

H型钢轧制质量研究

H XINGGANG ZHAZHI ZHILIANG YANJIU

马劲红 张荣华 崔岩 李红斌 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

H型钢轧制质量研究

马劲红 张荣华 崔岩 李红斌 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2014

内 容 简 介

本书从 H 型钢轧制质量出发, 针对 H 型钢轧制过程中存在的理论问题和实际问题, 采用数值模拟和实验研究相结合的方法, 对 H 型钢的轧制变形过程进行系统的分析, 提出了控制 H 型钢轧制质量的实际措施。本书注重解决生产实际问题, 具有一定的理论价值和实用价值。

本书可供与 H 型钢轧制技术相关的生产、科研、设计、管理以及教学人员参考、使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

H 型钢轧制质量研究/马劲红等著. —北京: 冶金工业出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-5024-6645-9

I. ①H… II. ①马… III. ①型钢—质量管理—研究
IV. ①TG142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 170504 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 常国平 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6645-9

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京百善印刷厂印刷

2014 年 8 月第 1 版, 2014 年 8 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 5.5 印张; 160 千字; 164 页

30.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

前 言

H 型钢在万能轧制过程中由于腹板和翼缘在不同的变形区域进行变形，其变形规律和金属流动规律十分复杂，而且变形不均匀，因此在 H 型钢轧制过程中必然存在变形不均匀的现象。另外，由于腹板比较薄、翼缘比较厚，在轧制过程中腹板的散热面积大、翼缘散热面积小，特别是 R 角部分厚度较大，而且散热面积小，因此其温度最高。因此，在 H 型钢轧制过程中，R 角温度最高、翼缘温度次之、腹板温度最低。由于变形不均匀，会导致 H 型钢在轧制过程中出现腹板或翼缘波浪，甚至拉裂等现象。另外，由于腹板和翼缘变形不均匀，必然使 H 型钢端部出现舌形。由于变形不均匀和 H 型钢在轧制过程中存在断面温差，因此在轧后 H 型钢中必然存在残余应力和残余应变，影响了 H 型钢的使用性能。H 型钢的轧制工艺会影响 H 型钢的微观组织，同时影响轧后 H 型钢的综合力学性能。H 型钢的轧后冷却过程也影响 H 型钢存在的残余热应力。

本书从上述 H 型钢轧制过程中存在的理论问题和实际问题出发，采用数值模拟和实验研究相结合的方法，对 H 型钢的轧制变形过程进行系统分析，从理论和实践角度提出了解决 H 型钢轧制生产中存在的难题的具体措施。

H 前 言

本书共分6章。第1章主要介绍了H型钢轧制生产的发展历史和存在问题；第2章对H型钢腹板和翼缘均匀延伸进行了研究；第3章对H型钢端部舌形成因进行了分析，并对端部舌形长度提出了控制措施；第4章针对H型钢轧制过程中存在的残余应力和残余应变进行了分析；第5章对H型钢轧制工艺参数对微观组织的影响进行了数值模拟和实验分析，并对其综合力学性能进行了测试，提出如何通过优化轧制工艺参数，改善轧后微观组织，从而提高H型钢综合力学性能；第6章通过优化轧后冷却方案，减少轧后H型钢中的残余热应力。

本书主要面向研究生和从事H型钢轧制生产的工程技术人员。第1章由张荣华著，第3章由崔岩和李红斌合著，其余章节由马劲红著。本书在写作过程中得到了河北联合大学冶金与能源学院教师郑申白和研究生陶彬的帮助，特此表示感谢！

