

# 钢结构设计原理

陈绍蕃著

科学出版社

1987

# 钢结构设计原理

陈绍蕃著

科学出版社

1987

## 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;第十二章包括塑性设计、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和有关教学、科研和工程技术的人员参考。

### 钢结构设计原理

陈 绍 著

责任编辑 杨家福

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

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

\*

1987年11月第一版 开本: 787×1092 1/32

1987年11月第一次印刷 印张: 18 3/4

印数: 0001—7,000 字数: 429,000

ISBN 7-03-000005-6/TU·I

统一书号: 15031·878

定价: 4.40元

# 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。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。作者不揣鄙陋编写这本《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

# 目 录

序.....	v
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 .....	2
1.2 钢结构的建造过程及其对构件性能的影响 .....	15
1.3 外界作用对钢结构性能的影响 .....	27
第 二 章 钢结构稳定问题概述.....	30
2.1 钢结构的失稳破坏 .....	30
2.2 失稳的类别 .....	32
2.3 结构稳定问题的特点 .....	36
2.4 稳定计算中的整体观点 .....	41
第 三 章 钢结构的断裂 .....	47
3.1 钢结构脆性破坏及其原因 .....	47
3.2 断裂力学的观点 .....	50
3.3 防止脆性断裂 .....	58
3.4 应力腐蚀开裂 .....	73
第 四 章 疲劳破损.....	77
4.1 影响疲劳破损的因素 .....	77
4.2 疲劳设计的准则 .....	91
4.3 疲劳试验和检验 .....	105
4.4 提高疲劳性能的工艺措施 .....	109
第 五 章 拉杆 .....	112
5.1 拉杆的极限状态 .....	112
5.2 净截面的效率 .....	115
5.3 角钢拉杆 .....	119
5.4 螺纹拉杆 .....	125
第 六 章 轴心压杆.....	127

6.1 轴心压杆的极限状态 .....	127
6.2 轴心压杆的稳定计算 .....	141
6.3 压杆的计算长度 .....	148
6.4 格构式压杆 .....	171
6.5 压杆的截面尺寸 .....	188
6.6 压杆的支撑 .....	196
<b>第七章 受弯构件</b> .....	<b>209</b>
7.1 受弯构件的强度 .....	209
7.2 梁的过度塑性变形 .....	220
7.3 梁的整体稳定 .....	230
7.4 薄腹板梁的承载能力 .....	263
7.5 多钢种混用梁 .....	277
7.6 梁的截面尺寸 .....	281
<b>第八章 压弯构件和框架</b> .....	<b>289</b>
8.1 压弯构件的强度和平面内稳定 .....	289
8.2 压弯构件的空间失稳 .....	305
8.3 杆端约束和杆计算长度 .....	316
8.4 框架 .....	339
8.5 压弯构件的截面尺寸 .....	350
<b>第九章 连接</b> .....	<b>356</b>
9.1 角焊缝的性能和计算 .....	356
9.2 抗剪螺栓连接 .....	369
9.3 抗拉螺栓连接 .....	383
9.4 兼承剪力和拉力的螺栓连接 .....	393
9.5 承受重复荷载的螺栓连接 .....	395
9.6 混合连接 .....	399
<b>第十章 构造设计</b> .....	<b>404</b>
10.1 构件的拼接 .....	404
10.2 梁端的柔性连接和半刚性连接 .....	415
10.3 梁和柱的刚性连接 .....	421

10.4 柱脚.....	433
10.5 桁架节点.....	440
10.6 抵抗疲劳的构造.....	451
10.7 抵抗脆性断裂的构造.....	463
<b>第十一章 冷弯薄壁型钢结构的特点</b> .....	<b>469</b>
11.1 冷弯薄壁构件的一般特点.....	469
11.2 屈曲后强度和有效截面.....	478
11.3 屈曲中的相关作用.....	499
11.4 方管、矩形管桁架节点.....	507
<b>第十二章 钢结构设计的其他问题</b> .....	<b>527</b>
12.1 钢结构的塑性设计.....	527
12.2 箱形梁.....	542
12.3 受扭构件.....	560
12.4 设计中的试验工作.....	570
12.5 钢结构加固设计.....	574
<b>索引</b> .....	<b>587</b>

# 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。

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结构的影响。第二至四章简要论述结构在稳定、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)。

