

巍巍交大 百年书香
www.jiaodapress.com.cn
bookinfo@sjtu.edu.cn



策划编辑/刘建
责任编辑/贺兰晚 陈祖英
封面设计/刘文东



21世纪高等学校土木工程系列规划教材

钢结构设计原理

钢结构设计原理

GANGJIEGOU SHEJI YUANLI

主编 汪芳

GANGJIEGOU SHEJI YUANLI

钢结构设计原理



扫描二维码
关注上海交通大学出版社
“书香交大”

ISBN 978-7-313-20940-5



9 787313 209405 >

定价: 52.00元



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

免费提供
精品教学资料包
服务热线: 400-615-1233
www.huatengedu.com.cn

21世纪高等学校土木工程系列规划教材

钢结构设计原理

GANGJIEGOU SHEJI YUANLI

主 编 汪 芳
副主编 杨丽平 岳欢欢



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书共分6章,内容包括钢结构设计原理概述,钢结构的材料,钢结构的连接,受弯构件,轴心受力构件,拉弯、压弯构件等。

本书可作为高等院校土木工程及相关专业的教学用书,也可作为工程设计人员的学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构设计原理/汪芳主编. —上海:上海交通大学出版社,2019

ISBN 978-7-313-20940-5

I. ①钢… II. ①汪… III. ①钢结构—结构设计
IV. ①TU391.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 031123 号

钢结构设计原理

主 编:汪 芳

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:三河市骏杰印刷有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

字 数:384 千字

版 次:2019 年 2 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-20940-5/TU

定 价:52.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:18.75

印 次:2019 年 2 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:010-88433760

前 言

Preface

近年来,随着我国经济的发展,钢结构越来越广泛地应用在各种工程中,不仅用于大跨度空间结构、超高层钢结构及重型工业厂房,而且逐渐应用于各种其他厂房、住宅、架构等结构。

“钢结构设计原理”是我国高等院校土木工程及相关专业中一门重要的专业基础课程,在整个课程体系中起着重要的作用。本书讲授的知识可以直接应用于工程实际,并为学习“钢结构设计”等专业课程打下良好的理论基础。

近几年,钢结构设计相关规范、规程及材料的系列标准等都陆续有所更新,如《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)、《热轧型钢》(GB/T 706—2016)、《钢结构焊接规范》(GB 50661—2011)等,为适应新规范、新标准的要求,同时也使教材更加精简实用,我们编写了本书。

本书系统地讲述了钢结构设计的基本理论和方法,从实用的角度出发,重点阐述了基本原理和构造措施,避免大量的理论推导,以便读者在有限的时间内尽可能全面地掌握钢结构设计原理的基础知识。

本书体系完整、条理清晰、通俗易懂,便于教师教学和学生自学使用。本书既可作为“钢结构设计原理”课程的教材,也可供相关设计人员和施工技术人员参考。

本书推荐学时如下表所示:

序 号	内 容	学 时
1	钢结构设计原理概述	2
2	钢结构的材料	4
3	钢结构的连接	10
4	受弯构件	8
5	轴心受力构件	6
6	拉弯、压弯构件	6
总计		36

 **钢结构设计原理**

本书由武汉华夏理工学院土木建筑工程学院结构教学团队负责编写,由汪芳任主编,由杨丽平、岳欢欢任副主编。编写分工如下:岳欢欢编写第1章,汪芳编写第2章、第5章、第6章和附录,杨丽平编写第3章和第4章。全书由汪芳统稿。

由于编者水平有限,书中存在的疏漏之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

Contents

第 1 章 钢结构设计原理概述	1
1.1 钢结构的特点和应用	1
1.1.1 钢结构的特点	1
1.1.2 钢结构的应用	2
1.2 钢结构的发展	4
1.2.1 钢结构的发展历程	4
1.2.2 钢结构的发展趋势	5
1.3 钢结构的设计方法	8
1.3.1 结构的功能要求	8
1.3.2 结构的作用及抗力	9
1.3.3 结构的可靠性和可靠度	9
1.3.4 极限状态设计方法	9
思考与练习	12
第 2 章 钢结构的材料	14
2.1 钢结构材料概述	14
2.2 钢材的主要性能	15
2.2.1 钢材的力学性能和工艺性能	15
2.2.2 钢材的可焊性能	19
2.2.3 钢材的耐火、耐候性能	19
2.3 钢材的破坏形式	19
2.4 影响钢材性能的因素	20
2.4.1 化学成分的影响	20
2.4.2 冶炼、浇铸、轧制和热处理的影响	21
2.4.3 钢材的硬化	22
2.4.4 温度的影响	22
2.4.5 应力集中的影响	24
2.4.6 残余应力及疲劳因素的影响	24
2.4.7 复杂应力作用的影响	25

2.5	钢材的疲劳和疲劳计算	26
2.5.1	影响疲劳强度的因素	26
2.5.2	疲劳计算	27
2.6	建筑用钢材的种类、规格和选用	30
2.6.1	钢结构用钢的种类	30
2.6.2	钢结构用钢的牌号	31
2.6.3	钢材的品种和规格	39
2.6.4	钢材的选用	41
	思考与练习	42
第3章 钢结构的连接		44
3.1	钢结构连接概述	44
3.1.1	焊缝连接	45
3.1.2	铆钉连接	45
3.1.3	螺栓连接	45
3.2	焊接方法、焊缝类型、焊接连接的形式和焊缝质量等级	47
3.2.1	焊接方法	47
3.2.2	焊缝类型	49
3.2.3	焊接连接的形式	50
3.2.4	焊缝质量等级	51
3.3	焊缝符号及标注方法	53
3.4	对接焊缝的构造和计算	55
3.4.1	对接焊缝的构造	55
3.4.2	对接焊缝的计算	57
3.5	角焊缝的构造和计算	61
3.5.1	角焊缝的构造	62
3.5.2	角焊缝的计算	64
3.6	焊接残余应力和残余变形	75
3.6.1	焊接残余应力的分类及成因	75
3.6.2	焊接残余变形的分类	76
3.6.3	焊接残余应力和残余变形对结构工作性能的影响	77
3.6.4	减小焊接残余应力和残余变形措施	78
3.7	螺栓连接的构造	80
3.7.1	螺栓的形式和规格	80
3.7.2	螺栓的排列	81
3.7.3	螺栓的其他构造要求	83
3.8	普通螺栓连接的工作性能与计算	84
3.8.1	受剪螺栓连接	84
3.8.2	受拉螺栓连接	92

3.8.3	拉剪螺栓连接	97
3.9	高强度螺栓连接的工作性能与计算	99
3.9.1	高强度螺栓的紧固方法	99
3.9.2	高强度螺栓的工作性能	100
3.9.3	高强度螺栓群受剪螺栓连接计算	102
3.9.4	高强度螺栓群受拉螺栓连接计算	103
3.9.5	高强度螺栓群拉剪螺栓连接计算	105
	思考与练习	106
第4章	受弯构件	112
4.1	受弯构件的类型和应用	112
4.2	梁的强度和刚度	114
4.2.1	梁的强度	114
4.2.2	梁的刚度	119
4.3	梁的整体稳定性	121
4.3.1	梁的整体稳定性概述	121
4.3.2	梁整体稳定性的验算	121
4.3.3	梁的整体稳定系数	122
4.3.4	保证梁整体稳定性的构造措施	125
4.4	梁的局部稳定性和腹板加劲肋的计算	126
4.4.1	翼缘的局部稳定	127
4.4.2	腹板加劲肋的配置要求	128
4.4.3	腹板局部稳定性计算	129
4.4.4	梁腹板加劲肋的设计	133
4.4.5	支承加劲肋的计算	134
4.5	考虑腹板屈曲后强度时梁的计算	135
4.5.1	腹板屈曲后梁的受剪承载力	135
4.5.2	腹板屈曲后梁的受弯承载力	136
4.5.3	考虑腹板屈曲后强度的梁的计算公式	137
4.5.4	考虑腹板屈曲后强度的梁的加劲肋设计	137
4.6	梁的设计	138
4.6.1	型钢梁的设计	138
4.6.2	组合梁的设计	141
4.7	梁的拼接和连接	152
4.7.1	梁的拼接	152
4.7.2	次梁与主梁的连接	153
	思考与练习	155

第 5 章 轴心受力构件..... 157

5.1	轴心受力构件的类型.....	157
5.2	轴心受力构件的强度和刚度.....	158
5.2.1	轴心受力构件的强度.....	158
5.2.2	轴心受力构件的刚度.....	159
5.3	轴心受压构件的整体稳定.....	161
5.3.1	轴心受压构件的整体稳定概述.....	161
5.3.2	理想轴心受压构件的受力性能.....	161
5.3.3	实际轴心受压构件的计算方法.....	164
5.4	实腹式轴心受压构件的局部稳定.....	170
5.5	实腹式轴心受压构件的截面设计.....	173
5.5.1	实腹式轴心受压构件的截面设计原则.....	173
5.5.2	实腹式轴心受压构件的截面设计步骤.....	173
5.6	格构式轴心受压构件.....	177
5.6.1	格构式轴心受压构件的组成.....	177
5.6.2	格构式轴心受压构件的整体稳定性.....	179
5.6.3	缀材的计算.....	180
5.6.4	格构式轴心受压构件的设计.....	183
5.7	轴心受压柱与梁的连接.....	187
5.7.1	梁支承于柱顶.....	188
5.7.2	梁支承于柱侧.....	188
5.8	铰接柱脚.....	189
5.8.1	铰接柱脚的形式与构造.....	189
5.8.2	铰接柱脚的计算.....	190
	思考与练习.....	195

第 6 章 拉弯、压弯构件..... 198

6.1	拉弯、压弯构件概述.....	198
6.2	拉弯、压弯构件的强度和刚度.....	200
6.2.1	拉弯、压弯构件的强度.....	200
6.2.2	拉弯、压弯构件的刚度.....	202
6.3	实腹式压弯构件的整体稳定.....	203
6.3.1	实腹式压弯构件在弯矩作用平面内的稳定计算.....	203
6.3.2	实腹式压弯构件在弯矩作用平面外的稳定计算.....	206
6.4	实腹式压弯构件的局部稳定.....	208
6.4.1	应力梯度.....	208
6.4.2	高厚比、宽厚比限值.....	208
6.5	压弯构件的计算长度.....	208

6.5.1	在框架平面内的计算长度	209
6.5.2	在框架平面外的计算长度	211
6.6	实腹式压弯构件的截面设计	212
6.6.1	实腹式压弯构件的截面设计原则	212
6.6.2	实腹式压弯构件的截面设计方法	212
6.6.3	实腹式压弯构件的截面构造规定	213
6.7	格构式压弯构件的设计	215
6.7.1	格构式压弯构件的截面形式	215
6.7.2	格构式压弯构件的稳定	215
6.7.3	格构式压弯构件缀件的计算	217
6.8	框架柱的柱头和柱脚	219
6.8.1	柱头的构造	219
6.8.2	刚接柱脚	220
6.8.3	外露整体式刚接柱脚	221
6.8.4	分离式刚接柱脚	223
	思考与练习	224
附录		227
附录 1	疲劳计算的构件和连接分类	227
附录 2	H 型钢规格及截面特性	233
附录 3	剖分 T 型钢规格及截面特性	241
附录 4	工字钢规格及截面特性	246
附录 5	槽钢规格及截面特性	250
附录 6	工字钢与 H 型钢型号及截面特性参数对比	253
附录 7	等边角钢规格及截面特性	256
附录 8	不等边角钢规格及截面特性	263
附录 9	无缝钢管规格及截面特性	268
附录 10	焊接钢管规格及截面特性	275
附录 11	轴心受压构件的稳定系数	281
附录 12	各种截面回转半径的近似值	284
附录 13	柱的计算长度系数	286
附录 14	锚栓规格	288
附录 15	锚栓的有效截面积	288
参考文献		289

钢结构设计原理概述

学习目标

- (1) 掌握钢结构的特点和应用范围。
- (2) 了解钢结构的发展历程及发展趋势。
- (3) 了解钢结构设计方法中可靠性的含义、极限状态的分类。
- (4) 熟悉承载能力和正常使用状态设计表达式。

1.1 钢结构的特点和应用

1.1.1 钢结构的特点

钢结构是由钢板和各种型钢等钢制构件连接组合而成的结构,是主要的建筑结构类型之一。与钢筋混凝土结构、砌体结构、木结构相比,钢结构有如下特点:

1. 自重轻而承载力高

钢材容重虽大,但强度却高得多,属于轻质高强材料。钢材的比强度(比强度是材料的强度与其表观密度之比)为 $(3.1\sim 4.9)\times 10^6$,混凝土的比强度为 $(1.25\sim 2.4)\times 10^6$ 。也就是说,同样的跨度承受相同的荷载时,钢屋架的重量只有钢筋混凝土屋架的 $1/4\sim 1/3$;若采用冷弯薄壁型钢,则将更轻。因而,钢结构能承受更大的荷载,跨越更大的跨度。此外,钢结构重量轻,可以相应地减小地震作用效应,同时减小地基压力。在地震区,特别是软弱地基地区,采用钢结构可以取得不错的经济效益。

2. 塑性和韧性好

在一般情况下,钢材不会因为超载或偶然荷载而突然断裂破坏,有较好的塑性变形能力,给人们以明显的征兆。在冲击荷载作用下,钢试件能消耗相当大的冲击功,有一定的抗冲击脆断能力。

3. 材质均匀,最接近匀质等向体

钢材内部组织比较均匀,接近各向同性。在正常使用阶段,钢材属于理想的弹性体,

弹性模量大,因而变形小。这些和力学计算中采用的假定比较符合,因此,钢结构的实际受力情况和力学计算结构最相符合。

4. 密封性好

钢结构连接后,尤其是采用焊接连接后,可以密闭而不渗漏。因而,钢材是制造各种容器(如高压容器、油罐、输气管道等)的良好材料。

5. 工业化程度高

钢构件在专业化的制造厂中生产,制造相对简单,成品的精度较高。制成的构件被运输到施工现场进行吊装和连接,机械化程度高,可以大大缩短施工周期;此外,还便于拆除、加固和改扩建,材料可回收利用。

6. 耐腐蚀性差

一般的钢材易锈蚀,在湿度大、有腐蚀介质的环境中更甚,影响其使用寿命,因而钢结构需要采取防腐蚀措施,如涂防腐蚀涂料、除锈等,其维护费用比砌体结构和钢筋混凝土结构高。

