

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

普通高等教育“九五”国家级重点教材

钢结构设计原理

(第三版)

Principles of Steel Structure Design

陈绍蕃 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书比较深入地讨论了钢结构的性能和钢结构设计中所考虑的有关问题,并尽可能地反映国内外在这方面的新成果。本书共十二章,前四章属于钢结构性能和设计的总论;第五至八章为各种构件的分论;第九和十章论述连接和构造设计;第十一章介绍冷弯薄壁型钢结构的特点;第十二章介绍了塑性设计、受扭构件和加固设计等特殊问题。

本书可供结构工程的研究生学习,以及有关教学、科研和工程技术的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构设计原理/陈绍蕃著. —3 版. —北京:科学出版社, 2005. 1

ISBN 7-03-014948-3

I. 钢… II. 陈… III. 钢结构-结构设计 IV. TU391.04

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第006984号

责任编辑:杨家福/ 责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉/ 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年4月第 三 版 开本:B5(720×1000)

2005年4月第七次印刷 印张:28 1/2

印数:15 901—18 900 字数:539 000

定价:50.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话-010-62136131 编辑部电话-010-62137026

第三版序

随着时光流逝和事物的发展,本书又到了修订的时刻。推出第三版的直接原因是有关设计和施工规范、规程的修订,包括《钢结构设计规范》、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》、《建筑抗震设计规范》、《钢结构工程施工质量验收规范》、《建筑钢结构焊接技术规程》和《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》的修订。然而,更基本的原因则是学科进展的新成就和钢材生产领域的新成果。规范和规程的新版本在一定范围内体现了这些新成就,而本书的修订面则更为广泛。

具体修改和补充的主要内容有:

- (1) 连铸技术,高性能钢材,热矫正、热成型及火灾的影响;
- (2) 轴心压杆的弯扭屈曲计算,柱段屈曲的相关作用;
- (3) 受弯构件端部加劲肋对整体稳定计算长度的影响,腹板受弯、受剪屈曲后强度的简化计算;
- (4) 框架有侧移失稳和无侧移失稳的判据,框架柱计算长度的调整和精度分析,框架简化的二阶弹塑性稳定分析和二阶弹性分析,半刚性框架;
- (5) 高强螺栓承压型连接,半刚性和刚性连接的分界,螺栓端板连接的刚度;
- (6) 板件相关屈曲和畸变屈曲,开口截面的直接承载力法,方管桁架的节点承载力;
- (7) 框架节点的抗震设计,防曲支撑框架;
- (8) 钢结构防火设计。

著者希望在快速发展的新形势下,这本第三版能够继续体现本书的初衷,在造就钢结构专业人才方面发挥有益的作用。

第二版序

本书问世以来,已经经历了10年时间。在这10年中,钢结构作为一门学科取得了不小的进展,改革开放政策又使钢结构在我国的应用日趋广泛。为顺应这一喜人的形势,本书再版就提到日程上来了。

这次再版修订工作,重点在内容更新,包括增加新节段,在原有基础上适当扩展和以新的资料取代陈旧的内容。主要有:第一章增加快速加荷和循环加荷对钢材和结构的影响;第二章增加稳定设计的几项原则;第三章对防止脆断的选材方法做了补充;第四章增加变幅疲劳的计数方法;第六章增加厚壁柱的残余应力和稳定系数,并对支撑设计进行了以新代旧和扩展;第七章梁的支撑设计也是既有更新又有扩展,还充实了腹板屈曲后强度利用的设计方法;第八章增强了框架弹塑性二阶分析;第九章增加焊缝群的极限承载力计算和螺栓连接的剪拉联合破坏计算;第十章增加箱形截面柱和梁连接的构造,并更新和扩充了桁架节点设计的内容;第十一章增加冷弯型钢的残余应力分布,并用新的方管桁架设计的完整资料取代原有比较杂乱的内容;第十二章增加了抗震钢结构的特点部分,并对“设计中的试验工作”一节做了更新。

在修订过程中较多地吸收了10年来我国在钢结构研究方面取得的成果,同时也参考了国外的研究成果和20世纪90年代新的设计规范(欧洲的EC3-ENV-1993和美国的AISC-LRFD-1993)。本书第一版脱稿时我国的现行规范GBJ17-88和GBJ18-87都还未最后定稿和实施,而后来的正式颁行本和当初的草案之间存在着少量差别;本版都据之做了订正。在研究生教学过程中发现第一版存在的缺点和错误,本版也都做了相应修改。

本书几年来为我国多所高等学校用作结构工程研究生教材,并于1996年经高校建筑工程学科专业指导委员会审定为研究生用重点教材。作者希望经过这次修订后本书能够更好地符合研究生培养工作的要求,并为从事钢结构工作的广大工程技术人员提供有益的较新参考资料。本版的修订也会存在新的不足或谬误,希望读者发现后不吝指正。

序

对钢结构性能的全面了解,是从事钢结构设计的人员所必须具备的条件。所谓“性能”,是指结构在各种不同的荷载作用和环境条件下的反应。对性能的了解包括对各种钢材的特点、制造和安装的各工序对构件产生的影响、结构所处环境的影响、各类荷载作用的效应、结构形式和构造细节可能引起的后果等的了解。此外,设计工作者还必须了解如何满足施工的要求,以使设计能顺利实现并获得优良的工程质量。工程设计是复杂的综合性问题,只有掌握上述这些知识,才能对工程实践中出现的各种情况应付裕如。目前国内钢结构方面的出版物很少,很不适应钢结构工程迅速发展的需要。作者不揣简陋编写这本《钢结构设计原理》作为应急之需,希望它能够在造就钢结构专业人才方面起一点微薄的作用。

本书的读者对象是已经学过大学本科钢结构课程的人员,包括研究生和科研、设计及施工的技术人员。因此,本书的内容是在钢结构初步知识的基础上加深提高。前四章属于钢结构性能的总论。对于钢结构承载能力的极限状态,除了强度和过度变形不能继续承载外,丧失稳定、疲劳破损和脆性断裂都占有重要位置。本书第二至四章分别对后三个问题集中地做了一般性的论述。第五至八章是构件的分论,分别论述拉杆、压杆、受弯构件和压弯构件的承载能力,其中稳定问题占较大分量。作者在选材时注意避免重复一般教科书中有关稳定理论的内容,尽量把稳定计算公式和构造紧密联系起来,把理论和实际设计联系起来。第九、十两章论述连接和构造。正确确定构造细节是钢结构设计的重要组成部分,但有时不为人们所重视。这里单辟一章讲构造设计,不仅意在强调其重要性,并且还由于集中论述而使得构造设计的原则更容易为读者所掌握。作为一本研究生教材和工程技术人员更新知识的读物,本书的内容力求反映近年来国内外的新成就。除了在第一至十章中尽量这样做外,又写了第十一和第十二章,论述冷弯薄壁型钢结构的设计特点,塑性设计和箱形梁等新结构和新设计方法。第十二章还纳入一些特殊问题如钢结构的加固等。

本书的第一至十章承蒙清华大学王国周教授和浙江大学夏志斌教授详细审阅并提出改进意见,谨致谢意。我在西安冶金建筑学院钢木结构教研室的同事陈骥、郭在田、蒋焕南、赵挥琴、何保康和研究生童根树、顾强等同志也对初稿的许多章节提出了不少好意见,一并在这里致谢。

目 录

第三版序

第二版序

序

第一章 钢结构的基本性能	1
1.1 钢材的生产及其对材性的影响	1
1.2 钢结构的建造过程及其对构件性能的影响.....	10
1.3 外界作用对钢结构性能的影响.....	18
参考文献	22
第二章 钢结构稳定问题概述	24
2.1 钢结构的失稳破坏.....	24
2.2 失稳的类别.....	26
2.3 结构稳定问题的特点.....	28
2.4 稳定计算中的整体观点.....	31
2.5 稳定设计的几项原则.....	34
参考文献	35
第三章 钢结构的断裂	36
3.1 钢结构脆性破坏及其原因.....	36
3.2 断裂力学的观点.....	38
3.3 防止脆性断裂.....	42
3.4 应力腐蚀开裂.....	53
参考文献	54
第四章 疲劳破损	56
4.1 影响疲劳破损的因素.....	56
4.2 疲劳设计的准则.....	65
4.3 疲劳试验和检验.....	75
4.4 提高疲劳性能的工艺措施.....	78
参考文献	79
第五章 拉杆	81
5.1 拉杆的极限状态.....	81
5.2 净截面的效率.....	83
5.3 角钢拉杆.....	86

5.4 螺纹拉杆	90
参考文献	90
第六章 轴心压杆	91
6.1 轴心压杆的极限状态	91
6.2 轴心压杆的稳定计算	100
6.3 压杆的计算长度	106
6.4 格构式压杆	123
6.5 压杆的截面尺寸	134
6.6 压杆的支撑	140
参考文献	148
第七章 受弯构件	151
7.1 受弯构件的强度	151
7.2 梁的过度塑性变形	158
7.3 梁的整体稳定	164
7.4 薄腹板梁的承载能力	191
7.5 多钢种混用梁	201
7.6 梁的截面尺寸	204
参考文献	208
第八章 压弯构件和框架	210
8.1 压弯构件的强度和平面内稳定	210
8.2 压弯构件的空间失稳	222
8.3 杆端约束和杆计算长度	229
8.4 框架	250
8.5 压弯构件的截面尺寸	260
参考文献	262
第九章 连接	265
9.1 角焊缝的性能和计算	265
9.2 抗剪螺栓连接	277
9.3 抗拉螺栓连接	288
9.4 兼承剪力和拉力的螺栓连接	297
9.5 承受重复荷载的螺栓连接	299
9.6 混合连接	301
参考文献	304
第十章 构造设计	306
10.1 构件的拼接	306
10.2 梁与梁的连接	314

