

939025

TU391
3061

钢结构

同济大学 宗 听 聪 编

中国
建筑工业出版社



TU391
3061

029025

高等工科院校自学函授教材

钢 结 构

同济大学 宗听聪 编

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本书根据工业与民用建筑专业本科、函授《钢结构》课程的教学大纲,并按最新的《钢结构设计规范GBJ17—88》编写。书中着重介绍钢结构实际设计的基本知识,并列举了大量例题,以介绍各种构件的设计步骤,详细分析和指出计算与构造必须相适应之处,使读者能够提高钢结构设计的能力。

全书包括:材料、计算方法、连接、梁、拉杆、压杆和柱,以及整个屋盖的组成、选型、计算、构造和施工图绘制等内容;为使读者能完整地掌握钢屋盖的设计,还介绍了钢厂房的形式、布置、结构体系、计算方法、构造措施等知识。

本书可供土建专业本科、专科在校和函授师生及一般工程技术人员阅读。

高等工科院校自学函授教材

钢 结 构

同济大学 宗听聪 编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 22³/₄ 插页 1 字数: 554 千字

1991年12月第一版 1991年12月第一次印刷

印数: 1—3,570 册 定价: 14.10元

ISBN7-112-01333-X/TU·975

(6375)

序

《钢结构设计规范》GBJ17—88的颁布前后几年里，出了不少各种版本的钢结构教材，这些教材适合于多种层次的日校教学，而且各有侧重，各具特色。但是目前函授教学采用日校教材，总有许多不宜之处，现在中国建筑工程出版社出版的钢结构函授教材，填补了这方面的空白，丰富了函授教学，必然会受到函授师生们的欢迎。

函授教学的最大特点是教师和学生不见面或很少见面，学生主要是依靠自学，教材和自学指示书就是最主要的老师。因此函授教材必须“内容精炼、份量适当、主次分清、重点特出、文字简明、语言通俗”；而且教材结构必须“少而精和理论联系实际”。编好函授教材，可使学生们学习顺利，受益良多。

宗听聪教授长期从事钢结构教学工作，治学严谨。而且有十多年的工程设计经验，他的课堂教学很有特色。讲课深入浅出、条理分明、生动活泼，深受同学们的欢迎，多次被评为优秀教师和先进工作者。他所精心编著的这本钢结构函授教材一定能够满足函授师生们愿望。

王肇民

前言

本书根据工业与民用建筑专业本科、函授《钢结构》课程的教学大纲编写。为了配合钢结构设计规范的修订和钢结构学科的新发展,更新教学内容和适应函授专业课程的特点,编写此书作为钢结构课程的函授教材。

考虑到函授自学的特点,贯彻“少而精”和“理论联系实际”的原则,编写时力求内容精炼、份量适当、主次分清、重点突出、文字简明、语言通俗。为了加深钢结构实际设计的基本知识,书中列举了大量例题,介绍了各种构件的设计步骤,详细分析和指出了计算必须与构造相适应等,以培养钢结构设计的能力。

本书第一章钢结构的材料,较为全面地介绍钢材的各项力学性能(机械性能)及影响力学性能的各种因素。为恰当地选择钢材和妥善地处理构造问题打好基础。第二章钢结构的计算方法,介绍了四十年来我国钢结构设计方法的变革,现行规范采用的近似概率设计法的基本原理和计算方法,这是为了使用新的《钢结构设计规范》GBJ17—88提供理论根据而写的。第三、四、五章连接、梁、拉杆、压杆和柱,这是最基本的理论。第六章钢屋盖介绍整个空间屋盖的组成、布置、选形、计算、构造和施工图的绘制等,全面地介绍前面几章学过的基本知识的综合运用。通过课程设计,进一步培养对钢屋盖的设计能力。以上六章是钢结构课程最主要的内容。

虽然钢屋盖已经是独立完整的空间钢结构,但仍有其局限性。对一个钢结构的设计,不能局限于掌握钢屋盖设计,尚应对钢厂房的形式、布置、结构体系、计算方法、构造措施等有所了解。为此编写了第七章单层厂房钢结构。但是钢结构形式繁多,内容丰富,用途广泛,效果良好。由于学习时间有限,许多优良的新颖结构和宝贵的技术资料未能编入本书,只好忍痛割爱以保重点。

