

钢结构

王珊 主编



中国建材工业出版社

TU391
W241

钢 结 构

王 珊 主编



中国建材工业出版社

1990/21

(京)新登字 177 号

内 容 提 要

本书按照高等院校建筑学专业、钢结构课教学大纲编写。全书包括：绪论，钢结构材料，设计方法，连接，轴心受力构件，梁，偏心受力构件，多层，高层建筑钢结构，钢屋盖等章节。按照《钢结构设计规范》(GBJ 17—88)编写。本书可作为建筑学专业本科和大专学生教材，也可作为结构设计，施工技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构/王珊主编. —北京:中国建材工业出版社, 1997. 8
ISBN 7-80090-634-5

I. 钢… I. 王… II. 钢结构 N. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 17108 号

中国建材工业出版社出版 (北京海淀区三里河路 11 号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京密云红光印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18.25 字数: 435 千字

1997 年 8 月第 1 版 1997 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1—5000 册 定价: 29.5 元

ISBN 7-80090-634-5/TU · 141

前 言

本书是根据高等院校建筑学专业钢结构课教学大纲、并参照多年教学实践经验和工程实践经验,按照《钢结构设计规范》(GBJ 17-88)编写而成。本书可作为建筑学专业本科和大专学生教材;亦可作为从事钢结构设计,制作和施工工程技术人员参考。

本书力求在讲清基本理论的基础上,重点讲解基本公式的应用范围与条件,解决工程设计的实际问题。由于目前高层建筑钢结构较多,本书增设多层、高层建筑钢结构一章,使学生了解钢结构框架的设计方法和常用的节点构造。每章后面附有思考题和习题,通过例题和习题练习,使学生深刻理解和熟练掌握规范,熟悉钢结构设计程序和方法。

本书由王珊主编。其中第一,二,三,五,六,八章由王珊编写;第四章由王珊和瞿履谦合写;第七章由甄芳编写;第九章由徐占发编写。本书在编写过程中得到许多同志的帮助,在此表示感谢。

由于编者水平所限,书中不免会有缺点和错误,敬请读者批评指正。

编者 王珊

1997年2月

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	(1)
第三节 钢结构的发展概况	(2)
第四节 钢结构的设计基本要求	(4)
第二章 钢结构的材料	(5)
第一节 钢材的主要机械性能	(5)
第二节 决定和影响钢材性能的因素	(8)
第三节 钢材的断裂 防火和防腐	(12)
第四节 钢材的疲劳和疲劳计算	(13)
第五节 钢材的品种、代号和钢材选用	(17)
第六节 常用钢材规格	(19)
第三章 钢结构的设计方法	(23)
第一节 概率极限状态设计法的基本概念	(23)
第二节 一次二阶矩概率极限状态设计方法	(24)
第四章 钢结构的连接	(28)
第一节 钢结构的连接方法	(28)
第二节 焊缝连接	(31)
第三节 对接焊缝连接	(35)
第四节 角焊缝连接的型式与构造	(40)
第五节 角焊缝连接的计算	(45)
第六节 焊接残余应力和焊接残余变形	(57)
第七节 螺栓连接的构造	(63)
第八节 普通螺栓连接的计算	(66)
第九节 高强度螺栓连接	(77)
第五章 轴心受力构件	(93)
第一节 轴心受力构件的应用与截面	(93)
第二节 轴心受力构件的强度与刚度	(94)
第三节 轴心受压构件的整体稳定	(96)
第四节 轴心受压构件的局部稳定	(104)
第五节 实腹式轴心受压构件的截面设计	(107)
第六节 格构式轴心受压柱	(111)
第七节 轴心受压柱的柱头和柱脚	(120)

第六章 梁	(127)
第一节 梁的型式与应用	(127)
第二节 梁的强度与刚度	(128)
第三节 梁的整体稳定	(132)
第四节 型钢梁设计	(141)
第五节 焊接组合梁设计	(145)
第六节 梁的局部稳定	(152)
第七节 梁腹板加劲肋的设计	(158)
第八节 梁的拼接与连接	(162)
第七章 拉弯和压弯构件	(167)
第一节 概述	(167)
第二节 强度计算	(168)
第三节 实腹式压弯构件的整体稳定	(170)
第四节 实腹式压弯构件的局部稳定	(176)
第五节 压弯构件的计算长度	(179)
第六节 实腹式压弯构件的截面设计	(181)
第七节 格构式压弯构件	(184)
第八节 框架柱与梁和基础的连接	(187)
第八章 多层, 高层建筑钢结构	(195)
第一节 结构体系与布置	(195)
第二节 框架柱的计算长度	(198)
第三节 结构分析方法	(200)
第四节 框架梁柱截面与连接	(203)
第五节 高层建筑钢结构水平带状桁架设计	(208)
第六节 偏心支撑设计	(209)
第九章 钢屋盖结构设计	(214)
第一节 屋架形式和尺寸	(215)
第二节 屋架杆件的内力计算	(216)
第三节 屋架杆件的截面计算	(218)
第四节 钢屋架的支撑	(227)
第五节 普通钢屋架设计例题	(231)
附录一 钢材、焊缝、螺栓、混凝土的设计强度	(245)
附录二 计量单位的换算关系	(246)
附录三 型钢表	(247)
附录四 各种截面回转半径的近似值	(272)
附录五 轴心受压构件的稳定系数	(273)
附录六 柱的计算长度系数	(279)
附录七 疲劳计算的构件和连接分类	(283)

第一章 绪 论

第一节 钢结构的特点

由型钢和钢板等制成梁、柱等基本构件，再用焊缝，螺栓或铆钉将其连接成可承受各种荷载作用的几何不变体系称为钢结构。

钢结构与钢筋混凝土结构，木结构，砖石结构等都是工程结构。他们之间有许多共同性。例如在结构体系，内力分析等方面大体是类似的。由于所用材料性质不同，又具有各自的特殊性。例如构件计算方法，构件连接方式以及构造处理都有显著差别。

