

钢 结 构 设 计 原 理

(第 二 版)

陈绍蕃 著

科 学 出 版 社

1 9 9 8

钢 结 构 设 计 原 理

(第 二 版)

陈绍蕃 著

科 学 出 版 社

1 9 9 8

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. —2版. —北京:科学出版社,1997

ISBN 7-03-005919-0

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 (97) 第 13629 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998 年 8 月第 二 版 开本: 787×1092 1/16

1998 年 8 月第三次印刷 印张: 23 1/4

印数: 7 901—9 900 字数: 539 000

定价: 39.00 元

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作了补充;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”一节作了更新。

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 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;本版都据之作了订正。在研究生教学过程中发现第一版存在的缺点和错误,本版也都作了相应修改。

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。本版的修订也许有新的不足或谬误,希望读者发现后不吝指正。

目 录

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	8
1.3 外界作用对钢结构性能的影响	14
参考文献	17
第二章 钢结构稳定问题概述	19
2.1 钢结构的失稳破坏	19
2.2 失稳的类别	20
2.3 结构稳定问题的特点	22
2.4 稳定计算中的整体观点	25
2.5 稳定设计的几项原则	27
参考文献	28
第三章 钢结构的断裂	29
3.1 钢结构脆性破坏及其原因	29
3.2 断裂力学的观点	31
3.3 防止脆性断裂	34
3.4 应力腐蚀开裂	43
参考文献	44
第四章 疲劳破损	46
4.1 影响疲劳破损的因素	46
4.2 疲劳设计的准则	53
4.3 疲劳试验和检验	61
4.4 提高疲劳性能的工艺措施	63
参考文献	64
第五章 拉杆	66
5.1 拉杆的极限状态	66
5.2 净截面的效率	68
5.3 角钢拉杆	70
5.4 螺纹拉杆	73
参考文献	74
第六章 轴心压杆	75
6.1 轴心压杆的极限状态	75

6.2 轴心压杆的稳定计算	82
6.3 压杆的计算长度	87
6.4 格构式压杆	99
6.5 压杆的截面尺寸	109
6.6 压杆的支撑	114
参考文献	121
第七章 受弯构件	123
7.1 受弯构件的强度	123
7.2 梁的过度塑性变形	129
7.3 梁的整体稳定	134
7.4 薄腹板梁的承载能力	155
7.5 多钢种混用梁	163
7.6 梁的截面尺寸	165
参考文献	169
第八章 压弯构件和框架	171
8.1 压弯构件的强度和平面内稳定	171
8.2 压弯构件的空间失稳	181
8.3 杆端约束和杆计算长度	188
8.4 框架	202
8.5 压弯构件的截面尺寸	211
参考文献	213
第九章 连接	215
9.1 角焊缝的性能和计算	215
9.2 抗剪螺栓连接	225
9.3 抗拉螺栓连接	234
9.4 兼承剪力和拉力的螺栓连接	241
9.5 承受重复荷载的螺栓连接	242
9.6 混合连接	244
参考文献	246
第十章 构造设计	247
10.1 构件的拼接	247
10.2 梁与梁的连接	253
10.3 梁与柱的柔性连接和半刚性连接	255
10.4 梁和柱的刚性连接	258
10.5 柱脚	266
10.6 桁架节点	270
10.7 抵抗疲劳的构造	277
10.8 抵抗脆性断裂的构造	282
参考文献	284

第十一章 冷弯薄壁型钢结构的特点	286
11.1 冷弯薄壁构件的一般特点	286
11.2 屈曲后强度和有效截面	292
11.3 屈曲中的相关作用	303
11.4 方管、矩形管桁架节点	307
参考文献.....	319
第十二章 钢结构设计的其他问题	321
12.1 钢结构的塑性设计	321
12.2 抗震钢结构的特点	330
12.3 箱形梁	337
12.4 受扭构件	346
12.5 设计中的试验工作	351
12.6 钢结构加固设计	353
参考文献.....	359
索引.....	362

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)。

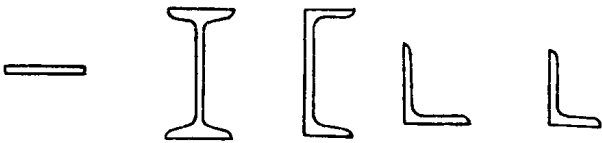


图 1.1 热轧钢材

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。

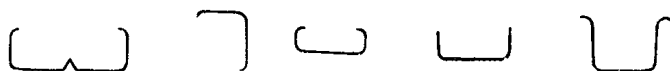


图 1.2 冷弯型钢

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亲和力比铁高的锰、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