本书内容完全按照最新出版的《钢结构设计规范》GBJ17—88编写。适应函授专业的特点,每章均有学习指导、复习思考题和习题。

本书由王肇民教授主审,审查细致,指正甚多,获益非浅。附图全部由冯利先生精心绘制。特此一并致谢。

· 目 录

绪论

第一节 我国钢结构发展概况	1
第二节 钢结构的优缺点及其适用范围	2
第三节 钢结构的发展	3

第一章 钢结构的材料 6

第一节 钢材在单向均匀受拉时的工作性能	6
第二节 钢结构对材料性能的要求	9
第三节 影响钢材力学性能的因素	12
第四节 应力集中现象对钢材性能的影响	18
第五节 复杂应力作用下钢材的工作性能	19
第六节 钢材的种类和选用	19
第七节 钢材的规格	24
学习指导	27
复习思考题	27
习题	27

第二章 钢结构的计算方法 29

第一节 钢结构计算方法的变革	29
第二节 结构概率设计法	31
第三节 钢结构设计的基本规定	34
第四节 钢材的疲劳破坏和疲劳强度计算	38
学习指导	44
复习思考题	44
习题	44

第三章 钢结构的连接 46

第一节 钢结构的连接方法	46
第二节 焊接结构的特性和缺陷	47
第三节 对接焊缝的构造和计算	53
第四节 角焊缝的构造和计算	60
第五节 焊缝连接的构造形式和相应的计算特点	77
第六节 普通螺栓连接的构造和计算	82
第七节 螺栓连接构造形式和相应的计算特点	97
第八节 高强度螺栓连接的构造和计算	99
学习指导	108
复习思考题	109
习题	110

第四章 梁	116
第一节 梁的类型、梁格布置和梁的设计步骤	116
第二节 梁的强度计算	119
第三节 梁的整体稳定计算	122
第四节 梁的截面选择和验算	127
第五节 梁的局部稳定和加劲肋设计	136
第六节 焊接梁设计实例	147
第七节 梁的拼接	155
第八节 次梁与主梁的连接	157
学习指导	158
复习思考题	159
习题	160
第五章 拉杆、压杆和柱	161
第一节 概述	161
第二节 轴心和偏心拉杆	161
第三节 轴心压杆的整体稳定	164
第四节 轴心受压实腹柱	172
第五节 轴心受压格构柱	177
第六节 偏心压杆的整体稳定	188
第七节 偏心受压实腹柱	194
第八节 偏心受压格构柱	202
第九节 梁与柱的连接	207
第十节 柱脚设计	211
学习指导	220
复习思考题	223
习题	223
第六章 屋盖结构	225
第一节 屋盖结构的组成和布置	225
第二节 钢屋盖的支撑系统	226
第三节 钢檩条	231
第四节 普通钢屋架	235
第五节 轻型钢屋架介绍	252
第六节 梯形钢屋架例题	255
学习指导	269
复习思考题	270
习题	270
第七章 单层厂房钢结构概论	273
第一节 单层厂房钢结构的组成和布置	273
第二节 厂房钢结构的横向框架	276
第三节 支撑体系和墙架	279
第四节 吊车梁设计	286
第五节 单层厂房钢结构的计算特点	302

学习指导	313
复习思考题	313
附录一 材料的性能	314
附录二 梁的整体稳定系数	320
附录三 轴心受压构件的稳定系数	324
附录四 柱的计算长度系数	331
附录五 常用钢材及型钢截面特性表	338

绪 论

钢结构在建筑物、构筑物、桥梁、起重机械、矿井、码头等各领域中的应用甚广。随着社会主义建设事业的发展，将越来越多地在建筑工程中广泛采用。钢结构与其它建筑结构比较，具有强度大、重量轻、工业化程度高等优点，特别适用于重型厂房、高层建筑、高耸结构、大跨度结构、桥梁、起重运输机械和水工结构。

第一节 我国钢结构发展概况

随着炼铁、炼钢技术的发展，人类即开始采用钢铁结构。钢结构是由生铁结构开始，逐步发展起来的。我国是最早用铁建造承重结构的国家。远在秦始皇时代（公元前二百多年）就已经有了用铁建造的桥墩。汉明帝时（公元六十年前后），就开始在深山峡谷上建造铁链悬桥，这是世界各国公认的最古铁桥。

铁链悬桥是以锻铁为环，相扣成链，用链做成悬式承重结构。明代建造的云南沅江桥，清代建造的贵州盘江桥和四川泸定大渡河桥最为著名。大渡河桥建于清代康熙年间。全桥共有铁链十三根，底部九根铺板走人，两旁扶手四根，桥宽2.8m，净长100m。桥台由条石砌成，每根铁链重达一吨半，系于由生铁铸成的直径20cm长4m的锚桩上。

