



普通高等教育“十二五”规划教材

水工钢结构原理 与设计

主编 三峡大学 李昆



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

水工钢结构原理 与设计

主编 三峡大学 李昆



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书阐述了水工钢结构的设计原理和方法。主要内容包括：绪论、钢结构的材料、钢结构设计方法、钢结构连接、受弯构件、钢柱和钢压杆、钢结构构造设计、钢屋盖设计、钢闸门和拦污栅、钢结构制作与安装以及钢结构工程施工质量控制。

根据普通高等教育“十二五”规划教材的要求，全书按照现行国家标准 GB 50017—2003《钢结构设计规范》和行业标准 SL 74—95《水利水电工程钢闸门设计规范》编写。

本书可作为高等学校水利水电工程专业及相关专业教材，也可供水利工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工钢结构原理与设计 / 李昆主编. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2011. 12
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5084-9371-8

I. ①水… II. ①李… 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(2011)第281453号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 水工钢结构原理与设计
作 者	主编 三峡大学 李昆
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
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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 17.5印张 415千字
版 次	2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	35.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

水工钢结构是水利水电工程专业及其相关专业学生的一门专业基础课。随着时代的发展和技术的进步,钢结构在我国工程领域越来越占据着重要的地位,这无疑要求学生在校期间能够掌握尽可能多的钢结构相关知识。比如钢结构的基本原理、钢结构连接设计、基本构件设计、典型水工钢结构的设计方法、钢结构生产制作以及质量控制等。如何在短时间内有效利用一门课程并做到重点内容掌握、基本方法熟练、相关概念了解,这正是编者力图通过本教材要达到的目的。

钢结构的设计计算源于力学基础课程,但是在理论计算的基础上,还需要通过加工制造等各项工艺以及质量控制体系来最终完成一个合格的钢结构产品。因此,本书在阐述基本原理与基本设计方法之外,特意增加了钢结构制作安装和质量控制这两个内容,旨在让学生对钢结构设计生产的全过程有一个充分的了解,对设计、制作、工艺、质量保证这一系列内容有全面的认识。

本书内容共分十一章及十二个附录,内容包括:钢结构设计的基本知识和基本理论、基本构件和连接的设计与计算、平面钢闸门设计、弧形钢闸门、船闸人字门以及拦污栅的结构布置和特点。此外,本书还介绍了钢结构的制作安装和钢结构工程施工质量控制相关的内容。

本书由三峡大学土木与建筑学院和水利与环境学院的教师编写,具体分工如下:

第一章、第二章(部分)至第五章由李昆编写;第二章(部分)、第六章由周万清编写;第七章、第八章、第十一章由孙开畅编写;第九章、第十章由吴海林编写。

本书由三峡大学土木与建筑学院李昆副教授担任主编,武汉大学土木建筑工程学院郭耀杰教授担任主审。在编写过程中,三峡大学土木与建筑学院给予了大力支持,在此表示衷心的感谢。

书中不足之处在所难免,希望读者批评指正,编者不胜感激。

编 者

2011年8月

目 录

前言

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	2
第三节 钢结构在水利工程中的应用和发展	4
第四节 本课程的性质、任务和学习方法	6
第二章 钢结构的材料	8
第一节 钢材的主要机械性能	8
第二节 钢材的破坏形式	14
第三节 影响钢材机械性能的一般因素	17
第四节 钢材的种类、牌号、规格及选用原则	23
第三章 钢结构设计方法	31
第一节 概率极限状态设计方法的基本概念	31
第二节 一次二阶矩概率极限状态设计方法	34
第三节 水工钢结构采用的容许应力设计法	40
第四节 材料和连接的设计指标	42
第四章 钢结构连接	46
第一节 钢结构的连接方式	46
第二节 对接焊缝构造和计算	51
第三节 角焊缝构造和计算	56
第四节 焊接应力和焊接变形	67
第五节 螺栓连接构造和计算	71
第五章 受弯构件	86
第一节 受弯构件的形式和应用	86
第二节 受弯构件的强度、刚度和整体稳定	87
第三节 型钢梁设计	95
第四节 组合梁设计	97