10.3	梁与柱连接的分类·····	315
10.4	梁与柱连接的构造·····	317
10.5	柱脚·····	331
10.6	桁架节点·····	336
10.7	抵抗疲劳的构造·····	344
10.8	抵抗脆性断裂的构造·····	351
	参考文献·····	353
第十一章	冷弯薄壁型钢结构的特点 ·····	356
11.1	冷弯薄壁构件的一般特点·····	356
11.2	屈曲后强度和有效截面·····	364
11.3	屈曲中的相关作用·····	377
11.4	方管、矩形管桁架节点·····	386
	参考文献·····	400
第十二章	钢结构设计的其他问题 ·····	403
12.1	钢结构的塑性设计·····	403
12.2	抗震钢结构的特点·····	415
12.3	箱形梁·····	429
12.4	受扭构件·····	441
12.5	设计中的试验工作·····	448
12.6	钢结构加固设计·····	450
12.7	钢结构的防火·····	457
	参考文献·····	460
索引	·····	464

第一章 钢结构的基本性能

钢结构的内在特性是由它所用的原材料和所经受的一系列加工过程决定的。外界的作用,包括各类荷载和气象环境对它的性能也有不可忽视的影响。

建筑工程中,钢结构所用的钢材都是塑性比较好的材料,在拉力作用下,应力-应变曲线在超过弹性后有明显的屈服点和一段屈服平台,然后进入强化阶段。传统的钢结构设计,以屈服点作为钢材强度的极限,并把局部屈服作为承载能力的准则。但是,钢材的塑性性能在一定条件下是可以利用的:简支梁可以允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,允许在结构中出现塑性铰以及继之而来的内力重分布。这种利用塑性的设计方法已经提到日程上来了。

钢材和其他建筑结构材料相比,强度要高得多。在同样的荷载条件下,钢结构构件截面小,截面组成部分的厚度也小。因此,稳定问题在钢结构设计中是一个突出的问题。只要构件及其局部有受压的可能,在设计时就应考虑如何防止失稳。有时,局部性的失稳还不是构件承载能力的极限,则可以不加防止,并对屈曲后强度加以利用。

建筑结构钢材有较好的韧性。因此,有动力作用的重要结构经常用钢来做。但设计这类钢结构,还必须正确选用钢材,当荷载多次重复时,还应从计算、构造和施工几个方面来考虑疲劳问题。

钢材的韧性并不是一成不变的。材质、板厚、受力状态、温度等都会对它有所影响。钢结构曾经有过脆性断裂的事故,从焊接结构开始推广的年代起,脆断一直成为一个引人注目的问题。

深入了解钢结构的特性,必须从钢材开始。本章着重论述材料和施工过程对钢结构的影响。第二至四章简要论述钢结构在稳定、脆断和疲劳方面的特性。

1.1 钢材的生产及其对材性的影响

建筑结构所用的钢材包括两大类:一类是热轧型钢和钢板(图 1.1);另一类是冷成型(冷弯、冷冲、冷轧)的薄壁型钢和压型钢板(图 1.2)。

钢在熔炼炉中炼成后,先浇注成钢锭,然后经过多次辊轧才形成钢材。冶炼、脱氧、辊轧等环节都对钢材的性能有很大影响。

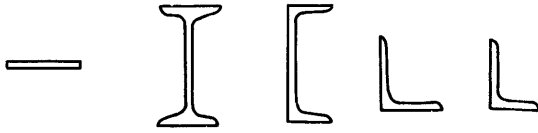


图 1.1 热轧钢材



图 1.2 冷弯型钢

1.1.1 钢的熔炼

冶炼按需要生产的钢号进行,它决定钢材的主要化学成分。各种化学元素对钢材性能的影响,一般钢结构教材都有所阐述,这里不作讨论。冶炼的炉种不同,所得钢材也有差异。目前我国大量生产的是平炉钢和氧气转炉钢,二者质量不相上下。早期生产的转炉钢都用空气吹炼,所含有害杂质多,尤其是含氮较多,使钢易脆,并对时效敏感。转炉钢改用氧气吹炼,大大改善了质量。如果吹入的氧气纯度高于99.5%,则钢材的综合性能优于平炉钢:含氮量低,冲击韧性高20%~30%^[1.1]。氧气转炉钢具有投资少、建厂快、生产效率高、原料适应性强等优点,已成为炼钢工业发展的主要方向。我国曾经一度生产侧吹碱性转炉钢(空气转炉钢),轧成小角钢和圆钢,用于承受静力荷载的结构,目前已逐步为氧气转炉钢所代替。

1.1.2 钢的脱氧

钢的熔炼是把铁水中过多的碳和有害元素硫、磷加以氧化而脱去。在这一过程中,不免有少量的铁也氧化,形成氧化铁(FeO)。为此,需要进行脱氧。脱氧的手段是在钢液中加入和氧的亲合力比铁高的锰、硅或铝。脱氧的程度对钢材质量颇有影响。锰是一种弱脱氧剂,如果只在钢液中加些锰铁,则脱氧很不充分。钢液中还含有较多的 FeO ,浇注时 FeO 和碳相互作用,形成 CO 气体逸出,引起钢液的剧烈沸腾;这样的钢称之为沸腾钢。沸腾钢在钢锭模中冷却很快,气体只能逸出一部分。因此,它夹杂有较多的 FeO ,冷却后并有许多气泡[图1.3(a)]^[1.2]。硅是较强的脱氧剂,在熔炼炉或盛钢桶中加入适量的硅(硅铁),脱氧即比较充分。硅在还原氧化铁的过程中放出热量,使钢液冷却缓慢,气体大多可以逸出,所得钢锭称为镇静钢[图1.3(b)]。这种钢锭在缓慢冷却和凝固过程中出现的晶核多,晶粒较细。冷却后因体积收缩而在上部形成较大缩孔,缩孔的孔壁有些氧化,在轧制时不能焊合,必须先把钢锭头部切去。切头后实得钢材仅为钢锭的80%~85%。

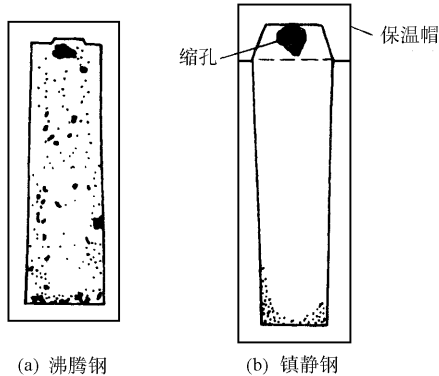


图 1.3 钢锭剖面

沸腾钢的质量不如镇静钢,它的杂质多而组织欠均匀,气泡周围容易集中硫化物,形成硫的偏析,组织也不够致密。但沸腾钢生产周期短,消耗脱氧剂少,轧钢时切头很小,成品率高,因此成本低廉。

镇静钢的性能优于沸腾钢,主要表现在容易保证必要的冲击韧性,包括低温冲击和时效冲击。在静力作用下,屈服点也比沸腾钢稍高。由于成本高,过去我国镇静钢只用于承受动力荷载或处于低温的结构,而沸腾钢则用得比较普遍。上面谈到沸腾钢容易存在硫的偏析,而在焊接结构中硫的偏析可能引起热裂纹。因此欧洲一些国家规定:当不能避免在偏析区施焊时,不应采用非镇静钢。GB 50017-2003规范规定沸腾钢不能用于下列焊接结构:①需要验算疲劳者;②处于 -30°C 和更低温度者;③工作温度低于 -20°C 并直接承受动力荷载(但不需验算疲劳)者。鉴别沸腾钢和镇静钢,可以通过硅的含量来进行。按我国的国家标准《碳素结构钢》(GB700-88)的规定:沸腾钢含硅量不超过 0.07% ,实际上常低于 $0.03\% \sim 0.07\%$;镇静钢的含硅量在 $0.12\% \sim 0.30\%$ 之间,实际下限常在 $0.15\% \sim 0.17\%$ 之间;半镇静钢含硅量在上述二者之间,不超过 0.17% ,实际常不低于 $0.10\% \sim 0.12\%$ ^[1.4]。GB700-88还规定,Q235钢分为A,B,C,D四级。前二级可以是沸腾钢、半镇静钢或镇静钢,C级必须是镇静钢。

对冲击韧性(尤其是低温冲击韧性)要求重要结构,如寒冷地区的露天结构,钢材宜用以硅脱氧后再用铝补充脱氧的特殊镇静钢。GB700-88所规定的Q235D钢,即属于特殊镇静钢,要求含有酸溶铝不少于 0.015% (或全铝不少于 0.020%)。低合金结构钢要求 -20°C 或 -40°C 冲击韧性者,也有类似要求。用铝进行补充脱氧,不仅进一步减少钢中的有害氧化物,而且能够细化晶粒。这种钢比一般镇静钢具有更高的室温冲击韧性和更低的冷脆倾向性和时效倾向性。冶金工厂承载运转特别繁重的硬钩吊车的吊车梁,采用这种钢材也比较合适。当然,用铝脱氧也使钢材成本进一步提高。图1.4给出化学成分(除硅外)十分接近的镇静钢板和沸腾钢板冲击韧性值 a_k 随温度变化的曲线。钢的含碳量为 0.20%