我国古代的金属结构，除铁链悬桥外，还建有很多铁塔。至今犹有宋代建造的湖北荆州的十三层玉泉寺铁塔。山东济宁铁塔寺的铁塔。江苏镇江甘露寺铁塔。这些建筑物表示我国古代建筑和冶金技术方面的高度水平。

我国古代金属结构方面虽有卓越成就，但由于长期受封建制度的束缚，近百年来又不断受到帝国主义的侵略，钢结构的发展很慢。新中国成立之前仅有沈阳皇姑屯机车厂钢结构厂房、广州中山纪念堂圆屋顶、杭州钱塘江大桥等，是我国自己设计建造的。

新中国成立之后，随着社会主义建设事业的蓬勃发展，钢结构科学技术和工程建设，有了大规模的发展，钢结构设计、制造和安装技术水平提高很快。大量钢结构工程中，有些在规模上和技术上已达到了世界先进水平。在五十年代，先后建造了钢结构厂房、矿井结构和桥梁。如鞍钢、武钢的大批冶金厂房，大连造船厂，太原、富拉尔基重型机器制造厂，长春汽车制造厂，洛阳拖拉机厂，武汉长江大桥等。

六、七十年代，由于客观条件的限制，只有在十分必需的重要建筑物中，才能采用钢结构。如首都人民大会堂的钢屋架（跨度60m）、北京工人体育馆的圆形悬索结构（直径94m）、浙江人民体育馆的马鞍形悬索结构（60×80m）、新疆化肥厂俱乐部悬索结构（36×50m）、成都城北公园体育馆圆形悬索结构（直径61m）、首都体育馆的平板网架结构（跨度99m）、上海体育馆的圆形平板网架结构（直径110m）、上海电视塔（高210m）、广州电视塔（高200m）、南京跨越长江的线路塔（高194m）、北京环境气象桅杆（高325m）。

八十年代建造了宝山钢铁公司的大量冶金和轧制车间，并在北京建造了国际贸易中心

(高155m)、京城大厦(高183m)、京广大酒店(高208m),上海建造了瑞金大厦(高107m)、锦江饭店(高153m)、静安希尔顿饭店(高143m),深圳的深圳发展中心(高154m)等高层楼房。悬索结构的发展也很快,建有山东淄博市体育馆、毛纺厂俱乐部、化纤厂餐厅、长途汽车站、吉林滑冰馆、广西柳州水泥厂熟料库、四川省体育馆、辽宁丹东体育馆、安徽安庆体育馆、上海杨浦区体育馆、北京朝阳体育馆、山东青岛市体育馆等。北京燕山石化公司东风化工厂地毯车间的网架结构,柱网为18m,覆盖建筑面积近40000m²,是我国覆盖建筑面积最大的网架群。这种多跨大柱网网架群结构,近年来在青岛四方机车车辆厂、邢台汽车制造厂等几十家工业厂房中推广使用。在塔桅结构方面有广东汕头电视塔(高200m)、大庆电视塔(高260m)等。在桥梁方面有西藏达孜拉萨河公路悬索桥(主跨500m)、四川宜宾金沙江铁路桥(简支钢桁桥跨度192m)等。

第二节 钢结构的优缺点及其适用范围

钢结构在工程中得到广泛应用和迅速发展,是由于钢结构与其它结构比较,有下列优点:

(1) 钢材强度高。钢与混凝土、木材相比,虽然容重较大,但其屈服点较混凝土和木材要高得多,其容重与屈服点的比值相对较低。在承载力相同的条件下,钢结构与钢筋混凝土结构相比,构件较小,重量较轻,便于运输和安装。因此,特别适用于跨度大,高度高、承载重的结构,也适用于可移动、易装拆的结构。

(2) 钢结构安全可靠。钢材质地均匀,各向同性,弹性模量大,有良好的塑性和韧性,为理想的弹塑性体,完全符合目前所采用的计算方法和基本概念。因此,钢结构计算准确性好,可靠性高,适用于有特殊重要意义的建筑物。

(3) 钢结构工业化程度高。尽管制造钢结构需要复杂的机械设备和严格的工艺要求,但与其它建筑结构比较,钢结构工业化程度高,具备了成批大件生产和高度准确性的特点。可以采用工厂制造,工地安装的施工方法,缩短施工周期。进而为降低造价、提高效益创造条件。

