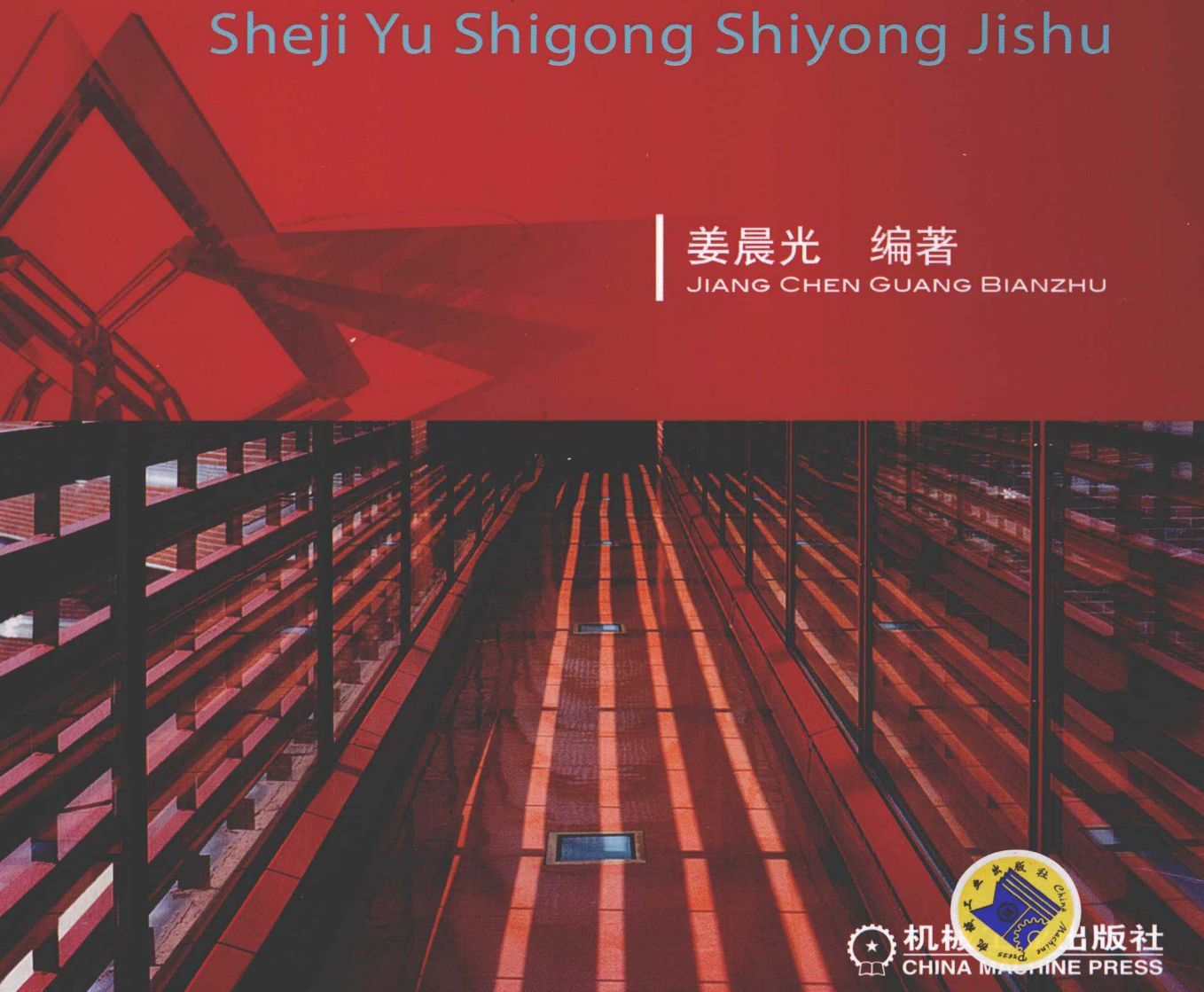


建筑钢结构 设计与施工实用技术

Jianzhu Gangjiegou
Sheji Yu Shigong Shiyong Jishu

姜晨光 编著

JIANG CHEN GUANG BIANZHU



建筑钢结构设计与 施工实用技术

姜晨光 编著



机械工业出版社

本书从实用的角度出发,系统地阐述了建筑钢结构的特点、基本要求、制作方法、常见安装施工工艺、焊接与连接施工工艺、涂装施工工艺与要求等,给出了相关的工程实例,对建筑钢结构的建造(建筑钢结构的设计、建设、管理)、科学研究及教学均具有一定的指导意义和参考价值。

本书可作为建设主管部门工作人员、土木工程企业管理人员、土建工程设计及施工人员、土建工程建设及管理人员、工程勘察工作者、建筑钢结构研究者的参考用书,还可作为各类教育层次的土木工程专业学生的课外辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

建筑钢结构设计与施工实用技术/姜晨光编著. —北京:机械工业出版社, 2012. 3

ISBN 978 - 7 - 111 - 37426 - 8

I. ①建… II. ①姜… III. ①建筑结构: 钢结构 - 结构设计②钢结构 - 建筑工程 - 工程施工 IV. ①TU391.04②TU758.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 020830 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 薛俊高 责任编辑: 薛俊高 李 坤

版式设计: 霍永明 责任校对: 刘秀丽 吴美英

封面设计: 张 静 责任印制: 杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2012 年 4 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 15.5 印张 · 382 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 37426 - 8

定价: 42.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 一 部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部: (010)88379649

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

钢结构具有自重轻、强度高、适合于软弱地基且安装容易、施工周期短、施工污染小、抗震性能好、可循环利用等优点,被广泛应用于体育场馆、会展中心、桥梁、火车站房、飞机库、住宅、厂房等的建设中。以钢结构为主体的住宅不仅抗震性能强而且还是可持续性宜居住宅。目前国内外常见的钢结构建筑主要有低层或多层钢结构、轻钢结构、高层及超高层钢结构、大跨及超大跨度钢结构、巨型钢结构等。

改革开放以来,随着我国钢铁产量的逐年上升,我国的钢结构建筑也得到了快速发展,国家体育中心(鸟巢)、深圳大运体育中心、上海环球金融中心、杭州湾跨海大桥等具有代表性的钢结构建筑的总体水平均已居世界领先地位。中国建筑业的快速发展使得钢结构建筑的比例逐年提高,然而,在我国钢结构建筑迅速发展的背后还隐藏着许多问题(比如钢结构设计水平低、钢结构制作和施工受工期制约严重、钢材价格及质量波动大等),这些问题都直接或间接地影响了我国钢结构建筑的健康发展。要确保钢结构建筑安全、健康、可持续发展,必须建立更加严格的审图制度,更加科学合理地安排钢结构建造工期,更加有效地规范钢材市场行为,进一步强化对钢材质量的监控,进一步提高钢材的制造水平。美国“911”的悲剧对钢结构的发展起到了一个重要的警醒作用,从此,人们对钢结构建筑的防火问题更加关注并开始进一步全面地权衡与思考其他问题(比如建筑钢结构的防腐问题)。另外,还有许多技术及生产工艺方面的问题需要解决(比如优质建筑结构用钢的生产,建筑钢结构的全面精细质量检测,钢结构生产的智能控制等)。总之,中国钢结构建筑的健康、可持续发展任重道远。为普及建筑钢结构建造知识,为建筑钢结构建设事业健康发展作出自己应有的贡献,笔者撰写了本书。本书是笔者在江南大学从事教学、科研和工程实践活动的经验积累之一,也是笔者30余年土木工程生涯的部分心得。本书的撰写借鉴了国内外大量的实际工程资料,吸收了许多前人及当代人的宝贵经验和认识,也包含了笔者对建筑钢结构的感悟、认识以及些许微不足道的研究心得。

