

网
结
构
设
计
原
理

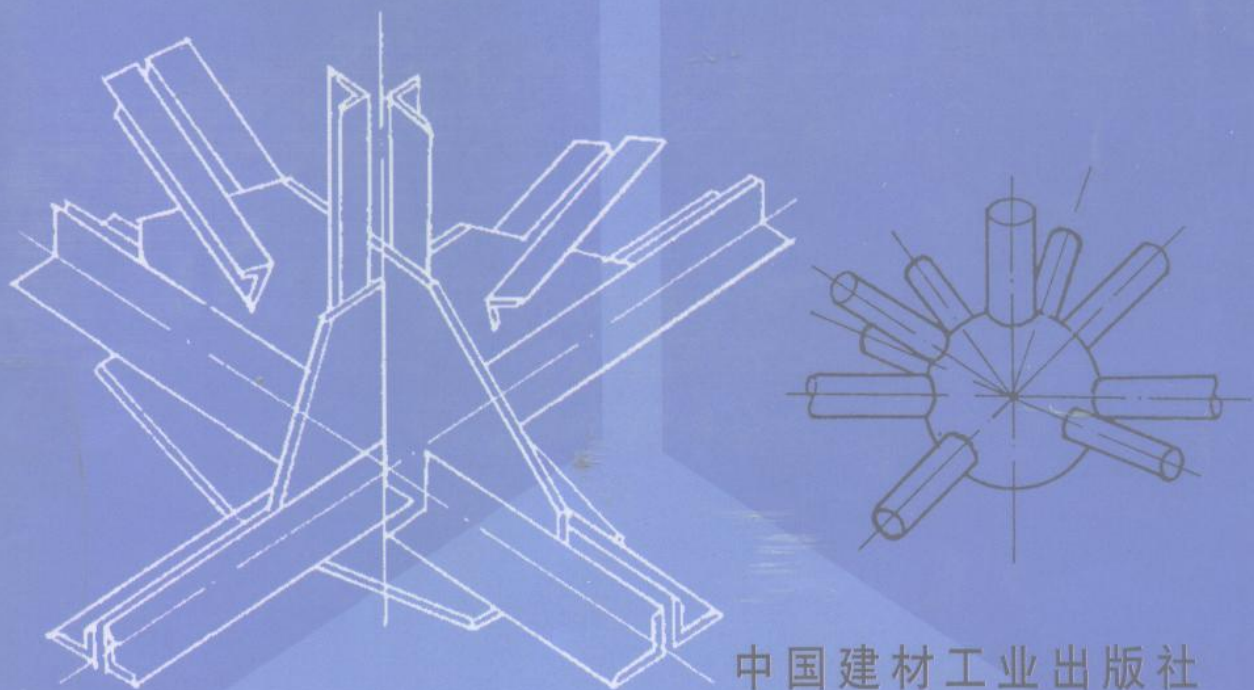
高等院校土木工程专业系列教材
GAODENG YUANXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE XILIE JIAOCAI

钢 结 构

主 编：吴建有
副主编：赵 欣 贾绍平
主 审：吴建有

设 计 原 理

g a n g j i e g o u s h e j i y u a n l i



中国建材工业出版社

中国建

TU39-43

社

高等院校土木工程专业系列教材

钢结构设计原理

主 编 吴建有
副主编 赵 欣 贾绍平
主 审 吴建有

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢结构设计原理/吴建有主编. -北京: 中国建材工业出版社, 2000. 7

ISBN 7-80159-021-X

I. 钢… II. 吴… III. 钢结构-结构设计

IV. TU391.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 34820 号

内 容 提 要

本书是为高等学校新的土木工程专业学生初学钢结构原理与设计而编写的。书中重点介绍了钢结构材料基本性能、钢结构设计方法、钢结构连接方法及钢结构基本构件计算,较详细地介绍了钢结构工程中常用的屋盖钢结构、平台钢结构、框架钢结构、单层厂房钢结构的构造组成、设计方法及构造要求。

本书主要适用于普通高等学校、成人高校土木工程专业的教学,也可作为继续教育的培训教材。对从事实际工作的工程技术人员和管理人员,也是非常有益的专业参考书。

2/27/09

钢结构设计原理

主编 吴建有

*

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: 18.75 插页: 1 字数: 436 千字

2000 年 7 月第一版 2000 年 7 月第一次印刷

印数: 1-3000 册 定价: 28.00 元

ISBN 7-80159-021-X/TU·018

土木工程专业系列教材编辑委员会

主 任：窦远明

副 主 任：姜忻良 许炳权

委 员：（按姓氏笔划排列）

王立久 王铁成 史三元 戎 贤 许炳权

刘春原 朱赛鸿 吴建有 陆培毅 杨春风

苏幼坡 赵方冉 姜忻良 阎西康 窦远明

潘延龄 魏连雨

秘 书：刘春原 阎西康

顾 问：陈 环 顾晓鲁 黄世昌 陈章洪 崔冠英

前 言

随着国家经济建设的发展和 21 世纪国家建设对专业人才的需求,我国近期对高等教育专业设置进行了较大幅度的调整,其中新设置的土木工程专业取代了过去的建筑工程、交通土建工程等四个相近专业。根据国家教育部门的安排,全国各高校从 1999 年起按新专业目录进行新生录取工作。建设部专业指导委员会也于 1999 年初下达了新土木工程专业的课程设置指导意见。比较而言,土木工程专业较过去各专业覆盖面要广泛得多,涵盖了原来近 8 个专业的内容,因此新专业的教学计划、课程内容调整以及新教材的编写就成为当前一项较为紧迫的任务。为适应这一形势的要求,河北工业大学、天津大学、天津城市建设学院等院校经过充分协商和研究,本着“探索、科学、先进”的原则和符合“大土木”的专业要求,联合编写了一套系列教材,由中国建材工业出版社出版并向全国发行。