(4) 钢结构密闭性较好。由于焊接结构可做到完全密封,一些要求气密性和水密性好的高压容器、大型油库、气柜管道等板壳结构都适宜采用钢结构。

(5) 钢结构具有一定的耐热性。温度在250℃以内,钢的性质变化很小,温度达到300℃以后,强度逐渐下降,达到450℃~650℃时,强度降为零。因此,钢结构可用于温度不高于150℃的场合。

在有特殊防火要求的建筑中,钢结构必须用耐火材料予以围护。

钢结构的最大缺点是易于锈蚀。新建造的钢结构一般都需仔细除锈、镀锌或刷涂料。以后隔一定时间又要重新刷涂料,这种经常性维护费用较高。另外,钢结构价格比较昂贵,钢又是国民经济中的贵重材料,钢结构的应用就受到一定限制,设计时要尽量节约钢材。

根据钢结构的上述特点,考虑到我国钢产量尚不很充足,仍应节约钢材和适当控制钢材用量。对高度或跨度很大的结构,荷载或吊车起重重量很大的结构,密封要求很高的结构,需要经常移动或经常装拆的结构,采用其它建筑材料尚有困难或不很经济的结构,适宜采

用钢结构。目前我国适宜采用钢结构的工程大致有：

（1）重型工业厂房结构

用于重型车间的承重骨架，例如冶金工业厂房的平炉车间、转炉车间、初轧车间、混铁炉车间等重型机器厂的铸钢车间，水压机车间、锻压车间等；造船厂的船台车间；飞机制造厂的装配车间等。这些厂房常备有起重量100吨以上的重级或中级工作制吊车，厂房高度达30m以上，其主要承重结构常全部或部分采用钢结构。

（2）大跨度结构

结构的跨度越大，结构自重对结构的经济效果影响越大，越适宜采用钢结构以发扬其强度高、自重轻的优点。常用于飞机库、汽车库、火车站、大会堂、体育馆、展览馆、影剧院等。其结构体系常采用框架结构、拱架结构、网架结构、悬索结构以及预应力钢结构。

（3）高层建筑

对于层数多和高度大的高层楼房的骨架来说，也是钢结构的适用范围。上海、北京等地、已建造30至50层的宾馆、饭店、公寓等高层楼房多处。在炼油工业中也常采用多层多跨的高层框架结构。

（4）承受动力荷载的结构

由于钢材具有良好塑性、韧性和延性。对设有锻锤或其它动力设备的厂房，即使厂房跨度不很大，常采用钢结构。直接承受跨度较大的桥式吊车的吊车梁，经常采用钢结构。此外，对于抗震性能要求较高的结构也都经常采用钢结构。

（5）可拆卸和可移动的结构

需要经常搬迁的结构，如流动式展览馆和活动房屋、活动支架、拔杆和起重运输机械等，经常采用螺栓连接的拼拆式钢结构。

（6）塔桅结构

由于钢材具有抗震（风振、地震）性能好，重量轻、体积小、风阻力小等特点。高度较大的无线电桅杆、微波塔、电视塔、高压输电线路塔、化工排气塔、石油钻井塔、大气监测塔、旅游瞭望塔、火箭发射塔等经常采用钢结构。

（7）板壳结构

常用于要求密闭的容器，如大型贮液库、煤气库、炉壳以及大直径的管道结构等。

（8）轻钢结构

对于使用荷载特别轻的中小跨度房屋，采用轻钢结构特别有利。耗钢量常比普通钢结构省25%~50%，与钢筋混凝土同类房屋相比，耗钢量相近而自重却可减轻约70%左右。

（9）桥梁结构

在中等跨度和大跨度桥梁中，经常采用钢结构，如钱塘江大桥、武汉、南京长江大桥等。

第三节 钢 结 构 的 发 展

钢结构优点较多，是一种比较理想的承重结构，但因过去钢产量较少，致使钢结构在我国的应用受到很大限制。随着工农业、国防和科学技术现代化发展，我国钢结构的生

和应用将有很大的增长和发展。为了适应这种新的形势, 钢结构的科学技术水平也应该迅速提高。当前应在下列几个方面努力工作, 深入研究和不断提高。

(1) 高强度钢材的研究和应用

利用高强度钢材对跨度大、高度高、承载重的结构非常有利。结构用高强度钢材一般都是低合金结构钢, 以保证必要的塑性和韧性。目前屈服点为 345N/mm^2 的16锰钢在我国采用已很普遍。北京首都体育馆的网架结构, 上海电视塔塔柱钢管就是采用的16锰钢。屈服点 390N/mm^2 的15锰钒钢和15锰钛钢也已开始应用。15锰钒钢是在冶炼16锰钢的基础上增添少量钒铁而成, 已有20多年工程实践的经验, 综合性能较好, 可较3号钢(新标准为Q235钢)节约用钢量 $15\% \sim 25\%$ 。上海电视塔的斜杆用一种特别研制的30硅钛钢以减少用钢量。另一种屈服点为 440N/mm^2 的15锰钒氮钢也有应用。国外高强度钢发展很快, 1969年美国规范列入屈服点为 685N/mm^2 的钢材。1975年苏联规范列入屈服点为 735N/mm^2 的钢材。今后随着冶金工业的发展, 研究强度更高的钢材及其合理使用, 将是重要的课题。

