



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

钢结构 原理与设计

GANG JIE GOU YUAN LI YU SHE J I

主编◎殷飞 周旭丹



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育

规划教材

钢结构原理与设计

主 编 殷 飞 周旭丹

副主编 吴 炎 王 恒 王晨飞

北 京

冶金工业出版社

2014

内 容 简 介

全书共分为10章,包括绪论、钢结构材料、钢结构的主要构件、钢结构的连接、钢结构施工安装、轻型门式钢结构设计、中重型钢结构设计、屋盖钢结构设计、网架结构设计、钢结构事故类型及原因分析。各章除附有思考题或习题外,还附有教学提示和教学目标,以利于基本理论和设计方法的学习与掌握。

本书可供本科及大专院校土木工程专业学生、教师使用,也可作为相关专业的设计和施工技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构原理与设计 / 殷飞等主编. —北京:冶金工业出版社, 2014. 6
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5024-6630-5

I. ①钢… II. ①殷… III. ①钢结构—理论—高等学校—教材 ②钢结构—结构设计—高等学校 IV. ①TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 083487 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcbbs@cnmip.com.cn

ISBN 978-7-5024-6630-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京明兴印务有限公司印刷

2014 年 6 月第 1 版, 2014 年 6 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 17 印张; 411 千字; 270 页

35.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

《钢结构设计原理》为土木工程、道桥工程、岩土工程和工程管理等专业学生的必修课，属于专业基础课。通过本课程的学习，应使学生较全面地了解钢结构材料的基本性能，掌握基本构件及其连接的设计计算方法，熟悉基本构件的构造设计。

本书的主要特色有：

1. 本课程的主讲教师均由长期从事钢结构理论研究、应用研究和钢结构教学实践的教师担任，在教学过程能够根据钢结构理论和应用研究的最新发展趋势、最新研究成果以及钢结构市场应用，及时补充教学内容和调整教学重点。

2. 重视培养学生的分析问题和解决问题的能力，鼓励学生参与科技创新活动。将部分教学内容转化为，让学生通过查阅相关文献和有关设计资料，自行进行结构设计并进行方案布置和内力分析与计算，提出并发现问题，分析产生问题的原因，提出解决方案。通过这一过程，培养了学生自主学习和获取知识的能力；鼓励学生参加全国及省、校级结构设计大赛；组织学生利用毕业设计的实践性教学环节进行积极的创新设计，这些措施对学生素质的提高和创新能力的培养起到了重要作用。

3. 形式多样的教学方法。在教学方法上采用启发式、讨论式、提问式等多种方式，营造生动活泼、师生互动的课堂氛围，以激发学生的学习兴趣，促进学生积极思考。教师授课时重在师生交流启发式地“教”，重点讲思路、讲方法，避免“填鸭式”传授知识，鼓励学生自主学习，将传统的以教师为中心的课堂教学模式转变为以学生为主体的教学模式。另外，不同学科背景的教师分别讲授其擅长的章节，更能及时反映课程的最新发展和前沿信息，做到教学资源齐全、新颖、先进。

本教材由殷飞主编并完成全书的统稿工作。具体编写分工如下：殷飞（吉林农业科技学院）编写第二章、第三章、第七章；周旭丹（吉林农业大学）编写第五章、第六章、第十章；吴炎（长安大学）编写第四章、第九章；王恒（南阳师范学院）编写第一章；王晨飞（厦门理工学院）编写第八章。全书由殷飞完成大纲制定及统稿工作。

在编写过程中，得到了许多高校同行的大力支持，并提出了许多宝贵意见。在此一并致谢！这里还需要说明的是书中的许多插图均来源于参考文献中的各位作者，但有些插图不能确定就是作者原图，特别是有些插图经多本书引用，但又没注明出处，我们又很难考证原图，因此本书中插图出处也只好空缺。如有插图原作者发现插图来源有误，请及时与我们联系，我们将在再版时予以更正，并表示歉意。

编者

2014. 1



目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 钢结构的特点	(1)
第二节 钢结构的应用范围	(2)
第三节 钢结构的设计方法	(2)
第四节 钢结构的发展	(3)
第二章 钢结构的材料	(5)
第一节 钢材的生产	(5)
第二节 钢材的主要性能	(9)
第三节 各种因素对钢材性能的影响	(12)
第四节 建筑用钢的种类、规格和选用	(19)
第三章 钢结构的主要构件与连接	(25)
第一节 受拉构件及索	(25)
第二节 轴心受力构件	(28)
第三节 受弯构件	(39)
第四节 压弯构件	(50)
第四章 钢结构的连接	(55)
第一节 钢结构连接方法	(55)
第二节 焊接连接的特性	(56)
第三节 对接焊缝的构造和计算	(60)
第四节 角焊缝的构造和计算	(62)
第五节 焊接应力和焊接变形	(65)
第六节 普通螺栓连接的构造	(68)
第五章 钢结构施工安装	(74)
第一节 钢结构工程安装方案的编制	(74)
第二节 钢结构安装前准备	(78)
第三节 钢结构安装	(83)
第四节 多层及高层钢结构安装	(105)
第五节 钢结构质量控制	(110)
第六节 钢结构安全施工	(119)
第六章 轻型门式刚架结构设计	(125)
第一节 概述	(125)
第二节 结构形式和结构布置	(127)
第三节 刚架设计	(130)
第四节 压型钢板设计	(141)



