

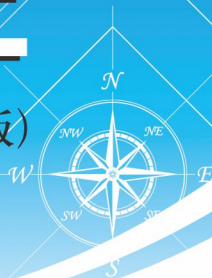


“十四五” 职业教育江苏省规划教材
“十三五” 江苏省高等学校重点教材

“十四五” 江苏省职业教育第二批在线精品课程配套教材

钢结构与施工

(第四版)



◎主编 束必清 张 军 李 晨



扫码查看省精品课程、在线题库、视频、标准规范等资源
可用于成人教育、开放教育及建筑企业职工继续教育



南京大学出版社



“十四五”职业教育江苏省规划教材
“十三五”江苏省高等学校重点教材

“十四五”江苏省职业教育第二批在线精品课程配套教材

钢结构与施工

(第四版)

主 编 束必清 张 军 李 晨
副主编 符 想 张雪雯 智日忠
参 编 赵聪聪 陶玉鹏 杜姚姚 顾维扬
主 审 张苏俊



南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

钢结构与施工 / 束必清, 张军, 李晨主编. -- 4 版.
南京: 南京大学出版社, 2026. 8. -- ISBN 978-7-305-
- 30361-6

I. TU758.11

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 202649K7B8 号

出版发行 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号 邮编 210093
书 名 钢结构与施工
GANGJIEGOU YU SHIGONG
主 编 束必清 张 军 李 晨
责任编辑 朱彦霖 编辑热线 025-83597482

照 排 南京开卷文化传媒有限公司
印 刷 南京凯德印刷有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16 印张 21 字数 538 千
版 次 2026 年 8 月第 4 版 2026 年 8 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-305-30361-6
定 价 59.80 元

网 址: <http://www.njupco.com>

官方微博: <http://weibo.com/njupco>

微信服务号: NJUYUNSHU

销售咨询热线: (025)83594756

* 版权所有, 侵权必究

* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购
图书销售部门联系调换

第四版前言

本书主要为配合高职建筑工程类专业的学生学习钢结构设计计算与施工而编著,根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)、《钢结构工程施工规范》(GB 50755—2012)和《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205—2020)和新颁布的有关规范、多年教学体会和工程实践经验编写,共有 10 个学习情境:钢结构认识、钢结构材料的选择、钢结构连接设计、钢结构构件设计、钢结构识图、钢结构拆图、钢结构加工制作、钢结构安装、钢结构涂装工程和钢结构施工质量检验,可作为大中专院校全日制教育、成人学校学历继续教育以及高等教育自学考试的教学用书。

随着中国工业化进程的进一步加速、人口老龄化的进一步加剧,国家对建筑工程提出装配式和绿色节能的要求。最近几十年,中国钢铁工业得到了迅速发展,钢产量一直位列世界首位,钢材的品种、质量亦有了极大提高;同时,钢结构建筑本身就一直属于装配式建筑,钢结构构件可以重复使用或再次冶炼成钢材,具有其他材料无可比拟的优势。以上因素均为钢结构的发展提供了充分、必要条件。

本书在前期使用过程中,获得了国内多所职业院校的一致好评;教材中存在的一些缺点和不妥之处得到了广大读者指正。根据《国家职业教育改革实施方案》(国发〔2019〕4 号)关于教材改革的需要,基于钢结构相关规范的更新、广大读者的指正,本次的修订是在第 3 版教材项目过程系统化编排章节的基础上,以知识点碎片化为引导,各章节按照校企合作开发、工作手册式教材的思路进行编写,以学生为本,在每个学习情境最前面增加“工程常用知识速查”,配套开发在线开放课程、教案、课件、知识点习题、现场视频、现场实物照片等信息化资源,使教材更加情景化、动态化、形象化,形成立体化教材,使教材具备动态、共享的课程教材资源库,同时通过插入中央电视台超级工程、辉煌中

国、为中国而设计、开讲啦等节目的优质资源,配套设置了相应的课程思政元素。

本书为“十四五”职业教育江苏省规划教材,“十三五”江苏省高等学校重点教材,是国家现代学徒制试点专业核心课程、江苏省骨干专业核心课程、江苏省示范校重点建设专业核心课程、江苏省中外合作办学示范性项目重点建设课程的配套教材,适用于高职高专土建施工类学生选用学习,也可作为高教自考、电大函授、专业培训和工程建设和管理人员的学习参考书。

本书由扬州工业职业技术学院张苏俊担任主审;扬州工业职业技术学院束必清、张军、李晨担任主编;扬州工业职业技术学院符想、张雪雯,江苏扬建集团有限公司智日忠担任副主编;扬州工业职业技术学院陶玉鹏、杜姚姚,中国建筑节能协会赵聪聪、扬州市邗江区住建局顾维扬参与了本书的编写工作;中联世纪建设集团有限公司顾浩斌、江苏牧羊集团有限公司王远建、杭州先闻信息技术有限公司左权胜等企业专家对本书的编写工作提供了专业技术指导。本书参考和引用了已公开的有关文献和资料,为此谨对所有文献的作者和曾关心、支持本书的同志们深表谢意。

限于编者水平有限,时间仓促,书中难免存在缺点和不足之处,敬请广大读者批评指正!

联系邮箱:baishi1226@126.com。

编 者
2026 年 6 月



扫码查看江苏省
在线精品课程

目 录

学习情景 1 钢结构的认识 / 001

- 1.1 钢结构发展史 / 003
- 1.2 钢结构的特点 / 009
- 1.3 钢结构的结构体系和应用范围 / 010
- 1.4 钢结构的应用前景 / 013
- 习题与思考题 / 014

学习情景 2 钢结构材料的选择 / 015

- 2.1 钢材的性能 / 017
- 2.2 钢材的命名规则 / 027
- 2.3 建筑钢材的种类、规格 / 027
- 2.4 建筑型钢表示方法 / 028
- 2.5 建筑钢材的选择 / 031
- 习题与思考题 / 032

学习情景 3 钢结构连接设计 / 033

- 3.1 钢结构连接的种类 / 036
- 3.2 焊缝连接常识及标注方法 / 037
- 3.3 对接焊缝连接 / 042
- 3.4 角焊缝连接 / 047
- 3.5 螺栓连接的常识 / 059
- 3.6 普通螺栓连接 / 061



3.7 高强螺栓连接的设计 / 073

习题与思考题 / 080

学习情景 4 钢结构构件设计 / 084

4.1 钢结构构件的基本构造要求 / 086

4.2 轴心受力构件的设计 / 086

4.3 受弯构件的设计 / 110

4.4 偏心受力构件的设计 / 130

习题与思考题 / 138

学习情景 5 钢结构识图 / 143

5.1 看图的一般方法和步骤 / 145

5.2 钢结构构件的符号 / 147

5.3 节点详图的识读 / 148

5.4 门式刚架的识图 / 156

5.5 重钢结构认识 / 174

习题与思考题 / 176

学习情景 6 钢结构拆图 / 177

6.1 门刚拆图工具的安装 / 179

6.2 参数输入类型 / 181

6.3 简识模块参数操作界面 / 183

学习情景 7 钢结构加工制作 / 201

7.1 钢结构加工制作前的准备工作 / 203

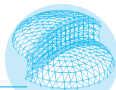
7.2 钢结构加工制作的工序 / 211

7.3 成品检验、管理和包装 / 232

习题与思考题 / 236

学习情景 8 钢结构安装 / 237

8.1 钢结构安装前的准备工作 / 239



- 8.2 单层钢结构的安装 / 242
- 8.3 多高层钢框架结构的安装 / 247
- 8.4 钢网架结构的安装 / 250
- 8.5 围护结构的安装 / 253
- 8.6 钢结构安装注意事项 / 271
- 习题与思考题 / 273

学习情景 9 钢结构的涂装工程 / 274

- 9.1 钢结构防腐涂料的涂装 / 276
- 9.2 钢结构防火涂料的涂装 / 285
- 习题与思考题 / 298

学习情景 10 钢结构施工质量检验 / 299

- 10.1 概 述 / 300
- 10.2 钢结构工程施工质量验收程序和组织 / 301
- 10.3 钢结构工程施工质量验收的划分 / 302
- 10.4 检验批及分项工程的验收 / 303
- 10.5 钢结构焊接工程验收 / 305
- 10.6 紧固件连接工程验收 / 307
- 10.7 钢结构验收资料 / 309
- 习题与思考题 / 309

附 录 / 310

- 附录 1 钢材和连接的强度设计值 / 310
- 附录 2 受弯构件的挠度容许值 / 313
- 附录 3 常用型钢规格及截面特性 / 314

参考文献 / 326

南京大学出版社
版权所有

学习情景 1

钢结构的认识



知识目标

1. 了解钢结构的基本概念及其在工程中的应用。
2. 掌握钢结构的发展历史,特别是中国古代和近代的冶铁技术及钢结构的发展阶段。
3. 理解钢结构的特点,包括轻质高强、材质均匀、塑性韧性好、制作安装简便等。
4. 熟悉钢结构的结构体系及其应用范围,如门式刚架、排架、框架、桁架、网架等。
5. 了解钢结构的应用前景及其在绿色建筑中的重要性。



能力目标

1. 能够识别不同类型的钢结构及其应用场景。
2. 能够分析钢结构在不同工程中的优势和局限性。
3. 能够根据工程需求选择合适的钢结构体系。
4. 能够理解并应用钢结构设计标准和技术规范。
5. 能够评估钢结构在绿色建筑中的应用潜力。



素质(思政教育)目标

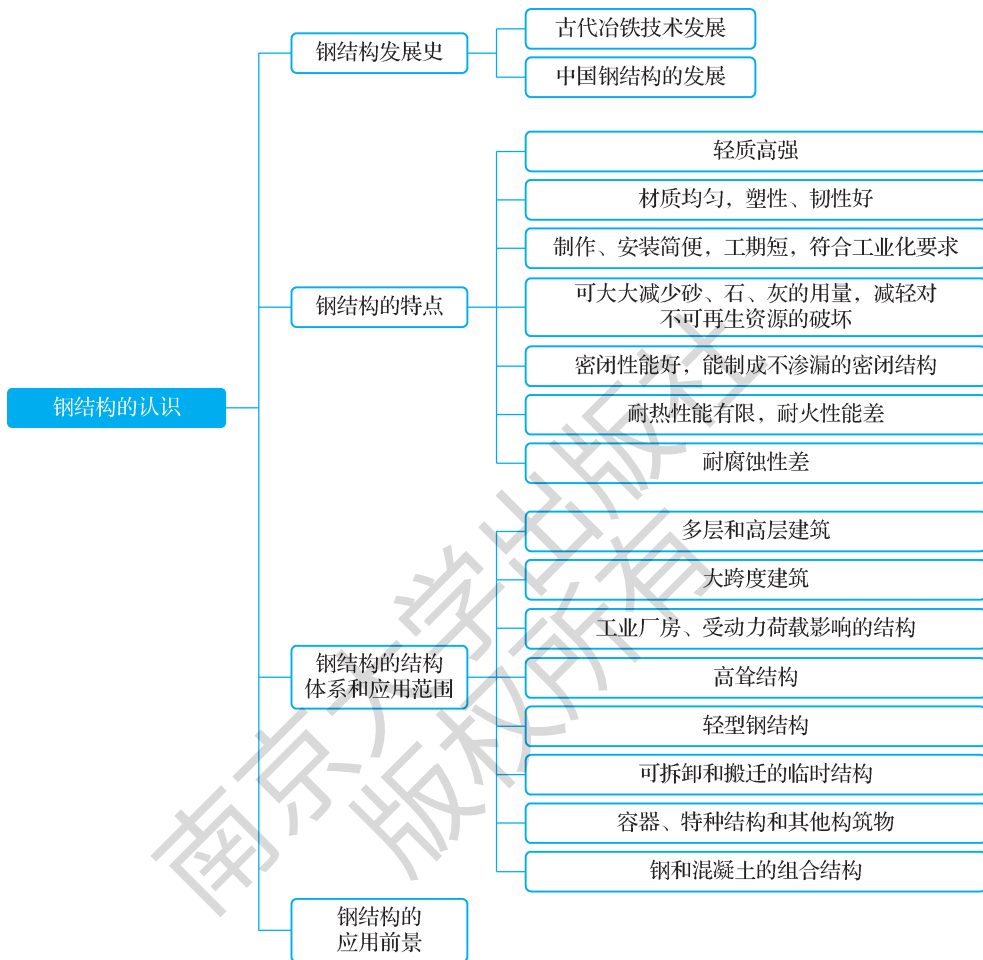
1. 培养学生的工程伦理意识,理解钢结构在可持续发展中的重要性。
2. 增强学生的文化自信,了解中国古代冶铁技术对世界冶炼技术的贡献。
3. 培养学生的创新意识,鼓励学生在钢结构设计和应用中提出创新解决方案。
4. 增强学生的环保意识,理解钢结构在减少建筑垃圾和节约资源方面的优势。
5. 培养学生的团队合作精神,通过小组讨论和项目合作,提升学生的沟通与协作能力。



课程思政

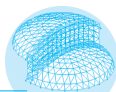


思维导图



工程常用知识速查

1. 钢结构是指钢材经设计、加工形成各种基本构件, 然后将这些基本构件按一定的组合方式通过焊接或螺栓等连接形式组成的工程结构形式。
2. 中国古代冶铁技术经历了块炼铁(海绵铁)→熟铁渗碳→百炼钢→炒钢→灌钢→苏钢(生铁浇淋)几个阶段。
3. 中国古代钢结构主要应用于建造铁链桥和铁塔。
4. 近代中国钢结构发展经历了三个阶段: 萌芽期(1890—1978 年)、逐步发展期(1978—2008 年)和高速发展期(2008 年—)。
5. 钢结构的特点: 轻质高强, 材质均匀、塑性韧性好, 制作安装简便、符合工业化, 减少砂石灰用量、降低对不可再生资源破坏, 密闭性能好、能制成密闭结构, 耐热性好、耐火性差, 耐腐蚀性差。



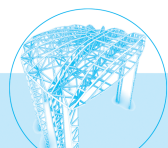
6. 较为常用的钢结构结构体系有:门式刚架、排架、框架、桁架和网架。

7. 钢结构的应用范围主要有:多高层建筑,大跨度建筑,工业厂房、受动力荷载影响的结构,高耸结构,轻型钢结构,可拆卸和搬迁的临时结构,容器、特种结构和其他构筑物,钢和混凝土的组合结构。

在日常生活中,大家接触到很多钢结构建筑,比如学校体育馆和车站的大跨度屋顶、工业厂房里面带吊车的厂房,对钢结构建筑都有一个直观的印象,那么具体什么叫作钢结构呢?

钢结构是指钢材(钢板和型钢)经过设计、加工,形成各种基本构件,如拉杆(有时还包括钢索)、压杆、梁、柱及桁架等,然后将这些基本构件按一定的方式通过焊接和螺栓等方式连接组成的工程结构形式。

人类探索钢结构的历史悠远绵长,钢结构的横空出世创造了工程史上的奇迹,在全世界范围内留下了坚实的印记,虽经岁月流逝,仍然历久弥新。



1.1 钢结构发展史

铁根据含碳量的不同进行分类,一般含碳量小于 0.02% 叫熟铁、含碳量 0.02%~2.21% 叫钢、含碳量 2.21%~6.69% 叫生铁(又称铸铁)。其中含碳量 0.02%~0.25% 叫低碳钢、含碳量 0.25%~0.6% 叫中碳钢、含碳量 0.6%~2.21% 叫高碳钢。在合理范围内,含碳量越高,铁越硬越脆,抗压强度越高但塑性越差。



钢结构发展史

钢(steel)是铁碳合金,人类采用钢结构的历史和炼铁、炼钢技术的发展是密不可分的。钢结构的发展,基于冶铁技术的发展。

1.1.1 古代冶铁技术发展

早期人类冶炼技术不够发达,无法从铁矿石中冶炼出铁,在人工冶铁技术出现之前,世界上许多民族都曾有过使用过陨铁制器的历史。例如在尼罗河流域(Nile River 长 6670 公里,是世界上最长的河流,流经非洲东部坦桑尼亚、卢旺达注入非洲维多利亚湖,向北流入乌干达、苏丹,经埃及首都进入尼罗河三角洲,注入地中海东端)和幼发拉底流域(Euphrates 为西南亚最大河流,大体上流向东南,发源于土耳其和亚美尼亚,流经叙利亚和伊拉克,最后与底格里斯河合流成为阿拉伯海,注入波斯湾)出土的公元前 2000 多年的铁珠和匕首,是目前所发现的世界最早的陨铁制器;目前中国发现最早的陨铁制器是中国河北省石家庄市藁城区台西村商代遗址中出土的公元前 14 世纪的铁刃铜钺。

人类最早使用的铁就是陨铁,但陨铁只是一种含铁量较大的陨星,或者说是一种天然铁,陨铁制器与人工冶铁的发明并没有必然的联系。

1. 西方古代冶铁技术发展

公元前 2000—公元前 1400 年左右,赫梯人(Hittites)生活的小亚细亚(亚洲最西段之半

岛,北临黑海,南滨地中海)地区铁矿较多,他们在向熔炉中投入铜矿石炼铜时(铜的熔点为 1083.4°C),有时会混杂进去一些铁矿石,在冶炼过程中,矿石中的铁便被高温熔炉中的一氧化碳还原出来。由于当时熔炉温度不够高(大约 1100°C 左右),低于铁的熔点 1538°C ,所以还原出的铁是固态铁块,这种固态铁块不会与溶化的铜混在一起,很容易区别,这也就是人类最早冶炼出的“块炼铁”。于是世界上最早的人工冶铁技术便宣告诞生。

由于疏松多孔,块炼铁也常被称为“海绵铁”。海绵铁属于熟铁,含碳量低,质地较软,使用受限制较多。

公元前1370年左右,赫梯人采用木炭燃烧冶铁过程中,发现当木炭较多、不完全燃烧的情况下,海绵铁的硬度较大,从此赫梯人发明了熟铁渗碳技术,即覆盖木炭进行闷烧,使得一些未燃烧的一氧化碳经过反应,最终成了渗碳过程,局部地补充海绵铁的含碳量,得到了比熟铁坚硬的表层渗碳钢(铁的莫氏硬度4~5、铜的莫氏硬度2.5~3)。

冶铁技术发明之后,赫梯国王严禁冶铁技术外传并禁止任何铁器出口,使其在公元前2000年—公元前1200年达到强盛。

公元前1200年—公元前1000年左右,随着赫梯国王的衰败,赫梯工匠四处移民,冶铁技术传入两河流域、古埃及和欧洲部分地区。

公元前900—公元前700年,埃及人掌握了淬火技术。从约公元前800年起,铁在中欧被越来越广泛地用于制作武器和工具。约公元前400年左右,欧洲制铁业的中心转移到西欧的凯尔特人领地(英国、法国)和西班牙地区。

从公元300年开始,欧洲冶铁业的产量开始下降。整个中世纪,块炼铁炉、科西嘉炉、加泰罗尼亚炉以及上法吹炼炉等新旧炉型和各式冶炼技术共存,西方冶铁业发展不均衡。

自16世纪开始,欧洲范围内逐步开始推广冶金机械化。

2. 中国古代冶铁技术发展

中国开始和使用铁器的年代,目前尚无定论。目前根据考古发现,中国古代冶铁技术发展与各朝代的关系如表1-1所示。

考古发现,人工冶炼的最早铁器属于春秋时期(公元前770年—公元前476年),这一时期多数属于固态的“海绵铁”。

战国时期(公元前475年—公元前221年),掌握了熟铁渗碳技术及淬火工艺,大大提高了铁器的实用性,为战国中后期的铁器大量应用于军事和农业生产创造了技术条件,铁器逐渐盛行,正式替代铜器。公元前400年,中国水力驱动鼓风炉炉温已达到 1530°C ,可冶炼出液态生铁,液态生铁可直接浇铸成器。

西汉时期(公元前202年—公元9年),“百炼钢”的技术兴起,使钢的质量较前提高。初级阶段的百炼钢是在战国晚期块炼渗碳钢的基础上直接发展起来的,二者所用原料和渗碳方法都相同;但不同的是增多了反复加热锻打的次数。锻打不仅起着加工成型的作用,同时使夹杂物减少、细化和均匀化,使晶粒细化的作用,显著地提高了钢的质量。

西汉中期以后,出现了炒钢。块炼铁虽然能制造渗碳钢,但效率很低,渗碳钢产量不大,不能适应当时封建社会生产发展的需要,同时生铁的产量已相当大,供不应求的矛盾促使出现了新工艺。东汉时期(公元25年—公元220年),一把名钢剑的价钱可购买当时供1人吃19年外加3个月的粮食;三国时期(220年—280年),曹操命有司(指主管某部门的官吏)制作宝刀5把,花了3年时间。

表 1-1 中国古代冶铁技术发展

代表建筑/人物		中国历史朝代发展时期	冶铁技术发展情况	
浙江余姚河姆渡建筑遗址		上古 (约 170 万年前—公元前 21 世纪初)	铜 ↓ 陨铁 ↓ 海绵铁 ↓ 熟铁渗碳 ↓ 百炼钢 炒钢 ↓ 灌钢 ↓ 苏钢	中国已经开始使用铜器。西方使用陨铁。
河南偃师二里头遗址		夏 (约公元前 2070—前 1600 年)		欧洲赫梯人冶炼出海绵铁。
		商 (公元前 1600 年—前 1046 年)		欧洲赫梯人发明了熟铁渗碳技术,但由于开放性和包容性较差,发展较慢。中国使用陨铁,如铁刃铜钺。
周公旦		西周 (约公元前 1046 年—前 771 年)		埃及人掌握了淬火技术,中欧掌握冶铁技术。
鲁班		春秋 (公元前 770 年—前 476 年)		中国开始冶炼海绵铁,生产力快速发展,奴隶社会逐渐瓦解,封建社会逐步形成。
李冰		战国 (公元前 475 年—前 221 年)		中国掌握了熟铁渗碳技术。英、法、西班牙成为欧洲制铁业中心。
		秦 (公元前 221 年—前 206 年)		
阳城延		西汉 (公元前 202 年—9 年)		中国掌握了百炼钢技术,进而生产炒钢。
		东汉 (公元 25 年—220 年)		
		三国 (公元 220 年—280 年)		
		西晋 (公元 265 年—316 年)	灌钢	
		东晋 (公元 317 年—420 年)		
		五胡十六国 (公元 304 年—439 年)		
綦毋怀文		南朝 (公元 420 年—589 年)		綦毋怀文,中国佛塔建造技术先驱,发明了灌钢法,采用双液淬火法冶铁,解决了当时全球熟铁低温冶炼时钢铁不能熔化,铁和渣不易分离,碳不能迅速渗入的难题,为世界冶炼技术发展做出划时代贡献,使中国的炼钢技术在 17 世纪以前长期居于世界领先地位,受到各国普遍赞扬。
		宋 齐 梁 陈		
		北朝 (公元 386 年—581 年)		
		北魏 东魏→北齐 西魏→北周		
宇文恺		隋 (公元 581 年—618 年)		
		唐 (公元 618 年—907 年)		
		五代 (公元 907 年—960 年)		
		十国 (公元 902 年—979 年)		
李诫		北宋 (公元 960 年—1127 年)	苏钢	
		辽 (公元 907 年—1125 年)		
		西夏 (公元 1038 年—1227 年)		
		南宋 (公元 1127 年—1279 年)		
		金 (公元 1115 年—1234 年)		
		元 (公元 1271 年—1368 年)		
计成或蒯祥		明 (公元 1368 年—1644 年)		采用生铁浇淋法治铁,为江苏工匠始创,又称之为“苏钢”。冶铁技术向北欧发展。
雷发达		清 (公元 1636 年—1912 年)		苏钢开始兴盛。
梁思成		近现代		采用喷吹的高炉炼铁技术,氧气顶吹转炉炼钢技术。



炒钢是将生铁炒到半液体半固体状态,加入铁矿粉进行搅拌,利用铁矿粉和空气中的氧进行脱碳,借以达到需要的含碳量,再反复热锻,打成钢制品。利用这种新工艺炼钢,既省去了繁难的渗碳工序,又能使钢的组织更加均匀,消除了由块炼铁带来的严重影响性能的夹杂物,使质量大大提高;是炼钢史上的一次飞跃发展,也是一次重大的技术革新。同时,百炼钢的原料也由原来的块炼铁,发展到用炒钢为原料,使钢的质量也随之大大提高,**百炼钢至此发展到成熟阶段**。

两晋南北朝时期(265年—589年),出现了以灌钢为主的炼钢技术[初始形式大约出现于东汉末年,南北朝时期著名冶金家綦毋怀文(今河北省邢台市沙河市人)对其进行了重大改进和完善]。百炼钢虽然是汉代风行一时的炼钢工艺,但固体渗碳工序费工费时;而在炒钢过程中控制钢的含碳量则是一个复杂的工艺,比较难以掌握控制。生产的发展,必然要求进一步发展工艺简单、保证质量而成本较低的炼钢方法。

灌钢技术是先将生铁炒成熟铁,然后同生铁一起加热,由于生铁的熔点低,易于熔化,待生铁熔化后,它便“灌”入熟铁中,使熟铁增碳而得到钢。只要配好生熟铁用量的比例,就能比较准确地控制钢中含碳水平,再经过反复锻打,就可以得到质地均匀的钢材。采用**双液淬火法**进行淬火,在温度较高时($650\sim 400^{\circ}\text{C}$),选用冷却速度较快的动物尿(尿中含盐)淬火,以保证工件的硬度;在温度较低时($300\sim 200^{\circ}\text{C}$),选用冷却速度较慢的动物油(高温冷却快而低温冷却慢)淬火,以防止工件开裂和变形,使其有一定的韧性。这种方法比较容易掌握,工效提高较大,因此南北朝以后成为主要炼钢方法。

17世纪之前,世界各国一般都是采取熟铁低温冶炼的办法,钢铁不能熔化,铁和渣不易分离,碳不能迅速渗入。**中国发明的灌钢法,成功解决这一难题,为世界冶炼技术的发展做出划时代贡献,使得中国的炼钢技术在17世纪以前长期居于世界领先地位,受到各国普遍赞扬。**

唐朝(618年—907年)、宋朝(960年—1279年)、元朝(1271年—1368年),灌钢技术成为主要的炼钢方法之一。

明朝(1368年—1644年),灌钢的冶炼方法基本一样,但操作略有不同。明代锻制生产工具时,采用了**“生铁淋口”**的方法,这种方法是利用熔化的生铁,作为熟铁的渗碳剂,使这种熟铁的刀口炼成钢铁。这一创造性的技术成就,现在应用于一些小农具的生产上面。

明代中期产生了**生铁浇淋法**,清朝时期(1636年—1911年)在安徽芜湖、湖南湘潭等地较兴盛,因传为江苏工匠始创,又称之为**“苏钢”**。

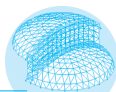
生铁浇淋法是在灌钢基础上发展起来的,在炼钢方面,把炼铁炉流出的铁水直接流进炒铁炉里炒成熟铁,在钢铁冶炼史上实现了半连续性系统,减少了再熔化的过程。

1.1.2 中国钢结构的发展

1. 古代钢结构的发展

中国古代钢结构主要应用于建造铁链桥和铁塔。

公元65年(汉明帝时代),中国已成功地用锻铁(wrought iron)为环,相扣成链,建成了世界上最早的铁链悬桥——**兰津桥,比欧洲早70余年**。此后,为了便利交通、跨越深谷,陆续建造了数十座铁链桥,其中1705年建成的**四川泸定大渡河桥**跨度最大,桥宽2.8 m,跨长100 m,由9根桥面铁链和4根桥栏铁链构成,两端系于直径20 cm、长4 m的生铁铸成的锚



桩上;该桥比美洲 1801 年才建造的跨长 23 m 的铁索桥早近百年,比号称世界最早的英格兰 30 m 跨铸铁(cast iron)拱桥也早 74 年。

除铁链悬桥外,中国古代还建有许多铁塔建筑物。公元 256 年(三国时期),镇江市北固山建成九级八面甘露寺铁塔(塔基三尺半有地宫),因明代海啸倾塌仅遗存有最下 3 层。公元 694 年(唐朝),河南省洛阳市建成的直径 3.6 m、高 30 m 天枢,用于歌颂武则天功德,寓意“天下中枢”,顶有直径为 11.3 m 的“腾云承露盘”,底部有直径约 16.7 m 用来保持天枢稳定的“铁山”,相当符合力学原理;武则天死后,唐玄宗废天枢,取铜铁以被军需。公元 1049 年(北宋),河南省开封市建成八角十三层、高 55.88 米的开封铁塔,历时 900 多年仍然巍然屹立。公元 1061 年(宋朝),湖北省宜昌市当阳市建成八角十三层、高 17.9 米的荆州玉泉寺铁塔,目前依然存在,与浙江天台国清寺、山东长清灵严寺、江苏南京栖霞寺并称为“天下四绝”。

所有这些都表明,中华民族对铁结构的应用,曾经居于世界领先地位。

2. 近代钢结构的发展

近代,清政府盲目自大,闭关锁国切断了与外界的交流,导致钢产量持续下跌,束缚了生产力的发展,钢材在建筑业的应用发展缓慢;1840 年鸦片战争以后,更沦为半封建半殖民地国家,经济凋敝,工业落后,古代在铁结构方面的技术优势早已丧失殆尽。近代中国钢结构发展经历了三个阶段:

(1) 萌芽期(1890—1978 年)

1890 年,时任湖广总督张之洞(1837 年—1909 年,晚清名臣,生于贵州省黔西南布依族苗族自治州安龙县)创办了中国近代最早的官办钢铁企业——汉阳铁厂(位于湖北省武汉市龟山,1893 年投产),是当时中国第一家,也是最大的钢铁联合企业,年产钢只有 0.85 万吨。从此,中国钢铁工业蹒跚起步,被西方视为中国觉醒的标志。

日本帝国主义侵略中国期间(1931 年 9 月 18 日—1945 年 8 月 15 日),在东北的鞍山、本溪建设了几个钢铁企业,疯狂掠夺中国的宝贵资源。1943 年是中国历史上钢铁产量最高的一年,生产生铁 180 万吨,钢 90 万吨,绝大部分是在东北生产的。这些钢铁很少用于建设,大部分被日本帝国主义用于反动的侵略战争。

1934 年,钱塘江大桥开始建设,1937 年建成通车,是中国浙江省杭州市境的一座跨钱塘江双层桁架梁桥,由中国桥梁专家茅以升主持设计,是中国自行设计、建造的第一座双层铁路、公路两用桥。1937 年 12 月 23 日为阻断侵华日军南下而炸毁,1948 年 5 月成功修复,2006 年 5 月被列为中国第六批“全国重点文物保护单位”。

1949 年 10 月 1 日下午 2 时,新中国成立。随着经济建设的发展,钢结构曾起过重要作用,如第一个五年计划期间,建设了一大批钢结构厂房、桥梁。但由于受到钢产量的制约,在其后的很长一段时间内,钢结构被限制使用在其他结构不能代替的重大工程项目中,在一定程度上,影响了钢结构的发展。

在萌芽期,中国钢铁工业基础薄弱,钢结构建筑和桥梁总体上较少。

(2) 逐步发展期(1978—2008 年)

1978 年,中国实行改革开放政策,经济建设获得了飞速的发展,钢产量逐年增加。

从 1996 年超过 1 亿吨开始,中国钢产量一直位列世界钢产量的首位;2003 年更达到创纪录的 2.2 亿吨,逐步改变着钢材供不应求的局面。中国的钢结构技术政策,也从“限制使

用”改为积极合理地推广应用。

钢结构市场随着改革开放经济社会的发展和民众文化知识的普遍提高而日益剧增。中国的钢结构产业得到了长足的发展,钢结构企业数量不断增多,规模不断增大,许多大企业纷纷开始意识到并且对钢结构企业进行一定的投资,外国著名钢结构厂商也纷纷打入中国市场。在多年工程实践和科学研究的基础之上,中国《钢结构设计标准》GB 50017—1988 和《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—1975)也已发布实施。

以上发展为钢结构在中国的快速发展创造了条件。中国 1985 年建成了高 160 米的深圳国贸大厦(地下 3 层地上 53 层)、1990 年建成了高 209 米的北京京广中心(地下 3 层地上 52 层)、1996 年建成高 383.95 米的深圳地王大厦(地下 4 层地上 69 层)、1997 年建成高 420.5 米的上海金茂大厦(地下 3 层地上 88 层)、2007 年建成高 330 米北京国贸三期(地下 4 层地上 74 层)。