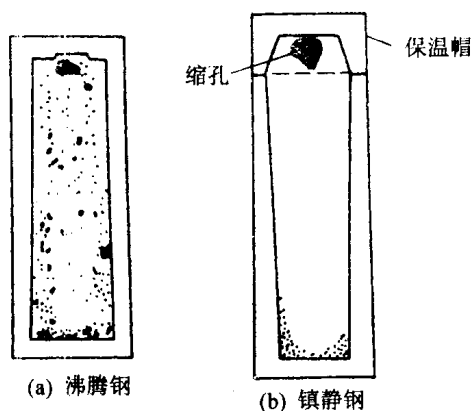


图 1.3 钢锭剖面

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

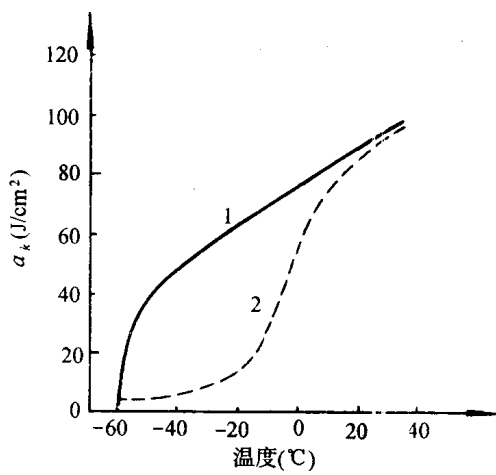
缩孔、缩孔的孔壁有些氧化,在轧制时不能焊合,必须先把钢锭头部切去。切头后实得钢材仅为钢锭的 80%~85%。

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,目前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。英国对焊接结构规定都用镇静钢或半镇静钢,沸腾钢只能用于厚度 5 毫米以下的个别情况^[1.3]。半镇静钢是介于沸腾钢和镇静钢之间的钢材。它的性能比沸腾钢好,价格比镇静钢便宜。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%~0.07%;镇静钢的含硅量在 0.12%~0.30%之间,实际下限常在 0.15%~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%~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)要求高的重要结构,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℃ 或 -40℃ 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% (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℃。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℃。



1. 镇静钢 2. 沸腾钢
图 1.4 镇静钢和沸腾钢的冲击韧性

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 铌半^[1.5],但 GB1591-88 中已改为 18 铌。

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,

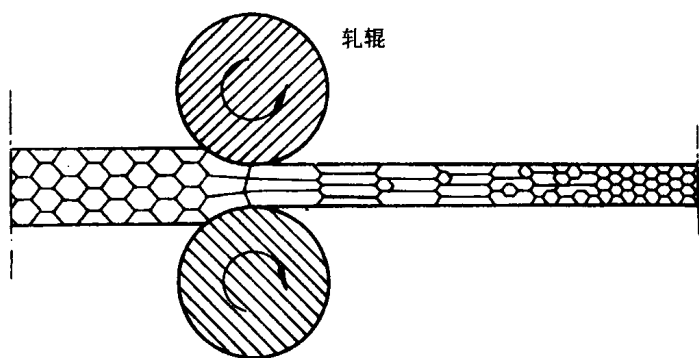


图 1.5 钢的轧制使晶粒细化

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。

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)。冲击试验则只作纵向试样。

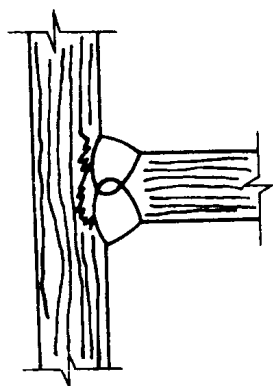


图 1.6 层间撕裂

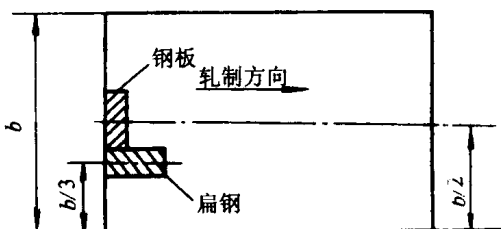


图 1.7 钢板和扁钢试件取样

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 235N/mm²。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。