第五节	檩条设计	(146)
第六节	墙梁、支撑设计	(149)
第七章	中、重型厂房结构设计	(151)
第一节	结构形式和结构布置	(151)
第二节	厂房结构的计算原理	(162)
第三节	钢屋架设计	(164)
第四节	吊车梁设计	(169)
第八章	屋盖钢结构设计	(173)
第一节	屋盖结构布置	(173)
第二节	屋盖支撑体系	(176)
第三节	檩条设计	(180)
第四节	普通钢屋架设计	(186)
第九章	网架结构设计及施工	(201)
第一节	网架的分类及选型	(201)
第二节	网架几何尺寸的确定	(215)
第三节	网架设计	(216)
第四节	网架杆件及节点设计与构造	(220)
第五节	网架结构施工质量验收	(242)
第十章	钢结构事故类型及原因分析	(249)
第一节	概述	(249)
第二节	钢屋盖事故	(251)
第三节	空间钢网架结构事故	(252)
第四节	轻钢结构事故	(259)
第五节	钢柱的事故	(261)
第六节	钢吊车梁系统事故	(262)
参考文献	(265)



第一章 绪 论

第一节 钢结构的特点

(1) 轻质高强。

钢 Q235 强度是混凝土 C20 强度的十倍级；钢材的密度为混凝土密度的 3 倍。在同样的跨度承受同样荷载的情况下，钢屋架的质量是混凝土屋架的 $1/3 \sim 1/4$ ；冷弯薄壁型钢屋架甚至接近 $1/10$ 。

(2) 塑性、韧性好。

1) 塑性：钢材抵抗变形的能力的大小；在一般情况下，钢结构不会因偶然超载或局部超载而突然破坏。

2) 韧性：钢材抵抗动荷载的能力；钢材在动力荷载作用下，吸收能量的能力的大小（与延性相关）。

(3) 材质均匀，符合力学假定。

材料力学基本假定：连续、均匀、各向同性。计算结果与实际受力情况吻合。

(4) 具有可焊性。

可焊性是钢材经焊接而不开裂的性质。由于钢结构具有可焊性，使得结构的连接大大简化，并可根据需要，实现各种形状复杂结构的连接。但应注意焊接时产生的焊接残余应力和残余变形的问题。

(5) 工业化程度高，施工周期短。

标准化：设计标准化、加工制作标准化、安装标准化；

装配化：采用螺栓连接时，钢结构可装可卸。

(6) 密闭性好（水密性和气密性）。

焊接的钢结构（钢材及焊缝）密闭性好。

(7) 耐热不耐火。

1) 耐热性。

$0 \sim 200^\circ\text{C}$ ：力学性能影响不大，但强度随温度的升高，呈降低趋势；仅幅度不大而已；

$200 \sim 250^\circ\text{C}$ ：材质变化较大，不仅强度逐步降低，而且伴有徐变现象；

250°C 左右：强度增大，塑性韧性降低，钢材表面发蓝（蓝脆现象）；

$250 \sim 600^\circ\text{C}$ ：强度为零，完全丧失承载能力（软化 $E \rightarrow 0$ ）。

2) 不耐火性：

无保护层的钢柱的耐火极限仅为 0.25h。因此，规范中规定，钢构件表面辐射温度大于 150°C 时，应采取有效的隔热防火措施。



(8)抗腐蚀性能差。

钢材的腐蚀有化学反应和原电池反应两种。钢材的生锈只是化学反应中的一种。

第二节 钢结构的应用范围

(1)大跨度结构:梁、桁架、框架、拱、壳、空间网架、悬索等;

(2)轻型钢结构:轻型钢结构由圆钢,小角钢或薄壁型钢组成,以满足荷载小,跨度及高度均不大的轻型支架结构和屋盖结构的承载要求;现在包括门式刚架轻型房屋钢结构、冷弯薄壁型钢结构以及钢管结构;

(3)多层和高层结构:住宅、写字楼等;

(4)高耸结构:塔及桅杆;

(5)工业厂房结构:锻压车间等;

(6)可拆移或移动的结构;

(7)特种结构:栈桥、海上采油平台、容器、管道等;

(8)钢—砼组合结构:劲性混凝土。

第三节 钢结构的设计方法

《钢结构设计规范 GB50017—2003》已于 2003 年 12 月 1 日开始实施,规范总则中第一条“为做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量,特制定本规范”。