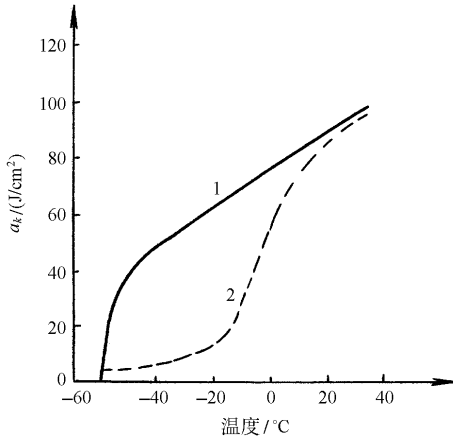


图 1.4 镇静钢和沸腾钢的冲击韧性

1. 镇静钢; 2. 沸腾钢

(钢液化验的数字, 钢板化验为 0.23%)。曲线 1 的钢板厚 10mm, 为铝补充脱氧的镇静钢, 脆性转变温度低至 -60°C。曲线 2 的钢板厚 18mm, 为沸腾钢, 它的冲击韧性在室温下并不比镇静钢低多少, 但在负温度下就相差悬殊, 脆性转变温度为 -10°C。

目前, 我国大部分钢厂已经采用连铸技术取代传统的钢锭模浇铸方法。连续浇铸的过程不再出现沸腾状态, 产品属于镇静钢。由于没有缩孔和切头造成的损失, 其价格并不高于传统的沸腾钢^[1,3]。连铸钢坯化学成分分布比较均匀, 只有轻微的偏析现象。因此, 沸腾钢正逐渐从市场上消失。

高强度低合金钢一般都是镇静钢, 我国过去的普通低合金结构钢系列中也有半镇静钢, 即 18 钼半^[1,5], 但 GB1591-88 中已改为 18 钼。

1.1.3 钢的轧制

轧制是型钢和钢板成型的工序, 它给这些钢材的组织 and 性能以很大影响。轧制有热轧和冷轧之分, 以前者为主。冷轧只用于生产小号型钢和薄板。

热轧可以破坏钢锭的铸造组织, 细化钢材的晶粒(图 1.5), 并消除显微组织的缺陷。浇注时形成的气泡、裂纹和疏松, 可在高温和压力作用下焊合。经过热轧后, 钢材组织密实, 力学性能得到改善。这种改善主要体现在沿轧制方向上, 从而使钢材在一定程度上不再是各向同性体。经过轧制之后, 钢材内部的非金属夹杂物(主要是硫化物和氧化物, 还有硅酸盐)被压成薄片, 出现分层(夹层)现象。分层使钢材沿厚度方向受拉的性能大大恶化, 并且有可能在焊缝收缩时出现层间撕裂(图 1.6)。焊缝收缩诱发的局部应变时常达到屈服点应变的数倍, 比荷载引起的应变大得多。

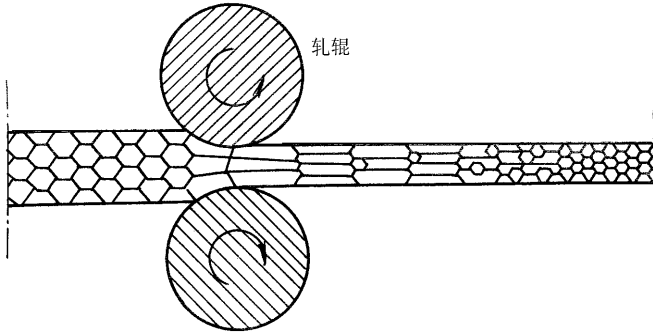


图 1.5 钢的轧制使晶粒细化

对于型钢和扁钢来说,轧制形成的非各向同性并不引起什么问题,因为它们总是沿辊轧方向受力的,对钢板则有所不同,下料切成小块后有可能垂直于辊轧方向受力,大块的板也可能处于平面应力状态。因此钢板拉力试验的试样应垂直于轧制方向切取(图 1.7)。按照钢材标准冲击试验取纵向试样。

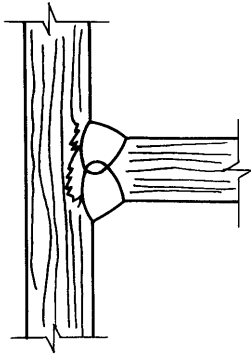


图 1.6 层间撕裂

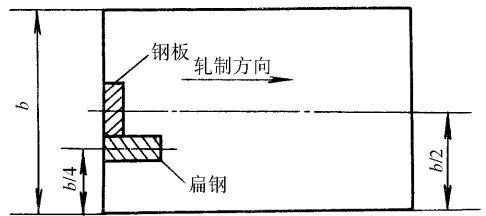


图 1.7 钢板和扁钢试件取样

实践表明,热轧钢材厚度小者强度高于厚度大者,而且塑性及冲击韧性也比较好。因此钢材的机械性能要按厚度分级。如Q235钢只是在厚度不超过16mm时屈服点为 $235\text{N}/\text{mm}^2$ 。超过16mm时要按厚度的递增而逐步减小。薄钢材性能好的原因,是辊轧次数多,轧制的压缩比大。厚度很大的钢材,压缩比过小,内部组织不如压缩比大的钢材,机械性能较差,尤其是冲击韧性差别最为显著。

同一根热轧型钢的不同部分,因压轧条件不同,机械性能也会有差别。轧制普通工字钢的轧机只有两个水平轧辊(图 1.8)。辊轧成型时腹板所受压力大于翼缘,翼缘所

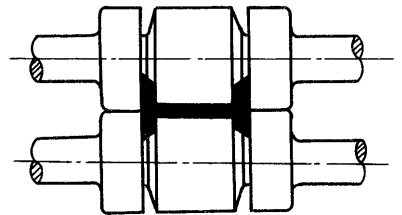


图 1.8 工字钢轧辊

受压力和它内侧的斜度有关。压力不同,其结果是翼缘和腹板在组织上有差别,机械性能随之也有差别:腹板的性能优于翼缘。但是,工字钢用作受弯构件时,翼缘的应力大于腹板,承载能力主要取决于翼缘的性能。因此,拉力试样如能在翼缘上取样,将更为合理,但翼缘内侧有坡度,不便做试样。因此,我国目前规定^[1,6],各类型钢拉力试验和冲击试验的样坯都从翼缘上切取,如图 1.9(b~ e)。不过,槽钢和工字钢拉伸试件也可以在腹板取样[图 1.9(b,c)],试样部位见图。

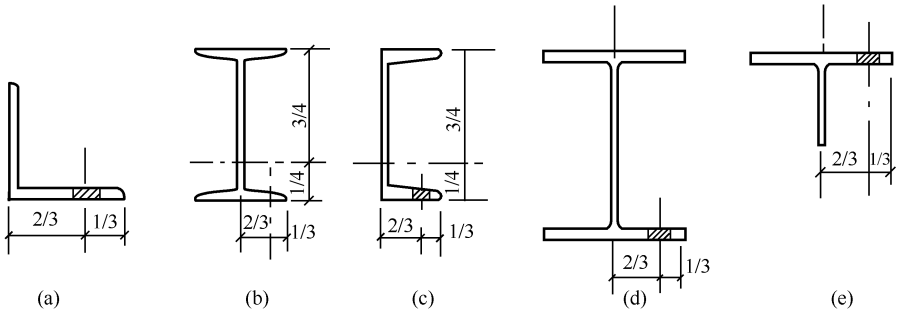


图 1.9 型钢试件取样

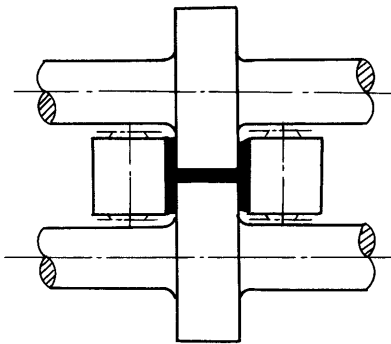


图 1.10 宽翼缘工字钢轧辊

宽翼缘工字钢(H 形钢)的翼缘内侧没有坡度,用两个水平轧辊和两个竖向轧辊同时辊压(图 1.10),翼缘也直接受到压力,情况要比普通工字钢好得多。但由于厚度不同,翼缘和腹板的性能还会有差别。差别的幅度,不同的试验报告有一些出入。B. W. Young 所得的结果是:翼缘的屈服点变动在腹板屈服点的 76% ~ 98% 之间^[1,7]。D. J. L. Kennedy 和 M. G. Aly 在分析宽翼缘工字钢的统计参数时取翼缘屈服点为腹板的 0.95^[1,8]。屈服点变动情况可参看

图 6.7(a)。

热轧的另一后果,是不均匀冷却造成的残余应力。以图 1.11(a)的钢板而言,板的两边和空气接触的面积大,冷却得快,中部则相反,在边部已经完全冷却后还保持一定温度。这时,中部的收缩受到边部的约束,形成拉应力,而边部则有与之相平衡的压应力。板的尺寸越大,冷却后的应力也越大。这种在没有外力作用下内部自相平衡的应力叫做残余应力。各种截面的热轧型钢都有这类残余应力,不过随截面形式和尺寸不同,残余应力的分布有所区别。普通工字钢翼缘厚而窄,冷却得慢,最后呈现残余拉应力,而腹板大部分是残余压应力[图 1.11(b)]。宽翼缘工字钢翼缘和腹板交接处材料最厚,冷却最慢。其翼缘残余应力分布和板