第五节	组合梁的局部稳定和加劲肋设计	101
第六节	组合梁的拼接	107
第六章	钢柱和钢压杆	114
第一节	钢柱与钢压杆的应用和构造形式	114
第二节	轴心受压实腹式构件的整体稳定	115
第三节	轴心受压实腹式构件的局部稳定	122
第四节	轴心受压实腹柱设计	123
第五节	轴心受压格构式构件的稳定性	125
第六节	轴心受压格构柱设计	127
第七节	实腹式压弯构件的承载能力	133
第八节	偏心受压实腹柱设计	138
第九节	偏心受压格构柱设计	140
第七章	钢结构构造设计	143
第一节	梁和梁的连接	143
第二节	梁和柱的连接	146
第三节	柱脚	148
第八章	钢屋盖设计	152
第一节	钢屋盖结构布置	152
第二节	屋架杆件的内力计算	154
第三节	屋架杆件的截面设计	156
第四节	屋架的节点设计	159
第五节	钢屋架的支撑	166
第六节	普通钢屋架设计例题	170
第九章	钢闸门和拦污栅	184
第一节	平面钢闸门	184
第二节	弧形钢闸门简介	202
第三节	人字钢闸门简介	205
第四节	拦污栅简介	209
第十章	钢结构制作与安装	212
第一节	概述	212
第二节	钢结构的制作	214
第三节	钢结构的安装	226
第十一章	钢结构工程施工质量控制	230
第一节	概述	230
第二节	钢结构工程施工质量控制	233
附录一	钢材的化学成分和机械性能	241

附录二	疲劳计算的构件和连接分类	243
附录三	型钢规格和截面特性	245
附录四	型钢的螺栓(铆钉)准线表	256
附录五	普通螺栓的标准直径及螺纹处的有效截面积	257
附录六	梁的整体稳定系数	258
附录七	轴心受压构件的稳定系数	262
附录八	组合截面回转半径近似值	266
附录九	矩形弹性薄板弯矩系数	267
附录十	轴套材料及混凝土承压容许应力	270
附录十一	钢闸门自重(G)估算公式	271
附录十二	材料的摩擦系数	273
参考文献		274

第一章 绪 论

第一节 钢 结 构 的 特 点

钢结构在国外工程结构领域已经得到了广泛的应用。在欧洲、美洲、日本、韩国及我国台湾地区等地，钢结构用量已占到钢材产量的40%以上。新中国成立以来，随着钢产量的不断提高，我国钢结构行业得到迅速发展。2009年，我国钢结构用钢量约占全国钢产量的4%，与世界经济发达国家相比还有较大差距，发达国家钢结构用量一般占钢材产量的10%左右，这说明我国钢结构产业有着较大的应用领域和发展空间。预期到2020年前，我国钢结构行业将以每年10%以上的速度增长。

钢结构是用钢板、热轧型钢或冷加工成型的薄壁型钢制造而成的，和其他材料的结构相比，钢结构有如下一些特点：

1. 材料的强度高，塑性韧性好

钢材和其他建筑材料诸如混凝土、砖石和木材相比，强度要高得多。因此，特别适用于跨度大或荷载很大的构件和结构。钢材还具有塑性和韧性好的特点。塑性好，结构在一般条件下不会因超载而突然断裂；韧性好，结构对动力荷载的适应性强。良好的吸能能力和延性还使钢结构具有优越的抗震性能。

2. 材质均匀，符合力学计算假定

钢材内部组织比较接近于匀质和各向同性体，而且在一定的应力幅度内几乎是完全弹性的。因此，钢结构的实际受力情况和工程力学计算结果比较符合。钢材在冶炼和轧制过程中质量可以严格控制，材质波动的范围小。

3. 制造简便，施工周期短

钢结构所用材料单一，加工比较方便，易于机械加工。因此，构件可由专业化的金属结构厂制作，精确度较高。构件在工地拼装，可以采用普通螺栓和高强度螺栓，也可以在地面拼装和焊接成较大的单元再进行吊装，以缩短施工周期。

4. 钢结构的质量轻

钢材的密度虽比混凝土等建筑材料大，但钢结构却比钢筋混凝土结构轻，原因是钢材的强度与密度之比要比混凝土大得多。以同样的跨度承受同样荷载，钢屋架的质量仅为钢筋混凝土屋架的1/3~1/4，冷弯薄壁型钢屋架甚至接近1/10，为吊装提供了方便条件。

5. 钢材耐腐蚀性差

钢材耐腐蚀性能比较差，必须对结构加以防护。这使维护费用比钢筋混凝土结构高。不过在无侵蚀性介质的一般厂房中，构件经过彻底除锈并涂上合格的油漆，锈蚀问题并不严重。近年来出现的耐大气腐蚀的钢材具有较好的抗锈性能，已经逐步推

广应用。

6. 钢材耐火性差

钢材长期经受 100°C 辐射热时, 强度没有多大变化, 具有一定的耐热性能, 但温度达 300°C 以上时, 钢的强度和弹性模量会显著下降, 达到 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 以上时, 钢材即失去承载能力。所以高温下工作的结构, 需要采用隔热层加以保护, 例如, 利用蛭石板、蛭石喷涂层或石膏板等加以防护。

