

新版钢铁技术讲座

2

钢材生产

日本钢铁协会编

上海科学技术出版社

内 容 提 要

《新版钢铁技术讲座》共五卷: (一) 炼铁与炼钢; (二) 钢材生产; (三) 钢材的性能与试验; (四) 钢材加工; (五) 铸铁与铸钢。

本书是讲座的第2卷。内容分为两部分, 第一部分主要介绍各种型号钢材的生产方法; 第二部分介绍钢材的表面处理。

全书对各种钢材的生产设备、工艺、产品规格、质量控制以及它们的用途等都作了介绍。内容丰富、实用。可供有关钢材生产者、研究者、使用者以及高校师生参考。

新版钢铁技术讲座

第2卷

钢材生产

上海宝山钢铁总厂资料室翻译组译

赵永生 王 韵 校

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张17.75 字数430,000

1981年5月第1版 1981年5月第1次印刷

印数1—4,000

书号: 15119·2108 定价: (科四) 1.65元

序

日本钢铁协会于1959年(昭和34年)以钢材用户为对象,以讲述材料的正确选择及合理使用为目的,出版了一套钢铁技术讲座,共五卷。在刚出版的时候,日本钢铁工业的粗钢产量仅为1663万吨,勉强达到法国的水平。但1963年则达到了3400万吨,超过英国、西德,跃居世界第三位。以后又取得了举世共知的惊异发展,今天日本粗钢产量已超过1亿吨,成为居世界领先地位的钢铁生产国之一。

在这钢铁工业的发展时期,我们认为作为一本珍贵的参考书,本书的出版不仅对钢铁工业的同行们,就是对其他有关企业来说,也是有所裨益的。

然而,如上所述,此后钢铁技术的发展是惊人的,原来讲座的内容在目前已显得陈旧落后了,有关读者也迫切希望能修订讲座内容。因此,为满足读者的要求,现邀请活跃在第一线的科技工作者重新执笔,修订内容,作为新版钢铁技术讲座出版,共五卷。

日本钢铁工业还面临着许多难题,为解决这些难题,今后钢铁产业界及钢铁材料用户仍须共同努力。我们确信,本书的出版对今后钢铁技术的发展和普及、对钢铁的新认识,也是大有帮助的。

本书用途广泛,不仅可供从事于钢铁工业的技术工作者参考,而且可供钢材用户及专科学校作教学材料或重要的参考书使用。若进而能对日本各工业部门的发展有所帮助的话,则更感荣幸了。

最后,在本讲座发行之际,谨向以编辑委员长东京大学松下教授为首的各位编辑委员及作者们致意,对他们的共同努力,表示衷心的感谢。

日本钢铁协会会长 小林佐三郎

1976年9月

序

本书为50年代后期出版的五卷《钢铁技术讲座》的新版，是为适应70年代的需要而重新修订出版的。这期间，关于钢铁科学技术的惊人发展暂且不谈，但就我国钢铁工业在世界经济中所起的作用，以及在进入80年代将要承担的责任来说，也许是应该正视的现实。

本书初版的问世，是当时日本钢铁协会会长益沢正一先生，及钢铁技术讲座编辑委员长伊藤正夫领导有关人士共同努力的结果。我们的先辈为我们树立了关于钢铁材料“实用参考书”的样板。去年以来，由于有关方面的迫切要求，决定对书稿进行修订，但出版宗旨依然不变，即以钢材用户为对象，以讲述材料的正确选择和合理使用为目的，为了适应当前社会节约资源和能源的需要，力求使工业界人士对钢铁加深认识，同时也考虑使本书能作为高等工业专科学校或大学教科书使用。

内容编排方面，第1~4卷的标题与初版相同，但第5卷则根据铸钢、铸铁的现状作了改动。第1卷的重点在于掌握钢铁生产的全貌，叙述炼铁技术的发展、直接炼铁、从平炉到转炉的变迁、连续铸钢、钢的特殊处理等。第2卷叙述钢铁成品化过程中的轧制和表面加工。第3卷介绍关于钢铁性能的系统概念。第4卷则以钢材二次加工为中心进行讲述。总之，本书以避免高深的理论，讲述通俗易懂的内容为宗旨。