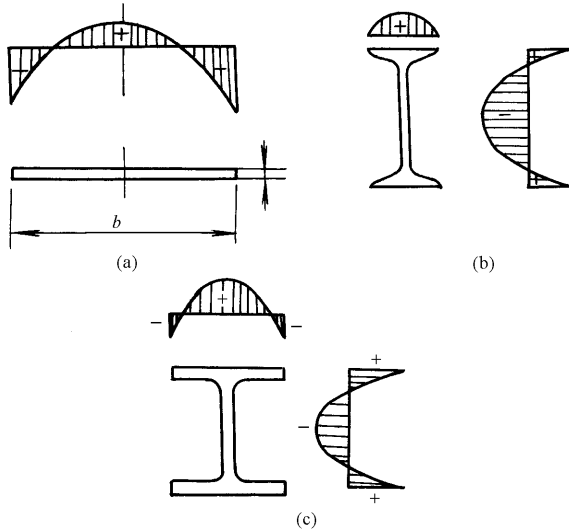


图 1.11 热轧钢材的残余应力

类似,但腹板两边受拉,分布图形和普通工字钢相似[图 1.11(c)]。一般地说,截面尺寸越大,残余应力也越大。残余应力虽然是自相平衡的,对钢构件在外力作用下的性能还是有一定影响。如对变形、稳定性、抗疲劳等方面都可能产生不利的作用。热轧钢材残余应力的绝对值和屈服点无关,因此对屈服点高的钢材来说,残余应力和屈服点的比值要小些。

1.1.4 矫直和热处理

钢材在热轧成型之后往往需要矫直。矫正原有的弯曲,必须反弯至出现塑性变形才能生效。图 1.12 所示宽翼缘工字钢绕弱轴有原始弯曲,给以反弯曲时沿翼缘宽度的应力分布如图中折线 $ABCDE$ 所示, AB 和 DE 为屈服区。在卸去施加的弯矩时,变形和应力都按线弹性规律变化,即相当于从 $ABCDE$ 应力图中减去 MCN 应力。因此,截面中残存有应力 $RSCTU$ 。反弯时受拉一侧为残余压应力。以上分析是按钢材不存在初始残余应力的条件做出的。实际上,钢材热轧冷却后存在残余应力,因此矫直后的残余应力应是对原始残余应力进行重新分布。重新分布使翼缘原始残余压应力峰值有所降低,将减轻用作压杆时的不利作用。矫直有

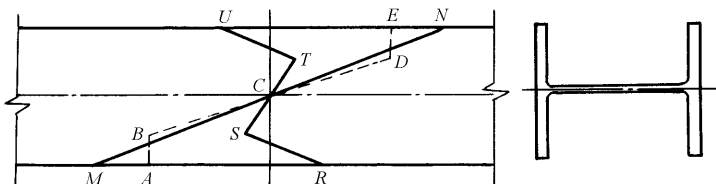


图 1.12 矫直产生的残余应力

两种方法:辊床调直和顶直。前法使整个杆长原始残余应力都重新分布,后法则重分布只发生在中部较短范围内。

热处理是改善钢材性能的重要手段之一。建筑结构用的钢材,一般以热轧状态交货,即不进行热处理。但是,屈服点超过 $400\text{N}/\text{mm}^2$ 的低合金钢常常要进行调质处理或正火处理。调质热处理包括淬火和高温回火两道工序。淬火时把钢材加热至 900°C 以上,保温一定时间,然后放入水或油中快速冷却。淬火使钢材的强度提高,但却使塑性和韧性降低。为了改善塑性和韧性,把淬火后的钢材在 $500\sim 650^\circ\text{C}$ 范围内进行高温回火,即升温后保持一段时间,然后在空气中冷却。回火可以减小脆性和淬火后造成的内应力,从而得到较好的综合力学性能。国外屈服强度为 $550\text{N}/\text{mm}^2$ 以上的合金钢,都经过调质热处理。正火是热处理的另一种形式,把钢材加热至高于 900°C 后保持一段时间,然后在空气中冷却。它的目的在于改善钢材的组织 and 细化晶粒。普通热轧型钢和钢板以热轧状态交货,实际上是轧后在空气中冷却的一种正火状态。但是,如果钢材停轧温度过低(低于 850°C),会出现带状组织,使钢材各向异性。因此对质量要求高的钢材如桥梁钢,需要另行正火处理,或是采用控制轧制的办法来保证质量。我国对屈服点不超过 $450\text{N}/\text{mm}^2$ 的高强度低合金钢都规定以热轧状态交货,但对 15MnTi , 14MnVTiRE 和 15MnVN 钢规定的力学性能则是指热处理状态的。

通过控温控轧技术以获得细晶粒高性能钢是当前结构用钢发展的重要途径。高性能不仅表现在强度高(屈服强度可达 $460\text{N}/\text{mm}^2$ 或更高),而且延性和韧性都很好。所谓控温控轧,既要控制加热和轧制温度,又要控制轧制后冷却速度。

武汉钢铁公司生产的正火型桥梁钢 14MnNbq 和控轧型公路桥梁用钢 WQ490E 实物质量都十分优异^[1,22],屈强比保持在较低范围,且具有较高的低温冲击韧性。

1.1.5 钢材的匀质和等向性

一般认为钢材内部组织比较接近于匀质和各向同性体,所以钢结构的实际受力情况和工程力学计算比较符合。显然钢材质地均匀的程度比混凝土好,各向同性的程度比木材好。但是,这只是问题的一个方面,是和其他材料比较而言的。我们从事钢结构设计和研究时,则还必须了解钢材在匀质和等向性方面有哪些不足,才能善于使用钢材。

钢材内部化学元素的分布并不是完全均匀的。钢锭的四周部分含碳较少,从周边到中心碳逐渐增多,硫、磷等杂质也聚集在冷却较慢的部分,形成偏析。沸腾钢偏析比镇静钢严重。由图1.13所示钢锭中硫的偏析,可见沸腾钢偏析的严重程度^[1,9]。偏析并不因轧制而有所改善。偏析严重的钢锭,轧制成材后偏析区的分布如图1.14所示。沸腾钢锭的偏析,头部比底部严重得多。因此轧成型钢或钢板的偏析程度和它来自钢锭的那一部分有关。重要的焊接结构,为了避免偏析造成

开裂,不宜采用沸腾钢。采用药皮含有 CaO 的碱性焊条施焊,可以对焊缝的熔化金属进行脱硫,但这种焊条工艺性能比较差,要求焊工具有较高的技术。

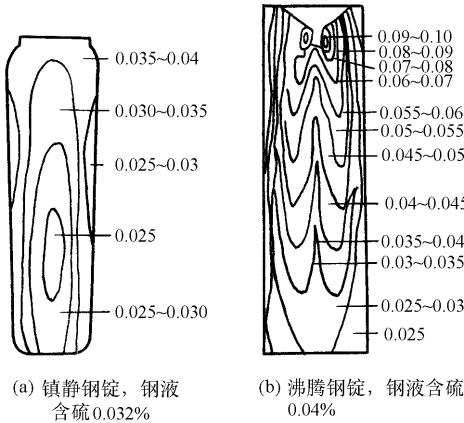


图 1.13 钢锭中硫的偏析

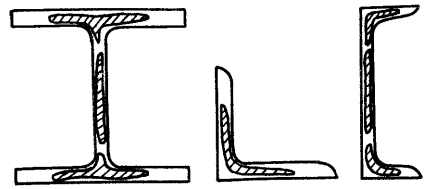


图 1.14 型钢硫的偏析

型钢截面上不同部分的屈服点有差别,是力学性质上的一种非匀质现象。H形钢不仅翼缘和腹板的屈服点有差别,它的翼缘也并不是屈服点完全一致的,变化幅度可以达到 $\pm 14\%$ (参看图 6.7)。前面说过,在翼缘上切取试样确定屈服点比在腹板上取样更能反映材料的实际性能。测出有代表性的力学性能的另一个方法是做型钢短段的压缩试验来测定它的平均屈服点。

钢材内部存在的残余应力,从受力角度来说也是一种不均匀性。当构件受压时,残余压应力最大处将首先屈服,此后继续加压,已屈服部分不再分担更多的压力,外力在截面上分布就不均匀了。

钢板的各向异性,表现在三个方向的受力性能。沿轧制方向力学性能最好,横方向稍差。图 1.15 给出一种锅炉钢板纵向和横向冲击韧性值 a_k 的对比,差别十分明显^[1,10]。钢板如果有分层,则沿厚度方向性能最差。是否有分层,分层的情况如何可以通过超声波等探伤手段去揭示。用一般质量的钢轧成较厚的板,局部性的分层往往难于避免。因此,对于比较重要的结构,一要对钢材进行探伤检查,并限制局部分层的面积,二要在设计时注意避免垂直于板面受拉和焊缝收缩造成层间撕裂。在第三和第十章还将讨论这些问题。近年来出现一种抗层间撕裂的钢材,名为 Z 向钢。这种钢材的含硫量在 0.01% 以下,沿厚度方向受拉时表现较好的塑性,截面收缩率在 15% 以上。这种钢能够适用于荷载大而有动力作用和气象环境恶劣的结构如海上采油平台。我国已制订国家标准《厚度方向性能钢板》(GB5313-85),适用于厚度为 15~150mm、屈服点不大于 500MPa 的镇静钢的板材。标准要求钢板满足保证厚度方向性能的补充规定,主要是含硫量的限制和厚度方向拉伸的断面收缩率,并分为三种级别。见表 1.1。2000 年实施的《高层