全书由江南大学姜晨光主笔完成。李锦铭、王浩闻、苏文馨、徐至善、黄建文五位教授级高工对本书初稿进行了认真审阅,提出了许多中肯的意见;无锡市建设局夏正兴、何跃平、成美捷、钱保国、宋艳萍、胡闻、陈江渝、华崇乐、闵向林、黄伟祥、朱烨昕、顾持真,无锡市财政评估中心王静,华仁建设集团陈爱岚、吴华杰、邹鹏、程文丽、陈晓江、施其虎、王同文、王纪明,江南大学王凤芹、姜勇、张大林等为本书的最终定稿提供了大量帮助,谨此致谢!

限于水平、学识和时间,书中内容难免存在欠妥之处,敬请读者批评指正。

姜晨光

2011年8月于江南大学

目 录

前言

第1章 建筑钢结构的基本要求	1	第3章 建筑钢结构的安装施工	116
1.1 建筑钢结构的特点	1	3.1 单层钢结构安装施工	116
1.2 建筑钢结构的材料	5	3.2 多层与高层钢结构安装施工	122
1.3 建筑钢结构构件的截面承载强度	17	3.3 压型金属板安装施工	142
1.4 建筑钢结构中单个构件的 承载稳定性	35	3.4 钢网架结构拼装施工	145
1.5 建筑钢结构整体结构中压杆 和压弯构件的设计	50	3.5 钢网架结构安装施工	156
1.6 建筑钢结构的正常使用极限状态	57	第4章 建筑钢结构的焊接 与连接施工	186
1.7 建筑钢结构的连接和节点 的构造与计算	63	4.1 建筑钢结构的焊条电弧焊焊接施工 ...	186
第2章 建筑钢结构的制作	85	4.2 建筑钢结构的埋弧自动焊焊接施工 ...	198
2.1 建筑钢结构制作的基本要求	85	4.3 建筑钢结构的熔嘴电渣焊焊接施工 ...	207
2.2 建筑钢结构制作的施工准备	86	4.4 建筑钢结构的焊钉焊接施工	209
2.3 建筑钢结构制作对材料和质量 的要求	89	4.5 建筑钢结构的二氧化碳气体 保护焊焊接施工	212
2.4 建筑钢结构制作的施工工艺	90	4.6 建筑钢结构的高强度螺栓连接施工 ...	218
2.5 建筑钢结构制作的质量标准	102	4.7 建筑钢结构的普通紧固件连接施工 ...	225
2.6 建筑钢结构制作的成品保护	103	第5章 建筑钢结构的涂装施工	229
2.7 建筑钢结构制作中的安全环保措施 ...	105	5.1 建筑钢结构的防腐涂料涂装施工	229
2.8 建筑钢结构制作的质量记录要求	105	5.2 建筑钢结构的防火涂料涂装施工	234
		参考文献	239

第 1 章 建筑钢结构的基本要求

1.1 建筑钢结构的特点

钢结构是一种传统的、历史悠久的重要结构体系。改革开放前,我国由于受钢材相对匮乏以及“节约、合理使用”政策的制约,建筑钢结构的发展受到了较大限制,因此,建筑钢结构领域的相关工作也开展得较少。改革开放后,大量钢结构技术、工程经验、产品不断地被引进、消化、吸收并得到创新发展,在我国确立“以经济建设为中心”而使国民经济持续、快速、健康发展的大背景下,中国钢结构技术、产业、市场进入了快速发展的黄金时代,也确立了钢结构行业在国民经济建设中的重要产业地位,使钢结构行业成为我国重要的新型工业产业之一。

1.1.1 钢结构技术的历史与发展

确切地说,钢结构发展的源头是铁结构(比如铁索桥、铁塔、铁的房屋建筑等),随着冶金技术的发展,钢的纯净度、强韧性、焊接性均得到了明显提高,因而使钢结构获得了更为广阔的应用空间。目前,最高、最大跨度、最深的结构以及各种轻型结构基本上都是由钢结构来实现的,世界各地标志性的高层建筑、广播电视塔、桥梁、体育场馆以及现代化工业厂房等的建设均充分显示出钢结构的经济性、优越性以及可循环的环保理念和产业化发展趋势,因此,钢结构得到了越来越多的国家、企业和科技工作者的重视,有关的政策、规范、标准也在不断更新以适应、推动和促进钢结构事业的发展。

(1) 我国钢材产业的发展情况

钢材是钢结构最基本的原材料,钢材的消耗水平也是工业化国家发达程度的重要标志之一。目前我国钢产量居世界前列,2010 年度的钢产量已超过 5 亿 t。但人均消费不足 400kg,与发达国家钢材人均消耗 600kg 相比仍有一定差距。我国钢结构用钢仅占目前钢总产量的 6% (而发达国家则一般在 10% 左右)。由于钢结构用的钢材品种、质量、规格因结构不同而有很大差异,我国钢铁企业经过近 30 年建设,通过引进国外先进技术、装备和技术革新、改造,基本上能够提供满足钢结构行业需要的钢材(Q235、Q345、Q390、Q420、Q460; 板材厚度 0.3 ~ 250mm; 热轧 H 型钢腹板高度 200 ~ 1000mm; 镀锌、镀铝锌钢板及彩色涂层钢板、圆钢管及大型方形钢管; 各种形状的冷弯型钢)。北京奥运场馆建设所用的钢材就完全是国产钢材,其中具有世界先进水平的 Q460E ~ Z35 在很短时间内就完成了研制和工程应用,说明我国钢结构相关的技术水平完全能够满足现代化建设的需要。

(2) 我国在钢结构分析、计算、设计领域的发展情况

钢结构分析、计算、设计是确保钢结构能否承担起结构工程要求的荷载,满足安全、寿命和经济合理性要求的重要环节。从 1955 年我国编写出《钢结构设计规范试行草案》(规范 4-54),到目前最新的《钢结构设计规范》(GB50017),理论和结构分析计算与世界发达