钢结构具有以下优缺点：

1. 材料强度高，结构重量轻

钢材强度较高，弹性模量也高。与混凝土和木材相比，其密度与屈服强度的比值相对较低，因而在同样受力条件下钢结构的构件截面小，自重轻，便于运输和安装，适于跨度大，高度高，承载重的结构。

2. 钢材韧性，塑性好，材质均匀，结构可靠性高

适于承受冲击和动力荷载，具有良好的抗震性能。钢材内部组织结构均匀，近于各向同性匀质体。钢结构的实际工作性能比较符合目前采用的计算理论。所以钢结构可靠性高。

3. 钢结构制造安装机械化程度高

钢结构构件便于在工厂制造、工地拼装。工厂机械化制造钢结构构件成品精度高、生产效率高、工地拼装速度快、工期短。钢结构是工业化程度最高的一种结构。

4. 钢结构密封性好

由于焊接结构可以做到完全密封，可以作成气密性，水密性均很好的高压容器，大型油罐，压力管道等。

5. 钢结构耐热不耐火

温度在 150°C 以下时，钢材性质变化很小。因而钢结构适用于热车间，但结构表面受 150°C 左右的热辐射时，要采用隔热板加以保护。温度在 300°C — 400°C 时，钢材强度和弹性模量均显著下降，温度在 600°C 左右时，钢材的强度趋于零。在有特殊防火要求的建筑中，钢结构必须采用耐火材料予以防护，提高结构的耐火等级。

6. 钢结构的耐腐蚀性差

特别是在潮湿和腐蚀性介质的环境中，容易锈蚀。一般钢结构要除锈、镀锌或涂料，且要定期维护。对处于海水中的海洋平台结构，需采用“锌块阳极保护”等特殊措施予以防腐蚀。

第二节 钢结构的应用

根据钢结构的特点，对于荷载，高度和跨度较大的结构，抗震要求较高的结构，可考虑采用钢结构，钢结构的合理应用范围大致如下：

1. 重工业厂房结构

用于重工业厂房的桁架、柱和吊车梁。例如冶金企业的炼钢，轧钢车间；重型机械厂的铸钢，水压机，锻压车间，电厂的锅炉框架结构，造船厂的船台车间，飞机制造厂的装配车间等，这些车间高度，跨度都较大，有重级工作制大吨位吊车或有振动设备。

2. 大跨度结构

用于飞机库。火车站，体育馆，大会堂，影剧院，展览厅等要求空间较大的重要性建筑。

3. 多层和高层建筑结构

用于工业建筑中的多层框架，如炼油塔架，锅炉框架。用于民用建筑中跨度较大的多层和高层框架，目前我国已建成多幢四、五十层的高层钢结构建筑。

4. 塔桅结构

用于高压输电线路铁塔，电视发射塔，无线电发射桅杆，化工排气塔，石油钻井塔架，火箭发射塔等。

5. 板壳结构

用于高压密封的压力容器和管道，如大型储液罐，储气罐，大直径输油（气）和输煤浆管道，水工压力管道，粮食筒仓以及炉体结构。核电站反应堆压力壳等。

6. 桥梁结构

用于大跨度的铁路和公路梁式桥梁，拱型桁架桥或悬索桥。

7. 移动式结构

用于水工闸门，各种起重机，如升船机，塔式起重机，龙门吊车，桥式吊车等，移动式采油平台以及装配式活动房屋。

8. 轻钢结构

用于跨度较小，屋面较轻的工业和商业用房，常采用冷弯薄壁型钢，小角钢，圆钢焊接而成的轻钢结构。

第三节 钢结构的发展概况

中国是最早用钢铁建造承重结构的国家。公元六十年左右（汉明帝时）开始在高山峡谷地区建造铁链桥，其中明朝时湖南的沅江桥，清朝时四川大渡河桥（泸定桥）最为著名。泸定桥建于1706年（康熙45年），净跨100m，宽2.7m共有13根铁链。每根重1.6t，铁链系于直径20cm长4m的铸铁锚桩上。在当时生产力条件下，在峡谷建造这样长的铁链桥表明我国古代劳动人民的勤劳和智慧。

中国古代除铁链桥外，尚有众多的观赏铁塔，至今尚存的有宋代（1061）湖北荆州玉泉寺铁塔，塔身高17.9m，共13层，由生铁铸造成；还有山东济宁铁塔寺铁塔和江苏镇江甘露寺铁塔等。

几个世纪以后的779年，英国用生铁建造了科尔布鲁克代尔（Coalbrookdale）肋拱桥，跨长30.5m。随着冶金技术的发展，出现了熟铁铆钉连接结构，1850年英国威尔士建造了麦奈海峡（Menais Straits）四跨连续箱型截面铁路桥，1889年法国建成巴黎埃菲尔铁塔（Eifel）高321m。19世纪60年代，发明了平炉和转炉炼钢才有了用钢建造的桥梁和高层建筑。如1931年美国建造了帝国大厦，高381m，102层。1974年在芝加哥建造了西尔斯（Sears）大厦，高440m，110层。是目前世界上最高的高层建筑。1981年建成的英国亨伯（Humber）吊桥，主跨为1410m是至今跨度最大的钢桥。正在建造的日本明石海峡吊桥，跨度为1990m，1974年在波兰华沙建成的长波发射桅杆，高645m共五层纤绳，是目前最高的结构物。1975年在美

国新奥尔良建成的直径 207m 的穹顶结构是世界上最大的穹顶之一。

中国古代在钢铁结构方面虽有卓越成就，但在封建制度束缚下，发展极其缓慢。在解放前近百年的半封建半殖民地历史条件下，更是发展艰难，虽然也建一些钢桥及建筑结构，但决大多数是外国人设计的。