第二节 钢结构的应用

钢结构目前在建筑领域中得到了广泛的应用。

1. 大跨度结构

结构跨度越大, 自重在全荷载中所占比重也就越大, 减轻自重可以获得明显的经济效益。因此, 钢结构强度高而质量轻的优点尤其适用于大跨结构。如大跨度公路钢桥——南京长江第三公路大桥, 如图 1-1 所示, 该桥已于 2006 年建成通车。大桥主跨为钢箱梁斜拉桥, 桥长 2938m, 桥面宽 38.2m, 主跨为 628m。主梁由 93 块钢箱梁现场悬吊、悬拼、焊接组成, 如图 1-2 所示。

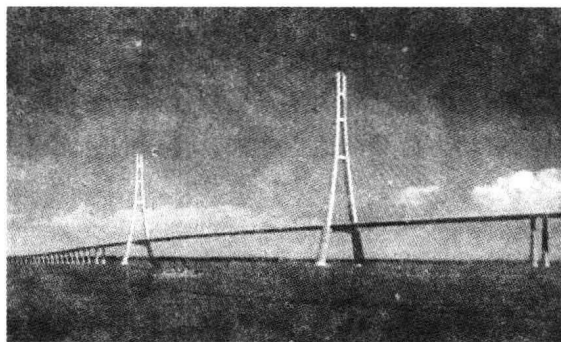


图 1-1 南京长江第三公路大桥效果图

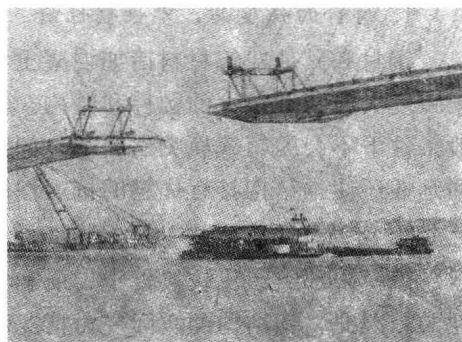


图 1-2 主跨钢箱梁吊装

2. 重型厂房结构

钢铁联合企业和重型机械制造业有许多车间属于重型厂房。所谓“重”, 就是车间里吊车的起重质量大 (常在 100t 以上), 且运行频繁 (24h 运转)。这些车间的主要承重骨架往往全部或部分采用钢结构。图 1-3 为在建的重型钢结构厂房。

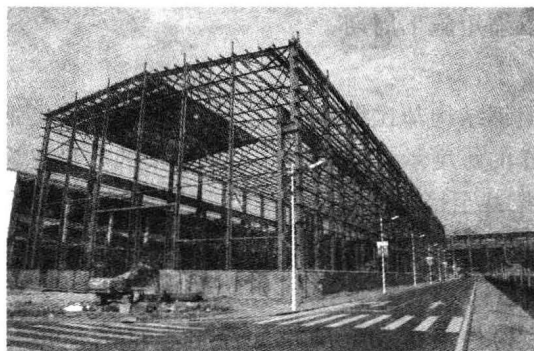


图 1-3 钢结构厂房

3. 承受动力荷载的结构

由于钢材具有良好的韧性, 设有较大锻锤或产生动力作用等其他设备的厂房, 即使屋架跨度不是很大, 也往往采用钢结构。对于抗震能力要求高的结构, 采用钢结构。

4. 可拆卸结构

钢结构不仅质量轻，还可以用螺栓或其他便于拆装的手段来连接。需要搬迁的结构，如建筑工地生产和生活用房的骨架，临时性展览馆等，钢结构最为适宜。钢筋混凝土结构施工用的模板支架，现在也趋向于用工具式的钢桁架。

5. 高耸结构和高层建筑

高耸结构包括塔架和桅杆结构，如高压输电线路的塔架、广播和电视发射用的塔架和桅杆等。

6. 容器和其他构筑物

用钢板焊成的容器具有密封和耐高压的特点，广泛用于冶金、石油、化工企业中，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、钻井和采油塔架，以及海上采油平台等其他钢构筑物。

7. 轻型钢结构

钢结构质量轻不仅对大跨结构有利，对荷载较小的小跨结构也有优越性。因为荷载较小时，结构的自重也就成了一个重要因素。冷弯薄壁型钢屋架在一定条件下的用钢量可以不超过钢筋混凝土屋架的用钢量，如图 1-4 所示。