近年来,耐候钢和高耐候钢在结构中得到成功运用,虽然其强度和普通钢相同,但是其防腐能力比普通钢提高了2~4倍,而且价格较高。

7. 耐热性好,但耐火性差

实验表明:钢材的受热温度在150℃以内时,其性能变化不大;当受热温度超过150℃后,钢材的强度逐渐下降,塑性性能变差;当受热温度达到600℃时,钢材软化,强度降至零,几乎完全丧失承载力。

无防火措施的钢结构的耐火极限仅为15~20 min,因此,《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定:当钢结构的耐火时间不能达到规定的设计耐火极限要求时,应采取防火保护措施,如外包混凝土或砌体、涂防火涂料、包覆隔热材料等。

8. 低温脆性

温度较低时,钢材的强度提高,但塑性变差,呈脆性,可能会发生脆性断裂。在设计低温环境中的钢结构时要特别注意,以避免发生事故。

1.1.2 钢结构的应用

钢结构应用的领域和广度不仅与钢结构本身的特点有关,还受到我国国民经济发展情况的极大影响。中华人民共和国成立初期,我国钢产量每年只有十几万吨,钢结构的工程应用受到了一定的限制。但近年来,我国钢产量有了突飞猛进的提高,钢产量的增加以及钢结构施工、连接技术的进步,使得钢结构的应用领域越来越广泛。

根据钢结构的特点及工程实践经验,钢结构的应用领域如下:

1. 大跨度结构

钢结构因具有轻质高强的特点,故最适于建造大跨度的结构,如上海浦东国际机场(见图1-1)、鸟巢体育馆(见图1-2)、国家大剧院、广州会展中心等。



图 1-1 上海浦东国际机场



图 1-2 鸟巢体育馆

此外,钢结构还广泛应用于桥梁结构,尤其是大跨度的桥梁,如金门大桥、西陵长江大桥、徐浦大桥(见图 1-3)、汕头海湾大桥等。



图 1-3 徐浦大桥

2. 大型、重型工业厂房

当厂房的柱距和跨度都比较大时,一般设有重级工作制吊车,往往还要承受动力荷载,因此宜采用钢柱、钢屋架、钢吊车梁等构件,如宝山钢铁公司的很多车间、各冶金工厂及重型机器制造厂的车间等便采用了此种构件,如图 1-4 所示。



图 1-4 宝山钢铁公司的工业厂房

3. 高层建筑

改革开放以来,我国的高层建筑不仅如雨后春笋般拔地而起,而且也越来越高,使钢结构在高层建筑中得到广泛的应用,如深圳地王大厦(见图 1-5)、上海金茂大厦(见图 1-6)、上海环球金融中心等。



图 1-5 深圳地王大厦



图 1-6 上海金茂大厦

4. 高耸结构

高耸结构包括高压输电线路塔、变电架构、广播和电视发射塔、桅杆等。这些结构主要承受风荷载,而钢结构构件截面小、轻质高强,便于安装施工,能够取得较大的降级效益。例如,2009年竣工的广州新电视塔,高达600 m。

5. 可拆卸或移动的结构

流动式的展馆及建筑工地的临时房屋等,最适宜采用钢结构。因为钢结构便于装配、拆卸和搬迁。

6. 轻型钢结构

门式刚架结构及薄壁型钢组成的轻型钢结构(如轻型屋面的钢屋架等)具有自重轻、建造速度快、用钢量省等优点,近年来得到了广泛应用。

7. 容器和管道

钢材因强度高、韧性好且密闭性良好,故广泛用于高压气罐和管道、煤气罐、锅炉等。

8. 其他结构

运输通廊、各种管道支架、海上钻探平台、城市的人行过街天桥等,通常也都采用钢结构。

1.2 钢结构的发展

1.2.1 钢结构的发展历程

人类采用钢结构的发展历史和炼铁、炼钢技术的发展关系密切,对于一个国家来说,还和本国的钢铁产量有关。我国是最早用铁建造承重结构的国家。早在秦始皇时代(公元前200多年),就已经用铁建造桥墩。在公元前六七十年,就成功地用熟铁建造铁链桥。1696年,我国采用铸铁建成了著名的四川泸定大渡河链桥,其由9根桥面铁链和4根桥栏铁链构成,净跨长达100 m,桥宽2.8 m。无论是工程规模还是施工技术,我国当

时都处于世界领先水平。

此外,我国古代还建造了不少铁塔。例如,湖北荆州玉泉寺铁塔,共13层,高17.9 m,位于湖北当阳城西15 km的玉泉山东麓,始建于北宋嘉祐六年(1061年);江苏省镇江的甘露寺铁塔;山东济宁寺的铁塔;等等。这些古代建筑物都表明了我国在冶金技术方面具有较高水平。

中华人民共和国成立后,我国各项建设事业都有了突飞猛进的发展,冶金工业的飞速发展和钢铁产能的急剧增长,为我国钢结构的应用发展提供了良好的条件。

在建筑方面,第一个五年计划期间,我国很快出现了自己的钢铁冶金企业、重型机器制造业、汽车制造业、动力设备制造工业及一些轻化工业等。在这些建设事业中,很多厂房都采用了规模巨大的钢结构,其中主要恢复和扩建了鞍山钢铁公司、武汉钢铁公司和大连船厂等,新建了富拉尔基重型机器制造厂、长春汽车制造厂、哈尔滨和四川的三大动力厂、洛阳拖拉机厂及一些飞机制造厂等。武汉长江大桥、汉阳铁路桥都是在这一时期建造的,这一时期我国钢结构的发展较快。

钢结构的发展有赖于钢产量的提高,我国的冶金工业虽然在中华人民共和国成立后有了很大的发展,但是产量并不高,使得钢结构在我国的采用受到了客观条件的限制。20世纪60年代,为节约钢材,只在必须采用钢结构的重要或重型建筑中才采用钢结构,如1959年建成的人民大会堂,钢屋架的跨度达60.9 m;1961年建成的北京工人体育馆(见图1-7),屋盖采用了94 m直径的悬索结构;1965年建成的广州塔(见图1-8),塔身主体高454 m。还有1968年建成的南京长江大桥,1973年建成的上海万人体育馆。



图 1-7 北京工人体育馆



图 1-8 广州塔(老)

党的十一届三中全会以来,国家将工作重心转移到经济建设上来。随着经济建设的迅速发展和钢产量的提高,钢结构在我国建设事业中得到了更加广泛的应用。我国陆续建成了一批世界著名的高层建筑,如1998年建成的上海金茂大厦,高达420.5 m;2008年建成的上海环球金融中心,高492 m;2016年竣工的上海中心大厦,高632 m。这些高层建筑标志着我国超高层钢结构已进入世界前列。

1.2.2 钢结构的发展趋势

我国钢结构正处于迅速发展的前期,可以预计今后我国钢结构的发展趋势主要表现在以下几个方面:

1. 研发和推广应用高效钢材

使用高强度和高质量钢材,可有效减轻结构自重,对结构十分有利。《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定钢材宜采用 Q235、Q345、Q390、Q420、Q460 及 Q345GJ 钢,它在原有《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)的基础上增列了近年来已成功使用的 Q460 钢及《建筑结构用钢板》(GB/T 19879—2015)中的建筑结构用钢板(简称 GJ 钢板)。在我国标志性建筑(如国家体育场鸟巢、中央电视台总部大楼、首都新机场、上海环球金融中心等)的重要构件中,建筑结构用钢板和在厚度方向上具有抗层状撕裂性能的厚钢板(简称 Z 向钢板)均有应用,如 Q460GJEZ35、Q390GJEZ25、Q345GJDZ15、Q345GJDZ25。

钢构件的应用由传统型钢(如工字钢、槽钢、角钢)向新型 H 型钢、T 型钢转变。此外,冷弯薄壁型钢、热镀锌或镀铝锌钢板、耐候钢、耐火钢,以及高强度和超高强度低合金冷弯型钢的市场需求不断增多,市场前景将十分广阔。

2. 改进钢结构设计方法

在构件设计上仍采用当前国际上最先进的结构计算方法——以概率理论为基础的极限状态设计法,但由这个方法计算出的可靠度只是构件或某一截面的可靠度,而不是整个结构体系的可靠度,其整体性能的研究方法有待发展。对于钢结构的疲劳计算,由于疲劳极限状态的概念还不够确切,对各种有关因素的研究还不够,因此只能沿用传统的容许应力设计法。另外,结构设计上考虑优化理论的应用与计算机辅助设计及绘图都得到很大的发展。

3. 应用新型钢结构形式

今后,钢结构将在超高层、大跨度及特种结构等领域广泛应用,这对钢结构形式提出了更高的要求,预应力钢结构、空间结构、膜结构、组合结构等新型钢结构形式的应用也将更为广泛。

(1)预应力钢结构。预应力钢结构是在结构承受荷载前对钢结构构件采用一定的方法(如钢索张拉法、支座位移法、弹性变形法等)预加初应力,从而提高结构的承载力,改善结构的受力状态,以达到节约钢材的目的。目前,预应力钢结构在大跨度建筑结构领域应用广泛。例如,1994 年建成的攀枝花市体育馆采用的是预应力网壳屋盖,2011 年建成的内蒙古自治区鄂尔多斯体育中心采用的是巨拱、预应力钢索加空间桁架结构体系穹顶屋盖。在高层建筑中也有采用预应力钢结构的实例,如南非约翰内斯堡市的发展银行大楼、北京电视中心综合业务楼及北京新保利大厦等。在桥梁结构方面,预应力应用得也比较多,国内外许多悬索桥、斜拉桥都是预应力技术成熟的工程实践成果。

(2)空间结构。近年来,以网架和网壳为代表的空间结构有较大发展,不仅用于民用建筑,而且广泛用于工业厂房、机库、体育馆、展览中心、大剧院等,如北京奥运会国家体育馆、上海世博会场、广州亚运会体育场馆等。据统计,目前,网架和网壳的生产已趋于平稳状态,每年大约生产 $250 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

悬索结构是以一系列受拉的索为主要承重构件,这些索按一定规律组成各种不同形式的体系悬挂在边缘构件或支承构件上而形成的一种空间结构。悬索结构形式多样、布置灵活,能适应多种建筑平面,可充分利用钢材的强度,最大限度地利用材料,用钢量很

低。目前,悬索结构连接节点的加工技术和锚固系统已经比较完善,预应力张拉工艺及控制技术也非常成熟,但在我国房屋建筑方面的应用还较少,还需做进一步的推广。

(3)膜结构。膜结构是用高强度柔性薄膜材料与支撑体系相结合形成具有一定刚度的稳定曲面,能承受一定外荷载的空间结构形式。其造型自由轻巧、安装快捷、易于使用。膜结构重量轻,自重为 $0.02\sim 0.15\text{ kN/m}^2$,抗拉强度高,可达 $1\,400\text{ kN/m}^2$ 。膜结构可分为充气膜结构和张拉膜结构。前者是通过不断充气使膜结构内外保持一定的压力差,以保证膜结构体系的刚度,维持所设计的形状。后者是通过柱及钢架支承钢索张拉成型。

膜结构和悬索结构都处于发展阶段,用量均不大,主要用于体育场馆、机场、公园和街道景观等。目前,高中档膜材[如聚四氟乙烯(PTFE)、乙烯-四氟乙烯共聚物(ETFE)]仍需进口。国家游泳中心——水立方是目前世界上最大的膜结构工程,外围采用了先进、环保的 ETFE 膜材,由 3 000 多个气枕组成。

(4)组合结构。将混凝土和钢材两者组合在一起共同受力,发挥各自的长处,可有效节约材料。钢与混凝土的组合结构主要有压型钢板与混凝土组合板、钢与混凝土组合梁、型钢混凝土结构、钢管混凝土结构、外包钢混凝土结构五大类。

压型钢板与混凝土组合板(见图 1-9)是在压型钢板上浇灌混凝土,压型钢板既可以作为现浇混凝土的永久性模板,又可以作为楼板的底筋,这种结构一般用于高层建筑的组合楼盖。

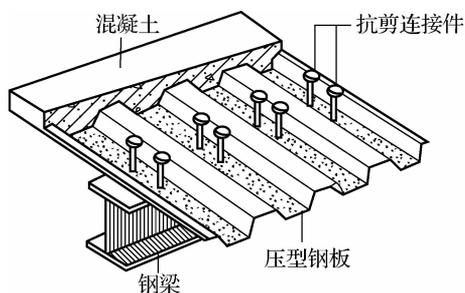


图 1-9 压型钢板与混凝土组合板

钢与混凝土组合梁是将钢梁与钢筋混凝土翼板通过抗剪连接件(圆柱头焊钉或槽钢)相连在一起共同工作,形成 T 形梁。按照混凝土翼板的类型来分,钢与混凝土组合梁有现浇混凝土板组合梁(见图 1-10)、预应力混凝土板组合梁、压型钢板组合梁(见图 1-11)等。在钢与混凝土组合梁中,混凝土受压,钢梁主要受拉与受剪,受力合理,并且侧向刚度大的混凝土板与钢梁连接在一起,很大程度上克服了钢结构容易发生整体失稳和局部失稳的弱点。

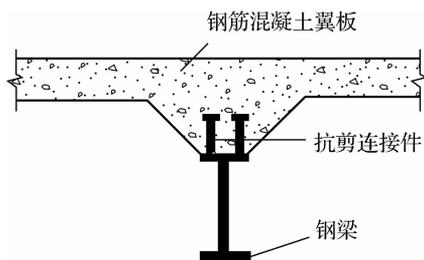


图 1-10 现浇混凝土板组合梁

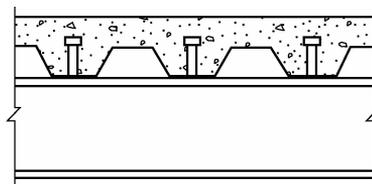


图 1-11 压型钢板组合梁

型钢混凝土结构又称钢骨混凝土或劲性钢筋混凝土结构,是在混凝土中主要配置型

钢并配有—定纵向钢筋和箍筋的结构。其中,型钢可轧制也可焊接,一般在大型建筑中经常配置焊接型钢,可灵活选择各个板件的宽度和厚度。型钢混凝土结构的截面形式如图 1-12 所示。型钢混凝土结构节省了—大量钢材,不仅强度和刚度明显增加,而且延性获得了很大的提高,是—种抗震性能很好的结构,尤其适用于地震区。



图 1-12 型钢混凝土结构的截面形式

钢管混凝土结构是在钢管内填充混凝土而形成的结构。在钢管内可以配置钢筋,也可以只填充混凝土。按截面形式的不同,钢管混凝土可分为圆钢管混凝土、方钢管混凝土和多边形钢管混凝土。由于柱中混凝土被钢管约束,能很好地共同工作,因此钢管混凝土的整体强度大大提高,并且具有良好的塑性和韧性。