值得庆幸的是，由于得到各专业委员会主编、编委们的积极协助，以及第一线的各位执笔者的共同努力，本书出版计划进行得很顺利。在本书发行之际，协会编辑及地人书馆有关人员，无不感到喜悦。

《新版钢铁技术讲座》编辑委员长 松下幸雄

1978年9月

目 录

第一编 轧 制 法

第一章 轧制理论和变形抗力..... 1

大阪大学教授 加藤健三

一、轧制原理	1	(三) 动力传动损失	13
(一) 轧件的塑性变形	1	(四) 空载运转力矩	13
(二) 压下量和压下率	2	(五) 张力影响	14
(三) 接触角(或咬入角)	2	八、轧制理论	14
(四) 接触弧水平投影长度	3	(一) 卡尔曼(Karman)微分方程	14
(五) 中性点	3	(二) 纳迪(Nadai)的微分方程	15
(六) 前滑率	3	(三) 奥洛文(Orowan)的理论	16
(七) 摩擦系数	4	(四) 勃兰特(Bland)和福特(Ford)的冷 轧公式	17
(八) 宽展	5	(五) 西姆斯(Sims)的热轧公式	17
二、轧辊的变形	5	(六) 艾克龙特(Ekelund)的热轧轧制压 力公式	17
(一) 轧辊的弯曲	5	(七) 斯东(Stone)的冷轧可能轧制的最小 板厚公式	17
(二) 轧辊的热膨胀	7	九、变形抗力	18
(三) 轧辊的压扁变形	8	(一) 纯变形抗力	18
三、轧机的变形	8	(二) 加工变形抗力	18
(一) 轧机机架的变形	9	(三) 影响变形抗力的因素	18
(二) 压下螺丝的变形	10	1. 与温度的关系	19
四、轧制压力分布	10	2. 与变形速度的关系	19
五、轧制压力	12	3. 与变形量的关系	19
六、轧制力矩	12		
七、轧制动力	13		
(一) 变形时所需的动力	13		
(二) 轧辊轴承的摩擦损失	13		

第二章 初轧、厚板轧制.....20

一、初轧	20	1. 坯料	26
川崎製鉄株式会社 有村康男		2. 均热炉的加热操作	27
(一) 概述	20	3. 初轧生产	41
(二) 生产设备	21	4. 火焰清理机	45
1. 均热炉	21	5. 钢坯的剪切	46
2. 初轧机	25	6. 冷却	46
3. 火焰清理机	30	(四) 钢坯质量和检查	48
4. 剪切机	31	1. 钢锭和连铸坯的比较	48
5. 钢坯冷却设备	33	2. 检查	50
6. 钢坯表面清理设备	34	二、厚板轧制	51
7. 计算机控制的工序	34	(一) 概述	51
(三) 生产流程	36	(二) 生产设备	52

ii 目 录

1. 加热设备	52
2. 轧制设备	53
3. 矫直设备	55
4. 冷却设备	56
5. 剪切设备	57
6. 热处理设备	60
7. 精整设备	61
8. 辅助设备	61
9. 程序计算机和生产线计算机	61
(三) 生产工序	62
1. 坯料(板坯)	62
2. 加热	63
3. 轧制	64

第三章 热轧钢板.....74

日本钢管株式会社 松本取幸

一、概述	74
(一) 热轧钢板的概念	74
(二) 热轧厂	74
(三) 生产能力与工序计划	75
(四) 轧制设备及其发展	76
(五) 特殊热轧带钢轧机	77
二、设备与操作	79
(一) 设备布置	79
(二) 加热炉	80
(三) 粗轧机组	82
(四) 精轧机组	83

第四章 冷轧薄板.....96

新日本製铁株式会社 高橋久

一、概述	96
(一) 坯料	96
(二) 生产流程	97
二、除鳞	98
(一) 铁鳞	98
(二) 酸洗设备及操作	99
(三) 连续酸洗机组	99
(四) 无酸除鳞法	101
三、冷轧	101
(一) 概述	101
(二) 可逆式冷轧机	102
(三) 连续式冷轧机	103
(四) 二次冷轧机	103
(五) 其他型式的冷轧机	104
(六) 轧制油	104
(七) 轧辊和轴承	104