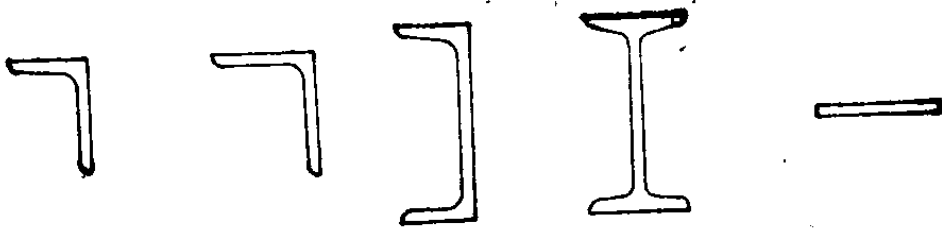


图 1.1 热轧钢材

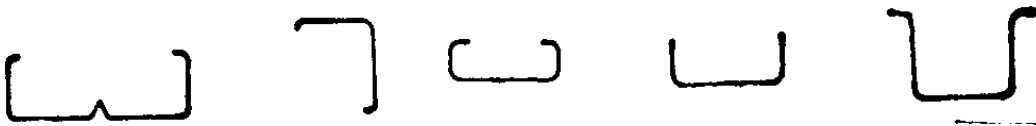


图 1.2 冷弯型钢

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。

### 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，并且时效敏感。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%<sup>[1,1]</sup>。氧气转炉钢具有投资少、建厂快、生产效率高、原料适应性大等优点，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。

## 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，冷却后有许多气泡[图1.3(a)]<sup>[1,2]</sup>。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，在辊轧时不能焊合，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

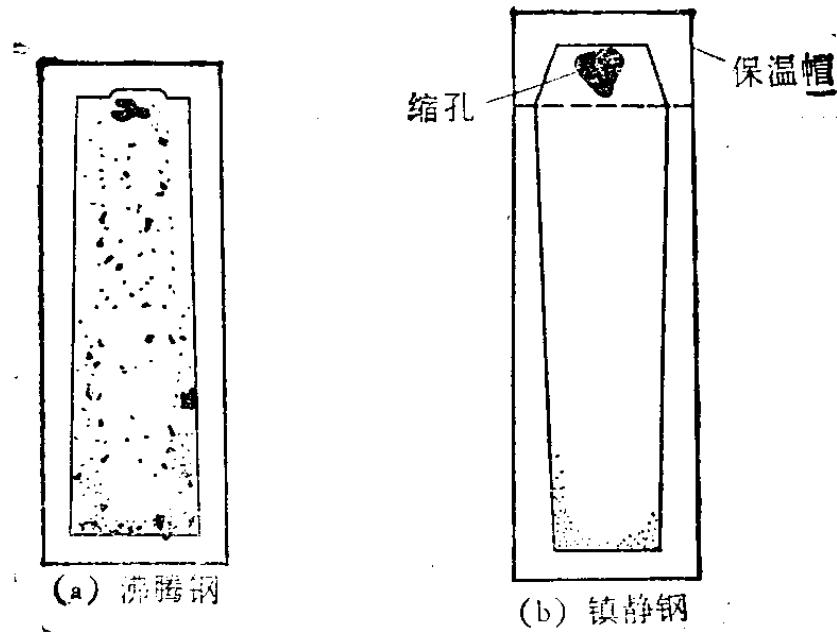


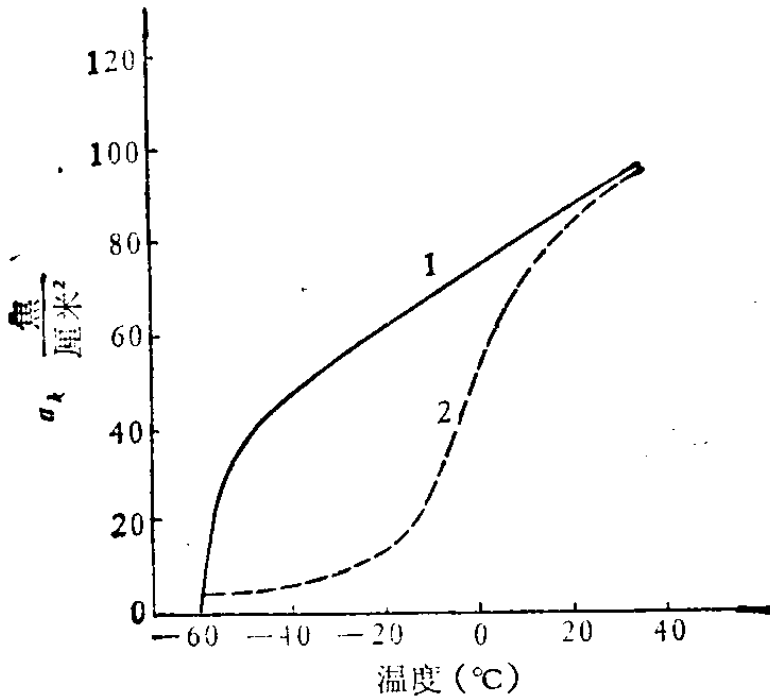
图 1.3 钢锭剖面(a)沸腾钢(b)镇静钢

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<sup>[1.3]</sup>。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GB700-79《普通碳素结构钢技术条件》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%<sup>[1.4]</sup>。