外包钢混凝土结构是在外部配置型钢的混凝土结构(见图 1-13)。构件中的受力主筋—般由角钢代替并设置在构件四角,角钢的外表面与混凝土表面取平,或稍突出混凝土表面,横向箍筋与角钢焊成骨架,为了满足箍筋保护层厚度的要求,可将箍筋两端墩成球形,再与角钢内侧焊接,横向箍筋也可用小角钢代替。这种结构构造简单、连接方便、承载能力高、延性高、经济指标好,耐火性比钢结构好,但也存在—些缺点,如角钢外露、钢材易发生腐蚀。

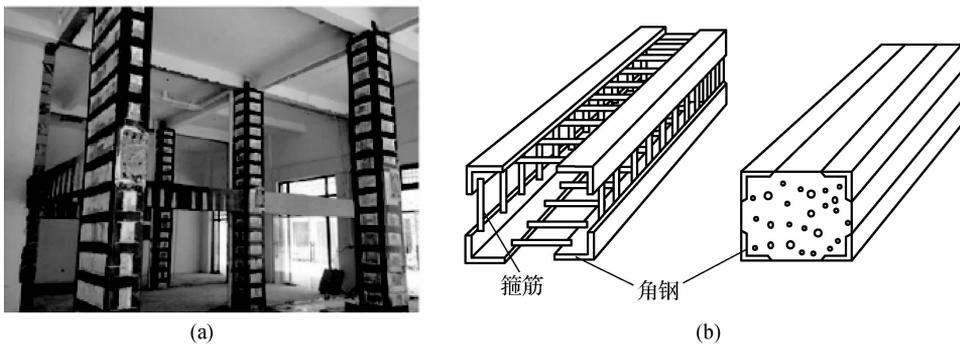


图 1-13 外包钢混凝土结构
(a)外包钢混凝土结构构件 (b)截面形式

1.3 钢结构的设计方法

1.3.1 结构的功能要求

结构在规定的—设计使用年限内,应满足安全性、适用性、耐久性等功能要求。

1. 安全性

结构在正常施工和正常使用时,应能承受可能出现的各种荷载及外部作用,以及在

偶然事件发生时和发生后,能保持必需的整体稳定性。

2. 适用性

结构在正常使用时有良好的工作性能,能满足预定的使用要求。

3. 耐久性

结构在正常维护的情况下,材料性能虽随时间变化,但仍能满足预定功能要求。

1.3.2 结构的作用及抗力

结构在施工和使用期内,除了自重外,还需要承受人群活荷载、设备机械荷载,以及风、雪、地震、温度等其他作用。这些使结构产生内力和变形的原因统称为作用。施加在结构上的集中力或均布力称为直接作用,即我们常说的荷载。引起结构外加变形或约束变形的其他原因,称为间接作用,包括地震、温度变化、基础不均匀沉降等。

施加于结构或构件上的若干种作用所引起的结构或构件的内力和变形,称为作用效应,习惯也常称为荷载效应,如弯矩、轴力、剪力、挠度等。作用效应取决于作用的方式、支承条件、构件的集合参数等。作用和作用效应都具有不确定性,是随机变量。

结构或构件的承载力,称为抗力。它与材料性能、构件截面几何参数、计算模式等因素有关。结构由于构件的制造误差、安装误差、生产工艺等的影响,其抗力具有不确定性,因此也是随机变量。

1.3.3 结构的可靠性和可靠度

结构的可靠性是指结构在规定的时间内和规定的条件下,完成预定功能的能力。这种能力既取决于结构的作用和作用效应,也取决于结构的抗力。

结构的可靠度是对结构可靠性的定量描述,即结构在规定的时间内(设计使用年限)内和规定的条件下(正常设计、正常施工、正常使用)完成预定功能的概率。

1.3.4 极限状态设计方法

除疲劳计算外,我国采用的是以概率论为基础的极限状态设计方法,它是由结构可靠度设计方法转变而来的。如果直接按照可靠指标进行设计,对很多设计工作者来说太过复杂,为此《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定采用分项系数设计表达式进行计算。

1. 结构的极限状态

整个结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求,此特定状态称为该功能的极限状态。极限状态是结构满足某一特定功能的临界状态。对于结构的各种极限状态均应规定明确的标志和限值,作为结构设计的依据。

结构的极限状态分为承载能力极限状态和正常使用极限状态。

(1) 承载能力极限状态。承载能力极限状态应包括:构件或连接的强度破坏、脆性断裂,因过度变形而不适用于继续承载,结构或构件丧失稳定,结构转变为机动体系和结构倾覆。

承载能力极限状态大体来说是指三种情况:一是指某一截面或连接部位的应力超过

材料强度;二是指构件整体失去稳定性;三是指构件或连接虽未出现破坏但产生了不适于继续承载的变形。

(2)正常使用极限状态。这种极限状态对应于结构或结构构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值。正常使用极限状态应包括:影响结构、构件和非结构构件正常使用或外观变形,影响正常使用的振动,影响正常使用或耐久性能的局部损坏(包括混凝土裂缝)。

由以上可知,结构的承载能力极限状态考虑了结构的安全性功能,若结构超过承载能力极限状态,则可能会影响结构的安全性,甚至发生破坏,造成生命财产的损失。而结构的正常使用极限状态考虑了结构的适用性和耐久性,即使结构超出正常使用极限状态,也不会威胁结构的安全。因此,对承载能力极限状态的失效概率的控制比正常使用极限状态更为严格。

2. 承载能力极限状态的设计表达式

按承载能力极限状态设计钢结构时,应考虑荷载效应的基本组合,必要时尚应考虑荷载效应的偶然组合,并应采用下列设计表达式进行设计。

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (1-1)$$

式中, γ_0 为结构重要性系数,对安全等级为一级或设计使用年限为100年及以上的结构构件不应小于1.1,对安全等级为二级或设计使用年限为50年的结构构件不应小于1.0,对安全等级为三级或设计使用年限为5年的结构构件不应小于0.9; S_d 为荷载基本组合的效应设计值; R_d 为结构构件抗力的设计值。

荷载基本组合的效应设计值 S_d 在钢结构设计中习惯用应力表达,对于承载能力极限状态, S_d 应按下列极限状态设计表达式中的最不利值确定。

由可变荷载控制的效应设计值:

$$\gamma_0 (\gamma_G \sigma_{Gk} + \gamma_{Q1} \sigma_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} \sigma_{Qik}) \leq f = f_k / \gamma_R \quad (1-2)$$

由永久荷载控制的效应设计值:

$$\gamma_0 (\gamma_G \sigma_{Gk} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} \sigma_{Qik}) \leq f = f_k / \gamma_R \quad (1-3)$$

式中, γ_G 为永久荷载的分项系数,当永久荷载效应对结构不利时,对由可变荷载效应控制的组合应取1.2,对由永久荷载效应控制的组合应取1.35,当永久荷载效应对结构有利时,不应大于1.0; γ_{Q1} 、 γ_{Qi} 为第1个和第*i*个可变荷载分项系数,一般情况下应取1.4,对标准值大于4 kN/m²的工业房屋楼面结构的活荷载,应取1.3; σ_{Gk} 为永久荷载标准值计算的荷载效应值; σ_{Q1k} 为基本组合中起控制作用的一个可变荷载标准值的效应; σ_{Qik} 为第*i*个可变荷载标准值的效应; ψ_{ci} 为可变荷载 Q_i 的组合值系数,对民用建筑楼、屋面均布活荷载,一般取0.7,具体可查阅《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012); f 为结构构件和连接的强度设计值(见表1-1和表1-2); f_k 为材料强度的标准值; γ_R 为抗力分项系数(见表1-3和表1-4)。

表 1-1 钢材的强度设计值

单位: N/mm²

钢材牌号	钢材厚度或直径/mm	强度设计值		
		抗拉、抗压、抗弯 f	抗剪 f_v	端面承压(刨平顶紧) f_{ce}
Q235	≤ 16	215	125	320
	$> 16, \leq 40$	205	120	
	$> 40, \leq 100$	200	115	
Q345	≤ 16	305	175	400
	$> 16, \leq 40$	295	170	
	$> 40, \leq 63$	290	165	
	$> 63, \leq 80$	280	160	
	$> 80, \leq 100$	270	155	
Q390	≤ 16	345	200	415
	$> 16, \leq 40$	330	190	
	$> 40, \leq 63$	310	180	
	$> 63, \leq 100$	295	170	
Q420	≤ 16	375	215	440
	$> 16, \leq 40$	355	205	
	$> 40, \leq 63$	320	185	
	$> 63, \leq 100$	305	175	
Q460	≤ 16	410	235	470
	$> 16, \leq 40$	390	225	
	$> 40, \leq 63$	355	205	
	$> 63, \leq 100$	340	195	

注 1:表中直径指实芯棒材直径,厚度是指计算点的钢材或钢管壁厚度,对轴心受拉和轴心受压构件是指截面中较厚板件的厚度。

注 2:冷弯型材和冷弯钢管,其强度设计值应按现行有关国家标准的规定采用。

表 1-2 建筑结构用钢板的强度设计值

单位: N/mm²

建筑结构用 钢板	钢材厚度或直径/mm	强度设计值		
		抗拉、抗压、抗弯 f	抗剪 f_v	端面承压(刨平顶紧) f_{ce}
Q345GJ	$> 16, \leq 50$	325	190	415
	$> 50, \leq 100$	300	175	

表 1-3 Q235、Q345、Q390、Q420、Q460 钢材抗力分项系数

厚度分组/mm	6~40	>40, ≤100
Q235	1.090	
Q345	1.125	
Q390		
Q420	1.125	1.180
Q460		

表 1-4 Q345GJ 钢材抗力分项系数

厚度分组/mm	6~16	>16, ≤40	>40, ≤60	>60, ≤100
抗力分项系数 γ_R	1.059	1.059	1.095	1.120

对于一般排架、框架结构,由可变荷载效应控制的组合可采用下列简化的设计表达式与式(1-3)同时使用。

$$\gamma_0(\gamma_G\sigma_{Gk} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi}\psi_{ci}\sigma_{Qik}) \leq f \quad (1-4)$$

3. 正常使用极限状态的设计表达式

按正常使用极限状态设计钢结构时,应考虑荷载效应的标准组合,对钢与混凝土组合梁,尚应考虑准永久组合,并应采用下列设计表达式进行设计。

$$S_d \leq C \quad (1-5)$$

式中, C 为结构或结构构件达到正常使用要求的规定限值,如变形、裂缝、振幅等的限值。

(1) 荷载标准组合的效应设计值 S_d 应按式(1-6)计算。

$$S_d = S_{Gk} + S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} S_{Qik} \leq [S] \quad (1-6)$$

式中, S_{Gk} 为永久荷载的标准值 G_k 在结构或构件中产生的变形值; S_{Q1k} 为起控制作用的第 1 个可变荷载标准值 Q_{1k} 在结构或构件中产生的变形值; S_{Qik} 为其他的第 i 个可变荷载标准值 Q_{ik} 在结构或构件中产生的变形值; $[S]$ 为结构或构件中的容许变形值。

(2) 荷载准永久组合的效应设计值 S_d 应按式(1-7)计算。

$$S_d = S_{Gk} + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} S_{Qik} \leq [S] \quad (1-7)$$

式中, ψ_{qi} 为第 i 个可变荷载的准永久值系数,具体可查阅《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)。

思考与练习

- (1) 与其他结构相比,钢结构有哪些特点?
- (2) 在我国,钢结构主要应用在哪些领域?
- (3) 高效钢材包括哪些种类?

- (4) 分项系数设计表达式中分项符号的含义是什么?
- (5) 结构的承载能力极限状态包括哪些计算内容? 正常使用极限状态包括哪些计算内容?
- (6) 某钢结构平台, 主梁上的结构自重为 5 kN/m , 检修时可能产生的最大活荷载为 18 kN/m , 跨度为 8 m , 主梁按两端简支条件, 求该梁跨中的弯矩设计值。

钢结构的材料

学习目标

- (1) 了解钢结构对材料的基本要求。
- (2) 掌握钢材的主要性能, 以及影响钢材性能和脆性破坏的主要因素。
- (3) 了解钢材的两种破坏形式。
- (4) 了解钢结构疲劳的基本概念、影响疲劳强度的主要因素、疲劳的计算方法。
- (5) 掌握建筑用钢材的种类、规格和表示方法。
- (6) 了解钢结构材料的选用原则。

2.1 钢结构材料概述

建筑钢结构承受着各种荷载, 且工作环境和情况各不相同。总体来说, 对钢结构所用钢材性能有以下要求:

1. 较高的屈服强度和抗拉强度

屈服强度是衡量钢材承载能力的指标。屈服强度高可以减小构件的截面, 从而减轻结构自重、节约钢材、降低造价。抗拉强度是衡量钢材极限抗拉能力的指标, 它直接反映了钢材内部组织的优劣。抗拉强度高可以增加钢材的安全保障。

2. 良好的塑性和韧性

钢材塑性好, 能在结构破坏前产生明显的塑形变形, 不易发生脆性破坏, 同时还能调整局部应力高峰, 使应力重分布且趋于均匀; 韧性好的钢材具有较强的抵抗脆性破坏的能力, 有利于承受动力荷载。

3. 良好的加工和可焊性能

钢结构使用的钢材具有良好的加工和可焊性能是指钢材在经过多道工序(冷加工、热加工、焊接等)后, 其材料性能(强度、塑性、韧性等)不会发生明显的改变, 否则会对结构产生不利影响。

4. 专用的特种性能

专用的特种性能主要是指钢材的耐候性、耐火性、Z 向性能(钢板沿厚度方向的受力性能,即抗层状撕裂性能)。在露天工作环境或有害介质作用下,对钢结构有较高的防腐要求,对重要钢结构建筑物还有较高的防火要求。若钢材自身具有耐候性、耐火性,则有利于钢结构的应用。对厚度较大的钢板(如高层建筑钢结构中的钢板)有 Z 向性能要求,即沿厚度方向具有抗层状撕裂的能力。

2.2 钢材的主要性能

钢材的主要性能包括力学性能、工艺性能、可焊性能及耐火、耐候性能。

2.2.1 钢材的力学性能和工艺性能

1. 强度

钢材的主要强度指标和变形性能是根据静载单向拉伸试验确定的。将标准试件(见图 2-1, $l_0/d=5$ 或 10)在常温($20\text{ }^\circ\text{C}\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$)下缓慢匀速加载,一次完成,可得到钢材的应力-应变($\sigma-\epsilon$)曲线,由此曲线可获得许多钢材性能的信息。