参加本书编写的有河北工业大学的赵欣(第四、五章)、天津城市建设学院的贾绍平(第一、七、八章)、天津城市建设学院的张卓(第二、三章)、天津市房管局职工大学的李建国(第六章)、河北工业大学的张小鹏(第九章)。全书由吴建有、赵欣统稿。限于编者的理论水平和实践经验,书中不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

2000 年 6 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 钢结构的特点.....	(1)
第二节 钢结构的发展和应用.....	(2)
第二章 钢结构的材料	(7)
第一节 钢材的主要机械性能.....	(7)
第二节 钢材在复杂应力状态下的工作.....	(9)
第三节 影响钢材性能的各种因素	(10)
第四节 钢材的疲劳	(13)
第五节 钢材的种类	(16)
第六节 钢材的规格	(18)
第三章 钢结构的设计方法	(21)
第一节 概述	(21)
第二节 概率极限状态设计法	(22)
第四章 钢结构连接	(25)
第一节 连接方法及其特点	(25)
第二节 焊接及其连接的型式	(27)
第三节 对接焊缝及其连接的构造和计算	(30)
第四节 角焊缝及其连接的构造和计算	(34)
第五节 焊接残余应力和焊接残余变形	(48)
第六节 普通螺栓连接的构造和计算	(51)
第七节 高强度螺栓连接的计算	(64)
第八节 有孔洞削弱的构件净截面强度	(71)
第五章 构件的强度刚度和稳定	(75)
第一节 轴心受力构件的强度和刚度	(75)
第二节 轴心受压构件的整体稳定	(76)
第三节 受弯构件的强度和刚度	(86)
第四节 受弯构件的整体稳定	(91)
第五节 拉弯和压弯构件的强度和刚度	(95)
第六节 压弯构件的稳定	(98)
第七节 实腹式构件的局部稳定.....	(102)
第六章 屋盖钢结构	(115)
第一节 钢屋盖结构布置.....	(115)
第二节 钢屋盖的支撑系统.....	(116)

第三节	普通钢屋架设计	(123)
第四节	檩条、天窗架、托架	(141)
第五节	普通钢屋架设计例题	(154)
第七章	平台钢结构	(167)
第一节	概述	(167)
第二节	平台铺板	(168)
第三节	平台梁	(169)
第四节	平台柱	(186)
第五节	平台结构连接节点构造	(197)
第八章	框架钢结构	(199)
第一节	框架钢结构体系	(199)
第二节	等截面框架柱的设计	(202)
第三节	框架的梁柱连接节点构造与计算	(210)
第九章	钢结构单层厂房	(217)
第一节	钢结构单层厂房的组成	(217)
第二节	钢结构单层厂房的整体布置	(219)
第三节	钢结构单层厂房支撑体系和墙架	(221)
第四节	钢结构单层厂房的横向平面框架	(225)
第五节	吊车梁	(233)
附录		(248)
附录一	钢材及连接强度设计值	(248)
附录二	型钢表	(252)
附录三	梁的整体稳定系数	(276)
附录四	各种截面回转半径的近似值	(279)
附录五	轴心受压构件的稳定系数	(281)
附录六	柱的计算长度系数	(285)
附录七	疲劳计算的构件和连接分类	(289)
附录八	螺栓规格	(291)
参考文献		(292)

第一章 绪 论

第一节 钢结构的特点

钢结构是由钢构件制成的工程结构。构件与构件之间用焊接、螺栓或铆钉连接，与其他结构形式诸如钢筋混凝土结构、木结构和砖石等砌体结构相比钢结构在结构形式、构件的计算方法、连接的计算与构造处理等方面，都有显著的特点。钢结构内在的特性是由其原材料及构件的加工过程决定的，学习钢结构要注意它的特殊点。

钢结构具有下列特点：

一、强度高、重量轻

钢材与其他材料相比，强度要高得多，在同样的荷载条件下，钢结构构件截面小，自重轻。例如在跨度和荷载都相同时，普通钢屋架的重量只有钢筋混凝土屋架的 $1/4\sim 1/3$ 。一般的钢筋混凝土高楼，典型楼层的自重约为 $12\sim 10\text{kN/m}^2$ ，而钢结构高楼的楼层自重约为 $8\sim 10\text{kN/m}^2$ ，后者约比前者减轻自重 30% 以上，相应的地震作用也大大减小。构件重量轻也便于运输和安装。

二、材质均匀、可靠性高

钢材在冶炼和轧制过程中，质量得到严格的控制，材质波动的范围很小，钢材组织均匀，接近于各向同性，其实际工作性能与结构计算理论符合较好，所以其可靠性较高。

三、塑性、韧性好

建筑工程中钢结构所选用的钢材都具有良好的塑性，在拉力的作用下，应力—应变曲线有明显的屈服点和一段屈服平台，然后进入强化阶段。结构在一般工作条件下，不会因超载而突然断裂。钢材的塑性性能在一定条件下是可以利用的。比如，简支梁可以容许塑性在弯矩最大截面上发展，连续梁和框架的塑性设计方法，容许在结构中出现塑性铰以及继之而来的内力重分布。建筑结构钢材还具有一定的韧性。因此，有动力作用的重要结构经常用钢材来做。钢材拉伸图所包含的面积反映了试件拉断时所吸收的能量。它的大小是材料韧性的指标，对于建筑结构所选用的低碳钢和高强度低合金钢，韧性分别是 83 和 103MNm/m^3 ，这些数字是混凝土无法比拟的。钢筋混凝土结构要做成延性很好的框架，就需要增加配筋量，这使它在造价上无法与钢框架竞争。