对冲击韧性(尤其是低温冲击韧性)要求高的重要结构,如寒冷地区的铁路桥梁,钢材宜用以硅脱氧后再用铝补充脱氧的特殊镇静钢,我国的16锰桥钢属于这种类型。用铝进行补充脱氧,不仅进一步减少钢中的有害氧化物,而且能和氮化合成非常细小的氮化铝。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



1. 镇静钢, 2. 沸腾钢

图 1.4 镇静钢和沸腾钢的冲击韧性

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的值 $a_k$ 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10毫米,为铝补充脱氧的镇静钢,脆性转变温度低至 $-60^{\circ}\text{C}$ 。曲线2的钢板厚18毫米,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 $-10^{\circ}\text{C}$ 。

高强度低合金钢一般都是镇静钢，但我国的普通低合金结构钢系列中也有半镇静钢，即18铌半<sup>[1.6]</sup>。

### 3. 钢的轧制

辊轧是型钢和钢板成型的工序，它给这些钢材的组织性能以很大影响。辊轧有热轧和冷轧之分，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

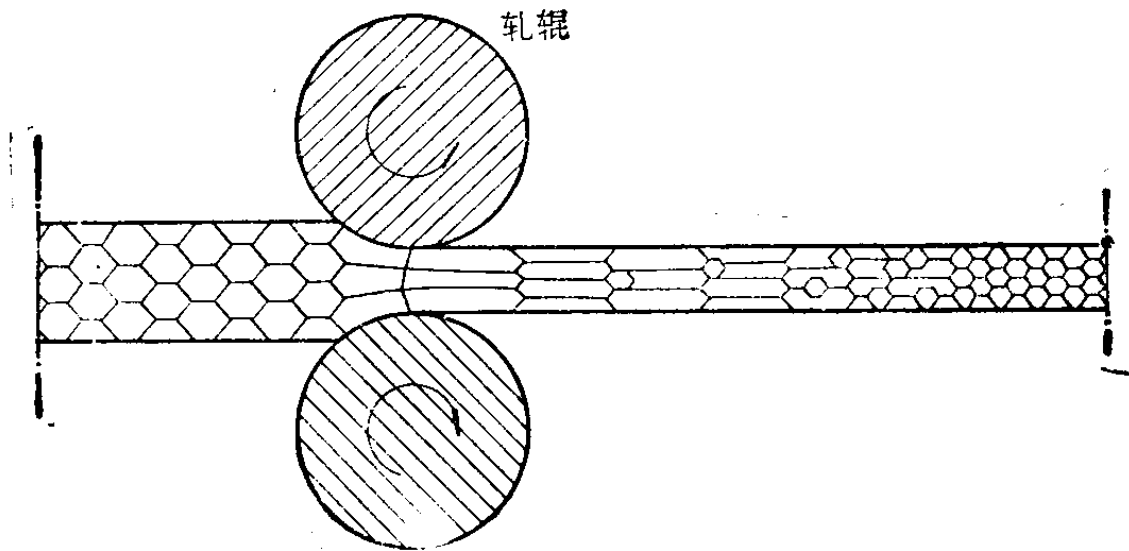


图 1.5 钢的轧制使晶粒细化

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)。

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

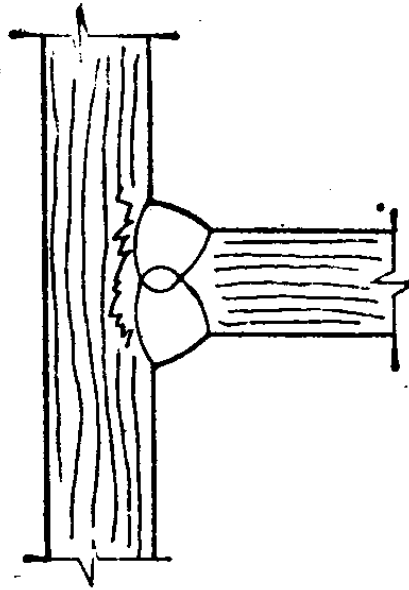


图 1.6 层间撕裂