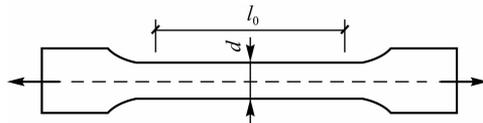


图 2-1 标准试件

l_0 —试件标距; d —试件直径

低碳钢(碳含量不大于 0.25%)单向拉伸试验的 $\sigma-\epsilon$ 曲线如图 2-2 所示。

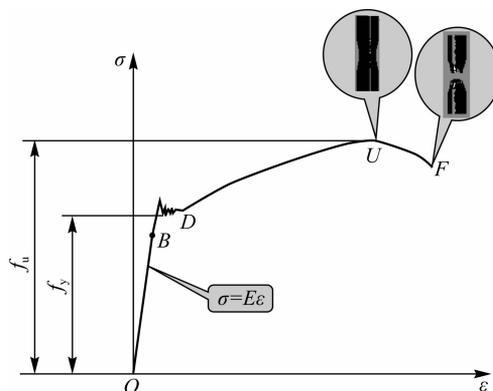


图 2-2 低碳钢单向拉伸试验的 $\sigma-\epsilon$ 曲线

低碳钢的 $\sigma-\epsilon$ 曲线有明显的屈服点。该曲线可以分为以下 4 个阶段:

(1)弹性段(OB 段)。OB 段为一直线,材料处于弹性状态,此阶段的变形称为弹性变

形。应力与应变成正比,比值为常数, $E=\sigma/\epsilon$, E 称为弹性钢材的弹性模量,一般可取值为 2.06×10^5 MPa。弹性模量反映钢材抵抗弹性变形的能力。

(2)弹塑性段(BD段)。应力超过B点后,材料开始出现塑性变形,应力与应变不再成正比关系,应力的增长滞后于应变的增长, $\sigma-\epsilon$ 曲线上波动,应力逐渐趋于平稳,应变迅速增加,直到D点,这就是钢材的屈服阶段。屈服阶段曲线的最高点和最低点分别称为上屈服强度和下屈服强度,因为下屈服强度较稳定,容易测定,所以取之为屈服点 f_y 。在拉伸过程中无明显屈服台阶的钢材(如经热处理的制造高强度螺栓的钢材,见图2-3),塑性变形小,设计时取相当于残余变形为0.2%时所对应的应力作为屈服点,这称为条件屈服点或名义屈服点。

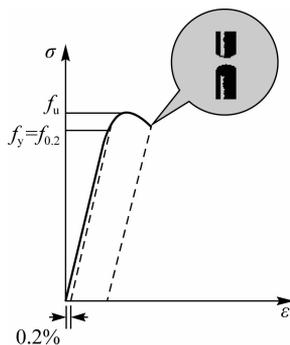


图 2-3 无明显屈服台阶的钢材的 $\sigma-\epsilon$ 曲线

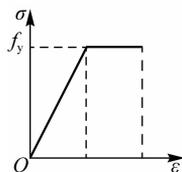
钢材所受力大于屈服点之后,会出现较大的变形,已不能满足使用要求。因此,在钢结构设计时,一般取 f_y 作为钢材强度取值的依据。 f_y 是衡量钢材的承载能力和确定钢材强度设计值的重要指标。

(3)强化段(DU段)。当应力超过屈服强度后,钢材的内部组织发生了改变,钢材得到强化,钢材抵抗塑性变形的能力部分恢复,随着荷载的增加, σ 缓慢增大,但 ϵ 增加较快。曲线最高点处的应力 f_u 称为抗拉强度或极限强度。

f_u 是钢材在破坏前所能承受的最大应力,它可以直接反映钢材内部组织的优劣,同时还可以作为钢材的强度储备。当钢结构采用塑性设计时,《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定钢材应满足屈强比 $\frac{f_y}{f_u} \leq 0.85$ 。

(4)颈缩破坏阶段(UF段)。当应力达到 f_u 时,试件被拉长,断面急剧缩小,荷载下降,直至断裂。

通过静力拉伸试验可见,在 f_y 之前, ϵ 很小;在 f_y 之后, ϵ 急剧增长。因此,通常将 σ 达到 f_y 之前的材料视为完全弹性体,将 σ 超过 f_y 之后的材料视为完全塑性材料,从而将钢材视为理想的弹-塑性材料。理想的弹-塑性材料的 $\sigma-\epsilon$ 曲线如图2-4所示。

图 2-4 理想的弹-塑性材料的 σ - ϵ 曲线

2. 塑性

塑性是指钢材破坏前产生塑性变形的能力。通过静力拉伸试验可得到衡量塑性的两个指标:伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 。

伸长率 δ 等于试件断裂前的永久变形(及伸长值)与原标定长度的百分比。试件有两种标距($l_0/d=5$ 和 $l_0/d=10$),相应的伸长率用 δ_5 和 δ_{10} 表示,标准试件一般取 δ_5 。伸长率 δ 的计算公式为

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

式中, l_0 为试件原标距长度(见图 2-1); l_1 为试件拉断后的标距长度。

断面收缩率 ψ 是指试件被拉断后,颈缩区的断面面积缩小值与原断面面积比值的百分比。断面收缩率 ψ 的计算公式为

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

式中, A_0 为试件原断面面积; A_1 为试件拉断后颈缩区的断面面积。

伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 越大,钢材的塑性越好。由于在测量试件的断面面积时容易产生较大的误差,因而钢材塑性指标仍然采用伸长率作为保证要求。

3. Z 向性能

Z 向性能可用厚度方向(Z 向)的断面收缩率 ψ_z 进行衡量,Z 向收缩率试验的试件采用圆柱体,直径 $d_0=10$ mm(板厚大于 25 mm),长度 L_0 不小于 $1.5d_0$,并沿钢板轧制方向的任一端的中部截取。试件被拉断后,其断口处横截面面积 A_1 比原横截面面积 A_0 的缩减百分比值 ψ_z ,称为厚度方向的断面收缩率。

根据《建筑结构用钢板》(GB/T 19879—2015)的规定,对于厚度方向的钢板,可分为 3 种厚度方向性能级别,即 Z15、Z25 和 Z35(字母 Z 后面的数字为断面收缩率的指标),它们分别表示 $\psi_z \geq 15\%$ 、 $\psi_z \geq 25\%$ 和 $\psi_z \geq 35\%$ 。

4. 冲击韧性

钢材的冲击韧性用冲击试验来确定。冲击韧性是衡量钢材在冲击荷载(动力)作用下抵抗脆性破坏的力学性能指标。

冲击韧性反映了钢材在塑形变形和断裂中吸收能量的能力,用断裂时吸收的冲击功 A_{kv} (单位为 J)来表示。其试验原理是用摆锤将带有 V 形缺口的长方形试件(试件的截面尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,长度为 55 mm)击断,将计算出的击断所需的冲击功 A_{kv} 作为冲击韧性指标。 A_{kv} 越大,表明钢材的冲击韧性越好。冲击韧性试验装置如图 2-5 所示。

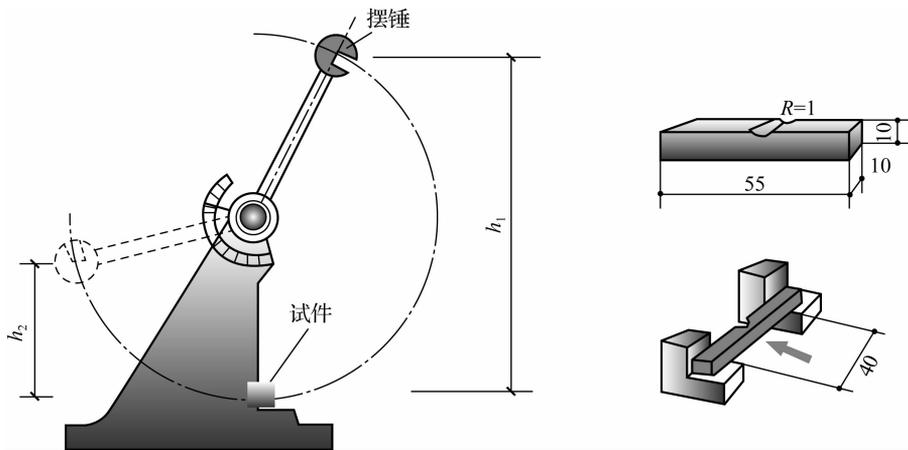


图 2-5 冲击韧性试验装置
 h_1 —起始高度； h_2 —终止高度

钢材的冲击韧性除与材质密切相关外，还与钢材的轧制方向有关，顺着轧制方向（纵向），钢材的冲击韧性值高，横向则较低。现钢材标准规定按纵向采用。钢材的冲击韧性还与试验的温度有关，低温下，钢材的冲击韧性急剧下降，故应测定负温下的冲击韧性。钢材的冲击韧性根据钢材质量等级的不同，分为 $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 几个指标。如《碳素结构钢》(GB/T 700—2006)中给出了钢材常温及负温冲击韧性指标，其中，对于 Q235B($+20\text{ }^{\circ}\text{C}$)、Q235C($0\text{ }^{\circ}\text{C}$)、Q235D($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)，均要求 $A_{kv} \geq 27\text{ J}$ 。

5. 冷弯性能

冷弯性能是描述钢材在冷加工下(常温下加工)产生塑性变形时，对发生裂缝的抵抗能力。冷弯性能是判别钢材塑性变形能力和冶金质量(如非金属夹杂和分层等)的综合指标。

在常温下根据试样厚度，按规定的弯心直径 d 将试件弯曲 180° ，检查试件的外表面，若无裂缝、裂断或分层，则冷弯试验合格，如图 2-6 所示。冷弯试验是比单向拉伸试验更为严格的一种试验方法，常作为拉伸试验和冲击试验的补充试验方法。

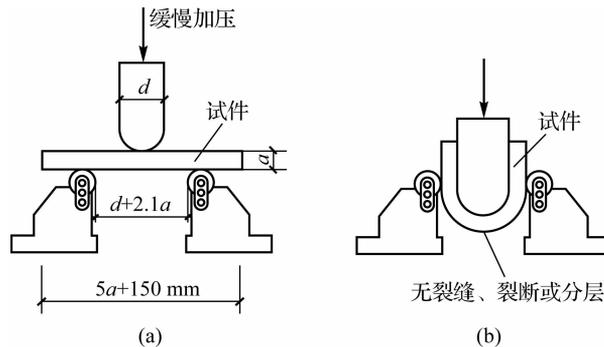


图 2-6 钢材的冷弯试验
 (a) 弯曲前 (b) 弯曲后

2.2.2 钢材的可焊性能

钢材的焊接是指将焊缝及其附近的母材金属升温熔化,再冷却凝结成一体的过程。钢材的可焊性则指在一定的焊接工艺条件下,所施焊的焊缝溶敷金属和母材金属均不产生裂纹,且焊接头的力学性能不低于母材的力学性能。钢材可焊性的优劣实际上是指钢材在采用一定的焊接方法、焊接材料、焊接工艺参数及一定的结构形式等条件下,获得合格焊缝的难易程度。

影响钢材可焊性的因素很多,除与品种(是非合金钢还是低合金钢、合金钢)、化学成分(碳、锰、合金元素、有害元素等)、规格(是厚板还是薄板)等内在因素有关外,还与节点复杂程度(是简单节点还是复杂节点)、约束程度(焊缝能否自由收缩)、焊接的环境温度(是常温还是负温)、焊接材料(焊条、焊剂等是否与母材匹配等)、焊接工艺(焊接方法、坡口形式和尺寸、焊前预热和焊后热处理等)等外在因素相关。

《钢结构焊接规范》(GB 50661—2011)根据钢材分类、受力状态、板厚和钢材的碳当量,将焊接难度分为易、一般、较难和难四个等级。对于难焊钢材,需采取预热措施和控制施焊工艺来获得合格的焊缝。

2.2.3 钢材的耐火、耐候性能

1. 耐火性能

具有耐火性能的钢结构能在一定的高温下保持结构在一定时间内不垮塌,以保证人员和物资安全撤离火灾现场。保证建筑物安全性的一个许用指标是钢材在 600 °C 高温时,屈服点应具有常温屈服点的 2/3。耐火钢一般是在低碳钢中添加钒、钛、铌合金元素。当有防火要求时,使用具有耐火性能的钢材,减少或减薄防火涂料的用量,可以达到良好的经济效果。

目前,国内外都已开发出具有一定耐火性能的钢材。宝山钢铁集团的耐火钢系列和耐候耐火钢系列在 600 °C 高温下,屈服点的下降幅度不大于其标准值的 1/3,可以减少使用或省去外涂或外包防火材料。

2. 耐候性能

普通钢材在自然环境下每 5 年的腐蚀厚度可达 0.1~1 mm,若处于腐蚀的气体环境中,则更为严重。对建筑钢材的耐候性能要求是:在自然环境下保证结构可裸露使用,耐候性是普通钢材的 2~8 倍。耐候钢一般是在低碳钢或低合金钢中添加铜、磷、铬、锂等合金元素,以提高抗腐蚀能力。钢材表面也可先镀锌或镀铝锌,再涂彩色聚酯类涂料,以提高钢材的耐候性能,但这种工艺只能用来生产彩涂薄钢板。国内常用的耐候钢标准有《耐候结构钢》(GB/T 4171—2008)和《铁道车辆用耐大气腐蚀钢》(TB/T 1979—2014)。

2.3 钢材的破坏形式

钢材的破坏形式有塑性破坏和脆性破坏。

1. 塑性破坏

塑性破坏也称延性破坏,是由于构件应力超过屈服点,并且达到抗拉极限强度 f_u 后,构件产生明显的变形并断裂。塑性破坏前,构件有明显的变形,破坏历时长,断口发暗,易于及时发现和采取措施进行补救,不至于引起严重后果。另外,构件在塑性变形后出现内力重分布,使结构中原先应力不均匀的部分趋于均匀,有可能提高结构的承载能力。

2. 脆性破坏

脆性破坏前没有明显的变形和征兆,破坏时产生的变形远比材料应有的变形能力小,破坏时的应力常小于钢材的屈服强度 f_y ,破坏发生突然,断口平齐,具有光泽的晶粒状,无法及时察觉和采取补救措施,会引起严重后果,危及人们的生命财产安全。在设计、制作和使用构件的过程中,应充分考虑各方面因素,尽量发挥材料的塑性,避免脆性破坏发生的可能性。