用于连接材料的高强度钢除16锰钢、15锰钒钢外, 尚有8.8级的45号钢和10.9级的40硼钢。这两种钢材都有比较成熟的生产工艺, 所制成的高强度螺栓已被广泛用于厂房结构, 网架结构、塔桅结构、桥梁结构等; 并取得了良好的效果。40硼钢屈服点为 650N/mm^2 , 抗拉强度为 800N/mm^2 , 经热处理后屈服点不低于 990N/mm^2 , 抗拉强度为 1100N/mm^2 。但是, 40硼钢由于发现有延迟断裂现象, 所以将被逐步淘汰, 现推荐采用20锰钛硼钢作为高强度螺栓专用钢。其强度级别为10.9级。

(2) 结构计算方法和设计准则的研究和改进

现代计算技术和测试技术的发展, 为深入了解结构和构件的实际性能提供了有利条件。计算方法愈能反映结构的实际情况, 就愈能合理使用材料, 充分发挥材料的作用并保证结构的安全。需要进一步研究的问题有: 钢材塑性的充分利用问题, 动力荷载作用下的结构反应问题, 残余应力对结构强度和稳定的影响问题, 板件屈曲后的承载能力问题等等。

最近应用概率论来考虑结构的安全度有了新的进展, 这也是改进计算方法的一个重要方面。《钢结构设计规范》GBJ17—88采用了以概率理论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, 并以分项系数的设计表达式进行计算。但是, 这还只是初步的, 近似的概率设计法, 还有许多问题需要继续研究、提高和完善。

(3) 结构形式的革新和应用

新的钢结构形式有: 薄壁型钢结构, 悬索结构, 网架结构、预应力结构等。这些结构适用于轻型屋盖结构、大跨度屋盖结构或其它钢结构。采用新结构对减少耗钢量有重要意义。

我国近年来对新结构的应用逐年有所增长, 特别是网架结构的发展更快。网架结构对各种平面形式的建筑物适应性很强。首都体育馆、上海体育馆、上海文化广场的平面分别为矩形、圆形, 和梯形, 都采用了平板网架, 经济效果很好。

(4) 钢和钢筋混凝土组合构件的应用

钢和钢筋混凝土组合构件是一种各取所长的结构。钢宜于受拉, 钢筋混凝土宜于受压, 两种材料结合能充分发挥各自的长处, 是一种很合理的结构。例如钢筋混凝土楼板用抗剪

键与钢梁连成整体而共同工作。由钢筋混凝土楼板作为受压翼缘，而钢梁主要承受拉力。另外，在钢管内浇灌混凝土用作柱肢（双肢柱）或柱，也是一种很好的组合构件的形式。钢管混凝土组合构件的塑性和抗震性能都很好，又比钢筋混凝土柱施工简便，这方面的研究已取得重大进展，是一种很有发展前途的新的结构形式。应进一步深入研究这种结构的工作性能、设计原理、构造要求和施工规程等。

（5）结构优化设计原理的研究和应用

结构优化设计包括确定优化的结构形式和确定优化的截面尺寸。由于电子计算机的逐步普及，促使结构优化设计得到相应的发展。我国最近编制的钢吊车梁图集，就是根据耗钢量最小的条件，写出目标函数，把强度、稳定、刚度等一系列设计要求作为约束条件，用计算机解得优化的截面尺寸，比过去的标准设计省钢5%~10%。优化设计已逐步地推广到塔桅结构设计、网架结构设计等方面。