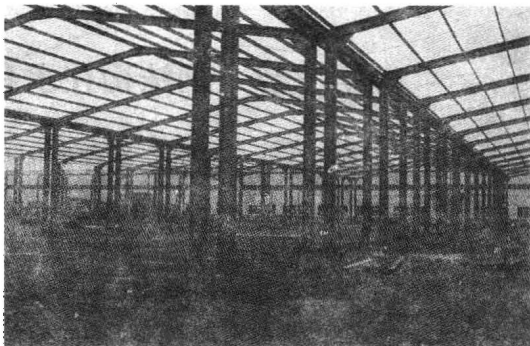


图 1-4 轻钢厂房

8. 新型空间钢结构

近 10 年来，我国建设了一批大型新型空间结构建筑，其建筑外形与计算方法与传统的建筑具有很大的区别，钢结构无疑成为了这类建筑的首选。具有代表性的建筑有国家体育场——鸟巢（图 1-5）、国家大剧院（图 1-6）、中央电视台新大楼（图 1-7）等。

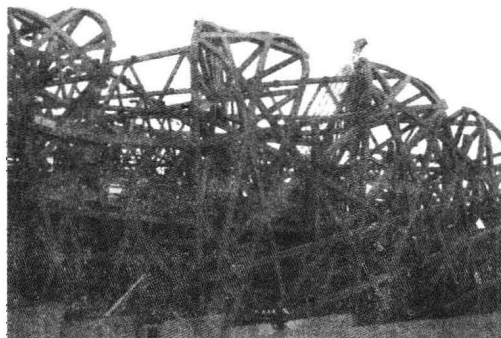


图 1-5 施工中的北京中国国家体育场

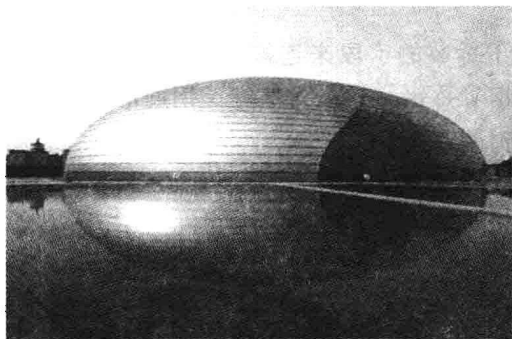


图 1-6 北京中国国家大剧院



图 1-7 施工中的北京中国中央电视台新大楼

第三节 钢结构在水利工程中的应用和发展

钢结构在水利、水电、水运、海洋采油等工程中的合理应用范围大致如下。

1. 活动式结构

例如水工中大量采用的钢闸门、阀门、拦污栅、船闸闸门、升船机和钢引桥等。对于这一类需要移动或转动的结构来说，可以充分发挥钢结构自重较轻的特点，从而能降低启闭设备的造价和运转所耗费的动力。

2. 装拆式结构

在水利工程中经常会遇到需要搬迁和周转使用的结构。例如施工用的钢栈桥，钢模板，装配式的混凝土搅拌楼，砂、石骨料的输送架等。这类结构充分发挥了钢结构自重较轻、便于运输和安装的特点。

3. 板结构

例如压力管道、囤斗、贮液罐、贮气罐等。用钢板制造的这类结构密封性好。三峡水利枢纽工程中的电厂进水压力钢管内径达 12.4m。

4. 高耸结构

如输电线路塔、微波塔、电视转播塔等。

5. 大跨度结构

如三峡水利枢纽升船机的承船厢，为钢质开口槽形结构。船厢有效长度为 120m，宽 18m，水深 3.5m，干舷高 0.8m，外形最大长度为 132m，宽 23m，高 10m。承船厢主体结构为梁格系统，可承载 30000kN（约 3000t）船舶过坝，为当今世界上最大的承船厢。

6. 海洋钢结构

海洋工程中的钻井、采油平台结构。海上采油固定钢平台，由采油平台、生活平台和烽火台所组成，中间由轻便的栈桥相连接。生活平台上设有多层的生活楼、直升机场和通信微波塔。采油平台下面有大容量的原油贮罐等。这类结构要承受平台上各种装置及机械设备的荷载以及风、浪和冰等动力荷载作用，这就发挥了钢材强度高、抗振性能好以及便于海上安装等特点。

随着我国经济建设的迅速发展和钢产量的不断提高，钢结构的应用也得到了更好的发

展。为更有效地使用钢材和节约钢材，水工钢结构的发展应主要考虑以下几个方面。

1. 合理使用材料

长期以来，钢结构传统地采用普通碳素结构钢，随着冶金工业的发展，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%，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。这类钢还具有某些特殊的性能，如抗蚀性、耐磨性及耐低温性等。如屈服点为 345N/mm^2 的Q345钢，就是在普通碳素钢——Q235（原3号钢，A3）钢化学成分中添加1.2%~1.6%的锰元素而成（原16锰钢，16Mn）。此后相继推出Q390钢（15MnV）和Q420钢（15MnVN）。这些新的钢材在工程实践中已有多年的应用，也是GB 50017—2003《钢结构设计规范》所推荐选用的。其经济效益比较Q235钢可节约15%~25%。

