

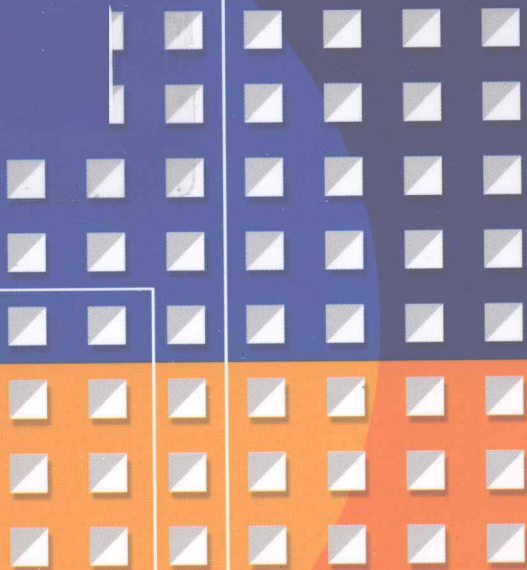


高等学校“十一五”精品规划教材

水工钢结构

主 编 赵占彪 刘丽霞

SHUIGONG GANGJIEGOU



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校“十一五”精品规划教材

水工钢结构

主 编 赵占彪 刘丽霞

副主编 高宗章 段青松

主 审 段绪胜



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材主要内容有：钢结构的特点、分类、应用、发展，钢结构的材料与计算方法，钢结构的连接，钢柱与钢压杆，钢梁和平面钢闸门等。章后有思考题、习题。本教材在基本概念、基本理论的论述上准确严谨，以现行《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)，《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—1995)，《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)等规范为依据编写，内容注重工程实际，力求反映水工钢结构的最新发展。

本教材可作为普通高等学校本科水利类工程各专业水工钢结构课程的教材，也可供其他专业和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工钢结构 / 赵占彪, 刘丽霞主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2009. 12
高等学校“十一五”精品规划教材
ISBN 978-7-5084-7129-7

I. ①水… II. ①赵… ②刘… III. ①水工结构: 钢结构—高等学校—教材 IV. ①TV34

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第000413号

书 名	高等学校“十一五”精品规划教材 水工钢结构
作 者	主编 赵占彪 刘丽霞
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 14.5印张 343千字
版 次	2009年12月第1版 2009年12月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	27.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

为了更好地适应 21 世纪普通高等学校水利类专业对钢结构课程的教学需要，按照教育部水利类专业教学指导委员会制定的水工钢结构课程教学基本要求，在综合各普通高等学校水利类专业的教学特点，总结多年教学经验的基础上编写了本教材。本教材为高等学校“十一五”精品规划教材之一。

本教材共 6 章，包括：绪论；钢结构的材料与计算方法；钢结构的连接；钢柱与钢压杆；钢梁；平面钢闸门等基本内容。这些内容均满足水利类专业水工钢结构技术基础课的全部要求。鉴于目前各校及不同专业的教学时数不统一，教学时可根据具体情况来选择教材内容。

在编写过程中紧紧围绕现行的《钢结构设计规范》（GB 50017—2003），《水电水利工程钢闸门设计规范》（SL 74—1995），《冷弯薄壁型钢结构技术规范》（GB 50018—2002）和行业标准《水电水利工程钢闸门设计规范》（2006 年送审稿）编写。

参加本教材编写的人员有：内蒙古农业大学赵占彪（第 1 章、第 5 章和附录 3~附录 7），云南农业大学蒋正跃（第 2 章和附录 1~附录 2）、段青松（第 3 章），河北农业大学高宗章（第 4 章），甘肃农业大学刘丽霞（第 6 章、附录 8~附录 11）。全书由赵占彪、刘丽霞担任主编，由山东农业大学段绪胜教授担任主审，由赵占彪统稿。