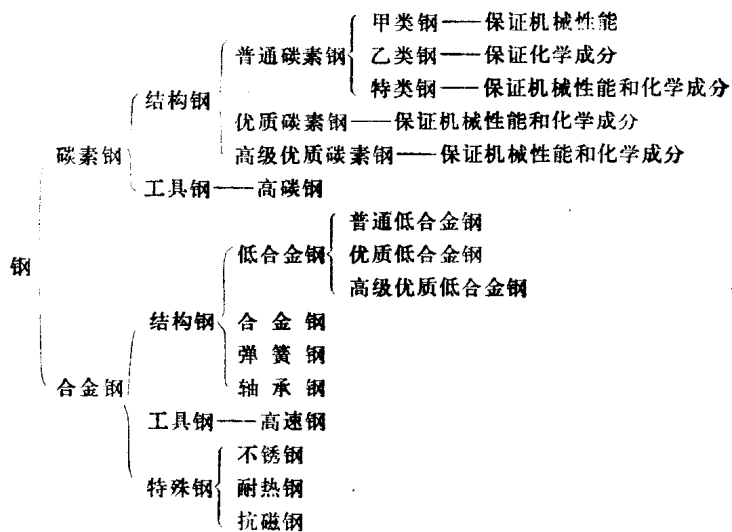
（6）高层钢结构的研究

近年来我国工业建设发展迅速，城市人口不断增加，大城市逐渐扩大，城市用地日趋紧张。为了节约用地和减少城市公共设施的投资。在上海、北京、广州和深圳等地，相继建造了一些高层建筑，高达180m。这些高层建筑很多都采用了钢结构框架体系，楼层采用钢梁、压型钢板上浇混凝土的组合构件，施工简便迅速。

我国在高层建筑方面，缺乏经验，与国外相比，还存在着较大差距。为了适应今后高层建筑发展需要，急需开展这方面的研究工作。

第一章 钢 结 构 的 材 料

钢的品种繁多，分类方法也多，可简略地归纳如下：



工程结构上常用的结构钢只是各种钢的一部分，而在钢结构中最常用的只是普通碳素钢和普通低合金钢。

第一节 钢材在单向均匀受拉时的工作性能

了解和掌握钢材在各种应力状态和不同使用条件下的工作性能，根据结构的重要性的使用要求、荷载变动的性质、连接的方法、构件的工作温度和周围环境、构件的受力特性和应力分布等，慎重地选择合适的钢材，既要使结构安全可靠地满足使用要求，又要尽最大可能节约钢材、降低造价，是学习钢结构课程的重要内容之一。

由于钢结构在使用过程中要受到各种形式的外力作用，所以要求钢材必须具有能抵抗外力作用而不超过允许的变形和不会引起破坏的能力，这种能力统称为钢材的力学性能（或叫机械性能）。钢材在外力作用下所表现出来的各种特性，如弹性、塑性、韧性、强度等即称为力学性能指标。钢材的力学性能指标是结构设计的重要依据，这些指标主要是靠试验来测定的。结构的受力情况和使用条件是多种多样的，不可能对每种情况都进行试验和测定力学性能指标。但是单向拉伸试验则是钢材力学性能最重要的试验方法之一，所得结果也是最基本、最主要的指标。

钢材在单向均匀受拉时的工作特性，通常是以大家所熟悉的静力拉伸试验的荷载—变形（或应力—应变）曲线来表示。图1-1表示钢结构中常用的低碳钢的荷载—变形曲线。图中横座标为试件的伸长 Δl ，纵座标为荷载 N 。观察图中曲线，可以把钢材的工作特

性分成几个阶段。

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，荷载降低到零（完全卸荷）则变形也降低到零（回到原点）。其中的OA段是一条斜直线，荷载与伸长成正比，完全符合虎克定律。A点的荷载为比例极限荷载 N_p ，相应的应力叫做比例极限 σ_p （ $\sigma_p = \frac{N_p}{A}$ ，A为试件截面面积）。E点的荷载为弹性极限荷载 N_e ，相应的应力叫做弹性极限 σ_e 。

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，曲线成锯齿形波动。甚至出现荷载不增加而变形仍在继续发展的现象，这就是钢材对外力的屈服，这个阶段称为屈服阶段。此时钢材的内部组织发生了变化，纯铁体晶粒与晶粒之间产生滑移，试件除弹性变形外，还出现了塑性变形，卸荷后试件不能完全恢复原来的长度而留有残余变形。卸荷后能消失的变形叫弹性变形，而不能消失的这一部分变形叫残余变形（或叫塑性变形）。

屈服阶段曲线上下波动，屈服荷载 N_s 。取波动部分的最低值（下限），相应的应力 σ_s ，叫屈服点或流限（用符号 f_s 表示），屈服阶段从开始（图1-1中E点）到曲线再度上升（称为强化）的变形范围较大，相应的应变幅度称为流幅。钢材不同，流幅也不同，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。