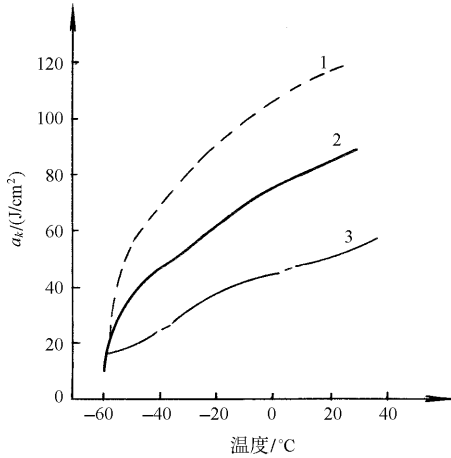


图 1.15 钢板冲击韧性的非等向性

1. 纵向试样 2. 横向试样 3. 人工时效后时横向试样

建筑结构用钢板》(YB4104)包括有 Q235GJZ 和 Q345GJZ 两种钢号,可以保证厚度方向性能符合表 1.1 的规定。

表 1.1 厚度方向性能钢板的级别

级 别	含硫量 (不大于)/%	断面收缩率(不小于)/%	
		三个试样平均值	单个试样值
Z15	0.010	15	10
Z25	0.007	25	15
Z35	0.005	35	25

从以上的论述可见,认识钢材的性能并不是一个简单的问题,而正确地认识材料性能对于一个钢结构设计工作者却是至关重要的。缺乏正确的认识,有可能导致失败的设计。加拿大一座仓库的屋盖塌落,有多方面的原因。其中之一是设计时材料强度取了出厂证书上的屈服点,比标准值高25%,而拉力试样取自工字钢的腹板。

1.2 钢结构的建造过程及其对构件性能的影响

1.2.1 钢结构的建造过程

现代钢结构都是在专业化的金属结构制造厂中用热轧钢材或冷弯型钢加工成构件或构体(构件的集合体),然后运到工地安装而成。

工厂制造包括以下工序:

钢材的验收、整理和保管,包括必要的矫正。

按施工图放样,做出样板、样杆,并据以划线和下料。

对划线后的钢材进行剪切(焰割)、冲(钻)孔、和刨边等项加工;非平直的零件则需要通过煨弯和辊圆等工序来成型。

对加工过程中造成变形的零件进行整平(辊平、顶平)。

把零件按图装配成构件,并加以焊接(铆接)。

对焊接造成的变形加以矫正。

除锈和涂漆。

工地安装工作包括:

现场的扩大拼装,即把工厂运来的构件(或大构件的一部分)集成较大的构件或构体。

把扩大拼装后的各构件(体)一一吊装就位,相互连接,加以临时固定。

调整各部分的相对位置,使符合安装精度的要求,并做最后固定。

1.2.2 加工对钢构件性能的影响

加工对钢构件性能的影响主要表现为两类:其一是常温下加工的塑性变形,即冷作硬化和其后的时效影响;其二是局部高温的影响,主要是焊接的影响,也有氧气切割的影响。

1. 冷加工的影响

从钢材的应力应变图(图1.16)可见,当材料经受的塑性变形不大,如拉伸图中的B点,则屈服点没有提高,塑性和韧性只是稍有降低。在辊床上把微弯的杆调直,属于这种情况。如果拉伸到C点,则屈服点将有所提高,而塑性及韧性则降低很大。塑性和韧性降低,属于不利后果。钢结构工程施工及验收规范GB50205-95^[1-15]对冷弯曲的曲率半径最小值有所规定,以限制冷加工的应变不致过大。从图1.17中可以看出,沸腾钢板人工时效使冲击韧性降低的情况。人工时效是给人以20%拉伸变形后均匀地加热到250℃并在这一温度下保温一小时。时效后不仅冲击韧性降低,脆性转变温度由原来的-10℃上升到20℃。韧性降低的原因包括冷加工和时效两种因素。如果是镇静钢(图1.15),冲击韧性虽有所降低,但脆性转变温度无大变化。

钢材的剪切和冲孔,使剪断的边缘和冲出的孔壁严重硬化,甚至出现微细裂纹。对于比较重要的结构,剪断处需要刨边;冲孔只能用较小的冲头,冲完再行扩钻。目的都是把硬化部分除掉,以免裂纹在一定条件下扩展。例如,焊接结构的工地安装孔,如果在冲成后受到邻近焊缝的影响而加热至200~450℃,使时效很快完成,孔壁裂纹就有扩展危险。钢板剪断的边缘如果以后还焊焊缝,可以不刨边。因为硬化部分会受热熔化。

图1.2所示冷弯型钢,是用轧制好的薄钢板加工弯成的。冷弯成型的方法有

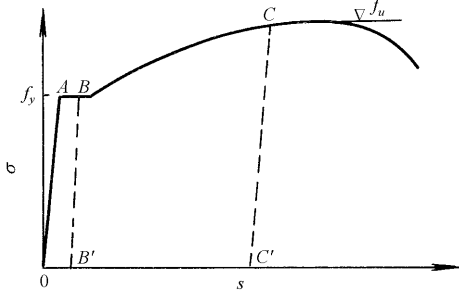


图 1.16 建筑钢材的应变硬化

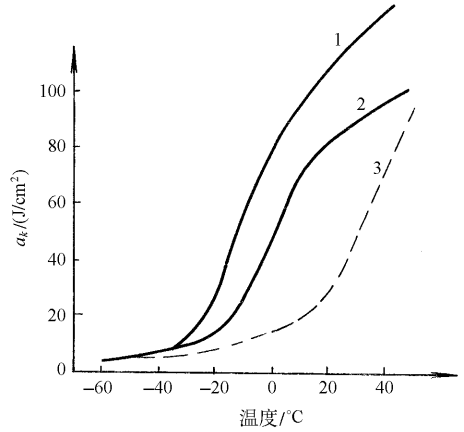


图 1.17 应变硬化使冲击韧性降低

- 1. 纵向试样 2. 横向试样
- 3. 人工时效后的纵向试样

冷轧、模压和无模压弯。不论采用哪种方法，钢板都经受一定的塑性变形，并出现强化和硬化。如图 1.18 所示卷边槽钢，冷弯成型后弯角部分屈服点大幅度提高，抗拉强度也有所提高，但不如屈服点提高的百分比大^[1.11]。弯角之间的平板部分屈服点是否有提高，提高幅度如何，和加工成型的工艺很有关系，压制成型者平板部分屈服点没有明显提高。

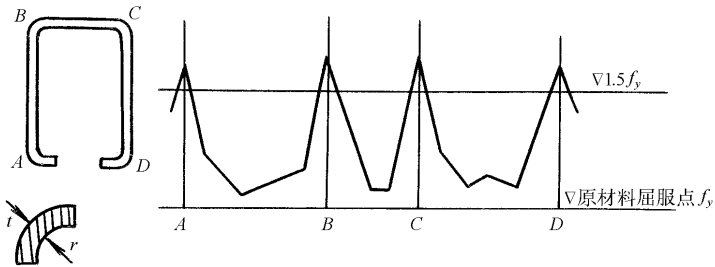


图 1.18 冷弯型钢屈服点提高

弯角部分的塑性变形，外侧沿圆弧方向为拉伸，沿半径方向为压缩，内侧则沿弧线压缩，而沿半径拉伸。这些塑性变形都是垂直于构件受力方向的，对构件抗拉和抗压性能的影响相同。

显然，材料弯成圆角时半径和板厚之比 r/t 越小，塑性应变越大，屈服点提高幅度也就越大。据 K. W. Karren 的研究，圆角材料的屈服点由原来的 f_y 提高到^[1.12]

$$f_{yc} = bf_y / (r/t)^m \tag{1.1}$$

b 和 m 都是和材料抗拉强度 f_u 和屈服点 f_y 的比有关的系数:

$$b = 3.69(f_u/f_y) - 0.819(f_u/f_y)^2 - 1.79 \quad (1.2)$$

$$m = 0.192(f_u/f_y) - 0.068 \quad (1.3)$$

从图 1.16 可以看出, f_y 提高的幅度和材料 f_u 高于 f_y 的程度有关: 高的越多则应变发生后 f_y 提高得也越多。因此, b, m 两个系数都由比值 f_u/f_y 确定。

从以上论述可见, 冷弯型钢也是力学非匀质的。考虑到冷弯型钢壁厚很小, 允许采用较小的 r/t 值, 因此屈服点提高幅度颇大, 设计时在一定条件下可以利用圆角强化的性能。如轴心受拉和轴心受压构件, 其屈服点可以取整个截面的加权平均值, 即

$$f_{yp} = cf_{yc} + (1 - c)f_y \quad (1.4)$$

式中 c 是截面中圆角所占面积和整个面积的比。

式(1.1)不适用于 f_u/f_y 小于 1.2 和 r/t 大于 7 的情况。同时, 如果受压时截面非全部有效(即平板部分先丧失局部稳定), 则不利用圆角屈服点的提高。如果构件是冷轧成型的, 它的平板部分的屈服点也明显提高, 则式(1.4)的 f_y 可以改用通过试验测定的平板部分平均屈服点。

黑龙江省低温建筑研究所运用塑性理论, 得出圆角强化后屈服点的计算公式, 和截面平均屈服点的计算公式^[1.18]。经统计处理和简化后, 平均屈服点由下式给出, 即

$$f_{yp} = \left[1 + \frac{\eta(12\gamma - 10)l}{t} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_i}{2\pi} \right] f_y = \nu f_y \quad (1.5)$$

式中 η 为成型方式系数, 对于冷弯高频焊(圆变)方、矩形管取 $\eta = 1.7$, 对于圆管和开口型钢取 $\eta = 1.0$; γ 为钢材的强屈比 f_u/f_y , 对 Q235 钢可取 1.58, 对 Q345 钢可取 1.48; l 为型钢截面中心线长度, 可取型钢截面积与其厚度的比值; n 为型钢截面所含棱角数目; θ_i 为型钢截面第 i 个棱角所对应的圆周角(rad)。