本书由于写作时间仓促和著者水平有限，难免存在不妥之处，欢迎专家和读者批评指正。

作 者

2014年5月

于河北联合大学

目 录

1 H 型钢发展综述	1
1.1 H 型钢的发展简介	1
1.1.1 国外 H 型钢发展状况	1
1.1.2 国内 H 型钢发展状况	2
1.2 H 型钢分类、特点和应用	4
1.2.1 H 型钢分类	4
1.2.2 H 型钢的特点	5
1.2.3 H 型钢应用领域	7
1.3 H 型钢轧制技术与轧制理论	8
1.3.1 H 型钢轧制技术	8
1.3.2 H 型钢轧制理论	12
1.4 H 型钢的轧制缺陷	15
2 H 型钢腹板和翼缘均匀延伸研究	19
2.1 概述	19
2.2 有限元分析模型的建立	20
2.2.1 创建实体模型	20
2.2.2 单元的设置	21
2.2.3 网格划分	23
2.2.4 约束的处理	24
2.2.5 热交换边界条件	25
2.2.6 摩擦模型的建立	25
2.2.7 求解控制	25
2.3 腹板和翼缘均匀延伸的影响因素分析	26
2.3.1 确定腹板和翼缘压下量的传统方法	26

H 目 录

2.3.2	腹板和翼缘的金属流动	28
2.4	H 型钢均匀延伸轧制实验	39
2.4.1	实验内容和实验条件	39
2.4.2	实验设备	39
2.4.3	轧制实验方案与结果	40
3	H 型钢端部舌形控制	46
3.1	端部形状分析	47
3.2	端部应力分析	49
3.2.1	整体等效应力分析	49
3.2.2	轧制方向应力分析	54
3.3	端部应变分析	56
3.4	端部金属流动分析	61
3.5	端部舌头成因分析	64
3.6	H 型钢轧制规程的优化模拟	65
3.6.1	优化思路设计	66
3.6.2	轧制规程的优化与模拟	67
3.6.3	优化后的模拟结果	68
3.6.4	有限元法准确性验证	70
4	H 型钢残余应力及应变控制研究	73
4.1	残余应力及其危害	73
4.1.1	残余应力及其产生形式	73
4.1.2	残余应力的危害以及消除	73
4.1.3	H 型钢残余应力的产生	74
4.1.4	H 型钢残余应力的研究	75
4.2	开坯过程有限模拟元分析	76
4.2.1	轧制速度对残余应变的影响	77
4.2.2	开坯温度残余应变的影响	81
4.2.3	初始晶粒尺寸对残余应变的影响	83
4.3	H 型钢万能轧制过程残余应力分析	86

4.3.1	万能轧制过程模型的建立	86
4.3.2	万能轧制过程残余应力分析	88
4.4	金相观测结果及分析	95
5	H 型钢轧制工艺参数对其组织性能的影响	97
5.1	有限元模型的建立	97
5.1.1	有限元几何模型的建立	98
5.1.2	运动边界条件设置	98
5.1.3	摩擦边界条件设置	99
5.1.4	热边界条件设置	100
5.1.5	再结晶模型设置	101
5.2	模拟结果分析	103
5.2.1	变形程度不同时的模拟结果	103
5.2.2	轧制速度不同时的模拟结果	109
5.2.3	轧制过程中微观结构的模拟	114
5.3	H 型钢金相组织分析	120
5.3.1	H 型钢的实验研究	120
5.3.2	实验结果及分析	121
5.4	力学性能测试实验	127
5.4.1	拉伸试样的制备	127
5.4.2	拉伸实验及其数据	127
6	H 型钢轧后控制冷却	129
6.1	控制冷却方法	129
6.1.1	控制冷却对 H 型钢组织与性能的影响	129
6.1.2	控制冷却的过程	130
6.1.3	控制冷却的几种方式	130
6.1.4	控制冷却的应用	132
6.2	传热模型分析	133
6.2.1	简化模型的假设	134
6.2.2	有限元模型建立	134

H 目 录

6.3 H型钢轧后自然空冷计算结果	139
6.3.1 自然空冷温度场结果及分析	139
6.3.2 自然空冷应力场结果及分析	141
6.4 H型钢有限元温度场模拟结果及分析	144
6.4.1 一号方案结果及分析	144
6.4.2 二号方案结果及分析	146
6.4.3 三号方案结果及分析	148
6.4.4 四号方案结果及分析	149
6.5 H型钢有限元应力场模拟结果及分析	151
6.5.1 一号方案结果及分析	151
6.5.2 二号方案结果及分析	152
6.5.3 三号方案结果及分析	154
6.5.4 四号方案结果及分析	155
6.6 方案对比与总结	156
参考文献	158