本教材编写过程中得到了多位钢结构专家的指导和帮助，特别是上述编写者所在学院的大力支持和帮助，在此深表谢意。

限于作者水平，本教材难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2009 年 9 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 钢结构课程的性质和任务	1
1.2 钢结构的特点	1
1.3 钢结构的分类和应用	2
1.4 钢结构的发展	6
思考题	8
第 2 章 钢结构的材料与计算方法	9
2.1 钢结构对材料的要求及破坏形式	9
2.2 钢材的主要工作性能	10
2.3 钢材的疲劳	14
2.4 影响钢材性能的主要因素	16
2.5 钢材的种类与规格	20
2.6 钢结构的设计方法	24
思考题	29
第 3 章 钢结构的连接	30
3.1 钢结构的连接方法及其特点	30
3.2 焊接方法和焊缝连接形式	31
3.3 对接焊缝的构造和计算	35
3.4 角焊缝的构造和计算	39
3.5 焊接残余应力和残余变形	50
3.6 普通螺栓连接的构造和计算	52
3.7 高强螺栓连接的构造和计算	63
思考题	67
习题	67
第 4 章 钢柱与钢压杆	70
4.1 钢柱和钢压杆的应用和构造形式	70
4.2 轴心受压实腹柱的整体稳定性	71
4.3 轴心受压实腹柱的局部稳定性	77

4.4	轴心受压实腹柱的设计	79
4.5	轴心受压格构柱的稳定	84
4.6	轴心受压格构柱的设计	87
4.7	实腹式压弯构件的承载能力	94
4.8	偏心受压实腹柱的设计	97
4.9	偏心受压格构柱的设计	100
4.10	柱脚的设计	101
	思考题	105
	习题	106
第5章	钢梁	107
5.1	概述	107
5.2	钢梁的强度和刚度的计算	108
5.3	梁的稳定设计	117
5.4	梁的局部稳定和腹板加劲肋设计	120
5.5	考虑腹板屈曲后强度的梁设计	129
5.6	型钢梁与组合梁的设计	133
	思考题	140
	习题	140
第6章	平面钢闸门	142
6.1	概述	142
6.2	平面钢闸门的组成和结构布置	143
6.3	面板和次梁的设计	149
6.4	主梁设计	155
6.5	横向连接系(横向支撑)和纵向连接系(纵向支撑)	157
6.6	边梁设计	158
6.7	行走支承	159
6.8	轨道及其他埋件	164
6.9	止水、启闭力和吊耳	167
6.10	设计例题——露顶式平面钢闸门设计	170
	思考题	185
附录		187
附录1	钢材和连接的强度设计值和容许应力值	187
附录2	受弯构件的容许挠度	194
附录3	梁的整体稳定系数	194
附录4	轴心受压构件的整体稳定系数	197
附录5	柱的计算长度系数	200
附录6	型钢表	203

附录 7 螺栓和锚栓规格	217
附录 8 矩形弹性薄板弯矩系数	218
附录 9 轴套材料及混凝土承压容许应力	220
附录 10 钢闸门自重 (G) 估算公式	221
附录 11 材料的摩擦系数	222
参考文献	223

第 1 章 绪 论

1.1 钢结构课程的性质和任务

钢结构是把各种型钢或钢板通过焊接 (welding) 或螺栓 (strength bolts) 连接等方法组成基本构件, 根据使用要求按照一定的规律制造而成的工程结构。钢结构在工程建设中应用较广, 如高层建筑、大跨度空间结构、轻钢结构、工业厂房, 道路工程中的钢桥, 水工建筑中的钢闸门、加油站的钢顶棚等。钢结构是结构工程中按使用材料划分出来的一门专业课程。

本课程的性质是在建筑材料、理论力学、材料力学、结构力学及工程实践知识的基础上, 按照工程结构使用的目的, 研究与计算在预计各种荷载的作用下, 在预定的使用期间内, 使结构不致失效的一门学科。因此, 在进行钢结构设计时, 必须考虑具体的材料性能, 综合运用上述的力学知识, 研究结构在使用环境各种荷载作用下的工作状况, 才能设计出既安全适用又经济合理的结构。

本课程的任务是论述常用的钢结构材料的工作性能、钢结构的连接方式的设计、钢结构各类基本构件的设计原理和方法。通过对本课程的学习, 具备钢结构的基本知识, 掌握正确的设计原理和方法, 能够对构件的连接、轴心受力构件、受弯构件、偏心受力构件等基本构件进行设计。并为设计其他类型的钢结构打下基础。