当有四个 90° 圆角时, $\sum_{i=1}^4 \frac{\theta_i}{2\pi} = 1$, 上式的提高系数 ν 简化为

$$\nu = 1 + \eta(12\gamma - 10) \frac{l}{t} \quad (1.6)$$

如果 $l/t = 1/80$, $\eta = 1.7$, $\gamma = 1.58$, 则 $\nu = 1.13$ 。

公式(1.5)和试验数据符合较好。国家标准《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB50018)规定, 计算全截面有效的受拉、受压或受弯构件的强度时可以采用式(1.5)给出的提高系数。此时强度设计值为 $f' = \nu f$ 。

冷弯型钢的成型过程也使它产生残余应力, 将在第十一章中阐述。

2. 焊接和焰割的影响

对钢材进行焊接, 造成以下三种后果:

(1) 焊缝金属具有铸造组织, 不同于轧制钢材。

(2) 焊弧的高温使邻近焊缝的钢材发生组织变化。

(3) 局部性的高温使钢材发生塑性变形,冷却后存在残余应力。

施焊时堆积的金属通常具有枝状组织。当用多层焊时,后一次的热量对前一层有退火作用,使晶粒变细,但是顶层受不到退火作用,保持堆积时的铸造组织。

焊缝金属在碳、氮、氧、氢的含量方面和轧制钢材也有差别。碳含量稍低,而氮、氧、氢稍高。氮的不利影响已在 1.1.1 节中谈到过。熔焊的金属冷却很快,和沸腾钢锭有些类似,因而含氧高,气泡和夹杂都较多,如果延长冷却过程,可以降低氧的含量。另外,采用短弧焊、埋弧焊和气体保护焊,使熔化金属和空气更好地隔离,可以不同程度地降低氮和氧的含量。

焊缝金属含氢量高,来源于大气和焊条药皮,包括药皮的有机物成分和吸收的水分。当冷却快时,氢能使焊缝金属内部出现微观裂纹。因此,不仅受潮的焊条必须烘干后才能使用,重要的结构还要用低氢型焊条 E4315、E4316 以及 E5015、E5016,以避免出现裂纹。用低氢型焊条得到的焊缝金属,脆性转变温度接近于镇静钢材。和铸锭时类似,当焊缝金属冷却比较缓慢时,氧和氢的含量就会减少,使之缓冷的一个有效措施是对焊件预先加热至 $\leq 200^{\circ}\text{C}$ 。预热使焊后冷却过程延长,改善了焊接构件的性能。我国《建筑钢结构焊接技术规程》规定,厚度大于 40mm 的 Q235 钢和厚度大于 25mm 的 Q345 钢,在焊接时需要预热,最低预热温度控制在 $60\sim 140^{\circ}\text{C}$ 。施焊后还应进行后热,其温度由试验确定。

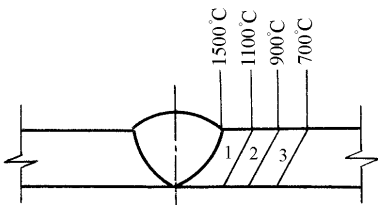


图 1.19 热影响区

1. 过热区 2. 正火区 3. 部分重结晶区

焊弧的热量使主体金属有一小部分熔化。邻近熔化区受到高温影响的部分叫做热影响区。热影响区是一个笼统的名称,它包括几个不同的区域,即过热区、正火区和部分重结晶区。图 1.19 示意这几个区域的分布情况。过热区的温度达到 1100°C 以上,它的晶粒粗大,强度和硬度提高,塑性和韧性降低,有时还会出现韧性很低的针状组织

(魏氏组织)。正火区是温度达到 $900\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 的区域,这一区域的力学性能很好,强度、塑性、韧性都较高。部分重结晶区是温度达到 $700\sim 900^{\circ}\text{C}$ 的区域,这一区内晶粒粗细不匀,因此力学性能不太好。采用电弧焊时,热影响区的宽度并不大,总共不过几个毫米,一般手工焊时约为 6mm,而自动焊时只有 2.5~3mm。

虽然热影响区是焊接结构中韧性较低的部分,但实际上结构从这里开始断裂的并不很多。结构的脆性断裂往往是多种因素共同作用的结果(参看 3.3 节),而热影响区通常没有宏观缺陷,而且焊接形成的残余应力在这一范围内比较低。如果热影响区正好遇到分层,则情况即有所不同。

焊接残余应力的产生,可用以下的简单模型来说明^[1.13]:三根同样长度的杆,端部由刚性构件连在一起(图 1.20),中央杆 2 的温度 T_1 远远高于两边的杆 1

和3。在冷却过程中,中杆趋于缩短,但收缩倾向在很大程度上受到两根边杆的约束而不能实现,从而使它受到拉力。同时,中杆的收缩作用使边杆受到压力。显然,对整个体系来说,拉力和压力相互平衡。在两板之间焊一条纵向焊缝(图 1.21),情况要比上述简单模型复杂得多。这里,不仅焊缝及其近旁母材温度远远高于较远部分,而且存在热态塑性压缩问题。图 1.21 的两块板在施焊时处于 600°C 以上的部分呈完全塑性。这部分在加热时受到两旁处在弹性状态的材料的制约,得不到应有的伸长,也就是受到了热态塑性压缩。在焊后冷却过程中,高温的塑性压缩部分趋向于缩得比原长度要短一些。由于温度梯度很大,而且存在局部性的塑性压缩,冷却后焊缝及其近旁的母材残余拉应力很高,经常达到材料的屈服点,甚至因热效应对材料性能的影响而比母材原有屈服点还高一些。焊接构件的残余应力和热轧构件一样,在整个截面上拉压两部分应力自相平衡,不同的是焊接构件在焊缝及其近旁的残余拉应力特别高。

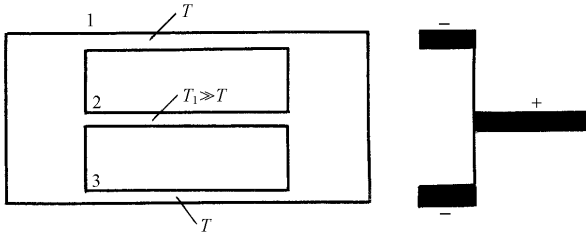


图 1.20 热残余应力的形成

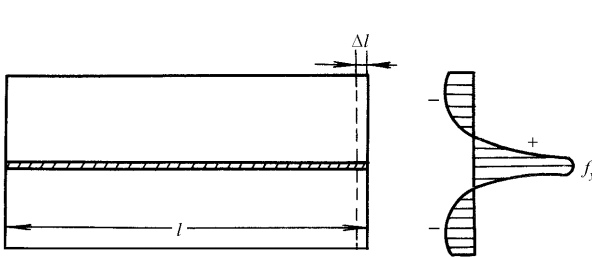


图 1.21 有纵向焊缝板的残余应力

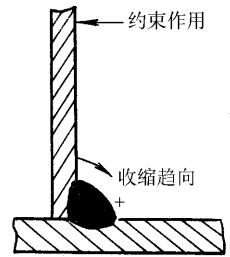


图 1.22 反作用残余应力

由于有热态塑性压缩,焊接构件除了残余应力外还存在残余变形,如图 1.21 所示的原长为 l 的板在温度降低到室温后缩短 Δl 。在制造厂对焊接结构的零件下料时,要考虑这种收缩而把材料适当放长。如果这两块板受到相连的刚性部分牵制而不能收缩,则整个构件将产生拉应力,这是另一种焊接残余应力,叫做反作用残余应力。在两块互相垂直板的一侧夹角焊上角焊缝(图 1.22),则焊缝的收缩促使夹角减小。如果这种减小受到约束而不能实现,则焊缝的纵截面内将出现反作用残余拉应力,这种应力有可能使焊缝出现裂纹。

钢板时常用氧气切割成需要的宽度。火焰切割的高温 and 焊缝一样造成残余

应力和变形。两纵边用氧气切割的钢板,具有如图1.23所示的残余应力图形。这种板用作焊接工形梁的翼缘时,加焊角焊缝后,残余应力转变为图1.24所示的形式^[1.14]。如果用作工形梁的腹板,残余应力和图1.23相比变化不大。

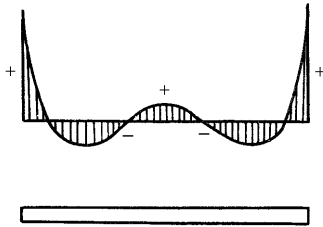


图 1.23 火焰切割残余应力

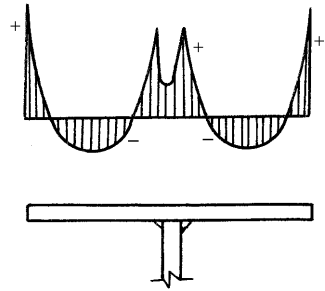


图 1.24 火焰切割边的板焊后残余应力

3. 热矫正和热成型

构件在焊接后除了长度缩小外,还会产生其他变形如角度变化、弯曲等。虽然在加工过程中采取防止措施,仍会或多或少存在残余变形,需要加以矫正。常用的矫正方法是进行局部加热,使其冷却后产生反向变形。为了防止淬火效应,加热温度不应超过 900°C ,钢结构工程施工质量验收规范GB50205还规定,低合金钢在加热矫正后应自然冷却。对碳素钢未提这一要求,原因是含碳量低于 0.25% 的碳素钢淬硬性很低。适宜的温度是不超过 700°C ,最好按 650°C 来控制^[1.23]。经过调质处理的高强度钢,为了不致消除回火的效应,应把温度控制在回火温度之下,最好不超过 590°C ,并注意缓慢冷却。