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)。

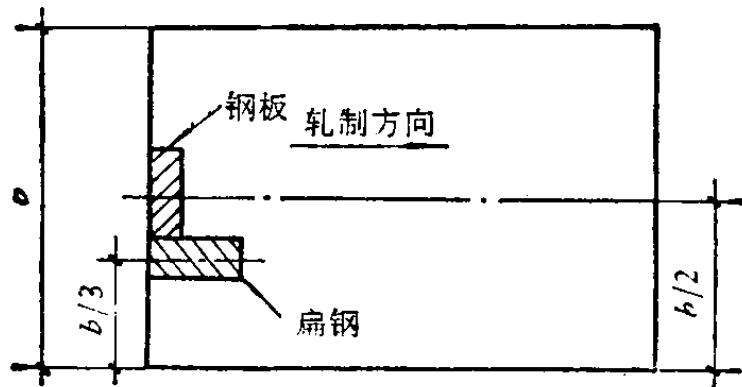


图 1.7 钢板和扁钢试件取样

实践表明,热轧钢材厚度小者强度高于厚度大者,而且塑

表 1.1 钢材分组尺寸 (毫米)

组别	3 号 钢			16 锰 钢
	棒钢的直径或厚度	型钢的厚度	钢板的厚度	钢材的直径或厚度
1	$\leq 40$	$\leq 15$	4~20	$\leq 16$
2	>40~100	>15~20	>20~40	17~25
3	>100~250	>20	>40~60	26~36

性及冲击韧性也比较好。因此钢材的机械性能要按厚度分组。目前我国常用钢材的分组情况见表1.1。工字钢和槽钢的厚度系指腹板的厚度，按照取样规定<sup>[1.6]</sup>，工字钢和槽钢的试样也都在腹板上切取[图1.8(a, b)]。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

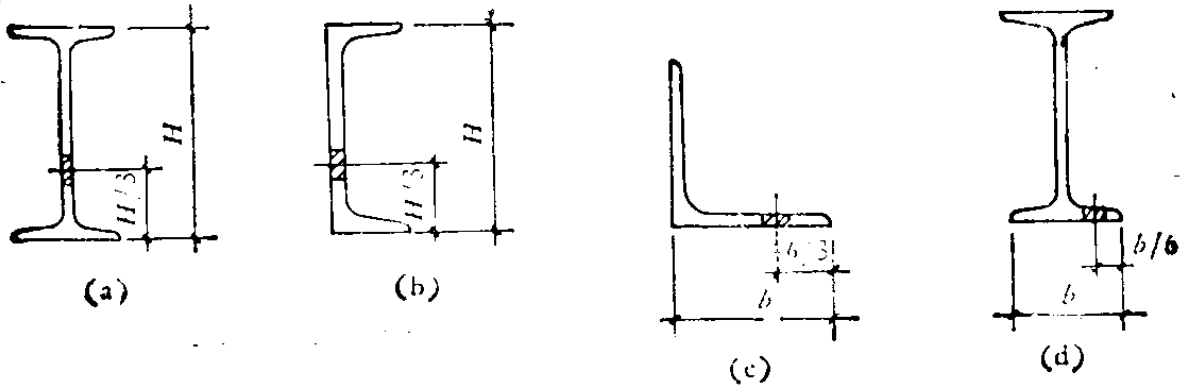


图 1.8 型钢试件取样

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1.9）。辊轧成型时，腹板所受压力大于翼缘，翼缘所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。

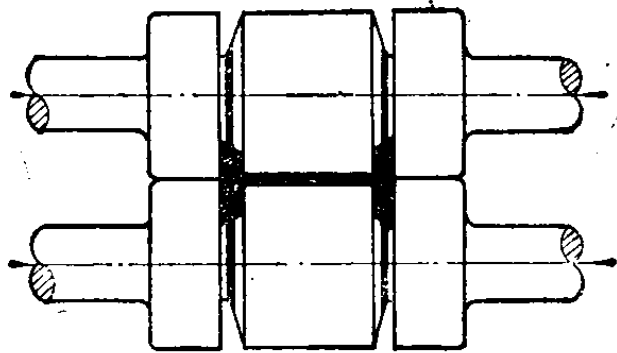


图 1.9 工字钢轧辊

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,在腹板上切取试样,同时规定型钢分组以腹板厚度为准,不失为一种办法。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1.8(d)],看来比较合理。