1994 年,深圳地王大厦动工,1996 年竣工验收,1997 年营业,位于深圳市罗湖区,总建筑面积为 26.7 万平方米,地下 4 层地上 69 层,高度 383.95 米,建筑方案由美国华人建筑设计师张国言设计,采用钢—混凝土混合结构(钢框架—钢筋混凝土核心筒)技术,主体钢柱采用钢管混凝土柱(钢管内填充混凝土)以减小柱截面的办法,增加了结构强度。中建三局一公司承接了地王大厦钢结构安装工程,创造了“两天半一个结构层”的“新深圳速度”,竣工时为当时中国最高的建筑物。

1994 年,上海金茂大厦动工,1997 年封顶,1999 年营业,位于上海市浦东新区,总建筑面积 29 万平方米,地下 3 层地上 88 层,高度 420.5 米,由美国芝加哥 SOM 设计事务所设计规划,由 Adrian Smith 主创设计,上海现代建筑设计有限公司配合设计,采用高强度混凝土与钢结构混合结构。土建由上海市第一建筑公司主承包,钢结构由日本新日铁制作承包,上海机械施工公司总管理和现场吊装,外围玻璃幕墙由德国格特纳公司承包。该建筑是中国首栋突破 400 米高的建筑,为 20 世纪中国高层建筑的代表作,2020 年入选 2019 上海新十大地标建筑。

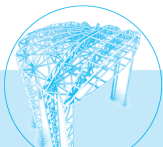
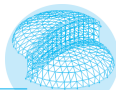
(3) 高速发展期(2008 年—)

2008—至今,钢结构产量年增长率超过 10%,2018 年中国钢产量突破 9 亿吨。钢结构工程快速发展,陆续建成了奥运会主场馆、中央电视台新台址、上海环球金融中心、上海中心等一大批高、大、精、尖的钢结构建筑。

传统的空间结构如网架、网壳等继续得到大力推广;新型空间结构开始得到广泛的应用,如张弦梁、张弦桁架、弦支穹顶等。上海浦东机场、哈尔滨会展中心、上海会展中心、广东会展中心等都采用了世界上极少见的超过 100 米张弦桁架;运动会、博览会场馆加大了采用空间结构的力度,如:2008 年北京奥运会新建的 37 个场馆,2009 年山东济南全运会场馆,2010 年上海世博会及广州亚运会场馆,2011 年深圳大运会场馆。

2008 年 5 月 12 日,中国四川省发生里氏 8.0 级特大地震,同年 8 月,中国举办了北京奥运会,新建的国家体育场(鸟巢)、国家游泳中心(水立方)、国家体育馆等场馆代表着中国钢结构的技术水平。

同年,杭州湾跨海大桥建成通车,沪宁城际铁路在南京开工。中国的钢结构发展步入了高速发展期。



1.2 钢结构的特点

在土木建筑工程中,除钢结构外,还有钢筋混凝土结构、砖石结构、木结构等。作工程规划时,要根据各类结构的特点,结合工程的具体情况来确定选用结构的类型,以便使工程设计经济合理。与其他结构相比,钢结构有如下特点:



钢结构的特点

1.2.1 轻质高强

钢材的容重虽然比钢筋混凝土、砖石及木材大,但因其强度更高,因此在承载力相同的条件下,钢结构的自重比其他结构要小。如使用热轧 H 型钢制作的钢结构与钢筋混凝土结构比较,自重可减轻 20%~30%(多层及高层钢结构住宅自重可减轻 30%~40%,大跨度钢结构自重可减轻 30%~50%)。另一方面,由于结构自重小,就可以承担更多的外加荷载,或具有更大的跨度;自重小也便于运输和吊装,例如,交通不便、取材困难的边远山区修建公路或输电工程时,常常考虑运输方便而选用钢桥或钢制输电线路塔架。

1.2.2 材质均匀,塑性、韧性好

钢材在冶炼和轧制过程中,质量受到严格的检验控制,因而材质比较均匀,质量比较稳定。钢材在弹性阶段近似各向同性,弹性工作范围大,因此它的实际工作情况与一般结构力学计算中采用的“材料为匀质各向同性体”的基本假定较为符合。

钢材破坏前要经受很大的塑性变形,能吸收和消耗很大的能量。因此,一般情况下不会因偶然局部超载而突然发生脆性破坏,对动力荷载的适应性强,抗震性能好。国内外大量的调查表明,地震后,各类结构中钢结构所受的损害最小。

1.2.3 制作、安装简便,工期短,符合工业化要求

组成钢结构的各个部件一般是在专业化的金属结构加工厂制造,然后运至现场,用焊接或螺栓进行拼接和吊装,因此加工精细,生产效率高,是工业化生产程度最高的一种结构。同时,钢结构也是施工现场工程量最小的一种结构,因而施工周期也最短。此外,钢结构工程主要是干作业,能改善施工环境,有利于文明施工。

1.2.4 可大大减少砂、石、灰的用量,减轻对不可再生资源的破坏

钢结构拆除后可回炉再生循环利用,有的还可以搬迁复用,可大大减少灰色建筑垃圾。因此,采用钢结构有利于保护环境、节约资源,被认为是环保产品。

与混凝土结构相比,钢结构是环保型、可再次利用的,也是易于产业化的结构,同时还有较好的综合经济指标。例如,因自重小,其地基基础费用相对较省;因构件截面相对较小,可增加有效使用面积;采用热轧 H 型钢的钢结构有效使用面积可增加 4%~6%;因施工快、工期短,可节省贷款利息并提前发挥使用效益;工程资料表明,1t 钢结构可减少 7t 混凝土用量,这样又可以节约能源。



1.2.5 密闭性能好,能制成不渗漏的密闭结构

钢材本身组织致密,当采用焊接、铆钉或螺栓连接时,易做到紧密不渗漏。因此钢材是制造容器,特别是高压容器、大型油库、气柜、输油管道的良好材料。

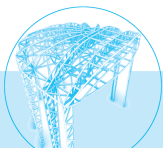
1.2.6 耐热性能有限,耐火性能差

钢材在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,抗拉强度略有提高,塑性降低(蓝脆现象);超过 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,钢材的强度及弹性模量开始显著下降;超过 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后下降加速;达到 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,钢材的屈服强度降至常温下的 $1/3$ 左右,基本丧失承载能力。另外,钢材导热性很好,局部受热(如发生火灾)也会迅速引起整个结构升温,危及结构安全。一般认为,当钢结构表面长期受高温辐射达 150°C 以上,或短时间内可能受到火焰作用,或可能受到炽热熔化金属喷溅,以及可能遭受火灾袭击时,就应采取有效的防护措施,如用耐火材料做成隔热层等。

1.2.7 耐腐蚀性差

据有关资料估算,有 $10\%\sim 12\%$ 的钢材损耗属于锈蚀损耗。低合金钢的抗锈能力比低碳钢好,其锈蚀速度比低碳钢慢。耐候钢抗锈最好,其抗锈能力高出一般钢材 $2\sim 4$ 倍。

钢材锈蚀会严重影响结构的使用寿命与安全性,因此钢结构必须根据用途和设计使用年限采取可靠的防腐蚀措施。涂装前钢材表面应按设计要求彻底除锈至规定等级,并涂覆防腐涂料或进行热浸镀锌等防护处理。此外,还应注意使结构经常处于清洁和干燥的环境中,保持通风良好,及时排除侵蚀性气体和湿气;选用的结构构件截面的形式及构造方式应有利于防锈;尽量避免出现难以检查、清洗和油漆之处,以及能积留湿气和大量灰尘的死角和凹槽,闭口截面构件应沿全长在端部焊接封闭;当采用热浸镀锌等工艺时,应按规定采取开孔防爆措施。平时应加强维护,及时进行清灰、清污工作,视涂装情况,每隔数年应重新油漆一次;必要时可采用耐候钢,如桥梁等露天结构。



1.3 钢结构的结构体系和应用范围

钢结构的结构体系有门式刚架、排架、框架、桁架(平面桁架、空间桁架)、网架、拱架和索等,较为常用的为门式刚架、排架、框架、桁架和网架。

随着我国国民经济的不断发展和科学技术的进步,将合适的结构体系应用于相应工程,钢结构在我国的应用范围也不断扩大。目前钢结构应用范围大致如下(图 1-1~1-6):

1.3.1 多层和高层建筑

由于钢结构的综合效益指标优良,近年来在多、高层民用建筑中也得到了广泛的应用。其结构形式主要有高层框架、框架—支撑结构、框筒、悬挂、巨型框架等。



钢结构结构体系



钢结构的应用范围

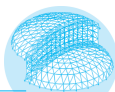


图 1-1 金茂大厦和环球金融中心



图 1-2 哈利法塔

1.3.2 大跨度建筑

结构跨度越大,自重在荷载中所占的比例就越大,减轻结构的自重会带来明显的经济效益。钢材强度高结构重量轻的优势正好适合于大跨结构,因此钢结构在大跨空间结构和大跨桥梁结构中得到了广泛的应用。所采用的结构形式有空间桁架、网架、网壳、悬索(包括斜拉体系)、张弦梁、实腹或格构式拱架和框架等。



图 1-3 上海八万人体育场

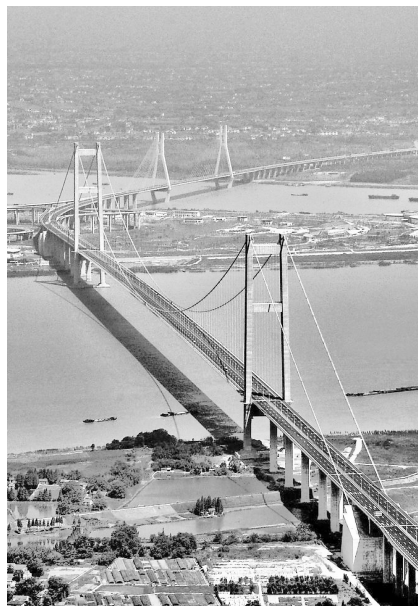


图 1-4 润扬长江大桥

1.3.3 工业厂房、受动力荷载影响的结构

由于钢材具有良好的韧性,设有较大锻锤或产生动力作用的其他设备的厂房,即使屋架跨度不大,也往往由钢制成。对于抗震能力要求高的结构,采用钢结构也是比较适宜的。

吊车起重量较大或者其工作较繁重的车间的主要承重骨架多采用钢结构。另外,有强烈辐射热的车间,也经常采用钢结构。

结构形式多为由钢屋架和阶形柱组成的门式刚架或排架,也有采用网架做屋盖的结构形式。

近年来,随着压型钢板等轻型屋面材料的采用,轻钢结构工业厂房得到了迅速的发展。其结构形式主要为实腹式变截面门式刚架。

1.3.4 高耸结构

高耸结构包括塔架和桅杆结构,如高压输电线路的塔架、广播、通信和电视发射用的塔架和桅杆、火箭(卫星)发射塔架等。

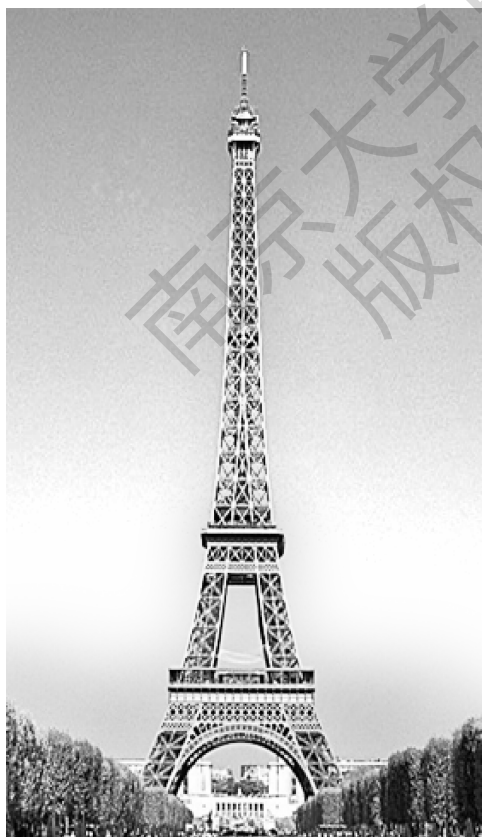
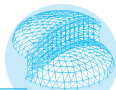


图 1-5 埃菲尔铁塔



图 1-6 东方明珠电视塔



1.3.5 轻型钢结构

钢结构重量轻不仅对大跨结构有利,对屋面活荷载特别轻的小跨结构也有优越性。因为当屋面活荷载特别轻时,小跨结构的自重也成为一个重要因素。

冷弯薄壁型钢屋架在一定条件下的用钢量可比钢筋混凝土屋架的用钢量还少。轻钢结构的结构形式有实腹变截面门式刚架、冷弯型钢结构(包括金属拱形波纹屋盖)、冷弯薄壁型钢体系以及钢管结构等。

1.3.6 可拆卸和搬迁的临时结构

钢结构不仅重量轻,还可以用螺栓或其他便于拆装的手段来连接,因此非常适用于需要搬迁的结构,如建筑工地、油田和需野外作业的生产和生活用房的骨架等。钢筋混凝土结构施工用的模板和支架,以及建筑施工用的脚手架等也大量采用钢材制作。

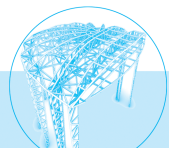
1.3.7 容器、特种结构和其他构筑物

冶金、石油、化工企业中大量采用钢板做成的容器结构,包括油罐、煤气罐、高炉、热风炉等。此外,经常使用的还有皮带通廊栈桥、管道支架、锅炉支架等其他钢构筑物,海上采油平台也大都采用钢结构。

1.3.8 钢和混凝土的组合结构

钢构件和板件受压时必须满足稳定性要求,往往不能充分发挥它的强度高的作用,而混凝土则最宜于受压不适于受拉,将钢材和混凝土并用,使两种材料都充分发挥它的长处,是一种很合理的结构。

近年来这种结构在我国获得了长足的发展,广泛应用于高层建筑(如深圳的赛格广场)、大跨桥梁、工业厂房和地铁站台柱等。主要构件形式有钢与混凝土组合梁和钢管混凝土柱等。



1.4 钢结构的应用前景

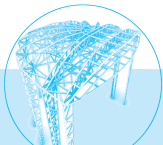
政策驱动是钢结构应用前景持续向好的首要动力。2025年9月,工业和信息化部会同自然资源部、生态环境部、商务部、市场监管总局五部门联合印发《钢铁行业稳增长工作方案(2025—2026年)》,明确提出积极推广钢结构在住宅、公共建筑、中小跨径桥梁等领域的应用,支持行业协会搭建上下游全产业链合作机制,鼓励有条件地区培育钢结构建筑产业园区和数字化供应链交易服务平台。“十五五”规划纲要进一步明确“促进装配式建筑规模化发展”,中国钢铁工业协会亦将钢结构建筑推广应用定位为拓展钢材应用空间的重点领域。与此同时,国务院《2030年前碳达峰行动方案》明确提出“大力发展装配式建筑,推广钢结构住宅”;2024年8月发布的《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》则要求在“十五五”时期实



施碳排放双控制度。国家层面已构建起“稳增长政策+碳达峰方案+装配式推广”的多维政策体系,为钢结构行业的规模化发展提供了坚实的制度保障。

从产业基础与发展目标来看,钢结构行业已具备相当规模且增长空间广阔。据中国钢结构协会统计,2024 年我国钢结构加工量达 1.09 亿吨,连续三年突破亿吨大关。根据《钢结构行业“十四五”规划及 2035 年远景目标》,到 2025 年底全国钢结构用量达到 1.4 亿吨左右,占粗钢产量比例 15% 以上,钢结构建筑占新建建筑面积比例达 15% 以上;到 2035 年,钢结构用量将跃升至每年 2.0 亿吨以上,占粗钢产量 25% 以上,钢结构建筑占新建建筑面积比例逐步迈向 40%。在应用领域方面,钢结构正从传统的超高层建筑、大型会展中心向住宅、中小跨径桥梁、市政基础设施等方向加速拓展;光伏支架、风电塔筒、储能设施等新能源基建需求亦显著增长,为行业开辟了极具潜力的新赛道。

绿色低碳转型则是钢结构应用前景的时代底色。钢结构作为一种可循环、高工业化程度的绿色建造方式,从全生命周期来看碳排放显著低于传统混凝土结构。在“双碳”目标驱动下,钢结构建筑正加速与绿色建材、智能技术深度融合。各地政策细化持续推进——广西提出力争形成钢结构设计、生产、施工、检测、维保、回收一体化完整产业链;上海发布钢结构模块化建筑技术导则;多地明确学校、医院等公共建筑优先采用钢结构。《钢结构装配式零碳建筑测评标准》(T/CABEE 134—2026)已于 2026 年 7 月实施。随着“十五五”时期装配式建筑规模化发展的深入推进,钢结构凭借其绿色低碳、抗震安全、施工高效等综合优势,必将迎来更加广阔的市场空间,成为推动建筑业转型升级与绿色低碳发展的重要力量。



习题与思考题

一、选择题

- 关于钢结构的特点叙述错误的是()。
 - 建筑钢材的塑性和韧性好
 - 钢材的耐腐蚀性很差
 - 钢材具有良好的耐热性和防火性
 - 钢结构更适合于建造高层和大跨结构
- 钢结构更适合于建造大跨结构,这是由于()。
 - 钢材具有良好的耐热性
 - 钢材具有良好的焊接性
 - 钢结构自重轻而承载力高
 - 钢结构的实际受力性能和力学计算结果最符合

二、思考讨论题

- 目前我国钢结构主要应用在哪些方面? 钢结构与其他结构相比有哪些优点?
- 钢结构的主要缺陷有哪两个?
- 通过收集查阅钢结构应用和发展方面的资料,谈谈你对钢结构应用和发展的看法。



答案扫一扫

学习情景 2

钢结构材料的选择



课程思政



知识目标

1. 掌握钢材的主要机械性能指标,包括强度、塑性、韧性、冷弯性能和可焊性。
2. 理解钢材的化学成分对其性能的影响,特别是碳、硅、锰、硫、磷等元素的作用。
3. 熟悉钢材的命名规则,能够根据钢材的牌号判断其强度、质量等级和脱氧方法。
4. 了解钢材的分类及其规格,掌握常见型钢的表示方法。
5. 掌握钢材选择的基本原则,能够根据结构的重要性、荷载情况、连接方法和工作环境选择合适的钢材。



能力目标

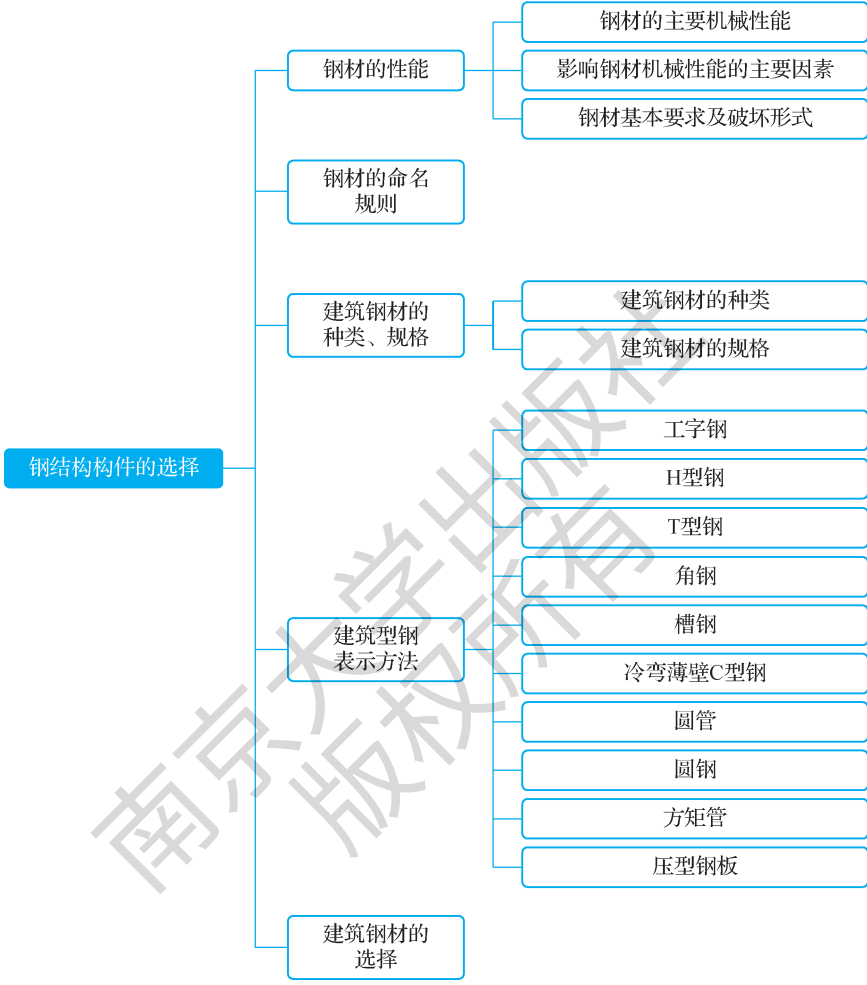
1. 能够根据工程需求选择合适的钢材,并能够解释选择的依据。
2. 能够识别和解释常见型钢的规格和表示方法。
3. 能够分析钢材的化学成分对其性能的影响,并能够根据不同的工作环境选择合适的钢材。
4. 能够根据钢材的命名规则,判断钢材的强度、质量等级和脱氧方法。



素质(思政教育)目标

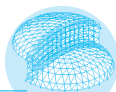
1. 能够根据工程需求选择合适的钢材,并能够解释选择的依据。
2. 能够识别和解释常见型钢的规格和表示方法。
3. 能够分析钢材的化学成分对其性能的影响,并能够根据不同的工作环境选择合适的钢材。
4. 能够根据钢材的命名规则,判断钢材的强度、质量等级和脱氧方法。

思维导图



工程常用知识速查

1. 钢材的主要机械性能主要包括强度(屈服强度、抗拉强度和弹性模量)和塑性(伸长率和断面收缩率)、冷弯性能(冷弯 180°无裂纹分层)、冲击韧性(冲击功)和可焊性(不产生裂纹、性能不降低);常说的钢材机械性能五项指标是指屈服强度、抗拉强度、伸长率 δ_5 、断面收缩率和冲击韧性。
2. 在一定的范围内,化学成分碳(C)、硅(Si)、锰(Mn)、钒(V)对钢材性能有利;硫(S)、磷(P)、氧(O)、氮(N)对钢材性能不利。
3. 根据脱氧情况,钢材可以分为:沸腾钢、半镇静钢、镇静钢、特殊镇静钢。
4. 冷作硬化是指应力超过屈服强度后卸载,再加载时提高了弹性极限,却牺牲了塑性。



5. 应力集中是指钢结构构件中存在的孔洞、槽口、凹角、裂缝、厚度变化、形状变化、内部缺陷等,使一些区域产生局部高峰应力的现象。

6. 低温冷脆是指当温度从常温下降时,塑性、韧性降低,下降到某一温度时冲击韧性突然下降很快,发生脆性破坏。

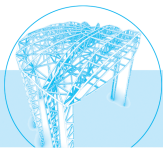
7. 钢材疲劳破坏是指在连续反复荷载(应力变化循环次数 $\geq 5 \times 10^4$)作用下,当应力低于抗拉强度甚至低于屈服强度便发生突然脆性断裂。

8. 现行《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)推荐使用的钢材有碳素结构钢(Q235)和低合金高强度结构钢(Q355、Q390、Q420、Q460)。

9. 钢材的破坏形式有塑性破坏和脆性破坏,脆性破坏在破坏前无明显变形,破坏突然发生,危险性大,应予以避免。

10. 熟悉钢材的命名规则,具体见“2.2 钢材的命名规则”,如常见的 Q235B 具体是什么含义。

11. 认识相关型钢规格的含义: $-600 \times 10 \times 3600$ 、I20a、 $H300 \times 200 \times 8 \times 14$ 、 $T220 \times 206 \times 15 \times 25$ 、 $L90 \times 8$ 、 $L125 \times 80 \times 8$ 、 $[10$ 、 $C100 \times 50 \times 15 \times 2.5$ 、 $D38 \times 3$ 、 $\phi 38 \times 3$ 、 $\phi 20$ 、 $\square 40 \times 25 \times 2$ 、 $F40 \times 25 \times 2$ 、 $J40 \times 25 \times 2$ / 箱 $40 \times 25 \times 2$ 、YX15 - 220 - 880 - 0.6。



2.1 钢材的性能

钢材品种很多,各自的性能、产品规格及用途都不相同。用于建筑的钢材,在性能方面要求具有较高的强度、较好的塑性及韧性,以及良好的加工性能。对于焊接结构还要求可焊性良好。在低温下工作的结构,要求钢材在低温下也能保持较好的韧性。在易受大气侵蚀的露天环境下或在有害介质侵蚀的环境下工作的结构,要求钢材具有较好的抗锈能力。

我国现行《钢结构设计标准》(以下简称《标准》)推荐采用 Q235、Q355、Q390 及 Q420 号钢材作为建筑结构使用钢材。其中 Q235 号钢材属于碳素结构钢中的低碳钢($C \leq 0.22\%$);而 Q355、Q390 及 Q420 都属于低合金高强度结构钢,这类钢材是在低碳钢基础上加入少量合金元素(如锰、硅、钒、铌等),含碳量通常控制在 0.20% 以下,与低碳钢相近甚至更低。由于增加了少量的合金元素,使材料的强度、冲击韧性、耐腐性能均有所提高,而塑性降低却不多,因此是性能优越的钢材。

2.1.1 钢材的主要机械性能

1. 强度和塑性

钢材的强度和塑性一般由常温静载下单向拉伸试验曲线表示。该试验是将钢材的标准试件放在拉伸试验机上,在常温下按规定的加荷速度逐渐施加拉力荷载,使试件逐渐伸长,直至拉断破坏,然后根据加载过程中所测得的数据画出其应力-应变曲线(即 $\sigma - \epsilon$ 曲线)。图2-1 是低碳钢在常温静载下的 $\sigma - \epsilon$ 单向拉伸曲线。图中



钢材的主要机械性能

纵坐标为应力(按试件变形前的截面积计算),横坐标为试件的应变 ϵ ($\epsilon = \Delta L / L$, L 为试件原有标距段长度,对于标准试件, L 取为试件直径的 5 倍, ΔL 为标距段的伸长量)。从这条曲线中可以看出钢材在单向受拉过程中有下列阶段:

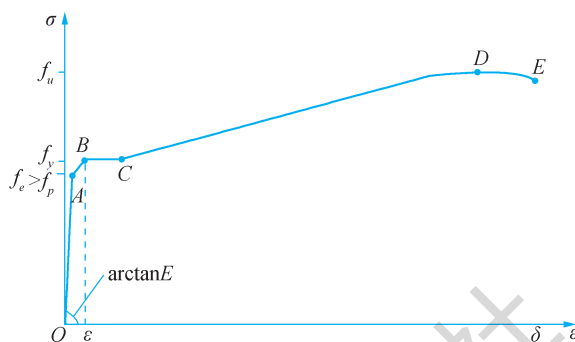


图 2-1 低碳钢拉伸曲线示意图

(1) 弹性阶段(曲线的 OA 段)

应力很小,不超过 A 点。这时如果试件卸荷, $\sigma - \epsilon$ 曲线将沿着原来的曲线下降,至应力为 0 时,应变也为 0,即没有残余的永久变形。这时钢材处于弹性工作阶段,A 点的应力称为钢材的弹性极限所对应的应力,所发生的变形(应变)称为弹性变形(应变)。实际上弹性阶段 OA 由一直线段及一曲线段组成,直线段从 O 开始到接近 A 点处终止,然后是一极短的曲线段到 A 点终止。直线段的应变随着应力增加成比例地增长,即应力-应变关系符合胡克定律,直线的斜率 $E = d_\sigma / d_\epsilon$,称为钢材的弹性模量。直线段终点处的应力称为钢材的比例极限 f_p ,由于 f_p 与弹性极限 f_e 十分接近,一般认为两者相同。《标准》取各类建筑钢材的弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。

(2) 弹塑性阶段(曲线的 AB 段)

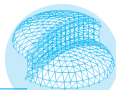
在这一阶段应力与应变不再保持直线变化而呈曲线关系。弹性模量亦由 A 点处 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 逐渐下降,至 B 点趋于 0。B 点应力称为钢材屈服点(或称屈服应力、屈服强度) f_y 。这时如果卸荷, $\sigma - \epsilon$ 曲线将从卸荷点开始沿着与 OA 平行的方向下降,至应力为 0 时,应变仍保持一定数值,称为塑性应变或残余应变。在这一阶段,试件既包括弹性变形(应变),也包括塑性变形(应变),因此 AB 段称为弹塑性阶段。其中弹性变形在卸荷后可以恢复,塑性变形在卸荷后仍旧保留,故塑性变形又称为永久变形。

(3) 屈服阶段(曲线的 BC 段)

低碳钢在应力达到屈服点 f_y 后,应力不再增加,应变却可以继续增加。应变由 B 点开始屈服时(上屈服点), $\epsilon_y \approx 0.15\% \sim 0.20\%$,屈服终了时(下屈服点对应的应变), ϵ 达到 $2.0\% \sim 3.0\%$ 左右,随后进入应变硬化阶段。这一阶段曲线保持水平,故又称为屈服台阶,在这一阶段钢材处于完全的塑性状态。对于材料厚度(直径)不大于 16 mm 的 Q235 号钢, $f_y \approx 235 \text{ N/mm}^2$ 。

(4) 应变硬化阶段(曲线的 CD 段)

钢材在屈服阶段经过很大的塑性变形,达到 C 点以后又恢复继续承载的能力, $\sigma - \epsilon$ 曲线又开始上升,直到应力达到 D 点的最大值,即抗拉强度 f_u 。这一阶段(CD 段)称为应变



硬化阶段。对于 Q235 号钢, f_u 为 $375 \sim 460 \text{ N/mm}^2$ 。

(5) 颈缩阶段(曲线的 DE 段)

试件应力达到抗拉强度 f_u 时, 试件中部截面变细, 形成颈缩现象。随后 $\sigma - \epsilon$ 曲线下降, 直到试件拉断(E 点)。曲线的 DE 段称为颈缩阶段。试件拉断后的残余应变称为伸长率 δ 。对于材料厚度(直径)不大于 16 mm 的 Q235 号钢, $\delta > 26\%$ 。

钢材拉伸试验所得的屈服点 f_y , 抗拉强度 f_u 和伸长率 δ , 是钢结构设计对钢材机械性能要求的三项重要指标。 f_y 和 f_u 反映钢材强度, 其值愈大, 承载力愈高。钢结构设计中, 常把钢材应力达到屈服点 f_y 作为评价钢结构承载能力(抗拉、抗压、抗弯强度)极限状态的标志, 即取 f_y 作为钢材的标准强度: $f_k = f_y$ 。设计时还将 $\sigma - \epsilon$ 曲线简化为如图 2-2 所示的理想弹塑性材料的 $\sigma - \epsilon$ 曲线。根据这条曲线, 认为钢材应力小于 f_y 时是完全弹性的, 应力超过 f_y 后则是完全塑性的。设计中以 f_y 作为极限, 是因为超过 f_y 钢材就进入应变硬化阶段, 材料性能发生改变, 使基本的计算假定(理想弹塑性材料)无效。另外, 钢材从开始屈服到破坏, 塑性区变形范围很大 $\epsilon (0.15\% \sim 2.5\%)$, 约为弹性区变形的 200 倍。同时抗拉强度 f_u 又比屈服点高出很多, 因此取屈服点 f_y 作为钢材设计应力极限, 可以使钢结构有相当大的强度安全储备。

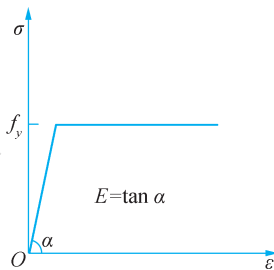


图 2-2 理想弹塑性材料的 $\sigma - \epsilon$ 曲线

钢材的伸长率 δ 是反映钢材塑性(或延性)的指标之一, 其值愈大, 钢材破坏吸收的应变能愈多, 塑性愈好。建筑用钢材不仅要求强度高, 还要求塑性好, 能够调整局部高应力, 提高结构抗脆断的能力。