1.2 钢结构的特点

钢结构与钢筋混凝土结构、木质结构、砖石结构以及混合结构相比具有如下特点。

1.2.1 钢材的强度高、钢结构自重轻

虽然钢的容重很大 ($\gamma=76.93\text{kN/m}^3$ 或 $\gamma=7.85\text{t/m}^3$), 但由于强度高, 构件所需的截面面积较小, 故做成的结构比较轻。结构的轻质性可以用材料的质量密度 ρ 和强度 f 的比值 α 来衡量, α 值越小, 结构相对越轻。建筑钢材的 α 值为 $1.7\times 10^{-4}\sim 3.7\times 10^{-4}/\text{m}$; 木材为 $5.4\times 10^{-4}/\text{m}$; 钢筋混凝土约为 $18\times 10^{-4}/\text{m}$ 。同跨度同荷载, 钢屋架的重量约为钢筋混凝土屋架的 $1/3\sim 1/4$, 冷弯薄壁型钢屋架甚至接近 $1/10$ 。

钢结构自重轻, 可减轻基础负荷, 降低基础造价, 同时便于运输和吊装, 特别适用于大跨度和高耸结构, 也更适用于活动结构, 以减少驱动力, 如水利工程中的钢闸门。

1.2.2 钢结构连接、装配速度快, 工期短

大型钢结构建筑的构件一般由工厂加工制作, 加工精度较高, 单件质量轻, 易起吊,

施工组装速度快；小型钢结构和轻型钢结构可以在现场下料制作，用螺栓或焊接安装迅速，施工工期短。部件便于更换，并且易于加固、改建和拆除。

1.2.3 钢材的塑性、韧性好

强度高、塑性和韧性好是钢材的特有性能，也是钢结构的主要特性，符合轻型结构和现代工业化建筑的发展趋势。强度高，适用于大跨度、高度高和承载重的建筑结构，如工业厂房、桥梁等大型重型建筑物；塑性好，结构在超载后发生的变形易于被发现，不会突然断裂，有一点微小的变形，受力重新分配，使应力变化趋于平缓；韧性好，抗振性和抗冲击性较高，再加上自重轻，引起的振动惯性也小，适于在动荷载作用下工作，抗地震能力较强。

1.2.4 材料均质，各向力学性能相同

钢材的内部结构组织均匀，物理力学性质接近各向同性，弹性模量较大 ($E=2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)，具有较大的抵抗变形的能力，是理想的弹性—塑性体。符合力学计算中的基本假设，钢结构的实际受力情况与计算结果比较符合工程实际，所以计算结果比较可靠，结构的安全程度比较明确。

1.2.5 钢结构的密封性能较好

钢材经过焊接后，焊缝密实，水密性和气密性较好。可用钢板做成管道、油箱、水箱和气罐等。

1.2.6 钢结构耐腐蚀性差

钢材很容易锈蚀，为了防止生锈，通常采用涂油漆或镀锌等措施。特别是薄壁构件或长期处于潮湿条件下的钢结构更要特别注意，油漆质量和涂层厚度要符合要求。尤其是水工钢结构，一定要定期检查维护。处于较强腐蚀性介质内的建筑物不宜采用钢结构。

1.2.7 钢结构的耐火性差

钢材在 200°C 以内屈服点和弹性模量下降较小，强度变化不大。当温度高于 300°C 时，不仅强度明显下降，而且出现徐变现象。当温度达到 500°C 以上时，钢材进入塑性状态，失去承载能力。因此，设计规定钢材表面温度超过 150°C 后要加上隔热保护措施，如在构件外面包石棉、混凝土等。对有防火要求的结构，更需按相应规范采取隔热保护措施。

1.2.8 钢材在低温下显脆性

钢结构在极端低温下显脆性，在没有预兆的情况下可能发生脆性断裂，这一点要特别注意。

1.3 钢结构的分类和应用

过去由于受钢材生产量的限制，钢结构应用范围不大。近年来我国钢产量有了很大的

发展,截至2008年底,我国钢产量达5.01亿t,连续多年居世界第一。加之钢结构形式的改进,钢结构的应用也有了很大的发展,如西气东输、西电东输、南水北调、青藏铁路、2008年北京奥运会场馆、2010年上海世博会园区等重大工程建设,其发展潜力和空间也很大,钢结构行业面临良好的发展机遇。