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

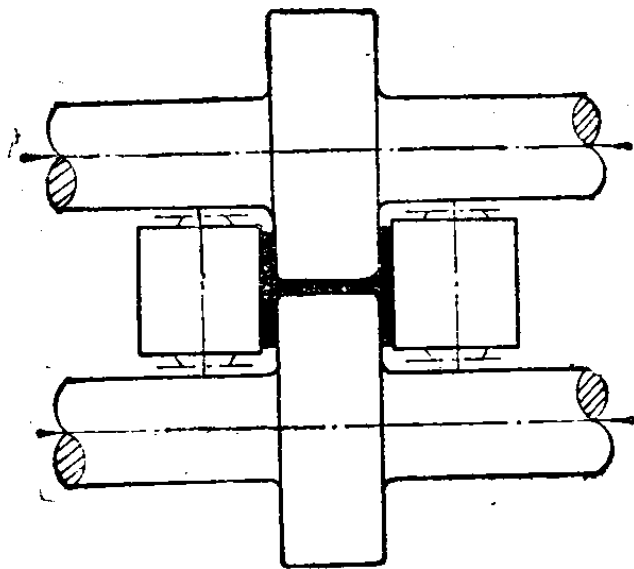


图 1.10 宽翼缘工字钢轧辊

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<sup>[1.7]</sup>。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<sup>[1.8]</sup>。

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



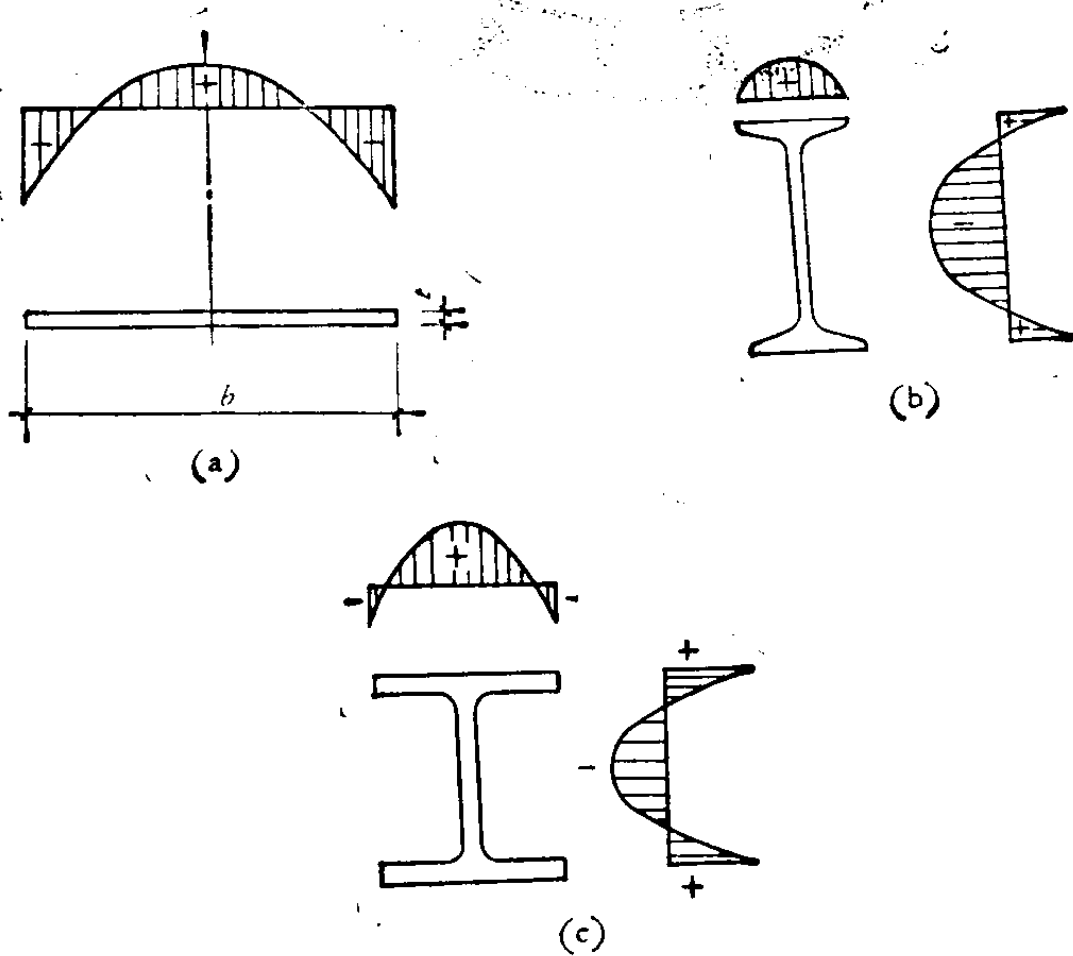


图 1.11 热轧钢材的残余应力

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