热加工成型的构件需要加热到 $900\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 。碳素钢和低合金钢应分别在温度下降到 700°C 和 800°C 之前结束加工,低合金钢应自然冷却。

1.2.3 制造和安装的偏差对钢结构性能的影响

钢结构的制造和安装都允许有一点偏差,偏差的最大限度应不超过施工质量验收规范的规定。例如,单层钢柱出厂时及安装就位后,柱身弯曲的矢高不超过构件长度的 $1/1200$,且不超过 12mm ,多节钢柱的柱身弯曲矢高则不超过该节长度的 $1/1500$ 和 5mm 。柱子安装就位后轴线和竖直线之间在柱顶的偏差(初始倾斜)对高 10 米以内的单层柱不超过 10mm ,对更高的柱不超过 $H/1000$ 及 25mm (图1.25)。其他如构件的长度,就位后的标高等也都有所规定^[1.15]。

构件在承受荷载前存在初始弯曲,是一种几何缺陷。它对不同的构件产生不同的影响。对于轴心拉杆来说,初始弯曲使杆受拉后的变形比完善直杆要大,但并不降低杆承受拉力的能力,因为初曲的杆受拉后逐渐拉直。对于轴心压杆,情况要严重得多,初始挠度不仅不逐渐消失,反而随压力增大而增大。因此存在初曲的轴心压杆,实际上是既受压又受弯。附加弯矩的出现和增长,称为 $P-\delta$ 效应。

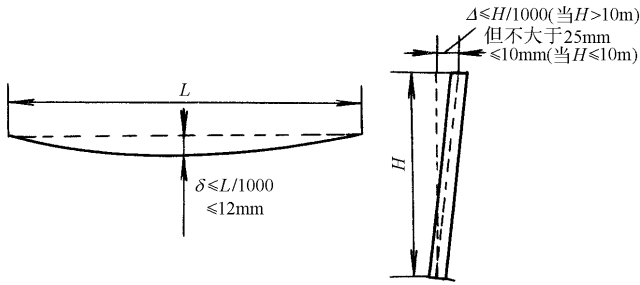


图 1.25 单层柱安装偏差限值

它必然要使杆件承受压力的能力受到损害。处在倾斜位置的柱子,在垂直于地面的压力作用下产生倾复力矩使之进一步倾斜。这种不利影响称为 $P-\Delta$ 效应。

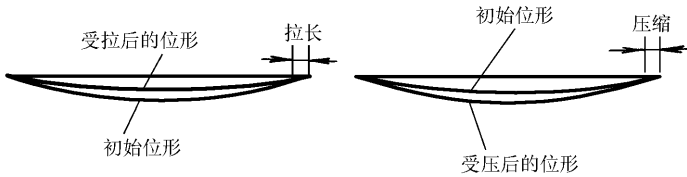


图 1.26 初始弯曲的影响

用许多杆件组装而成的杆系结构,当为静定结构时,杆件长度的允许偏差,只不过使结构的外形稍有变化[图1.27(a)].当为超静定结构时,情况就不同了。如图1.27(b)的体系,若 AC 杆有负偏差而其他杆都是正偏差,则安装时采取措施强行组装后,周边各杆将产生压力,两斜杆则产生拉力。压力和拉力在体系内自相平衡。由于出现在承受荷载之前,称为初始内力或残余内力。当初始内力和荷载引起的内力同号时,将使承载能力降低。澳大利亚的学者对平板网架进行模

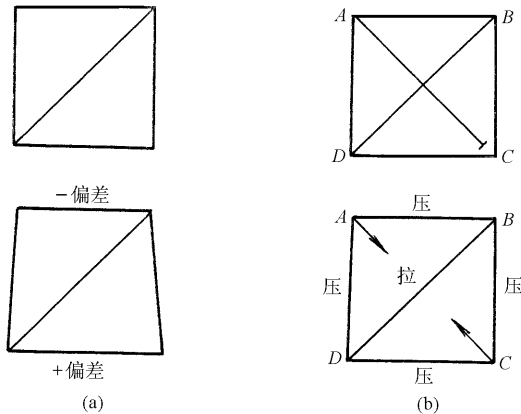


图 1.27 杆长度偏差的影响

型试验研究,测得一部分杆的初始内力为杆所能承受的力的7%~12%,初始内力和节点偏心、螺栓连接处的滑移等因素合在一起,使网架承载能力比理论计算值低13%~37%。超静定次数越高,差距越大^[1.16]。这和传统的概念“超静定次数越多安全储备越大”正好相反,由此可见施工和构造细节对结构性能影响之大。

鉴于制造和安装过程能够改变钢材原有性能和影响结构的承载能力,钢结构设计工作者应该熟悉制造和安装的各个环节,了解它们可能产生的影响以及如何保证结构的质量,并对制造和安装工作提出必要的合理要求。

1.3 外界作用对钢结构性能的影响

外界作用包括钢结构建成后的使用荷载和大气作用等。

1.3.1 多轴应力的影响

钢材在双向拉力作用下屈服应力和抗拉强度提高,延伸率降低,反之,在异号双向应力作用下,屈服应力和抗拉强度降低,而延伸率增大。图1.28给出单向拉伸和双向应力的应力应变关系的对比^[1.17]。如果是三向受拉,塑性比双向受拉进一步降低,破坏将是脆性的。因此,三轴拉应力对钢结构来说十分不利。

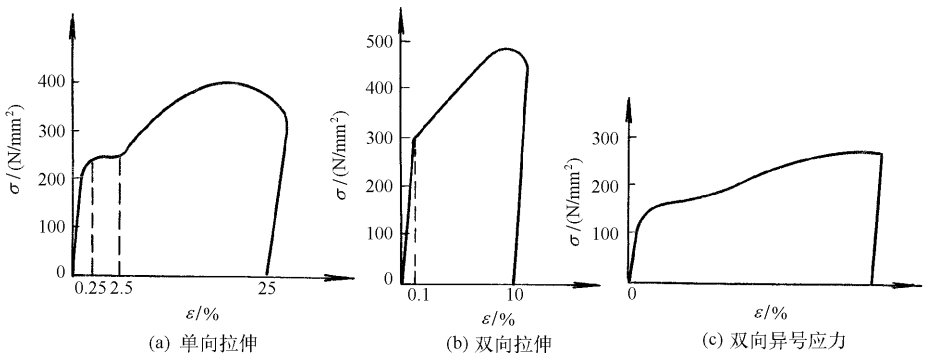


图 1.28 不同应力条件下的应力-应变图

1.3.2 加荷速率的影响

结构在动力作用下,加荷速率有时很高。例如,在强烈地震作用下,钢框架构件的最大应变可能达到 $1.6 \times 10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。钢材在快速加荷作用下的响应,也是设计人员应该了解的,在20℃左右的室温环境下,钢材的屈服点 f_y 和抗拉强度 f_u 虽然随应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的增大而提高,塑性变形能力却并未下降,反而和强度一样有所提高。图1.29给出静力和动力荷载下钢材本构关系的对比^[1.19]。由图可见,在动力作用下钢材开始硬化的应变 ϵ_s 有较大增加,极限应变 ϵ_u 略有增大。文

献[1.19]给出这些物理量随应变速率变化的公式。对于屈服点等于 235MPa 的钢材,这些公式是

$$f'_y/f_y = 1.306 + 0.061 \log \dot{\epsilon}$$

$$f'_u/f_u = 1.124 + 0.0414 \log \dot{\epsilon}$$

$$\epsilon'_{st}/\epsilon_{st} = 3.024 + 0.406 \log \dot{\epsilon}$$

$$\epsilon'_u/\epsilon_u = 1.095 + 0.0217 \log \dot{\epsilon}$$

式中左端带撇(')的符号属于动力加荷,不带撇者属于静力加荷。当应变速率为 $\dot{\epsilon} = 10^{-1} s^{-1}$ 时,以上公式给出

$$f'_y/f_y = 1.245 \quad f'_u/f_u = 1.083 \quad \epsilon'_{st}/\epsilon_{st} = 2.618 \quad \epsilon'_u/\epsilon_u = 1.073$$

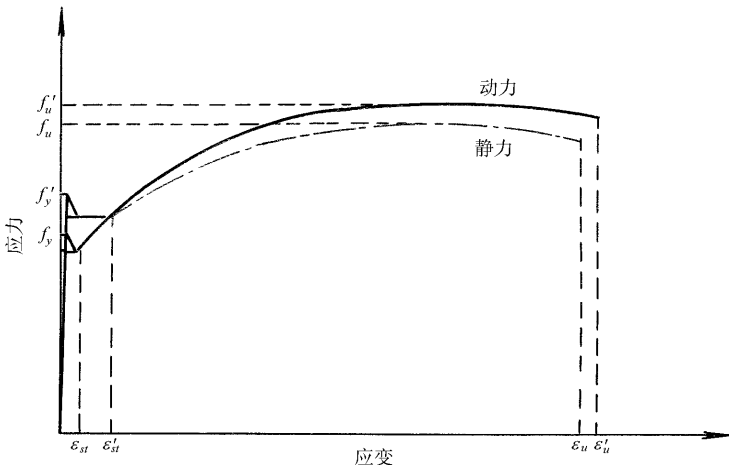


图 1.29 不同加荷速率下钢材的本构关系曲线

建筑结构钢材在冲击性的快速加载作用下保持良好的强度和塑性变形能力,从一些灾害性事故中得到证明:1945年美国纽约的帝国大厦在大雾中遭到一架B25轰炸机的冲撞,飞机的质量约为 10^4kg ,速度为 100m/s ,几乎撞到第78和79层之间的一根主要柱子上。结果这一高耸建筑的主框架并未损坏,受损的只是两根墙梁被拉脱^[1.20]。第二次世界大战期间英国被炸弹命中的多层框架建筑,爆炸使柱和梁受到的直接损害也比较轻,即使个别梁或柱损坏,整个框架结构仍能屹立如常。最新的一个证例是1993年美国纽约世界贸易中心连接两座塔楼的低层部分遭受炸药爆炸袭击的后果。爆炸现场钢结构损害轻微,柱子一根也未炸坏。有一根柱因旁边三层楼板相继炸穿而无支长度达到21m,相应的长细比为190。按所承动力荷载计算的安全系数已小于1.0,但仍完好无损^[1.21]。此外,很多高层建筑钢结构在剧烈地震作用下表现出良好的吸收和耗散能量的能力,也说明这一点。