钢结构制造工艺严格,具备批量生产和高精度的特点,是目前工业化程度最高的一种结构。加之钢结构具有自重轻、强度高、塑性韧性好和施工速度快等优点,应用范围较广。

按不同的标准,钢结构有不同的分类方法,下面仅按其应用领域和机构体系进行分类说明。

1.3.1 按应用领域分类

1.3.1.1 民用建筑钢结构

于1997年建设部颁布的《1996~2010年建筑技术政策》首次提出了“发展钢结构、加速推广轻钢结构,研究推广组合结构的应用以及研究开发膜结构、张拉结构与空间结构体系”等技术措施,明确了我国建筑技术政策的导向,即由多年来的限制钢结构使用转变为发展、推广钢结构的应用。在这一政策的指导和支持下,从重大工程、标志性建筑的使用开始,钢结构呈现出了前所未有的兴旺景象。我国钢结构行业迅速发展,产量、产值成倍增加的同时,工程质量不断提高,钢结构相关技术和管理水平也有了显著的进步,在制作、安装、钢材供应等方面达到了国内外先进水平,为国民经济发展作出了贡献。

民用建筑钢结构以房屋钢结构为主要对象。按传统的耗钢量大小来区分,大致可分为普通钢结构、重型钢结构和轻型钢结构。其中重型钢结构指采用大截面和厚板的结构,如高层钢结构、重型厂房和某些公共建筑等;轻型钢结构指采用轻型屋面和墙面的门式刚架房屋、某些多层建筑、薄壁压型钢板拱壳屋盖等,网架、网壳等空间结构也可属于轻型钢结构范畴。除上述钢结构主要类型外,还有索膜结构、玻璃幕墙支承结构、组合和复合结构等。

我国在“十五”期间,建筑钢结构发展已取得巨大成就;“十一五”期间仍将继续坚持鼓励发展钢结构的相关政策措施,保持其连续性、稳定性。推广和扩大钢结构的应用,要加强科技导向的规划和措施指导作用,促使钢结构整体的持续发展。高层和超高层建筑优先采用合理的钢结构或钢—混凝土组合体系,大跨度建筑积极采用空间网格结构、立体桁架结构、索膜结构以及施加预应力的结构体系,结合市场需求,积极开发钢结构的住宅建筑体系,并逐步实现产业化。在今后相当长的一段时间内,钢结构的需求将保持持续增长的趋势。目前要加快钢结构住宅建设的研究开发和工程应用,使钢结构的住宅建筑更加完善配套,提高住宅建筑的工业化、产业化水平。

建筑钢结构与混凝土、木结构等相比,具有轻质、高强、受力均匀、易于工业化、能耗小、绿色环保、可循环使用、符合可持续发展等优点。同时,其造价较高,对设计、制造、安装的要求较高,需要相关的辅助材料与之配套(尤其是住宅房屋),其发展受多种因素影响。

按照中国钢结构协会的分类标准,民用建筑结构分为高层钢结构(如上海期货大厦)、

大跨度空间钢结构（如 2008 年北京奥运会主体育场——鸟巢以及广州新体育馆）、钢—混凝土组合结构、索膜钢结构、钢结构住宅、幕墙钢结构等。

1.3.1.2 一般工业钢结构

一般工业钢结构主要包括单层厂房、双层厂房、多层厂房等，用于重型车间的承重骨架，例如冶金工厂的平炉车间、出轧车间、混凝土炉车间，重型机械场的铸钢车间、水压机车间、锻压车间，造船厂的船体车间，电厂的锅炉框架，飞机制造场的装配车间以及其他工业跨度较大的车间屋架、吊车梁等。我国鞍钢、武钢、包钢和上海宝钢等几个著名的冶金联合企业的许多车间都采用了各种规模的钢结构厂房，上海重型机械厂、上海江南造船厂也都有高大的钢结构厂房。

1.3.1.3 桥梁钢结构

钢桥建造简便、迅速，易于修复，因此钢结构广泛用于中等跨度和大跨度桥梁，著名的杭州钱塘江大桥（1934～1937 年）是我国自行设计的钢桥。此后的武汉长江大桥（1957 年）、南京长江大桥（1968 年）均为钢结构桥梁。其规模和难度都举世闻名，标志着我国钢结构桥梁事业已步入世界先进行列。