采用高强度低合金钢可以大大节约钢材，提高结构使用寿命，同时由于构件截面尺寸减小，还可以简化制造工艺，节约工时，有利于运输和安装，对于大跨度结构更显得有利。

为了合理利用材料，对于由稳定控制的构件，宜采用价格较低的普通碳素钢；对于由强度控制的构件，宜采用高强度低合金钢。同样，对于受弯构件，翼缘可以采用高强度的低合金钢，而腹板可采用普通碳素钢，这种构件称为异种钢构件。

对于不直接承受动力荷载的简支梁或连续梁，还可以采用钢与混凝土联合工作的组合梁。这种梁由钢筋混凝土作上翼缘，再由连接件与下部的钢梁连接成整体而共同作用。

2. 研究和推广使用抗腐蚀的耐候钢

耐候钢是在冶炼过程中加入少量的铜（Cu）、磷（P）、铬（Cr）、镍（Ni）等合金元素，当钢材在大气环境中遭受干湿交替时，其表面形成一层紧密的氧化膜来抑制钢材进一步腐蚀。这类钢称为耐候钢。碳素钢的耐蚀性较差，钢中含碳量增加会降低腐蚀性，含有硫也会降低耐蚀性。低合金钢（如Cu、Cr、Ni等总含量不超过5%者）或加入稀土（RE）元素也能提高耐蚀性。

3. 不断创新合理的结构形式

不断创新合理的结构形式是节约钢材的有效途径，例如采用钢管混凝土作受压构件（即在钢管内填入密实的混凝土），不仅混凝土受到钢管的约束而提高了抗压强度，同时由于管内混凝土的填充也提高了钢管抗压的稳定性。因而构件的承载能力大为提高，且具有良好的塑性和韧性，经济效益显著，它与钢柱相比，可节约钢材30%~50%，造价也相应降低。

预应力钢结构，也可以较大幅度地节约钢材（一般可节约钢材20%~40%）。例如在葛洲坝工程和三峡工程中，船闸人字钢闸门上均采用了预应力的门背斜拉杆，可以有效地防止当门扇在水中旋转时产生过度的挠曲和扭转变形。我国从20世纪50年代开始对预应力钢结构进行研究，已经在某些工程中采用了预应力钢结构，并收到节约钢材和降低造价的效果。所以预应力钢结构具有一定的发展前途。

4. 更新设计理论和计算方法

水工钢结构一直沿用容许应力设计方法。这种方法的优点是计算简便，可以满足正常的使用要求。但是，该方法的缺点是所给定的容许应力不能保证各种结构具有比较一致的

可靠度。例如恒载的估算要比活载的估算准确得多，若同一个结构所承受的恒载的比值很高，则其计算的可靠度就高，反之则低。因此，水工钢结构应研究以一次二阶矩概率论为基础的极限状态设计法。这一方法是 GB 50153—92《工程结构可靠度设计统一标准》中制订的设计准则。现行的 GB 50017—2003《钢结构设计规范》采用的也是这一方法。

水工钢闸门的结构计算，通常是将这样一个空间结构简化成若干个平面结构（如梁、柱、桁架、刚架等）来计算。这种计算方法没有考虑结构的整体性，其结果不能准确反映结构实际的工作性能。因此，也就不能充分合理地使用材料。我国从 20 世纪 50 年代以来，对钢闸门已经有按空间结构的计算方法。它是将整个闸门当作一个薄壁空间结构来考虑，这样可以计入面板和水平次梁在闸门整体弯曲中所起的弯曲作用，较真实地反映闸门的工作情况，而且还可以节约钢材。根据实践经验，对于大跨度的露顶闸门，按空间结构计算可省钢 10%~15%；然而，对于跨度较小的闸门，节约的效果没有大跨度的闸门显著，且计算过程比较繁琐，所以按空间结构计算并不适用。目前，计算机的发展已为钢闸门按空间结构计算提供了条件，同时还可以对结构进行优化设计。