四、工业化程度高

钢结构的构件是用各种轧制型材（工字钢、槽钢、角钢、钢板）经切割、焊接等工序制造而成。构件采用工厂制造，采用机械化程度高的专业化生产，有严格的工艺要求，制造精确度高，制造周期短。

五、安装方便、施工期短

构件在工地拼装，可以采用安设简便的普通螺栓。然后进行焊接或用高强螺栓连接。还可以在地面先拼装或焊成较大的吊装单元再行吊装，施工速度快，工期短，建筑物提早投

人使用，能尽快地发挥投资的效益。

六、密闭性好

焊接的钢结构可以做到完全密闭，适宜建造气密性和水密性要求较高的气罐、油罐和高压容器。

七、耐热性较好、耐火性差

当辐射热低于 100℃时，即使长期作用，钢材的主要性能变化很小，其屈服点和弹性模量均降低不多。温度在 250℃时，强度逐渐下降，达到 450~650℃时，强度为零。无保护层的钢柱耐火极限为 0.25h，达 150℃以上或在短时间内可能受到火焰作用时，应采取有效的防护措施（如加隔热层或水套等）。

八、耐腐蚀性差

钢材在潮湿和有侵蚀性介质的环境中容易锈蚀。目前防锈蚀的主要手段为在钢材表面彻底除锈后涂防锈漆，但需定时维修，后期的维护费用较高。现在有一种喷涂新工艺，即在严格清洗除锈的基础上喷铝或锌，其防锈寿命可达 20~30 年。在日本、美国等发达国家抗腐蚀、无须喷涂防锈漆的耐候性钢材得到了越来越多的应用。

第二节 钢结构的发展和应用

钢结构的发展与人类钢铁冶炼技术及社会发展的需要、材料试验技术、工程力学及结构理论的发展紧密相连。中国是最早用铁建造结构的国家之一。我国早期的钢结构主要是铁链桥和铁塔，时间上比欧洲最早的铁链桥早 70 余年。随后由于生产力发展缓慢，钢铁冶炼技术远远落后于欧洲。1855 年英国人亨利·贝斯麦（Henry Bessemer）首先炼成底吹酸性转炉钢，1865 年法国人西门式—马丁（Siemens—Martin）的平炉冶炼法将含碳量少的废钢和含碳量高的生铁成功地冶炼成含碳量适中，质量优良的钢种，为钢结构的蓬勃发展提供了前提条件。以下例举一些现存的在钢结构发展史上有代表意义的钢结构建筑。

1. 967 年（五代南汉） 广州寺东铁塔，共 7 层，塔身高 6.35m。

2. 1061 年（宋） 玉泉寺铁塔位于湖北当阳，该塔共 13 层，塔高 17.9m，塔身由生铁铸成，每层分别浇铸，留榫槽，逐层彼此连接而成为整体。

3. 1465 年~1487 年 霁虹桥位于云南省永平县与保山县之间，跨越澜沧江，净跨 53.7m，宽 3.7m，底部承重铁链 16 根（现存 14 根）。

4. 1779 年 英国塞佛恩（Severn）河上的肋拱桥，是首次以铁作为结构材料用于大跨度的结构物。跨长约 31m。

5. 1851 年 伦敦的水晶宫（Crystal Palace）是为伦敦第一届世界博览会所建的第一座铁框架单层建筑物。长 563m，宽 124m，工期为 4 个月，结构用铁量：3500 吨铸铁和 530 吨熟铁。

6. 1889 年 法国巴黎埃菲尔（Eiffel）铁塔，建成时高 300m（现总高 321m），用熟铁建成。堪称法国的象征。

7. 1974 年 美国芝加哥西尔斯大厦（Sears Building），全钢结构，109 层，445m 高，结构用钢量 76000 吨，主体工程仅用 15 个月即告完成。

8. 1998 年 中国上海浦东新区的金茂大厦见图 1-1 至屋顶板高度 420m，为中华第一

高楼,地上 88 层,地下 3 层,中间为钢筋混凝土核心筒,四周为钢结构框架,结构用钢量 18000 吨。

钢结构在我国的应用一直受国民经济发展情况及钢产量的制约。1949 年全国的钢产量只有十几万吨,1992 年达 8000 万吨,1996 年达一亿吨,位居世界第一。但相对于我们这样一个发展中的大国,钢材仍显短缺,目前在工业与民用建筑方面,钢结构的应用范围如下:

一、大跨度结构

比较其它建筑材料的结构,钢结构轻质高强,结构形式灵活多样(有梁、桁架、框架、拱、壳、空间网架、悬索等),跨度越大,无效荷载(结构自重)所占比例小的特点就越加明显。当跨度超过一定程度时,其它结构材料就难以胜任了。在桥梁方面,钢结构得到较多的应用。例如,1968 年建成南京长江大桥,为铁路公路两用双层桥,钢梁共 10 孔,其中有 9 孔为 $3\text{m} \times 160\text{m}$ 之跨连续桁架,采用了 16Mnq 低合金钢。另 1991 年建成的跨越黄浦江的上海市南浦大桥,总长 8346m,主桥为双塔双索面斜拉桥,全长 846m,采用钢梁与钢筋混凝土板相结合的组合梁结构,中跨跨长 423m,是我国已建跨度最大的斜拉桥。