国家的规范水平逐渐接近,其中,许多规定条目均是由国内科研、设计、建设等单位通过大量试验和工程应用获得的成果。《钢结构设计规范》(GB50017)与《钢结构工程施工质量验收规范》(GB50205)、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB50018)、《建筑钢结构焊接技术规程》(JGJ81)等50余个与钢结构密切相关的规范标准为我国钢结构事业的健康可持续发展奠定了必要的技术基础。计算机技术和人工智能技术的发展使钢结构分析、计算、设计及施工详图绘制软件得以开发、应用,并使其不断更新与优化,从而提高了设计人员的工作效率,减少了误差。目前,国内使用的钢结构计算机设计软件既有国外引进的,也有合作开发的,还有我国自己研发的,应用比较普遍的钢结构软件有PKPM(中国建筑科学研究院开发);SS2000、PS2000(中冶集团建筑研究总院开发);X-STEEL、MTS(同济大学开发);STRUCAD(北京华思维科技有限公司开发)、SSDD(阿依艾工程软件(大连)有限公司开发)等。钢结构设计软件的应用改变了过去只能使用图版、尺子、计算器进行设计的落后面貌。

(3) 我国钢结构制造、加工技术的发展情况

以往钢结构制造给人们的印象就是铆焊车间(有简单的剪切设备和焊接设备就可以进行生产制造),而现代钢结构制造发展的趋势是信息化带动自动化的制造装备来生产钢结构构件、非标准设备及成套设备。数控切割、钻孔、焊接及流水线的生产工艺提高了生产效率,保证了加工构件的精密度。目前,国内有不少钢结构企业在规模、装备水平及员工素质方面已达到了国际先进水平并获得了许多国外订单,专门为钢结构制造企业提供先进装备及焊接H型钢、箱型钢、冷弯型钢生产线的企业就有近百家(如山东的法因非赛普,无锡的阳通、华联,哈尔滨的四海,浙江的精工科技等)。当前条件下,先进的制造装备技术对复杂、大型、精密尺寸的钢结构构件制造是必不可少的。

(4) 我国钢结构安装技术的发展情况

现代钢结构安装技术是借助高效率的施工机械,先进的吊装、张拉、液压顶升装备来实现的。经过多年的研究开发应用,目前我国已构建了许多先进的施工工法(如整体提升、单元构件滑移拼装、高层建筑施工成套技术等)。许多大跨、高耸、重载的钢结构工程从方案制订,设备配置,质量、安全、意外措施及网络系统管理等方面均形成了许多专业化队伍及成套技术,目前在铁道、交通、石化、电力、冶金、机械、建设系统均有专业化施工企业。目前国内的各类工程项目基本上都是由这些企业来实施的,它们在许多大型工程项目中的安装质量已达到国际先进水平。安装质量好坏是最终作品成败的关键,许多设计、制造中没有考虑到或考虑不周全的问题均必须通过安装来调整完善。

(5) 我国钢结构连接技术的发展情况

当代钢结构连接技术的发展非常迅速,从传统的铆接到高强度螺栓连接、焊接、销接、粘接及各种接点技术均有发展。钢结构工程中应用最广泛的是高强度螺栓连接和焊接连接,这两种连接方式几乎每一个钢结构工程都不可避免。目前,高强度螺栓产品比较成熟,国内生产企业已有几十家,年产近10000万套。高强度螺栓连接对构件摩擦面、螺栓孔位置及连接板均有严格要求。焊接连接通常分别在工厂和施工现场操作,目前,大量自动化、半自动化焊接设备已经在钢结构制造、施工中采用(目前主要采用埋弧焊、二氧化碳气体保护焊、自保护的药芯焊等)。除要求焊接设备稳定、可靠、耐用外,对焊条、焊丝、焊剂以及焊接工人素质与技能的要求也越来越高,特别是当许多钢结构处于外露而无装饰状态时其焊接的

内在质量和表面质量均会有很高的要求。有关焊接工艺的评定高强度钢（或厚板、铸钢）的焊接及无损探伤技术尚有待进一步研究与发展，应不断开拓创新才能满足现代钢结构发展的需要。我国西气东输重点工程中采用 X70 级钢材以抵抗硫化氢腐蚀，其焊接质量要求非常严格，工程采用了直缝及螺旋埋弧法焊接钢管。工厂对焊缝质量要求是采用 X 光在线检查、水压检验、超声波探伤、X 光拍片等六道检验手段检查，只有经过六道检验手段检查合格后其质量才能真正满足工程要求。西气东输工程的成功建设提升了我国的钢结构施工水平，并使许多企业获得了大量的国内外工程订单。因此，钢结构连接技术的发展创新将促进钢结构的整体发展并同时更好地满足经济建设发展的要求。

（6）我国钢结构防腐与防火的发展情况

纵观国内外钢结构的发展历程，钢结构的应用长期以来一直受到防腐与防火的制约，许多人对钢结构的耐久性、耐火性持怀疑态度因而排斥其使用。实际上，许多古代建造的铁结构至今仍在使用（如我国古代建造的铁链桥——云南宝山霁虹桥已使用了 500 多年，法国建造的埃菲尔铁塔已经使用了 100 多年），因此，采用适当的防腐措施和必要的维护措施完全可满足结构要求的使用寿命（钢筋混凝土结构、砖木结构也是如此）。目前常规的耐大气腐蚀的涂料可满足 5~10 年的使用要求（采用重防腐配套的涂料可满足 30~50 年的使用要求）。钢结构的防火问题在近十几年得到了特别关注并制定了严格的行政管理措施，特别是美国“911 事件”导致的高层建筑坍塌使世界各国对钢结构的耐火性进行了认真的反思。一般情况下，钢材在高温 600℃ 时就基本丧失了强度，因此，钢结构是不能在持续的高温条件下使用的。考虑到火灾是由于意外产生以及火灾后局部升温对钢结构产生的严重影响，各个国家都根据当地人身和财产安全的特点制定了有关的防火规范，规定必须采取报警、消防措施、防火涂料等来满足钢结构的耐火极限要求。目前许多企业均能生产防火涂料，根据耐火极限要求有薄型、厚型涂料，具体可根据设计要求选用。当然，也可采用防火板以及隔热、绝缘的材料包覆以满足防火规范要求。许多钢铁企业还针对钢结构的使用要求研制出了提高钢材耐火性能的耐火钢，其在 600℃ 高温时仍然能保持三分之二的强度。另外，还有能耐大气腐蚀的耐候钢以及又耐候又耐火的耐候耐火钢等。我国武钢、鞍钢、济钢等研制的耐候钢在建筑、机车车辆、塔桅领域已经得到推广应用，耐候钢延长了钢结构的使用期限，取得了良好的社会效益和经济效益。耐候耐火钢在上海残疾人体育中心、北京国家大剧院也得到应用。