5. 研究和推广钢结构的新型连接方法

如改进焊接工艺，提高焊接质量，采用二氧化碳气体保护焊、电渣焊，研究与高强度结构钢相匹配的高质量焊接材料，继续推广使用高强度螺栓连接方法等。其中，使用高强度螺栓连接是由于螺帽拧紧后，能使螺栓产生很大的预拉力，在被连接的板件之间产生很大的摩阻力来传递外力。这种连接具有较好的塑性和韧性，避免了焊接结构中存在的焊接应力和焊接变形等缺点。因此，它不仅安装迅速，而且承受动力荷载的性能也较好。

6. 研究和推行水工钢结构的标准化和系列化

推行水工钢结构的标准化和系列化，是缩短工期、降低成本、提高劳动生产率的有效措施。

第四节 本课程的性质、任务和学习方法

钢结构是结构工程中按照材料划分出来的一门学科。这门学科主要是建立在建筑材料、材料力学、结构力学和其他有关工程力学及工程实践知识的基础上。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和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。

本课程的任务是阐述常用的结构钢的工作性能、钢结构的连接设计、钢结构基本构件的设计原理，结合水利工程专业的要求讲述平面钢闸门的设计原理和方法，介绍弧形钢闸门，船闸人字门以及拦污栅的结构布置和特点，并简要介绍钢结构制作与安装的常见方法以及钢结构工程施工质量控制。通过对本课程的学习，应具备钢结构的基本知识，掌握正确的设计原理和方法，能够对钢梁、钢柱、钢桁架等基本构件以及平面钢闸门进行设计，并为设计其他类型的钢结构打下基础。

本课程是一门实践性很强的专业基础课，在学习的过程中应注意以下四个方面。

(1) 对基本原理和设计方法的精心领会。钢结构基本原理是设计的基础，只有对原理做到精心掌握，才能正确的指导设计。基本的设计方法是结构设计应遵循的规律，对各类

构件设计方法的熟练掌握是今后进行钢结构深化设计的基础。

(2) 注重对规范的严格遵守。本课程与现行的相关规范有着紧密的关系，实际工程的设计与施工都必须严格遵循国家相关规范和规程，因此，在课程学习过程中，应结合规范，逐渐养成严格遵守规范的良好设计习惯。

(3) 注重对构造要求的熟练掌握。本课程中的大量计算都是建立在相关的力学课程的基础上，但是又与纯粹的力学计算有着不同。作为设计型课程，计算的结果不仅仅要求符合力学原理，而且还要符合实际工程中的相关要求，比如是否适于操作，是否与实际情况相符等。因此，构造要求在本课程的一些内容中具有重要的地位，如何设计出既受力合理，又易于制造的结构需要我们在目前的学习和将来的实践中有很好的体会。

(4) 注重对实际工程进展的及时跟踪。随着材料科学、计算方法和制造工艺的不断进步，钢结构工程也在经历着飞速的发展，越来越多的新型结构体系得以实现，新的计算理论，新的加工制造工艺要求在学习的过程中，时刻关注钢结构技术的最前沿，不断地更新，这样才能跟上技术进步的脚步。

第二章 钢结构的材料

第一节 钢材的主要机械性能

一、钢结构对钢材的要求

要深入了解钢结构的特性，必须从钢结构的材料（钢材）开始，掌握钢材在各种应力状态、不同生产过程和不同使用条件下的工作性能，从而能够选择合适的钢材，不仅使结构安全可靠和满足使用要求，又能最大可能地节约钢材和降低造价。

钢结构对钢材的要求是多方面的，主要有以下几个方面：

(1) 有较高的强度。要求钢材的抗拉强度和屈服点比较高。屈服点高可以减小构件的截面，从而减轻重量，节约钢材，降低造价。抗拉强度高，可以增加结构的安全储备。

(2) 塑性好。塑性性能好，能使结构破坏前有较明显的变形，可以避免结构发生脆性破坏。塑性好可以调整局部高峰应力，使应力得到重分布，并提高构件的延性，从而提高结构的抗震能力。

(3) 冲击韧性好。冲击韧性好可提高结构抗动力荷载的能力，避免发生裂纹和脆性断裂。

(4) 冷加工性能好。钢材经常在常温下进行加工，冷加工性能好可保证钢材加工过程中不发生裂纹或脆断，不因加工对强度、塑性及韧性带来较大的影响。

(5) 可焊性好。钢材的可焊性好，是指在一定的工艺和构造条件下，钢材经过焊接后能够获得良好的性能。可焊性是衡量钢材的热加工性能。可焊性可分为施工上的可焊性和使用上的可焊性。施工上的可焊性是指在焊缝金属及近缝区产生裂纹的敏感性，近缝区钢材硬化的敏感性。可焊性好是指在一定的焊接工艺条件下，焊缝金属和近缝区钢材不产生裂纹。使用性能上的可焊性是指焊缝和焊接热影响区的力学性能不低于母材的力学性能。