在大跨屋盖结构方面的应用有平面桁架,平板型网架,悬索屋盖等等,被广泛应用于重型机械制造厂房、大型飞机、造船、火力发电厂厂房、大型仓库、影剧院等的屋盖承重结构,目前我国的梯形钢屋架的跨度已达 72m,如图 1-2。

平板网架通常由平行弦桁架交叉组成或由三角锥、四角锥、六角锥的锥体单元组成的空间网架结构。在节点力的作用下,相交于节点的各项桁架共同受力,空间刚度大且为无推力结构、支承于周边的柱子或圈梁上,可不设边桁架。图 1-3 为 1975 年建成的上海体育馆屋盖结构,采用直径为 110m(包括悬挑为 125m)的三向网架,支撑于 36 根柱上。网架采用直径为 48~150mm 的圆钢管,节点为焊接球节点,球直径多为 400mm。图 1-4 所示为常见的网架焊接球节点、角钢及钢板节点。

悬索结构是以受拉的钢索作为主要承重构件。悬索结构的应用始于一千多年前的铁链桥,随着材料、计算理论、施工技术的不断进步,悬索结构也被广泛地应用于屋盖结构,以满足日益增长的建造大跨度房屋的实际需要。

钢索通常由钢绞线、钢丝绳、钢丝束或圆钢筋、带状薄钢板制成,由于钢材高强轻质、截面通常小而薄,使压、弯杆件由于稳定问题不能充分发挥材料的强度。钢索只受轴向拉

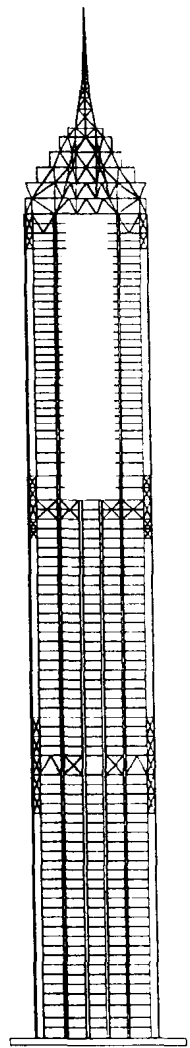


图 1-1 金茂大厦

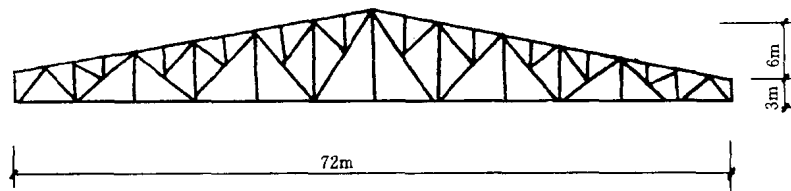
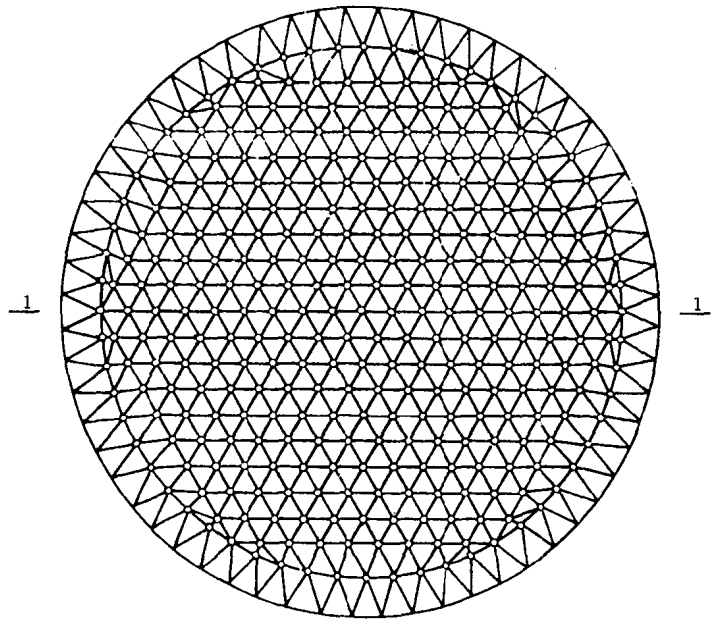