结构设计准则:结构由各种荷载产生的效应(内力和变形)不大于结构(包括连接)由材料和几何因素等所决定的抗力或规定限值。

结构计算的目的是保证所设计的结构或结构构件在施工和工作过程中满足预期的安全性和使用性要求。

一、基本概念

(1)可靠性:结构或构件在使用期间安全性、适用性和耐久性的总称。它是指结构在规定的时间内、在规定的条件下完成预定功能的能力。

(2)可靠度:可靠性的概率度量,即结构在规定时间内、规定条件下,完成预定功能的概率。

(3)荷载:恒荷载、活荷载;风荷载、雪荷载、地震荷载等。

(4)作用:凡是使结构或构件产生内力或变形的因素,统称为作用。

(5)荷载效应(S):荷载在结构或构件中产生的内力、应力、变形或裂缝等。

(6)抗力(R):结构或构件抵抗外力的能力,通常为强度或承载力。

(7)功能函数:

$$Z(R, S) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = R - S \begin{cases} > 0 & \text{安全可靠} \\ = 0 & \text{极限状态} \\ < 0 & \text{失效} \end{cases}$$



(8)极限状态:当结构或其组成部分超过特定状态就不能满足设计规定的某一项功能要求时,此特定状态就称为该功能的极限状态。

1)承载能力极限状态是指当结构或构件达到最大承载能力或达到不适于继续承载的变形时的极限状态。包括构件和连接的强度破坏、疲劳破坏和因过度变形而不适于继续承载,结构和构件丧失稳定,结构转变为机动体系和结构倾覆。

2)正常使用极限状态是指结构或构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值时的极限状态。包括影响结构和非结构构件正常使用或外观的变形,影响正常使用的振动,影响正常使用或耐久性能的局部损坏(包括混凝土裂缝)。

二、设计方法

(1)允许应力法(安全系数法)。

定义:许应力法是将影响结构安全的各种参数按经验取值,一般选用平均值或规范规定的标准值,在强度计算中采用安全系数 K 来考虑这些参数可能的变异对结构安全的影响。

允许应力法属定值法的一种,定值法包括最大荷载法和允许应力法。

特点:表达形式简单,使用方便;容易误解,以为该方法设计出的结构 100%的安全; K 的取值越大,结构越安全(砌体结构的 K 最大,但不能说明砌体结构比其他结构安全);静载和动载没有区分。

(2)概率极限状态设计法(风险设计法或不定值设计法)。

定义:概率极限状态设计法是将影响结构安全的各种参数作为随机变量用概率论和数理统计的方法,采用可靠度理论求出结构在使用期间满足基本功能的概率。

特点:该设计方法有特定的极限状态,又给出不超过该极限状态的概率(可靠度),是一种较为完善的设计方法。

(3)《钢结构设计规范 GB50017—2003》中,采用以上两种设计方法。

大多数情况采用概率极限状态设计法;对于疲劳设计或验算时,仍沿用允许应力法。

第四节 钢结构的发展

一、发展趋势

(一)高效钢材

(1)低合金钢。

利用添加少量合金元素(锰、钒、钛、稀土等)提高钢材的强度和改善一些性能,从而达到降低钢材用量和延长钢材使用寿命等目的,以取得良好的经济效益。其中耐候钢(耐大气腐蚀钢)亦是低合金钢中大力发展的钢种。由于耐候钢暴露在大气条件下时,表面可形成一层非常致密且附着力很强的稳定锈层,从而阻止外界腐蚀介质的侵入,减缓金属继续腐蚀的速度。因此,耐候钢可大量节约涂漆和维护费用。

(2)热强化钢材:控制轧制(控制终轧温度及压缩率,加大轧制压力)、控制冷却(包括轧制候



余热直接淬火)和热处理(淬火、淬火加回火、正火等)的各类钢材。由于经热强化后,钢材的内部组织经过调整,其强度、韧性等均有显著提高,如钢轨经热强化后,寿命可较一般钢延长1~2倍。

(3)经济截面钢材:H型钢、T型钢、异形型钢、钢管及冷弯型钢、压型钢板等。由于截面形状合理,故在用钢量相等的情况下,其截面惯性矩可比一般截面型材的大,且使用方便,能高效地发挥钢材的性能,节约钢材和降低钢结构制造费用。

(4)镀层、涂层、复合等表面处理钢材。

镀层、涂层、复合等表面处理钢材包括镀保护金属(锌、铝或铝锌合金)的镀层钢板、涂有机物(油漆和塑料)的涂层钢材、表面复合不同钢种的复合钢材。它们亦可统称为覆层钢材。

(5)冷加工钢材:经过冷轧、冷拔和冷挤压的钢材。由于产生冷加工硬化,故其强度大为提高,可节约钢材,但应注意塑性、韧性会降低。目前应用较广的冷轧薄板,一般可节约钢材约为30%,而生产费用仅增加约10%。

(6)金属制品。

金属制品一般是指钢绞线、钢丝、钢丝绳等。由于经冷拔的钢丝及其制品钢绞线、钢丝绳等有较高的抗拉强度,可比普通线材极大地节约钢材。钢丝、钢绞线除用于预应力结构中,钢绞线亦是钢结构中悬索结构的主要材料。