（7）我国钢结构产业的发展情况

我国在 20 世纪 50 年代能够承担钢结构制造任务的企业不过 20~30 家（主要是华北、华东、西南地区的几个建筑机械厂和大型的重型机械厂、造船厂、桥梁厂等），目前这类企业已发展壮大到上千家（其中有 30 多家企业年生产能力在 10~30 万 t 之间）。全行业年生产能力近 2000 万 t，产值 1000 亿元以上，且其产业发展速度惊人，部分企业的装备水平、生产技术、经营管理能力已达到国际先进水平。这些企业的许多生产线的主体设备甚至整条生产线都是国外引进的，设计、制作详图、放样基本上都由计算机在各种专门软件支持下完成，可以直接输入到制造车间进行无图化的加工。这些企业承担了我国大型重点工程的钢结构制造，如大跨度桥梁、巨型水坝闸门、火箭发射塔架、大型电站锅炉钢架、高层建筑、大跨度公共建筑等。一批规模较小的中小型加工企业（年生产能力在 5000~10000t）也在市场机制下应运而生，其中一些民营企业水平还比较低，但这些企业非常活跃，有着自己的优势和特长，承担着许多中小规模工程的加工制作任务，能够对市场起及时补充作用。我国国

有企业随着经济发展不断深化企业体制改革而使企业充满活力,许多中外合资企业、独资企业、民营企业、股份制企业也纷纷成立,从而形成了今天钢结构企业百舸争流的兴旺景象。

目前,由于钢结构的造价和一次性投入都比较高(在房屋建筑中比钢筋混凝土结构、砖混结构约高6%~10%),从而影响了钢结构的大量推广使用,导致国内目前钢结构企业的产能远大于实际产量(很多新企业任务不足,生产能力不能发挥)并造成较大的供需差距进而导致了一定程度的市场恶性竞争与相互压价(这也是当前钢结构行业面临的主要困境之一)。我国钢结构制造产业大多集中在上海、浙江、山东、北京、深圳、青岛、天津等省市,传统的船舶、机械、冶金、车辆制造企业除满足本行业的需要外都在向建筑钢结构这个最大、最广阔的市场进军。钢结构龙头企业在规模化、商品化以及设计、制造、施工一条龙服务方面不断开拓新思路。目前,在行业中比较有影响的重点企业的地区分布是浙江萧山区(如杭萧钢构、精工钢构、恒达钢构等)、上海地区(如宝冶钢构、江南重工等)、京津地区(如三杰国际钢构、首钢钢构、中国京冶等)、武汉地区(如武钢金结、武昌造船、一冶钢构等)、广东地区(如广船国际、深圳阳光、五羊钢构等);在行业中比较有影响的重点企业的行业分布是铁道行业(如山桥集团、宝桥集团等)、冶金建设行业(如宝冶钢构、二十冶钢构、五冶钢构等)、建设行业(如中建八局、中建二局、中建一局等)、重机制造业(如太原重机、哈尔滨锅炉、上海锅炉等)、石化行业(如兰州石化、金陵石化、燕山石化等)、钢铁行业(如宝钢产业、马钢钢构、首钢钢构等)、船舶行业(如江南重工、武昌造船、大连造船等)、其他行业(如上海振华港机、沪宁钢机、青岛东方铁塔等)。以上地区、行业中的重点钢结构制造企业构成了新型、现代的钢结构产业。

目前,我国的钢结构企业正在以加快发展先进制造业为目标,坚持以信息化带动工业化,广泛应用高新技术和先进适用技术改造提升制造业以形成更多拥有自主知识产权的知名品牌,发挥制造业对经济发展的重要支撑作用,我国的钢结构产业要为基础产业、基础设施(包括能源、交通运输、通信、材料、矿产开发等重大基础设施及基础产业)建设提供重要支撑与服务,要为城镇化建设及工业、民用设施建设提供绿色、环保、节约、安全可靠的钢结构体系,要促进钢结构工程建设标准、规范达到国际先进水平。我国目前钢结构产业年产量约占全国钢产量的10%(建筑钢结构约占6%),应加强钢结构市场的开发,应在满足国内市场需求的前提下扩大出口并在国际市场上占有一席之地,应积极培育钢结构企业的创新竞争能力并提高其规模化水平和配套能力,携手共同做大做强钢结构产业,全面推动钢结构事业的发展。

1.1.2 建筑钢结构的基本特点

建筑钢结构的特点可概括为以下八点:

1) 建筑钢材强度高,塑性好(强度高是指与其他建材相比其强度高得多,因此适用于建造大跨度结构、高层建筑结构以及重型结构。塑性好是指钢结构一般不会因偶然超载或局部超载而突然断裂破坏。韧性好是指钢结构适宜在动力荷载作用下工作,故在地震区采用钢结构较为有利)。

2) 钢结构的重量轻(钢材重度为 77kN/m^3 ,钢结构做屋架其重量仅为钢筋混凝土屋架的 $1/4 \sim 1/3$)。

3) 材质均匀,与力学计算的假定比较符合(钢结构内部组织比较均匀而接近各向同性,因此可被认为是理想弹塑性体,在一般情况下均处于弹性阶段,采用力学方法计算的结

果符合实际受力情况)。

4) 钢结构的工业化程度高(钢结构中各种构件均可在金属结构厂中生产,其成品精度高,在现场拼接简单,施工期短)。

5) 钢结构密闭性较好(钢结构的钢材和连接的水密性和气密性均较好,故适宜用做密闭要求高的结构)。

6) 钢结构耐腐蚀性差(钢结构在湿度大或有腐蚀性介质的环境中容易锈蚀从而使结构受损,因此必须采取防护措施(如除锈、刷油漆或涂料等),故其维护费用较高)。

7) 钢材耐热但不耐火(钢材在 200°C 以内性能变化不大,但当温度大于 200°C 时其屈服强度、弹性模量会降低,当温度大于 600°C (火灾)时结构可能瞬间崩溃)。

8) 钢结构在低温和其他条件下可能发生脆性断裂。

1.1.3 建筑钢结构的应用概况

钢结构的应用范围不仅取决于钢结构本身的特点,还取决于国民经济发展的情况。钢结构的常见应用范围是重型工业厂房(起重机吨位 $\geq 100\text{t}$, 高度 $20 \sim 30\text{m}$)、大跨度结构、高耸结构、多高层建筑、承受振动荷载影响及地震作用的结构、板壳结构、可拆卸或移动的结构、轻型钢结构、和混凝土组合而成的组合结构以及其他特种结构。

1949 年以前钢结构在我国发展很缓慢。1949 年以后钢结构在我国逐渐得以发展(现在则已经发展到了很高的水平)。我国比较有代表性的钢结构桥梁有武汉长江大桥(1957 年)、南京长江大桥(1968 年)、九江长江大桥(1995 年);比较有代表性的公共和民用建筑有北京人民大会堂(1959 年,屋盖结构的钢屋架 $l=60.9\text{m}$ 、 $h=7\text{m}$)、北京工人体育馆(1961 年,车辐式悬索结构, $d=94\text{mm}$)、上海体育馆(1975 年,圆形平板网架结构, $d=110\text{m}$)、长春体育馆(1998 年,拱式结构, $d_{\max}=200\text{m}$);比较有代表性的高层建筑有上海金茂大厦(1997 年,钢筋混凝土核心筒加外围钢结构,高 420.5m)、台北 101 大厦(1998 年,钢筋混凝土核心筒加外围钢结构,高 448m)、广州电视塔(2009 年,钢筋混凝土核心筒加外围钢结构,高 460m)、上海环球金融中心(2009 年,钢筋混凝土核心筒加外围钢结构,高 492m)、香港国际金融中心(2010 年,钢筋混凝土核心筒加外围钢结构,高 420m)、广州西塔(2010 年,钢筋混凝土核心筒加外围钢结构,高 460m)、上海中心(计划 2014 年建成,钢筋混凝土核心筒加外围钢结构,高 632m)。