4. 矫直	67
5. 定尺	68
6. 剪切与气割	68
7. 精整	69
8. 热处理	70
(四) 成品与检验	71
1. 厚板成品	71
2. 质量检验	72
(五) 成材率	72
1. 成材率的内容	72
2. 成品率	72
3. 订货成品率	73

(五) 卷板机	84
(六) 精整设备	86
(七) 轧辊	87
(八) 辅助设备	88
(九) 操作自动化	88
三、产品与质量	89
(一) 标准、用途、生产范围	89
(二) 尺寸精度	91
(三) 形状	93
(四) 表面和内部质量缺陷	93
(五) 机械性能	94

四、脱脂	106
(一) 概述	106
(二) 电解净化生产线	106
(三) 刷洗生产线	106
(四) 去油轧制	106
五、退火	106
(一) 概述	106
(二) 紧带卷退火	107
(三) 松带卷退火	108
(四) 带钢连续退火	109
(五) ΔPL 生产线(退火-酸洗联合生产线)	110
(六) 炉气成分	110
六、平整	111
(一) 概述	111
(二) 平整机	111
(三) 平整及其质量	111

七、精整	113	(一)冷轧薄板	117
(一)剪切	113	1. 冷轧薄板的种类	117
(二)再卷取	113	2. 冷轧薄板的主要特征	117
(三)带钢纵剪	114	(二)硅钢片	118
(四)防镑	115	1. 硅钢片的种类	118
八、包装	116	2. 硅钢片的质量	118
(一)包装材料	116	(三)表面处理钢板用的原板	119
(二)包装式样	116	1. 镀锡薄板、无锡薄板用的原板	119
(三)包装	117	2. 镀锌用的原板	119
九、成品	117		
第五章 型钢、棒钢、线材	119		
一、型钢	119	2. 线材厂的布置	186
新日本製鉄株式会社 土屋健治		3. 加热炉	188
(一)概述	119	4. 轧机与辅助设备	188
(二)加热炉	121	5. 棒钢的修整设备	140
(三)型钢轧制	124	6. 线材的修整设备	141
(四)切断和冷却	129	(三)轧制生产	142
(五)修整设备和操作	130	1. 钢坯清理	142
二、棒钢、线材	134	2. 加热	148
株式会社神戸製鋼所 三木 修		3. 轧制	148
(一)概述	134	4. 棒钢的修整	145
1. 棒钢、线材的种类	134	5. 线材的修整	146
2. 生产过程	134	(四)产品	147
(二)轧制设备	135	1. 产品的质量和规格	147
1. 棒钢厂的布置	135	2. 产品的用途	149
第六章 钢管	149		
住友金属工業株式会社 森 礼次郎		2. 冷轧法	170
一、概述	149	三、焊接钢管	171
(一)钢管生产的发展	150	住友金属工業株式会社 田中孝秀	
(二)钢管生产方法的分类和钢管的品种	150	(一)用焊接法生产钢管	171
二、无缝钢管的生产方法	152	(二)炉焊法	172
(一)热轧无缝钢管生产的方法	152	1. 非连续式对接焊生产方法	172
1. 孟内斯曼-自动轧管机轧管方式	153	2. 连续式对接焊生产方法	173
2. 孟内斯曼斜轧穿孔-阿塞尔轧管机轧管方式	158	(三)电阻焊接法	174
3. 孟内斯曼-连续式轧管机轧管方式	160	1. 低频电阻焊接法	176
4. 孟内斯曼-皮尔格(周期式)轧管机轧管方式	162	2. 高频感应焊接法	175
5. 尤金-赛乔尔内玻璃粉润滑剂挤压法	163	3. 高频电阻焊接法	176
6. 埃尔哈特-普肯本希顶管法	167	(四)电弧焊接法	177
(二)无缝钢管的冷加工方法	169	1. 直焊缝型	177
1. 冷拔法	170	2. 螺旋焊缝型	178
第七章 其他品种的轧制	179		
一、轮辐、轧制轮心及轧制车轮	179	住友金属工業株式会社 金子美明	