(6) 耐久性好。耐久性是指钢结构的使用寿命。对钢材使用寿命的不利影响主要是钢材的耐腐蚀性较差，其次是在长期荷载、反复荷载和动力荷载作用下钢材力学性能的恶化。

上述(1)~(4)条为对钢材力学性能（机械性能）的要求，它的好坏影响钢材的可焊性。

二、钢材在单向均匀受拉时的工作性能

(一) 钢材的荷载—变形曲线

钢材在单向均匀受拉时的工作特性，通常是以静力拉伸试验的应力—应变（或荷载—变形）曲线来表示。图 2-1 表示低碳钢的荷载—变形曲线。图中横坐标为试件的伸长 Δl ，纵坐标为荷载 N 。从图中曲线可以看出，钢材的工作特性可以分成如下几个阶段。

1. 弹性阶段 (OE 段)

在曲线 OE 段, 钢材处于弹性阶段, 亦即荷载增加时变形也增加, 荷载降到零时 (完全卸载) 则变形也降到零 (回到原点)。其中 OE 段是一条斜直线, 荷载与伸长成正比, 符合虎克定律。A 点的荷载为比例极限荷载 (N_p), 相应的应力为比例极限 σ_p ($\sigma_p = N_p/A$, A 为试件横截面积)。E 点的荷载为弹性极限荷载 (N_e), 相应的应力为弹性极限 σ_e ($\sigma_e = N_e/A$)。

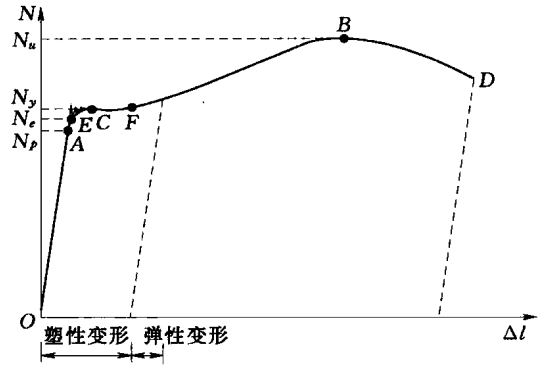


图 2-1 钢材的荷载—变形曲线

2. 屈服阶段 (ECF 段)

当荷载超过 N_e (应力超过弹性极限 σ_e) 后, 荷载与变形不成正比关系, 变形增加很快, 随后进入屈服平台循环曲线, 呈锯齿形波动, 甚至出现荷载不增加而变形仍在继续发展的现象。这个阶段称之为屈服阶段。此时钢材的内部组织纯铁体晶粒产生滑移。

试件除弹性变形外, 还出现了塑性变形。卸载后试件不能完全恢复原来的长度。卸载后能消失的变形称弹性变形, 而不能消失的这一部分变形称残余变形 (或塑性变形)。屈服阶段曲线上波动, 屈服荷载 N_y 取波动部分的最低值 (下限), 相应的应力称屈服点或流限, 用符号 f_y 表示。屈服阶段从开始 (图 2-1 中 E 点) 到曲线再度上升 (图 2-1 中 F 点) 的变形范围较大, 相应的应变幅度称为流幅。流幅越大, 说明钢材的塑性越好。屈服点和流幅是钢材的很重要的两个力学性能指标, 前者是表示钢材强度的指标, 而后者则表示钢材塑性变形的指标。

3. 强化阶段 (FB 段)

屈服阶段之后, 钢材内部晶粒重新排列, 并能抵抗更大的荷载, 但此时钢材的弹性并没有完全恢复, 塑性特性非常明显, 这个阶段称为强化阶段。对应于 B 点的荷载 N_u 是试件所能承受的最大荷载, 称极限荷载, 相应的应力为抗拉强度或极限强度, 用符号 f_u 表示。

4. 颈缩阶段 (BD 段)

当荷载到达极限强度 N_u 时, 在试件材料质量较差处, 截面出现横向收缩, 截面面积开始显著缩小, 塑性变形迅速增大, 这种现象叫颈缩现象。此时, 荷载不断降低, 变形却延续发展, 直至 D 点试件断裂。颈缩现象的出现和颈缩的程度以及与 D 点上相应的塑性变形是反应钢材塑性性能的重要标志。

图 2-2 所示曲线是 Q235 钢在常温下静力拉伸试验的结果, 图 2-2 (b) 是图 2-2 (a) 的局部放大。对于钢结构采用的其他钢号 (如低合金钢) 也都具有这个工作性能。图 2-3 表示低碳钢、低合金钢在单向拉伸时的应力—应变曲线。从图 2-2 和图 2-3 可以得出几点极为重要的钢材的工作特性:

(1) 由于比例极限、弹性极限和屈服点很接近, 而在屈服点之前的应变又很小 ($\epsilon_y < 15\%$), 所以在计算钢结构时可以认为钢材的弹性工作阶段以屈服点为上限。当应力达到屈服点后, 将使结构产生很大的、在使用上不允许的残余变形。因此, 在设计时取屈服点为钢材可以达到的最大应力。

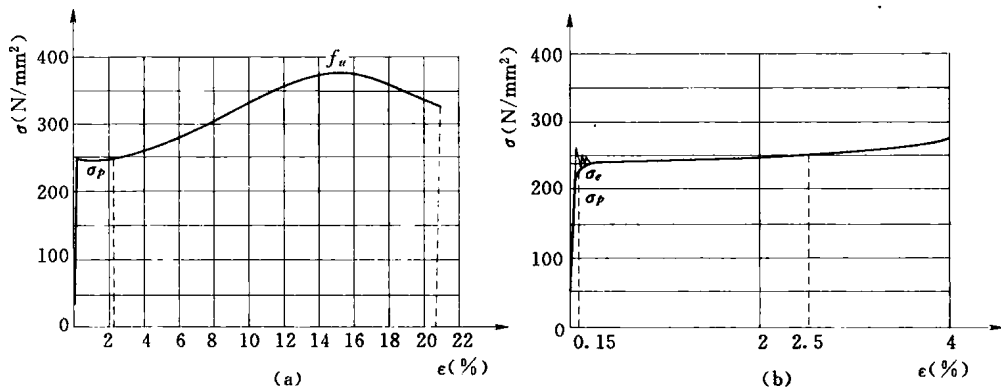


图 2-2 Q235 钢在单向均匀受拉时的工作性能

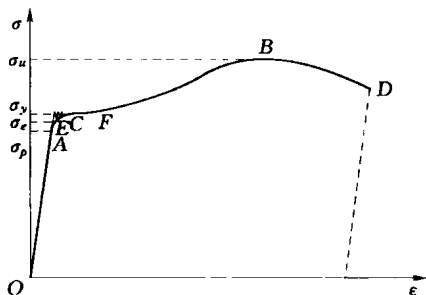


图 2-3 结构用钢的单向拉伸曲线

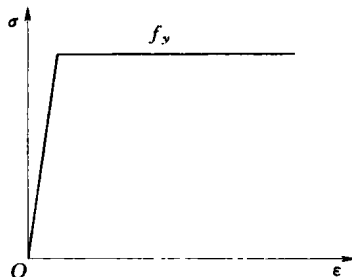


图 2-4 结构用钢的 σ - ϵ 曲线

(2) 钢材在屈服点之前的性质接近理想的弹性体，屈服点之后的流幅现象又接近理想的塑性体，并且流幅的范围 ($\epsilon \approx 0.15\% \sim 2.5\%$) 已足够用来考虑结构或构件的塑性变形的发展，因此可以认为钢材是符合理想的弹性—塑性材料，如图 2-4 所示。这就为进一步发展钢结构的计算理论提供了基础。

(3) 钢材破坏前的塑性变形很大，差不多等于弹性变形的 200 倍。这说明结构在破坏之前将出现很大的变形，容易及时发现和采取适当的补救措施，不致引起严重的后果。

(4) 抗拉强度 f_u 是钢材破坏前能够承受的最大应力。虽然在达到这个应力时，钢材已由于产生很大的塑性变形而失去使用性能，但是抗拉强度 f_u 高则可增加结构的安全保障，因此屈强比 (f_y/f_u) 可以看作是衡量钢材强度储备的一个系数。屈强比愈低，钢材的安全储备愈大。

(二) 钢材的塑性

钢材的塑性一般是指当应力超过屈服点后，能产生显著的残余变形（塑性变形）而不立即断裂的性质。衡量钢材塑性好坏的主要指标是伸长率 δ 和截面收缩率 ψ 。伸长率 δ 是应力—应变曲线中的最大应变值，等于试件（图 2-5）拉断后的原标距间长度的伸长值和原标距比值的百分率。伸长率 δ 与原标距长度 l_0 和试件

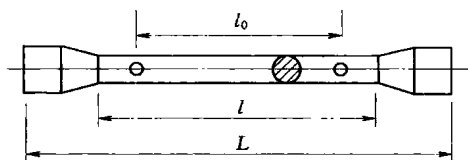


图 2-5 拉伸试件