就世界范围而言,比较有代表性的钢结构建筑有迪拜的哈利法塔(2010 年,是一种下部为钢筋混凝土结构、上部为钢结构的全新结构体系。哈利法塔的 $-30 \sim 601\text{m}$ 为钢筋混凝土剪力墙体系, $601 \sim 828\text{m}$ 为钢结构,其中 $601 \sim 760\text{m}$ 采用带斜撑的钢框架)、纽约世界贸易中心北楼(1972 年,纯钢结构,高 417m ,已在“911”事件中消失)、纽约世界贸易中心南楼(1973 年,纯钢结构,高 415m ,已在“911”事件中消失)、芝加哥西尔斯大厦(1974 年,纯钢结构,高 442m)、马来西亚吉隆坡双塔大厦(1996 年,钢筋混凝土核心筒加外围钢结构,高 450m)。

1.2 建筑钢结构的材料

1.2.1 建筑钢结构对材料的要求

建筑钢结构对钢材的基本要求主要有以下三点:较高的抗拉强度 f_u 和屈服强度 f_y ;较高

的塑性和韧性；良好的工艺性能（包括冷加工性能、热加工性能和焊接性能）。此外，根据结构的具体工作条件有时还要求钢材应具有适应低温、高温和腐蚀性环境的能力。针对上述要求，我国的钢结构设计规范作出了明确规定，即“承重结构采用的钢结构材料应具有抗拉强度、伸长率、屈服强度和硫、磷含量的合格保证，焊接结构还应具有碳含量的合格保证。焊接承重结构及重要的非焊接承重结构中采用的钢材还应具有冷弯试验的合格保证。对需要验算疲劳强度的结构用钢材应根据具体情况而具有常温或负温冲击韧性的合格保证”，我国《钢结构设计规范》（GB50017）中推荐的普通碳素结构钢 Q235 钢和低合金高强度结构钢 Q345、Q390 及 Q420 是符合上述要求的。

1.2.2 钢材的主要性能

钢材的主要性能主要是指其力学性能，可通过某些试验（拉伸、冷弯、冲击）测定。钢材性能通常可用五项力学性能指标衡量，即 f_u 、 f_y 、 δ 、180℃ 冷弯、冲击韧性 a_k （ a_k 是衡量钢材承受动力荷载作用时抵抗脆性破坏的性能）。

（1）单向拉伸时的钢材性能

钢材标准试件在常温静荷载情况下，单向均匀受拉试验时的荷载-变形（ $F-\Delta L$ ）曲线（或应力-应变曲线）见图 1-2-1，其强度可用比例极限 σ_p 、屈服强度 σ_y 、抗拉强度 σ_u 等指标表示。比例极限 σ_p 是应力-应变图中直线段的最大应力值（严格地说，比 σ_p 略高处还有弹性极限，但弹性极限与 σ_p 极其接近，因此，通常略去弹性极限的点而把 σ_p 看做是弹性极限）。应变 ε 在 σ_p 之后不再与应力成正比而是渐渐加大且应力-应变间成曲线关系（一直到屈服强度 σ_y ）。屈服平台之后，应变增加时又伴有应力的增加（但相对来讲应变增加得较快并呈现曲线关系直到最高点，即抗拉强度 σ_u ）。屈服强度是建筑钢材的一个重要力学特性，其重要意义在于以下两点：

1) 作为结构计算中材料强度的标准（或材料抗力标准）。由于应力达到 σ_y 时的应变与 σ_p 时的应变较接近，故可认为应力达到 σ_y 时为弹性变形的终点。同时，达到 σ_y 后在一个较大的应变范围内应力不会继续增加，显示出结构一时丧失继续承担更大荷载的能力，故以 σ_y 作为弹性计算时的强度标准。

2) 形成理想弹塑性体模型（为钢结构计算理论的进一步发展提供基础依据）。 σ_y 之前钢材接近于理想弹性体， σ_y 之后塑性应变范围很大而应力基本不变（接近理想塑性体），因此可用两条直线组成的图形作为理想弹塑性体的应力-应变曲线。钢结构设计规范对塑性设计的规定就是以材料为理想弹塑性体的假设为依据的（忽略了应变硬化的有利作用）。高强度钢没有明显的屈服强度和屈服台阶，这类钢的屈服条件是根据试验分析结果人为规定的，故称为条件屈服强度。条件屈服强度是以卸荷后试件中残余应变为 0.2% 时所对应的应力定义的（有时用 $\sigma_{0.2}$ 表示，见图 1-2-2），

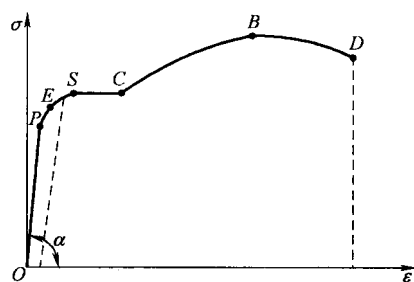


图 1-2-1 碳素结构钢的应力-应变曲线

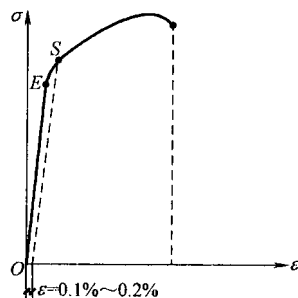


图 1-2-2 高强度钢的应力-应变关系

由于这类钢材不具有明显的塑性平台，故设计中不宜利用它的塑性。

塑性是指在静力荷载作用下钢材吸收变形能的能力，用伸长率（塑性性能） δ 表示。

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-2-1)$$

(2) 钢材的冷弯性能

钢材的冷弯性能是检验钢材弯曲变形能力或塑性性能的，同时也是显示钢材内部缺陷状况的一项指标，故可认为其是鉴定钢材在弯曲状态下塑性应变能力和钢材质量的综合指标。钢材冷弯性能通过钢材冷弯试验进行测试，见图 1-2-3。

(3) 钢材的冲击韧性

钢材的韧性则是指钢材抵抗冲击荷载的能力，它用材料在断裂时所吸收的总能量来量度（ C_v ）。韧性是钢材强度和塑性的综合指标。实际工作中，通常用冲击韧性来衡量钢材的抗脆断性能，钢材的冲击韧性是指在动力荷载作用下材料吸收能量的能力。钢材的冲击韧性试验见图 1-2-4。