(二)新型结构

(1)轻型钢结构。

(2)空间结构。

(3)预应力结构。

(4)组合结构。

二、发展前景

(一)物质基础

1996年,中国钢产量首次突破1亿吨(1.01亿吨),居世界之首;2003年,中国钢产量突破2亿吨(2.22亿吨);2005年,中国钢产量突破3亿吨(3.53亿吨);2006年,中国钢产量突破4亿吨(4.22亿吨);2008年,中国钢产量突破5亿吨(5.00亿吨);2009年全国生产粗钢56784.24万吨,比上年增长13.5%;2010年全国生产粗钢62665.4万吨,比上年增长9.26%。

中国钢铁工业协会多次行业信息发布会中提到,“钢铁生产总量高速增长,国内钢材市场供大于求”;钢结构建筑所需的钢材规格,可以自给自足。

(二)经济发展需要

由于经济发展的需要,机场、剧院、体育馆等高层、大跨度、大空间的建筑工程与日俱增,这些建筑物大多采用钢结构;钢结构建筑由于取材对环境破坏小,造型美观,施工周期短,抗震性能好,造价容易控制,适合不同气候条件和大气环境等优点,已经越来越受到业主青睐。目前主要应用于厂房、超市、展厅、体育馆、大跨($L \geq 60\text{m}$)、多层、高层、桥梁等。



第二章 钢结构的材料



钢是以铁和碳为主要成分的合金,其中铁是最基本的元素,碳和其它元素所占比例甚少,但却左右着钢材的物理和化学性能。钢材的种类繁多,性能差别很大,适用于钢结构的钢材只是其中的一小部分。为了确保质量和安全,这些钢材应具有较高的强度、塑性和韧性,以及良好的加工性能。我国《钢结构设计规范》GB50017(以下简称规范或 GB50017)具体推荐碳素结构钢中的 Q235 和低合金高强度结构钢中的 Q345、Q390 和 Q420 等牌号的钢材作为承重钢结构用钢。

钢材的性能与其化学成分、组织构造、冶炼和成型方法等内在因素密切相关,同时也受到荷载类型、结构形式、连接方法和工作环境等外界因素的影响。本章简要介绍钢材的生产过程和组织构造;重点介绍钢材的主要性能以及各种因素对钢材性能的影响;介绍钢材的种类、规格及选用原则。

第一节 钢材的生产

一、钢材的冶炼

除了天外来客——陨石中可能存在少量的天然铁之外,地球上的铁都蕴藏在铁矿中。从铁矿石开始到最终产品的钢材为止,钢材的生产大致可分为炼铁、炼钢和轧制三道工序。

(一) 炼铁

矿石中的铁是以氧化物的形态存在的,因此要从矿石中得到铁,就要用与氧的亲合力比铁更大的物质——一氧化碳与碳等还原剂,通过还原作用从矿石中除去氧,还原出铁。同时,为了使砂质和黏土质的杂质(矿石中的废石)易于熔化为熔渣,常用石灰石作为熔剂。所有这些作用只有在足够的温度下才会发生,因此铁的冶炼都是在可以鼓入热风的高炉内进行。装入炉膛内的铁矿石、焦炭、石灰石和少量的锰矿石,在鼓入的热风中发生反应,在高温下成为熔融的生铁(含碳量超过 2.06% 的铁碳合金称为生铁或铸铁)和漂浮其上的熔渣。常温下的生铁质坚而脆,但由于其熔化温度低,在熔融状态下具有足够的流动性,且价格低廉,故在机械制造业的铸件生产中有广泛的应用。铸铁管是土木建筑业中少数应用生铁的例子之一。

(二) 炼钢

含碳量在 2.06% 以下的铁碳合金称为碳素钢。因此,当用生铁制钢时,必须通过氧化作用除去生铁中多余的碳和其他杂质,使它们转变为氧化物进入渣中,或成气体逸出。这一作用也要在高温下进行,称为炼钢。常用的炼钢炉有三种形式:转炉、平炉和电炉。

电炉炼钢是利用电热原理,以废钢和生铁等为主要原料,在电弧炉内冶炼。由于不与空气



接触,易于清除杂质和严格控制化学成分,炼成的钢质量好。但因耗电量大,成本高,一般只用来冶炼特种用途的钢材。

转炉炼钢是利用高压空气或氧气使炉内生铁熔液中的碳和其他杂质氧化,在高温下使铁液变为钢液。氧气顶吹转炉冶炼的钢中有害元素和杂质少,质量和加工性能优良,且可根据需要添加不同的元素,冶炼碳素钢和合金钢。由于氧气顶吹转炉可以利用高炉炼出的生铁熔液直接炼钢,生产周期短、效率高、质量好、成本低,已成为国内外发展最快的炼钢方法。

平炉炼钢是利用煤气或其它燃料供应热能,把废钢、生铁熔液或铸铁块和不同的合金元素等冶炼成各种用途的钢。平炉的原料广泛,容积大,产量高,冶炼工艺简单,化学成分易于控制,炼出的钢质量优良。但平炉炼钢周期长,效率低,成本高,现已逐渐被氧气顶吹转炉炼钢所取代。