图 1-2 梯形屋架



网架平面布置图

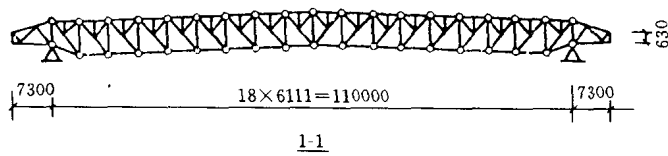


图 1-3 上海体育馆

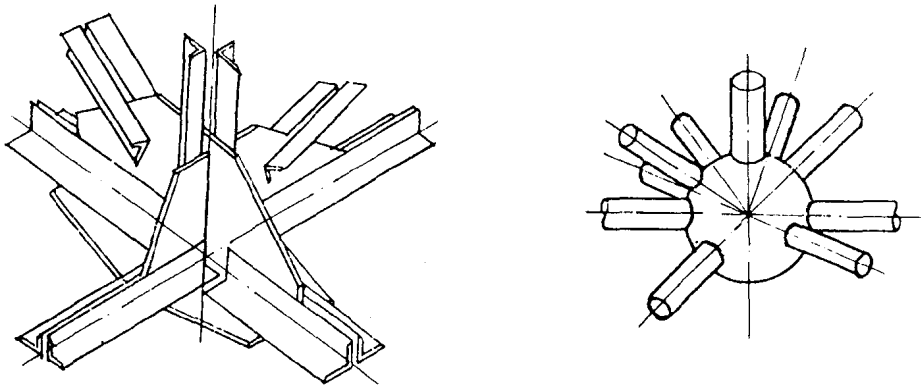


图 1-4 网架结点

力，无弯矩和剪力，使得高强钢材在这里大有用武之地。

图 1-5 为 1962 年建成的北京工人体育馆，比赛大厅直径 94m，可以容纳一万五千名观众。屋盖采用圆形双层辐射式悬索结构，上层索直接承受屋面荷载，为稳定索。通过中央钢内环将荷载传给下承重索，同时使上、下层钢索同时张紧，以增强屋盖刚度。中央钢环

直径 16m，高 11m。钢索采用钢绞线制成，外环为钢筋混凝土环梁，截面尺寸 2m×2m，支承于外层圆形截面的钢筋混凝土框架柱上，共 48 根。在上、下钢索的作用下，中央钢环及外钢筋混凝土环梁将分别承受环向拉力和环向压力。

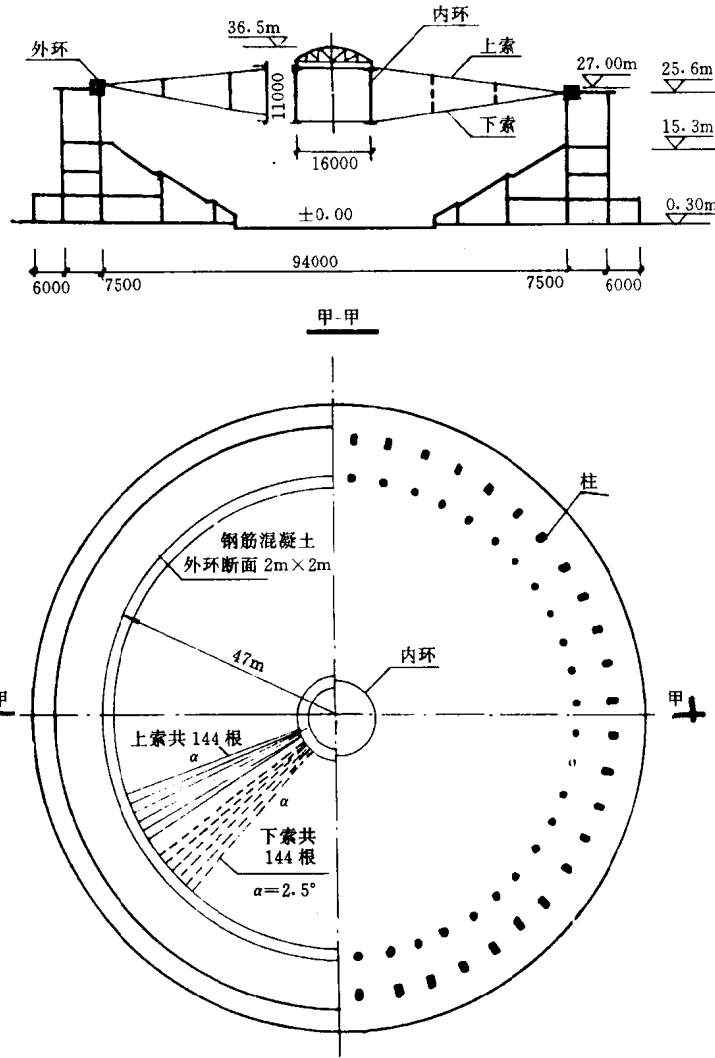


图 1-5 北京工人体育馆

二、高层建筑的骨架

钢结构以其优越的性能在高层、超高层建筑中担当着重要角色，至 1998 年末，我国已建成的 300m 以上的建筑有 3 座，其中 2 座为钢框架加钢筋混凝土或劲性混凝土核心筒结构。高层钢结构的结构形式多样，以满足不同建筑高度的承载要求。

三、重型厂房结构

大型钢铁企业的炼钢、轧钢、无缝钢管等厂房和重型机械厂、发电厂的锅炉车间等均属重型工业厂房，随着生产的发展、技术的进步，厂房更高大，对柱距和跨度的要求更宽。吊车吨位不断加大。比如，炼钢厂浇铸车间有的吊车吨位达 440 吨，在这里钢结构的轻质高强、耐高温、韧性好、耐冲击荷载等优点就得以充分的发挥。