2.4 影响钢材性能的因素

影响钢材性能的因素很多,应格外重视会使钢材产生脆性破坏的因素。

2.4.1 化学成分的影响

钢是以铁(Fe)和碳(C)为主要成分的合金,虽然碳和其他元素[包括硅(Si)、锰(Mn)、硫(S)、磷(P)、氧(O)、氮(N)等]在钢中所占比例甚少,但对钢材的性能特别是力学性能产生重要的影响。普通碳素钢中,铁占99%,碳和其他元素占1%;普通低合金钢中还含有小于5%的合金元素,如铜(Tu)、钒(V)、钛(Ti)、铌(Nb)、铬(Cr)等。

碳是各种钢中最主要的元素之一。随着含碳量的提高,钢的屈服强度和抗拉强度逐渐变大,而塑性和韧性特别是低温冲击韧性下降,冷弯性能、焊接性能和抗锈蚀性能等也变差。规范推荐的钢材的含碳量均不超过0.22%,对于焊接结构则严格控制在0.2%以内,即在低碳钢范围内。

硫是有害元素,常以硫化铁形式夹杂于钢中。当温度达800~1000℃时,钢材会因硫化铁熔化而变脆,在进行焊接或热加工时极可能出现热裂纹,这种现象称为热脆现象。此外,硫还会降低钢材的冲击韧性、疲劳强度、抗锈蚀性能和焊接性能等,因此应严格控制钢材中硫的含量,碳素结构钢的硫含量一般不大于0.035%~0.050%,低合金高强度结构钢的硫含量一般不大于0.020%~0.035%。

磷可提高钢的强度和抗锈蚀能力,但会严重地降低钢的塑性、韧性、冷弯性能和焊接性能,特别是在温度较低时会促使钢材变脆,这种现象称为冷脆现象。因此,磷的含量也要严格控制,碳素结构钢的磷含量一般不大于0.035%~0.045%,低合金高强度结构钢的磷含量一般不大于0.025%~0.035%。

锰是有益元素,在普通碳素钢中,它是一种弱脱氧剂,当锰含量在合理范围内时,可以提高钢材强度,消除硫、氧对钢材的热脆影响,改善钢的冷脆倾向,同时不显著降低塑

性和韧性。但随着锰含量的增加,钢材的焊接性能也随之降低,因此锰含量也不宜过多,碳素结构钢的锰含量一般不大于1.4%,低合金高强度结构钢的锰含量一般不大于1.7%。

硅是有益元素,在普通碳素钢中,它是一种强脱氧剂,常与锰共同除氧,生产镇静钢。适量的硅,可以细化晶粒,提高钢的强度,并且对塑性、韧性、冷弯性能和焊接性能无显著不良影响。硅的含量在碳素结构钢中不应大于0.35%,在低合金高强度结构钢中不应大于0.5%。过量的硅会恶化焊接性能和抗锈蚀性能。

钒、铌、钛等元素在钢中形成微细碳化物,适量加入,能起细化晶粒和弥散强化的作用,从而提高钢材的强度和韧性,又可保持良好的塑性。铬、镍是提高钢材强度和耐热性的合金元素。

氧和氮属于有害元素。氧的作用和硫类似,使钢热脆。氮的作用和磷类似,使钢冷脆。因此,氧和氮的含量均应严格控制,一般氧的含量应低于0.05%,氮的含量应低于0.008%。

2.4.2 冶炼、浇铸、轧制和热处理的影响

钢材在生产过程中要经过冶炼、浇铸和轧制等工艺过程。冶炼是将生铁水、废钢和石灰石等原料加入炼钢炉,用燃料加热至1650℃,使铁水中多余的元素经过一系列的反应被除去,形成符合要求的钢种。传统的浇铸和轧制方法是在钢炼好后,将钢液倒入钢锭模中制作成大的钢锭,然后轧制成长宽适当的钢坯,再轧成各种钢材。近20年来迅速发展的浇铸和轧制方法是连铸连轧,即直接将炼好的钢水在钢厂连铸机中浇铸成近终型的钢坯,然后经轧机连续轧制成各种钢材。

钢在熔炼的氧化过程中会生成氧化铁等杂质,使钢的性能变差,因而在浇铸过程中需将与氧亲和力比较高的脱氧剂加入钢液中脱氧。根据所使用的脱氧剂的不同,钢可分为沸腾钢(锰做脱氧剂)、镇静钢(硅做脱氧剂)、特殊镇静钢(硅脱氧后加铝补充脱氧),其脱氧程度依次增大。

在这些过程中,可能会出现化学成分偏析、非金属夹杂物、裂纹、气泡、分层等冶金缺陷而影响钢材性能。

(1)偏析。金属结晶后化学成分分布不均匀的现象,称为偏析。偏析主要是硫、磷偏析,其后果是偏析区钢材的塑性、韧性、可焊性变差。

(2)非金属夹杂物。非金属夹杂物指钢材中的非金属化合物,如硫化物、氧化物。硫化物使钢材热脆,氧化物使钢材的力学性能和工艺性能大大降低。

(3)裂纹。裂纹指钢材中存在的微观裂纹。它会严重降低钢材的冷弯性能、塑性和冲击韧性。

(4)气泡。气泡指浇铸时由FeO和C作用所生成的CO气体不能充分逸出而滞留在钢锭里形成的微小空洞。它会影响钢材的力学性能。

(5)分层。浇铸时的非金属夹杂物在轧制后可能造成钢材分层,分层处易被锈蚀,且分层使钢材性能变差。

2.4.3 钢材的硬化

1. 时效硬化

随着时间的增加,纯铁体中有一些数量极少的碳和氮的固溶物质析出,使钢材的屈服点和抗拉强度提高,塑性和韧性下降,这种现象称为时效硬化,如图 2-7(a)所示。时效硬化的过程一般很长,但若在材料发生塑性变形后,将其加热到 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$,则可使时效硬化加速发展,这种方法称为人工时效硬化,如图 2-7(b)所示。对于某些重要的结构,要求检验钢材在人工时效后的冲击韧性,以保证结构具有足够的抗脆性破坏的能力。

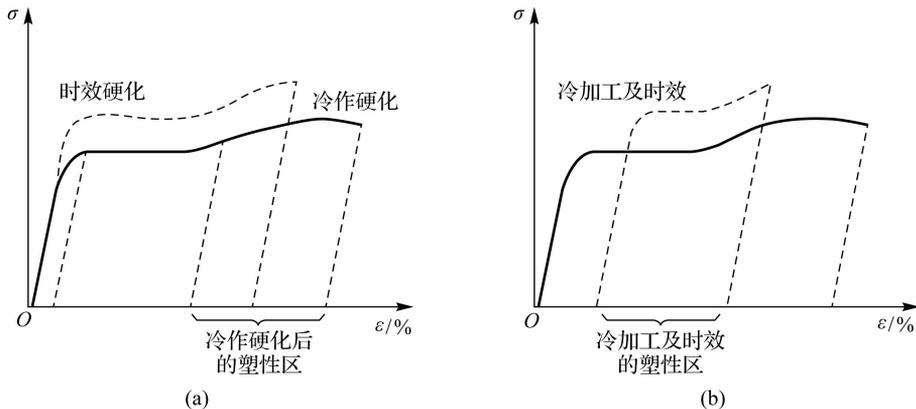


图 2-7 硬化对钢材性能的影响
(a)时效硬化与冷作硬化 (b)人工时效硬化

2. 冷作硬化

冷加工可使钢材产生很大的塑性变形,产生塑性变形的钢材被重新加荷,可提高其屈服点,降低塑性和韧性,这种现象称为冷作硬化,如图 2-7(a)所示。

钢结构在制造过程中一般都需要进行冷加工(冷拉、冷弯、冲孔、机械剪切等),这些工序会引起冷作硬化,增加发生脆性破坏的危险,这对直接承受动力荷载的结构尤为不利。

不管哪一种硬化,都会降低钢材的塑性和韧性,对钢材不利。因此,钢结构设计中一般不利用硬化后提高的强度,而且对于直接承受动力荷载的结构还应设法消除硬化的影响。例如,对于经过剪切机剪切的钢板,为了消除其剪切边缘的冷作硬化,可采用火焰烧烤使之“退火”或将边缘刨去 $3\sim 5\text{ mm}$ 。

2.4.4 温度的影响

钢材对温度相当敏感,温度升高和降低都使钢材的性能发生变化。

1. 正温范围

在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,对钢材的性能无影响;在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,随温度的升高,总的趋势是钢材的抗拉强度 f_u 、屈服强度 f_y 、弹性模量 E 降低,塑性增大。在 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,钢材的抗拉

强度略有提高,塑性降低,脆性增加,即蓝脆现象,该温度区段称为蓝脆区,在蓝脆区进行热加工,易引起裂纹。当温度超过 $250\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,钢材会产生徐变。徐变是指在应力持续不变的情况下,钢材以很缓慢的速度继续发生变形的现象,此时, f_y 、 f_u 显著下降,伸长率 δ 明显增大。在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,钢材的弹性模量趋于零,承载能力几乎完全丧失。温度对钢材性能的影响如图 2-8 所示,总的趋势是随着温度的升高,钢材的强度降低,变形增大。

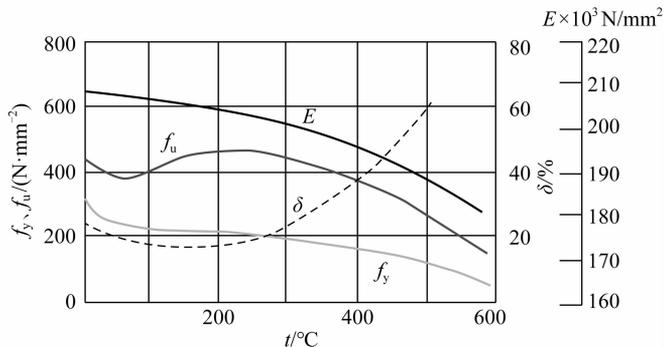


图 2-8 温度对钢材性能的影响

2. 负温范围

当温度低于常温时,钢材的脆性会随温度的降低而增加,特别是负温范围对冲击韧性的影响十分突出。从图 2-9 中的曲线可以看出,曲线的左端和右端都比较平缓,温度所带来的变化较小,中间部分($T_2\sim T_1$)曲线较陡, A_{KV} 急剧下降, T_2 与 T_1 之间称为温度转变区,材料由塑性破坏转到脆性破坏都是在这一区间内完成的,该区段曲线的最陡点所对应的温度 T_c 称为脆性转变温度。而且不同的钢材其脆性转变区的温度不同,必须通过试验确定。结构设计中要求完全避免脆性破坏,因此,结构所处温度必须高于 T_1 ,但不要求一定高于 T_2 ,因为这样虽然安全,但是对材料要求过严将会造成浪费。

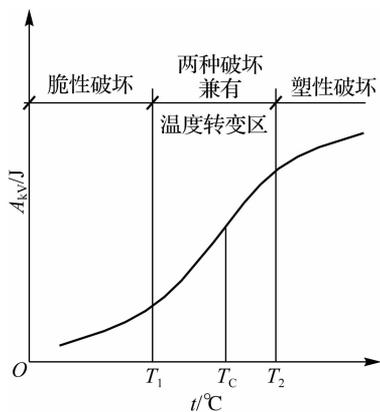


图 2-9 低温对钢材冲击韧性的影响

2.4.5 应力集中的影响

在钢构件中若存在开孔、凹槽或截面的宽度或厚度发生突然改变的情况,则构件中的应力分布将变得很不均匀,在缺陷或截面变化处,应力线曲折、密集,出现应力高峰,这种现象称为应力集中(见图 2-10)。应力集中会造成钢构件塑性降低,脆性破坏的危险性增加。

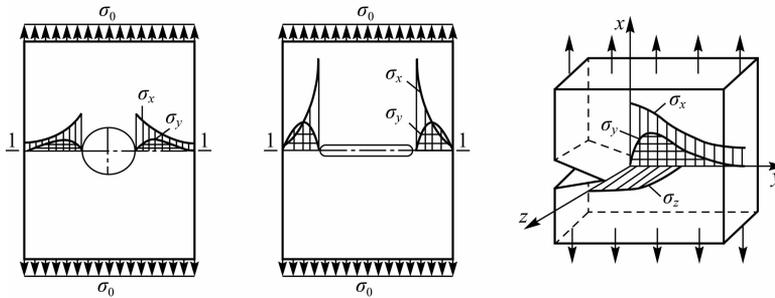


图 2-10 孔洞及槽孔处的应力集中现象

图 2-11 为开槽不同的 4 种拉伸试验的应力-应变曲线,可以看出截面槽口改变越大,应力集中现象越明显,抗拉强度越高,但塑性越差,脆性破坏的倾向越大。

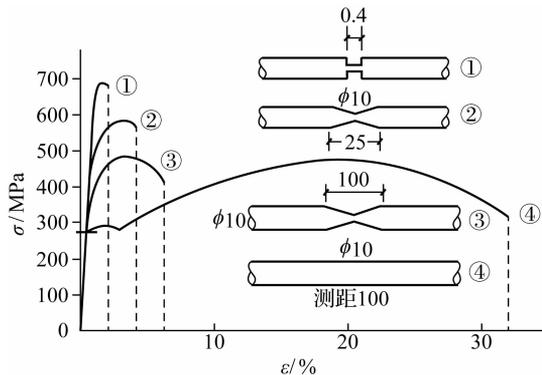


图 2-11 开槽不同的 4 种拉伸试验的应力-应变曲线

由于钢结构所采用的钢材的塑性较好,当内力增大时,应力不均匀现象会逐渐趋于平缓,因此不会影响界面的极限承载能力。对于承受静力荷载作用、在常温下工作的构件,设计时可不考虑应力集中的影响。但是,对于低温下直接承受动力荷载的构件,若应力非常集中,再加上其他不利影响,则很容易发生脆性破坏,因此设计时应使截面构造合理,如截面必须改变,则应采取构造措施使其平缓过渡,减小应力集中。

2.4.6 残余应力及疲劳因素的影响

钢材在冶炼、轧制、焊接、冷加工等过程中因不均匀的冷却、组织构造的变化而在其内部产生的不均匀应力,称为残余应力。残余应力在构件内部相互平衡而与外力无关,但是其存在易使钢材发生脆性破坏的可能。残余应力虽对构件的强度无影响,但会对构

件的变形(刚度)、疲劳及稳定承载力产生不利影响。

钢材在重复荷载作用下会产生疲劳破坏,其破坏强度低于静力荷载作用下的抗拉强度,并呈现脆性破坏的特征。关于钢材的疲劳将在 2.5 节中详细阐述。

2.4.7 复杂应力作用的影响

在单向拉伸试验中,当单向应力达到屈服点 f_y 时,钢材由弹性状态转入塑性状态。在复杂应力(双向应力或三向应力)作用下,钢材的屈服不能以某一方向的应力达到屈服点 f_y 来判断,而是要通过能量强度理论计算的折算应力 σ_{eq} 与钢材在单向应力下的 f_y 相比较来判断。