新中国成立后，随着国家经济的飞速发展，在钢结构设计理论，结构制造，安装水平等方面都有了较快的发展。在钢结构桥梁，大跨度工业厂房，大型公共建筑和高耸结构，高层建筑等方面都有较多的应用。

在钢结构桥梁方面，自 1957 年建成武汉长江大桥以后，又建了多座大桥，如 1968 年建成的南京长江大桥，正桥长 1576m，采用了 16Mng 桥钢，160m×3 三跨连续桁架。1993 年建成的九江长江大桥，正桥长 1808.8m，为 15M_nV_q 钢，柔性拱加肋的桁架桥，最大跨度为 216m。如 1991 年建成的上海黄浦大桥，总长为 8346m，主桥为双塔双索面斜拉桥，主桥长 846m，主跨长 423m。

在工业建筑方面，鞍钢、武钢、宝钢等冶金联合企业的许多车间都采用钢结构厂房。如 1977 年建成的上海锅炉厂的重型容器车间，主跨 36m，高 40m 采用双层桥式吊车，上层为两台 400/80t 吊车。1996 年建成的首都大型客机检修库屋盖采用双跨 150m 的钢网架结构。

在公共建筑方面，采用大跨度的平板网架，悬索结构等。如 1975 年建成的上海体育馆，层盖为直径 110m 的三向网架，支撑在 36 根柱子上。1962 年建成的北京工人体育馆，层盖为圆形双层辐射式悬索结构直径 94m，中央钢环直径 16m，高 11m，上下两层各有 144 束钢索。

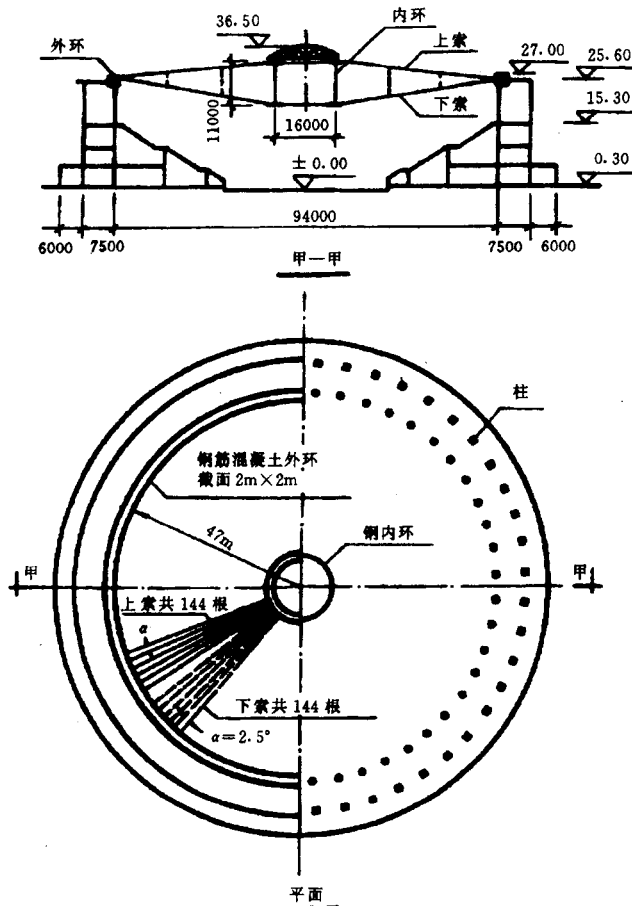


图 1-1 北京工人体育馆

是目前中国跨度最大的悬索层盖如图 1-1。

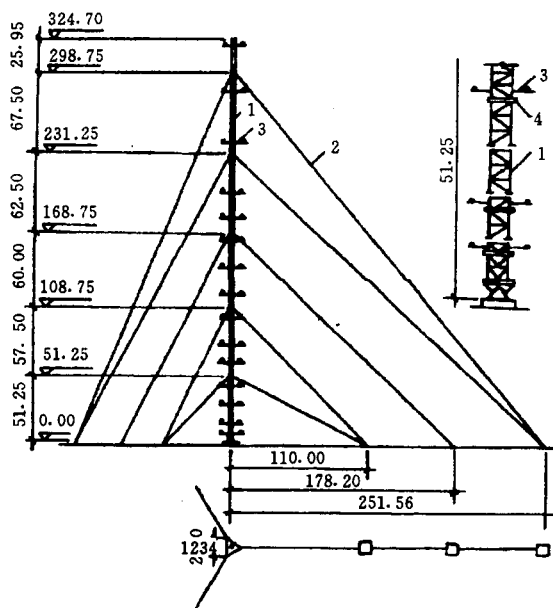


图 1-2 北京环境气象塔

1990 年建成的亚运会综合馆,屋盖为斜拉索双坡曲面组合屋盖。屋脊长度 115.8m,截面 $1.8 \times 1.8\text{m}$ 的纵向箱型钢梁,支撑在两个空心钢筋混凝土塔筒上,钢梁中部有四排(每排 3 根)斜拉索吊于东西塔顶,横向跨度 70m。纵向框架柱距 6.6m,桁架高度 3.3m。

近几年来,在上海,深圳,北京建成十几栋钢结构高层建筑,其中最高的一栋为 1989 年建成的京广大厦,框架剪力墙结构,高 208m,地上 53 层,地下 3 层。

用钢结构建成的塔桅结构也较多,如 1989 年建成的大庆电视塔高度 260m(塔架 160m,天线桅杆 100m)塔形为六边形空间桁架结构。1977 年建成的北京环境气象塔,高 325m,有 5 层纤绳的桅杆结构,杆身截面三角形,边宽 2.7m 是目前我国最高的桅杆结构。(图 1-2)