(三) 钢材的浇注和脱氧

按钢液在炼钢炉中或盛钢桶中进行脱氧的方法和程度的不同,碳素结构钢可分为沸腾钢、半镇静钢、镇静钢和特殊镇静钢四类。沸腾钢采用脱氧能力较弱的锰作脱氧剂,脱氧不完全,在将钢液浇注入钢锭模时,会有气体逸出,出现钢液的沸腾现象。沸腾钢在铸模中冷却很快,钢液中的氧化铁和碳作用生成的一氧化碳气体不能全部逸出,凝固后在钢材中留有较多的氧化铁夹杂和气孔。钢的质量较差。镇静钢采用锰加硅作脱氧剂,脱氧较完全,硅在还原氧化铁的过程中还会产生热量,使钢液冷却缓慢,使气体充分逸出,浇注时不会出现沸腾现象。这种钢质量好,但成本高。半镇静钢的脱氧程度介于上述二者之间。特殊镇静钢是在锰硅脱氧后,再用铝补充脱氧,其脱氧程度高于镇静钢。低合金高强度结构钢一般都是镇静钢。

随着冶炼技术的不断发展,用连续铸造法生产钢坯(用作轧制钢材的半成品)的工艺和设备已逐渐取代了笨重而复杂的铸锭—开坯—初轧的工艺流程和设备。连铸法的特点是:钢液由钢包经过中间包连续注入被水冷却的铜制铸模中,冷却后的坯材被切割成半成品。连铸法的机械化、自动化程度高,可采用电磁感应搅拌装置等先进设施提高产品质量,生产的钢坯整体质量均匀,但只有镇静钢才适合连铸工艺。因此国内大钢厂已很少生产沸腾钢,若采用沸腾钢,不但质量差,而且供货困难,价格并不便宜。

二、钢材的组织构造和缺陷

(一) 钢材的组织构造

碳素结构钢是通过在强度较低而塑性较好的纯铁中加适量的碳来提高强度的,一般常用的低碳钢含碳量不超过 0.25%。低合金结构钢则是在碳素结构钢的基础上,适当添加总量不超过 5% 的其他合金元素,来改善钢材的性能。

碳素结构钢在常温下主要由铁素体和渗碳体(F_3C)所组成。与纯铁的显微组织没有明显的区别,其强度、硬度较低,而塑性、韧性良好。铁素体在钢中形成不同取向的结晶群(晶粒),是钢的主要成分,约占质量的 99%。渗碳体是铁碳化合物,含碳 6.67%,其熔点高,硬度大,几乎没有塑性,在钢中其与铁素体晶粒形成机械混合物——珠光体,填充在铁素体晶粒的空隙中,形成网状间层。珠光体强度很高,坚硬而富于弹性。另外,还有少量的锰、硅、硫、磷及其化合物溶



解于铁素体和珠光体中。碳素钢的力学性能在很大程度上与铁素体和珠光体这两种成分的比例有关。同时,铁素体的晶粒越细小,珠光体的分布越均匀,钢的性能也就越好。

低合金结构钢是在低碳钢中加入少量的锰、硅、钒、铌、钛、铝、铬、镍、铜、氮、稀土等合金元素炼成的钢材,其组织结构与碳素钢类似。合金元素及其化合物溶解于铁素体和珠光体中,形成新的固溶体——合金铁素体和新的合金渗碳体组成的珠光体类网状间层,使钢材的强度得到提高,而塑性、韧性和焊接性能并不降低。

(二) 钢材的铸造缺陷

当采用铸模浇注钢锭时,与连续铸造生产的钢坯质量均匀相反,由于冷却过程中向周边散热,各部分冷却速度不同,在钢锭内形成了不同的结晶带。靠近铸模外壳区形成了细小的等轴晶带,靠近中部形成了粗大的等轴晶带,在这二部分之间形成了柱状晶带。这种组织结构的不均匀性,会给钢材的性能带来差异。

钢在冶炼和浇注过程中还会产生其他的冶金缺陷,如偏析、非金属夹杂、气孔、缩孔和裂纹等。所谓偏析是指化学成分在钢内的分布不均匀,特别是有害元素如硫、磷等在钢锭中的富集现象;非金属夹杂是指钢中含有硫化物与氧化物等杂质;气孔是指由氧化铁与碳作用生成的一氧化碳气体,在浇注时不能充分逸出而留在钢锭中的微小孔洞;缩孔是因钢液在钢锭模中由外向内、自下而上凝固时体积收缩,因液面下降,最后凝固部位得不到钢液补充而形成;钢液在凝固中因先后次序的不同会引起内应力,拉力较大的部位可能出现裂纹。