(一)概述	179	4. 试验和检查	187
(二)轧制生产	179	二、挤压	187
1. 坯料	180	横滨国立大学教授 工藤英明	
2. 切断	181	(一)概述	187
3. 加热	181	(二)挤压的特点和用途	188
4. 锻造	181	(三)操作及设备	189
5. 轧制	182	1. 加热炉	190
6. 测试与检验	184	2. 穿孔设备	190
(三)轧制轮心及车轮	184	3. 挤压水压机	190
1. 毛坯的锻造	185	(四)成品	191
2. 轧制	185		
3. 热处理	187		

第二编 表面加工法

第一章 镀锌法..... 193

日新製鋼株式会社 青山芳正

一、热镀锌	193	3. 镀锌板的加速腐蚀试验	208
(一)热镀锌法及其设备	193	二、电镀锌	209
1. 单张热镀锌法	193	1. 前处理	209
2. 连续式热镀锌	194	2. 电镀	210
(二)生产热镀锌板的新技术	197	3. 后处理	211
1. 气体喷射法	197	三、着色镀锌板	211
2. 锌花清除法	199	(一)着色镀锌板的生产设备	212
3. 合金化处理	199	(二)着色镀锌板的生产	213
4. 镀锌量的测定	199	1. 坯料和涂前处理	213
5. 形状矫正法	199	2. 涂料和涂装	214
6. 化成处理	199	(三)着色镀锌板的质量	215
(三)热镀锌层的组织	200	1. 外观	215
1. 铁-锌相图	200	2. 物理性能	216
2. 镀锌板的组织	200	3. 耐腐蚀性	216
3. 合金化镀锌板的组织	203	4. 防蚀性	216
(四)镀锌板的耐腐蚀性	203		
1. 锌和锌镀层的腐蚀与防腐蚀机理	203		
2. 锌镀层的耐腐蚀性	203		

第二章 镀锡薄板和无锡薄板..... 217

東洋鋼板株式会社 安藤平雄

一、镀锡薄板	217	2. 镀锡薄板原板的性质	224
(一)镀锡薄板的历史	217	3. 镀锡薄板的表面性质	224
(二)镀锡薄板生产	217	(四)镀锡薄板的分类和用途	227
1. 镀锡薄板的原板	219	1. 镀锡量	227
2. 镀锡用锡	219	2. 厚度和尺寸	227
3. 镀锡薄板原板的生产流程	219	3. 表面精加工	228
4. 电镀锌薄板的生产流程	220	4. 调质度	228
5. 热镀锌薄板的生产流程	223	5. 镀锡薄板的用途	228
(三)镀锡薄板的性质	223	(五)镀锡薄板的试验方法	238
1. 镀锡薄板的结构	223	1. 机械性能试验	238