在石油开发和城市建设中,建了不少大型油气储罐及筒仓等。1987 年在秦皇岛建成两座 10 万 m^3 储油罐。在北京建造的利浦钢板筒式粮仓,高 20m,直径 10m。

随着国民经济的发展与科技进步,我国将建造更多的大跨度、高层钢结构建筑。予应力结构,型钢混凝土结构,应用范围日益扩大。薄壁型钢尤其是压型钢板组合结构,近年来得到相当快地发展。随着钢结构计算理论。如钢结构的塑性设计,优化设计以及在动力荷载下的动力稳定问题的研究发展,结构的可靠性更高,还可对现在使用的钢结构进行可靠性评估,以及结构剩余寿命进行估算,达到减灾防灾的目的。

第四节 钢结构设计的基本要求

钢结构类型主要有:用于厂房的排架结构、用于多高层建筑的框架结构、框架—剪力墙结构、框—筒结构,用于大空间的平板网架结构和穹顶网壳结构等等。建筑功能不同,采用的结构形式也不同。钢结构设计要执行国家的技术规范,做到技术先进、经济合理、安全实用、确保质量。因此在结构设计中要注意以下要求:

1. 首先根据建筑功能要求,采用相应合理的结构体系。做到技术先进、结构新颖、达到建筑和结构的完美统一。
2. 钢结构(除容器外)多以杆件为主,故杆件尺寸尽可能模数化、标准化,便于机械化制造、运输、安装、提高生产率。
3. 采用具有较高经济指标的高效钢材。
4. 钢结构的节点是至关重要的,要采用适当的连接方式,使节点设计与结构计算简化模型相一致。以往的结构破坏绝大多数发生在节点,所以对节点要精心设计,精心施工,采用先进的、可靠的连接方法。

第二章 钢结构的材料

钢结构在使用过程中会受到各种形式的作用（荷载、基础不均匀沉降、温度等），所以要求钢材应具有良好的机械性能（强度、塑性、韧性）和加工性能（冷热加工和焊接性能），以保证结构安全可靠。钢材的种类很多，符合钢结构要求的只是少数几种，如碳素钢中的 Q235，低合金钢中的 16Mn，用于高强螺栓的 20 锰钒钢（20MnV）等。

第一节 钢材的主要机械性能

钢材的机械性能通常指钢厂供应钢材时，所提供的强度、伸长率、冷弯和冲击韧性等各种性能。

一、钢材在单向均匀拉力作用下的性能

钢材的拉伸实验，用规定形式和尺寸的标准试件，在常温 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 条件下，按规定的加载速度在拉力试验机上进行。用于 $x-y$ 函数记录仪记录试件的应力——应变曲线。图 2-1 是 Q235 钢的典型应力——应变曲线，纵坐标为应力 $\sigma = N/A$ ，横坐标为应变 $\epsilon = \Delta L/L_0$ （ $\Delta L_0/L$ 分别为试件的标距长度和标距长度的伸长量）

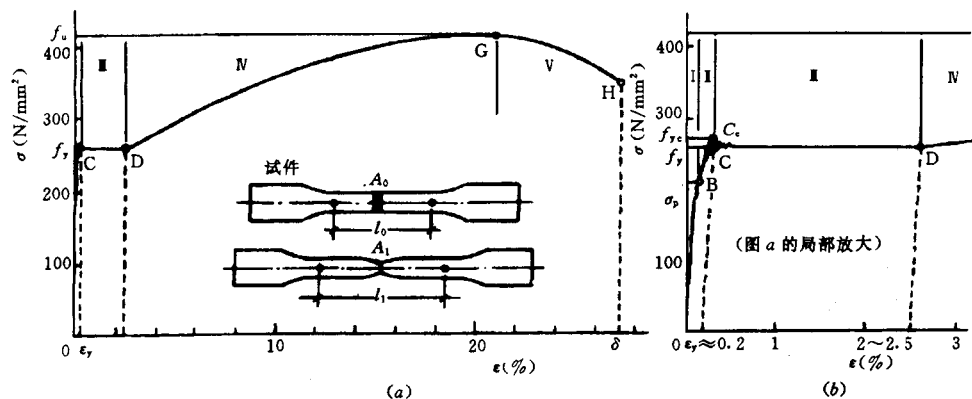


图 2-1 碳素结构钢静力拉伸曲线 (Q235 钢)

1—弹性阶段；2—弹塑性阶段；3—屈服阶段；4—强化阶段；5—颈缩阶段

1. 弹性阶段 (OB 段)

钢材处于弹性阶段，即应力与应变呈线性关系 $\sigma = E \cdot \epsilon$ ， E 为该直线段的斜率也称为钢材的弹性模量， $E = 2.06 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 。B 点的应力 σ_p 称为比例极限（弹性极限）。

2. 弹塑性阶段 (BC 段)

当施加的应力 $\sigma > \sigma_p$ 大于弹性极限后，钢材的应力应变呈曲线关系。这时钢材的变形包括弹性和塑性两部分，其中塑性变形在卸载后不再恢复。在塑性阶段变形增长率比应力快，曲线上任一点的切线斜率为该点的切线模量 $E_t = d\sigma/d\epsilon$ ，切线模量随应变增加而降低，直到应力

达到屈服强度为止（曲线上C点）

3. 屈服阶段（CD段）

当施加的应力超过C点后，曲线呈屈服平台。钢材的应力不再增大，而在某一确定值 f_y （屈服强度）附近上下波动。应变却在持续增长，即变形模量为零。钢材呈屈服状态，相应的应变幅度称为流幅，钢材屈服时其应力上限 f_{yu} 称为上屈服点，其应力下限 f_{yd} 称为下屈服点。