钢材的组织构造和缺陷,均会对钢材的力学性能产生重要的影响。

三、钢材的加工

钢材的加工分为热加工、冷加工和热处理三种。将钢坯加热至塑性状态,依靠外力改变其形状,产生出各种厚度的钢板和型钢,称为热加工。在常温下对钢材进行加工称为冷加工。通过加热、保温、冷却的操作方法,使钢的组织结构发生变化,以获得所需性能的加工工艺称为热处理。

(一) 热加工

将钢锭或钢坯加热至一定温度时,钢的组织将完全转变为奥氏体状态,奥氏体是碳溶入面心立方晶格的 γ 铁的固溶体,虽然含碳量很高,但其强度较低,塑性较好,便于塑性变形。因此钢材的轧制或锻压等热加工,经常选择在形成奥氏体时的适当温度范围内进行。选择原则是开始热加工时的温度不得过高,以免钢材氧化严重,而终止热加工时的温度也不能过低,以免钢材塑性差,引发裂纹。一般开轧和锻压温度控制在 $1150\sim 1300^{\circ}\text{C}$ 。

钢材的轧制是通过一系列轧辊,使钢坯逐渐辊轧成所需厚度的钢板或型钢。钢材的锻压是将加热了的钢坯用锤击或模压的方法加工成所需的形状,钢结构中的某些连接零件常采用此种方法制造。

热加工可破坏钢锭的铸造组织,使金属的晶粒变细,还可在高温和压力下压合钢坯中的气孔、裂纹等缺陷,改善钢材的力学性能。热轧薄板和壁厚较薄的热轧型钢,因辊轧次数较多,轧制的压缩比大,钢材的性能改善明显,其强度、塑性、韧性和焊接性能均优于厚板和厚壁型钢。



钢材的强度按板厚分组就是这个缘故。

热加工使金属晶粒沿变形方向形成纤维组织,使钢材沿轧制方向(纵向)的性能优于垂直轧制方向(横向)的性能,即使其各向异性增大。因此对于钢板部件应沿其横向切取试件进行拉伸和冷弯试验。钢中的硫化物和氧化物等非金属夹杂,经轧制之后被压成薄片,对轧制压缩比较小的厚钢板来说,该薄片无法被焊合,会出现分层现象。分层使钢板沿厚度方向受拉的性能恶化,在焊接连接处沿板厚方向有拉力作用(包括焊接产生的约束拉应力作用)时,可能出现层状撕裂现象,应引起重视。

(二)冷加工

在常温或低于再结晶温度的情况下,通过机械的力量,使钢材产生所需要的永久塑性变形,获得需要的薄板或型钢的工艺称为冷加工。冷加工包括冷轧、冷弯、冷拔等延伸性加工,也包括剪、冲、钻、刨等切削性加工。冷轧卷板和冷轧钢板就是将热轧卷板或热轧薄板经带钢冷轧机进一步加工得到的产品。在轻钢结构中广泛应用的冷弯薄壁型钢和压型钢板也是经辊轧或模压冷弯所制成。组成平行钢丝束、钢绞线或钢丝绳等的基本材料——高强钢丝,就是由热处理的优质碳素结构钢盘条经多次连续冷拔而成的。

经过冷加工的钢材均产生了不同程度的塑性变形,金属晶粒沿变形方向被拉长,局部晶粒破碎、位错密度增加,并使残余应力增加。钢材经冷加工后,会产生局部或整体硬化,即在局部或整体上提高了钢材的强度和硬度,但却降低了塑性和韧性,这种现象称为冷作硬化(或应变硬化)。冷拔高强度钢丝充分利用了冷作硬化现象,在悬索结构中有广泛的应用。冷弯薄壁型钢结构在强度验算时,可有条件地利用因冷弯效应而产生的强度提高现象。但对截面复杂的钢构件来说,这种情况是无法利用的。相反,钢材由于冷硬变脆,常成为钢结构脆性断裂的起因。因此,对于比较重要的结构,要尽量避免局部冷加工硬化的发生。

(三)热处理

钢的热处理是将钢在固态范围内,施以不同的加热、保温和冷却措施,籍改变其内部组织构造,达到改善钢材性能的一种加工工艺。钢材的普通热处理包括退火、正火、淬火和回火四种基本工艺。

退火和正火是应用非常广泛的热处理工艺,用其可以消除加工硬化、软化钢材、细化晶粒、改善组织以提高钢的机械性能;消除残余应力,以防钢件的变形和开裂;为进一步的热处理作好准备。对一般低碳钢和低合金钢而言,其操作方法为:在炉中将钢材加热至 $850\sim 900^{\circ}\text{C}$,保温一段时间后,若随炉温冷却至 500°C 以下,再放至空气中冷却的工艺称为完全退火;若保温后从炉中取出在空气中冷却的工艺称为正火。正火的冷却速度比退火快,正火后的钢材组织比退火细,强度和硬度有所提高。如果钢材在终止热轧时的温度正好控制在上述范围内,可得到正火的效果,称为控轧。如果热轧卷板的成卷温度正好在上述范围内,则卷板内部的钢材可得到退火的效果,钢材会变软。