20 世纪 90 年代以来，我国连续刷新桥梁跨度的记录，现在建设的钢桥已不再是原来意义上的全钢结构，而是包含了钢、钢—混凝土组合结构、钢管混凝土结构及钢骨混凝土结构。现在我国钢桥建设正处于一个迅速发展的阶段，不管是铁路钢桥、公路钢桥还是市政钢桥，从材料的开发应用、科研成果的应用到设计水平、制造水平、施工技术水平的提高，都取得了长足发展，并与钢桥建设的规模相适应。我国新建和再建的钢桥，其建筑跨度、建筑规模、建筑难度和建筑水平都达到了一个新的高度，如上海卢浦大桥、南京第二长江大桥、九江长江大桥、芜湖长江大桥等。国外著名的钢桥有美国的金门大桥、法国米劳大桥、日本的明石海峡大桥和 2007 年 6 月 18 日合拢的苏通大桥（斜拉桥，跨度 1088m）等。

1.3.1.4 密闭压力容器钢结构

密闭压力容器钢结构主要用于要求密闭的容器，如大型储液库、煤气库等炉壳，要求能承受很大内力，另外温度急剧变化的高炉结构、大直径高压输油管和输气管道等均采用钢结构。上海在 1958 年就建成了容积为 54000m³ 的湿式储气柜。上海金山及吴泾等石油、化工基地有众多的容器结构。一些容器、管道、锅炉、油罐等的支架也都采用钢结构。

锅炉行业近几年来得到了迅猛的发展，特别是由于经济发展的需要，发电厂的锅炉都向着大型化的方向发展。发电厂主厂房和锅炉钢结构用钢量增加很快，其大量采用中厚板、热轧 H 型钢，主要是 Q235 钢和 Q345 钢。

1.3.1.5 塔桅钢结构

塔桅钢结构是指高度较大的无线电桅杆、微波塔、广播和电视发射塔架、高压输电线路塔架、化工排气塔、石油钻井架、大气监测塔、旅游瞭望、火箭发射塔等。我国在 20 世纪 60～70 年代建成的大型塔桅结构有：高 200m 的广州电视塔、高 210m 的上海电视塔、高 194m 的南京跨越长江输电线路塔、高 325m 的北京环境气象桅杆、高 212m 的汕头电视塔、高 260m 的大庆电视塔等。

近年来广播电视事业迅速发展,广播电视塔桅结构工程技术也不断发展,最近又建成一批有代表性的电视塔,如中央电视塔(高405m)、上海东方明珠电视塔(高468m)、广州新电视塔(高610m)。

这些结构除了自重轻、便于组装外,还因构件截面小而大大减小了风荷载,因此取得了很好的经济效益。

1.3.1.6 船舶海洋钢结构

人类在开发和利用海洋的活动中,形成了海洋产业,发展了种类繁多的海洋工程结构物。人们一般将江、河、湖、海中的结构物统称为海洋钢结构,海洋钢结构主要用于资源勘测、采油作业、海上施工、海上运输、海上潜水作业、生活服务、海上抢险救助以及海洋调查等。

船舶海洋钢结构基本上可分为舰船和海洋工程装置两大类。近年来,我国研制了高技术、高附加值的大型与超大型新型船舶,以及具有先进技术的战斗舰船和具有高风险、高投入、高回报、高科技、高附加值的海洋工程结构等。

1.3.1.7 水利钢结构

我国近年来大力加快基础建设,在建和拟建相当数量的水利枢纽,钢结构在水利工程中占有相当大的比重。

钢结构在水利工程中用于以下方面:①钢闸门,用来关闭、开启或局部开启水工建筑物中过水孔口的活动结构;②拦污栅,主要包括拦污栅栅叶和栅槽两部分,栅叶结构是由栅面和支承框架组成的;③升船机,是不同于船闸的船舶通航设施;④压力管,是从水库、压力前池或调压室向水轮机输送水流的水管。

1.3.1.8 煤炭电力钢结构

发电厂中的钢结构主要用于以下方面:干燥棚,运煤系统皮带机支架(输煤栈桥)、火电厂主厂房、管道、烟风道及钢支架、烟气脱硫系统、粉煤灰料仓、输电塔,风力发电中的风力发电机、风叶支柱,垃圾发电厂中的焚烧炉,核电站中的压力容器、钢烟囱、水泵房、安全壳等。

1.3.1.9 钎具和钎钢

钎具也可称为钻具,由钎头、钎杆、连接套、钎尾组成。它是钻凿、采掘、开挖用的工具,有近千个品种规格,用于矿山、隧道、涵洞、采石、城建等工程中。钎钢是制作钎具的原材料,也有近百个品种规格。钎具按照凿岩工作的方式又可分为冲击式钎具、旋转式钎具、刮削式钎具等。