四、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。轻型钢结构重量轻、方便运输，结构整体刚度好。

五、塔桅结构

输电线路塔、广播电视塔、石油钻井架、高耸的烟囱塔架等常采用钢结构。图 1-6 为 1989 年建成高为 260m 的大庆电视塔。

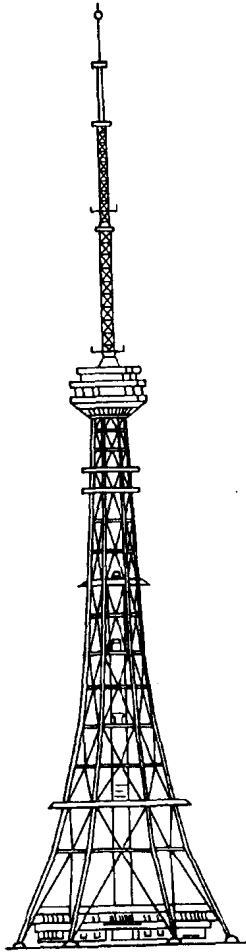


图 1-6 大庆电视塔

六、容器和管道

钢结构的气密性及水密性、耐高压的优点在煤气管道、输油管道、锅炉、储气、储油罐等的应用中得到充分发挥。

我国国民经济的蓬勃发展促进了钢结构工程科学技术水平的迅速提高。当前各项科研课题：计算理论的进一步完善、结构的革新及优化设计、高强度钢材的研制等取得可喜成绩，钢结构设计理论采用以一次二阶矩概率为基础的极限状态设计方法，用可靠指标度量结构的可靠度，使得合理地使用材料，充分地发挥钢材这种优质建筑材料的经济效益有了可靠的理论依据。

高强度钢材的研制，对于大跨度结构、高层或超高层建筑及重型结构有着重要的意义。我国结构用钢目前主要采用 Q235（屈服强度 $f_y=235\text{N/mm}^2$ ），16Mn（ $f_y=345\text{N/mm}^2$ ）也已有较普遍的应用；15MnV 钢（ $f_y=390\text{N/mm}^2$ ）也已作为承重结构用推荐钢材。九江长江大桥采用了新研制的 15MnV_q 钢（ $f_y=410\text{N/mm}^2$ ）。国外对于高强度钢材的研制和应用发展迅速。1969 年美国规范列入 $f_y=685\text{N/mm}^2$ ，1975 年苏联规范列入屈服强度为 $f_y=735\text{N/mm}^2$ 的钢材。而日本现已大量使用 490N/mm^2 和 590N/mm^2 的高强度厚钢板，目前为满足超高层建筑的要求正积极使用 780N/mm^2 的高强度厚钢板，并已研制开发出抗地震用的低屈强比高强度厚钢板及耐火用厚钢板，其在 600°C 高温下屈服强度为常温标准屈服强度的 2/3 以上。

钢和混凝土组合构件充分发挥两种构件的优点，是一种经济合理的结构形式。钢梁和钢筋混凝土板组成的组合梁已大量地应用于桥梁结构中，钢管混凝土结构提高了混凝土的抗压强度，改善了柱子的塑性及抗震性能，是一种很有发展前途的新结构。

以空间体系的网架结构、网壳结构、悬索结构代替平面结构，可以大大节约钢材，跨越更大的空间，受力合理、刚度大、重量轻，结构形式新颖丰富，可以突出结构美而富有艺术表现力，并且由于空间结构采用了大量的新材料、新技术和新工艺，使其成为反映一个国家建筑科学发展水平的标志。随着国家经济建设的发展和物质条件的改善，空间结构必将进一步得到发展。

第二章 钢结构的材料

钢材的种类很多，它的性质、用途和价格各不相同。钢结构常常需要在不同的环境和条件下承受各种荷载，因此钢结构中使用的钢材应当具有良好的机械性能，包括静力、动力强度和塑性、韧性等，也应当具有良好的加工性能，包括冷、热加工和焊接性能，以保证结构的安全可靠，便于加工制作，节省钢材和降低造价。符合钢结构上述性能要求的钢材仅有碳素钢和合金钢中的少数几种。

钢材在受力破坏时，表现为塑性破坏和脆性破坏两种形式，其产生原因既与钢材的自身性质有关，也与外在的使用条件有关。脆性破坏是在钢结构中应当避免的。因而需要了解钢材的各种主要性能及其影响因素，研究可能导致钢材脆性破坏的原因，以便经济、合理地选用钢材和设计结构。这对于提高和保证钢结构的质量，取得良好的经济和使用效果，是十分必要的。

第一节 钢材的主要机械性能

钢材的主要机械性能（也称力学性能）通常是指钢铁厂家生产供应的钢材在标准条件下均匀拉伸、冷弯和冲击等单独作用时所显示的各种机械性能。

一、钢材在单向均匀拉力作用下的性能

常温、静载下的钢材单向均匀拉伸所表示出来的性能最具有代表性，拉伸试验也简便易行，便于规定标准的试验方法和多项性能指标。钢材的主要强度指标和变形能力就是单向拉伸试验来确定的。