还有一种去应力退火,又称低温退火,主要用来消除铸件、热轧件、锻件、焊接件和冷加工件中的残余应力。去应力退火的操作是将钢件随炉缓慢加热至 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$,经一段时间后,随炉缓慢冷却至 $300\sim 200^{\circ}\text{C}$ 以下出炉。钢在去应力退火过程中并无组织变化,残余应力是在加热、



保温和冷却过程中消除的。

淬火工艺是将钢件加热到 900°C 以上,保温后快速在水中或油中冷却。在极大的冷却速度下原子来不及扩散,因此含有较多碳原子的面心立方晶格的奥氏体,以无扩散方式转变为碳原子过饱和的铁固溶体,称为马氏体。由于铁的含碳量是过饱和状态,从而使体心立方晶格被撑长为歪曲的体心正方晶格。晶格的畸变增加了钢材的强度和硬度,同时使塑性和韧性降低。马氏体是一种不稳定的组织,不宜用于建筑结构。

回火工艺是将淬火后的钢材加热到某一温度进行保温,而后在空气中冷却。其目的是消除残余应力,调整强度和硬度,减少脆性,增加塑性和韧性,形成较稳定的组织。将淬火后的钢材加热至 $500\sim 650^{\circ}\text{C}$,保温后在空气中冷却,称为高温回火。高温回火后的马氏体转化为铁素体和粒状渗碳体的机械混合物,称为索氏体。索氏体钢具有强度、塑性、韧性都较好的综合机械性能。通常称淬火加高温回火的工艺为调质处理。强度较高的钢材,如 Q420 中的 C、D、E 级钢和高强度螺栓的钢材都要经过调质处理。

第二节 钢材的主要性能

一、钢材的破坏形式

钢材有两种完全不同的破坏形式:塑性破坏和脆性破坏。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。

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。

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有人字纹。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。

钢材存在的两种破坏形式与其内在的组织构造和外部的的工作条件有关。试验和分析均证明,在剪力作用下,具有体心立方晶格的铁素体很容易通过位错移动形成滑移,即形成塑性变形;而其抵抗沿晶格方向伸长至拉断的能力却强大得多,因此当单晶铁素体承受拉力作用时,总是首先沿最大剪应力方向产生塑性滑移变形。实际钢材是由铁素体和珠光体等组成的,由于珠光体间层的限制,阻遏了铁素体的滑移变形,因此受力初期表现出弹性性能。当应力达到一定数值,珠光体间层失去了约束铁素体在最大剪应力方向滑移的能力,此时钢材将出现屈服现象,先前铁素体被约束了的塑性变形就充分表现出来,直到最后破坏。显然当内外因素使钢材中铁素体的塑性变形无法发生时,钢材将出现脆性破坏。



二、钢材在单向一次拉伸下的工作性能

钢材的多项性能指标可通过单向一次(也称为单调)拉伸试验获得。试验一般都是在标准条件下进行的,即:试件的尺寸符合国家标准,表面光滑,没有孔洞、刻槽等缺陷;荷载分级逐次增加,直到试件破坏;室温为 20°C 左右。图 2-1 所示为相应钢材的单调拉伸应力—应变曲线。由低碳钢和低合金钢的试验曲线看出,在比例极限(proportional limit) σ_p 以前钢材的工作是弹性的;比例极限以后,进入了弹塑性阶段;达到了屈服点(yield point 或 yield strength) f_y 后,出现了一段纯塑性变形,也称为塑性平台;此后强度又有所提高,出现所谓自强阶段,直至产生颈缩而破坏。破坏时的残余延伸率表示钢材的塑性性能。调质处理的低合金钢没有明显的屈服点和塑性平台。这类钢的屈服点是以卸载后试件中残余应变为 0.2% 所对应的应力人为定义的,称为名义屈服点或 $f_{0.2}$ 。