1 H 型钢发展综述

1.1 H 型钢的发展简介

1.1.1 国外 H 型钢发展状况

19 世纪中期，在工业革命的推动下，钢铁行业得到快速发展，但角钢等简单截面型材不能满足工程设计强度要求，为了解决这一难题，法国人兹尔在 1847 年通过四个角钢和一块钢板焊接，发明了工字钢。工字钢较角钢等型材具有更大的抗弯系数、节约金属等特点，得到快速的发展。但是由于焊接的工字钢腿部窄小、性能不稳定，不适合做承受纵向弯曲的柱形或桩形建筑构件，而二辊和三辊轧机较难生产出窄腿有斜度的工字钢。不久后在 1850 ~ 1860 年美国发明了万能轧机。万能轧机的问世为轧制宽腿无斜度的工字钢创造了机械条件。

1897 年 Henry Grey 等人研究表明，实际轧制生产中一台万能轧机不能同时解决 H 型钢腿部宽展和翼缘腿尖的加工问题，必须有一部二辊轧边机控制翼缘边部的宽展。人们利用一部二辊轧边机和万能轧机连轧的形式从而解决了 H 型钢腿部宽展和腿尖加工问题。这一研究成果的出现极大地推动了 H 型钢的快速发展。

1902 年迪弗丹日 H 型钢厂建立了第一条工业化 H 型钢万能轧制生产线。1908 年美国 and 德国均成功地建立了采用格林法生产 H 型钢的生产线。这种生产方式一直持续到 1955 年。1955 年后，建筑行业快速发展，建筑上需要轧钢厂提供腿和腰部很薄的平行腿工字钢。于是在 1958 年欧洲开发了 IPE 工字钢系列，由于 IPE 系列工字钢断面如英文大写字母“H”，故人们称其为“H 型钢”。

20 世纪 60 年代后世界钢铁工业的发展使得 H 型钢轧机得到迅速

的发展,大多数国家开始新建或改建 H 型钢生产线。这时候世界共有大型轧机 74 套,轨梁轧机 24 套,宽边钢梁轧机 12 套。1970 年后计算机技术在工业上成功应用,轧制结构和轧制工艺进一步完善。20 世纪 80 年代世界 H 型钢产量达到 2000 万吨,占世界钢材总量的 3%~6%。1987 年全世界拥有 70 多套 H 型钢生产轧机,到 20 世纪末全世界拥有 88 套 H 型钢轧机。到目前为止,世界约有 110 套 H 型钢生产线,年产量在 2000 万吨左右。占 50% 总产量的 H 型钢产自日本、美国和德国^[1]。

1.1.2 国内 H 型钢发展状况

我国 H 型钢发展较晚,直到 20 世纪 90 年代初个别企业使用 650 生产车间改造几条小型 H 型钢生产线。但是由于设备和产品质量问题没有形成规模。1998 年马鞍山钢铁公司建立了我国真正意义的 H 型钢生产线。该生产线是由德国德马克公司、西门子公司和美国依太姆公司共同设计而成。同年 11 月莱芜钢铁公司从日本引进 H100~H400 生产线投产。至此我国国内钢铁行业才弥补了没有 H 型钢生产线的空缺。

20 世纪 90 年代初期,为满足我国热轧 H 型钢的市场需求,国内的钢铁生产企业先后利用 650 中型轧机车间改造成了几条小型 H 型钢生产线,其中马鞍山钢铁公司的中型厂及鞍山市的轧钢厂由 650 车间改造的小型热轧 H 型钢生产线,由于装备水平落后、产品质量达不到要求等问题,并未形成大规模生产;鞍山市的第一轧钢厂引进美国的二手热轧 H 型钢的生产设备,并且生产了部分的产品,由于当时国内没有合适的坯料,只能够采用外购坯料生产,这就导致了企业经营陷入困境最终停产;秦皇岛市的华兴轧钢厂投产后由于技术原因未能正常生产,现已搬迁至莱芜钢铁公司。以上四家热轧 H 型钢生产线是国内较早的生产线,由于投产时间早,产品规格范围小,并没有形成系列产品,产品的市场开发难度大,投产后产品售价远远高于工字钢,因此上述生产单位在投产后均未形成规模生产。