4. 强化阶段（DG段）

钢材经历了屈服阶段的变形后，内部晶粒重新排列，又恢复了继续承载的能力。应力—应变曲线呈上升趋势，直至达到G点，此阶段称为钢材的强化阶段。G点的应力 σ_u 称作钢材的抗拉强度（极限强度）。

5. 颈缩阶段（GH段）

当试件应力超过 σ_u 以后，在承载力最薄弱的截面处，横截面急剧收缩，塑性变形迅速增加，荷载下降直到拉断的过程叫做颈缩阶段。

上述五个阶段是低碳钢单向拉伸实验 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线的典型特征，说明低碳钢具有理想的弹性。而高碳钢单向拉伸实验则没有明显的屈服阶段。

在工程实践中，钢材具有两种性质完全不同的破坏形式，一种呈塑性破坏，另一种呈脆性破坏。

塑性破坏是构件在破坏前有较大的塑性变形，断裂后断口呈纤维状，色泽发暗。由于破坏前有明显的变形，容易及时发现及采取措施，减少损失。脆性破坏是构件在破坏前变形很小，破坏前没有任何预兆，破坏突然发生，断口平直呈光泽的晶粒状。由于脆性破坏突然，没有预兆，故经济损失严重，在设计与施工时要特别注意预防脆性破坏。

二、钢材的基本性能

设计钢结构时，要根据结构的性质适当的选用钢材和指标保证项目。下面分别叙述钢材的各项基本机械性能

1. 强度

钢材的强度指标由弹性极限 σ_e ，屈服极限 σ_y 和抗拉极限 σ_u ，设计时以钢材的屈服强度为基础，屈服强度高可以减轻结构的自重，节省钢材，降低造价。抗拉强度 σ_u 是钢材破坏前所能承受的最大应力，此时的结构因塑性变形很大而失去使用性能，但结构变形大而不垮，满足结构抵抗罕遇地震时的要求。 σ_u/σ_y 值的大小，可以看作钢材强度储备的参数。

2. 塑性

钢材的塑性一般指应力超过屈服点后，具有显著的塑性变形而不断裂的性质。衡量钢材塑性变形能力的主要指标是伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 。

伸长率 δ 是应力—应变曲线的最大应变值，等于试件拉断后，原标距间长度的伸长值与原标距比值的百分率。一般以 $l_0/d_0 = 5$ 为标准试件。此时的伸长率 δ_5 按下式计算：

$$\delta_5 = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中： l_0 ——试件原标距长度；

d_0 ——试件标距长度内的直径（板件试件取等效直径 $d_0 = \sqrt{4A_0/\pi}$ ）；

l_1 ——试件拉断后标距间的长度。

断面的颈缩率是指试件拉断后，颈缩的断面面积缩小值与原截面积比值的百分率，按下式计算：

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (2-2)$$

式中： A_0 ——试件标准断面的面积；

A_1 ——试件拉断后颈缩区的断面面积。

需要指出，在图 2-1 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线中，应力是按原截面计算的名义应力 $\sigma = F/A_0$ 。由于在拉伸过程中，试件截面逐渐变小，则截面实际应力 $\sigma' = F/A_1$ 比名义应力 σ 大，当钢材屈服后，差别更为显著，试件出现颈缩阶段时，颈缩截面上应力比名义应力大得多，可达 10 倍以上。颈缩阶段曲线是下降的，但实际应力是增大的，直至试件拉断。

3. 冷弯性能

钢材的冷弯性能是衡量钢材在常温下弯曲加工产生塑性变形时对产生裂纹的抵抗能力。钢材的冷弯性能是用冷弯实验来检验钢材承受规定弯曲程度的弯曲变形性能。

图 2-2 是冷弯实验示意图，用直径为 d 的冲头加压，当试件弯曲一规定角度 α （一般 $\alpha=180^\circ$ ）时，检查弯曲部分的外侧，如无裂纹、分层现象，则认为冷弯性能合格。

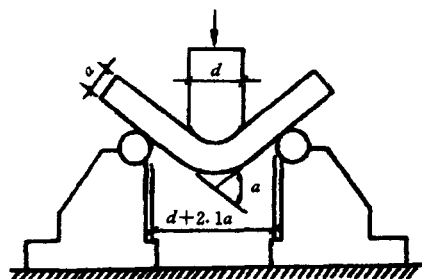


图 2-2 钢材冷弯试验示意图

冷弯试验不但是检查钢材的冷加工能力，而且还能显示钢材内部缺陷（如分层、夹渣等）状况，冷弯性能是检验钢材在复杂应力状态下塑性变形能力的一种综合指标。

4. 冲击韧性

钢材的冲击韧性是指钢材在冲击荷载作用下，断裂过程中吸收机械动能的一种能力，是衡量钢材抵抗冲击荷载作用，可能因低温、应力集中，而导致脆性断裂的一项机械性能。一般通过标准试件的冲击试验来获得钢材的冲击韧性指标。

标准试件有 V 型缺口试件和 U 型缺口试件两种。试件截面积为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ ，长度为 55mm ，中间开 V 型槽或 U 型槽，放在摆锤式冲击试验机上进行试验。（图 2-3）试件断裂后，可以从试验机的度盘上读出冲击功 A_k ，除以试件缺口处净截面 A_j 所得值为该种钢材的冲击韧性值 $A_{kv} = A_k/A_j$ ，单位为 J/mm^2 （即 $\text{N} \cdot \text{m}/\text{mm}^2$ ）