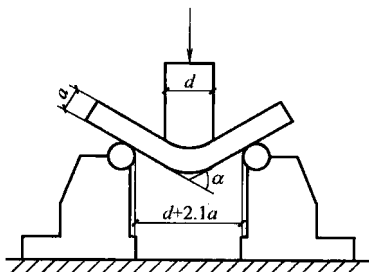


图 1-2-3 钢材冷弯试验

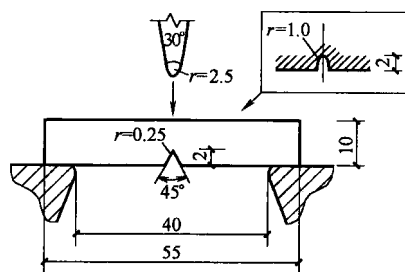


图 1-2-4 钢材冲击韧性试验

(4) 钢材的焊接性

钢材的焊接性是指采用一般焊接工艺就可完成合格（无裂纹）的焊缝的性能，钢材的焊接性受碳含量和合金元素含量的影响，碳含量在 0.12% ~ 0.20% 范围内的碳素钢焊接性最好（碳含量再高则易使焊缝和热影响区变脆）。

(5) 复杂应力作用下钢材的屈服条件

在单轴应力作用下 $\sigma \geq f_y$ 时钢材就会发生屈服，构件也相应地由弹性工作状态转为塑性工作状态。在多轴应力作用下钢材的屈服条件不能以某一轴向应力超过某屈服强度来判别，而应按材料力学的能量强度理论计算方法折算成应力，并与钢材在单轴应力作用下的 f_y 进行比较来判断（见图 1-2-5），当用应力分量表示时有

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (1-2-2)$$

当用主应力表示时有

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (1-2-3)$$

目前，人们通常认为在普通梁中一般只存在正应力 σ 和剪应力 τ ，即

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (1-2-4)$$

当三个主应力同号且数值接近时，即使应力值很大，但钢材仍很难屈服或发生脆性破

坏；当有异号应力且同号两个应力差较大时，即使 $\sigma < f_y$ ，但由于 σ_{red} 可能大于 f_y 故仍可发生塑性破坏；当钢材处于纯剪状态时， $\sigma_{\text{red}} = \sqrt{3\tau^2}$ 、 $\tau = \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 0.58f_y$ 。

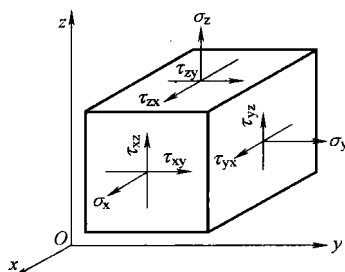


图 1-2-5 复杂应力下的分析

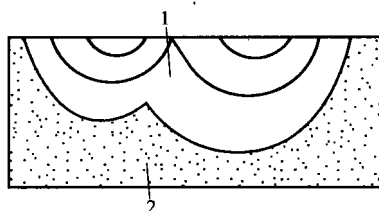


图 1-2-6 钢材疲劳破坏时的构件断口

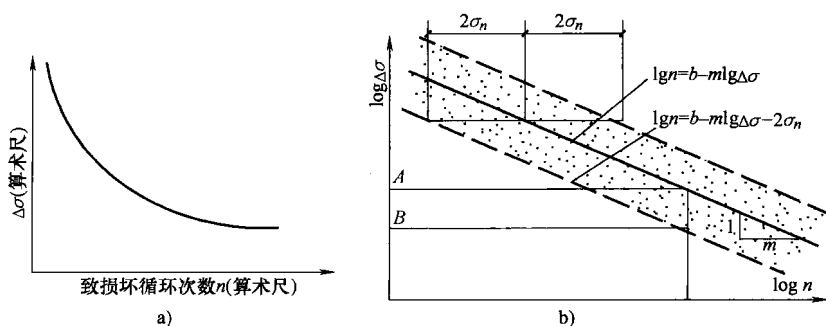
1.2.3 钢材的破坏

(1) 钢材的破坏形式

钢材有两种性质完全不同的破坏形式，即延性破坏和脆性破坏。延性破坏时钢材的断口呈纤维状、色泽发暗。脆性破坏在破坏前没有任何预兆，破坏是突然发生的，破坏时钢材的断口平直并呈有光泽的晶粒状。

(2) 循环荷载效应

钢材在循环荷载作用下发生疲劳破坏时，构件断口上面一部分呈现半椭圆形光滑区，其余部分则为粗糙区（见图 1-2-6）。目前，人们习惯将应力循环特性用应力比值来表示并以拉应力为正值。连续重复荷载之下应力往复变化一周称为一个循环， $\Delta\sigma$ 为应力幅（表示应力变化的幅度，为正值），常用公式为 $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ 、 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 。根据试验数据可以画出构件或连接件的应力幅 $\Delta\sigma$ 与相应的致损循环次数 n 的关系曲线（见图 1-2-7a），此曲线是疲劳验算的基础，致损循环次数也被称为疲劳寿命。目前国内外都习惯用双对数坐标轴的方法将曲线改为直线以方便分析（见图 1-2-7b），在双对数坐标图中疲劳方程就是直线式的（见图 1-2-7b 中的实直线）。

图 1-2-7 $\Delta\sigma \sim n$ 曲线

1.2.4 钢材中各种因素对钢材性能的影响

(1) 钢材中各种化学成分对钢材性能的影响

目前, 钢中基本元素为铁、碳、硅、锰、硫、磷、氧、氮。普通碳素钢中铁占 99%, 其余元素占 1%; 低合金钢中除了上述元素外还有一定的合金元素 (如镍、钒、钛等), 含量一般在 5% 左右。上述各种元素对钢材力学性能的影响如下:

1) 碳 (C)。碳含量增加, 钢材强度提高而塑性、韧性和疲劳强度将相应降低, 同时其焊接性和抗腐蚀性将恶化。一般在碳素结构钢中碳含量不应超过 0.22%, 在焊接结构中碳还应低于 0.2%。

2) 硅 (Si)。碳素结构钢中硅应控制在 0.3% 以内, 在低合金高强度钢中硅的含量通常可达 0.55%。

3) 锰 (Mn)。钢材中含锰适量可使其强度提高并降低硫、氧的热脆影响, 从而改善钢材的热加工性能, 且对钢材的其他性能影响不大, 因此锰是有益的。在碳素结构钢中锰的含量一般为 0.3% ~ 0.8%, 在低合金高强度钢中锰的含量可达 1.0% ~ 1.6%。

4) 硫 (S)。钢材中的硫可降低钢材的塑性、韧性、焊接性及疲劳强度, 在高温时还可使钢材变脆 (称之为热脆)。因此钢材中硫含量应不超过 0.045% (硫为有害成分)。

5) 磷 (P)。钢材中的磷可降低钢材的塑性、韧性、焊接性及疲劳强度, 在低温时还可使钢材变脆 (称之为冷脆)。因此, 钢材中的磷的含量不应超过 0.045%。钢材中磷可以提高钢材的强度和抗锈蚀性。通常认为钢材中的磷也为有害成分。