动力荷载也确实有对钢材性能不利的一面,即脆性转变温度随加荷速率增

大而提高。这个问题将在第三章 3.3 节中论述。

1.3.3 循环加荷的影响

钢材或钢构件在经受冷拉至产生塑性变形后,再使之受压,则压缩应力-应变关系与未曾预拉过的压杆有很大不同。 σ - ε 关系曲线很早就不再是直线,以致变形模量成为变化着的切线模量 E_t (图 1.30),其值小于原材料的弹性模量 E 。 σ - ε 曲线没有屈服平台,按残余应变为 0.2% 确定的屈服强度比受拉时的屈服强度要低。这种经预拉后抗压性能有所退化的现象称为包辛格(Bauschinger)效应。先压后拉也产生类似的退化现象,但在工程中的影响不如先拉后压的重要。

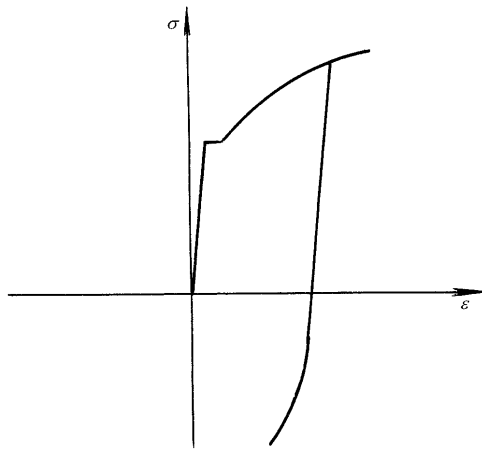


图 1.30 钢材的包辛格效应

钢材在多次重复的循环荷载作用下滞回环丰满而稳定(图 1.31)。这是一种极好的性能,为钢结构在地震作用下耗能能力提供了基础。不过在抗震设计中包辛格效应有明显影响。由图 1.31 可见,随着循环中拉力增大,受压切线模量 E_t 不断下降。

1.3.4 低温和腐蚀性介质的影响

低温使钢材韧性降低。温度降到一定程度时钢材在冲击荷载作用下完全是脆性断裂,腐蚀性介质也会促成脆性断裂并影响疲劳强度。这些因素的影响将在第三章和第四章阐述。

防止钢结构的锈蚀,长期以来都是依靠涂料来加以保护,并且避免在有腐蚀性介质的环境中使用钢结构。近年来出现了耐大气腐蚀的钢材,办法是在冶炼低碳或低合金钢时加入铜、铬、镍等合金元素使钢材表面形成保护层,以提高抗锈能力。我国的耐大气腐蚀钢称为耐候钢,按照以下两种国家标准生产。

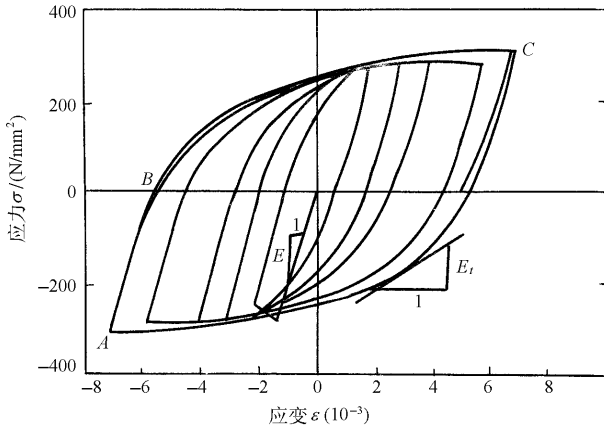


图 1.31 钢材在循环荷载作用下的应力应变关系

(1) 焊接结构用耐候钢(见国标 GB4172-84)包括四种牌号,即 16CuCr, 12MnCuCr, 15MnCuCr 和 15MnCuCr-QT。它们的共同点是含铜均为 0.20%~0.40%,含铬量前一种为 0.20%~0.60%,后三种为 0.30%~0.65%。牌号中 QT 表示进行淬火加回火热处理。这四种钢材都具有良好的焊接性能和力学性能,屈服点的标准值见表 1.2。对厚度 12~50mm 的钢材可保证 0℃ 和 -20℃ V 形缺口冲击功 27J。

表 1.2 焊接用耐候钢的标准屈服点(N/mm²)

牌号 厚度/mm	16CuCr	12MnCuCr	15MnCuCr	15MnCuCr-QT
≤ 16	245	294	343	441
> 16~ 40	235	284	333	431
> 40	216	265	312	412

(2) 高耐候性结构钢(见国标 GB4171-84)包括三种牌号,即 09CuPCrNi-A, 09CuPCrNi-B 和 09CuP。它们的共同特点是磷的含量略高于一般钢材,以之作为合金元素。这类钢的耐候性能比前一类的好些,但用作焊接结构时厚度一般应不大于 16mm,使它在工程中应用受到限制。

1.3.5 高温的影响

除了有热源的生产车间外,钢结构可能遭受的高温主要来自火灾。钢材在高温下的性能,一般钢结构教科书都有论述。这里需要补充的是火灾过后钢结构损伤的情况。文献[1.24]认为,未受力的钢材当升温到 700℃ 以内(不超过铁碳平衡图的临界点 A),然后冷却,其拉伸性能可以恢复到常温时的水平,当升温到 800

~ 1000℃时,则冷却后的残余强度为原有强度的85%~ 100%。然而结构在发生火灾时构件承受着不同程度的内力,如果应力很低,且经受的温度不很高,则构件可以安全渡过灾难。反之,如果应力较高,且温度接近600℃,则高温软化可以导致压杆屈曲和拉杆出现颈缩,需要修复、加固或更换。如果火灾后构件没有出现新的变形,一般都可以继续安全承载。

防止钢结构火灾损伤的途径有二:其一是用防火材料加以保护,见12.7节;其二是开发和应用耐火钢材。宝山钢铁公司生产的耐候耐火钢系列新产品,在600℃高温下屈服点下降幅度不大于标准值的1/3,采用这种钢材可以减少或取消防火涂层。

参 考 文 献

- [1.1] 重庆钢铁设计研究院,工业厂房钢结构设计手册,冶金工业出版社,1980。
- [1.2] Eperon, Pierre-Alain, L'acier, Matériau de Construction, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1974。
- [1.3] 柴昶,我国建筑钢结构用钢材的现状与展望,钢结构,16,1,2001,pp.1~6,11。
- [1.4] 李文卿,建筑钢基本知识,中国工业出版社,1965。
- [1.5] 国家标准,低合金结构钢技术条件(GB1591-76),1979。
- [1.6] 国家标准,钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备(GB/T2975-1998)。
- [1.7] ECCS. Introductory Report, 2nd Int. Colloquium on Stability, 1976, p. 33。
- [1.8] Kennedy, D. J. L., GadAlly, M., Limit State Design of Steel Structures, Performance Factor, Can. J. Civ. Eng., 7, 1980, pp. 45~ 77。
- [1.9] Deutschen Stahlbau-Verband, Stahlbau, ein Handbuch für Studium und Praxis, Band 1, 2. Aufl., Stahlbau Verlags, 1961。
- [1.10] Владимирский, Т. А., Хруйкость стали, Машиз 1959。
- [1.11] Karren, K. W., Winter, G., Effects of Cold-Forming on Light-Gage Steel Members, J. of the Struct. Div., ASCE, 93, ST1, 1967, pp. 443~ 470。
- [1.12] Karren, K. W., Corner Properties of Cold-Formed Steel Shapes, J. of the Struct. Div., ASCE, 93, ST 1, 1967, pp. 401~ 432。
- [1.13] ICOM, Conception des Structures Métalliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1979。
- [1.14] SSRC, Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 3d. ed., John Wiley, 1976。
- [1.15] 钢结构工程施工及验收规范(GBJ50205-95),中国计划出版社,1995。
- [1.16] Schmidt, L. C., Ultimate Load Testing of Space Trusses, J. of the Struct. Div., ASCE, 108, ST 6, 1982, pp. 1324~ 1335。
- [1.17] Стрелецкий, Н. С., Работа стали в строительных конструкциях, 1956。
- [1.18] 金昌成等,冷弯型钢屈服强度的研究,钢结构研究论文报告选集,第二册,全国钢结构标准技术委员会,1983。
- [1.19] Soroshian, P., Choi, K. - B., Steel Mechanical Properties at Different Strain Rate, J. Struct. Engrg., ASCE, 113, 4, 1987, pp. 663~ 672。
- [1.20] Council on Tall Building. Group CL. Tall Building Criteria and Loading, New York, 1980, ASCE。