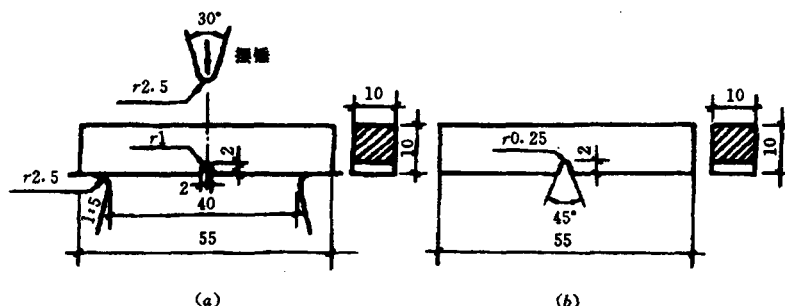


图 2-3 钢材冲击韧性试验示意图

(a) U 形缺口试件 (b) V 形缺口试件

我国规定钢材的冲击韧性用 V 型试件通过冲击试验获得，对于碳素钢（国家标准 GBJ 17-88）Q235A 级钢不做冲击试验，Q235B, C, D，分别要求 20°C ， 0°C ， -20°C 的冲击韧性，对于低合金钢（国家标准 GBJ1591-88）分别要求 20°C ， -20°C ， -40°C 的冲击韧性值。

钢材的冲击韧性不但与钢材质量，缺口形状，加载温度有关，而且受温度影响较大。负温时，钢材的冲击韧性较低。钢结构的脆性断裂，常常在材料内部缺陷处（裂纹、缺口）的应力集中点开始。冲击韧性值是用带有 V 型缺口的试件获取。

5. 焊接性能。钢材的焊接性能是指在一定的焊接工艺条件下，获得性能良好的焊接接头。焊接性能可分为焊接过程中的焊接性能和使用性能上的焊接性能两种。焊接过程中的焊接性能是指焊接过程中焊缝及焊缝附近金属不产生热裂纹或冷却不产生冷却收缩裂纹的敏感性。

焊接性能好，是指在一定焊接工艺条件下，焊缝金属和附近母材均不产生裂纹。使用性能上的焊接性能是指焊缝处的冲击韧性和热影响区内延性性能，要求焊缝及热影响区内钢材的力学性能不低于母材的力学性能。我国采用焊接过程的焊接性能试验方法，也采用使用性质上的焊接性能试验方法。

6. 耐久性。影响钢材耐久性的因素很多。首先是钢材的耐腐蚀性差，必须采取防护措施，防止钢材腐蚀生锈。防护措施有：定期对钢材油漆维护，采用镀锌钢材，在有酸，碱，盐等强腐蚀介质条件下，采用特殊防护措施，如海洋平台结构采用“阳极保护”措施防止导管架腐蚀，在导管架上固定上锌锭，海水电解质会自动先腐蚀锌锭，从而达到保护钢导管架的功能。其次由于钢材在高温和长期荷载作用下，其破坏强度比短期强度降低较多，故对长期高温作用下的钢材，要测定持久强度。钢材随时间推移会自动变硬、变脆、即“时效”现象。对低温荷载作用下的钢材要检验其冲击韧性。

第二节 决定和影响钢材性能的因素

决定钢材性能的主要因素是钢材的化学成分及其金相组织结构，同时与钢材的冶炼、浇注、轧制等生产工艺过程也有密切关系。另外，钢结构的制造、受力状况、工作环境等对钢材的性能也有重要影响。下面分别分析主要因素影响。

一、化学成分的影响

钢材的主要化学成分是铁元素（Fe 在普通碳素钢中占 99% 左右），此外，还有碳元素 C，锰元素 Mn 和硅元素 Si 等有利元素，以及在冶炼过程中难以除尽的硫 S、磷 P、氧 O、氢 H 等有害杂质元素。在合金钢中还特意加入一些合金元素（Mn、Si、V）以改善钢材的性能。碳、锰、硅以及硫、磷等元素虽然含量少，但对钢材的性能影响极大。

碳是除铁以外最主要的元素。其对钢材的强度，塑性，韧性及焊接性能有决定的影响。随着碳元素的增加，钢材的抗拉强度和屈服强度提高，但塑性、冷弯性能、韧性、特别是低温冲击韧性降低，焊接性能也变差，同时钢材的耐腐蚀性能和疲劳强度也明显下降。钢结构的钢材不但要有较高的强度，还要有良好的塑性，韧性和较好的可焊性。所以结构钢材的碳含量不宜过高，通常不超过 0.22%，在焊接钢结构中应限制在 0.20% 以下。

锰元素（Mn）是一种弱脱氧剂，锰、铁与碳的化合物能溶解于纯铁体和渗碳体中，有强化纯铁体和珠光体的双重作用，是一种有效的合金元素。锰还可以提高钢材的屈服强度和抗拉强度，显著改善钢材的冷脆倾向，降低硫、氧对钢材的热脆影响，改善钢材的热加工性能，同时不显著降低塑性和冲击韧性。锰可以与硫形成熔点高（约 1600℃ 远高于钢材的一般加工温度），塑性好的硫化锰 MnS ，因而消除部分硫的有害作用。在普通碳素钢中，锰含量限制在 0.3—0.8%，在低合金钢中，含量限制在 1.2—1.6% 之间，锰合金过多会使钢材变硬变

脆，并降低钢材的耐腐蚀和可焊性。

硅元素(Si)是一种较强的脱氧剂。硅在铁液中形成无数结晶中心可使纯铁体的晶粒细化而且分布均匀，适量的硅可有效地提高钢材的强度而对其塑性、冷弯性能、冲击性能、可焊性能无明显的不良影响。在碳素钢中含量不超过0.3%，低合金钢中含量限制在0.6%以内。过高硅含量将降低钢材的塑性、韧性、抗锈性和可焊性。

钒元素(V)是低合金钢中的一种合金元素。可以细化钢材晶粒结构而提高钢材的屈服强度和抗拉强度。钒的化合物稳定，使钢的高温硬度提高，15MnV钢是在16Mn钢基础上加入适量的钒(0.04—0.12%)而熔炼成强度较高的低合金钢。