随着经济建设的进一步发展,以及多处铁路、公路、水利水电、输气工程、市政基础设施的修建和开工,对钎钢、钎具产品提出了更多、更高、更新的要求。

1.3.1.10 地下钢结构

地下钢结构主要用于桩基础、基坑支护等,如钢管桩、钢板桩等。

1.3.1.11 货架和脚手架钢结构

超市中的货架和展览时用的临时设施多采用钢结构,一般而言,在建设施工中大量使用的脚手架都采用钢结构。

1.3.1.12 雕塑和小品钢结构

钢结构因其轻盈简洁的外观而备受景观师的青睐,不仅很多雕塑是以钢结构作为骨架,而且很多城市小品和标志物的建造都是直接用钢结构完成的,如南海观音佛像及天津塘沽迎宾道标志性建筑等。

1.3.2 按结构体系工作特点分类

1.3.2.1 梁状结构

梁状结构是由受弯曲工作的梁组成的结构。

1.3.2.2 刚架结构

刚架结构是由受压、弯曲工作的直梁和直柱组成的框形结构。

1.3.2.3 拱架结构

拱架结构是由单向弯曲形构件组成的平面结构。

1.3.2.4 桁架结构

桁架结构主要是由受拉或受压的杆件组成的结构。

1.3.2.5 网架结构

网架结构是由受拉或受压的杆件组成的空间平板型网格结构。

1.3.2.6 网壳结构

网壳结构主要是由受拉或受压的杆件组成的空间曲面形网格结构。

1.3.2.7 预应力钢结构

预应力钢结构是由张力索(或链杆)和受压杆件组成的结构。

1.3.2.8 悬索结构

悬索结构是以张拉索为主组成的结构。

1.3.2.9 复合结构

复合结构是由上述 8 种类型中的两种或两种以上结构构件组成的新型结构。

1.4 钢 结 构 的 发 展

随着我国经济建设的迅速发展和钢产量的不断提高,钢结构的应用也会更加广泛。为了更有效地利用钢材和节约钢材,加强资源管理,提高资源的利用率,钢结构的发展大致要考虑下列几个方面。

1.4.1 提高材料强度,减少材料用量

钢结构的发展,从所用的材料来看,先是铸铁、锻铁,后是钢,近些年出现了合金钢,所以钢结构可能要改称为金属结构。合金钢是冶炼时在碳素钢里加入少量的合金元素(合金元素总含量一般为 1%~2%,最多不超过 5%),就可以得到强度高,综合机械性能好的普通低合金钢。此材料还具有抗蚀、耐磨和耐低温等性质。除工程上常用的 Q235 钢(3 号钢)外,如屈服点为 345N/mm^2 的 Q345 钢(16 锰钢)和屈服点为 390N/mm^2 的 Q390 钢(15 锰钒钢)和 Q420 钢均已列为《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)推荐

使用。Q390 钢 (15 锰钒钢) 是在冶炼 Q345 钢 (16 锰钢) 的基础上加入少量的钒铁合金而成的, 已有 20 多年的使用经验, 是我国低合金结构钢中综合性能比较好的材料, 其经济效果比 3 号钢 (A3 钢, 即 Q235 钢) 节约材料 15%~20%。2008 年北京奥运会主体育场——鸟巢结构采用了最新研制的 Q460 钢。今后, 钢结构在各建筑领域的应用将更加广泛, 所以, 提高材料强度、减少材料用量是钢产业上一个非常重要的课题。

1.4.2 优化结构形式, 科学利用材料

不断创新、优化合理的结构形式, 是节约钢材和充分利用其他建筑材料的有效途径。如在混凝土柱中加入十字钢板, 可以提高混凝土柱的抗剪强度。再如在钢管内浇注混凝土作为受压构件, 不仅混凝土受到钢管的约束而提高抗压强度, 同时由于管内混凝土的填充也提高了钢管抗压的稳定性, 具有良好的塑性和韧性, 它与纯钢柱相比, 可节约钢材 30%~50%, 大大降低了工程造价。在屋架中也可以采用钢混结构形式, 充分利用各种材料的特性, 节约钢材。还有索膜钢结构、钢结构住宅、幕墙钢结构、悬索结构、网架结构和超高层结构也得到进一步研究与应用。从结构力学的角度出发, 研究人员设计出多种索膜钢结构、钢结构住宅、幕墙钢结构等形式。