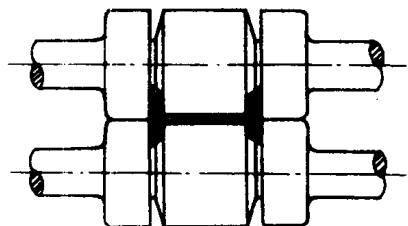


图 1.8 工字钢轧辊

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,翼缘所受压力 and 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],工字钢和槽钢拉力试验和冲击试验的样坯都从腹板上切取,如图 1.9(a,b)。不过,冲击韧性试样从腹板上切取可能会导致不安全的后果。英国标准 BS4360:1979 规定:工字钢拉伸试验可以在翼缘或腹板取样,而冲击试验则必须在翼缘取样[图 1.9(d)],看来比较合理。

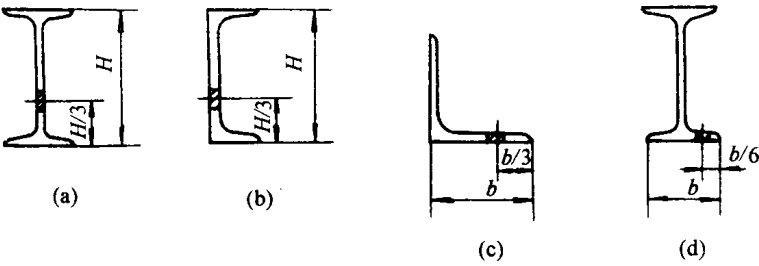


图 1.9 型钢试件取样

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)。

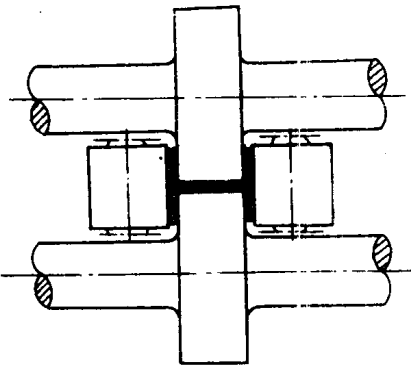


图 1.10 宽翼缘工字钢轧制

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

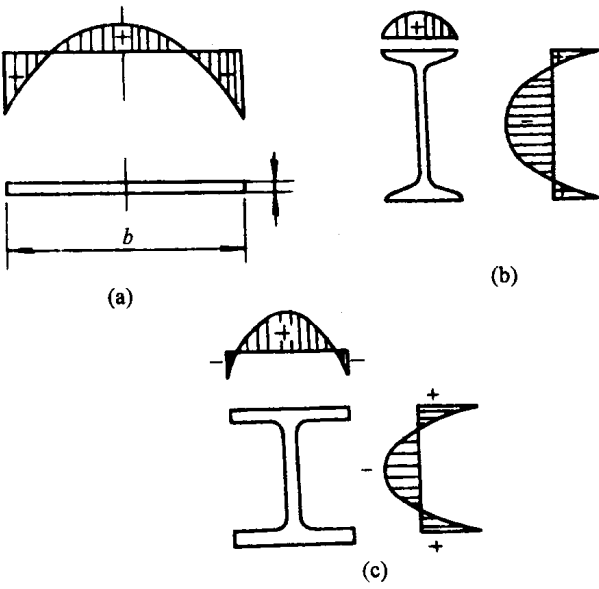


图 1.11 热轧钢材的残余应力

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。

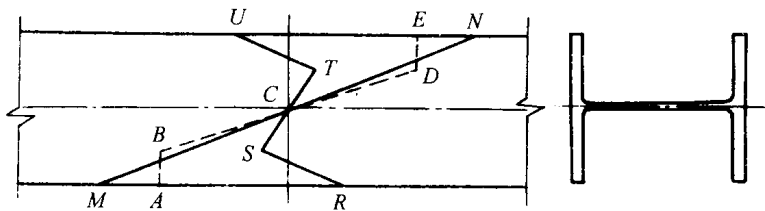


图 1.12 矫直产生的残余应力

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 400N/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 550N/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 450N/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。

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那些不足,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。