硫元素(S)是一种有害元素。硫与铁的化合成硫化铁(FeS)散布在纯铁体的层间中，当温度在800—1200℃时熔化而使钢材出现热裂纹，且易脆断。称为热脆现象。使钢材的焊接性能和热加工性能变坏，硫还会降低钢材的塑性和冲击韧性。硫在纯铁体中，以层状存在，易使厚钢材产生层状撕裂。因而限制硫的含量，其极限含量为0.05%。

磷元素(P)也是一种有害元素。磷与铁体结成不稳定的固溶体，增大纯铁体的晶粒结构。磷的存在可提高钢材的强度和抗锈性，但严重降低钢材的塑性、冷弯性能、冲击韧性和可焊性。特别是在低温下，钢材易产生低温脆断，称为冷脆现象。所以磷元素含量严格限制在0.045%以内。

氧氮都是有害元素，因容易从铁液中逸出，故含量甚少。氧的作用与硫类似，增大钢的热脆性，其含量要小于0.05%。氮的作用同磷类似，能显著降低钢材的塑性和冲击韧性。冷弯性能和焊接性能，特别是增大钢材的冷脆性，故其含量控制在0.008%以下。

二、冶炼 浇注 轧制过程的影响

我国目前结构用钢主要由平炉和氧气转炉冶炼，氧气转炉又分为顶吹氧和侧吹氧转炉。电炉炼钢成本较高，故较少用于钢结构。

平炉和顶吹氧气转炉炼钢化学成分稳定、质量接近。侧吹碱性转炉炼钢硫磷含量偏高，一般不用于承重结构中。

冶炼的钢液由脱氧程度不同分为沸腾钢、半镇静钢、镇静钢和特殊镇静钢。

1. 沸腾钢

以锰为脱氧剂加入钢罐内的钢液中脱氧。锰是弱脱氧剂，脱氧不充分，当钢液铸锭时，钢液中仍有相当多的氧、氮和一氧化碳等气体逸出，致使钢液表面剧烈沸腾，故称为沸腾钢。沸腾钢铸锭冷却快，溶于钢液中的气体来不及全部逸出，而形成气泡包在钢锭中，还有硫、磷等杂质分布不均匀，出现局部富集现象称谓偏析现象。这些缺陷使钢材力学性能降低，且易使钢材产生分层破坏。但是沸腾钢生产工艺简单，价格便宜，质量能满足一般承重结构的要求。

2. 镇静钢

在钢液中加入强脱氧剂硅、铝等进行脱氧。一般来说硅是锰脱氧能力的5倍，铝是锰脱氧能力的90倍。在钢液中加入适量的硅，大部分氮与硅化合成稳定的氮化硅，脱氧充分。氧化还原反应产生的热量较多，钢液冷却慢，气体容易逸出。在钢锭模内凝固时，钢液表面没有沸腾现象，而平静地冷却成型，故称为镇静钢。这种钢材材质均匀、晶粒结构细密、杂质少、偏析小，与沸腾钢相比，其强度高、塑性好、冲击韧性好、可焊性好。镇静钢要加入一定量的硅钛等强氧化剂，生产工艺过程复杂。冷却后钢锭头部缩凹，而需要切除的部分较多(切头率达20%)，故而价格较高。一般只用在承受冲击荷载，在低温条件下工作的重要性结构中。

3. 半镇静钢

是在钢液中加入少量强脱氧剂，质量价格介于沸腾钢于镇静钢之间。

4. 特殊镇静钢

是在硅脱氧后，再用铝或钛等强脱氧剂进行补充脱氧。进一步减少钢液中的氧化物，且与氮化合成非常细小晶粒的氮化铝或氮化钛，能明显地改善钢材的各种性能。尤其是提高钢的焊接性能。如 Q235-D 和 16 锰桥钢 (16Mnq) 等特殊镇静钢。

钢锭轧制成型材，把钢锭加热 1200—1300℃ 在轧机上反复轧，压成不同尺寸的板材型钢和线材。热轧不只改变了钢材的形状，而且改变钢材的内部组织结构排列，使钢具有良好的塑性和锻压性能。在压力作用下，消除铸造中的小气泡，质地疏松部分被锻焊在一起。使金属组织更加致密，消除铸造显微组织缺陷以及细化钢的晶粒，所以轧制钢材比铸钢质量好。实践证明，轧制的小型钢材其强度高，塑性、冲击韧性也较好，这是因为小型钢材轧制的次数多，轧制压缩比大等原因。且顺轧制方向的力学性能比横向（垂直）的力学性能要好。

三、温度影响

钢材的力学性能随温度的不同而有所变化，图 2-4 所示。温度在 150℃ 以下时，钢材的强

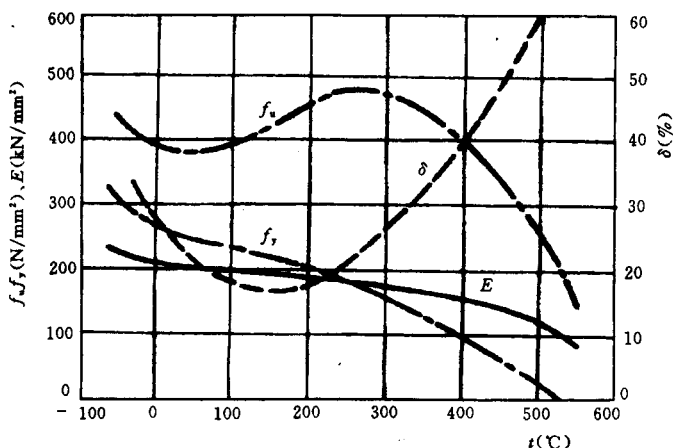


图 2-4 温度对钢材机械性能的影响

度和弹性模量变化不大。当温度在 250℃ 时，钢材的抗拉强度上升达到最大值，塑性、冲击韧性下降。钢材表面氧化膜呈兰色，故称之为兰脆现象。如果在此温度范围内对钢材进行加工，易产生脆性断裂。当温度超过 300℃ 时，钢材的屈服强度、抗拉强度和弹性模量均下降。而塑性增加，当温度超过 400℃ 时，强度和弹性模量急剧下降，到 600℃ 时，其强度和弹性模量趋于零，而完全丧失承载能力。