用主应力表示折算应力 σ_{eq} [见图 2-12(a)],即

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2-3)$$

用应力分量表示折算应力 σ_{eq} [见图 2-12(b)],即

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2-4)$$

当 $\sigma_{eq} < f_y$ 时,钢材处于弹性状态;当 $\sigma_{eq} \geq f_y$ 时,钢材处于塑性状态。

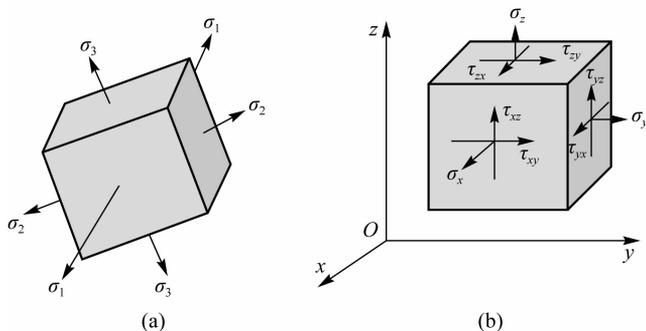


图 2-12 复杂应力作用的影响

当 3 个主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 同号且数值相近时,从式(2-4)中可看出,无论应力值多么大,材料都很难进入塑性状态,甚至破坏时也没有明显的塑性变形,材料处于脆性状态。但是当一个方向上的应力为异向,且同号的两个应力数值相差较大时,材料比较容易进入塑性状态。所以,在构造设计上应尽量避免同号三向应力,以免发生脆性破坏。当钢材厚度较薄时,厚度方向上的应力可以忽略不计。

在一般梁中,只存在正应力 σ 和剪应力 τ ,即 $\sigma_y = \sigma_z = 0$,且钢材厚度较薄,故厚度方向上的应力可忽略不计,则式(2-4)可简化为

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (2-5)$$

当只有剪应力 τ 时,即 $\sigma = 0$,则

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3\tau^2} \quad (2-6)$$

若取 $\sigma_{eq} = f_y$,则

$$\tau = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \approx 0.58f_y = f_{vy} \quad (2-7)$$

因此,《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定钢材的抗剪强度设计值 f_{vy} 为抗拉强度设计值 f_y 的 0.58 倍。

2.5 钢材的疲劳和疲劳计算

钢材的疲劳破坏是指在连续重复荷载作用下产生微观裂缝并不断扩展,直至最后出现突发性的断裂破坏。破坏时,塑性变形极小,应力小于材料的极限抗拉强度,甚至低于屈服强度,是一种脆性破坏,危险性较大。

通常,钢结构的疲劳破坏属于高周疲劳,破坏时总应变小,荷载循环次数多。因此,《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定:直接承受动力荷载重复作用的钢结构构件及其连接,当应力变化的循环次数 n 等于或大于 5×10^4 次时,应进行疲劳计算。

2.5.1 影响疲劳强度的因素

影响疲劳强度的因素有以下 3 种。

1. 微观裂纹和应力集中

钢材在生产和制造过程中会产生很多局部微小缺陷,如化学成分偏析,非金属夹杂物,轧制和加工(冲孔、切割等)产生的裂纹,焊接时残留的气孔、夹渣等,或截面几何形状、厚度突然改变处。在重复连续荷载作用下,这些部位出现应力集中现象,应力分布不均匀,产生微小裂纹并逐渐开展,截面被削弱,有效截面面积相应地逐渐缩小。当荷载作用达到一定的循环次数时,截面因承受不了外部荷载而发生脆性断裂,即疲劳破坏。

不同的连接类别,会引起不同的应力集中,包括连接的外形变化和内在缺陷影响。因此,连接类别也是影响疲劳强度的因素之一。疲劳计算的构件和连接分类见附录 1,根据构件和连接的细部构造引起的应力集中程度及焊接残余应力由低到高将构件和连接形式分为 8 类。

2. 应力幅和应力循环次数

在循环荷载作用下,应力从最大到最小重复一次为一次循环,应力幅 $\Delta\sigma$ 是每次应力循环中最大拉应力 σ_{\max} 与最小拉应力或压应力 σ_{\min} (其中,拉应力取正值,压应力取负值)之差,即 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 。应力循环内的应力幅保持常量,称为常幅(见图 2-13)。应力循环内的应力幅随机变化,则称为变幅(见图 2-14)。

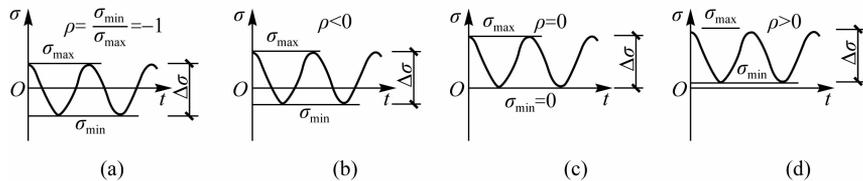


图 2-13 常幅应力谱

(a) 全对称应力循环 (b) 异号应力循环 (c) 脉动应力循环 (d) 同号应力循环

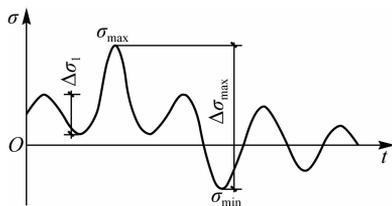


图 2-14 变幅应力谱

结构或构件破坏时所经历的应力变化次数 n 称为循环次数。应力幅越大,钢结构构件和连接产生疲劳破坏的应力循环次数越少,反之越多。当应力幅小于一定数值时,即使应力循环次数无限多,构件都不会产生疲劳破坏。

对于焊接结构,焊接会使焊缝处产生残余应力,其大小通常达到了屈服强度 f_y ,此时若施加一循环荷载,则外部应力将从 σ_{\min} 增大到 σ_{\max} ,焊缝附近应力已经达到 f_y (已进入塑性状态)的部分,其实际应力为 $\sigma_{\max} = f_y$,塑性区有所扩大;当外部应力由 σ_{\max} 下降到 σ_{\min} 时,该处的实际应力则由 f_y 减小到 $f_y - \Delta\sigma$,然后再升至 f_y ,如此往复循环,应力比 $\rho = \frac{f_y}{f_y - \Delta\sigma}$ 。由此可以看出,无论名义最小应力 σ_{\min} 和名义最大应力 σ_{\max} 为何值,只要应力幅 $\Delta\sigma$ 相同,其实际应力均相同。这表明焊接结构的疲劳强度与最大、最小名义应力和应力比无关,而与应力幅相关。

3. 应力比

应力循环特征也可用应力比 ρ 来表示,应力比等于最大应力和最小应力之比(拉应力取正值,压应力取负值),即 $\rho = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}$ 。 $\rho = -1$ 为全对称应力循环[见图 2-13(a)],其疲劳强度最低; $\rho < 0$ 为异号应力循环[见图 2-13(b)]; $\rho = 0$ 为脉动应力循环[见图 2-13(c)]; $\rho > 0$ 为同号应力循环[见图 2-13(d)]。

2.5.2 疲劳计算

现阶段对不同类型构件连接的疲劳裂缝形成、扩展及断裂这一全过程的极限状态,包括其严格定义和影响发展过程的有关因素都还研究不足,所掌握的疲劳强度数据也只是结构抗力表达式中的材料强度部分,所以疲劳计算仍按容许应力法进行验算。荷载应采用标准值,不考虑荷载分项系数和动力系数,而且应力按弹性状态计算。

疲劳计算的部位一般是受拉区应力集中比较突出处。在不出现拉应力(完全压应力)的循环中,裂纹即使出现也不会继续发展,因此,《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定这种情况可不予验算;另外,构件表面温度高于 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,处于海水腐蚀环境和低周-高应变疲劳状态等情况不属于此计算范畴。

1. 简化计算

当结构所承受的应力幅较低时,可用下列公式验算疲劳强度。

(1) 正应力幅的疲劳计算。

$$\Delta\sigma < \gamma_1 [\Delta\sigma_L]_{1 \times 10^8} \quad (2-8)$$

对焊接部位:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

对非焊接部位:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - 0.7\sigma_{\min}$$

(2)剪应力幅的疲劳计算。

$$\Delta\tau < [\Delta\tau_L]_{1 \times 10^8} \quad (2-9)$$

对焊接部位:

$$\Delta\tau < \tau_{\max} - \tau_{\min}$$

对非焊接部位:

$$\Delta\tau < \tau_{\max} - 0.7\tau_{\min}$$

式中, $\Delta\sigma$ 为构件或连接计算部位的正应力幅(N/mm²); σ_{\max} 为计算部位应力循环中的最大拉应力(取正值)(N/mm²); σ_{\min} 为计算部位应力循环中的最小拉应力或压应力(N/mm²), 拉应力取正值, 压应力取负值; $\Delta\tau$ 为构件或连接计算部位的剪应力幅(N/mm²); τ_{\max} 为计算部位应力循环中的最大剪应力(N/mm²); τ_{\min} 为计算部位应力循环中的最小剪应力(N/mm²); $[\Delta\sigma_L]_{1 \times 10^8}$ 为正应力幅的疲劳截止限(N/mm²), 根据附录 1 按表 2-1 采用; $[\Delta\tau_L]_{1 \times 10^8}$ 为剪应力幅的疲劳截止限(N/mm²), 根据附录 1 按表 2-2 采用; γ_t 为板厚或直径修正系数, 对于横向角焊缝连接和对接焊缝连接, 当连接板厚 $t > 25$ mm 时, $\gamma_t = (25/t)^{0.25}$, 对于螺栓轴向受拉连接, 当螺栓的公称直径 $d > 30$ mm 时, $\gamma_t = (30/d)^{0.25}$, 其余情况取 $\gamma_t = 1.0$ 。

表 2-1 正应力幅的疲劳计算参数

构件与连接类别	构件与连接相关系数		循环次数 n 为 2×10^6 次的容许正应力幅 $[\Delta\sigma]_{2 \times 10^6} / (N \cdot mm^{-2})$	循环次数 n 为 5×10^6 次的容许正应力幅 $[\Delta\sigma]_{5 \times 10^6} / (N \cdot mm^{-2})$	疲劳截止限 $[\Delta\sigma_L]_{1 \times 10^8} / (N \cdot mm^{-2})$
	C_z	β_z			
Z1	1.920×10^{12}	4	176	140	85
Z2	861×10^{12}	4	144	115	70
Z3	3.91×10^{12}	3	125	92	51
Z4	2.81×10^{12}	3	112	83	46
Z5	2.00×10^{12}	3	100	74	41
Z6	1.46×10^{12}	3	90	66	36
Z7	1.02×10^{12}	3	80	59	32
Z8	0.72×10^{12}	3	71	52	29
Z9	0.50×10^{12}	3	63	46	25
Z10	0.35×10^{12}	3	56	41	23
Z11	0.25×10^{12}	3	50	37	20

(续表)

构件与连接类别	构件与连接相关系数		循环次数 n 为 2×10^6 次的 容许正应力幅 $[\Delta\sigma]_{2 \times 10^6}$ $/(N \cdot mm^{-2})$	循环次数 n 为 5×10^6 次的 容许正应力幅 $[\Delta\sigma]_{5 \times 10^6}$ $/(N \cdot mm^{-2})$	疲劳截止限 $[\Delta\sigma_L]_{1 \times 10^8}$ $/(N \cdot mm^{-2})$
	C_z	β_z			
Z12	0.18×10^{12}	3	45	33	18
Z13	0.13×10^{12}	3	40	29	16
Z14	0.09×10^{12}	3	36	26	14

注:构件和连接的分类型应符合附录1的规定。

表 2-2 剪应力幅的疲劳计算参数

构件与连接类别	构件与连接相关系数		循环次数 n 为 2×10^6 次的 容许剪应力幅 $[\Delta\tau]_{2 \times 10^6} / (N \cdot mm^{-2})$	疲劳截止限 $[\Delta\tau_L]_{1 \times 10^8}$ $/(N \cdot mm^{-2})$
	C_j	β_j		
J1	4.10×10^{11}	3	59	16
J2	2.00×10^{16}	5	100	46
J3	8.61×10^{21}	8	90	55

注:构件和连接的分类型应符合附录1的规定。

2. 常幅疲劳计算

常幅疲劳是指重复作用的荷载值基本上不随时间随机变化,可视为常量,在应力循环次数内应力幅相等。当常幅疲劳计算不能满足式(2-8)或式(2-9)要求时,应按下列规定进行计算:

(1) 正应力幅的疲劳计算。

$$\Delta\sigma \leq \gamma_i [\Delta\sigma] \quad (2-10)$$

当 $n \leq 5 \times 10^6$ 时:

$$[\Delta\sigma] = \left(\frac{C_z}{n} \right)^{1/\beta_z}$$

当 $5 \times 10^6 < n \leq 1 \times 10^8$ 时:

$$[\Delta\sigma] = \left[\left([\Delta\sigma]_{5 \times 10^6} \right)^2 \frac{C_z}{n} \right]^{1/(\beta_z + 2)}$$

当 $n > 1 \times 10^8$ 时:

$$[\Delta\sigma] = [\Delta\sigma_L]_{1 \times 10^8}$$

(2) 剪应力幅的疲劳计算。

$$\Delta\tau \leq [\Delta\tau] \quad (2-11)$$

当 $n \leq 1 \times 10^8$ 时:

$$[\Delta\tau] = \left(\frac{C_j}{n} \right)^{1/\beta_j}$$

当 $n > 1 \times 10^8$ 时:

$$[\Delta\tau] = [\Delta\tau_L]_{1 \times 10^8}$$

式中, $[\Delta\sigma]$ 为常幅疲劳的容许正应力幅 (N/mm^2); C_Z, β_Z 为构件和连接的相关参数, 应根据附录 1 按表 2-1 采用; n 为应力循环次数; $[\Delta\sigma]_{5 \times 10^6}$ 为循环次数 $n = 5 \times 10^6$ 次的容许正应力幅 (N/mm^2) 应根据附录 1 按表 2-1 取值; $[\Delta\tau]$ 为常幅疲劳的容许剪应力幅 (N/mm^2); C_j, β_j 为构件和连接的相关系数, 应根据附录 1 按表 2-2 采用。