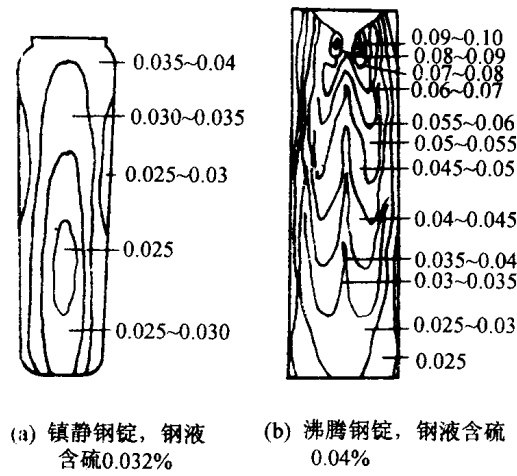


图 1. 13 钢锭中硫的偏析

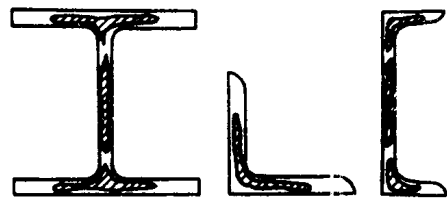
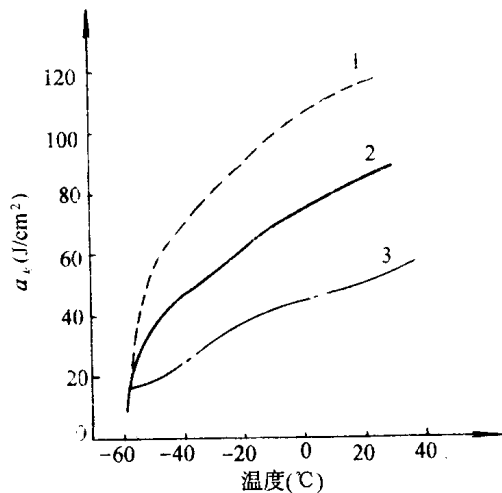


图 1. 14 型钢硫的偏析

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 型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±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



1. 纵向试样； 2. 横向试样； 3. 人工时效后时横向试样

图 1.15 钢板冲击韧性的非等向性

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。

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)集合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。在轧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,

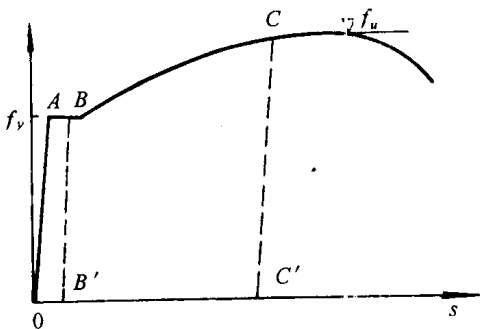
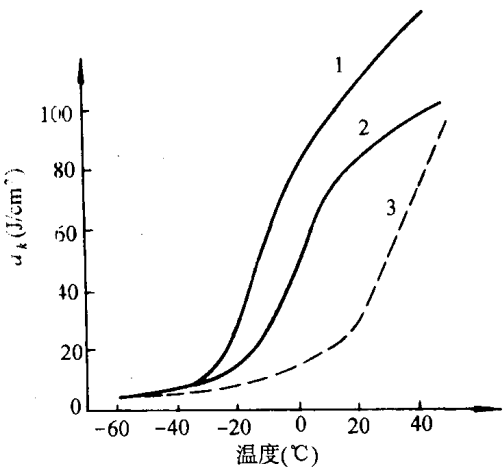


图 1.16 建筑钢材的应变硬化

沸腾钢板人工时效使冲击韧性降低的情况。人工时效是给以 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。



1. 纵向试样; 2. 横向试样 3. 人工时效后的纵向试样

图 1.17 应变硬化使冲击韧性降低

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。

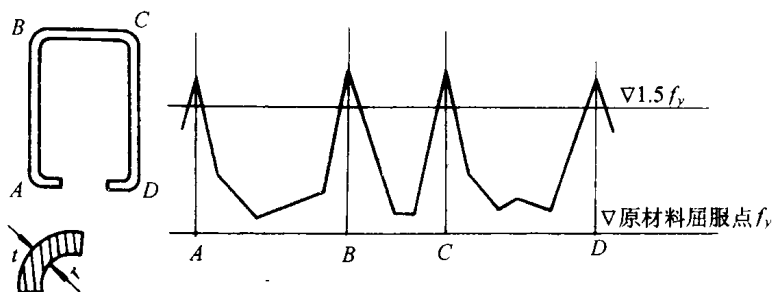


图 1.18 冷弯型钢屈服点提高

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]

$$f_{ye} = b f_y / (r/t)^m \quad (1.1)$$

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

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

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:

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

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 16 锰钢可取 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