钢材在单向压缩和剪切时所表现出的应力—应变规律基本上与单向拉伸相似，压缩的强度指标采用拉伸时的数值，而剪切时的强度指标数值比拉伸时小。

低碳钢与低合金钢的单向拉伸试验的应力—应变曲线如图 2-1 (a)。图 2-1 (b) 是其简化以后的光滑曲线。由该应力应变曲线所显示出的各项物理指标如下。

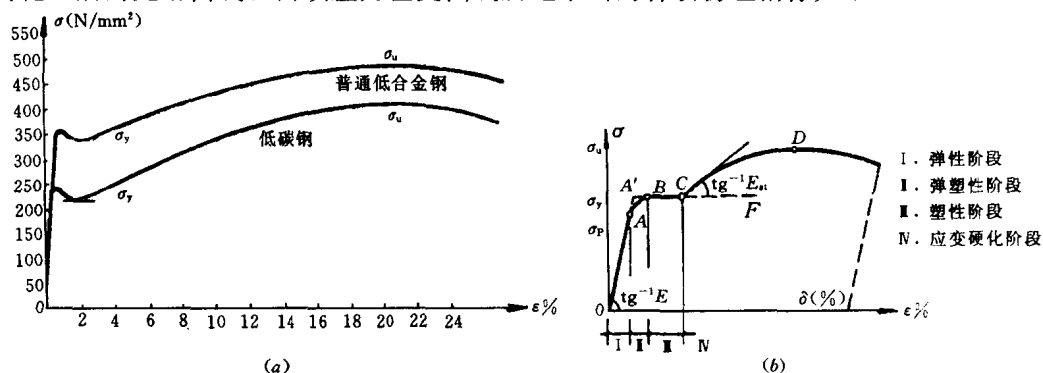


图 2-1 钢材拉伸试验的应力应变曲线

比例极限 这是应力应变曲线中直线的最大值，它与弹性极限极其相近，所以通常把 σ_p 看作是弹性极限。这样，当应力不超过 σ_p 时，应力应变成正比关系，即符合虎克定律，而且卸载后变形后完全恢复。如图 2-1 (b)，这一阶段为弹性阶段 OA。该直线的斜率，称为钢材的弹性模量。在钢结构的设计中，对所有的钢材统一取 $E=2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。

屈服点 应变 ϵ 在 σ_p 后不再与应力成正比，而是逐渐增大，应力应变为曲线关系，直至屈服点。这一阶段是图 2-1(a) 中的 AB 段，B 点的应力值为屈服点。在此之后，应力保持不变而应变继续发展，形成图 2-1(b) 中的水平线段 BC，弹性模量为零，这是塑性阶段。

应力超过 σ_p 之后，任一点的变形都包括弹性变形和塑性变形两个部分，其中塑性变形卸载后不可恢复，称之为残余变形。

光滑的曲线 BC 是简化以后得到的，是为了应用的方便。事实上，受试件加载速度等试验条件的不同的影响，屈服时为一上下波动的曲线，对应于其应力值的上限和下限，称之为上屈服点和下屈服点。下屈服点对试验的条件不敏感，形成稳定的水平线，所以在计算时以下屈服点作为材料抗力的标准（用 σ_y 表示）。

屈服点是钢结构材料的一项重要力学性能。由于钢材的弹性强度与屈服点的数值很接近，二者之间的变形值也不大，故可认为 σ_y 为弹性变形的终点。同时，材料达到 σ_y 后在一个较大的应变范围内应力不会继续增加，表明材料一时丧失继续承载的能力，所以将其作为弹性计算时强度的标准。

低碳钢和低合金钢有着明显的屈服点和屈服平台，而热处理钢材可以有较好的塑性但没有明显的屈服点和屈服平台，对于这样的钢材，规定将永久变形的 0.2% 时的应力作为屈服点，有时用 $\sigma_{0.2}$ 表示。为了区别起见，称之为名义屈服点。在钢结构中，为了统一和简明，对 σ_y 和 $\sigma_{0.2}$ 不再区分，都用 f_y 表示，并统一使用屈服强度一词。

抗拉强度 屈服平台之后，应变增长又需应力的增长，而应变相对应力增长为快，呈曲线关系直至最高点，这是图 2-1(b) 中的应变硬化阶段 CD。最高点的应力值为抗拉强度 σ_u ，到达 σ_u 后试件出现横向收缩变形，即“颈缩”，随后断裂。由于到达 σ_u 后构件开始断裂破坏，故可将其作为材料的强度储备。虽然钢材的塑性设计中将其作为理想的弹塑性体，忽略应变硬化的有利因素，却是以 σ_u 高出 σ_y 为条件的。如果没有硬化阶段，或是 σ_u 比 σ_y 高出不多，就不具备塑性设计应有的转动条件，因此规范规定钢材必须有 $\sigma_u/\sigma_y \geq 1.2$ 的屈强比。

伸长率 伸长率是断裂前试件的永久变形与标定长度的百分比，取圆形试件直径的五倍或十倍为标定长度，其响应的伸长率用 δ_5 和 δ_{10} 来表示。伸长率代表材料断裂前经受的塑性变形的能力。结构制作时，这种能力使得材料承受剪切、冲压、弯曲及锤击所产生的局部屈服而无明显破坏。

综上，屈服点、抗拉强度和伸长率是钢材的三个重要的力学性能指标。

二、钢材冷弯试验时的性能

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裂纹的抵抗能力的一项指标。

图 2-2 是冷弯试验示意图，用具有弯心直径 d 的冲头对标准试件中部施加荷载使之弯曲，检查并记录试件弯曲部位出现的裂纹或分层等情况时的冷弯角度，或者要求将试件冷弯到规定的一定角度（一般为 180° ）而不出现裂缝或分层，作为判断冷弯性能的方法。

冷弯性能一方面是检验钢材适应冷加工能力和显示钢材内部缺陷（如分层、非金属夹

杂等) 状况的一项指标, 另一方面由于冷弯时试件中部受弯部位受到冲头挤压以及弯曲和剪切的复杂作用, 因而也是考察钢材在复杂应力状态下发展塑性变形能力的一项指标。

三、钢材冲击试验时的性能

与抵抗冲击作用有关的钢材的性能是韧性。冲击韧性是钢材断裂时吸收机械能能量的量度, 是衡量钢材抵抗可能因低温、应力集中、冲击荷载作用等导致的脆性断裂能力的一项机械性能。