20 世纪末,我国的热轧 H 型钢产业在国家有关部门的热心支持下得到了很快发展,马鞍山钢铁公司从德国的曼内斯曼·德马克公

司、西门子公司和美国依太姆公司引进技术和设备，组成了我国第一条热轧 H 型钢及普通大型型钢生产线，并于 1998 年 9 月建成投产。该生产线具有 20 世纪 90 年代的世界先进工艺水平，以近终形的异形连铸坯作为原料并使用“U-E-U”的串列形式可逆的连轧工艺。其中的一期工程设计的年产量为 60 万吨，二期的年产量为 100 万吨，生产的热轧 H 型钢的产品规格范围为 H200 ~ 700mm 的生产线。1998 年 11 月，山东省的莱芜钢铁公司建成了热轧 H 型钢规格为 H100 ~ 350mm 生产线，该生产线采用日本新日铁公司的主体机械设备和东芝公司的全套电器及自动控制设备，设计的年产量为 50 万吨。这两条生产线的投产，结束了国内无法生产热轧 H 型钢的现状。随着我国热轧 H 型钢产量的不断增长，并且增长的幅度也很大，到 2002 年我国的热轧 H 型钢的产能就已经达到了 117.53 万吨，远远超过当初的设计生产能力，国产热轧 H 型钢已初具规模，极大地推动了中国钢结构事业的发展。

“十一五”期间，我国国内又有多条热轧 H 型钢生产线相继建成或在建。马鞍山钢铁公司、莱芜钢铁公司通过新上轧机进一步扩大生产能力，产品规格形成配套。山东省的日照钢铁有限公司的热轧 H 型钢生产线的生产规格为 H100 ~ 350mm，于 2004 年年初顺利投产；河北省的津西钢铁有限公司的热轧 H 型钢生产线生产规格为 H250 ~ 900mm，以及两条小规格的生产线已经顺利投产；山西省长治钢铁筹建的热轧 H 型钢项目业已投产；鞍山钢铁、包头钢铁公司和攀枝花钢铁公司的轨梁轧机完成了万能化的改造，完全可以生产热轧 H 型钢。在 2005 年我国热轧 H 型钢的产能为 400 多万吨左右。2008 年的美国次债危机对中国的钢铁产业造成了严重的冲击，同时这也反映了我国钢铁产业自身的内部问题——产量高、质量不高、产能过剩等，这次经济危机也是我国钢铁行业的一个洗牌过程，即使是这样，我国的热轧 H 型钢需求仍有很大的市场空间，我国在高层建筑以及基础建设中采用的结构钢比重与西方发达国家相比还有很大的差距。所以说，我国的热轧 H 型钢的市场空间还是相当可观的^[2-5]。

中国的 H 型钢发展已有二十年的时间，虽然时间比较短，但是发展比较快，并且取得了不错的成绩。然而随着我国国内热轧 H 型

钢生产能力的急速扩张, 热轧 H 型钢的竞争将更趋激烈, 整个热轧 H 型钢行业即将面临挑战。但同时这也表明中国内地的钢结构市场得到了快速发展, 同时市场的急剧变化、动荡将促进整个热轧 H 型钢行业重新洗牌、优胜劣汰, 这对处在发展中的中国热轧 H 型钢产业来讲, 并不是一件坏事, 它能够促进热轧 H 型钢产业的调整及向优良正规化方向发展。

1.2 H 型钢分类、特点和应用

1.2.1 H 型钢分类

众所周知 H 型钢的品种规格很多: 按用途分为柱型和梁型; 按单位质量分为轻型、中型和重型; 按翼缘分为宽边、中边和窄边。根据国标 GB/T 11263—1998《热轧 H 型钢和部分 T 型钢》规定, H 型钢依截面分为如下四个系列^[6]:

(1) 宽翼缘 H 型钢 HW。截面规格为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \sim 400\text{mm} \times 400\text{mm}$, 其翼缘较宽, 截面宽高比为 $1:1$, 常用作支撑柱。宽翼缘 H 型钢弱轴的回转半径相对较大, 具有良好的受压承载力。

(2) 中翼缘 H 型钢 HM。截面规格为 $150\text{mm} \times 100\text{mm} \sim 600\text{mm} \times 300\text{mm}$ 。中翼缘 H 型钢常用于柱和梁, 翼缘宽度比宽翼缘 H 型钢窄一些, 截面宽高比为 $1:1.3 \sim 1:2$ 。

(3) 窄翼缘 H 型钢 HN。截面规格为 $100 \sim 900\text{mm}$, 具有良好的受弯承载力, 常用作梁。其翼缘较窄, 又称为梁型 H 型钢。

(4) 薄壁 H 型钢 HT。热轧轻型薄壁 H 型钢是近年来 H 型钢产品家族中刚刚兴起的一种新产品、新材料, 与普通热轧 H 型钢相比, 热轧轻型薄壁 H 型钢在其承载负荷应用范围内具备“轻、薄”的特点, 其质量轻, 金属消耗量少, 具有节省金属、刚度性能好、更利于环保等优点; 与同类焊接 H 型钢相比, 不仅内部性能优越, 而且具有成本低的优势。它广泛应用于轻型钢结构、民用建筑等领域, 具有广阔的市场开发前景。

目前, 国内生产的轻型薄壁 H 型钢主要是焊接 H 型钢。热轧轻型薄壁工艺技术为冶金发达国家所掌握。热轧轻型薄壁 H 型钢

生产不仅要求其设备刚度和精度高，而且在生产中其表观形状和部位尺寸难以控制，是一种难度较大的国际先进水平的轧制工艺技术。

国内少数几家掌握生产小规格轻型薄壁 H 型钢先进技术及能使之投入生产的厂家有马钢、莱钢万力型钢厂、莱芜钢宝公司等几家企业，最薄目前可达到 2.3mm 左右。

我国 H 型钢分类与国外略有不同，我国将 H 型钢分为 3 类，分别为宽翼缘 H 型钢（HK）、窄翼缘 H 型钢（HZ）和桩用 H 型钢（HU）。

根据 H 型钢在工程方面的应用条件，其规格标准一般包含以下三种类型：

（1）梁型 H 型钢：主要是窄翼缘（HN 系列）H 型钢规格，其宽高比为 $1:3.3 \sim 1:2$ ，具有良好的抗弯承载性能，截面高度为 100 ~ 1100mm。

（2）柱型 H 型钢：主要是宽翼缘（HW 系列）和中宽翼缘（HM 系列）H 型钢规格，其宽高比为 $1:1.6 \sim 1:1.0$ ，其弱轴的回转半径相对较大，所以具有良好的承压能力，截面高度为 100 ~ 600mm。

（3）桩型 H 型钢：主要是桩用（HP 系列）H 型钢，其宽高比为 $1:1$ ，截面高度为 200 ~ 500mm，并且绝大部分规格的桩型 H 型钢腹板与翼缘的厚度相同。

1.2.2 H 型钢的特点

H 型钢的断面形状类似于大写的英文字母 H，是在工程领域常见的经济断面型材，也被称宽边（翼缘）工字钢、平行边（翼缘）工字钢或万能钢梁。同工字钢相比，H 型钢翼缘宽度较宽，承载性能更强，其截面面积的分配更加优化和合理。与工字钢相比，H 型钢具有以下显著特点^[7,8]：