强化阶段（FB段）

屈服阶段之后，钢材内部晶粒重新排列，使抵抗外荷载的能力有所提高，但此时钢材的弹性并没有完全恢复，塑性特征非常明显，曲线只是略有上升而到达顶点B，这个阶段称为强化阶段。对应于B点的荷载 N_b 是试件所能承受的最大荷载，与此相应的应力 σ_b 叫抗拉强度或极限强度（用符号 f_b 表示）。

颈缩阶段（BD段）

当荷载到达极限值 N_b 时，在试件材料质量较差处的截面出现局部横向收缩，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（实际上颈缩处应力仍不断增加并出现复杂应力状态），变形却继续发展，直至D点试件断裂。

颈缩现象的出现和颈缩区的伸长及横向收缩（图1-5）是反映钢材塑性性能的重要标志。

钢材在屈服时和拉断时的应力大小，反映钢材抵抗外力的强弱程度（强度），这些特定点的应力，工程上常称之为屈服强度 f_s 和抗拉强度 f_b 。

在工程实践中，钢材有两种性质完全不同的破坏形式，一种叫塑性破坏，另一种叫脆

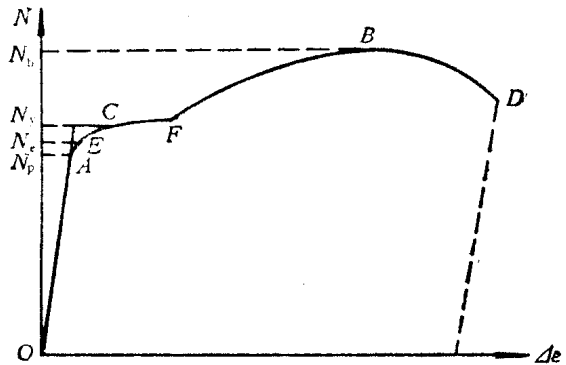


图 1-1 低碳钢的荷载—变形曲线

性破坏。

塑性破坏通常是由于变形过大，构件的应力达到了钢材的抗拉强度 f_u 后发生的。破坏前构件产生较大的塑性变形和明显的颈缩现象，断裂后的断口呈纤维状，色泽发暗。由于在塑性破坏前出现很大的变形，容易及时发现和采取适当补救措施，不致引起严重后果。另外，塑性变形后出现内力重分布，使构件中原先受力不等的部分应力趋于均匀，因而提高了构件的承载能力。

脆性破坏则相反，破坏前构件变形很小，计算应力可能小于钢材的屈服强度 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。破坏前没有任何预兆，破坏是突然发生的，断口平直并呈有光泽的晶粒状。由于脆性破坏前没有明显的预兆，无法及时觉察和采取补救措施，而且个别构件的断裂常引起整个结构塌毁，危及人民生命财产的安全，后果严重，损失较大。在设计、施工和使用钢结构时，要特别注意防止出现脆性破坏。

各种工程结构例如厂房、桥梁、船艇、压力容器等，都曾出现过不少的重大脆性断裂事故。工程技术人员通过总结经验和科学分析，认识到钢结构中所选用的钢材不但要强度高、弹性好，还要具有一定的塑性、韧性、可焊性等一系列重要力学性能，它们都直接影响到钢结构是否能安全可靠地使用，在这些认识的基础上，提出了理想受力材料的工作性能应是如图1-2所示的弹性-塑性体。