反映钢材塑性(或延性)的另一个指标是截面收缩率 ψ , 其值为试件发生颈缩拉断后, 断口处横截面积(即颈缩处最小横截面积) A_1 与原横截面积 A_0 的缩减百分比, 即

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

截面收缩率标志着钢材颈缩区在三向拉应力状态下的最大塑性变形能力。 ψ 值愈大, 钢材塑性愈好。对于抗层状撕裂的 Z 向钢, 要求 ψ 值不得过低。

建筑中有时也使用强度很高的钢材, 例如用于制造高强度螺栓的经过热处理的钢材。这类钢材没有明显的屈服台阶, 伸长率 δ 也相对较小。对于这类钢材, 取卸荷后残余应变为 $\epsilon = 0.2\%$ 时所对应的应力作为屈服点, 这种屈服点又称为条件屈服点, 它和有明显屈服点的钢材一样均用 f_y 表示(图 2-3), 并统称为屈服强度。

2. 冷弯性能

冷弯试验又称为弯曲试验, 它是将钢材按原有厚度(直径)做成标准试件, 放在如图 2-4 所示的冷弯试验机上, 用具有一定弯心直径 d 的冲头, 在常温下对标准试件中部施加荷载, 使之弯曲达 180° , 然后检查试件表面, 如果不出现裂纹和起层, 则认为试件材料冷弯试验合格。冲头的弯心直径 d 根据试件厚度 a 和钢种确定: 一般厚度愈大, d 也愈大; 同时钢种不同, d 也有区别。

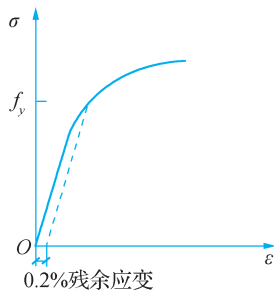


图 2-3 钢材的条件屈服点

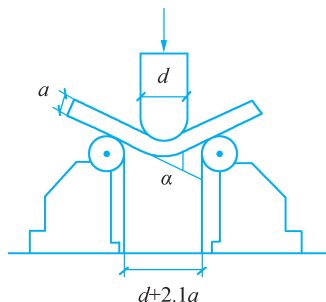


图 2-4 冷弯试验示意图

3. 韧性

韧性是指钢材抵抗冲击或振动荷载的能力,其衡量指标称为冲击韧性值。

前述钢材的屈服点 f_y 、抗拉强度 f_u 、伸长率 δ 是在常温静载下试验得到的,因此只能反映钢材在常温静载下的性能。实际的钢结构常常会承受冲击或振动荷载,如厂房中的吊车梁、桥梁结构等。为保证结构承受动力荷载安全,就要求钢材的韧性好、冲击韧性值高。

冲击韧性值是由冲击试验求得的,即用带有 V 形缺口的标准试件,在冲击试验机上通过

动摆施加冲击荷载,使之断裂(图 2-5),由此测出试件受冲击荷载发生断裂所吸收的冲击功,即为材料的冲击韧性值,用 KV (如 KV_2, KV_8 , 表示 V 形缺口夏比冲击吸收能量),单位为 J。 A_{KV} 值愈高表明材料破坏时吸收的能量愈多,因而抵抗脆性破坏的能力愈强,韧性愈好。因此它是衡量钢材强度、塑性及材质的一项综合指标。

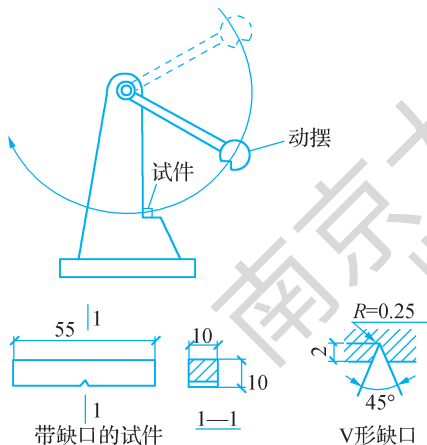


图 2-5 冲击韧性试验示意图(单位: mm)

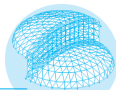
冲击试验采用 V 形缺口试件是考虑到钢材的脆性断裂常常发生在裂纹和缺口等应力集中处或三向拉应力场处,试件的 V 形缺口根部比较尖锐,与实际缺陷情况相近,因此能更好地反映钢材的实际性能。

冲击韧性值的大小与钢材的轧制方向有关。顺着轧制方向(纵向),由于钢材经受碾压次数多,内部结晶构造细密,性能好。故沿纵向切取的试件冲击韧性值较高,横向切取的则较低。冲击韧性值的大小还与试验温度有关,试验温度愈低,其值愈低。对于 Q235 钢,根据钢材质量等级不同,有的不要求保证 A_{KV} 值,有的则要求在 $+20^{\circ}\text{C}$ 或 0°C 或 -20°C 时,纵向 A_{KV} 值大于 27 J。

4. 可焊性

钢材在焊接过程中,焊缝及其附近的金属要经历升温、熔化、冷却及凝固的过程。这与一个复杂的金属冶炼过程类似。经历这样一个过程后,焊缝区金属机械性能是否发生变化,是否还能满足结构设计要求,是钢材可焊性研究的课题。

目前我国还没有规定衡量钢材可焊性的指标。一般来说,可焊性良好的钢材用普通的焊接方法焊接后,焊缝金属及其附近热影响区的金属不产生裂纹,并且其机械性能不低于母材的机械性能。钢材可焊性与钢材品种、焊缝构造及所采用的焊接工艺规程有关。只要焊



缝构造设计合理并遵循恰当的焊接工艺规程,我国钢结构设计标准所推荐的几种建筑钢材(当含碳量不超过 0.2% 时)均有良好的可焊性。对于其他钢材,必要时可进行焊接工艺试验来确定其可焊性。

钢结构设计中,除上述各种机械性能需要了解之外,还有下列四种数据也会常常用到:

(1) 钢材的质量密度: $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3 = 76.98 \text{ kN/m}^3$ 。

(2) 钢材的泊松比: $\nu = 0.3$ 。

(3) 钢材的温度线膨胀系数: $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

(4) 钢材的剪变模量: $G = 7.9 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 。

2.1.2 影响钢材机械性能的主要因素



影响钢材性能的因素很多,本节讨论化学成分、钢材制造过程、钢材硬化、复杂应力和应力集中、残余应力、温度变化及疲劳等因素对钢材性能的影响。

影响钢材机械性能的主要因素 1

1. 化学成分的影响

钢结构主要采用碳素结构钢和低合金结构钢。钢的主要成分是铁(Fe)。碳素结构钢中纯铁含量占 99% 以上,其余是碳(C),此外还有冶炼过程中留下来的杂质,如硅(Si)、锰(Mn)、硫(S)、磷(P)等元素。低合金高强度结构钢中,除铁、碳元素之外,冶炼时还特意加入少量合金元素,如锰、硅、钒(V)、铜(Cu)、铬(Cr)、钼(Mo)等。这些合金元素通过冶炼工艺以一定的结晶形态存在于钢中,可以改善钢材的性能(注意,同一种元素以合金的形式和以杂质的形式存在于钢中,其影响是不同的)。下面分别叙述各种元素对钢材性能的影响。

(1) 碳: 钢材中含碳量增加,会使钢材强度增加,塑性降低,冷弯性能及冲击韧性(尤其是低温下的冲击韧性)也会降低,还会使钢材的可焊性及抗锈性能变差。碳素结构钢按含碳量多少分为三类:低碳钢(含碳量不大于 0.25%)、中碳钢(含碳量 0.25%~0.60%)、高碳钢(含碳量不低于 0.6%)。建筑钢材要求强度高、塑性好。《标准》所指定的碳素结构钢 Q235,其含碳量为 0.12%~0.22%,属低碳钢,其强度、塑性适中,有明显的屈服台阶(图2-1)。

(2) 锰: 在碳素钢中,锰作为一种脱氧剂加入,因此它常以杂质的形式留在钢中。我国的低合金高强度结构钢中,锰常作为一种合金元素加入,是仅次于碳的一种重要的合金元素。当锰的含量不多时,它能提高钢材强度,但又不会过多降低塑性和冲击韧性。此外,锰能与硫生成硫化锰,从而消除硫的不利影响;锰还可以改善钢材冷脆的倾向。

(3) 硅: 硅也是作为一种脱氧剂加入碳素钢中的。硅作为一种合金元素可以提高钢的强度,同时对钢的塑性、冷弯性能、冲击韧性及可焊性没有显著的不利影响。

(4) 钒: 钒作为一种合金元素加入钢中,可以提高钢的强度,增加钢材的抗锈性能,同时又不会显著降低钢的塑性。

(5) 硫和磷: 它们是冶炼过程中留在钢中的杂质,是有害元素。

硫能使钢的塑性及冲击韧性降低,并使钢材在高温时出现裂纹,称为“热脆”现象。这对钢材热加工不利。磷能使钢材在低温下冲击韧性降低很多,称为“冷脆”现象。这对低温下工作的结构不利。硫和磷一般作为杂质,其含量均应严格控制。

氧(O)和氮(N)以及氢(H)是冶炼过程中留在钢中的杂质,它们均是有害元素,含量高



时可分别使钢热脆或冷脆。

2. 冶炼、浇注、轧制过程及热处理的影响

建筑用的轧制钢材,是将炼钢炉炼出的钢液注入盛钢桶中,再由盛钢桶送入浇筑车间,浇注成钢锭。一般钢锭冷却至常温处放置,需要时再将钢锭加热切割,送入轧钢机中反复碾压轧制成各种型号的钢材(钢板、型钢等)。

钢材在冶炼、轧制过程中常常出现的缺陷有偏析、夹层、裂纹等。偏析是指金属结晶后化学成分分布不均匀。夹层是由于钢锭内有气泡,有时气泡内还有非金属夹渣,当轧制温度及压力不够时,不能使气泡压合,气泡被压扁延伸,形成了夹层。此外,因冶炼过程中残留的气泡、非金属夹渣,或因钢锭冷却收缩,或因轧制工艺不当,还可能导致钢材内部形成细小的裂纹。偏析、夹层、裂纹等缺陷都会使钢材性能变差。

建筑所用的钢材一般由平炉和氧气转炉炼成。目前用这两种方法冶炼的钢材,其质量相当,但氧气转炉钢成本较低。

钢液从出炉到浇注的过程中,会析出氧气等并生成氧化铁,造成钢材内部夹渣等缺陷。为保证钢材质量,需要在钢液中加入脱氧剂进行脱氧。根据脱氧程度不同,钢材分为沸腾钢、半镇静钢、镇静钢及特殊镇静钢。

沸腾钢用“F”表示,是以脱氧能力较弱的锰作为脱氧剂,因而脱氧不够充分,在浇铸过程中,有大量气体逸出,钢液表面剧烈沸腾,故称为沸腾钢。沸腾钢注锭时冷却快,钢液中的气体(氧、氮、氢等)来不及逸出,在钢中形成气泡。沸腾钢结晶构造粗细不匀、偏析严重,常有夹层,因而塑性、韧性及可焊性相对较差。

镇静钢用“Z”表示(可省略不写),所用脱氧剂除锰之外,还用脱氧能力较强的硅,因而脱氧充分,在脱氧过程中产生很多热量,使钢液冷却缓慢,气体容易逸出,浇注时没有沸腾现象,钢锭模内钢液表面平静,故称为镇静钢。镇静钢结晶构造细密,杂质气泡少,偏析程度低,因而塑性、冲击韧性及可焊性比沸腾钢好,同时冷脆及时效敏感性也低。

半镇静钢用“b”表示,介于沸腾钢及镇静钢之间。

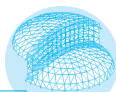
特殊镇静钢用“TZ”表示(可省略不写),是在用锰和硅脱氧之后,再加铝或钛进行补充脱氧,其性能得到明显改善,尤其是可焊性显著提高。

轧制钢材时,在轧机压力作用下,钢材的结晶粒会变得更加细密均匀,钢材内部的气泡、裂缝可以得到压合。因此,轧制钢材的性能比铸钢优越。轧制次数多的钢材比轧制次数少的性能改善程度要好些,一般薄钢材的强度及冲击韧性优于厚的钢材。此外,钢材性能与轧制方向也有关,一般钢材顺轧制方向的强度和冲击韧性比横方向的要好。

对于某些特殊用途的钢材,在轧制后还常经过热处理进行调质,以改善钢材性能。常见的热处理方式有淬火、正火、回火、退火等。用作高强度螺栓的合金钢,如 20MnTiB(20 锰钛硼)就要进行热处理调质(淬火后高温回火),使其强度提高,同时又保持良好的塑性和韧性。

3. 钢材的冷作硬化与时效硬化

如图 2-6(a)所示为低碳钢试件单向拉伸的 $\sigma-\epsilon$ 曲线。如前所述,当拉伸应力从 0 增加,超过弹性阶段 OA,进入弹塑性阶段 AB 内的点 1 时,这时如果卸荷,曲线不会沿着原来的曲线返回至 O 点,而是从 1 点开始沿着与 OA 平行的方向直线下降至应力为 0 时的 2 点,产生残余应变 E_p (0-2 段)。如果再加荷,曲线将沿从 2 到 1 的方向上升至 1 点。这意味着



经历一次加载后,钢材的弹性极限(或比例极限)由原来的 A 点升至 1 点,弹性范围加大了。如果再继续加荷到 3 点又卸荷,曲线将从 3 点沿着与 OA 平行的方向降至应力为 O 时的 4 点。若再加荷,曲线由 4 点升至 3 点,弹性范围更大。若继续加荷至拉断破坏,曲线沿着原来的实线,拉断后直线下降至应力为 O 的 5 点。这就是说,经历几次重复加载后,钢材的塑性变形范围由原来的“ $0-5$ ”段缩小至“ $4-5$ ”段。 $\sigma-\epsilon$ 曲线的这种变化说明钢材受荷超过弹性范围以后,若重复地卸载、加载,将使钢材弹性极限提高,塑性降低。这种现象称为应变硬化或冷作硬化。

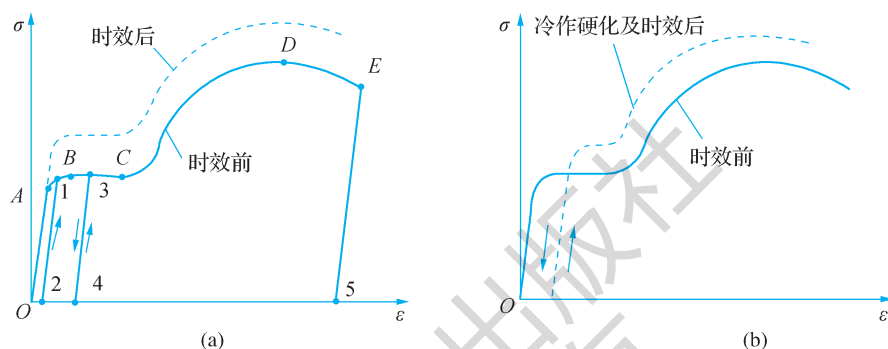


图 2-6 钢材的冷作硬化与时效硬化(示意图)

轧制钢材放置一段时间后,其机械性能也会发生变化。钢材的 $\sigma-\epsilon$ 曲线会由图 2-6(a) 中的实线变成虚线所示的曲线。比较实线和虚线,可以看出钢材放置一段时间后,强度提高,塑性降低。这种现象称为时效硬化。如果钢材经过冷加工产生过塑性变形,时效过程会加快[图 2-6(b)]。如果冷加工后又将钢材加热(例如加热到 100°C 左右),其时效过程就更加迅速。这种处理称为人工时效。在钢筋混凝土结构中,常常利用这种性能对钢筋进行冷拉、冷拔等工艺,然后再作人工时效处理,以提高钢筋的承载力。对于冷弯薄壁型钢,考虑到它在经受冷弯加工成型过程中,由于受冷作硬化和时效硬化的影响,其屈服点比原来有较大的提高,其抗拉强度也略有提高,延伸率降低。科技人员经过一系列的理论和试验研究,并借鉴国外成功的经验,认为在设计中可以考虑利用冷弯效应引起的强度提高,以充分发挥冷弯薄壁型钢的承载力,因此在现行的《冷弯型钢技术标准》(GB/T 50018—2025)中,列入了考虑冷弯效应引起设计强度提高的条款。

但是,在一般的由热轧型钢和钢板组成的钢结构中,不利用冷作硬化来提高钢材强度。对于直接承受动荷载的结构,还要求采取措施消除冷加工后钢材硬化的影响,防止钢材性能变脆。例如,经过剪切机剪断的钢板,为消除剪切边缘冷作硬化的影响,常常用火焰烧烤使之“退火”,或者将剪切边缘部分钢材用刨、削的方法将其除去(刨边)。

4. 复杂应力和应力集中的影响

钢材受同号复杂应力作用时,强度提高,塑性降低,性能变脆。钢材受异号复杂应力作用时,强度降低,塑性增加。

现在讨论应力集中对钢材性能的影响。实际钢结构中的构件常因构造而有孔洞、缺口、凹槽,或采用变厚度、变宽度的截面,这类构件就会有应力集中现象。如图 2-7 所示为带有



影响钢材机械性能的主要因素 2

孔洞的轴向受力构件,孔洞处的截面应力不再是均匀分布,而是在孔口边缘处有局部的应力高峰,其余部分则应力较低,这种现象称为应力集中。应力峰值及应力分布不均匀的程度与杆件截面变化急剧的程度有关。如槽孔尖端处[图 2-7(b)]就比圆孔[图 2-7(a)]的应力集中程度大得多。同时,应力集中处不仅有纵向应力 σ_x ,还有横向应力 σ_y ,常常形成同号应力场,有时还会有三向的同号应力场。这种同号应力场导致钢材塑性降低,脆性增加,使结构发生脆性破坏的危险性增大。

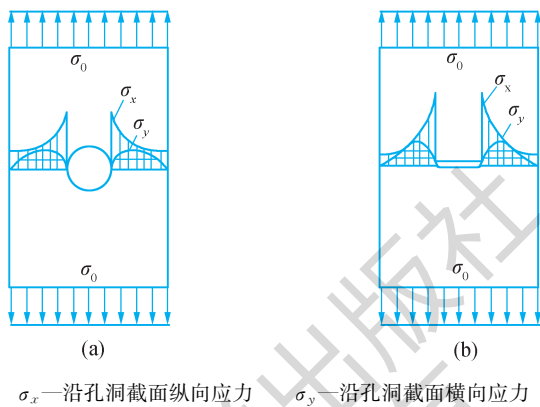


图 2-7 构件孔洞处的应力集中现象

在静荷载作用下,应力集中可以因材料本身具有塑性(即 $\sigma-\epsilon$ 曲线上的屈服台阶)得到缓和。例如图 2-8 中的杆件,当荷载增加,孔口边缘应力高峰首先达到屈服点 f_y 时,如荷载继续增加,边缘达到 f_y 处的应变可继续增加,但应力保持 f_y 。截面其他地方应力及应变仍旧继续增加。这样,截面上的应力随荷载增加逐渐趋向均匀,直到全截面的应力都达到 f_y ,不会影响截面的极限承载能力。因此,塑性良好的钢材可以缓和应力集中。

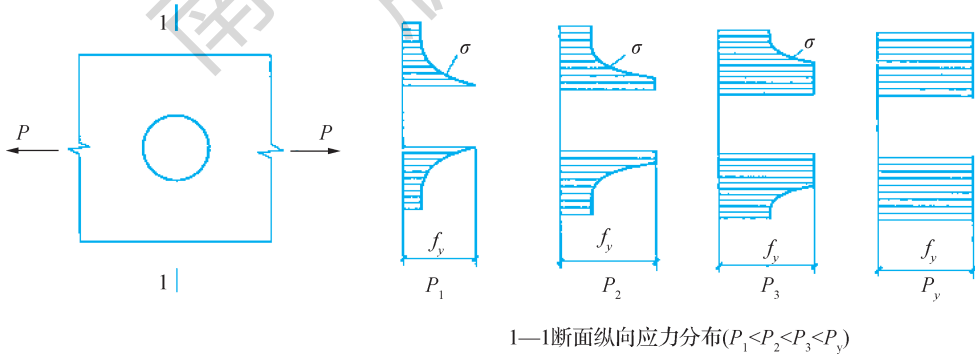
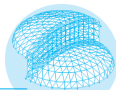


图 2-8 应力集中缓和的过程

常温下受静荷载的结构只要符合设计和施工规范要求,计算时可不考虑应力集中的影响。但是对于受动荷载的结构,尤其是低温下受动荷载的结构,应力集中引起钢材变脆的倾向更为显著,常常是导致钢结构脆性破坏的原因。对于这类结构,设计时应注意构件形状合理,避免构件截面急剧变化以减小应力集中程度,从构造措施方面防止钢材脆性破坏。



注：前面讲述冲击韧性试验的试件带有V形缺口，就是为了使试件受荷载时产生应力集中，由此测得的冲击韧性值就能够反映材料对应力集中的敏感性，因而能够更全面地反映材料的综合品质。

5. 残余应力的影响

型钢及钢板热轧成材后，一般放置堆场自然冷却，冷却过程中截面各部分散热速度不同，导致冷却不均匀。例如，钢板截面两端接触空气表面积大，散热快，先冷却，而截面中央部分则因接触空气表面积小，散热慢，后冷却。同样，工字钢边缘端部及腹板中央部分一般冷却较快，腹板与翼缘相交部分则冷却较慢。先冷却的部分恢复弹性较早，它将阻止后冷却部分自由收缩，从而引起后冷却部分受拉，先冷却部分则受后冷却部分收缩的牵制引起受压。这种作用和反作用最后导致截面内形成自相平衡的内应力，称为热残余应力。

钢材中残余应力的特点是应力自相平衡且与外荷载无关。

当外荷载作用于结构时，外荷载产生的应力与残余应力叠加，导致截面某些部分应力增加，可能提前达到屈服点进入塑性区。随着外荷载的增加，塑性区会逐渐扩展，直到全截面进入塑性达到极限状态。因此，残余应力对构件强度极限状态承载力没有影响，计算中不予考虑。但是，由于残余应力使部分截面提前进入塑性区，截面弹性区减小，因而刚度也随之减小，导致构件稳定承载力降低。此外，残余应力与外荷载应力叠加常常产生二向或三向应力，特使钢材抗冲击断裂能力及抗疲劳破坏能力降低。尤其是低温下受冲击荷载的结构，由于残余应力的存在，更容易在低工作应力状态下发生脆性断裂。

对钢材进行“退火”热处理，在一定程度上可以消除一些残余应力。

6. 温度的影响

温度升高时，钢材的强度(f_u 、 f_y)及弹性模量(E)降低，但在200℃以内，钢材性能变化不大，因此，钢材的耐热性较好。但超过200℃，尤其是在430℃~540℃， f_u 及 f_y 急剧下降，到600℃时强度很低已不能继续承载，所以钢结构是一种不耐火的结构。对于受高温作用的钢结构，钢结构规范对其隔热、防火措施有具体的规定。

此外，钢材在250℃附近时强度有一定的提高，但塑性降低，性能转脆。由于在这个温度下，钢材表面氧化膜呈蓝色，故又称蓝脆。在蓝脆温度区加工钢材可能引起裂纹，故应尽量避免在这个温度区对钢材进行热加工。

在负温度范围内，随着温度的下降，钢材强度略有提高，但塑性及韧性下降，钢材性能变脆。当温度下降到某一区间时，冲击韧性急剧下降，其破坏特征很明显地转变为脆性破坏。因此对于在低温下工作的结构，尤其是在受动力荷载和采用焊接连接的情况下，钢结构规范要求不但要有常温冲击韧性的保证，还要有低温(如0℃、-20℃等)冲击韧性的保证。

7. 钢材的疲劳

生活中常有这样的经验，一根细小的铁丝，要拉断它很不容易，但将它弯折几次就容易折断了；又如机械设备中高速运转的轴，由于轴内截面上应力不断交替变化，承载能力就较静荷载时低得多，常常在低于屈服点时就断了。这些实例说明，钢材承受重复变化的荷载作用时，材料强度降低，破坏提早。这种现象称为疲劳破坏。

疲劳破坏的特点是强度降低，材料转为脆性，破坏突然发生。

钢结构标准规定，对于承受动力荷载作用的构件(如吊车梁、吊车桁架、工作平台等)及其



连接,当应力变化的循环次数超过 5×10^4 次时,就需要进行疲劳计算,以保证不发生疲劳破坏。

钢材发生疲劳破坏一般认为是由于钢材内部有微观细小的裂纹,在连续反复变化的荷载作用下,裂纹端部产生应力集中,其中同号的应力场使钢材性能变脆,交变的应力使裂纹逐渐扩展,这种累积的损伤后导致其突然地脆性断裂。因此钢材发生疲劳对应力集中也最为敏感。对于受动荷载作用的构件,设计时应注意避免截面突变,让截面变化尽可能平缓过渡,目的是减缓应力集中的影响。

一般情况下,钢材静力强度不同,其疲劳破坏情况没有显著差别。因此,对于受动荷载的结构不一定要采用强度等级高的钢材,但宜采用质量等级高的钢材,使其有足够的冲击韧性,以防止疲劳破坏。

2.1.3 钢材基本要求及破坏形式

为了体现出钢结构的特点,钢材需要满足以下基本要求:

(1) 较高的强度,高强度是轻质高强的根本,主要通过比例极限、屈服强度、抗拉强度反映。

(2) 较好的塑性,应力超过屈服点后能产生显著变形而不立即断裂的性质主要通过伸长率、断面收缩率反映。

(3) 较好的韧性,破坏前吸收能量、抵抗冲击荷载的能力,主要通过冲击韧性反映。

(4) 良好的加工性能,主要通过冷弯试验检测。

(5) 良好的可焊性。

(6) 较好的抗锈蚀能力。

钢材有两种完全不同的破坏形式:塑性破坏和脆性破坏。

塑性破坏的主要特征是:破坏前具有较大的塑性变形,常在钢材表面出现明显的相互垂直交错的锈迹剥落线。只有当构件中的应力达到抗拉强度后才会发生破坏,破坏后的断口呈纤维状,色泽发暗。由于塑性破坏前总有较大的塑性变形发生,且变形持续时间较长,容易被发现和抢修加固,因此不至于发生严重后果。钢材塑性破坏前的较大塑性变形能力,可以实现构件和结构中的内力重分布,钢结构的塑性设计就是建立在这种足够的塑性变形能力上。

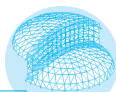
钢结构所用的钢材在正常使用条件下,虽然有较高的塑性和韧性,但在某些条件下,仍然存在发生脆性破坏的可能性。脆性破坏的主要特征是:破坏前塑性变形很小,或根本没有塑性变形,而突然迅速断裂。破坏后的断口平直,呈有光泽的晶粒状或人字纹。由于破坏前没有任何预兆,破坏速度又极快,无法察觉和补救,而且一旦发生常引发整个结构的破坏,后果非常严重,因此在钢结构的设计、施工和使用过程中,要特别注意防止这种破坏的发生。

现行《钢结构设计标准》推荐的 Q235、Q355、Q390 和 Q420 建筑钢材均有较好的塑性和韧性。在正常情况下,它们都不会发生脆性破坏。因此,我国规范对钢结构构件的可靠性计算一般根据延性破坏来取值。

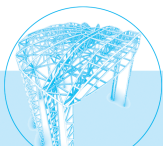
钢材究竟会发生何种形式的破坏,不仅与钢材的品种有关,还与钢材所建结构的工作环境、结构构件形式等多种因素有关。常常有这样的情况,即原来塑性很好的钢材,当工作环境改变,如应力集中严重、在低温下受冲击荷载作用等,就可能导致钢材性能变脆,发生脆性破坏。历史上曾有过多起焊接桥梁、船舶、吊车梁及贮罐等,由于气温骤降、受冲击荷载、有严重应力集中或钢材及焊缝品质不合格等原因,导致脆性破坏的事故。我国 1989 年曾发生



钢材的基本要求
及破坏形式



过一起直径 20 m 的焊接钢制贮罐,在交工验收后使用不久即突然破坏的事故。事故发生过程不足 10 s,无任何先兆,呈明显的脆性断裂特征。当时气温为 -11.9°C ,罐内装载低于设计容量,罐体压力远低于钢材屈服点。调查判定为低应力下低温脆性断裂事故。进一步调查发现,贮罐焊缝存在大量未焊透,部分钢材含碳量、含硫量较高,降低了钢材的塑性及可焊性,其常温冲击韧性值比规定值低,是导致低温断裂的原因。鉴于这些教训,对钢材发生脆性破坏的危险性应有充分的认识,应注意研究钢材的机械性能及钢材性能转脆的条件,在钢结构的设计、制造及安装过程中,采取适当的措施,防止发生脆性破坏。



2.2 钢材的命名规则

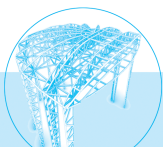
建筑钢材采用特定的工程语言进行命名,表示其强度、质量等级和脱氧方法。具体采用“QXXX - $\square$ · []”表示,例如 Q235 - A · F、Q235 - B · b、Q355 - E · Z。

其中 Q——屈服强度的第一个拼音字母。

XXX——屈服强度值,单位为 N/mm^2 ,结构用钢常有 235、355、390、420。

$\square$ ——质量等级,分为 A、B、C、D、E 五个等级。A 表示钢材对冲击韧性不作要求;B 有 20°C 时的冲击功要求;C 有 0°C 时的冲击功要求;D 有 -20°C 时的冲击功要求;E 有 -40°C 时的冲击功要求。低合金钢才有 E。

[]——脱氧方法,分为 F、b、Z 和 TZ 四种。F 表示沸腾钢;b 表示半镇静钢;Z 表示镇静钢;TZ 表示特殊镇静钢。其中 Z 和 TZ 可不写。



2.3 建筑钢材的种类、规格

2.3.1 建筑钢材的种类

钢材的分类方法有很多种,按化学成分可以分为碳素结构钢、低合金高强度结构钢及合金结构钢。

1. 碳素结构钢

现行《碳素结构钢》(GB/T 700—2006)将碳素结构钢按屈服点数值分 5 个牌号:Q195、Q215、Q235、Q255、Q275。

钢结构规范中推荐的碳素结构钢是 Q235。

2. 普通低合金钢

普通低合金钢是在普通碳素钢中添加少量的一种或几种合金元素(总量 $<5\%$)以提高



建筑钢材的
种类、规格



其强度、耐腐蚀性、耐热性、低温冲击韧性。其含碳量 $\leq 0.2\%$,以便钢材的加工和焊接。

现行《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2018)将低合金高强度钢分 6 个牌号:Q355、Q390、Q420、Q460、Q500、Q550。

《钢结构设计标准》中推荐用于建筑结构的低合金高强度结构钢是 Q355、Q390、Q420。

另外,在桥梁、造船、压力容器、锅炉等专业用钢材,分别在末尾加“q”“c”“r”“g”,如:Q235q、Q345q。

3. 特种钢

为了满足一些特殊用途,冶炼制作了一些特种钢材,比如 Z 向钢、耐候钢、耐热钢等。

国家相继出台了《耐候结构钢》(GB/T 4171—2008)、《建筑结构用钢板》(GB/T 19879—2023)等相关规范,冶炼制作了 Q235NH、Q345NH、Q235GJ、Q345GJ、Q235GJZ、Q345GJZ 等一批特种钢材。

2.3.2 建筑钢材的规格

钢材可以分为钢板、热轧型钢、焊接型钢、冷弯薄壁(厚度 1.5~5 mm)型钢、压型钢板等。

钢板主要有热轧钢板和钢带、冷轧钢板和钢带、花纹涂板(用作走道板和梯子踏板)、高层建筑结构用钢板等。

薄钢板厚度 ≤ 4 mm,厚板的厚度 4.5~60 mm;常用热轧板 6~25 mm,冷轧板 0.6~2 mm。

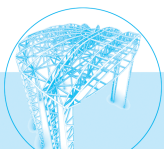
钢板代号:“一宽 $\times$ 厚 $\times$ 长”单位 mm,如一 600 $\times$ 10 $\times$ 3600 表示钢板宽度 600 mm、厚度 10 mm、长度 3600 mm。