6) 氧 (O)。钢材中的氧可降低钢材的塑性、韧性、焊接性及疲劳强度, 在高温时还可导致钢材发生热脆。因此, 氧也为有害成分。

7) 氮 (N)。钢材中的氮可降低钢材的塑性、韧性、焊接性及疲劳强度, 在低温时还可导致钢材发生冷脆。因此, 氮也为有害成分。

8) 钒 (V) 和钛 (Ti)。钒和钛是钢材中的合金元素, 既可提高钢材的强度和抗腐蚀性, 能又不显著降低钢材的塑性。

9) 铜 (Cu)。钢材中的铜可显著提高钢材的抗腐蚀性能, 还可提高钢材的强度, 但对焊接性有不利影响。

(2) 冶金缺陷对钢材性能的影响

在冶炼、轧制过程中常常出现的缺陷有偏析、非金属夹杂、裂纹、夹层及气孔等。偏析是指钢材中化学成分的不一致性和不均匀性, 主要的偏析是硫、磷, 偏析将严重恶化钢材的性能并使偏析区钢材的塑性、韧性及焊接性变坏。非金属夹杂是指钢材中存在非金属化合物 (硫化物、氧化物), 非金属夹杂会使钢材性能变脆。裂纹、分层一般在轧制中可能出现, 将影响钢材的冷弯性能。

1) 冶炼。目前, 钢材的冶炼方法主要有平炉炼钢、氧气顶吹转炉炼钢、碱性侧吹转炉炼钢及电炉炼钢等。在建筑钢结构中, 主要使用氧气顶吹转炉生产的钢材。目前氧气顶吹转炉钢的质量由于生产技术的提高已不低于平炉钢的质量。冶炼这一冶金过程形成了钢材的化学成分与含量以及钢材的金相组织结构, 其中不可避免地会存在冶金缺陷, 因此, 人们规定了不同的钢种、钢号及其相应的力学性能。

2) 浇铸。把熔炼好的钢液浇铸成钢锭或钢坯有两种方法, 一种是浇入铸模做成钢锭,

另一种是浇入连续浇铸机做成钢坯。铸锭过程中钢材因脱氧程度的不同而最终成为镇静钢、半镇静钢与沸腾钢。钢在冶炼及浇铸过程中也不可避免地会产生冶金缺陷（常见的冶金缺陷有偏析、非金属夹杂、气孔及裂纹等），这些缺陷都将影响钢的力学性能。钢锭剖面见图 1-2-8，钢锭中硫的偏析见图 1-2-9，型钢中硫的偏析见图 1-2-10。

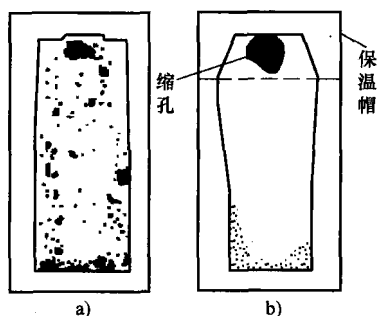


图 1-2-8 钢锭剖面
a) 沸腾钢 b) 镇静钢

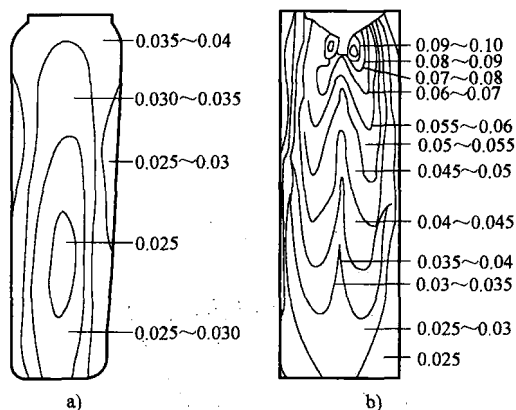


图 1-2-9 钢锭中硫的偏析
a) 镇静钢 b) 沸腾钢

3) 轧制。钢材的轧制既能使金属的晶粒变细，也能使气泡、裂纹等焊合，因而可改善钢材的力学性能。薄板因辊轧次数多故其强度比厚板略高。由于浇铸时的非金属夹杂物在轧制后能造成钢材的分层，因此分层是钢材（尤其是厚板）的一种缺陷。故设计时应尽量避免拉力垂直于板面的情况以防止层间撕裂。钢材的轧制使晶粒细化的过程见图 1-2-11。

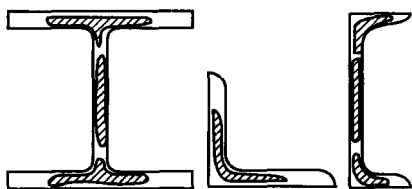


图 1-2-10 型钢中硫的偏析

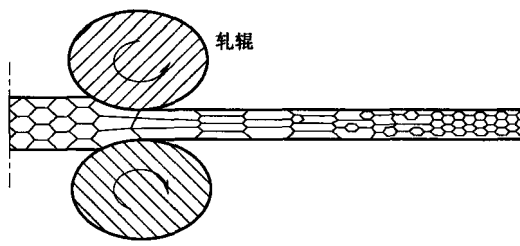


图 1-2-11 钢的轧制使晶粒细化

(3) 钢材的硬化

钢材的硬化主要包括冷作硬化、时效硬化、应变时效等。当对钢材加载到超过材料比例极限后卸载就会出现残余变形，若再次加载则会出现屈服强度提高而塑性及韧性降低的现象，这种现象称为冷作硬化（也称应变硬化）。钢材随时间的增长，其中的碳和氮的化合物会从晶体中析出从而使材料发生硬化，这种现象被称为时效硬化。钢材产生塑性变形时，碳、氮化合物更易析出（即钢材在冷作硬化的同时还可以加速时效硬化），这种现象称为应变时效（也称人工时效）。

(4) 温度影响

钢材的性能会随温度的变动而变化，总的趋势是温度升高，钢材强度降低，应变增大（反之，温度降低则钢材强度会略有增加，而塑性和韧性却会降低），见图 1-2-12。温度升

高时, 在 200℃ 以内钢材性能没有很大变化, 430 ~ 540℃ 之间强度急剧下降, 600℃ 时强度很低不能承担荷载。在 250℃ 左右钢材的强度反而略有提高, 同时塑性和韧性均下降, 材料有变脆的倾向, 钢材表面氧化膜呈现蓝色, 称为蓝脆现象。钢材应避免在蓝脆温度范围内进行热加工。当温度在 260 ~ 320℃ 之间时钢材在应力持续不变的情况下会以很缓慢的速度继续变形, 此种现象称为徐变现象。当温度从常温开始下降, 特别是在负温度范围内时, 钢材强度虽有些提高, 但其塑性和韧性会降低, 材料逐渐变脆, 这种性质称为低温冷脆。图 1-2-13 所示是钢材冲击韧性与温度的关系曲线, 由图 1-2-13 可见, 随着温度的降低 C_u 值迅速下降, 材料将由塑性破坏转变为脆性破坏, 同时可见这一转变是在一个温度区间 ($T_1 \sim T_2$) 内完成的, 此温度区 ($T_1 \sim T_2$) 称为钢材的脆性转变温度区, 在此区间内曲线的反弯点 (最陡点) 所对应的温度 T_0 称为脆性转变温度。实际工程中, 只要把低于 T_0 完全脆性破坏的最高温度 T_1 作为钢材的脆断设计温度即可保证钢结构低温工作的安全。