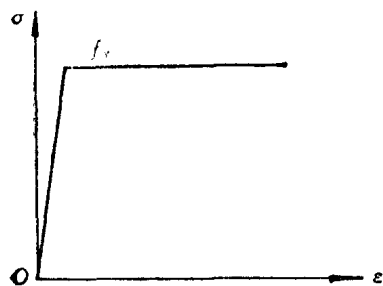


图 1-2 理想的弹性-塑性体的应力-应变曲线

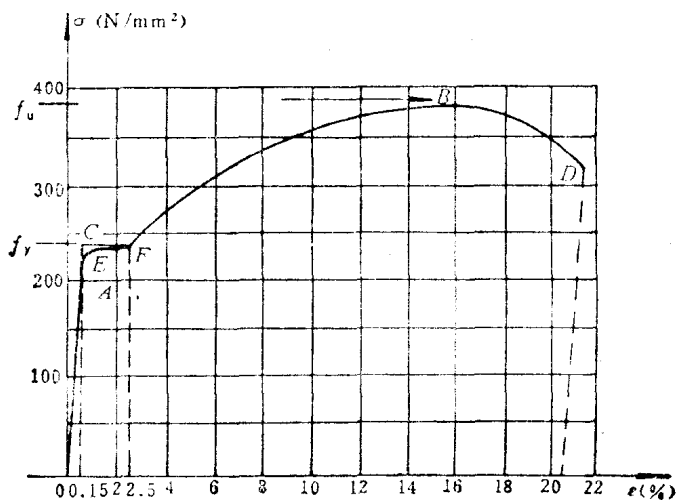


图 1-3 3号钢在单向均匀受拉时的工作性能

现在再研究一下在钢结构中最常用的3号钢(Q235)(普通碳素钢)的工作性能和几个重要的力学性能指标。图1-3所示曲线是3号钢(Q235)在常温下静力拉伸试验的结果，随着作用力(应力)的增加，3号钢明显地表现出弹性、屈服、强化和颈缩等四个阶段，各个阶段的应力和应变大致为：比例极限 $\sigma_p \geq 200 \text{ N/mm}^2$ ， $\epsilon_p \approx 0.1\%$ ；屈服点 $f_y \geq 235 \text{ N/mm}^2$ ， $\epsilon_y \approx 0.15\%$ ；流幅从 $\epsilon \approx 0.15\%$ 至 $\epsilon \approx 2.5\%$ ；抗拉强度(极限强度) $f_u = 370 \sim 460 \text{ N/mm}^2$ ；破坏时的伸长率(最大应变) $\delta \approx 22\%$ ；弹性模量 $E \approx 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。

对图1-3所示的常用钢材(3号钢)在单向均匀受拉时工作性能的分析研究，可以得出几点极为重要的钢材的工作性能。

(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($\epsilon_y \approx$

0.15%)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。当应力达到屈服强度 f_y 时,钢材的承载能力表面上达到了最大限度,并将使结构产生很大的,在使用上不容许的残余变形。因此,在设计时取屈服强度 f_y 为钢材可以达到的最大应力。

(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($\varepsilon = 0.15\% \sim 2.5\%$)已足够用来考虑结构或构件的塑性变形的发展。因此,可以认为钢材是最符合理想的弹性-塑性材料(图1-3),为进一步发展钢结构的计算理论提供了基础。

(3) 常用钢材(低碳钢)的塑性变形很大,差不多等于弹性变形的200倍,说明结构在破坏之前将出现很大的变形。但实际上钢结构几乎不可能发生纯塑性破坏,因为当结构出现相当大的变形后早已丧失使用性能,或已使人们采取加固补救措施。

第二节 钢结构对材料性能的要求

钢结构对材料性能的要求当然是多方面的,不能偏重于某一项或少数几项指标,对各种指标的高低好坏和利害得失,要进行全面的衡量,慎重地选择合适的钢材。下面分别对各种指标进行讨论。

1. 强度

钢材的强度有比例极限 σ_p ,弹性极限 σ_e 和屈服强度 f_y 三个指标,实际上可用屈服强度 f_y 作为代表,设计时认为这是钢材可以达到的最大应力。屈服强度 f_y 高,则可减轻结构自重,节约钢材和降低造价。此外还有一个强度指标即抗拉强度(极限强度) f_u ,这是钢材破坏前能够承受的最大应力。虽然在这个应力时,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,故 f_u/f_y 的值可以看作是钢材强度储备多少的一个系数。

必须注意, f_y 、 f_u 值是由单向均匀受力的静力拉伸试验获得的,这样的指标也只有在承受静力荷载而且应力单向分布较均匀的结构或构件中,才具有实际意义。强度指标虽然是结构设计的重要依据之一,但单凭这一指标不足以完全判定结构是否安全可靠,还需考虑下面所述因素。

2. 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 和断面收缩率 ψ 。

伸长率 δ 是应力—应变曲线(图1-3)中最大应变值,等于试件(图1-4)拉断后的

原标距间长度的伸长值(残余塑性变形)和原标距比值的百分率,当 $l_0/d_0 = 10$ 时,以 δ_{10} 表示,当 $l_0/d_0 = 5$ 时,以 δ_5 表示。 δ 值可按式计算

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

式中 δ —— 伸长率;

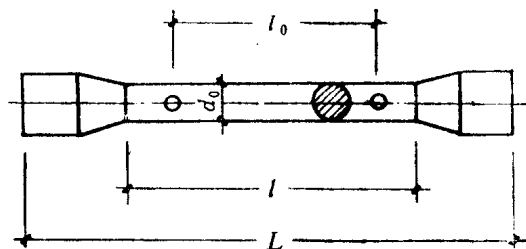


图 1-4 静力拉伸试验的试件