热轧型钢主要工字钢、H 型钢、T 型钢、槽钢、角钢、圆管、方管、圆钢等。

焊接型钢主要有 H 型钢、T 型钢、箱型钢、十字型钢等。

常见的冷弯薄壁(厚度 1.5~5 mm)型钢有 L 型钢、C 型钢、Z 型钢等。

热轧型钢、焊接型钢、冷弯薄壁型钢和压型钢板的表示方法见 2.4 建筑型钢表示方法。



2.4 建筑型钢表示方法

2.4.1 工字钢

工字钢一般用于受弯构件,故也称为钢梁,主要分为普通工字钢、轻型工字钢和宽翼缘工字钢。

工字钢用符号 I 及号数表示,其中号数代表截面高度的厘米数,如 I18 表示该工字钢截面高度为 180 mm。工字钢的型号和其他截面尺寸详见附录 9。

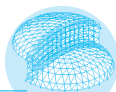
I20 以上的工字钢根据腹板的厚度和翼缘宽度的不同,同号工字钢又分为 a、b 类型,I32 分为 a、b、c 三类。如 I20a、I20b、I32a、I32b、I32c。

2.4.2 H 型钢

H 型钢是一种截面面积分配较为优化、强重比合理的经济断面高效型材,因其断面与英



建筑型钢
表示方法



文字母“H”相同而得名。H 型钢配件以直角排布使得在受力方向上具有抗弯能力强、施工简单、节约成本和结构重量轻等优点,已被广泛应用。

轧制 H 型钢分为宽翼缘 H 型钢、中翼缘 H 型钢、窄翼缘 H 型钢三类,代号分别为 HW、HM、HN,其型号用相应代号和截面高度 $\times$ 翼缘宽度表示(单位 mm),如 HW220 $\times$ 206 表示截面高度为 220 mm,翼缘宽度为 206 mm。轧制 H 型钢的型号和其他截面尺寸详见附录 9。

焊接 H 型钢用相应代号和截面高度 $\times$ 翼缘宽度 $\times$ 腹板厚度 $\times$ 翼缘厚度表示(单位 mm),H300 $\times$ 200 $\times$ 8 $\times$ 14 的截面形式和尺寸如图 2-9 所示。

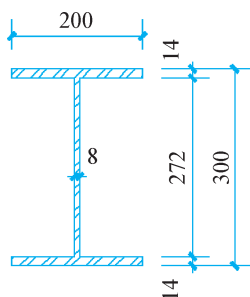


图 2-9 H 型钢截面形式和尺寸

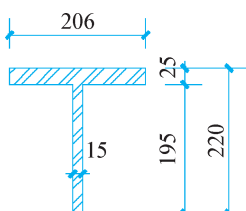


图 2-10 T 型钢截面形式和尺寸

2.4.3 T 型钢

轧制 T 型钢分为宽翼缘 T 型钢、中翼缘 T 型钢、窄翼缘 T 型钢三类,代号分别为 TW、TM、TN,其型号用相应代号和截面高度 $\times$ 翼缘宽度 $\times$ 腹板厚度 $\times$ 翼缘厚度表示(单位 mm),具体可查型钢表。

焊接 T 型钢用相应代号和截面高度 $\times$ 翼缘宽度 $\times$ 腹板厚度 $\times$ 翼缘厚度表示(单位 mm),T220 $\times$ 206 $\times$ 15 $\times$ 25 的截面形式和尺寸如图 2-10 所示。

2.4.4 角钢

角钢(角铁)是两边互相垂直成角形的长条钢材,分为等边角钢和不等边角钢。

等边角钢的两个边宽相等,用符号 L 和肢宽 $\times$ 肢厚表示(单位 mm);不等边角钢的两个边宽不相等,用符号 L 和长肢宽 $\times$ 短肢宽 $\times$ 厚度表示(单位 mm)。截面形式和尺寸见附录 9 所示。

2.4.5 槽钢

槽钢是截面为凹槽形的长条钢材,分为普通槽钢和轻型槽钢,其代号分别为 [(普通槽钢) 和 Q[(轻型槽钢) 及号数组成,其中号数表示截面高度的厘米数。如 [10 表示该槽钢截面高度为 100 mm。槽钢的型号和其他截面尺寸详见附录 9。

2.4.6 冷弯薄壁 C 型钢

冷弯薄壁型钢指用钢板或带钢在冷状态下弯曲成的各种断面形状的成品钢材,最为常用的为冷弯薄壁 C 型钢。

冷弯薄壁 C 型钢用代号 C 及号数组成,其型号用相应代号和截面高度 $\times$ 翼缘宽度 $\times$ 卷边高度 $\times$ 钢板厚度(单位为 mm),C100 $\times$ 50 $\times$ 15 $\times$ 2.5 的截面形式和尺寸如图 2-11 所示。

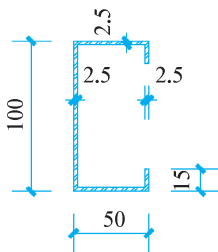


图 2-11 C 型钢截面形式和尺寸

2.4.7 圆管

圆管是指两端开口并具有中空同心圆断面,其长度与周边之比较大的钢材。用代号 D



或 ϕ 表示,其型号用相应代号和外径 $\times$ 壁厚表示(单位 mm),如 $D38\times 3$ 或 $\phi 38\times 3$ 均表示圆管外径 38 mm,壁厚 3 mm。

2.4.8 圆钢

圆钢是指截面为圆形的实心长条钢材,用代号 ϕ 表示,其型号用相应代号和直径表示(单位 mm),如 $\phi 30$ 表示圆钢直径为 30 mm。

2.4.9 方矩管

方矩管简称方管和矩管,是带钢经过工艺处理卷制而成,一般是把带钢经过拆包、平整、卷曲、焊接形成圆管,再由圆管轧制成方形管,然后剪切成需要长度。方矩管是方形管材和矩形管材的统称,是边长相等和不相等的钢管。用 $\square$ 、F、J 或文字箱表示,其型号用相应代号和高 $\times$ 宽 $\times$ 壁厚表示(单位 mm),如 $\square 40\times 25\times 2$ 表示方管的截面高度为 40 mm,截面宽度为 25 mm,壁厚为 2 mm。

2.4.10 压型钢板

压型钢板是将涂层板或镀层板经辊压冷弯,沿板宽方向形成波形截面的成型钢板。屋面和墙面常用板厚为 0.4~1.6 mm,用于承重楼板或筒仓时厚度达 2~3 mm 及以上;波高一般为 10~200 mm。

轻钢结构屋面及墙体一般采用彩色钢板维护结构,可双层加保温,有多种样式可供选择,采用各种紧固件和泛水配件组装而成。

压型钢板的表示为:YX 肋高-波距-有效覆盖宽度(单位 mm),板厚需在型号后单独注明(如 YX15-220-880-0.6),YX15-220-880 的截面形式和尺寸如图 1-12 所示。

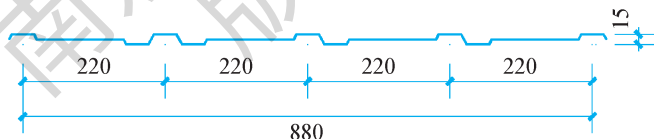
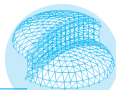


图 2-12 压型钢板截面形式和尺寸(板厚 0.5、0.6 和 0.8)

压型彩钢板根据防腐、防雨及外形要求有不同型号可供选择,几种常用的压型彩钢板如下:

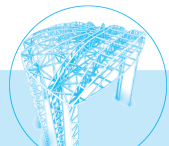
- (1) 840 型彩钢板, YX28-210-840, 板厚有 0.6、0.8 和 1.0 三种, 主要用于屋面板和墙面板。
- (2) 867 型彩钢板, YX26-289-867, 板厚有 0.6、0.8 和 1.0 三种, 主要用于屋面板和墙面板。
- (3) 880 型彩钢板, YX15-220-880, 板厚有 0.5、0.6 和 0.8 三种, 主要用于墙面板。
- (4) 760 型彩钢板, YX61-380-760, 板厚有 0.6、0.8 和 1.0 三种, 主要用于隐藏式屋面板。

保温夹芯板是一种保温和隔热与面板一次成型的双层压型钢板。由于保温和隔热芯材的存在,芯材的上、下均需加设钢板。上层为小波的压型钢板,下层为小肋的平板。芯材可



采用聚氨酯、聚苯或岩棉,芯材与上下面板一次成型,也有在上下两层压型钢板间在现场增设玻璃棉保温和隔热层的做法。

保温夹芯板(金属面绝热夹芯板)标记示例为:JXB-Y-EPS 3000×1000×75(长度×宽度×厚度),其中JXB为夹芯板代号(J-金属面,X-芯材,B-板),Y表示压型板,EPS表示聚苯乙烯芯材。



2.5 建筑钢材的选择

建筑钢材的选择是指根据规范要求确定钢材牌号及其质量等级。选择的目的是保证安全可靠、经济合理。选择钢材时应考虑下述原则:

1. 结构的重要性

对重型工业建筑结构、大跨度结构、高层民用建筑结构等重要结构,应考虑选用质量好的钢材。根据统一标准的规定,结构安全等级有一级(重要的)、二级(一般的)和三级(次要的)。安全等级不同,所选钢材的质量也应不同。同时,构件造成破坏对结构整体的影响也应考虑。当构件破坏导致整个结构不能正常使用时,则后果十分严重;如果构件破坏只造成局部损害而不致危及整个结构正常使用,则后果就不很严重。两者对材质的要求也应有所区别。

2. 荷载情况

直接承受动荷载的结构和强烈地震区的结构,应选用综合性能好的钢材,一般承受静荷载的结构则可选用质量等级稍低的钢材,以降低造价。

3. 连接方法

钢结构的连接方法有焊接和非焊接两种。对于焊接结构,为保证焊缝质量,要求可焊性较好的钢材。

4. 结构所处的温度和工作环境

在低温下工作的结构,尤其是焊接结构,应选用有良好抗低温脆断性能的镇静钢。在露天或在有害介质环境中工作的结构,应考虑结构要有较好的防腐性能。必要时应采用耐候钢。

对于具体的钢结构工程,选用哪一种钢材应根据上述原则结合工程实际情况及钢材供货情况进行综合考虑。同时对于所选的钢材,还应按规范要求及视工程具体情况,提出保证各项指标合格的要求:如承重结构的钢材应具有抗拉强度、伸长率、屈服强度和硫、磷含量的合格保证;对焊接结构尚应具有碳含量的合格保证;焊接承重结构以及重要的非焊接承重结构的钢材还应具有冷弯试验的合格保证;对于需要验算疲劳的结构,还应根据结构的工作温度及所用钢材的品种保证不同温度下的冲击韧性合格。

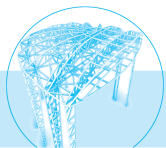
一般说来,保证的条件愈高,保证的项目愈多,钢材的价格愈高。因此,所提要求应力图经济合理。

钢材进入项目部,除了检查规格、数量以外,主要检查建筑钢材的质量证明书,属于下列



情况之一,须同时具备质量证明书和试验报告:

- (1) 国外进口的钢材。
- (2) 钢材质量保证书的项目少于设计要求(应提供缺少项目的试验报告)。
- (3) 混批采购的钢材。
- (4) 设计有特殊要求的钢结构用材。



习题与思考题

一、名词解释

1. 钢材的韧性
2. 时效硬化
3. 冷作硬化
4. 应力集中
5. 镇静钢
6. 蓝脆现象

二、填空题

1. 钢材在当温度下降到负温的某一区间时,其冲击韧性急剧下降,破坏特征明显地由_____破坏转变为_____破坏,这种现象称为_____。
2. 钢材的三项主要力学性能指标分别为:_____、_____和_____。
3. 对钢材性能有利的化学元素有:_____、_____、_____和_____。
4. 对钢材性能不利的化学元素有:_____、_____、_____和_____。
5. 低碳钢的应力-应变曲线的五个阶段分别为:_____、_____、_____、_____和_____。
6. 钢材按脱氧程度的不同可以分为:_____、_____、_____和_____。

三、思考讨论题

1. 碳(C)、硅(Si)、锰(Mn)、钒(V)对钢材的机械性能的影响分别是什么?
2. 硫(S)、磷(P)、氧(O)、氮(N)对钢材的机械性能的影响分别是什么?
3. 钢结构对钢材的机械性能有哪些要求? 这些要求用哪些指标来衡量?
4. 钢结构中常用的钢材有哪几种? 钢材牌号的表示方法是什么?
5. 钢材选用应考虑哪些因素? 怎样选择才能保证经济合理?
6. 应力集中对钢材的机械性能有哪些影响? 为什么?
7. 钢结构改善钢材性能常用的热处理方式有哪些?
8. 试查阅相关资料,写出常见钢板、热轧型钢、焊接组合型钢、冷弯型钢有哪些? 分别如何表示?



答案扫一扫

学习情景 3

钢结构连接设计



知识目标



课程思政

1. 掌握钢结构连接的基本类型及其特点,包括焊接连接、铆钉连接、螺栓连接和紧固件连接。
2. 理解普通螺栓的性能等级和高强度螺栓的性能等级、受力特点及其应用场景。
3. 掌握焊缝连接的构造要求、标注方法及常见缺陷的检验方法。
4. 理解对接焊缝、角焊缝的计算方法及其在钢结构中的应用。
5. 掌握普通螺栓和高强度螺栓的受剪、受拉及同时受剪受拉的计算方法。
6. 理解高强度螺栓的预拉力控制及其在摩擦型和承压型连接中的应用。



能力目标

1. 能够根据钢结构的设计要求,合理选择连接方式并进行连接设计。
2. 能够进行焊缝连接的构造设计和强度验算。
3. 能够进行普通螺栓和高强度螺栓的受力计算及连接设计。
4. 能够根据钢结构连接的受力情况,进行合理的连接构造设计。
5. 能够识别和解决钢结构连接中的常见问题,如焊缝缺陷、螺栓松动等。

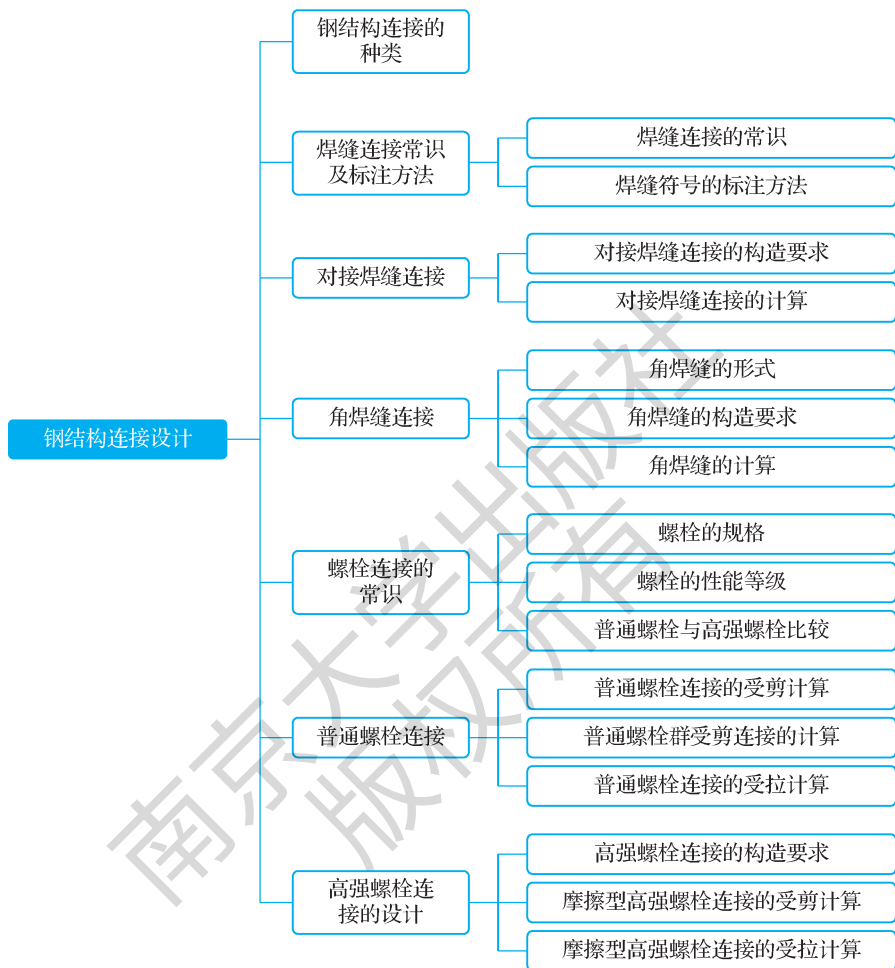


素质(思政教育)目标

1. 培养学生的工程实践能力,增强对钢结构连接设计的责任感和使命感。
2. 培养学生的团队协作精神,能够在团队中合理分工,共同完成钢结构连接设计任务。
3. 培养学生的创新意识,能够在设计中提出合理的改进方案,优化连接设计。
4. 培养学生的安全意识,能够在设计中充分考虑结构的安全性,确保连接的可靠性。
5. 培养学生的环保意识,能够在设计中考虑材料的节约和环境的保护。



思维导图



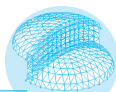
工程常用知识速查

1. 钢结构连接种类主要有:焊接、螺栓连接、铆钉连接等。焊缝按性质分为对接焊缝、角焊缝;螺栓分为普通螺栓和高强度螺栓,普通螺栓常用C级粗制螺栓,高强度螺栓按施工工艺分为大六角高强螺栓(扭矩法、转角法施加预拉力)和扭剪型高强螺栓(扭掉螺栓尾部梅花卡法),一般按摩擦型传力方式设计。

C级粗制螺栓的螺孔直径 d_0 =螺栓公称直径 $d+1.5\sim 3.0$ mm,高强螺栓摩擦型 $d_0=d+1.5\sim 2.0$ mm。螺栓排列,最小中距 $3d_0$,端距、边距一般取 $2d_0$ 。

2. 焊缝质量检验方法分:外观检查和内部探伤,内部探伤又有超声波探伤检验、X射线检验等方法。

焊缝质量等级分为一级焊缝、二级焊缝和三级焊缝。一级焊缝、二级焊缝需经外观检



查、内部探伤,探伤比例:一级焊缝 100%,二级焊缝 20%;三级焊缝只需外观检查。

3. 焊缝符号由引出线和基本符号组成,必要时加上辅助符号,详见《焊缝符号表示法》(GB/T 324—2008)。

4. 对接焊缝(直焊缝)受轴力作用产生正应力计算公式: $\sigma = \frac{N}{l_w t} \leq f_t^w$ 或 f_c^w ; 受弯矩作用产生正应力计算公式: $\sigma_{\max} = \frac{M}{W_x} \leq f_t^w$; 受剪力作用产生剪应力计算公式: $\tau_{\max} = \frac{VS_w}{I_x t_w} \leq f_v^w$; 同一点位,正应力、剪应力共同作用的折算应力计算公式: $\sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau_1^2} \leq 1.1f_t^w$ 。

5. 角焊缝的焊脚尺寸, $1.5\sqrt{t_{\max}} \leq h_f \leq 1.2t_{\min}$, 对于边缘角焊缝同时满足 $h_f \leq t_1$ ($t_1 \leq 6$ mm) 或 $h_f \leq t_1 - (1 \sim 2)$ ($t_1 > 6$ mm); 侧面角焊缝计算长度 $\max\{8h_f, 40\} \leq l_w \leq 60h_f$ 。

6. 角焊缝受剪力作用产生剪应力: $\tau_f = \frac{N}{\sum h_e l_w} \leq f_f^w$; 角焊缝受轴力作用产生正应力: $\sigma_f = \frac{N}{\sum h_e l_w} \leq \beta_f f_f^w$; 角焊缝受弯矩作用产生正应力: $\sigma_f^M = \frac{M}{W_e} \leq \beta_f f_f^w$; 同一点位,正应力、剪应力共同作用的折算应力计算公式: $\sqrt{\left(\frac{\sigma_f^M + \sigma_f^N}{\beta_f}\right)^2 + \tau_f^2} \leq f_f^w$ 。

7. 受轴心力作用角焊缝,角钢肢背分配系数 $0.70 \pm 5\%$ 、肢尖分配系数 $0.30 \pm 5\%$ 。

8. 螺栓规格用 M 和公称直径表示,如 M 16、M 20;螺栓性能等级标号由两部分数字组成,分别表示螺栓材料的公称抗拉强度值和屈强比值,如普通螺栓 4.6、4.8,高强度螺栓 10.9S、8.8S。

9. 普通螺栓受剪连接五种破坏形式:螺杆被剪断、连接件半孔壁挤压破坏、钢板拉(压)断、钢板冲剪破坏、螺杆弯曲破坏。前三个破坏通过计算来避免,钢板冲剪破坏通过最小端距 $2d_0$ 来避免,螺杆弯曲破坏通过螺栓夹紧长度 $\leq (4 \sim 6)d$ 来避免。

螺栓抗剪承载力设计值 $N_v^b = n_v \frac{\pi d^2}{4} f_v^b$ 、端部承压承载力 $N_c^b = d \sum t f_c^b$, 单个受剪螺栓承载力设计值取两者的较小值。

连接件钢材净截面强度验算 $\sigma = \frac{N}{A_n} \leq f$ 。

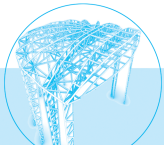
10. 普通螺栓抗拉承载力 $N_t^b = A_e f_t^b$ 。轴力作用下,螺栓均匀受力;弯矩作用下,以弯矩所指最外侧螺栓为转动轴,离转动轴最远受力最大;偏心拉力时,先要判断大小偏心,小偏心转动轴在螺栓群中心位置、大偏心转动轴在弯矩所指最外侧螺栓处。

同时受剪和受拉时,螺栓需满足 $\sqrt{\left(\frac{N_v}{N_v^b}\right)^2 + \left(\frac{N_t}{N_t^b}\right)^2} \leq 1$ 和 $N_v \leq N_c^b$ 。

11. 高强螺栓摩擦型抗剪承载力 $N_v^b = 0.9n_f \mu P$ 。

连接件钢材净截面强度验算(考虑孔前传力) $\sigma = \frac{N'}{A_n} = \left(1 - 0.5 \frac{n_1}{n}\right) \frac{N}{A_n} \leq f$ 。

12. 高强螺栓摩擦型抗拉承载力 $N_t^b = 0.8P$ 。轴力作用下,螺栓均匀受力;弯矩或弯矩和轴力作用下,转动轴均在螺栓群中心位置。



3.1 钢结构连接的种类

钢结构是将钢板和型钢按需要裁剪成各种零件,通过连接将它们组成基本的构件(梁、柱、拉杆、压杆等),然后再将这些基本构件通过连接组成需要的结构。这里,连接设计与基本构件设计一样,在整个钢结构设计中占有重要地位。同时,整个钢结构的制造和安装过程中,连接部分所占的工程量最大。因此,钢结构的连接设计必须安全可靠,选型要合理,既要做到传力明确,又要构造简单,节约钢材,施工方便。

钢结构的连接方法可分为焊接连接、铆钉连接、螺栓连接和轻型钢结构用的紧固件连接等(图 3-1)。



钢结构连接种类及特点



图 3-1 钢结构的连接方法

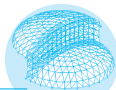
焊接是通过电弧产生高温,将构件连接边缘及焊条金属熔化,冷却后凝成一体,形成牢固连接。焊接的优点是:焊件直接相连,构造简单,不削弱截面,连接刚度大,密闭性好,操作方便,在一定条件下可采取自动化操作。焊接的缺点是:焊缝金属在焊接过程中,要经历一次高温熔化而后冷却凝固的过程,使焊缝及周围热影响区的金属结晶构造及机械性能发生变化,热影响区硬度升高、韧性下降,部分区域性能变脆。同时在升温及冷却过程中,温度分布不均匀还会导致焊接结构内产生焊接残余应力和焊接变形(残余变形),残余应力使结构刚度降低、稳定承载力下降,变形影响安装精度和使用功能。

铆钉连接是利用铆钉将两个或两个以上的元件(一般为板材或型材)连接在一起的一种不可拆卸的静连接,简称铆接。目前铆接逐渐被高强螺栓所取代。

螺栓连接有普通螺栓连接和高强度螺栓连接两种。普通螺栓通常采用 Q235 钢材制成,安装时由人工用普通扳手拧紧螺栓。高强度螺栓用高强度钢材经热处理制成,安装时用特制的扳手拧紧螺栓。拧紧时螺栓杆被迫伸长,栓杆受拉,其拉力称为预拉力。由此产生的反作用力使连接钢板压紧,导致板件之间产生摩阻力,可阻止板件相对滑移。特制的扳手有相应的预拉力指示计,施工时必须保证螺栓预拉力达到规定的数值。

普通螺栓分 A、B、C 三级,其中 A 和 B 级为精制螺栓,在钢结构中较少采用;C 级为粗制螺栓,在钢结构中采用较多。粗制螺栓由圆钢压制而成,为安装方便,其螺栓的孔径比螺栓杆公称直径 d 大 1.5~3 mm。普通螺栓连接受剪时,连接板件之间产生滑动,直到螺栓杆件与板件孔壁接触,最后以螺栓杆被剪断或孔壁被挤压破坏时的荷载为极限承载力。

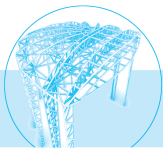
高强度螺栓连接受剪时,按其传力方式可分为摩擦型连接和承压型连接两种。摩擦型



连接受剪时,以剪力达到板件接触面间最大摩擦力为极限状态,即保证在整个使用期间剪力不超过最大摩擦力为准则。这样,板件之间不会发生相对滑移变形,连接板件始终是整体弹性受力,因而连接刚性好,变形小,受力可靠,耐疲劳。承压型连接则允许接触面间摩擦力被克服,从而板件之间产生滑移,直至栓杆与孔壁接触,由栓杆受剪或孔壁受挤压传力直至破坏,此时受力性能与普通螺栓相同。摩擦型连接中螺栓的孔径比螺栓杆公称直径 d 大 $1.5 \sim 2$ mm,承压型连接中孔径比栓杆公称直径大 $1 \sim 1.5$ mm。

螺栓连接的优点是安装方便,可以拆卸,施工需要技术工人少;其缺点是连接构造复杂,连接件需要开孔,构件有削弱,安装需要拼装对孔,增加制造工作量,同时耗费钢材也较多。

普通螺栓连接与高强度螺栓连接的区别是:普通螺栓拧紧时,栓杆中的预拉力很小,且数值不加控制,普通螺栓大量用于工地安装连接,以及需要拆装的结构,如施工用的塔架和临时性结构;而高强度螺栓连接要求板件之间压紧产生摩阻力来阻止滑移,因此施工时要求栓杆预拉力达到规定的数值。和普通螺栓相比,高强度螺栓不仅承载力大,而且可靠性好,多用于重要的构件连接。受剪的高强度螺栓连接中,承压型连接设计承载力显然高于摩擦型连接,但其整体性和刚度相对较差,实际强度储备相对较小,一般多用于承受静力或间接动力荷载的连接。



3.2 焊缝连接常识及标注方法

3.2.1 焊缝连接的常识

焊缝(Welded Seam)是利用焊接热源的高温,将焊条和接缝处的金属熔化连接而成的缝,焊缝金属冷却后,将两个焊件(及焊接连接的构件)连接成整体。



焊缝连接常识

1. 焊接方法及焊条型号

常见的焊接方法有手工电弧焊、自动半自动埋弧电弧焊、 CO_2 气体保护焊、气压焊、电阻点焊、闪光对焊、电渣压力焊、埋弧压力焊。**钢结构施工现场以手工电弧焊为主,钢结构加工厂以自动半自动埋弧电弧焊为主。**

手工电弧焊(简称手弧焊)是以手工操作的焊条和被焊接的焊件作为两个电极,利用焊条与焊件之间的电弧热量熔化金属进行焊接的方法。

焊条型号编制方法:字母“E”表示焊条;前两位数字表示熔敷金属抗拉强度的最小值;第三位数字表示焊条的焊接位置,“0”及“1”表示焊条适用于全位置焊接(平、立、仰、横),“2”表示焊条适用于平焊及平角焊,“4”表示焊条适用于向下立焊;第三位数字表示焊接位置,第四位数字表示药皮类型和电流种类。当仅用三位数字表示时(如 E430),第三位数字同时隐含药皮类型信息;四位数字(如 E4315)中,第三位为“1”(全位置),第四位“5”表示“低氢钠型药皮,直流反接。在第四位数字后附加“R”表示耐吸潮焊条、附加“M”表示耐吸潮和力学性能有特殊规定的焊条、附加“-1”表示冲击性能有特殊规定的焊条。



如 E4300:“E”表示焊条,“43”表示熔敷金属抗拉强度 ≥ 430 MPa,第三位数字“0”表示适用于全位置焊接(平、立、仰、横),第四位数字“0”在三位编号中同时表示药皮类型为纤维素钠型,电流种类为交流或直流正、反接。

埋弧焊是电弧在颗粒状的焊剂层下,并在空腔中燃烧的自动焊接方法。电弧的辐射热使焊件、焊丝和焊剂熔化、蒸发形成气体,排开电弧周围的熔渣形成一封闭空腔,电弧就在这个空腔内稳定燃烧。空腔的上部被一层熔化的焊剂——熔渣膜所包围,这层渣膜不仅可有效保护熔池金属,又使有碍操作的弧光辐射不再射出来,同时熔化的大量焊剂对熔池金属起还原、净化和合金化的作用。

2. 焊缝连接的分类

按焊缝受力特征和构造形式分:坡口焊缝(对接焊缝)和角焊缝。此外还有塞焊缝、槽焊缝和端接焊缝等特殊形式。具体如图 3-2、图 3-3 所示。

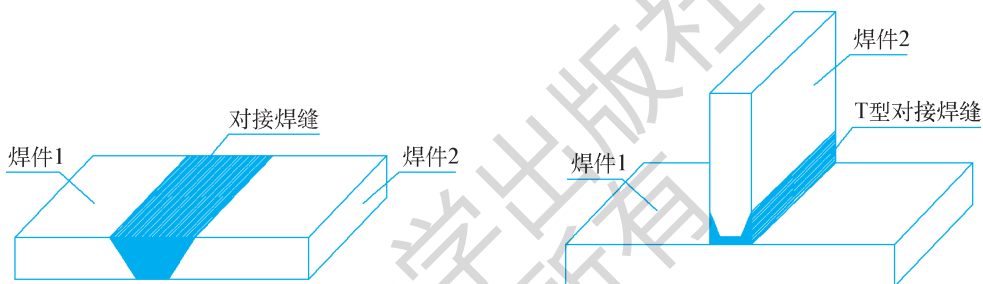


图 3-2 对接焊缝

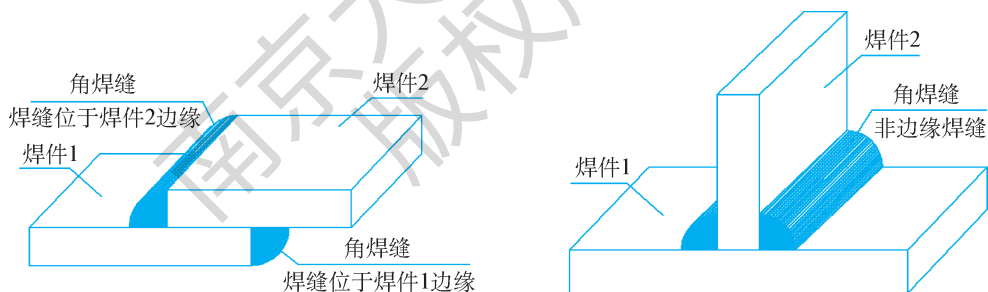


图 3-3 角焊缝

按施工位置分:俯(平)焊、立焊、横焊、仰焊,其中以俯焊施工位置最好,所以焊缝质量也最好,仰焊最差。具体如图 3-4 所示。

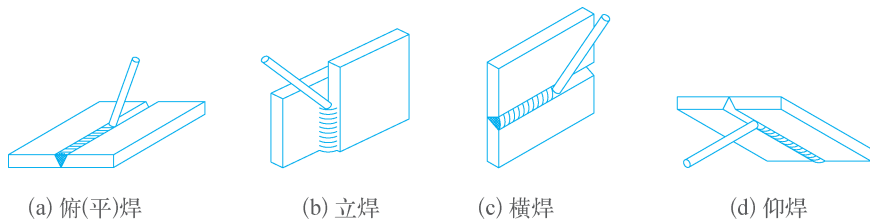


图 3-4 焊缝的不同施工位置

按两焊件的相对位置分:对接、搭接、顶接(T形连接)、角接。具体如图 3-5 所示。

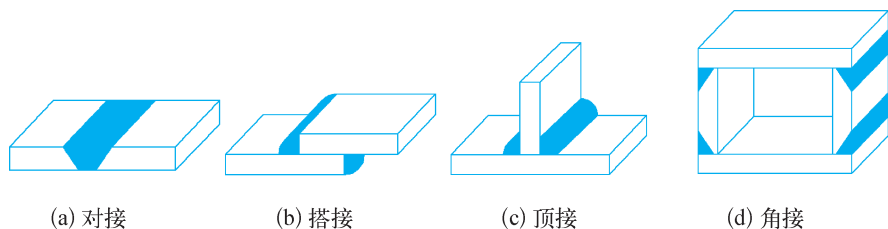
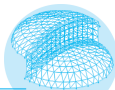