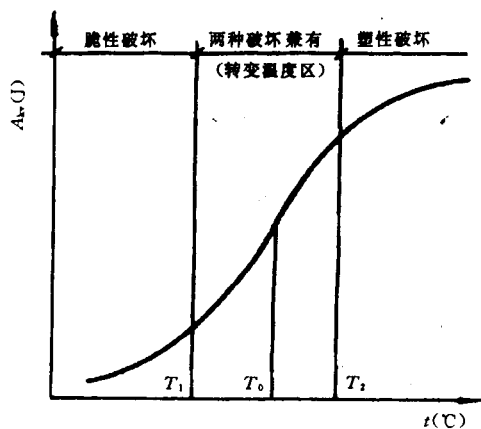


图 2-5 低温对钢材冲击韧性的影响

当温度下降，特别是在负温度范围内，钢材的强度升高，塑性、韧性降低，脆性增大。图 2-5 是钢材冲击韧性与温度关系示意曲线、温度 $T > T_2$ 时，试件能承受较高的冲击功。温度 $T < T_1$ 时，试件承受较低的冲击功。表明钢材

冲击韧性随温度变化不敏感。当温度 $T_1 < T < T_2$ 时, 曲线急剧变化, 表明钢材的冲击韧性随温度变化很大。 $T_2 - T_1$ 温度是钢材由塑性破坏转为脆性破坏的转变温度区段。其间曲线的反弯点所对应的温度 T 。称为钢材的脆性转变温度。每种钢材的脆性转变温度区需通过大量试验点统计得出。

四、时效和冷加工影响

钢材随时间推移屈服强度和抗拉强度提高。塑性、冲击韧性降低的现象, 称为时效硬化。其物理原因是因纯铁体中残存的少量氮的固溶物质, 随时间增长, 从纯铁体中逐渐析出, 形成自由的氮化物微粒, 散布在晶粒间的滑移面上, 阻碍纯铁体晶粒间滑移的原故。

热轧钢材堆放在仓库中, 经过一段时间, 其强度提高的现象称为自然时效。人工时效是先使钢材产生 10% 的塑性变形, 再加热到 250°C 左右, 保温 1 小时 ($250^{\circ}\text{C} \cdot \text{小时}$) 冷却到室温, 做成试件进行拉伸试验。其强度大为提高。图 2-6 (a)

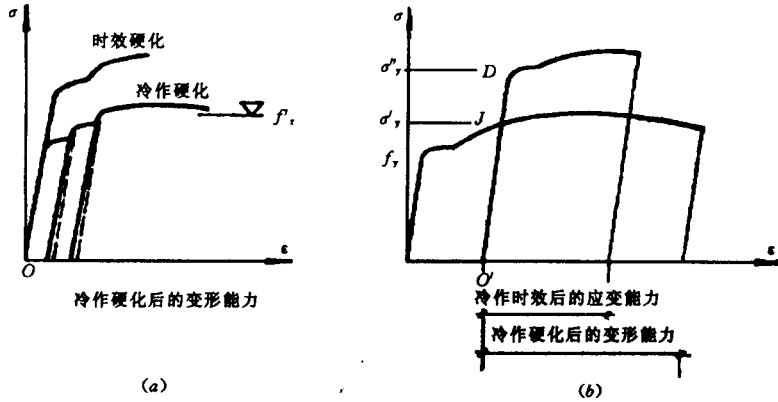


图 2-6 钢材的硬化

钢材在弹性阶段, 重复加卸荷作用, 钢材性能不变化。但在塑性阶段, 重复加卸荷载将改变钢材的性能。图 2-6(b) 钢材重复加载应力—应变曲线表明。第一次加载到应变硬化阶段 J 点, 卸荷至 o' 点, 经过一段时间再加荷载曲线沿 $o'JD$ 变化, 表明钢材的屈服强度提高, 塑性降低, 这一现象成为冷加工(冷作)硬化或应变硬化。钢材经过冷拉、冷拔、冲孔、剪切等冷加工作用超过钢材的弹性范围, 因而产生冷作硬化。强度虽有提高, 但塑性降低、脆性增加。对承受动力荷载的钢结构是相当不利的。钢结构设计中一般不利用冷作硬化和时效提高的强度。

五、应力集中影响

轴心受力试件截面应力是均匀分布的。实际上结构构件中常有孔洞、裂纹、缺口等缺陷, 使构件截面突然改变。在荷载作用下, 截面突变处的孔洞边缘或裂纹尖端处产生局部应力高峰, 其余部位应力较低, 这种现象称为应力集中。截面高峰应力与平均应力(轴心受力作用时)的比值称为应力集中系数, 其值表明应力集中程度, 取决于截面突变的程度。图 2-7 表明, 圆孔边缘应力集中系数为 5, 椭圆孔边缘应力系数达 10 左右, 从圆孔、椭圆孔到裂纹端部, 应力集中是逐步增大的, 裂纹尖端应力集中达 20 以上。

在应力集中的高峰应力区内, 通常存在着二维或三维拉应力, 容易导致构件脆性断裂。所以设计构件时应尽量表面光滑, 避免构件截面突变, 减少应力集中, 从构造上防止构件脆性破坏。