1.4.3 推广科学的连接方式, 提高结点强度

从钢结构连接方式的发展看, 在生铁和熟铁时代是销钉连接; 19 世纪初采用铆钉连接; 20 世纪初出现了焊接连接; 现在发展了高强度螺栓连接。

结点是钢结构中的一个薄弱环节, 推广科学的连接方式, 提高结点强度, 也是钢结构发展中一项很重要的工作。一方面要继续研究改进焊接工艺, 提高焊接质量, 采用二氧化碳气体保护焊、电渣焊, 研究与高强度结构相匹配的高质量焊接材料等; 另一方面继续推广高强度螺栓的连接方式, 这种连接能够在板与板之间产生很大的摩擦阻力, 并且具有较好的塑性和韧性, 也避免了焊接中产生的焊接应力和焊接变形的缺点, 同时具有组装速度快、承受动荷载性能好的优点。

1.4.4 探索新的设计理论, 充分发挥材料的性能

钢结构在设计计算上一直采用容许应力法, 此种方法计算简便, 易掌握, 计算结果也能够满足正常的安全使用要求。但此方法的最大缺点是容许应力不能保证各构件具有比较一致的可靠程度, 不能同时达到最大承载力。原因是通常将一个空间结构简化成若干平面结构 (如梁、柱、桁架、刚架) 进行计算, 此种计算方法没有考虑结构的整体性, 其计算结果不能准确反映结构的实际工作状况。现在在钢结构的计算上采用以一次二阶矩概率为基础的概率极限状态设计法, 这一方法是我国《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001) 颁布实施的方法, 也是现行《钢结构设计规范》(GB 50017—2003) (下称《设计规范》) 所采用的方法。这个方法的特点是不用经验的安全系数, 而是用根据各种不定性分析所得的失效概率 (或可靠指标) 去度量结构的可靠性。但此方法还有待于研究发展, 因为它所计算的可靠度只是构件或某一截面的可靠度, 而不是整体结构的可靠度, 同时也不适用于疲劳计算的反复荷载和动荷载作用下的结构。

1.4.5 提高结构水平，推广多型钢材

今后，在钢结构制造工业的机械化水平方面还需要进一步加强，提高构件的制造精度，严格尺寸要求，减小组装应力，根据力学原理设计出多种结构形式。同时要提高钢材的质量，生产推广 H 型、正方形和矩形等多型钢材，以适应各种结构的需求。近年来轻型钢结构已广泛应用于仓库、办公室、工业厂房、展览馆和体育场馆中。

思 考 题

- 1.1 钢结构的概念是什么？学习它需要掌握哪些知识与内容？
- 1.2 举例说明钢结构在建筑中被广泛应用于何处？
- 1.3 钢结构具有哪些优缺点？
- 1.4 你对我国钢结构今后的发展有什么看法？

第 2 章 钢结构的材料与计算方法

2.1 钢结构对材料的要求及破坏形式

2.1.1 钢结构对材料的要求

钢结构的原材料是钢，而钢的种类较多，其力学性能有很大的差异，钢结构是在承载、外力干扰的作用下处于稳定状态的结构，所以钢结构对钢材要有特殊的要求。多年的实践证明，符合钢结构要求的建筑钢材有碳素结构钢（carbon structural steels）中的 Q235（3 号钢）和低合金高强度结构钢（high strength low alloy structural steels）中的 Q345、Q390、Q420 钢，可见适用于钢结构的钢只占钢材料的一小部分。用于钢结构的钢材必须具备下列条件：

（1）具有较高的强度。钢材的屈服点 f_y 是衡量钢结构承载能力的指标， f_y 越高承载能力越强，同时用材较少，减轻结构自重，降低工程造价。钢材的抗拉强度 f_u 是衡量钢材经过较大塑性变形后的抗拉能力，它是衡量钢材内部组织结构优劣的一个主要指标， f_u 越高，结构的安全保障越高。

（2）具有较好的塑性和韧性。塑性是指结构在荷载的作用下具有足够的应变能力，当去掉荷载马上恢复原位时，不至于发生突然性的脆性破坏；韧性是指结构在反复振动荷载的作用下表现出较强的反复应变能力，不至于发生折断破坏。

（3）具有较好的工艺性能。工艺性能是指钢材的冷加工、热加工和可焊性能，在加工焊接过程中不至于对钢材的强度、塑性和韧性造成大的破坏，以致造成局部承载能力的降低，导致结构的局部强度不够而破坏。