图 3-5 焊件的不同相对位置

3. 焊缝连接的缺陷及质量检验

常见的缺陷形式:裂纹、焊瘤、烧穿、弧坑、气孔、夹渣、咬边、未熔合、未焊透

焊接缺陷是指焊接接头部位在焊接过程中形成的缺陷。

焊接缺陷包括裂纹、焊瘤、烧穿、弧坑、气孔、夹渣、咬边、未熔合、未焊透等,其中弧坑、咬边、焊瘤及表面裂纹属表面缺陷,其他缺陷(包括内部埋藏裂纹)均属埋藏缺陷。

焊缝质量检验方法分:外观检查和内部探伤,内部探伤方法主要有超声波探伤、射线探伤和磁粉探伤、渗透探伤等。

焊缝质量等级相对应分为一级焊缝、二级焊缝和三级焊缝,其中一级焊缝、二级焊缝需经外观检查、超声波探伤,超声波探伤不能对缺陷作出判断时,应采用射线探伤。以确保无外观、内部缺陷;探伤比例:一级焊缝须 100%全部探伤,二级焊缝须抽取 20%进行探伤检验。

三级焊缝只需经外观检查合格即可。

3.2.2 焊缝符号的标注方法

焊缝符号由引出线和基本符号组成,必要时加上辅助符号。

引出线由带箭头的指引线和两条基准线组成,其中一条为实线、一条为虚线,线型均为细线,见图 3-6 所示;基本(图形)符号是画在基准线上线下的符号;辅助符号和补充符号标注在基准线的尾部(右端),主要用于注明焊接方法代号、焊缝尺寸、检验要求等内容。

表示箭头所指位置的焊缝,则基本符号写在实线一侧;表示箭头所指位置对面的焊缝,则基本符号写在虚线一侧,虚线在不需要时可省略,见图 3-7 所示。



焊缝符号标注方法

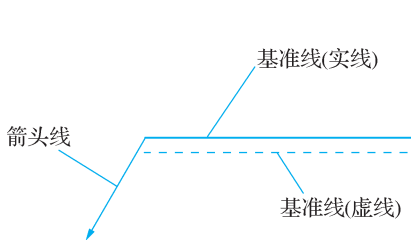


图 3-6 焊缝的引出线

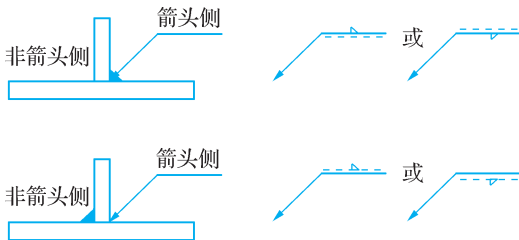


图 3-7 基本符号的表示位置

当为双面对称焊缝时,基准线可不加虚线,如图 3-8 所示。

在同一图形上,当焊缝形式、断面尺寸和辅助要求均相向时,可只选择一处标注焊缝的



符号和尺寸,并加注“相向焊缝符号”,相同焊缝符号为 $3/4$ 圆弧,画在引出线的转折处,如图 3-9 所示。

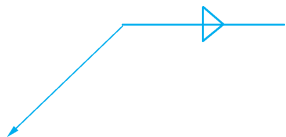


图 3-8 双面对称焊缝的引出线及符号

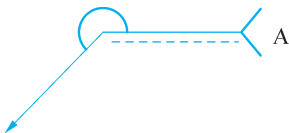


图 3-9 相同焊缝符号

环绕焊件周围的周围焊缝符号用圆圈表示,画在引出线与基准线的转折处,并标注其焊角尺寸 K ,如图 3-10 所表示。

在施工现场进行焊接的焊件其焊缝需标注“现场焊缝”符号,现场焊缝符号为涂黑的三角形旗号,绘在引出线的转折处,如图 3-11 所示。

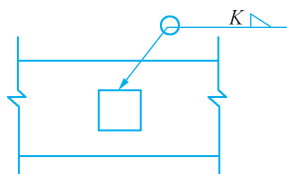


图 3-10 围焊缝符号的标注方法

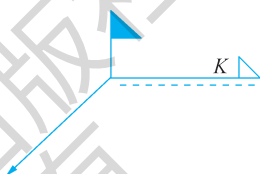


图 3-11 现场焊缝符号

相互焊接的两个焊件中,当只有一个焊件带坡口时(如单面 V 形),引出线箭头指向带坡口的焊件,如图 3-12 所示(上部焊件带坡口)。

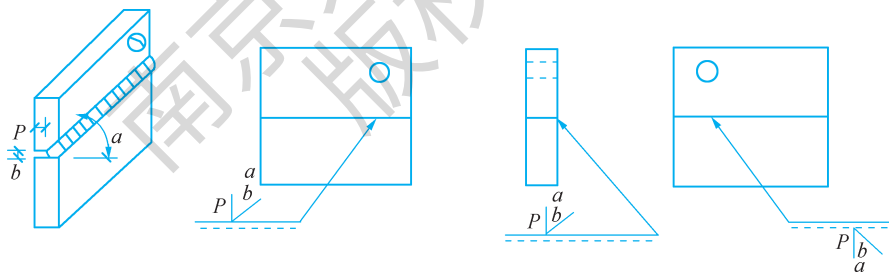


图 3-12 一个焊件带坡口的焊缝标注方法

相互焊接的两个焊件,当为单向带双边不对称坡口焊缝时,引出线箭头指向较大坡口的焊件,如图 3-13 所示($\alpha_1 \geq \alpha_2$)。

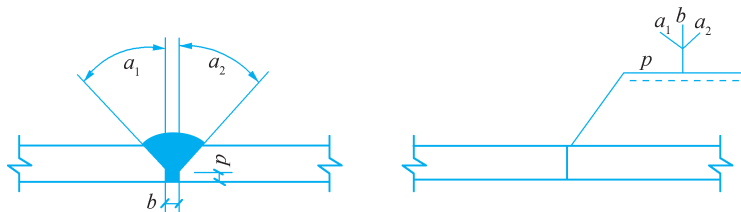
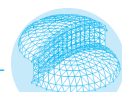
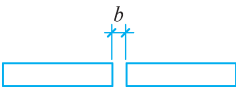
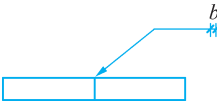
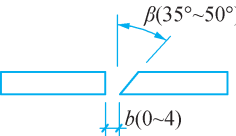
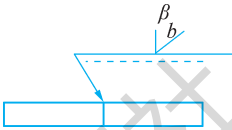
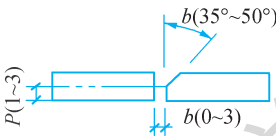
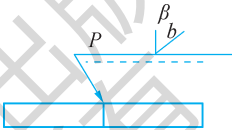
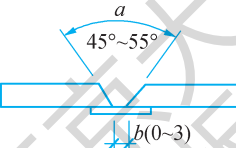
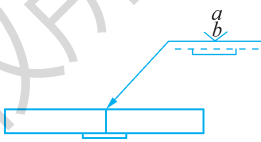
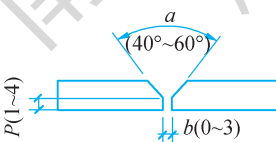
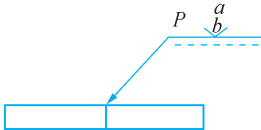
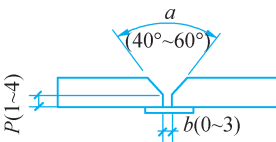
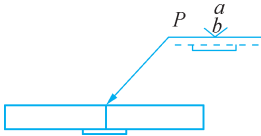
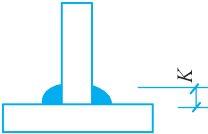
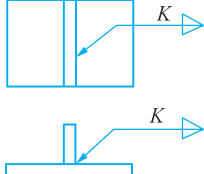


图 3-13 单面不对称坡口焊缝的标注方法



常用焊缝的标注方法见表 3-1。

表 3-1 常用焊缝的标注方法

焊缝名称	型式	标准标注方法	习惯标注方法(或说明)
I 型焊缝			b 焊件间隙(施工图中可不标注)
单边 V 型焊缝			β 施工图中可不标注
带钝边单边 V 型焊缝			P 的高度称钝边, 施工图中可不标注
带垫板 V 型焊缝			a 施工图中可不标注
Y 型焊缝			
带垫板 Y 型焊缝			
T 型接头双面焊缝			

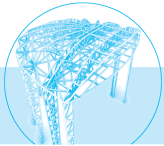


续 表

焊缝名称	型式	标准标注方法	习惯标注方法(或说明)
双面角焊缝			
周围角焊缝			
三面围角焊缝			
L 型围角焊缝			

注：在实际应用中基准线中的虚线经常被省略。

根据焊件的相互位置关系,焊缝的符号标注方法有好多种,本教材仅列举了较为常见的焊缝符号标注方法,较为详细的焊缝符号标注方法可查阅《焊缝符号表示法》(GB/T 324—2008)。



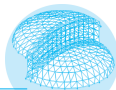
3.3 对接焊缝连接

3.3.1 对接焊缝连接的构造要求

对接焊缝的焊件常需做成坡口,故又叫坡口焊缝。坡口形式与焊件厚度有关,当焊件厚度很小(手工焊 $t \leq 6 \text{ mm}$,埋弧焊 $t \leq 12 \text{ mm}$)时,可用直边缝。对于一般厚度(手工焊 $t = 6 \sim 16 \text{ mm}$,埋弧焊 $t = 12 \sim 20 \text{ mm}$)的焊件可采用具有斜坡口的单边 V



对接焊缝
形式与构造



形或V形焊缝。斜坡口和根部间隙共同组成一个焊条能够运转的施焊空间,使焊缝易于焊透;钝边 p (手工焊 $0\sim 3\text{ mm}$,埋弧焊 $2\sim 6\text{ mm}$)有托住熔化金属的作用。对于较厚的焊件(手工焊 $t>16\text{ mm}$,埋弧焊 $t>20\text{ mm}$),则采用U形、K形和X形坡口(图3-14)。对于V形焊缝和U形缝需对焊缝根部进行补焊。对接焊缝坡口形式的选用,应根据板厚和施工条件按现行标准《气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口》(GB/T 985.1—2008)和《埋弧焊的推荐坡口》(GB/T 985.2—2008)的要求进行。

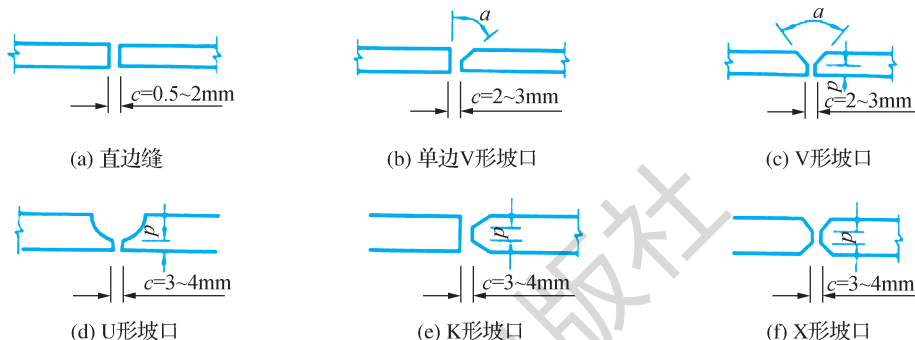


图3-14 对接焊缝的坡口形式

在对接焊缝的拼接处,当焊件的宽度不同或厚度相差 4 mm 以上时,应分别在宽度方向或厚度方向从一侧或两侧做成坡度不大于 $1:2.5$ 的斜角(图3-15),以使截面过渡平缓,减小应力集中。

在焊缝的起灭弧处,常会出现弧坑等缺陷,这些缺陷对承载力影响极大,故焊接时一般应设置引弧板和引出板(图3-16),焊后割除。对受静力荷载的结构设置引弧(出)板有困难时,允许不设置引弧(出)板,此时,可令焊缝计算长度等于实际长度减 $2t$ (此处 t 为较薄焊件厚度)。

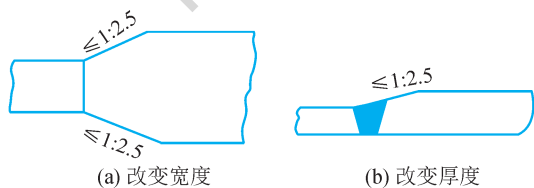


图3-15 钢板拼接

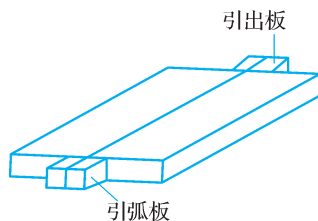


图3-16 用引弧线和引出板焊接

3.3.2 对接焊缝连接的计算

对接焊缝的强度与所用钢材的牌号、焊条型号及焊缝质量的检验标准等因素有关。

如果焊缝中不存在任何缺陷,焊缝金属的强度是高于母材的。但由于焊接技术问题,焊缝中可能有气孔、夹渣、咬边、未焊透等缺陷。实验证明,焊接缺陷对受压、受剪的对接焊缝影响不大,故可认为受压、受剪的对接焊缝与母材强度相等,但受拉的对接焊缝对缺陷甚为敏感。当缺陷面积与焊件截面积之比超过 5% 时,对接焊缝的抗拉强度将明显下降。由于三级检验的焊缝允许存在的缺陷较多,故其抗拉强度为母材强度的 85% ,而一、二级检验的焊



缝的抗拉强度可认为与母材强度相等。

由于对接焊缝是焊件截面的组成部分,焊缝中的应力分布情况基本上与焊件原来的情况相同,故计算方法与构件的强度计算一样。

1. 轴心受力对接焊缝的计算

如图 3-17 所示为对接焊缝受垂直于焊缝长度方向的轴心力(拉力或压力),其焊缝强度按下式计算:



对接焊缝受轴力计算

$$\sigma = \frac{N}{l_w \cdot t} \leq f_t^w \text{ 或 } f_c^w \quad (3-1)$$

式中: N ——轴心拉力或压力;

l_w ——焊缝的计算长度,当采用引弧板时,取焊缝的实际长度;当未采用引弧板时,每条焊缝取实际长度减去 $2t$;

t ——在对接接头中取连接件的较小厚度,T形接头取腹板的厚度;

f_t^w 、 f_c^w ——对接焊缝的抗拉、抗压强度设计值,按附录 2 采用。

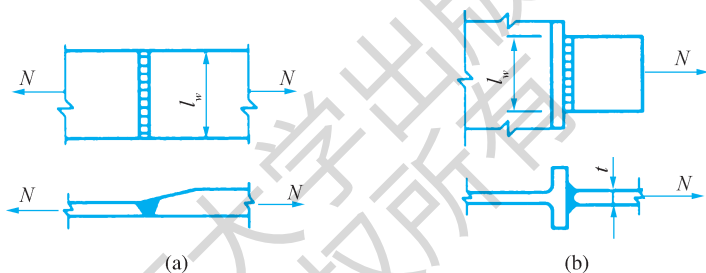


图 3-17 直对接焊缝

按施工及验收规范的规定,对接焊缝施焊时均应加引弧板,以避免焊缝两端的起落弧缺陷,这样,焊缝计算长度应取为实际长度。但在某些特殊情况下,如 T 形接头,当加引弧板较为困难而未加时,则计算每条焊缝长度应减去 $2t$ 。因此,在一般加引弧板施焊的情况下,所有受压、受剪的对接焊缝以及受拉的一、二级焊缝,均与母材等强,不用计算,只有受拉的三级焊缝才需要进行计算。

当直焊缝不能满足强度要求时,可采用斜对接焊缝。如图 3-18 所示的轴心受拉斜焊缝,可按下列公式计算:

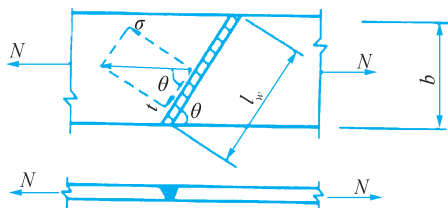


图 3-18 斜对接焊缝

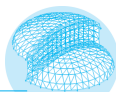
$$\sigma = \frac{N \sin \theta}{l_w t} \leq f_t^w \quad (3-2)$$

$$\tau = \frac{N \cos \theta}{l_w t} \leq f_v^w \quad (3-3)$$

式中: l_w ——焊缝的计算长度,加引弧板时, $l_w = b / \sin \theta$;不加引弧板时, $l_w = b / \sin \theta - 2t$ 。

f_v^w ——对接焊缝的抗剪强度设计值。

当斜焊缝倾角 $\theta \leq 56.3^\circ$, 即 $\tan \theta \leq 1.5$ 时,可认为与母材等强,不用计算。



斜对接焊缝在 20 世纪 50 年代用得较多,由于消耗材料较多,施工也不方便,已逐渐被摒弃不用,而代之以直对接焊缝。直缝一般加引弧板施焊,若抗拉强度不满足要求,可采用二级检验标准,或将接头位置挪至内力较小处。

例题 3.1 试验算图 3-19 所示钢板的对接焊缝强度。已知 $l=550\text{ mm}$, $t=22\text{ mm}$, 轴向力设计值为 $N=2300\text{ kN}$, 钢材为 Q235B, 手工焊, 焊条为 E43 型, 三级检验标准的焊缝, 施焊时未加引弧板。 θ 分别考虑为 90° (直焊缝) 和 56° (斜焊缝) 两种情形。

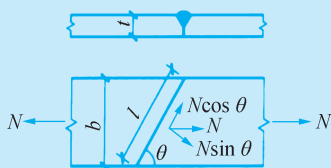


图 3-19 例题 3.1 图

查附录 2 得: 焊缝抗拉强度设计值 $f_t^w = 175\text{ N/mm}^2$ 。

不采用引弧板: $l_w = 550 - 2 \times 22 = 506\text{ mm}$

$$\sigma = \frac{N}{l_w t} = \frac{2300 \times 10^3}{506 \times 22} = 206.61\text{ N/mm}^2 > f_t^w \text{ (不满足要求)}$$

改用斜焊缝: 取 $\tan \theta = 1.5$, 即 $\theta = 56^\circ$, 则焊缝长度为

$$l_w = \frac{l}{\sin \theta} - 2t = \frac{550}{\sin 56^\circ} - 2 \times 22 = 620\text{ mm}$$

$$\sigma = \frac{N \sin \theta}{l_w t} = 139.79\text{ N/mm}^2 < f_t^w = 175\text{ N/mm}^2$$

$$\tau = \frac{N \cos \theta}{l_w t} = 94.29\text{ N/mm}^2 < f_v^w = 120\text{ N/mm}^2$$

满足要求。

这就说明当 $\tan \theta \leq 1.5$ 时, 焊缝强度能够保证, 可不必验算。

2. 承受弯矩和剪力联合作用的对接焊缝

如图 3-20(a) 所示对接接头受弯矩和剪力的联合作用, 由于焊缝截面是矩形, 正应力与剪应力图形分别为三角形与抛物线形, 其最大值应分别满足下列强度条件:



对接焊缝受
弯矩、剪力计算

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W_x} \leq f_t^w \quad (3-4)$$

$$\tau_{\max} = \frac{VS_w}{I_x t_w} \leq f_v^w \quad (3-5)$$

式中: W_x ——焊缝的截面模量, $W_x = I_x / y$, y 为最大正应力点至焊缝中和轴的距离;

S_w ——焊缝截面的应力计算点以上或以下截面对中和轴的面积距;

t_w ——钢板或腹板厚度;

I_x ——焊缝截面的惯性矩, 对于矩形截面为 $I_x = \frac{bh^3}{12}$ 。

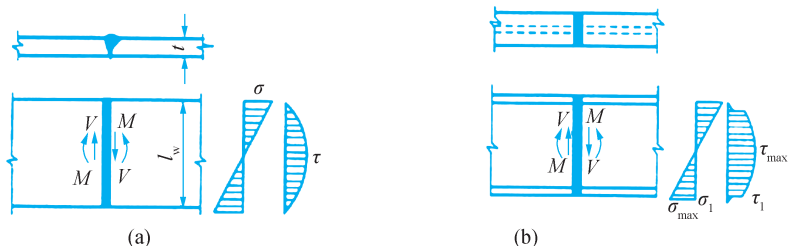


图 3-20 对接焊缝受弯矩和剪力联合作用

如图 3-20(b)所示是工字形截面梁的接头,采用对接焊缝,除应分别验算最大正应力和剪应力外,对于同时受有较大正应力和较大剪应力处,例如腹板与翼缘的交接点处,还应按下式验算折算应力:

$$\sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau_1^2} \leq 1.1f_t^w \quad (3-6)$$

式中: σ_1 、 τ_1 ——验算点处的焊缝正应力和剪应力。

系数 1.1 为考虑到最大折算应力只在局部出现,而将强度设计值适当提高的系数。

3. 承受轴心力、弯矩和剪力联合作用的对接焊缝

当轴心力与弯矩、剪力联合作用时,轴心力和弯矩在焊缝中引起的正应力应进行叠加,剪应力仍按式(3-5)验算,折算应力仍按式(3-6)验算。

除考虑焊缝长度是否减少,焊缝强度是否折减外,对接焊缝的计算方法与母材的强度计算完全相同。

例题 3.2 某 8 m 跨度简支梁的截面和荷载(含梁自重在内的设计值)如图 3-21 所示。在距支座 2.4 m 处有翼缘和腹板的拼接连接,试设计其拼接的对接焊缝。已知钢材为 Q235,采用 E43 型焊条,手工焊,三级质量标准,施焊时采用引弧板。

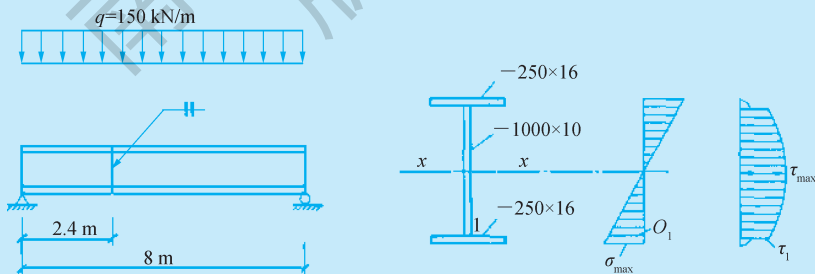


图 3-21 例题 3.2 图

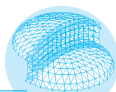
解: (1) 距支座 2.4 m 处的内力计算

$$M = qab/2 = 150 \times 2.4 \times (8 - 2.4)/2 = 1008 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V = q(1/2 - a) = 150 \times (8/2 - 2.4) = 240 \text{ kN}$$

(2) 焊缝计算截面的几何特征值计算

$$I_x = \frac{10 \times 1000^3}{12} + 2 \times \left(\frac{250 \times 16^3}{12} + 250 \times 16 \times 508^2 \right) = 2898 \times 10^6 \text{ mm}^4$$



$$W_x = \frac{I_x}{y} = \frac{2898 \times 10^6}{516} = 5.6163 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$S_1 = 250 \times 16 \times 508 = 2.032 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$S_w = 250 \times 16 \times 508 + 500 \times 10 \times 250 = 3.282 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

(3) 焊缝强度计算

由附录2查得: $f_t^w = 185 \text{ N/mm}^2$, $f_v^w = 125 \text{ N/mm}^2$

① 最大正应力: $\sigma_{\max} = \frac{M}{W_x} = \frac{1008 \times 10^6}{5.6163 \times 10^6} = 179.5 \text{ N/mm}^2 \leq f_t^w = 185 \text{ N/mm}^2$, 满足要求。

② 最大剪应力: $\tau_{\max} = \frac{VS_w}{I_x t_w} = \frac{240 \times 10^3 \times 3.282 \times 10^6}{2898 \times 10^6 \times 10} = 27.2 \text{ N/mm}^2 \leq f_v^w = 125 \text{ N/mm}^2$, 满足要求。

③ 翼缘与腹板交接处折算应力

$$\sigma_1 = \frac{M}{I_x} y_1 = \frac{1008 \times 10^6}{2898 \times 10^6} \times 500 = 173.9 \text{ N/mm}^2$$

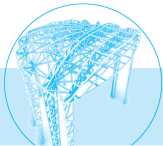
$$\tau_1 = \frac{VS_1}{I_x t_w} = \frac{240 \times 10^3 \times 2.032 \times 10^5}{2898 \times 10^6 \times 10} = 16.8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau_1^2} = \sqrt{173.9^2 + 3 \times 16.8^2} = 176.3 \text{ N/mm}^2 \leq 1.1f_t^w = 1.1 \times 185 = 203.5 \text{ N/mm}^2$$

折算应力满足要求。

故由以上计算可知,采用直接拼接满足要求。

为使受力良好,实际设计中通常将三块板的拼接错开布置。



3.4 角焊缝连接

3.4.1 角焊缝的形式



角焊缝形式与构造

角焊缝是最常用的焊缝。角焊缝按其与作用力的关系可分为:焊缝长度方向与作用力垂直的正面角焊缝;焊缝长度方向与作用力平行的侧面角焊缝以及斜焊缝。按其截面形式可分为直角角焊缝(图3-22)和斜角角焊缝(图3-23)。

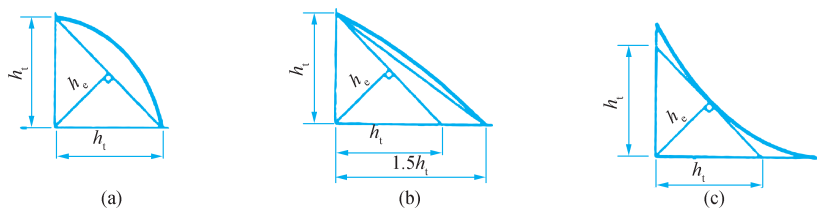


图 3-22 直角角焊缝截面

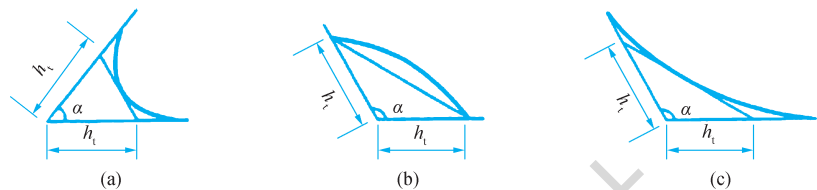


图 3-23 斜角角焊缝截面

直角角焊缝通常做成表面微凸的等腰直角三角形截面[图 3-22(a)]。在直接承受动力荷载的结构中,正面角焊缝的截面常采用如图 3-22(b)所示的面式,侧面角焊缝的截面则作成凹面式[图 3-22(c)]。图中的 h_f 为焊角尺寸。

两焊脚边的夹角 $\alpha > 90^\circ$ 或 $\alpha < 90^\circ$ 的焊缝称为斜角角焊缝(图 3-23)。斜角角焊缝常用于钢漏斗和钢管结构中。对于夹角 $\alpha > 135^\circ$ 或 $\alpha < 60^\circ$ 的斜角角焊缝,除钢管结构外,不宜用作受力焊缝。

3.4.2 角焊缝的构造要求

(1) **最小焊脚尺寸。**如果板件厚度较大而焊缝焊脚尺寸过小,则施焊时焊缝冷却速度过快,可能产生淬硬组织,易使焊缝附近主体金属产生裂纹。因此,《标准》规定角焊缝的最小焊脚尺寸 $h_{f\min}$ 应满足下式要求[图 3-24(a)]:

$$h_{f\min} \geq 1.5\sqrt{t_{\max}}$$

此处 $t_{\max}$ 为较厚焊件的厚度(mm)。自动焊的热量集中,因而熔深较大,故最小焊脚尺寸 $t_{\max}$ 可较上式减小 1 mm。 T 形连接单面角焊缝可靠性较差, $h_{f\min}$ 应增加 1 mm。当焊件厚度等于或小于 4 mm 时,则 $h_{f\min}$ 应与焊件同厚。

(2) **最大焊脚尺寸。**角焊缝的 h_f 过大,焊接时热量输入过大,焊缝收缩时将产生较大的焊接残余应力和残余变形,且热影响区扩大易产生脆裂,较薄焊件易烧穿。板件边缘的角焊缝与板件边缘等厚时,施焊时易产生咬边现象。因此,角焊缝的 $h_{f\max}$ 应符合下列规定[图 3-24(a)]:

$$h_{f\max} \leq 1.2t_{\min}$$

式中: $t_{\min}$ 为较薄焊件厚度。

对板件边缘(厚度为 t_1)的角焊缝尚应符合下列要求[图 3-24(b)]:

- ① 当 $t_1 > 6 \text{ mm}$ 时, $h_{f\max} \leq t_1 - (1 \sim 2) \text{ mm}$;
- ② 当 $t_1 \leq 6 \text{ mm}$ 时, $h_{f\max} \leq t_1$ 。

(3) **最小计算长度。**角焊缝的焊缝长度过短,焊件局部受热严重,且施焊时起落弧坑相距过近,再加上一些可能产生的缺陷使焊缝不够可靠。因此,规定角焊缝的最小计算长度

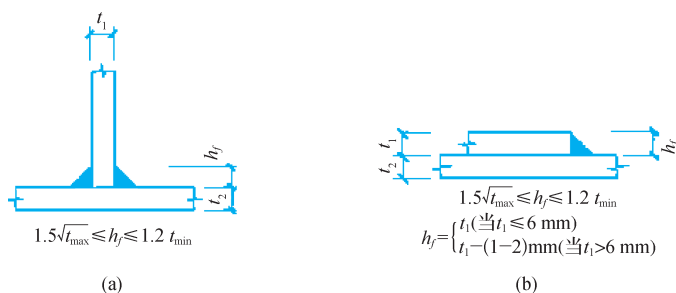
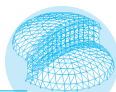


图 3-24 角焊缝的焊角尺寸

$l_w \geq 8h_f$, 且不小于 40 mm。

(4) **侧面角焊缝的最大计算长度。**侧缝沿长度方向的剪应力分布很不均匀, 两端大而中间小, 且随焊缝长度与其焊脚尺寸之比值的增大而更为严重。当焊缝过长时, 其两端应力可能达到极限, 而中间焊缝却未充分发挥承载力。因此, 侧面角焊缝的最大计算长度取 $l_w \leq 60h_f$ 。

当侧缝的实际长度超过上述规定数值时, 超过部分在计算中不予考虑; 若内力沿侧缝全长分布时则不受此限, 例如工字形截面或梁的翼缘与腹板的角焊缝连接等。

(5) 在搭接连接中, 为减小因焊缝收缩产生过大的焊接残余应力及因偏心产生的附加弯矩, 要求搭接长度 $l \geq 5t_{\min}$, 且不小于 25 mm (图 3-25)。

(6) 板件的端部仅用两侧缝连接时 (图 3-36), 为避免应力传递过于弯折而致使板件应力过于不均匀, 应使焊缝长度 $l_w \geq b$; 同时, 为避免因焊缝收缩引起板件变形拱曲过大, 应满足 $b \leq 16t$ (当 $t > 12$ mm 时) 或 200 mm (当 $t \leq 12$ mm 时)。若不满足此规定则应加焊端缝。