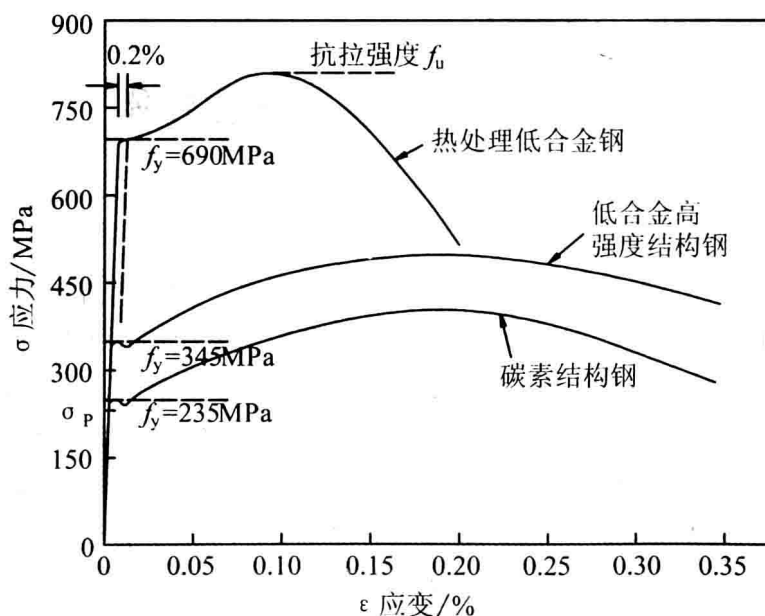


图 2-1 钢材的单调拉伸应力—应变曲线

钢材的单调拉伸应力—应变曲线提供了三个重要的力学性能指标:抗拉强度(tensile strength) f_u 、伸长率(elongation) δ 和屈服点 f_y 。抗拉强度 f_u 是钢材一项重要的强度指标,它反映钢材受拉时所能承受的极限应力。伸长率 δ 是衡量钢材断裂前所具有的塑性变形能力的指标,以试件破坏后在标定长度内的残余应变表示。取圆试件直径的 5 倍或 10 倍为标定长度,其相应伸长率分别用 δ_5 或 δ_{10} 表示。屈服点 f_y 是钢结构设计中应力允许达到的最大限值,因为当构件中的应力达到屈服点时,结构会因过度的塑性变形而不适于继续承载。承重结构的钢材应满足相应国家标准对上述三项力学性能指标的要求。

断面收缩率 ψ 是试样拉断后,颈缩处横断面积的最大缩减量与原始横断面积的百分比,也是单调拉伸试验提供的一个塑性指标。 ψ 越大,塑性越好。在国家标准《厚度方向性能钢板》中,使用沿厚度方向的标准拉伸试件的断面收缩率来定义 Z 向钢的种类,如 ψ 分别大于或等于 15%、25%、35% 时,为 Z15、Z25、Z35 钢。由单调拉伸试验还可以看出钢材的韧性好坏。韧性



可以用材料破坏过程中单位体积吸收的总能量来衡量,包括弹性能和非弹性能两部分,其数值等于应力—应变曲线下的总面积。当钢材有脆性破坏的趋势时,裂纹扩展释放出来的弹性能往往称为裂纹继续扩展的驱动力,而扩展前所消耗的非弹性能则属于裂纹扩展的阻力。因此,上述的静力韧性中非弹性能所占的比例越大,材料抵抗脆性破坏的能力越高。

由图 2-1 可以看到,屈服点以前的应变很小,如把钢材的弹性工作阶段提高到屈服点,且不考虑自强阶段,则可把应力—应变曲线简化为图 2-2 所示的两条直线,称为理想弹塑性体的工作曲线。它表示钢材在屈服点以前应力与应变关系符合虎克定律,接近理想弹性体工作;屈服点以后塑性平台阶段又近似于理想的塑性体工作。这一简化,与实际误差不大,却大大方便了计算,成为钢结构弹性设计和塑性设计的理论基础。

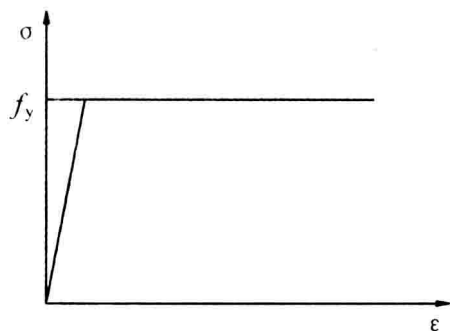


图 2-2 理想弹塑性体应力—应变曲线

三、钢材的其他性能

(一)冷弯性能

钢材的冷弯性能(cold-bending behavior)由冷弯试验确定。试验时,根据钢材的牌号和不同的板厚,按国家相关标准规定的弯心直径,在试验机上把试件弯曲 180° (见图 2-3),以试件表面和侧面不出现裂纹和分层为合格。冷弯试验不仅能检验材料承受规定的弯曲变形能力的大小,还能显示其内部的冶金缺陷,因此是判断钢材塑性变形能力和冶金质量的综合指标。焊接承重结构以及重要的非焊接承重结构采用的钢材,均应具有冷弯试验的合格保证。

(二)冲击韧性

由单调拉伸试验获得的韧性没有考虑应力集中和动荷作用的影响,只能用来比较不同钢材在正常情况下的韧性好坏。冲击韧性也称缺口韧性(notch toughness)是评定带有缺口的钢材在冲击荷载作用下抵抗脆性破坏能力的指标,通常用带有夏比 V 形缺口(Charpy V-notch)的标准试件做冲击试验(见图 2-4),以击断试件所消耗的冲击功大小来衡量钢材抵抗脆性破坏的能力。冲击韧性也称为冲击功,用 A_{KV} 或 C_V 表示,单位为 J($1\text{J}=1\text{N}\times 1\text{m}$,即 1 焦耳=1 牛顿 \times 1 米)。

试验表明,钢材的冲击韧性值随温度的降低而降低,但不同牌号和等级钢材的降低规律又有很大的不同。因此,在寒冷地区承受动力作用的重要承重结构,应根据其工作温度和所用钢材牌号,对钢材提出相当温度下的冲击韧性指标的要求,以防脆性破坏发生。