钢材的冲击韧性通常用有特定缺口的标准试件, 在试验机上进行冲击荷载试验使试件断裂来确定。常用的标准试件的型式有梅氏(Mesnager)U形缺口试件和夏比(Charpy)V形缺口试件两种。前者规定用带U型缺口的方形截面的小试件在规定的试验机进行如图2-3(b)。试件在摆锤冲击下折断后, 断口处单位面积上消耗的冲击功即为冲击韧性值, 用 α_k 表示, 单位 J/mm^2 。

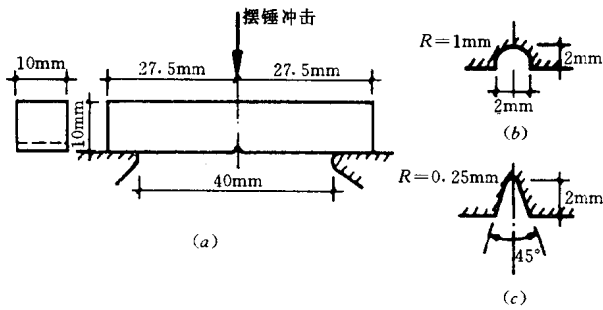


图 2-3 冲击试验

我国规定钢材的冲击韧性用 V 型试件通过冲击试验得到, 试件与梅氏试件的区别仅仅在于缺口是 V 形如图 2-3(c), 由于缺口比较尖锐, 其根部的高峰应力及其附近的应力状态能更好地反映实际结构的缺陷。夏比 V 型缺口试件韧性用 c_v 表示, 其值为试件折断所需的功, 单位为 J_0 。

缺口韧性值受温度的影响, 温度

低于某值时会急剧降低。设计处于低温的重要结构, 尤其受动载作用的结构时, 不但要求保证常温 ($20 \pm 5^\circ C$) 下的冲击韧性, 还要保证负温 ($-20^\circ C$ 或 $-40^\circ C$) 下的冲击韧性

第二节 钢材在复杂应力状态下的工作

如前所述, 钢材在单向拉伸作用的状态下, 当应力小于屈服点 f_y 时, 在弹性状态下工作; 而当应力达到 f_y 时, 钢材则在塑性状态下工作。

在实际钢结构中, 钢材常常处于双向或三向复杂应力作用的状态下, 这时候钢材的屈服并不只取决于某一方向的应力, 而是由综合反映各个方向应力影响的强度理论来确定。实验证明, 形状改变能量强度理论能够较好地说明比较接近于弹-塑性体的钢材的弹-塑性工作状态。

能量强度理论认为, 材料由弹性状态转入塑性状态的综合强度指标要用变形时单位体积中由于边长比例变化的能量来衡量。

根据材料力学可以导出, 复杂应力作用下如图 2-4, 钢材由弹性状态转变为塑性状态的条件, 可以用折算应力 σ_{eq}

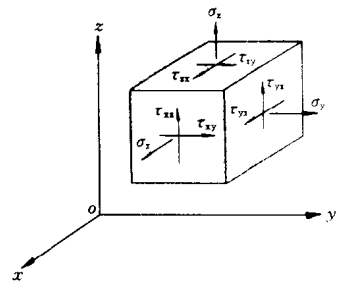


图 2-4 复杂应力状态

和钢材在单向应力时的屈服点 f_y 的关系来判断。

当折算应力用主应力表示时：

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

当折算应力用应力分量表示时：

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

$\sigma_{\text{eq}} < f_y$ —— 弹性状态：

$\sigma_{\text{eq}} \geq f_y$ —— 塑性状态。

平面应力时，折算应力可简化为：

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad (2-2a)$$

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (2-2b)$$

一般的梁中，只存在正应力与剪应力，上式化为：

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

而在纯剪时，则有：

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{3\tau^2} \quad (2-4)$$

在上式中取 $\sigma_{\text{eq}} = f_y$ 时，得：

$$\sigma_{\text{eq}} = \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 0.58f_y \quad (2-5)$$

即剪应力达到屈服点的 0.58 倍时，钢材进入塑性状态。所以钢材的抗剪设计强度 f 取为 $0.58f$ ， f 为抗拉强度设计值。

第三节 影响钢材性能的各种因素

影响钢材机械和加工等性能的因素很多，其中钢材的化学成分及其微观组织结构是最主要的，而冶炼、浇铸、轧制的过程，残余应力、温度、钢材硬化、热处理的影响等也是重要的因素，现分述如下。

一、化学成分

钢材是含碳量小于 2% 的铁碳合金，碳大于 2% 时则为铸铁。制造钢结构所用的材料有碳素结构钢中的低碳钢和低合金结构钢。碳素结构钢由纯铁、碳及杂质元素组成，其中纯铁约占 99%，碳及杂质元素约占 1%；低合金结构钢中，除了铁、碳之外还加入总量不超过 3% 的合金元素。碳及其他元素虽然所占比例不大，但对钢材性能却有重要影响。

碳的含量对钢的强度、塑性、韧性和焊接性有决定性的影响。含碳量增加，钢材的抗拉强度和屈服强度也随之提高。但是其塑性、冷弯性能和冲击韧性，特别是低温冲击韧性降低、可焊性变坏。因此钢结构的含碳量不宜太高，一般不超过 0.22%，在焊接结构中则应限制在 0.20% 以内。

锰是结构钢中的常有元素。锰能够显著提高钢材强度而不过多降低塑性和冲击韧性。锰有脱氧作用，是弱脱氧剂。锰还能消除硫对钢材的热脆作用。碳素钢中锰是有益杂质，低