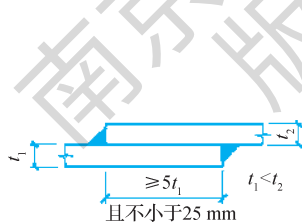


图 3-25 搭接长度要求

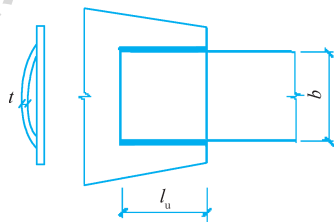


图 3-26 仅用两侧缝连接的构造要求

(7) 当角焊缝的端部在构件的转角处时, 为避免起落弧缺陷发生在此应力集中较严重的转角处, 宜作长度为 $2h_f$ 的绕角焊 (图 3-27), 转角处 (包括围焊缝的转角处) 必须连续施焊, 以改善连接的受力。

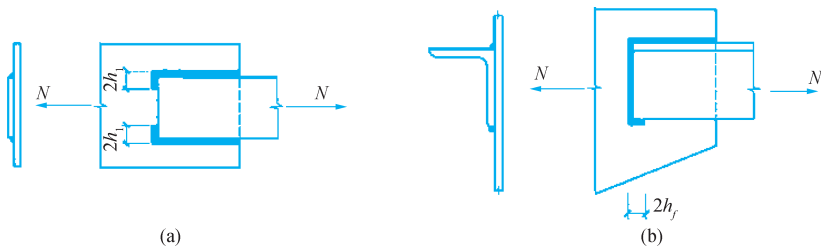


图 3-27 角焊缝的绕角焊



3.4.3 角焊缝的计算

1. 矩形盖板承受轴心力作用时角焊缝的计算

当作用力(拉力、压力、剪力)通过角焊缝群形心时,认为焊缝沿长度方向的应力均匀分布。由于作用力与焊缝长度方向间关系的不同,故在应用角焊缝的一般强度计算表达式时分别为:

(1) 侧面角焊缝或作用力平行于焊缝长度方向的角焊缝

$$\tau_f = \frac{N}{h_e \sum l_w} \leq f_f^w \quad (3-7)$$

式中: τ_f ——按焊缝计算截面计算,平行于焊缝长度方向的剪应力;

f_f^w ——角焊缝的强度设计值,按附录 2 采用;

h_e ——角焊缝的有效焊脚尺寸, $h_e = 1/\sqrt{2} h_f = 0.7 h_f$ 。

(2) 正面角焊缝或作用力与焊缝长度方向垂直的角焊缝

$$\sigma_f = \frac{N}{h_e \sum l_w} \leq \beta_f f_f^w \quad (3-8)$$

式中: σ_f ——焊缝计算截面计算,垂直于焊缝长度方向的应力;

β_f ——正面角焊缝的强度设计值提高系数,对承受静力或间接承受动力荷载的结构取 $\beta_f = 1.22$;对直接承受动力荷载的结构构件取 $\beta_f = 1.0$ 。

(3) 斜焊缝或作用力与焊缝长度方向斜交成 θ 的角焊缝

首先将外力分解到与焊缝平行和垂直的方向,分别算出各方向的应力,再按下式进行计算:

$$\sqrt{\left(\frac{N \sin \theta}{\beta_f h_e l_w}\right)^2 + \left(\frac{N \cos \theta}{h_e l_w}\right)^2} \leq f_f^w \quad (3-9)$$

对于承受静力荷载和间接承受动力荷载的情况,若将 $\beta_f = 1.22$ 和 $\cos^2 = 1 - \sin^2$ 代入式 (3-9) 中,整理后可得:

$$\frac{N}{h_e \sum l_w} \sqrt{1 - \frac{1}{3} \sin^2 \theta} \leq f_f^w \quad (3-10)$$

$$\text{取} \quad \beta_{f\theta} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{3} \sin^2 \theta}} \quad (3-11)$$

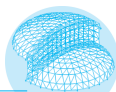
$$\text{则为} \quad \frac{N}{h_e \sum l_w} \leq \beta_{f\theta} f_f^w \quad (3-12)$$

式中: $\beta_{f\theta}$ ——斜向角焊缝强度设计值提高系数,对承受静力或间接承受动力荷载的结构,按式 (3-12) 计算;对直接承受动力荷载的结构取 $\beta_{f\theta} = 1.0$;

θ ——轴心力与焊缝长度方向的夹角。



角焊缝受轴力
计算(矩形盖板)



(4) 周围焊缝

由侧面、正面和斜向各种角焊缝组成的周围焊缝,假设破坏时各部分角焊缝都同时达到各自的极限强度,则可按下式计算:

$$\frac{N}{\sum (\beta_{f\theta} h_e l_w)} \leq f_f^w \quad (3-13)$$

例题 3.3 试设计如图 3-28(a)所示一双盖板的对接接头。钢板截面为 250×14 , 盖板截面为 $2-200 \times 10$, 承受轴心力设计值 700 kN (静力荷载), 钢材为 Q235, 焊条 E43 型, 手工焊。

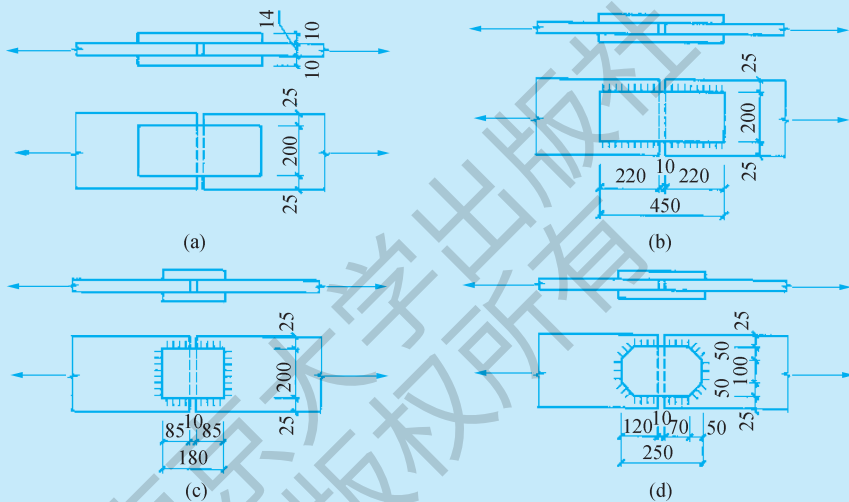


图 3-28 例题 3.3 图 (单位: mm)

解: 确定角焊缝的焊脚尺寸 h_f :

$$\begin{aligned} \text{取 } h_f &= 8 \text{ mm} \leq t - (1 \sim 2) \text{ mm} = 10 - (1 \sim 2) \text{ mm} = 8 \sim 9 \text{ mm} \\ &\leq 1.2 t_{\min} = 1.2 \times 10 = 12 \text{ mm} \\ &> h_{f\min} = 1.5 \sqrt{t_{\max}} = 1.5 \times \sqrt{14} = 5.6 \text{ mm} \end{aligned}$$

由附录 2 查得角焊缝强度设计值 $f_f^w = 160 \text{ N/mm}^2$ 。

(1) 采用侧面角焊缝连接, 如图 3-28(b)所示。

因用双盖板, 接头一例共有 4 条焊缝, 每条焊缝所需的计算长度为:

$$l_w = \frac{N}{4 h_e f_f^w} = \frac{700 \times 10^3}{4 \times 0.7 \times 8 \times 160} = 195.3 \text{ mm}, \text{取 } l_w = 200 \text{ mm}$$

验算构造 $l_w = 200 \text{ mm} < 60 h_f = 60 \times 8 = 480 \text{ mm}$

$$> 8 h_f = 8 \times 8 = 64 \text{ mm}$$

$$> b = 200 \text{ mm (仅有侧面角焊缝)}$$



$$l = 200 + 2 \times 8 = 216 \text{ mm} > 5t_{\min} = 50 \text{ mm}$$

$$t = 10 \text{ mm} < 12 \text{ mm} \text{ 且 } b = 200 \text{ mm (仅有侧面角焊缝)}$$

满足构造要求。

故盖板总长: $L = (200 + 2 \times 8) \times 2 + 10 = 442 \text{ mm}$, 取 $L = 450 \text{ mm}$ 。

(2) 采用三面围焊, 如图 3-28(c) 所示。

正面角焊缝所能承受的内力 N' 为:

$$N' = 2 \times 0.7h_f l_w \beta_f f_f^w = 2 \times 0.7 \times 8 \times 200 \times 1.22 \times 160 = 437284 \text{ N}$$

接头一侧所需侧缝的计算长度为:

$$l'_w = \frac{N - N'}{4h_e f_f^w} = \frac{700000 - 437284}{4 \times 0.7 \times 8 \times 160} = 73.3, \text{ 取 } 75 \text{ mm}$$

$$\text{验算构造 } l_w = 75 \text{ mm} < 60h_f = 60 \times 8 = 480 \text{ mm}$$

$$> 8h_f = 8 \times 8 = 64 \text{ mm}$$

$$l = 75 + 8 = 83 \text{ mm} > 5t_{\min} = 50 \text{ mm}$$

满足构造要求。

盖板总长: $L = (75 + 8) \times 2 + 10 = 176 \text{ mm}$, 取 180 mm 。

(3) 采用菱形盖板, 如图 3-28(d)。

为使传力较平顺和减小拼接盖板四角处焊缝的应力集中, 可将拼接盖板做成菱形。连接焊缝由三部分组成: ① 两条端缝 $l_{w1} = 100 \text{ mm}$; ② 四条侧缝 $l_{w2} = 70 - 8 = 62 \text{ mm}$;

③ 四条斜缝 $l_{w3} = \sqrt{50^2 + 50^2} = 71 \text{ mm}$ 。其承载力分别为:

$$N_1 = \beta_f h_e \sum l_w f_f^w = 1.22 \times 0.7 \times 8 \times 2 \times 100 \times 160 = 218624 \text{ N}$$

$$N_2 = h_e \sum l_w f_f^w = 0.7 \times 8 \times 62 \times 4 \times 160 = 222208 \text{ N}$$

斜焊缝因 $\theta = 45^\circ$, 算得 $\beta_{f\theta} = 1.1$, 则

$$N_3 = h_e \sum l_w \beta_{f\theta} f_f^w = 0.7 \times 8 \times 4 \times 71 \times 1.1 \times 160 = 279910 \text{ N}$$

连接盖板一侧共能承受的内力为: $N_1 + N_2 + N_3 = 720.7 \text{ kN} > 700 \text{ kN}$

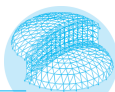
所需拼接盖板总长: $L = (50 + 70) \times 2 + 10 = 250 \text{ mm}$, 比采用三面围焊的矩形盖板的长度有所增加, 但改善了连接的工作性能。

2. 角钢连接的角焊缝受轴力作用计算

如图 3-29(a) 所示为一钢屋架(桁架)的结构简图, 这类桁架的杆件常采用双角钢组成的 T 形截面, 桁架节点处设一块钢板作为节点板, 各个双角钢杆件的端部用贴角焊缝焊在节点板上, 使各杆所受轴力通过焊缝传到节点板上, 形成一个平衡的汇交力系, 如图 3-29(b) 所示。由于双角钢 T 形截面的重心布置成与桁架的轴线重合, 因此保证了各杆成为轴心受力杆件。角钢与节点板用角焊缝连接可采用三种形式: 两个侧面焊缝、三面围焊和 L 形围焊。为避免偏心受力, 布置在角钢肢背和角



角焊缝受轴力
计算(角钢)



钢肢尖的焊缝重心,应与角钢杆件的重心也就是桁架的轴线重合。

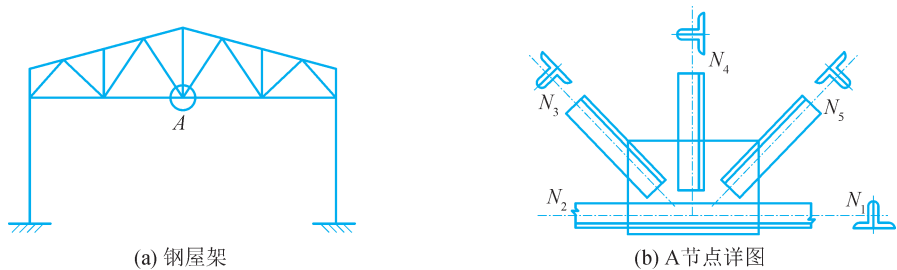


图 3-29 钢屋架节点示意图

(1) 用两侧面角焊缝连接,如图 3-30(a)所示

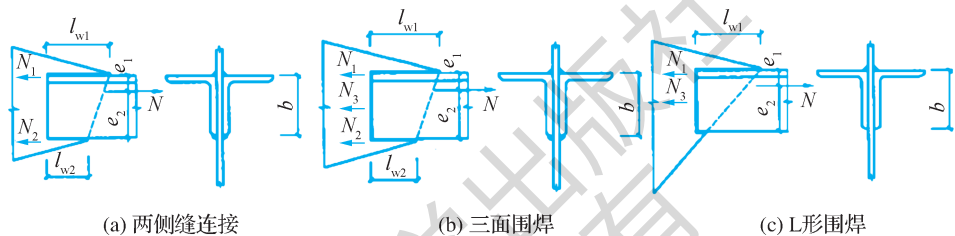


图 3-30 角钢与钢板的角焊缝连接

由于角钢截面重心轴线到肢背和肢尖的距离不相等,靠近重心轴线的肢背焊缝承受较大的内力。设 N_1 、 N_2 分别为角钢肢背和肢尖焊缝承受的内力,由平衡条件 $\sum N = 0$ 可得:

$$N_1 = \frac{e_2}{e_1 + e_2} \times N = \frac{e_2}{b} \times N = K_1 N \quad (3-14)$$

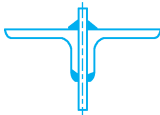
$$N_2 = \frac{e_1}{e_1 + e_2} \times N = \frac{e_1}{b} \times N = K_2 N \quad (3-15)$$

式中: e_1 、 e_2 ——角钢与连接板贴合胶重心轴线到肢背与肢尖的距离;
 b ——角钢与连接板连接的端部宽度;
 K_1 、 K_2 ——角钢肢背与肢尖焊缝的内力分配系数,实际设计时,可按表 3-2 近似值采用。

表 3-2 角钢侧面角焊缝内力分配系数

角钢类型	连接情况	分配系数	
		角钢肢背 K_1	角钢肢尖 K_2
等边		0.70	0.30

续 表

角钢类型	连接情况	分配系数	
		角钢肢背 K_1	角钢肢尖 K_2
不等边(短肢相连)		0.75	0.25
不等边(长肢相连)		0.65	0.35

算得 N_1 、 N_2 后,根据构造要求确定肢背和肢尖的焊脚尺寸 h_{f1} 和 h_{f2} (一般取 $h_{f1} = h_{f2}$), 然后分别计算角钢肢背和肢尖焊缝所需的计算长度:

$$\sum l_{w1} = \frac{N_1}{0.7h_{f1}f_f^w} \tag{3-16}$$

$$\sum l_{w2} = \frac{N_2}{0.7h_{f2}f_f^w} \tag{3-17}$$

算出 $\sum l_{w1}$ 、 $\sum l_{w2}$ 后须对焊缝的长度是否满足构造要求进行验算,以下部分相同。
 (2) 采用三面围焊,如图 3-30(b)所示
 根据构造要求,首先选取端缝的焊脚尺寸 h_f ,并计算其所能承受的内力(设截面为双角钢组成的 T 形截面)

$$N_3 = 2 \times 0.7 \times h_f b \beta_f f_f^w \tag{3-18}$$

由平衡条件可得:

$$N_1 = K_1 N - \frac{N_3}{2} \tag{3-19}$$

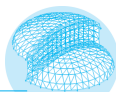
$$N_2 = K_2 N - \frac{N_3}{2} \tag{3-20}$$

同样, N_1 、 N_2 可由分别计算角钢肢背和肢尖的侧面角焊缝。
 (3) 采用 L 形围焊,如图 3-30(c)所示
 L 形围焊中由于角钢肢尖无焊缝,故可令式(3-20)中的 $N_2 = 0$, 则可得

$$N_3 = 2K_2 N \tag{3-21}$$

$$N_1 = N - N_3 = (1 - 2K_2) N \tag{3-22}$$

求得 N_3 和 N_1 后,可分别计算出角钢正面角焊缝和肢背侧面角焊缝。



例题 3.4 如图 3-31 所示角钢与连接板的三面围焊连接中,轴心力设计值 $N = 800 \text{ kN}$ (静力荷载),角钢为 $2\text{L}110 \times 70 \times 10$ (长肢相连),连接板厚度为 12 mm ,钢材为 Q235,焊条为 E43 型,手工焊。试确定所需焊脚尺寸和焊缝长度。

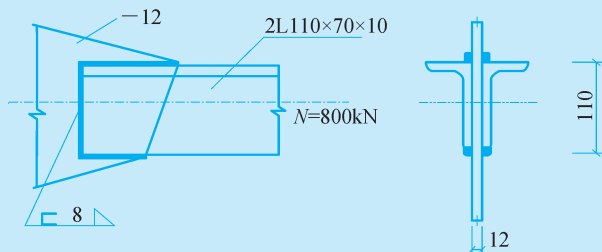


图 3-31 例题 3.4 图 (单位 mm)

解: 设角钢肢背、肢尖及端部焊脚尺寸相同, 取

$$\begin{aligned} h_f &= 8 \text{ mm} \leq t - (1 \sim 2) \text{ mm} = 10 - (1 \sim 2) \text{ mm} \\ &= 8 \sim 9 \text{ mm} \leq 1.2t_{\min} = 1.2 \times 10 = 12 \text{ mm} > h_{f\min} \\ &= 1.5\sqrt{t_{\max}} = 1.5 \times \sqrt{12} = 5.2 \text{ mm} \end{aligned}$$

由附录 2 查得角焊缝强度设计值 $f_f^w = 160 \text{ N/mm}^2$

端焊缝承受的内力: $N_3 = 2 \times 0.7 \times h_f b \beta_f f_f^w = 2 \times 0.7 \times 8 \times 110 \times 1.22 \times 160 = 240 \text{ kN}$
肢背和肢尖承受的内力分别为:

$$\begin{aligned} N_1 &= K_1 N - \frac{N_3}{2} = 0.65 \times 800 - \frac{240}{2} = 400 \text{ kN} \\ N_2 &= K_2 N - \frac{N_3}{2} = 0.35 \times 800 - \frac{240}{2} = 160 \text{ kN} \end{aligned}$$

肢背和肢尖焊缝计算长度为:

$$\begin{aligned} l_{w1} &= \frac{N_1}{2 \times 0.7 \times h_f f_f^w} = \frac{400 \times 10^3}{2 \times 0.7 \times 8 \times 160} = 223 \text{ mm} \\ l_{w2} &= \frac{N_2}{2 \times 0.7 \times h_f f_f^w} = \frac{160 \times 10^3}{2 \times 0.7 \times 8 \times 160} = 89 \text{ mm} \end{aligned}$$

验算构造

$$\begin{aligned} l_w &< 60h_f = 60 \times 8 = 480 \text{ mm} \\ &> 8h_f = 8 \times 8 = 64 \text{ mm} \\ l &= l_w + h_f > 5t_{\min} = 50 \text{ mm} \end{aligned}$$

故肢背和肢尖焊缝需要的实际长度为:

$$\begin{aligned} l_1 &= 223 + 8 = 231 \text{ mm}, \text{取 } 235 \text{ mm} \\ l_2 &= 89 + 8 = 97 \text{ mm}, \text{取 } 100 \text{ mm} \end{aligned}$$



3. 在弯矩、剪力和轴心力共同作用下的 T 形连接角焊缝的计算

如图 3-32 所示为一同时承受轴心力 N 、弯矩 M 和剪力 V 作用的 T 形连接。



角焊缝受弯矩、
剪力、轴力计算

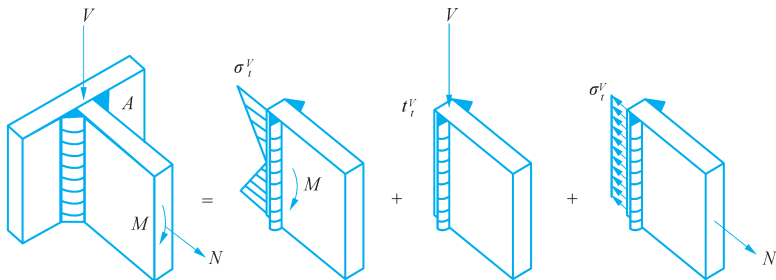


图 3-32 弯矩、剪力和轴心力作用时 T 形连接角焊缝

焊缝的 A 点为最危险点。

由轴心力 N 产生的垂直于焊缝长度方向的应力为

$$\sigma_f^N = \frac{N}{A_w} = \frac{N}{2h_e l_w} \quad (3-23)$$

由剪力 V 产生的平行于焊缝长度方向的应力为

$$\tau_f^V = \frac{V}{A_w} = \frac{V}{2h_e l_w} \quad (3-24)$$

由弯矩 M 引起的垂直于焊缝长度方向的应力为

$$\sigma_f^M = \frac{M}{W_w} = \frac{6M}{2h_e l_w^2} \quad (3-25)$$

将垂直于焊缝方向的应力 σ_f^N 和 σ_f^M 相加, 考虑 σ_f 及 τ_f 的组合作用, 焊缝的强度条件应为

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_f^N + \sigma_f^M}{\beta_f}\right)^2 + \tau_f^2} \leq f_f^w \quad (3-26)$$

式中: A_w ——角焊缝的有效截面面积;

W_w ——角焊缝的有效截面模量。

例题 3.5 如图 3-33 所示角钢与钢柱用角焊缝连接, 焊脚尺寸 $h_f = 10 \text{ mm}$, 钢材为 Q345, 焊条为 E50 型, 手工焊。试计算焊缝所能承受的最大静力荷载设计值 F 。

解: 将偏心力 F 向焊缝群形心简化, 则焊缝同时承受弯矩 $M = Fe = 30F \text{ kN} \cdot \text{mm}$ 及剪力 $V = F \text{ kN}$, 虽然角肢为不等肢, 但仅两竖向直边有焊缝, 故焊缝群中和轴仍位于两竖直线焊缝的重心轴线, 因此, 应按最危险点 A 或点 B 确定焊脚尺寸。此外, 因转角处有绕角焊 $2h_f$, 故焊缝计算长度不考虑起落弧弧坑的影响, $l_w = 200 \text{ mm}$ 。

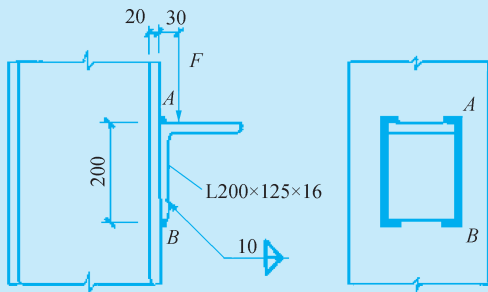
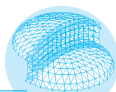


图 3-33 例题 3.5 图 (单位 mm)



(1) 验算侧面角焊缝长度的构造要求

$$l_w = 200 < 60h_f = 60 \times 10 = 600 \text{ mm}$$

$$> 8h_f = 8 \times 10 = 80 \text{ mm}$$

$$l = l_w + h_f > 5t_{\min} = 80 \text{ mm}$$

故侧面角焊缝长度满足要求。

(2) 焊缝计算截面的几何参数

$$A_w = 2 \times 0.7h_f l_w = 2 \times 0.7 \times 10 \times 200 = 2800 \text{ mm}^2$$

$$W_w = \frac{2 \times 0.7h_f l_w^2}{6} = \frac{2 \times 0.7 \times 10 \times 200^2}{6} = 93333 \text{ mm}^3$$

(3) 应力分量

$$\sigma_f^M = \frac{M}{W_w} = \frac{30F \times 10^3}{9333} = 0.3214 F$$

$$\tau_f^V = \frac{V}{A_w} = \frac{F \times 10^3}{2800} = 0.3571 F$$

(4) 求 F

由附录2查得角焊缝强度设计值 $f_f^w = 160 \text{ N/mm}^2$

$$\sqrt{(\sigma_f^M / \beta_f)^2 + (\tau_f^V)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.3214F}{1.22}\right)^2 + (0.3571F)^2} \leq f_f^w = 200$$

解得: $F \leq 450.7 \text{ kN}$

因此,该连接所能承受的最大静力荷载设计值 F 为 450.7 kN 。

例题 3.6 验算图 3-34 所示牛腿与柱的连接角焊缝。钢材为 Q235,焊条为 E43 型,手工焊,作用力设计值 $F = 380 \text{ kN}$ (静力荷载)。

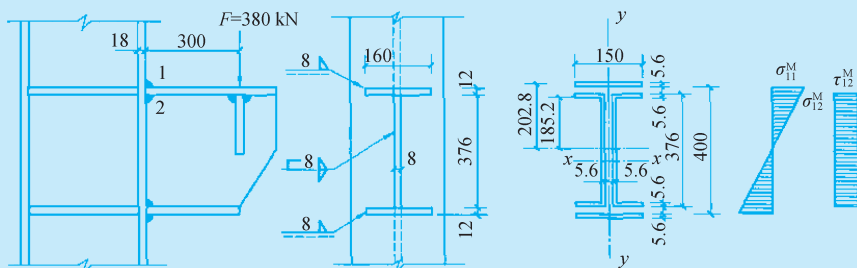


图 3-34 例题 3.5 图(单位 mm)

解: 将作用力 F 移至焊缝计算截面形心轴线上,则焊缝同时承受弯矩 $M = Fe = 380 \times 10^3 \times 300 = 1.14 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 及剪力 $V = F = 380 \text{ kN}$ 。因牛腿翼缘板的竖向刚度较低,一般不考虑其承受剪力,故全部剪力由腹板上的两条竖向焊缝承担,弯矩则由全部焊缝计算截面承担。



$$\begin{aligned} \text{取 } h_f &= 8 \text{ mm} < h_{f_{\max}} = 1.2 \times t_{\min} = 1.2 \times 8 = 9.6 \text{ mm} \\ &> h_{f_{\min}} = 1.5 \sqrt{t_{\max}} = 1.5 \times \sqrt{18} = 6.4 \text{ mm} \end{aligned}$$

(1) 验算侧面角焊缝长度的构造要求

$$\begin{aligned} l_w &= 400 < 60h_f = 60 \times 8 = 480 \text{ mm} \\ &> 8h_f = 8 \times 8 = 64 \text{ mm} \\ l &= l_w + h_f > 5t_{\min} = 40 \text{ mm} \end{aligned}$$

故侧面角焊缝长度满足要求。

(2) 焊缝有效截面的几何参数

两条腹板竖向焊缝的计算截面面积为：

$$A_w = 2 \times 0.7 \times 8 \times 376 = 4211.2 \text{ mm}^2$$

整个焊缝计算截面对 x 轴的惯性矩和截面抵抗矩为：

$$\begin{aligned} I_w &= 2 \times \frac{1}{12} \times 0.7 \times 8 \times 376^3 + 2 \times 0.7 \times 8 \times (150 - 2 \times 8) \times 202.8^2 + 4 \times 0.7 \times 8 \times \\ &\quad (71 - 5.6 - 8) \times 185.2^2 = 1.64 \times 10^8 \text{ mm}^4 \\ W_w &= I_w / y = 1.64 \times 10^8 / 205.6 = 8.0 \times 10^5 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

(3) 焊缝强度验算

由附录 2 查得角焊缝强度设计值 $f_f^w = 160 \text{ N/mm}^2$

“1”点有由弯矩 M 产生的垂直于焊缝长度方向的应力 $\sigma_{f_1}^m$ ：

$$\sigma_{f_1}^M = \frac{M}{W_w} = \frac{1.14 \times 10^4}{8.0 \times 10^5} = 143 \text{ N/mm}^2 < \beta_f f_f^w = 1.22 \times 160 = 195.2 \text{ N/mm}^2$$

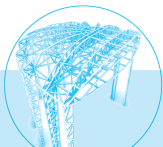
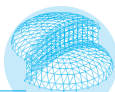
“2”点有由弯矩 M 和剪力 V 产生的应力 $\sigma_{f_2}^m$ 和 $\tau_{f_2}^v$ ：

$$\sigma_{f_2}^M = \sigma_{f_1}^M \times \frac{h_o}{h} = 143 \times \frac{188}{205.6} = 130.3 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{f_2}^V = \frac{V}{A_w} = \frac{380 \times 10^3}{4211.2} = 90.2 \text{ N/mm}^2$$

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{f_2}^M}{\beta_f}\right)^2 + (\tau_{f_2}^V)^2} = \sqrt{\left(\frac{130.3}{1.22}\right)^2 + 90.2^2} = 140 \text{ N/mm}^2 < f_f^w = 160 \text{ N/mm}^2$$

所以焊缝强度满足要求。



3.5 螺栓连接的常识

3.5.1 螺栓的规格



螺栓连接的常识

钢结构采用的普通螺栓形式为六角头型,其代号用字母 M 和公称直径的毫米数表示。为制造方便,一般情况下,同一结构中应尽可能采用一种栓径和孔径的螺栓,需要时也可采用 2~3 种螺栓直径。

螺栓直径应根据整个结构及其主要连接的尺寸和受力情况选定,受力螺栓一般用 $\geq M16$,建筑工程中常用 M16、M20、M24 等。

钢结构施工图中螺栓、螺栓孔的表示方法应符合表 3-3 的规定。

表 3-3 螺栓、孔的表示方法

名 称	图 例	名 称	图 例
永久螺栓		圆形螺栓孔	
高强螺栓		长圆形螺栓孔	
安装螺栓		胀锚螺栓	

注: ① 细“+”线表示定位线;② M 表示螺栓型号;③ ϕ 表示螺栓孔直径;④ d 表示膨胀螺栓的直径;⑤ 采用引出线标注螺栓时,横线上标注螺栓规格,横线下标注螺栓孔直径。

3.5.2 螺栓的性能等级

螺栓性能等级的含义是国际通用的标准,相同性能等级的螺栓,不管其材料和产地的区别,其性能是相同的,设计上只选用性能等级即可。

螺栓性能等级标号由两部分数字组成,分别表示螺栓材料的公称抗拉强度值和屈服比值。

例如:性能等级 4.6S 的普通螺栓,其含义是:

- (1) 螺栓材质的公称抗拉强度达 400 MPa;
 - (2) 螺栓材质的屈服比为 0.6;
 - (3) 螺栓材质的公称屈服强度达 $400 \times 0.6 = 240$ MPa;
- 强度等级 10.9S 高强度螺栓,其材料经过热处理后:



- (1) 螺栓材质的公称抗拉强度达 1000 MPa;
 - (2) 螺栓材质的屈强比值为 0.9;
 - (3) 螺栓材质的公称屈服强度达 $1000 \times 0.9 = 900$ MPa。
- 螺栓的其他性能等级以此类推。

3.5.3 普通螺栓与高强螺栓比较

普通螺栓一般是指低强度等级要求的螺栓,硬度强度不是很高,用普通的螺丝线材生产,其材料硬度强度、抗拉力、扭力都不高。高强螺栓是高强度的螺栓,一般情况下,高强螺栓可承受的载荷比同规格和普通螺栓大。

常见的普通螺栓和高强螺栓分别见下图 3-35 和图 3-36 所示。



图 3-35 普通螺栓



图 3-36 高强螺栓

高强螺栓的形状、连接构造与普通螺栓基本相同。两者具体区别比较如下:

(1) 原材料

高强螺栓的螺杆、螺帽和垫圈都由高强钢材制作。

普通螺栓常用 Q235 钢制造。

高强螺栓摩擦型的螺孔比螺栓公称直径 d 大 1.5~2.0 mm;高强螺栓承压型的螺孔比螺栓公称直径 d 大 1.0~1.5 mm。

C 级粗制螺栓的螺孔直径比螺栓公称直径 d 大 1.0~1.5 mm。

(2) 强度等级

高强螺栓强度等级高,常用 8.8S 和 10.9S 两个强度等级,其中 10.9 级居多。

普通螺栓强度等级,一般为 4.6、4.8、5.6 和 8.8(不带 S 后缀),如 4.6 级、4.8 级为 C 级粗制螺栓,螺杆表面粗糙,制作安装方便。5.6 级、8.8 级为 A 级、B 级精制螺栓,螺杆、螺孔加工精度高,制作安装复杂,目前很少用,已被高强螺栓代替。