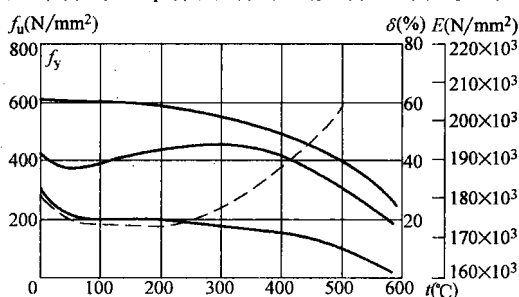


图 1-2-12 温度对钢材力学性能的影响

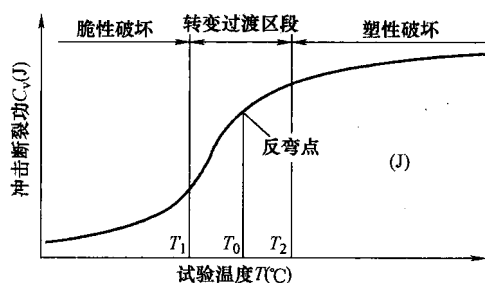


图 1-2-13 冲击韧性与温度的关系曲线

(5) 应力集中

钢结构构件上的孔洞、刻槽、凹角、裂纹以及截面厚度或宽度改变等部位在力作用下会出现高峰应力 (而周边其他部位则应力较低), 产生截面应力分布不均匀现象, 即应力集中。应力集中用应力集中系数 k 表示, k 为最大应力与平均应力之比, 见式 (1-2-5)。应力集中是造成构件脆性破坏的主要原因之一, 应力集中系数越大其变脆的倾向越严重。孔洞及槽孔处的应力集中见图 1-2-14。

$$k = \sigma_{\max} / \sigma_0 \quad (1-2-5)$$

1.2.5 钢材的种类与规格

(1) 钢材的种类

钢材按用途可分为结构钢、工具钢、特殊钢 (如不锈钢等); 按冶炼方法可分为转炉钢、平炉钢; 按脱氧方法可分为沸腾钢、镇静钢、特殊镇静钢; 按成型方法可分为轧制钢、锻钢、铸钢; 按化学成分可分为碳素钢、合金钢。

在建筑钢结构工程中采用的是碳素结构钢、低合金高强度结构钢、优质碳素结构钢。普通碳素钢 (碳素结构钢、低合金结构钢) 牌号由

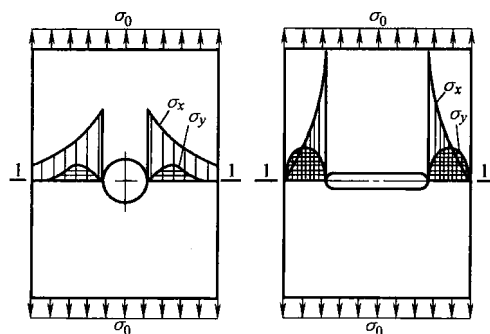


图 1-2-14 孔洞及槽孔处的应力集中

四部分组成（如 Q235-B·F），其中 Q 代表屈服强度；195、215、235、255、275、345、390 等为屈服强度的数值；A、B、C、D、E 等为质量等级符号（A、B、C、D 是普通碳素钢的四个等级；A、B、C、D、E 是普通低合金钢的五个等级）；F、b、Z、TZ 为脱氧方法符号（F 代表沸腾钢，b 代表半镇静钢，Z 代表镇静钢，TZ 代表特殊镇静钢）。优质碳素结构钢主要用于钢结构某些节点或用作连接件。

建筑结构用钢板一般为高性能建筑结构钢材（GJ 钢），牌号由四部分组成，其中 Q 代表屈服强度；数字为屈服强度的数值；GJ 代表高性能建筑结构用钢；B、C、D、E 为质量等级符号（代表四个等级。对厚度方向性能钢板，在质量等级后面加上厚度方向性能级别 Z15、Z25、Z35）。高性能建筑结构钢材适用于建造高层建筑结构、大跨度结构及其他重要建筑结构。

（2）钢材的选择

钢材的选择关键是确定钢材的种类及其质量等级。钢材选择时主要应考虑五方面因素，即结构的重要性（安全等级不同所选钢材的质量等级也应不同，重要的结构构件应选用质量好的钢材）、荷载特征（荷载通常分为静力荷载或动力荷载，应根据具体情况选用不同性能的钢材）、连接方法（如焊接应选择焊接性好的钢材，非焊接结构对含碳量可降低要求）、结构所处的温度和环境（如在负温下工作时应选用负温冲击试验合格的钢材，结构周围有腐蚀介质存在时要选用抗锈性好的钢材）、钢材的厚度（厚度大的焊接结构应选用材质较好的钢材）等。

（3）钢材的规格

钢结构采用的型材有热轧钢板、热轧型钢、冷弯薄壁型钢等。热轧钢板的代号是“-”，加“宽度×厚度×长度”（比如 -280×150×8），单位为 mm。热轧型钢包括热轧角钢、热轧工字钢、热轧槽钢、H 型钢等。热轧角钢分为等肢角钢（代号为“L”，加“肢宽×肢厚”，单位为 mm）、不等肢角钢（代号“L”，加“长肢宽×短肢宽×肢厚”，单位为 mm）。热轧工字钢分为普通工字钢（代号是“I”，加“号数”，号数代表截面高度、单位为 cm）、轻型工字钢（代号是“QI”，加“号数”，号数代表截面高度，单位为 cm），20 号以上的工字钢按腹板厚度同一号数又分为 a、b、c 三类。热轧槽钢分为普通槽钢（代号“[”，加“号数”）、轻型槽钢（代号“Q[”，加“号数”），14 号以上的槽钢按腹板厚度同一号数又分为 a、b、c 三类。H 型钢分宽翼缘 H 型钢（代号“HK”，用于轴压、压弯构件），其型号为公称高度的毫米数，其后标注 a、b、c。薄壁型钢是用薄钢板经模压或弯曲制成的，壁厚一般 1.5~5mm，可用作轻型屋面及墙面等构件。钢管分为无缝钢管和焊接钢管（代号为“φ”，加“外径×厚度”，单位为 mm）。常见的热轧型钢截面见图 1-2-15，常见的薄壁型钢截面见图 1-2-16。

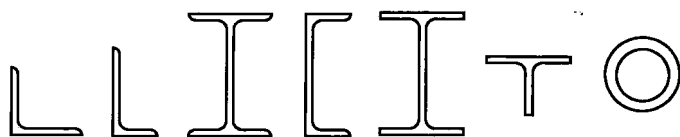


图 1-2-15 热轧型钢截面