3. 变幅疲劳计算

钢结构中的吊车梁和吊车桁架都是承受变幅循环荷载的构件。对于这类构件, 如果仍取最大应力幅按常幅疲劳计算显然不太合理。由于中、轻级工作制吊车的操作不太频繁, 在设计基准期内的应力循环次数较少, 一般不会产生疲劳破坏, 所以在实际工程中只有重级工作制吊车需要进行疲劳计算。《钢结构设计标准》(GB 50017—2017) 对重级工作制吊车梁和重级、中级工作制吊车桁架的变幅疲劳进行了简化计算, 可取应力循环中最大的应力幅按下列公式计算:

(1) 正应力幅的疲劳计算。

$$\alpha_f \Delta\sigma \leq \gamma_t [\Delta\sigma]_{2 \times 10^6} \quad (2-12)$$

(2) 剪应力幅的疲劳计算。

$$\alpha_f \Delta\tau \leq [\Delta\tau]_{2 \times 10^6} \quad (2-13)$$

式中, α_f 为欠载效应的等效系数, A6、A7、A8 工作级别(重级)的硬钩吊车取 1.0, A6、A7 工作级别(重级)的软钩吊车取 0.8, A4、A5 工作级别(中级)的吊车取 0.5; 其他参数含义同前。

不同的车间, 循环次数不同, 为便于比较, 《钢结构设计标准》(GB 50017—2017) 统一以 $n = 2 \times 10^6$ 次疲劳强度为标准推算出欠载效应的等效系数 α_f , 所以, 式(2-13)中的容许应力幅采用 $[\Delta\sigma]_{2 \times 10^6}$ 进行比较。

2.6 建筑用钢材的种类、规格和选用

2.6.1 钢结构用钢的种类

钢的种类很多, 按冶炼方法可分为平炉钢、氧气转炉钢、电炉钢(用于生产特殊合金钢, 不用于建筑), 按用途可分为结构钢、工具钢、特殊性能钢(如不锈钢等), 按脱氧程度可分为特殊镇静钢(代号为 TZ)、镇静钢(代号为 Z)和沸腾钢(代号为 F), 按化学成分可分为非合金钢、低合金钢和合金钢。

钢结构用钢主要包括非合金钢中的碳素结构钢和低合金钢中的低合金高强度结构钢, 另外, 还有一些具有特殊性能的专用结构钢种, 如耐候结构钢(NH 钢或 GNH 钢, NH 和 GNH 为耐候和高耐候汉语拼音的首字母)、高性能建筑结构用钢(GJ 钢)等; 用于钢结构连接的普通螺栓、高强度螺栓及焊接材料类的钢材, 还有合金钢类。

2.6.2 钢结构用钢的牌号

1. 碳素结构钢

碳素结构钢的牌号由以下 4 个部分按顺序组成：

(1)代表屈服强度的字母 Q。

(2)屈服强度数值(按厚度不大于 16 mm 的钢材确定,单位为 N/mm^2)。

(3)质量等级符号。碳素结构钢根据钢材的化学成分和力学性能不同划分为 A、B、C、D 四个质量等级。在力学性能中,A 级钢只保证抗拉强度、屈服点、伸长率,B、C、D 级钢均应保证抗拉强度、屈服点、伸长率、冷弯和冲击韧性,如表 2-3、表 2-4 所示。

表 2-3 Q235 钢的化学成分

质量等级	脱氧方法	化学成分(质量分数)/%, 不大于				
		C	Mn	Si	S	P
A	F、Z	0.22	1.40	0.35	0.050	0.045
B		0.20			0.045	
C	Z	0.17			0.040	0.040
D	TZ				0.035	0.035

表 2-4 Q235 钢的力学性能和工艺性能

钢材厚度 或直径 /mm	拉伸试验			180°冷弯试验 ($b=2a$)		夏比(V型)冲击韧性		
	上屈服强度 R_{eH} /($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$), 不小于	抗拉强度 R_m /($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	伸长率 $\delta_s/\%$, 不小于			质量 等级	温度 /°C	冲击功 A_{kv}/J , 不小于
					纵向			
≤ 16	235	370~500	26	$d=a$	$d=1.5a$	A	—	—
$>16\sim 40$	225		26					27
$>40\sim 60$	215		25	B	20	27		
$>60\sim 100$	215		24			C	0	27
$>100\sim 150$	195		22	供需双方协商		D	-20	27
$>150\sim 200$	185		21					27

注: b 为试样宽度, a 为钢材厚度(直径), d 为弯心直径。

(4)脱氧方法符号(F、Z、TZ)。在牌号组成表示方法中,Z 和 TZ 可以省略。例如,Q235AF 代表屈服点为 $235 \text{ N}/\text{mm}^2$ 的质量等级为 A 级的沸腾碳素结构钢,Q235C 代表屈服点为 $235 \text{ N}/\text{mm}^2$ 的质量等级为 C 级的镇静钢(Q295、Q345、Q390、Q420、Q460、Q500、Q550、Q620 和 Q690)。A、B 级钢分为沸腾钢或镇静钢,C 级钢全为镇静钢,D 级钢全为特殊镇静钢。

《碳素结构钢》(GB/T 700—2006)规定普通碳素结构钢共有 4 个牌号:Q195、Q215、Q235、Q275。其中,Q235 是推荐采用的低碳钢钢材。

2. 低合金高强度结构钢

低合金高强度结构钢的含碳量不大于 0.20%,强度的提高主要依靠添加少量几种合金元素来达到,但合金元素的总量应低于 5%。

低合金高强度结构钢的牌号命名方式与碳素结构钢相似,由字母 Q、规定的最小上屈服强度数值、交货状态代号、质量等级符号(B、C、D、E、F)四个部分组成。低合金高强度结构钢采用的脱氧方法均为镇静钢或特殊镇静钢,故可不加脱氧方法的符号。当交货状态为热轧时,交货状态代号 AR 或 WAR 可省略;当交货状态为正火或正火轧制状态时,交货状态代号均用 N 表示。例如,Q390ND 表示规定的最小上屈服强度为 390 N/mm²、交货状态为正火或正火轧制、质量等级为 D 级的镇静钢。当需方要求钢板具有厚度方向性能时,应在上述规定的牌号后加上代表厚度方向(Z 向)性能级别的符号,如 Q390NDZ25。

《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2018)规定低合金高强度结构钢分为 8 个牌号,即 Q355、Q390、Q420、Q460、Q500、Q550、Q620 和 Q690,它们均为镇静钢或特殊镇静钢。其中,Q355、Q390、Q420、Q460 钢(其他 4 个牌号未列)的化学成分如表 2-5 所示(仅列出了正火或正火轧制钢^①)。从表中可以看出,4 个牌号的合金元素均以锰为主,另外至少加入钒、钛、铌、铝中的一种,还可加入稀土元素和钼、氮等,以改善钢的性能。力学性能方面,B、C、D、E 等级均保证抗拉强度、屈服点、伸长率、冷弯和冲击韧性几项指标,如表 2-6~表 2-8 所示(仅列出了正火或正火轧制钢)。

《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)推荐使用的是 Q345^②、Q390、Q420、Q460 这 4 个牌号。

3. 建筑结构用钢板

建筑结构用钢板主要用于高层建筑结构和其他重要建筑结构,厚度为 6~100 mm。建筑结构用钢板的牌号共分 5 种,即 Q235GJ、Q345GJ、Q390GJ、Q420GJ、Q460GJ;质量等级分为 B、C、D、E 四级。

和同等级的碳素结构钢或低合金高强度钢相比,建筑结构用钢板的各项指标均优于普通钢材,其微合金元素的含量得到控制,S、P 含量降低,其化学成分如表 2-9 所示。在力学性能方面,规定了屈服强度的波动范围和较低的屈强比,以保证强度指标稳定和较多的强度储备。建筑结构用钢板的力学性能和工艺性能如表 2-10 所示。对有冷加工成型要求或抗震要求的构件宜优先采用建筑结构用钢板。

① 热轧和热机械轧制钢的力学性能和工艺性能可查看《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2018)中的相关规定。

② 《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2018)中规定用 Q355 代替 Q345 钢,但《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)中推荐用钢仍为 Q345,此处以《钢结构设计标准》为准。

表 2-5 Q355、Q390、Q420、Q460 钢的牌号及化学成分

牌号		化学成分(质量分数)/%													
钢级	质量等级	C	Si	Mn	P ^①	S ^①	Nb	V	Ti ^③	Cr	Ni	Cu	Mo	N	Als ^④
		不大于	不大于		不大于	不大于							不大于		
Q355N	B	0.20	0.50	0.90~1.65	0.035	0.035	0.005~0.05	0.01~0.12	0.006~0.05	0.30	0.50	0.40	0.10	0.015	0.015
	C														
	D														
	E														
	F														
Q390N	B	0.20	0.50	0.90~1.70	0.035	0.035	0.01~0.05	0.01~0.20	0.006~0.05	0.30	0.50	0.40	0.10	0.015	0.015
	C														
	D														
	E														
Q420N	B	0.20	0.60	1.00~1.70	0.035	0.035	0.01~0.05	0.01~0.20	0.006~0.05	0.30	0.80	0.40	0.10	0.015	0.015
	C														
	D														
	E														
Q460N ^②	C	0.20	0.60	1.00~1.70	0.030	0.030	0.01~0.05	0.01~0.20	0.006~0.05	0.30	0.80	0.40	0.10	0.015	0.015
	D														
	E														

注:钢中应至少含有铝、铌、钒、钛等细化晶粒元素中的一种,单独或组合加入时,应保证其中至少一种合金元素含量不小于表中规定含量的下限。

① 对于型钢和棒材,磷和硫含量上限值可提高 0.005%。

② V+Nb+Ti≤0.22%,Mo+Cr≤0.30%。

③ Ti 最高含量可达 0.20%。

④ 可用全铝 Al_T 代替 Als,此时全铝最小含量为 0.020%。当钢中添加了铌、钒、钛等细化晶粒元素且含量不小于表中规定含量的下限值时,铝含量下限值不限。



表 2-6 Q355、Q390、Q420、Q460 钢的强度和伸长率

牌 号	上屈服强度/MPa 不小于										抗拉强度/MPa					断后伸长率/% 不小于				
	质量 等级	≤16	>16 ~40	>40 ~63	>63 ~80	>80 ~100	>100 ~150	>150 ~200	>200	≤100	>100 ~200	>200 ~250	≤16	>16 ~40	>40 ~63	>63 ~80	>80 ~200	>200 ~250		
Q355N	B、C、 D、E、 F	355	345	335	325	315	295	285	275	470~ 630	450~ 600	450~ 600	22	22	22	21	21	21		
Q390N	B、C、 D、E	390	380	360	340	340	320	310	300	490~ 650	470~ 620	470~ 620	20	20	19	19	19	19		
Q420N	B、C、 D、E	420	400	390	370	360	340	330	320	520~ 680	500~ 650	500~ 650	19	19	18	18	18	18		
Q460N	C、D、 E	460	440	430	410	400	380	370	370	540~ 720	530~ 710	510~ 690	17	17	17	17	17	16		

注：正火状态包含正火加回火状态。

表 2-7 Q355、Q390、Q420、Q460 钢的夏比(V 型缺口)冲击试验的温度和冲击吸收能量

牌 号		以下试验温度的冲击吸收能量最小值/J											
		20 °C		0 °C		-20 °C		-40 °C		-60 °C			
钢 级	质量等级	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向		
Q355N、Q390N、 Q420N	B	34	27	—	—	—	—	—	—	—	—		
	C	—	—	34	27	—	—	—	—	—	—		
Q355N、Q390N、 Q420N、Q460N	D	55	31	47	27	40	20	—	—	—	—		
	E	63	40	55	34	47	27	31	20	—	—		
Q355N	F	63	40	55	34	47	27	31	20	27	16		

注 1: 当需方未指定试验温度时, 正火、正火轧制和新机械轧制的 C、D、E、F 级钢材分别做 0 °C、-20 °C、-40 °C、-60 °C 冲击。

注 2: 冲击试验取纵向试样, 经供需双方协商, 也可取横向试样。

表 2-8 Q355、Q390、Q420、Q460 钢的弯曲试验

试样方向	180°弯曲试验	
	D—弯曲压头直径;a—试样厚度或直径	公称厚度或直径/mm
对于公称宽度不小于 600 mm 的钢板及钢带, 拉伸试验取纵向试样; 其他钢材的拉伸试验取纵向试样	≤16	>16~100
	D=2a	D=3a



表 2-9 建筑结构用钢板的化学成分

牌号	质量等级	化学成分(质量分数)/%												
		C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	Als	Cr	Cu	Ni	Mo
		≤												
Q235GJ	B、C	0.20	0.35	0.60~1.50	0.025	0.015	—	—	—	0.015	0.30	0.30	0.30	0.08
	D、E	0.18			0.010	0.015				0.30	0.30	0.30	0.30	
Q345GJ	B、C	0.20	0.55	≤1.60	0.025	0.015	0.150	0.070	0.035	0.015	0.30	0.30	0.30	0.20
	D、E	0.18			0.020	0.010				0.015	0.30	0.30	0.30	0.30
Q390GJ	B、C	0.20	0.55	≤1.70	0.025	0.015	0.200	0.070	0.030	0.015	0.30	0.30	0.70	0.50
	D、E	0.18			0.020	0.010				0.015	0.30	0.30	0.30	0.70
Q420GJ	B、C	0.20	0.55	≤1.70	0.025	0.015	0.200	0.070	0.030	0.015	0.80	0.30	1.00	0.50
	D、E	0.18			0.020	0.010				0.015	0.80	0.30	0.30	1.00
Q460GJ	B、C	0.20	0.55	≤1.70	0.025	0.015	0.200	0.110	0.030	0.015	1.20	0.50	1.20	0.50
	D、E	0.18			0.020	0.010				0.015	1.20	0.50	0.50	1.20

注 1: 允许用全铝含量(Al_t)来代替酸溶铝含量(Als)的要求, 此时全铝含量 Al_t 应不小于 0.020%, 如果钢中添加 V、Nb 或 Ti 任一元素, 且其含量不低于 0.015% 时, 最小铝含量不适用。

注 2: 当 V、Nb、Ti 组合加入时, 对于 Q235GJ、Q345GJ, (V+Nb+Ti) ≤ 0.15%, 对于 Q390GJ、Q420GJ、Q460GJ, (V+Nb+Ti) ≤ 0.22%。