(3) 受力特点

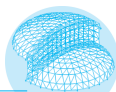
高强度螺栓施加预拉力和靠摩擦力传递外力。

根据受力特点又可分为高强螺栓摩擦型和高强螺栓承压型两类。

按施工工艺分为大六角高强螺栓和扭剪型高强螺栓。大六角高强螺栓与扭剪型高强螺栓均属于高强度螺栓,并非普通螺丝的高强度级;两者在材料热处理、预拉力控制及传力机理(靠摩擦力)上与普通螺栓有本质区别。扭剪型高强度螺栓是大六角高强度螺栓的改进型,其尾部设有梅花头,可通过拧断梅花头控制终拧扭矩,施工检查更直观。

普通螺栓连接靠栓杆抗剪和孔壁承压来传递剪力。

普通螺栓拧紧螺帽时产生预拉力很小,其影响可以忽略不计;高强螺栓除了其材料强度



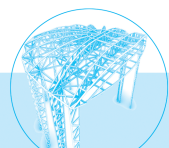
很高之外,还给螺栓施加很大预拉力,使连接构件间产生挤压力,从而使垂直于螺杆方向有很大摩擦力。

(4) 使用范围和使用次数

建筑结构主构件的螺栓连接,一般均采用高强螺栓连接。

普通螺栓抗剪性能差,可在次要结构部位使用。

普通螺栓只需拧紧即可,可重复使用;高强螺栓是预应力螺栓,不可重复使用。



3.6 普通螺栓连接

普通螺栓连接按受力情况可分为三类:螺栓只承受剪力,螺栓只承受拉力,螺栓承受拉力和剪力的共同作用。下面先介绍螺栓受剪时的工作性能和计算方法。

3.6.1 普通螺栓连接的受剪计算

1. 受剪连接的工作性能

抗剪连接是最常见的螺栓连接。如果以如图3-37(a)所示的螺栓连接试件作抗剪试验,可得出试件上 a 、 b 两点之间的相对位移 δ 与作用力 N 的关系曲线[图3-37(b)]。该曲线给出了试件由零载一直加载至连接破坏的全过程,经历了以下四个阶段:



认识普通螺栓
及其受力方式

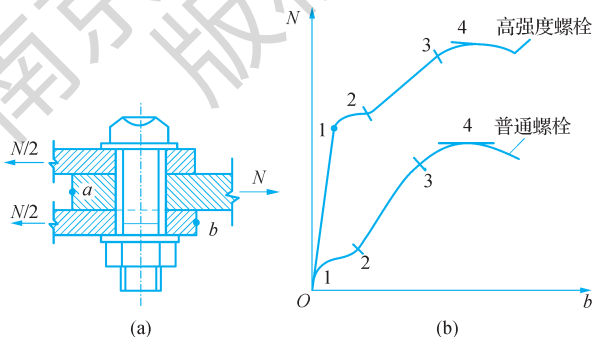


图3-37 单个螺栓抗剪试验结果

(1) 摩擦传力的弹性阶段

在施加荷载之初,荷载较小,荷载靠构件间接触面的摩擦力传递,螺栓杆与孔壁之间的间隙保持不变,连接工作处于弹性阶段,在 $N-\delta$ 图上呈现出 $0\sim 1$ 斜直线段。但由于板件间摩擦力的大小取决于拧紧螺帽时在螺杆中的初始拉力,一般说来,普通螺栓的初拉力很小,故此阶段很短。

(2) 滑移阶段

当荷载增大,连接中的剪力达到构件间摩擦力的最大值,板件间产生相对滑移,其最大滑移量为螺栓杆与孔壁之间的间隙,直至螺栓与孔壁接触,相应于 $N-\delta$ 曲线上的 $1\sim 2$ 水平段。



(3) 栓杆传力的弹性阶段

荷载继续增加,连接所承受的外力主要靠栓杆与孔壁接触传递。栓杆除主要受剪力外,还有弯矩和轴向拉力,而孔壁则受到挤压。由于栓杆的伸长受到螺帽的约束,增大了板件间的压紧力,使板件间的摩擦力也随之增大,所以 $N-\delta$ 曲线呈上升状态。达到“3”点时,曲线开始明显弯曲,表明螺栓或连接板达到弹性极限,此阶段结束。

(4) 弹塑性阶段

达到“3”点后,即使给荷载以很小的增量,连接的剪切变形迅速增大,直至连接破坏。“4”点(曲线的最高点)即为普通螺栓抗剪连接的极限承载力。

受剪螺栓连接达到极限承载力时,可能的破坏形式有:

- ① 当栓杆直径较小,板件较厚时,栓杆可能先被剪断[图 3-38(a)];
- ② 当栓杆直径较大,板件较薄时,板件可能先被挤坏[图 3-38(b)],板件的挤压是相对的,故也可把这种破坏叫作螺栓的承压破坏;
- ③ 板件可能因螺栓孔削弱太多而被拉断[图 3-38(c)];
- ④ 端距太小,端距范围内的板件有可能被栓杆冲剪破坏[图 3-38(d)];
- ⑤ 栓杆过长导致栓杆受弯破坏[图 3-38(e)]。

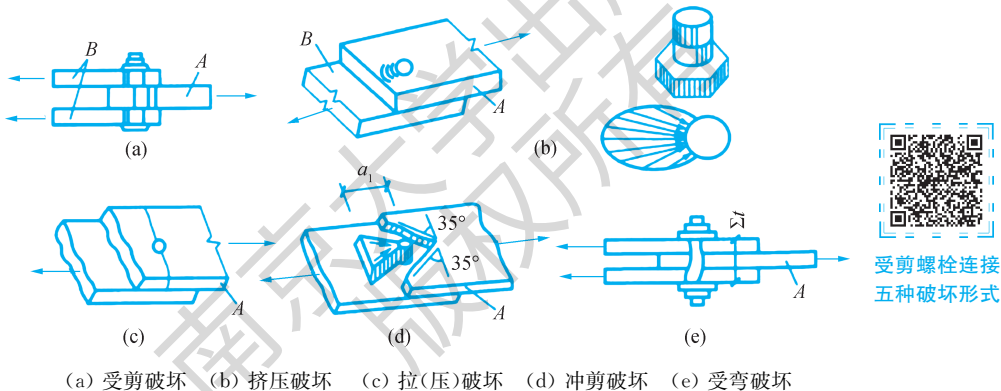


图 3-38 螺栓连接的破坏类型

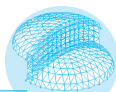
为了防止上述五种破坏,对于冲剪破坏主要控制螺栓的端距不小于 $2d_0$;对于受弯破坏主要控制螺栓的夹紧长度不超过 4~6 倍螺栓直径;板件的拉(压)破坏主要是通过验算板件的有效净截面强度加以控制;受剪破坏和挤压破坏则需要按照式(3-27)和式(3-28)来进行计算加以控制。

2. 单个普通螺栓的受剪计算

普通螺栓的受剪承载力主要由栓杆受剪和孔壁承压两种破坏模式控制,因此应分别计算,取其较小值进行设计。计算时做了如下假定: ① 栓杆受剪计算时,假定螺栓受剪面上的剪应力是均匀分布的;② 孔壁承压计算时,假定挤压力沿栓杆直径平面(实际上是相应于栓杆直径平面的孔壁部分)均匀分布。考虑一定的抗力分项系数后,得到普通螺栓受剪连接中,每个螺栓的受剪和承压承载力设计值如下:

受剪承载力设计值:

$$N_v^b = n_v \frac{\pi d^2}{4} f_v^b \quad (3-27)$$



承压承载力设计值:

$$N_c^b = d \sum t f_c^b \quad (3-28)$$

式中: n_v ——螺栓受剪面数, 单剪 $n_v = 1$, 双剪 $n_v = 2$, 四剪 $n_v = 4$ 等(图 3-39);

$\sum t$ ——在同一受力方向的承压构件的较小总厚度;

d ——螺栓杆直径;

$f_v^b f_c^b$ ——螺栓的抗剪和承压强度设计值, 按附录 2 采用(表中设计强度的规定与上述螺栓应力均匀分布假定相应)。

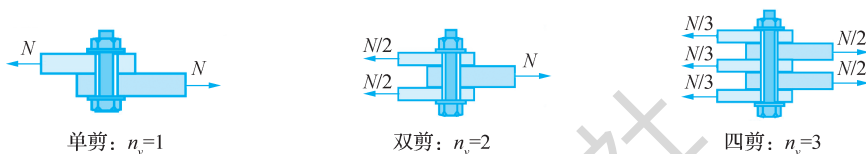


图 3-39 螺栓受剪面数量

单个受剪螺栓的承载力设计值应取 N_v^b 和 N_c^b 中的较小值, 即

$$N_{\min}^b = \min(N_v^b, N_c^b) \quad (3-29)$$

3.6.2 普通螺栓群受剪连接的计算

(1) 普通螺栓群轴心受剪

试验证明, 螺栓群的受剪连接承受轴心力时, 与侧焊缝的受力相似, 在长度方向各螺栓受力是不均匀的(图 3-40), 两端受力大, 中间受力小。当连接长度 $l_1 \leq 15d_0$ (d_0 为螺孔直径) 时, 由于连接工作进入弹塑性阶段后, 内力发生重分布, 螺栓群中各螺栓受力逐渐接近, 故可认为轴心力 N 由每个螺栓平均分担, 即螺栓数 n 为:

$$n \geq \frac{N}{N_{\min}^b} \quad (3-30)$$

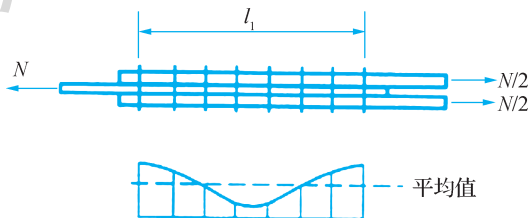


图 3-40 长接头螺栓的内力分布

当 $l_1 > 15d_0$ 时, 连接工作进入弹塑性阶段后, 各螺杆所受内力仍不易均匀, 端部螺栓首先达到极限强度而破坏, 随后由外向里依次破坏。

根据试验, 并参考国外的规定, 我国规范规定: 当 $l_1 > 15d_0$ 时, 应将螺栓的承载力设计值乘以折减系数予以折减(超长调整)。

$$\eta = 1.1 - \frac{l_1}{150d_0} \geq 0.7 \quad (3-31)$$

则对长连接, 所需抗剪螺栓数为:

$$n \geq \frac{N}{\eta N_{\min}^b} \quad (3-32)$$



(2) 构件净截面强度验算

螺栓连接中,由于螺栓孔削弱了构件截面,因此需要验算构件开孔处的净截面强度。

$$\sigma = \frac{N}{A_n} \leq f \quad (3-33)$$

式中: N ——连接件或构件验算截面处的轴心力设计值;

A_n ——连接件或构件在所验算截面上的净截面面积;

f ——钢材的抗拉(或抗压)强度设计值,按附录 2 选用。

净截面强度验算截面应选择最不利截面,即内力最大或净截面面积较小的截面。

现以如图 3-41(a)所示的钢板轴心受拉为例加以说明。

如果该连接采用如图 3-41(b)所示螺栓并列布置时,拉力 N 通过 9 个螺栓的栓杆剪切和孔壁承压传递给盖板。假定均匀传递,则每个螺栓承受的拉力为 $N/9$,构件在截面 I-I、II-II、III-III 处的拉力分别为 N 、 $6N/9$ 、 $3N/9$,因此最不利截面为截面 I-I,其内力最大为 N ,之后各截面因前面螺栓已传递部分内力,故逐渐递减。但连接盖板各截面的内力恰好与被连接构件相反,截面 III-III 受力最大,因此还须按下面公式比较它和被连接构件截面 I-I 的净截面面积,以确定最不利截面,然后按式(3-33)进行验算。

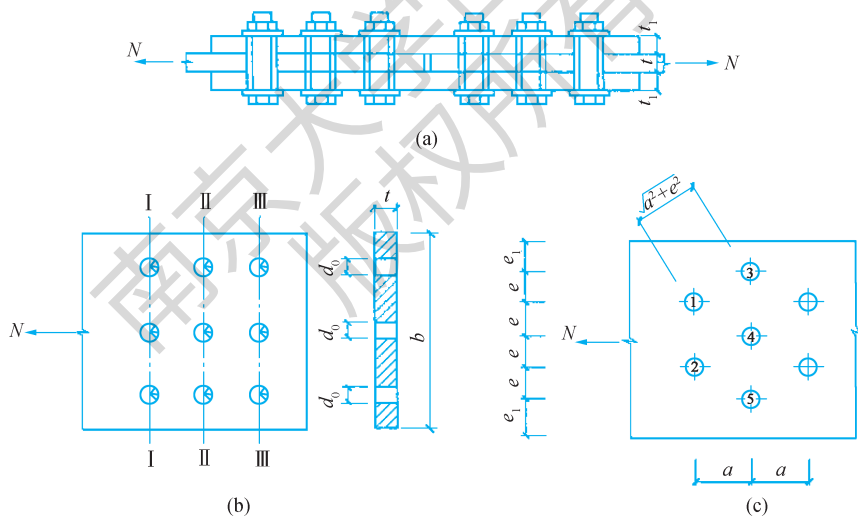


图 3-41 受剪螺栓连接受轴心力作用

被连接构件截面 I-I

$$A_n = (b - n_1 d_o) t \quad (3-34)$$

连接盖板截面 III-III

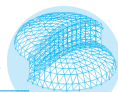
$$A_n = 2(b - n_3 d_o) t_1 \quad (3-35)$$

式中: n_1 、 n_3 ——截面 I-I 和截面 III-III 上的螺栓孔数目;

t 、 t_1 ——被连接构件和连接盖板的厚度;

d_o ——螺栓孔直径;

b ——被连接构件和连接盖板的宽度。



如果该连接采用如图 3-41(c)所示的螺栓错列布置时,净截面破坏有如下 6 种可能的破坏面:①沿孔 1→2 的直线净截面;②沿孔 3→4→5 的直线净截面;③沿孔 3→1→2 的 3 孔 1 折净截面;④沿孔 3→1→4→5 的 4 孔 2 折净截面;⑤沿 3→4→2 的 3 孔 1 折净截面;⑥沿孔 3→1→4→2→5 的 5 孔 4 折净截面。应同时计算出各种可能破坏面的净截面面积 A_n ,并分析各种可能破坏面上所受力的大小,确定最不利截面,然后将净截面面积和相应验算截面处的轴心力设计值代入式(3-34)、(3-35)验算。

例题 3.6 两个截面为—14×400 的钢板,采用双盖板和 C 级普通螺栓拼接,螺栓为 M20,钢材为 Q235。承受轴心拉力设计值 $N=940$ kN,试设计此连接。

解: (1) 确定连接盖板截面

采用双盖板拼接,按照连接盖板与被连接构件等强的原则,选取盖板截面尺寸为—7×400,钢材亦采用 Q235。

(2) 确定所需螺栓数目和螺栓排列

由附录 2 查得 $f_v^b = 140$ N/mm², $f_c^b = 305$ N/mm²。

单个螺栓受剪承载力设计值:

$$N_v^b = n_v \frac{\pi d^2}{4} f_v^b = 2 \times \frac{\pi \times 20^2}{4} \times 140 = 87964 \text{ N}$$

单个螺栓承压承载力设计值:

$$N_c^b = d \sum t f_c^b = 20 \times 14 \times 305 = 85400 \text{ N}$$

则连接一侧所需螺栓数目为:

$$n = \frac{N}{N_{\min}^b} = \frac{940 \times 10^3}{85400} = 11.0, \text{取 } n = 12.$$

采用如图 3-42 所示的并列布置。连接盖板采用 2 块—400×7×490。其螺栓的中距、边距和端距均满足表 3-3 的构造要求。

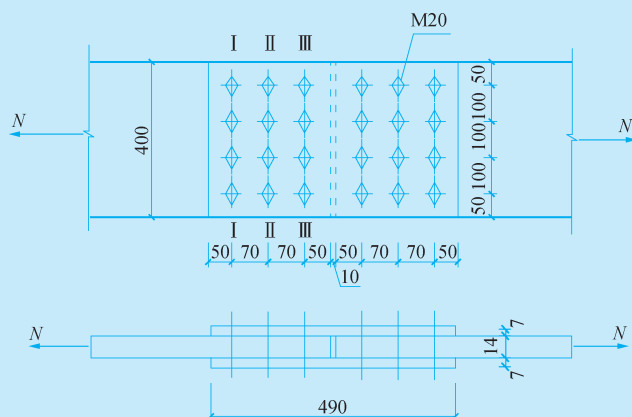


图 3-42 例题 3.6 图(单位: mm)



(3) 验算

① 是否需要超长调整的判断(取螺栓孔 $d_0 = d + 2 = 22 \text{ mm}$)

$$l_1 = 70 + 70 = 140 \leq 15d_0 = 330 \text{ mm}$$

故不需超长调整。

② 连接板件的净截面强度

由附录 2 查得 $f = 215 \text{ N/mm}^2$ 。

连接钢板在截面 I-I 受力最大为 N , 连接盖板则是截面 III-III 受力最大为 N , 但因两者钢材、截面均相同, 故只验算连接钢板。

$$A_0 = (b - n_1 d_0) t = (400 - 4 \times 22) \times 14 = 4368 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{N}{A_n} = \frac{940 \times 10^3}{4368} = 215.2 \text{ N/mm}^2 \approx f = 215 \text{ N/mm}^2$$

故连接板件的净截面强度满足要求。

由上述计算可知, 采用如图 3-42 所示的螺栓连接, 可以满足要求。

例题 3.7 如图 3-43 所示, 试设计两角钢拼接的普通 C 级螺栓连接, 角钢截面为 $L80 \times 5$, 承受轴心拉力设计值 $N = 130 \text{ kN}$, 拼接角钢采用与构件相同截面。钢材为 Q235, 螺栓为 M20。

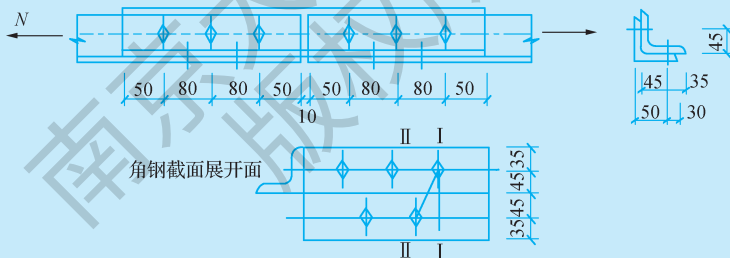


图 3-43 例题 3.7 图(单位: mm)

解: (1) 确定所需螺栓数目和螺栓布置

由附录 2 查得 $f_v^b = 140 \text{ N/mm}^2$, $f_c^b = 305 \text{ N/mm}^2$ 。

单个螺栓受剪承载力设计值:

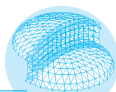
$$N_v^b = n_v \frac{\pi d^2}{4} f_v^b = 1 \times \frac{\pi \times 20^2}{4} \times 140 = 43982 \text{ N}$$

单个螺栓承压承载力设计值:

$$N_c^b = d \sum t f_c^b = 20 \times 5 \times 305 = 30500 \text{ N}$$

则构件连接一侧所需螺栓数目为:

$$n = \frac{N}{N_{\min}^b} = \frac{130 \times 10^3}{30500} = 4.26, \text{取 } n = 5$$



为安排紧凑,螺栓在角钢两肢上交错排列,如图 3-43 所示。螺栓排列的中距、边距和端距均符合表 3-3 的构造要求。

(2) 验算

① 判断是否需要超长调整(取螺栓孔 $d_0 = d + 2 = 22 \text{ mm}$)

$$l_1 = 80 + 80 = 160 \leq 15d_0 = 330 \text{ mm}$$

故不需超长调整。

② 构件净截面强度验算

由附录 2 查得 $f = 215 \text{ N/mm}^2$ 。

由型钢表(附录 9)查得角钢的毛截面面积 $A = 7.91 \text{ cm}^2$

直线截面 I-I 净截面面积:

$$A_{OI} = A - n_1 d_0 t = 7.91 \times 10^2 - 1 \times 22 \times 5 = 681 \text{ mm}^2$$

齿状截面 I-I 净截面面积:

$$A_{OII} = [2e_1 + (n_2 - 1)\sqrt{e^2 + a^2} - n_2 d_0]t = [2 \times 35 + (2 - 1) \times \sqrt{40^2 + 90^2} - 2 \times 22] \times 5 = 622.4 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{N}{A_{n\min}} = \frac{130 \times 10^3}{622.4} = 208.9 \text{ N/mm}^2 < f = 215 \text{ N/mm}^2$$

故构件的净截面强度满足要求。

由上述计算可知,采用图 3-43 所示的螺栓连接,可以满足要求。

3.6.3 普通螺栓连接的受拉计算

1. 受力性能和承载力

如图 3-44(a)所示为螺栓 T 形连接。图中板件所受外力 N 通过受剪螺栓 1 传给角钢,角钢再通过受拉螺栓 2 传给翼缘。受拉螺栓的破坏形式是栓杆被拉断,拉断的部位通常在螺纹削弱的截面处。

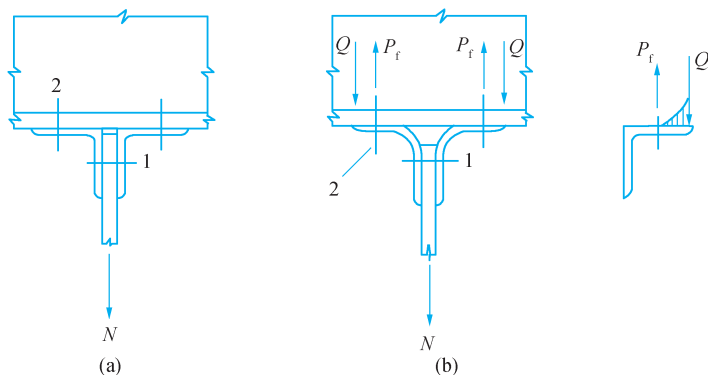


图 3-44 受拉螺栓连接

与受拉螺栓相连的角钢如果刚度不大,总会有一定的弯曲变形,因此外力 N 使螺栓受拉的同时,也使角钢肢尖处由杠杆作用产生撬力 Q (压力),如图 3-44(b)所示。这样,图中螺栓实际所受拉力不是 $N/2$,而是 $N/2+Q$ 。由于精确计算 Q 十分困难,设计时一般不显示计算撬力 Q ,按《钢结构设计标准》,普通螺栓抗拉承载力按 $N_t^b = A_e f_t^b$ 计算,其中 f_t^b 直接取表附录 2 中的普通螺栓抗拉强度设计值(如 Q235 取 170 N/mm^2),标准已不再明文规定乘以 0.8 折减。

前已述及,受拉螺栓的最不利截面在螺纹削弱处。所以,计算时应根据螺纹削弱处的有效直径 d_e 或有效面积 A_e 来确定其承载力。故一个受拉螺栓的承载力设计值为

$$N_t^b = \frac{1}{4} \pi d_e^2 f_t^b = A_e f_t^b \tag{3-36}$$

式中: d_e 、 A_e ——螺栓螺纹处的有效直径和有效面积,按表 3-4 采用;

f_t^b ——螺栓抗拉强度设计值,按附录 2 采用。

表 3-4 螺栓的有效截面面积

螺栓直径 d/mm	16	18	20	22	24	27	30
螺距 p/mm	2	2.5	2.5	2.5	3	3	3.5
螺栓有效直径 d_e/mm	14.1236	15.6545	17.6545	19.6545	21.1854	24.1854	26.7163
螺栓有效截面面积 A_e/mm^2	156.7	192.5	244.8	303.4	352.5	459.4	560.6

2. 受拉螺栓连接的计算

(1) 受拉螺栓受轴心力作用的计算

当外力 N 通过螺栓群中心使螺栓受拉时,可以假定各个螺栓所受拉力相等,则所需螺栓数目为

$$n = \frac{N}{N_t^b} \tag{3-37}$$



受轴力作用构件的普通螺栓计算

(2) 受拉螺栓受弯矩作用的计算

如图 3-45 所示为一工字形截面柱翼缘与牛腿端板用螺栓连接。图中螺栓群在弯矩作用下,连接上部牛腿与翼缘有分离的趋势。计算时,通常近似假定牛腿绕最底排螺栓旋转,以弯矩指向一侧最外侧螺栓的形心为转动轴,从而使螺栓受拉。弯矩产生的压力则由弯矩指向一侧的部分牛腿端板通过挤压传递给柱身。各排螺栓所受拉力的大小与该排螺栓到转动轴线的距离 y 成正比。因此顶排螺栓(1 号)所受拉力最大。设每列各排螺栓所受拉力分别为 N_1^m 、 N_2^m 、 N_3^m 、 $\cdots$ 、 N_n^m ,转动轴 O 到每列各排螺栓的距离分别为 y_1 、 y_2 、 y_3 、 $\cdots$ 、 y_n ,并偏安全地忽略端板压力形成的力矩,认为外弯矩只与螺栓拉力产生弯矩平衡。这样,由平衡条件和基本假定得



受弯矩作用构件的普通螺栓计算

$$\frac{M}{m} = N_1^m y_1 + N_2^m y_2 + N_3^m y_3 + \cdots + N_n^m y_n \tag{3-38}$$

$$\frac{N_1^m}{y_1} = \frac{N_2^m}{y_2} = \frac{N_3^m}{y_3} = \cdots = \frac{N_n^m}{y_n} \tag{3-39}$$

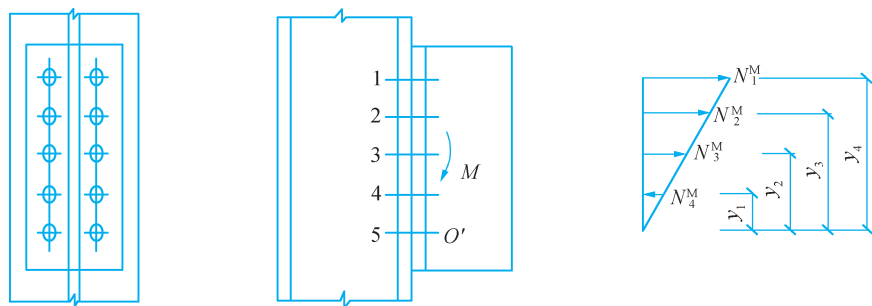
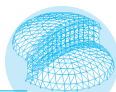


图 3-45 受拉螺栓连接受弯矩作用

由式(3-39)求得 $N_i^m = N_1^m y_i / y_1$, 代入式(3-38)再经整理后可得

$$N_1^M = \frac{My_1}{m \sum y_i^2} \quad (3-40)$$

设计要求受力最大的最外排螺栓所受拉力 N_1^m 不超过单个螺栓抗拉承载力设计值, 即

$$N_1^M = \frac{My_1}{m \sum y_i^2} \leq N_t^b \quad (3-41)$$

式中: M ——弯矩设计值;

y_1, y_i ——最外排螺栓(1号)和第 i 排螺栓到转动轴 O 的距离, 转动轴通常取在弯矩指向一侧最外排螺栓形心处;

m ——螺栓的纵向列数, 如图 3-45 所示 $m=2$ 。



偏心受力构件的
普通螺栓计算

(3) 受拉螺栓受偏心拉力作用的计算

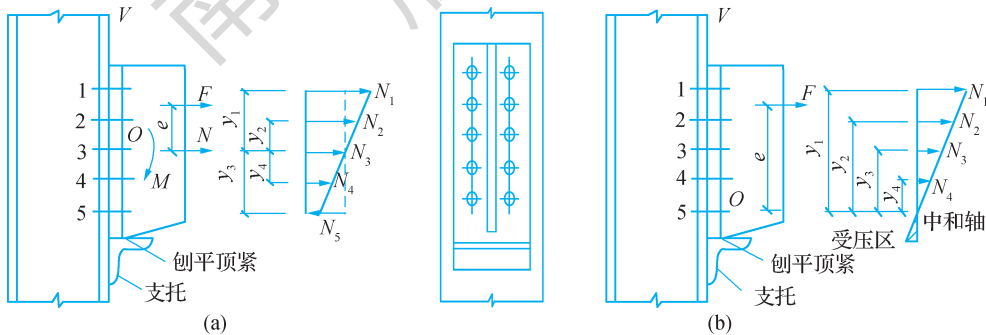


图 3-46 受拉螺栓连接受偏心作用

如图 3-46 所示为牛腿或梁端与柱的连接, 端板刨平顶紧于支托。螺栓群受偏心拉力 F (图中所示的 $M=Fe, N=F$ 联合作用等效) 以及剪力 V 作用。剪力 V 全部由焊接于柱上的支托承担, 螺栓群只承受偏心拉力 F 的作用。这种情况应根据偏心距的大小分为下列两种情况计算:

① 小偏心受拉情况[图 3-46(a)]—— $N_{\min} \geq 0$

当偏心距 e 较小时, 弯矩 $M=Fe$ 不大, 连接以承受轴心拉力 N 为主。这时螺栓群中所

有螺栓均受拉,计算 M 作用下螺栓的内力时,取螺栓群的转动轴在螺栓群中心位置 O 处。可得最顶排螺栓所受拉力为:

$$N_1^m = \frac{My_1}{m \sum y_i^2} = \frac{Fey_1}{m \sum y_i^2} \quad (3-42)$$

在轴心拉力 $N = F$ 作用下,各螺栓均匀受拉,其拉力值为

$$N_1^N = \frac{N}{n} \quad (3-43)$$

因此,螺栓群中螺栓所受最大拉力 $N_{\max}$ (弯矩背向一侧最外排螺栓)及最小拉力 $N_{\min}$ (弯矩指向一侧最外排螺栓)应符合下列条件

$$N_{\max} = \frac{F}{n} + \frac{Fey_1}{m \sum y_i^2} \leq N_t^b \quad (3-44a)$$

$$N_{\min} = \frac{F}{n} - \frac{Fey_1}{m \sum y_i^2} \geq 0 \quad (3-44b)$$

式中: F ——偏心拉力设计值;

e ——偏心拉力至螺栓群中心 O 的距离;

n ——螺栓数,图 3-46(a)中 $n=10$;

y_1 ——最外排螺栓到螺栓群中心 O 的距离;

y_i ——第 i 排螺栓到螺栓群中心 O 的距离;

m ——螺栓的纵向列数,图 3-46(a)中 $m=2$ 。

式 3-44(a) 表示最大受力螺栓的拉力不得超过单个螺栓的抗拉承载力设计值;式 (3-44b) 则保证全部螺栓受拉,属于小偏心受拉,不存在受压区,这是式 (3-44a) 成立的前提条件。

② 大偏心受拉情况[图 3-46(b)]—— $N_{\min} < 0$

当偏心距 e 较大,式 (3-44b) 不能满足时,端板底部将出现受压区,螺栓群转动轴位置下移。为便于计算,偏安全地近似取转动轴下移至弯矩指向一侧最外排螺栓形心 O' 处,与纯弯相同,则

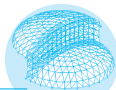
$$N_{1\max} = \frac{Fe'y'_1}{m \sum y_i'^2} \leq N_t^b \quad (3-45)$$

式中: F ——偏心拉力设计值;

e' ——偏心拉力 F 到转动轴的距离,转动轴通常取在弯矩指向一侧最外排螺栓形心 O' 处;

y'_1, y'_i ——最外排、第 i 排螺栓到转动轴 O' 的距离;

m ——螺栓的纵向列数,图 3-46(b)中 $m=2$ 。



例题 3.8 如图 3-47(a)所示屋架下弦端节点 A 的连接如图 3-47(b)所示。图中下弦、腹杆与节点板等在工厂焊成整体,在工地吊装就位位于柱的支托处,然后用螺栓与柱连成整体。钢材为 Q235, C 级普通螺栓为 M22。试验算该连接的螺栓是否安全。

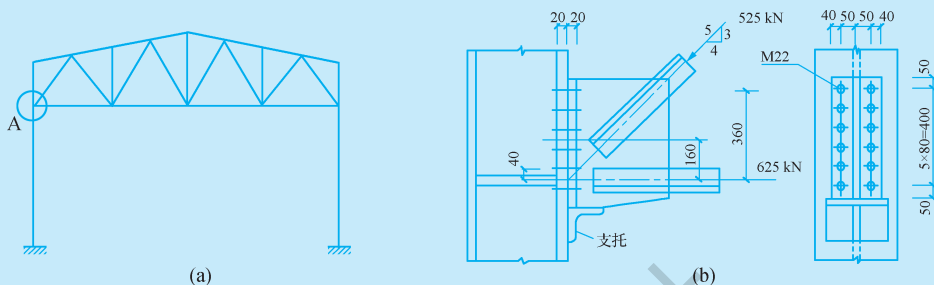


图 3-47 例题 3.8 图(单位: mm)