（1）翼缘宽，侧向刚度大。热轧宽翼缘 H 型钢高度与宽度的比值可达到 1，甚至略小于 1，这使其侧向刚度显著增加。窄翼缘 H 型钢（HN 系列）的翼缘宽度也比同高度工字钢的翼缘宽 1.1 ~ 1.4 倍，所以在截面积相同的条件下，其侧向刚度值（ I_y ）要高 1 倍左右。H

型钢与工字钢弱轴惯性矩比较曲线如图 1-1 所示。

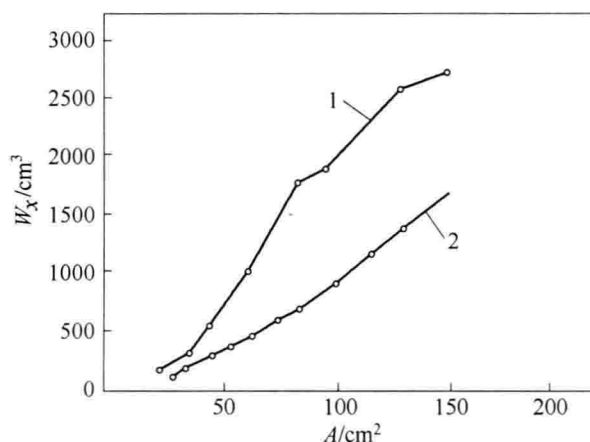


图 1-1 H 型钢与工字钢弱轴惯性矩比较曲线
1—窄翼缘 (HN) 系列；2—工字钢

(2) 抗弯能力强。由于 H 型钢截面面积分配较工字钢更加合理，因此在相同截面积 (或质量) 条件下，H 型钢绕强轴的抗弯性比工字钢高 5% ~ 10%，如图 1-2 所示。

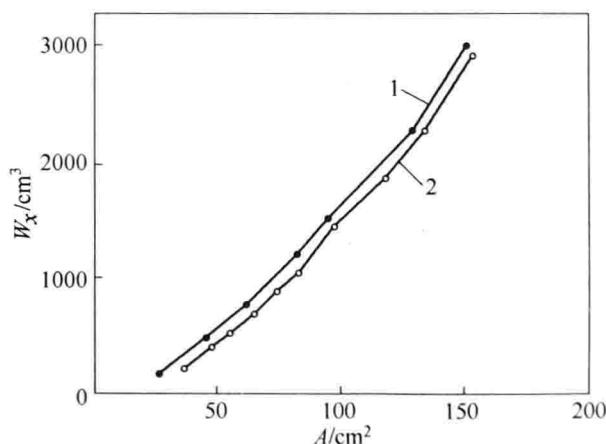


图 1-2 H 型钢与工字钢强轴抵抗矩比较曲线
1—窄翼缘 (HN) 系列；2—工字钢

(3) 翼缘两表面相互平行，构造方便。H 型钢的翼缘较宽，并且两个表面相互平行，因而在其构造连接方面更加简单易行。

(4) 可加工再生型材。H 型钢可以经过再加工制成 T 形钢和蜂窝梁等再生型材, 工艺比较简单方便, 这些再生型材在石油化工、高层建筑等方面均有非常广泛的应用。

1.2.3 H 型钢应用领域

由于 H 型钢自身的很多优点, 在西方国家已经被广泛应用, 而我国的应用历史相对较短。但是随着我国经济的飞速发展, 对城市建设、各种工程结构用钢需求的不断增加, H 型钢的应用领域也越来越广。下面做一些具体介绍^[9]:

(1) 高层建筑工程。国内大多数著名的高层建筑均使用 H 型钢结构, 如北京国贸中心、鸟巢、北京京广中心、上海金贸大厦项目等, 设计全部采用钢结构或者钢筋混凝土复合结构, 其中 H 型钢使用量占钢材总使用量的 40% ~ 60% 左右。

(2) 桥梁工程。至今为止我国桥梁构件的 80% ~ 90% 采用 H 型钢部件, 其他构件采用钢板、工字钢和角钢铆焊而成。若全部采用热轧 H 型钢可以节约钢材 20% ~ 30%, 节约焊条 2%, 节约工时 40% ~ 60%。公路桥的主梁也希望用热轧 H 型钢, 其规格为 H300 × 200 ~ H900 × 300。