2.1.2 建筑钢材的两种破坏形式

钢材有塑性破坏和脆性破坏两种破坏形式。钢结构所用的材料虽然有较高的塑性和韧性，一般发生的是塑性破坏，但在一定条件下，仍有发生脆性破坏的可能性。当构件中的应力超过屈服点 f_y ，即有明显的塑性变形产生，当应力超过钢材的抗拉强度 f_u 后，构件将在很大的变形情况下断裂，这种破坏称为塑性破坏。塑性破坏前，结构有明显的塑性变形，且变形持续时间长，人们易于发现结构处于危险状态并有可能会采取补救措施。此外，塑件变形后结构出现内力重分布，使结构中原先受力不均匀的部分应力趋于均匀，从而提高了结构的承载能力。

另一种破坏形式是脆性破坏。脆性破坏前塑性变形很小，甚至没有塑性变形，材料所受应力可能小于钢材的屈服点 f_y ，断裂从应力集中处开始。冶金和机械加工过程中产生

的缺陷，特别是缺口和裂纹，常是断裂的发源地。破坏前没有明显的变形和预兆，断裂往往发生在瞬间。由于脆性破坏前没有明显的预兆，无法及时察觉和采取补救措施，而且个别构件的断裂常引起整个结构塌毁，后果严重，损失较大。

同一种钢材，由于具体情况和工作条件不同，可能发生塑性破坏，也可能发生脆性破坏。使钢材产生脆性破坏的原因包括钢材材质的优劣、设计与构造措施是否正确、施工制作是否合理及结构使用是否恰当等。应充分认识到钢材脆性破坏的严重后果，在设计、施工和使用钢结构时，采取合理措施，避免脆性破坏的发生。

2.2 钢材的主要工作性能

2.2.1 钢材单向拉伸试验的机械性能

钢材的机械性能也称力学性能。在静载、常温条件下由标准试件按照金属拉力试验法进行一次单向均匀拉伸试验得出的力学性能最具有代表性。所以，钢材的主要强度指标和

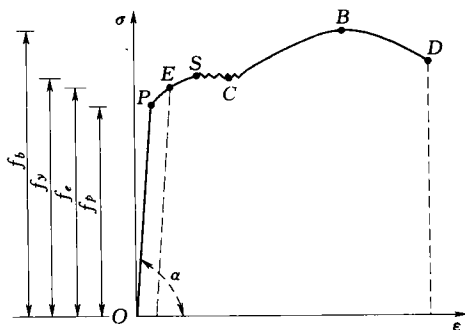


图 2.1 碳素结构钢和低合金钢一次单向拉伸应力—应变曲线

变形性能是根据标准试件在规定试验条件下的拉伸试验确定的，即试件尺寸符合国家标准，表面光滑，没有孔洞、刻槽等缺陷；荷载分级逐次增加，室温为 20℃ 左右。碳素结构钢和低合金钢一次单向拉伸时的应力—应变曲线如图 2.1 所示。拉伸时的工作特征可分为四个阶段。

2.2.1.1 弹性阶段

应力由零到比例极限 f_p ，在此阶段，钢材表现为弹性，应力—应变成线性关系，弹性模量很大，且为常数， $E=206 \times$

2.2.1.2 弹塑性阶段

由比例极限 f_p 到屈服极限 f_y ，应力—应变表现为曲线关系，应变值 ϵ 增加比应力值 σ 增加快，弹性模量 $E=206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 逐渐减为零，在此阶段内，任何一点的变形中都包括弹性变形和塑性变形两部分，其中塑性变形在卸荷后不再恢复。

2.2.1.3 塑性阶段

应力维持屈服点 f_y 不变，而应变不断增加，应变 ϵ 从开始屈服时的 0.1%~2% 达到屈服结束时的 2%~3%，表现为钢材暂时失去承载力，应力—应变关系形成水平段，弹性模量 E 为零。

2.2.1.4 强化阶段

钢材发生很大的塑性变形后，内部结晶组织自行调整，抵抗外荷载的能力又有所提高，应力—应变关系曲线上升，最后当应力达到极限抗拉强度 f_u 时，在试件的某一薄弱截面发生颈缩现象而断裂破坏，这种破坏是塑性破坏。通过标准试件的拉伸试验，