解: 竖向剪力 $V = 525 \times \frac{3}{5} = 315$ kN, 全部由支托承担; 水平偏心力 $N = 625 - 525 \times \frac{4}{5} = 205$ kN, 由螺栓群连接承受(最底排螺栓受力最大)。

(1) 单个螺栓的抗拉承载力设计值

由附录 2 查得 $f_t^b = 170$ N/mm², 由表 3-4 查得螺栓 $A_e = 303.4$ mm²。

(2) 螺栓强度验算

下弦杆轴线距螺栓群中心 $e = 160$ mm

$$N_{\min} = \frac{N}{n} - \frac{My_1}{m \sum y_i^2} = \frac{205 \times 10^3}{12} - \frac{205 \times 10^3 \times 160 \times 200}{2 \times (40^2 + 120^2 + 200^2)} = -12203 \text{ N} < 0$$

由于 $N_{\min} < 0$ 表示端板上部有受压, 属于大偏心情况。此时, 螺栓群转动轴在最顶排螺栓形心处, 最底排螺栓受力最大, 其值为 $N_{\max}$ 。下弦杆轴线距顶排螺栓 $e = 360$ mm。

$$N_{\max} = \frac{Ne'y'_1}{m \sum y_1'^2} = \frac{205 \times 10^3 \times 360 \times 400}{2 \times (80^2 + 160^2 + 240^2 + 320^2 + 400^2)} = 41932 \text{ KN} < N_t^b$$

$$= 51578 \text{ KN}$$

故该连接的螺栓满足要求, 是安全的。

3. 同时受剪和受拉的螺栓连接

如例题 3.8 所示, 对 C 级螺栓, 由于其抗剪性能差, 连接中一般不用它承受剪力, 而是设置支承板(支托)承受全部剪力。但是, 对承受静力荷载的次要连接, 或临时安装连接中的 C 级螺栓, 也可不设支托, 此时, 螺栓将同时承受剪力 N_v (每个螺栓均匀承担,

所以 $N_v = \frac{V}{n}$) 和偏心拉力或弯矩引起沿螺栓杆轴方向的拉力 N

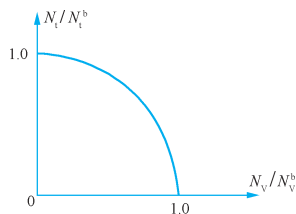


图 3-48 螺栓受拉及受剪的相关方程曲线



(其计算方法与前述受拉螺栓示例相同)的共同作用。根据试验,这种螺栓的强度条件应满足圆曲线相关方程(图 3-48)。

螺栓受力应满足式(3-46)和式(3-47)。

$$\sqrt{\left(\frac{N_V}{N_V^b}\right)^2 + \left(\frac{N_t}{N_t^b}\right)^2} \leq 1 \quad (3-46)$$

$$N_V \leq N_V^b \quad (3-47)$$

式中: N_V^b , N_c^b , N_t^b ——单个螺栓的抗剪、承压和抗拉承载力设计值。

式(3-47)是为防止连接板件薄弱时,可能因承压强度不足而引起破坏。

例题 3.9 将例题 3.8(图 3-47)的螺栓连接改用 C 级 M24 普通螺栓,并取消支托,其余条件不变,试验算该螺栓连接是否满足要求。

解: 由例题 3.8 求得:竖向剪力 $V=315$ kN,由 12 个螺栓均匀分组;即 $N_V = \frac{315}{12} = 26.25$ kN。

(1) 单个 M24 的承载力设计值

由附录 2 查得: $f_V^b=140$ N/mm², $f_t^b=170$ N/mm², $f_c^b=305$ N/mm²,由表 3-4 查得 $A_e=352.5$ mm²。

$$N_V^b = n_v \frac{\pi d^2}{4} f_V^b = 1 \times \frac{\pi \times 24^2}{4} \times 140 = 6335 \text{ N}$$

$$N_c^b = d \sum t f_c^b = 24 \times 20 \times 305 = 146400 \text{ N}$$

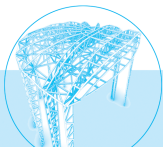
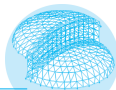
$$N_t^b = A_e f_t^b = 352.5 \times 170 = 59925 \text{ N}$$

(2) 螺栓强度验算

$$\sqrt{\left(\frac{N_V}{N_V^b}\right)^2 + \left(\frac{N_t}{N_t^b}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{26.25 \times 10^3}{6335}\right)^2 + \left(\frac{41.932 \times 10^3}{59925}\right)^2} = 0.81 < 1$$

$$N_V = 262500 < N_c^b = 146400 \text{ N}$$

故取消支托后改用 C 级 M24 普通螺栓,螺栓连接的强度能满足要求。



3.7 高强螺栓连接的设计

3.7.1 高强螺栓连接的构造要求

高强度螺栓有摩擦型和承压型两种。摩擦型高强度螺栓在抗剪连接设计时以剪力达到板件接触面间可能发生的最大摩擦力为极限状态。而承压型高强度螺栓在受剪时则允许摩擦力被克服并发生相对滑移,之后外力还可继续增加,并以栓杆抗剪或孔壁承压的最终破坏为极限状态。在受拉时,两者没有区别。

高强度螺栓的构造和排列要求,除栓杆与孔径的差值较小外,与普通螺栓相同。

1. 高强度螺栓的材料和性能等级

10.9级的高强度螺栓可用20MnTiB(20 锰钛硼)钢、40B(40 硼)钢和35VB(35 钒硼)钢为材料;8.8级的高强度螺栓材料则常用45号钢和35号钢。螺母常用45号钢、35号钢和15MnVB(15 锰钒硼)钢。垫圈常用45号钢和35号钢。螺栓、螺母、垫圈制成品均应经过热处理,以达到规定的指标要求。

目前我国采用的高强度螺栓性能等级,按热处理后的强度分为10.9级和8.8级两种。其中整数部分(10和8)表示螺栓成品的抗拉强度应不低于 1000 N/mm^2 和 800 N/mm^2 ;小数部分(0.9和0.8)则表示其屈强比 f_y/f_u 为0.9和0.8。

2. 高强度螺栓的预拉力

高强度螺栓的预拉力值应尽可能高些,但需保证螺栓在拧紧过程中不会屈服或断裂,所以控制预拉力是保证连接质量的一个关键性因素。预拉力值与螺栓的材料强度和有效截面等因素有关,《标准》规定按下式确定:

$$P = \frac{0.9 \times 0.9 \times 0.9 f_u A_e}{1.2} = 0.6075 f_u A_e \quad (3-48)$$

式中: A_e ——螺栓的有效截面面积;

f_u ——螺栓材料经热处理后的最低抗拉强度,对于8.8级螺栓 $f_u = 830 \text{ N/mm}^2$,对于10.9级螺栓, $f_u = 1040 \text{ N/mm}^2$ 。

式(3-48)中系数1.2是考虑拧紧时螺栓杆内部产生扭矩剪应力的不利影响。另外,式中3个0.9系数则分别考虑:①螺栓材质的不定性;②补偿螺栓紧固后有一定松弛引起预拉力损失;③式中未按 f_y 计算预拉力,而是按 f_u 计算,取值应适当降低。

按式(3-48)计算并经适当调整,即得《标准》规定的预拉力设计值 P (表3-5)。



认识高强螺栓及其
预拉力施加方式



表 3-5 高强度螺栓的预拉力设计值 P (kN)

螺栓的性能等级	螺栓公称直径(mm)					
	M16	M20	M22	M24	M27	M30
8.8 级	80	125	150	175	230	280
10.9 级	100	155	190	225	290	355

3. 高强度螺栓的紧固方法

高强度螺栓的连接副(即一套螺栓)由一个螺栓、一个螺母和两个垫圈组成。我国现有大六角头型和扭剪型两种高强度螺栓。大六角头型和普通六角头粗制螺栓相同[图 3-49(a)]。扭剪型的螺栓头与铆钉头相仿,但在它的螺纹端头设置了一个梅花卡头和一个能够控制紧固扭矩的环形槽沟,如图 3-49(b)所示。

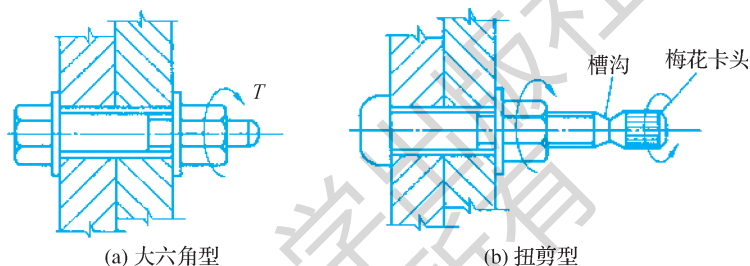


图 3-49 高强度螺栓

高强度螺栓的紧固方法有三种:大六角头型采用转角法和扭矩法,扭剪型采用扭掉螺栓尾部的梅花卡头法。下面分别叙述这些方法。

(1) 转角法。先用扳手将螺母拧到贴紧板面位置(初拧)并作标记线,再用长扳手将螺母转动 $1/3 \sim 3/4$ 圈(终拧)。终拧角度与螺栓直径和连接件厚度等有关。此法实际上是通过螺栓的应变来控制预拉力,不需专用扳手,工具简单但不够精确。

(2) 扭矩法。先用普通扳手初拧(不小于终拧扭矩值的 50%),使连接件紧贴,然后用定扭矩测力扳手终拧。终拧扭矩值根据预先测定的扭矩和预拉力之间的关系确定,施拧时偏差不得超过 $\pm 10\%$ 。

(3) 扭掉螺栓尾部的梅花卡头法。紧固螺栓时采用特制的电动扳手,这种扳手有内外两个套筒,外套筒卡住螺母,内套筒卡住梅花卡头(图 3-50)。接通电源后,两个套筒按反方向转动,螺母逐步拧紧,梅花卡头的环形槽沟受到越来越大的剪力,当达到所需要的紧固力时,环形槽沟处被剪断,梅花卡头掉下,这时螺栓预拉力达到设计值,紧固完毕。

4. 摩擦面抗滑移系数

提高连接接触面抗滑移系数 μ 是提高高强度螺栓连接承载力的有效措施。 μ 值与钢材品种及钢材表面处理方法有关。一般干净的钢材轧制表面,若不经处理或只用钢丝刷除去浮锈,其 μ 值很低。若对轧制表面进行处理,提高其表面的平整度、清洁度及粗糙度,则 μ 值可以提高。为保证摩擦面的平整度,我国《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205—2020)规定,连接接触面间隙大于 1 mm 时,要求进行处理以保证接触紧密。前面提到高强度螺栓连接必须用钻成孔,就是为了防止冲孔造成钢板下部表面不平整。为了增加摩擦面

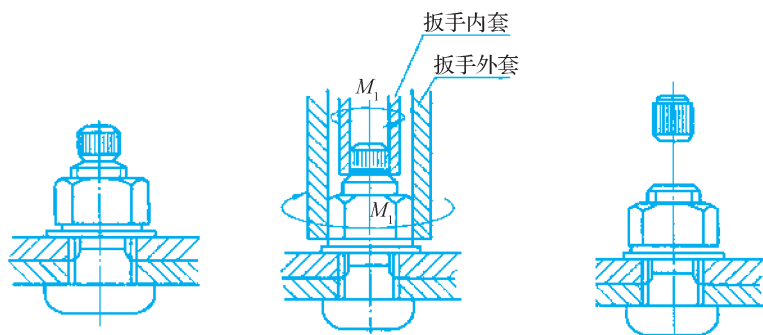
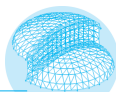


图 3-50 扭剪型高强度螺栓连接副的安装过程

的清洁度及粗糙度,一般采用下列方法:

(1) **喷砂或喷丸**。用直径 1.2~1.4 mm 的砂粒(铁丸)在一定压力下喷射至钢材表面,可除去表面浮锈及氧化铁皮,提高表面的粗糙度,因此 μ 值得以增大。由于喷丸处理的质量优于喷砂,目前大多采用喷丸。

(2) **喷砂(丸)后涂无机富锌漆**。表面喷砂或喷丸后若不立即组装,可能会受污染或生锈,为此常在表面涂一层无机富锌漆,但这样处理将使摩擦面 μ 值降低。

(3) **喷砂(丸)后生赤锈**。实践及研究表明,喷砂(丸)后若在露天放置一段时间后生出一层浮锈,再用钢丝刷除去浮锈,可增加表面的粗糙度, μ 值会比原来提高。《标准》采用这种方法,但规定其 μ 值与喷砂或喷丸处理相同。

《标准》对接触面抗滑移系数 μ 值的规定如表 3-6 所示。

表 3-6 摩擦面抗滑移系数 μ 值

在连接处构件接触面的处理方法	构件的钢号		
	Q235 钢	Q345 钢、Q390 钢	Q420 钢
喷砂(丸)	0.45	0.50	0.50
喷砂(丸)后涂无机富锌漆	0.35	0.40	0.40
喷砂(丸)后生赤锈	0.45	0.50	0.50
钢丝刷清除浮锈或未经处理的干净轧制表面	0.30	0.35	0.40

3.7.2 摩擦型高强螺栓连接的受剪计算

1. 受剪高强度摩擦型螺栓承载力计算

受剪高强度螺栓摩擦型连接中每个螺栓的承载力,与其预拉力 P 、连接中的摩擦面抗滑移系数 μ 以及摩擦面数 n_f 有关。计入抗力分项数后,螺栓承载力设计值为

$$N_v^b = 0.9 n_f \mu P \quad (3-49)$$

式中: n_f ——传力摩擦面数;

P ——每个高强度螺栓的预拉力,按表 3-5 采用;

μ ——摩擦面的抗滑移系数,按表 3-6 采用。

0.9——螺栓抗力系数分项系数 $\gamma_R = 1.111$ 的倒数数值。



高强螺栓摩擦
型抗剪计算



2. 受剪高强度螺栓摩擦型连接的计算

受剪高强度螺栓摩擦型连接的受力分析方法与受剪普通螺栓连接一样,所以受剪摩擦型高强度螺栓连接在受轴心力作用或受轴心力作用时的计算均可利用前述普通剪力螺栓连接的计算公式,只需将单个普通螺栓的承载力设计值 $N_{\min}^b$ 改为单个受剪摩擦型高强度螺栓的承载力设计值 N_V^b (式 3-49) 即可。

摩擦型高强度螺栓连接中构件的净截面强度验算与普通螺栓连接有所区别,应特别注意。现加以论述如下:

由于摩擦型高强度螺栓是依靠被连接件接触面间的摩擦力传递剪力,假定每个螺栓所传递的内力相等,且接触面向的摩擦力均匀地分布于螺栓孔的四周(图 3-51),则每个螺栓所传递的内力在螺栓孔中心线的前面和后面各传递一半。这种通过螺栓孔中心线以前板件接触面间的摩擦力传递的现象称为“孔前传力”。如图 3-51 所示的最外列螺栓截面 I-I 已传递 $0.5n_1(N/n)$ (n 和 n_1 分别为构件一端和截面 I-I 处的高强度螺栓数目),故该截面的内力为 $N' = N - 0.5n_1(N/n)$, 故连接开孔截面 I-I 的净截面强度应按式验算:

$$\sigma = \frac{N'}{A_n} = \left(1 - 0.5 \frac{n_1}{n}\right) \frac{N}{A_n} \leq f \quad (3-50)$$

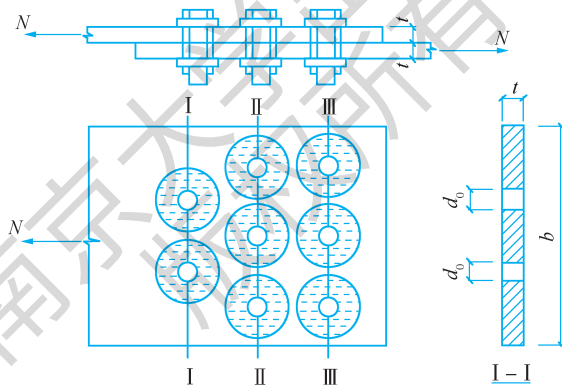


图 3-51 钢板净截面强度

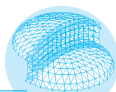
由以上分析可知,最外列以后各列螺栓处构件的内力显著减小,只有在螺栓数目显著增多(净截面积显著减少)的情况下,才有必要作补充验算。因此,通常只需验算最外列螺栓处有孔构件的净截面强度即可。

此外,由于 $N' < N$, 所以除对有孔截面进行验算外,还应对毛截面进行验算,即应验算, $\sigma = N/A \leq f$ 。

例题 3.10 如图 3-52 所示为一钢牛腿,承受荷载设计值 $V=90 \text{ kN}$,其偏心距 $e=300 \text{ mm}$,用高强度螺栓摩擦型连接于工字形柱的翼缘上。钢材为 Q345,螺栓为 10.9 级 M20,喷砂后生赤锈处理接触面。试验算螺栓的强度是否满足要求?

解: 单个螺栓的承载力

由表 3-5 查得 $P=155 \text{ kN}$,由表 3-6 查得 $\mu=0.50$ 。



$$N_v^b = 0.9n_f\mu p = 0.9 \times 1 \times 50 \times 155 = 69.75 \text{ kN}$$

作用于螺栓群中心 O 的竖向剪力 V 和扭矩 T 分别为

$$V = 90 \text{ kN}$$

$$T = Ve = 90 \times 0.3 = 27 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

最不利螺栓在最外排,其受力为:

$$\sum x_i^2 + \sum y_i^2 = 6 \times 7^2 + 4 \times 7.5^2 = 519 \text{ cm}^2$$

$$N_{x1}^T = \frac{Ty_1}{\sum x_i^2 + \sum y_i^2} = \frac{27 \times 10^3 \times 75}{519 \times 10^2} = 39.02 \text{ kN}$$

$$N_{y1}^T = \frac{Tx_1}{\sum x_i^2 + \sum y_i^2} = \frac{27 \times 10^3 \times 70}{519 \times 10^2} = 36.42 \text{ kN}$$

$$N_{y1}^V = \frac{V}{n} = \frac{90}{6} = 15 \text{ kN}$$

$$N_1^{TV} = \sqrt{(N_{x1}^T)^2 + (N_{y1}^T + N_{y1}^V)^2} = \sqrt{(39.02)^2 + (36.42 + 15)^2} = 64.55 \text{ kN} < N_v^b = 69.75 \text{ kN}$$

故螺栓的强度满足要求。

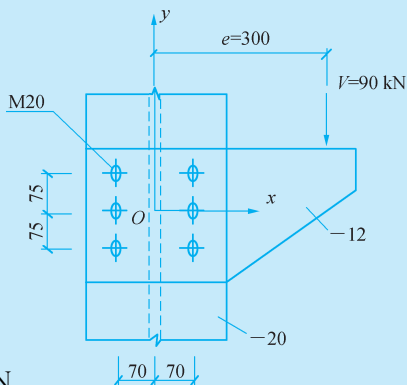


图 3-52 例题 3.10 图

例题 3.11 如图 3-53 所示为一 300×16 轴心受拉钢板用双盖板和高强度螺栓摩擦型连接的拼接接头。已知钢材为 Q345, 螺栓为 10.9 级 M20, 接触面喷砂后涂无机富锌漆。试确定该拼接的最大承载力设计值 N 。

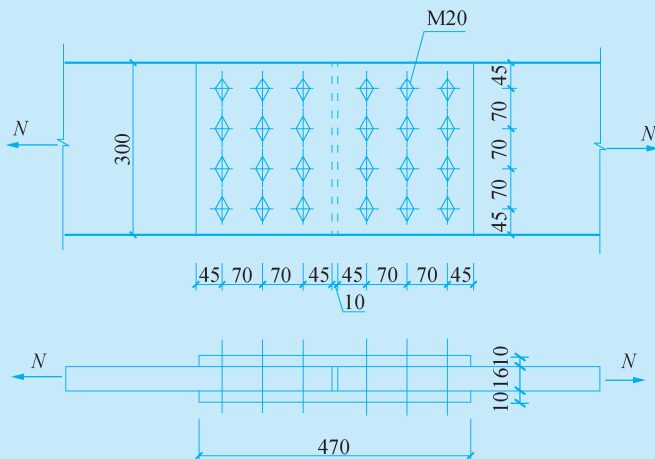


图 3-53 例题 3.11 图 (单位: mm)



解：(1) 按螺栓连接强度确定 N

由表 3-5 查得 $P=155\text{ kN}$ ，由表 3-6 查得 $\mu=0.4$ 。

$$N_V^b = 0.9n_f\mu P = 0.9 \times 2 \times 0.4 \times 155 = 111.6\text{ kN}$$

12 个螺栓连接的总承载力设计值为：

$$N = nN_V^b = 12 \times 111.6 = 1339\text{ kN}$$

(2) 按钢板截面强度确定 N

构件厚度 $t=16\text{ mm}$ 小于两盖板厚度之和 $2t_1=20\text{ mm}$ ，所以按构件钢板计算。

① 按毛截面强度

由附录 2 查得 $f=310\text{ N/mm}^2$ 。

$$A = bt = 300 \times 16 = 4800\text{ mm}^2$$

$$N = Af = 4800 \times 310 = 1512\text{ kN}$$

② 按第一列螺栓处净截面强度

$$A_n = (b - n_1d_0)t = (300 - 4 \times 22) \times 16 = 3392\text{ mm}^2$$

$$N = \frac{A_n f}{1 - 0.5n_1/n} = \frac{3392 \times 310}{1 - 0.5 \times 4/12} = 1262\text{ kN}$$

因此，该拼接的承载力设计值为 $N=1262\text{ kN}$ ，由钢板的净截面强度控制。

例题 3.12 如图 3-54 所示，构件— 300×16 受轴心受拉 $N=940\text{ kN}$ ，采用 M20、8.8 级摩擦型高强螺栓双盖板连接。已知盖板— 300×8 ，钢材为 Q345，钢丝刷清除浮锈，试验算该连接是否满足要求。（ $\mu=0.35$ ， $P=125\text{ kN}$ ）

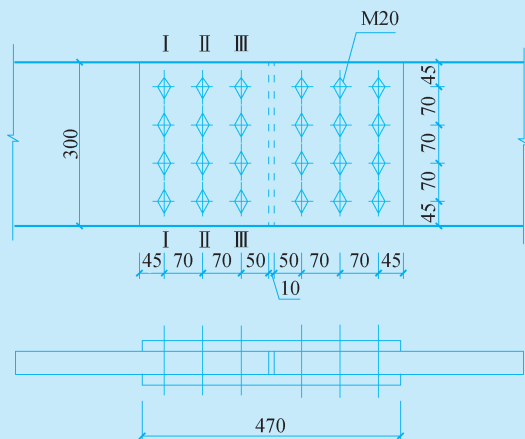
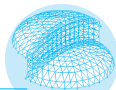


图 3-54 例题 3.12 图 (单位: mm)



解: (1) 参数查询

根据表 3-5 可知预拉力 $P=125 \text{ kN}$; 根据表 3-6 可知 $\mu=0.35$ 。

根据附录 2 可知钢材抗拉强度 $f=310 \text{ N/mm}^2$ 。

(2) 验算螺栓

$$N_V^b = 0.9 n_f \mu P = 0.9 \times 2 \times 0.35 \times 125 = 78.75 \text{ kN}$$

$$n N_V^b = 12 \times 78.75 = 945 \text{ kN} > 940 \text{ kN (实际外力)}$$

所以螺栓满足要求。

(3) 验算第一列螺栓处钢材

$$A_n = (b - n_1 d_0) t = (300 - 4 \times 22) \times 16 = 3392 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \left(1 - 0.5 \frac{n_1}{n}\right) \frac{N}{A_n} = \left(1 - 0.5 \frac{4}{12}\right) \times \frac{940 \times 10^3}{3392} = 230.9 \text{ N/mm}^2 < f = 310 \text{ N/mm}^2$$

所以钢材满足要求。

由以上计算可知该连接满足要求。

3.7.3 摩擦型高强螺栓连接的受拉计算



高强螺栓摩擦型抗拉计算

承受外力之前,高强度螺栓已有很高的预拉力 P ,它与板层之间的压力平衡。当施加外力 N 使螺栓受拉时,螺栓略有伸长,使拉力增加 ΔP ,而压紧的板件则有所放松,使压力减小,螺杆伸长与板的放松膨胀值相当。由于板在厚度方向刚度很大,膨胀很小,因而螺杆伸长也很小,其增加的拉力 ΔP 也很小。由试验分析得知,只要板层之间压力未完全消失,螺栓杆中的拉力只增加 $5\% \sim 10\%$,所以高强度螺栓所承受的外拉力基本上只使板层间压力减小,而对螺栓杆的预拉力没有大的影响。直到外拉力大于螺栓杆的预拉力,板层完全松开后,螺栓受力才与外力相等。

为使板件间保留一定的压紧力,《标准》规定,一个受拉摩擦型高强度螺栓的承载力设计值 N_t^b 为

$$N_t^b = 0.8P \quad (3-51)$$

受拉高强度螺栓摩擦型连接受轴心力 N 作用时,与普通螺栓连接一样,假定每个螺栓均匀受力,则连接所需的螺栓数 n 为

$$n = \frac{N}{N_t^b} \quad (3-52)$$

受拉高强度螺栓摩擦型连接受弯矩 M 作用时,只要确保螺栓所受最大外拉力不超过 $N_t^b = 0.8P$,被连接件接触面将始终保持密切贴合。因此,可以认为螺栓群在弯矩 M 作用下始终绕螺栓群中心轴转动,即转动轴在螺栓群中心轴。最外排螺栓所受拉力最大,其值 N_t^M 可按下列公式计算:



高强螺栓摩擦型抗弯计算

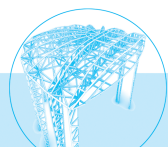
$$N_1^M = \frac{My_1}{m \sum y_i^2} \leq N_t^b = 0.8P \quad (3-53)$$

式中: y_1 ——最外排螺栓至转动轴(螺栓群中心)的距离;

y_i ——第 i 排螺栓至转动轴(螺栓群中心)的距离;

m ——螺栓纵向列数。

受拉高强度螺栓摩擦型连接受偏心拉力作用时,如前所述,只要螺栓最大拉力不超过 $0.8P$,连接件接触面就能保证紧密结合。因此不论偏心力矩的大小,均可按受拉普通螺连接小偏心受拉情况计算,即按式(3-44a)计算,而不需按式(3-44b)进行大小偏心判断,但式中取 $N_t^b = 0.8P$ 。



习题与思考题

一、名词解释

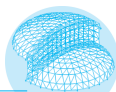
1. 正面角焊缝。
2. 侧面角焊缝。
3. 摩擦型高强螺栓。
4. 承压型高强螺栓。

二、填空题

1. 钢结构的连接方法有_____、_____和_____。
2. 焊缝连接的形式按构件的相对位置分有_____、_____、_____和角接。
3. 在对接焊缝中,为了保证焊缝质量,通常按焊件厚度及施焊条件的不同,将焊口边缘加工成不同形式的坡口,坡口形式通常有_____、_____、_____、U型、X型等。
4. 焊接形式按施工位置分为:仰焊、立焊、横焊、俯焊,其中以_____施工位置最好,_____施工位置最差。
5. 螺栓连接可分为_____和_____两种。
6. 抗剪螺栓连接的破坏形式有_____、_____、_____、_____、_____。
7. 在普通螺栓连接中,抗剪螺栓连接是依靠螺栓的_____和_____来传递外力的;抗拉螺栓连接是由_____直接承受拉力来传递外力的。

三、思考讨论题

1. 手工焊条型号应根据什么选择? 焊接 Q235B 钢和 Q345B 钢的一般结构须分别采用哪种型号焊条?
2. 焊缝的质量分几个等级? 如何验收?
3. 对接焊缝在什么情况下才需要进行计算?
4. 角焊缝的尺寸有哪些要求?



5. 角钢连接角焊缝在受到轴心力作用时,肢背和肢尖的内力分配系数不同的原因是什么?
6. 螺栓的最小中距、边距和端距分别有哪些要求?
7. 普通螺栓受剪连接的破坏有哪几种形式? 分别用什么方法来防止破坏?
8. 试比较普通螺栓连接和高强螺栓连接在偏心拉力作用下各种的转动轴位置有什么不同?
9. 试比较普通螺栓连接和高强螺栓连接的受力特点有什么不同?
10. 试比较两拼对接钢板,采用双盖板连接,分别采用侧面角焊缝和螺栓连接,对盖板的要求有什么不同?

四、计算题

1. 设计一 500×14 钢板的对接焊缝拼接。钢板承受轴心拉力,其中恒荷载和活荷载标准值引起的轴心拉力值分别为 700 kN 和 400 kN,相应的荷载分项系数为 1.2 和 1.4。已知钢材为 Q235,采用 E43 型焊条,手工电弧焊,三级质量标准,施焊时未用引弧板。
2. 验算如图 3-57 所示由三块钢板焊成的工字形截面梁的对接焊缝强度。已知工字形截面尺寸为:翼缘宽度 $b = 100$ mm,厚度 $t = 12$ mm;腹板高度 $h_0 = 200$ mm、厚度 $t_w = 8$ mm。截面上作用的轴心拉力设计值 $N = 240$ kN,弯矩设计值 $M = 50$ kN·m,剪力设计值 $V = 240$ kN。钢材为 Q345,采用手工焊,焊条为 E50 型,施焊时采用引弧板,三级质量标准。

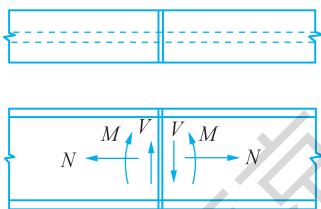


图 3-57 习题 2 图

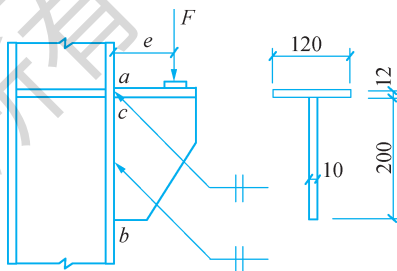


图 3-58 习题 3 图 (单位: mm)

3. 验算如图 3-58 所示柱与牛腿连接的对接焊缝。已知 T 形牛腿的截面尺寸为:翼缘宽度 $b = 120$ mm、厚度 $t = 12$ mm;腹板高度 $h_0 = 200$ mm、厚度 $t_w = 10$ mm。距焊缝 $e = 150$ mm 处作用有一竖向力 $F = 180$ kN(设计值),钢材为 Q390,采用 E55 型焊条,手工焊,三级质量标准,施焊时不用引弧板。
4. 设计一双盖板的钢板对接接头(图 3-59)。已知钢板截面为一 300×14 ,承受轴心拉力设计值 $N = 800$ kN(静力荷载)。钢材为 Q235,焊条用 E43 型,手工焊。

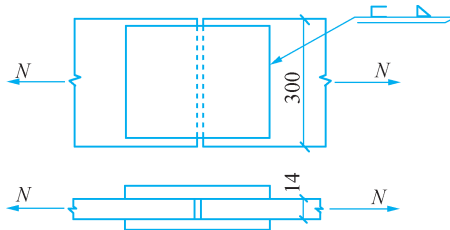


图 3-59 习题 4 图(单位: mm)

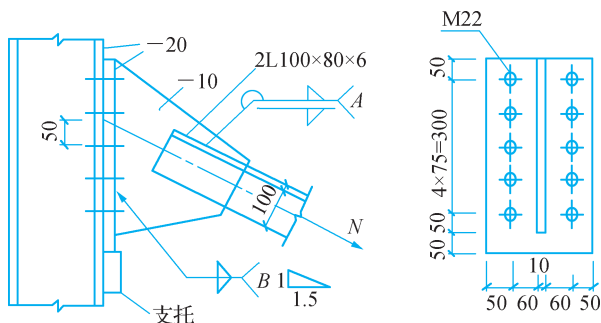


图 3-60 习题 5、习题 6、习题 9 图(单位: mm)



-

图 3-62 习题 11 图(单位: mm)

- 082