表 2-10 建筑结构用钢板的力学性能和工艺性能

牌号	质量等级	拉伸试验						断后伸长率 A/%	纵向冲击试验		弯曲试验		
		钢板厚度/mm							冲击吸收能量 KV ₂ /J	温度/°C	180° 弯曲压头直径 D	钢板厚度/mm	
		屈服强度 R _{sL} /MPa		抗拉强度 R _m /MPa		屈强比 R _{sL} /R _m							
		6~16	>16 ~50	>100 ~150	>150 ~200	≤100	>100 ~150	>150 ~200	6	>150 ~200	≥	≤16	>16
Q235GJ	B												
	C	≥235	235~345	215~325	—	400~510	380~510	—	≤0.80	—	47	D=2a	D=3a
	D												
	E												
Q345GJ	B												
	C	≥345	345~455	325~435	305~415	490~610	470~610	470~610	≤0.80	≤0.80	47	D=2a	D=3a
	D												
	E												
Q390GJ	B												
	C	≥390	390~510	370~490	—	510~660	490~640	—	≤0.83	—	47	D=2a	D=3a
	D												
	E												

(续表)

牌号	质量等级	拉伸试验										纵向冲击试验		弯曲试验	
		钢板厚度/mm										断后伸长率 A/%	冲击吸收能量 KV ₂ /J	180° 弯曲压头直径 D	
		下屈服强度 R _{el} /MPa		抗拉强度 R _m /MPa		屈服比 R _{el} /R _m		温度/°C		≤16	>16				
		6~16	>16 ~50	>50 ~100	>100 ~150	>150 ~200	≤100	>100 ~150	>150 ~200	6 ~150	>150 ~200	≥			
Q420GJ	B		420~550	410~540	400~530	—	530~680	510~660	—	≤0.83	—	20			
	C	≥420									0	47	D=2a	D=3a	
	D										-20				
	E										-40				
Q460GJ	B		460~600	450~590	440~580	—	570~720	550~720	—	≤0.83	—	20			
	C	≥460									0	47	D=2a	D=3a	
	D										-20				
	E										-40				

注:a为试样厚度。

4. 耐候钢

耐候钢的牌号由“屈服强度”“高耐候”或“耐候”的汉语拼音首字母 Q、GNH 或 NH，以及屈服强度的下限值和质量等级(A、B、C、D、E)组成。《耐候结构钢》(GB/T 4171—2008)将耐候钢分为高耐候钢和焊接耐候钢两类。高耐候钢有 Q265GNH、Q295GNH、Q310GNH、Q355GNH，焊接耐候钢有 Q235NH、Q295NH、Q355NH、Q425NH、Q460NH、Q520NH、Q550NH。

2.6.3 钢材的品种和规格

钢结构用钢的品种主要有钢板、钢带、热轧型钢、冷弯薄壁型钢及压型钢板。

1. 钢板和钢带

钢板和钢带有冷轧和热轧两种(见表 2-11)。其表示方法为“—”和“宽×厚度×长度”，单位为 mm。例如，“— 1 000×10×3 000”表示宽度为 1 000 mm、厚度为 10 mm、长度为 3 000 mm 的钢板或钢带。厚钢板(厚度为 4.5~60 mm)可用于各种组合截面的翼缘或腹板、焊接钢管、节点板、加劲肋等。薄钢板(厚度为 0.35~4 mm)是冷弯薄壁型钢的原料。

表 2-11 钢板与钢带

规格		厚度/mm	宽度/mm	长度/mm
热轧	钢板	0.5~200	600~2 000	1 200~6 000
	钢带	1.2~25	120~1 900	1 200~6 000 或卷板 (对薄钢带)
冷轧	钢板	0.2~5	600~2 000	1 200~2 300
	钢带	0.2~5	>600	卷板

2. 热轧型钢

热轧型钢有 H 型钢、部分 T 型钢、工字钢、角钢、槽钢、钢管等，如图 2-15 所示。

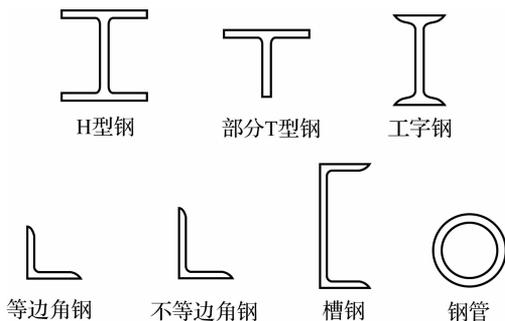


图 2-15 热轧型钢

H 型钢和剖分 T 型钢是近年来我国使用较为广泛的热轧型钢。H 型钢分为宽翼缘、中翼缘和窄翼缘三类。H 型钢和剖分 T 型钢的代号分别为 HW、HM、HN 和 TW、

TM、TN；H 型钢还有轻型薄壁类别，代号为 HT。HW 型钢的翼缘宽度 B 与截面高度 H 相等，适用于制作柱；HM 型钢的翼缘宽度 $B=(1/2\sim 2/3)H$ ，适用于制作柱或梁；HN 型钢的翼缘宽度 $B=(1/3\sim 1/2)H$ ，适用于制作梁；HT 型钢则适用于制作轻型房屋的柱、梁和檩条等。H 型钢和剖分 T 型钢的标注方式均为截面高度 $H\times$ 翼缘宽度 $B\times$ 腹板厚度 $t_1\times$ 翼缘厚度 t_2 ，单位为 mm。例如，HW300 \times 300 \times 11 \times 19，其剖分 T 型钢为 TM150 \times 300 \times 11 \times 19。H 型钢规格及截面特性可参见附录 2。剖分 T 型钢规格及截面特性可参见附录 3。H 型钢与普通工字钢相比，其翼缘内外侧平行，便于与其他构件连接，当两者自重相近时，H 型钢的惯性矩较大，能使钢材更好地发挥效能。工字钢与 H 型钢钢号及截面特性参数对比可参见附录 6。

工字钢、角钢、槽钢是传统热轧型钢。工字钢分为普通工字钢和轻型工字钢。普通工字钢型号用 I 和号数表示，号数代表截面高度的厘米数。号数为 20 及以上的工字钢，按腹板厚度和翼缘宽度不同又分为 a、b 两类或 a、b、c 三类。工字钢规格及截面特性可参见附录 4。例如，I30a 表示截面高度为 30 cm，腹板厚度为 a 的工字钢。轻型工字钢的表示方法同普通工字钢。我国生产的普通工字钢的最大型号是 63 号，供应长度为 5~19 m。工字钢一般宜用作受弯构件，且选择腹板较薄的工字钢较经济，因其质量轻，截面惯性矩相对较大。

角钢分为等边角钢和不等边角钢两种。角钢的表示方法为在符号“L”后面加上“长边宽 \times 短边宽 \times 厚度”（对不等边角钢），或在符号“L”后面加上“边长 \times 厚度”（对等边角钢）。例如，L63 \times 5 表示边长为 63 mm、厚度为 5 mm 的等边角钢；L125 \times 80 \times 8 表示长肢为 125 mm、短肢为 80 mm、厚度为 8 mm 的不等边角钢。我国生产的等边角钢的最大边长为 250 mm，不等边角钢的肢长为 200 mm \times 125 mm，角钢的供应长度一般为 3~19 m。等边角钢规格及截面特性可参见附录 7，不等边角钢规格及截面特性可参见附录 8。

槽钢的型号表示方法与工字钢相似，用符号“[”和号数表示，号数代表截面高度的厘米数。14 号以上的槽钢按腹板厚度和翼缘宽度的不同又可分为 a、b 两类或 a、b、c 三类。例如，[20b 表示截面高度为 20 cm，腹板厚度为 b 的槽钢。我国生产的槽钢的最大型号为 [40c，供应长度为 5~19 m。槽钢规格及截面特性可参见附录 5。

钢管分为热轧无缝钢管（见附录 9）和焊接钢管（见附录 10）两种，型号可用代号 Φ 后加“外径 \times 壁厚”表示，单位为 mm。例如， Φ 273 \times 5 表示外径为 273 mm、壁厚为 5 mm 的钢管。国产热轧无缝钢管的最大外径可达 630 mm，供应长度为 3~12 m。

3. 冷弯薄壁型钢及压型钢板

冷弯薄壁型钢是用壁厚为 1.5~5 mm 的薄钢板冷轧而成的，如图 2-16 所示。冷弯薄壁型钢的截面形式和尺寸均可按受力特点合理设计，以达到充分利用钢材的强度、节约钢材的目的。压型钢板是将壁厚为 0.3~2 mm 的薄钢板（彩色薄钢板）辊压冷弯成 W 型、U 型、V 型等类似形状（见图 2-17），用于建筑屋面、墙面和楼板的建筑材料。压型钢板板型的表示方法为：YX 波高-波距-有效覆盖宽度。例如，YX15-380-760 表示波高为 15 mm、波距为 380 mm、板的有效覆盖宽度为 760 mm 的板型。压型钢板的厚度需另外注明。冷弯薄壁型钢及压型钢板在国内外轻钢建筑中被广泛应用。

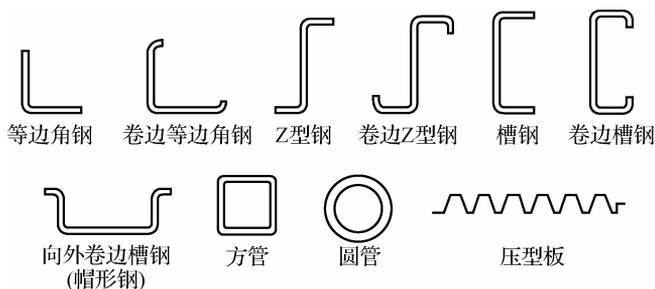


图 2-16 冷弯薄壁型钢

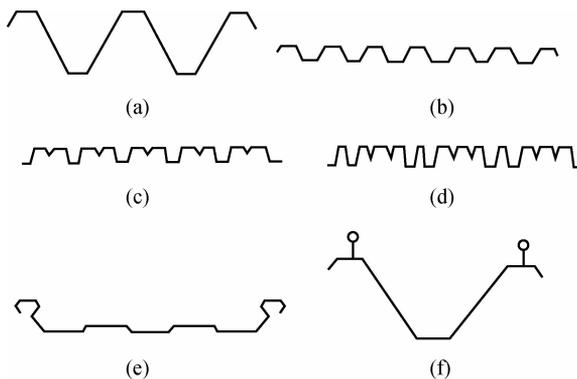


图 2-17 压型钢板的截面形式

2.6.4 钢材的选用

钢材的选用原则是:安全可靠、经济合理、节约材料、降低造价。选择钢材时,只采用高强度和质量等级高的钢材是不合理的,这样的钢材往往价格也较高,应综合考虑钢材的需要进行合理选择。

选择钢材时应考虑的因素有如下几个:

1. 结构或构件的重要性

根据建筑结构破坏后的严重性,《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)将建筑结构的安全等级划分为一级、二级和三级。对安全等级为一级的房屋结构及其构件,如重型工业建筑、大跨度建筑、高层或超高层的钢结构等,应选用质量好的钢材;对一般的或次要的房屋建筑,可按其性质选用普通质量的钢材。

2. 荷载的性质

结构所受荷载可分为静力荷载和动力荷载两类。对直接承受静力荷载的结构构件,应选用质量和韧性较好的钢材。对承受静力荷载的钢材,可选用普通质量的钢材。

3. 连接方法

钢结构的连接方法有焊接和非焊接两种。在焊接过程中,钢结构会产生焊接缺陷、残余应力、残余应变等不利影响,从而导致构件发生脆性破坏。因此,对焊接构件所用钢

材的质量要求较高,应选择塑性和韧性较高、可焊性较好的钢材,并严格控制钢材中碳、硫、磷的含量。

4. 工作条件

结构构件的工作环境对钢材性能有很大影响。例如,露天结构或周围环境有腐蚀性介质的钢材容易锈蚀,应选择抗腐蚀能力较强的耐候钢材;钢材在低温时容易产生冷脆现象,尤其是焊接结构,因此,在低温条件下工作的结构应选择抗低温冷脆性能较好的镇静钢。

5. 板厚尺寸

厚度大的钢材的强度较小,而且塑性、冲击韧性、焊接性能及沿厚度方向的受力性能也较差。因此,当需要厚度较大的钢板时,应选用质量较好的钢材或 Z 向性能钢板。

《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)推荐使用的钢材型号是 Q235、Q345、Q390、Q420、Q460 和 Q345GJ。承重结构所用钢材应具有屈服强度、抗拉强度、断后伸长率和硫、磷含量的合格保证,对焊接结构尚应具有碳当量的合格保证。焊接承重结构及重要的非焊接承重结构采用的钢材还应具有冷弯试验的合格保证,对直接承受动力荷载或需验算疲劳的构件所用钢材尚应具有冲击韧性的合格保证。

《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)还规定:A 级钢仅可用于结构工作温度高于 0°C 的不需要验算疲劳的构件,且 Q235A 钢不宜用于焊接结构。对于需要验算疲劳的焊接结构用钢材,当工作温度高于 0°C 时其质量等级不应低于 B 级;当工作温度不高于 0°C 但高于 -20°C 时,Q235 钢和 Q345 钢不应低于 C 级,Q390 钢、Q420 钢、Q460 钢不应低于 D 级;当工作温度不高于 -20°C 时,Q235 钢和 Q345 钢不应低于 D 级,Q390 钢、Q420 钢、Q460 钢选用 E 级。需验算疲劳的非焊接结构,其钢材质量等级要求可按焊接结构的要求降低一级但不应低于 B 级。吊车起重量不小于 50 t 的中级工作制吊车梁,其质量等级要求应与需要验算疲劳的构件相同。对工作温度不高于 -20°C 的受拉构件及承重结构的受拉板材,所用钢材厚度或直径不宜大于 40 mm,质量等级不宜低于 C 级;当钢材厚度或直径不小于 40 mm 时,其质量等级不宜低于 D 级;重要承重结构的受拉板材宜满足现行国家标准《建筑结构用钢板》(GB/T 19879—2015)的要求。

思考与练习

- (1) 建筑钢结构对所用钢材的性能有何要求?
- (2) 钢材的力学性能和工艺性能指标包括哪些? 承重结构用钢至少应保证哪几项指标满足要求?
- (3) 碳、硫、磷、氧、氮对钢材性能有什么影响?
- (4) 什么是钢材的硬化? 对钢材性能有何影响?
- (5) 什么情况下会产生应力集中? 应力集中对钢材性能有何影响?
- (6) Q235 钢的 4 个质量等级在脱氧方法和力学性能上有什么不同?
- (7) 哪些因素会使钢材发生脆性破坏? 应如何防止?
- (8) 钢结构的破坏形式有哪两种? 各有何特点?

- (9) 什么是疲劳破坏? 影响疲劳破坏的主要因素是什么?
- (10) 试述各型钢符号的含义。
- (11) 试述建筑用钢材的种类和规格。
- (12) 选用钢材时应遵循什么原则?