(3) 在电力及通讯行业的各种大型超高塔架的建筑中, H 型钢也有大量的应用。

(4) 地下铁路和矿山巷道的支护工程。随着高速铁路、高速公路、大型输水工程、煤矿、地下铁路等隧道工程的大型化, H 型钢作为主要支护材料获得了广泛应用。H 型钢在断面稳定性、安全性以及施工的方便性和缩短工期等方面, 明显优于普通工字钢和矿用工字钢, 尤其是在地下隧道、海底隧道或地质结构复杂区域的施工中, H 型钢是理想的支护材料。

(5) 工业用钢结构件。全国大多数行业的大型机械均可以采用 H 型钢结构, 如冶金行业中烧结机的钢结构是用钢板焊接成 H 形, 完全可以用轧制 H 型钢代替。再如火力发电厂大型锅炉承重结构、铁路平板车车体、起重行业单梁吊车、门型吊车的主梁等均可采用 H 型钢。

(6) 石油工业中的采油井架及石油抽油机均可用到 H 型钢。

1.3 H 型钢轧制技术与轧制理论

1.3.1 H 型钢轧制技术

目前 H 型钢的轧制工艺一般采用 BD 开坯机加万能轧制机组的轧制方法。H 型钢的开坯过程一般采用二辊可逆式轧机，轧件在该轧机上反复轧制数道次，以获得万能轧制所用的坯料。经开坯后的异型坯料进入由万能粗轧机和万能精轧机组成的万能轧制机组。万能轧机由电机驱动的上下两个水平辊以及在水平辊两侧设置的两个被动的立辊所组成，这四个辊形成一个“H”形的孔型，并且各道次轧辊辊缝均可以调节。H 型钢腹板部位由上下两个水平辊轧制，而翼缘部位由水平辊的外侧辊面和立辊共同作用轧制而成，如图 1-3 所示。由于万能孔型未能对翼缘的边部施加压下，因此一般要在多道次的万能轧机中设置轧边机，主要对翼缘边部施加压下，限制翼缘的高度。在实际生产中，一般会把这两架轧机作为一个轧机组对轧件反复轧制，每道次均施加一定的压下量，最终使坯料轧制成规定的尺寸和形状。在对翼缘的轧制过程中，水平辊外侧面与轧件之间有滑动摩擦，轧辊磨损严重。而水平辊侧面经磨损后，即使重车也不能恢复形状，所以一般生产上将上下水平辊的侧面以及两侧立辊表面设置 $3^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 的倾斜角。而最终道次的万能精轧机，其立辊表面是平的，但水平辊侧面仍需要有若干斜度，所以一般最终产品的翼缘内侧会残存一定的

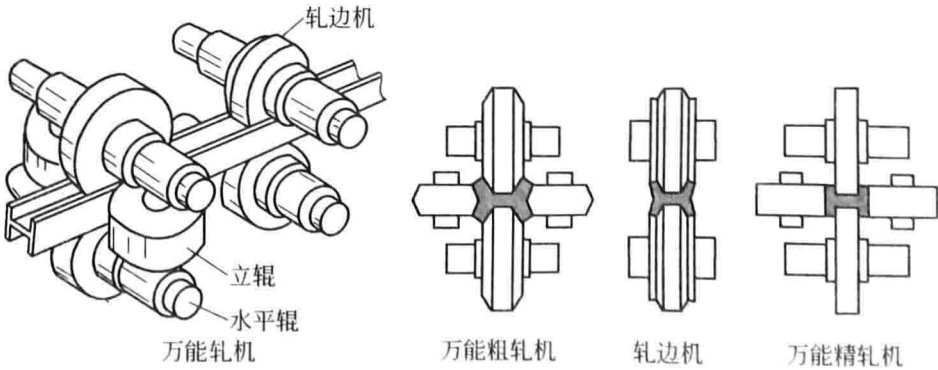


图 1-3 万能轧机轧制 H 型钢