2. 物理化学试验	228	1. 无锡薄板的结构	231
(六) 镀锡薄板的发展前途	229	2. 无锡薄板的耐腐蚀性	233
二、无锡薄板	229	3. 无锡薄板的圆筒连接法	232
(一) 无锡薄板的历史	229	(四) 无锡薄板的试验方法	232
(二) 无锡薄板的生产	230	1. 保护层测定法	232
1. 一步法	230	2. 耐腐蚀性试验方法	233
2. 两步法	231	(五) 无锡薄板的发展前途	233
(三) 无锡薄板的表面性质	231		
第三章 其他的表面加工方法	233		
东京都立大学助教授 森健实			
一、去锈	233	五、电镀	253
(一) 氧化物的生成和溶解	234	(一) 电极沉积理论	253
(二) 去锈、除磷用的溶剂	235	(二) 电解条件与电解析出机理	254
(三) 去锈、除磷的实际操作	237	(三) 镀铜	255
1. 酸洗	237	(四) 镀锌	256
2. 碱性洗液	238	(五) 镀铬	256
3. 熔融碱法	238	(六) 阴极处理钢板	259
4. 电解去锈	239	六、化学镀	259
(四) 清洗	239	(一) 镍的化学镀	259
二、脱脂	240	(二) 铜的化学镀	261
(一) 脱脂机理	240	(三) 铬的化学镀	261
(二) 脱脂时使用的溶剂	241	(四) 钴的化学镀	261
(三) 脱脂操作	241	七、气相镀膜	262
1. 碱性脱脂	241	(一) 真空镀膜	262
2. 溶剂脱脂	242	(二) 阴极电泳	263
3. 乳状液脱脂	242	(三) 离子电镀	263
4. 电解脱脂	243	(四) 化学气相镀膜	263
5. 超声波洗液法	244	八、钢铁的化成处理	265
三、电解抛光、化学抛光	244	(一) 加热着色法	265
(一) 电解抛光	244	(二) 碱性黑色薄膜	265
(二) 实际电解抛光	246	(三) 磷酸盐处理	266
1. 与坯料的关系	246	(四) 草酸薄膜	267
2. 电解抛光液及条件	247	(五) 不锈钢的化成处理	267
(三) 化学抛光	249	九、有机薄膜	267
(四) 化学抛光的实例	249	(一) 有机物的覆层法	268
四、热镀	250	(二) 有机物覆盖钢板	268
(一) 热镀锌	250	(三) 覆层用塑料	269
(二) 热镀锡	251		
(三) 热镀铝	252		
(四) 热镀铝	252		

第一篇

轧制法

第一章 轧制理论和变形抗力^[1]

一、轧制原理

(一) 轧件的塑性变形

以轧制钢板为例。由图 1-1 所示,从侧面及上面观察轧辊与板坯之间的关系:轧辊直径为 D , 半径为 R , 辊身长度为 B , 轧制前的板厚为 h_1 , 轧制后的板厚为 h_2 , 轧制前的板宽为 b_1 , 轧制后的板宽为 b_2 , 轧件的入口速度为 v_1 , 轧件的出口速度为 v_2 , 轧辊与轧件接触的角度即接触角(咬入角)为 α , 轧辊与轧件接触部分的水平投影长度为 l_d 。轧辊按箭头方向旋转, 轧件从入口被咬入后, 经过轧制, 厚度减薄。轧件之所以被旋转的轧辊咬入是因为轧件与轧辊之间有摩擦力作用。

随着轧件厚度减薄, 宽度会逐渐增加。在冷轧中, 轧辊与轧件之间的润滑良好, 呈滑动摩擦状态。如轧制前呈垂直的断面, 在轧制后其断面仍旧垂直, 如图 1-2 所示, 这种变形称为理想变形。但是, 在实际轧制中, 常会产生不均匀变形, 如图 1-3 所示。轧制前呈垂直的断面, 在变形区内, 由于附加的剪切变形而产生弯曲, 这表明轧件表面比中心的前进速度快。特别是热轧, 轧辊与轧件之间没有相对滑动, 通常为粘着摩擦状态, 因而容易造成弯曲。

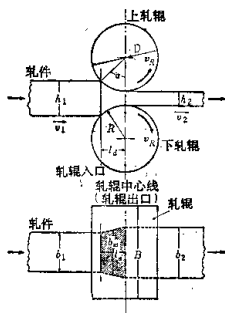


图 1-1 轧辊和轧件

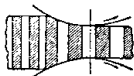


图 1-2 理想变形(均匀变形)

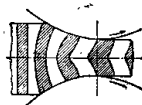


图 1-3 实际变形(不均匀变形)

在热轧中, 由于摩擦系数大, 板厚减薄快, 因此, 在宽度方向上也发生了变形。如图 1-4 所示, 轧件较薄时为单鼓肚形, 轧件较厚时为双鼓肚形。此外, 靠近轧件表层, 由于轧制时的延伸在轧件尾部形成双层, 如图 1-5 所示, 称之为鱼尾形, 这种鱼尾形必须切除, 为了减少此类浪费, 应进一步研究其防止方法。

铸锭的组织是粗大的树枝状晶体, 它具有成分上的偏析和气泡等缺陷, 韧性差、机械性质容易发生变化。通过在奥氏体温度范围内进行热轧, 可得到以下效果: ①利用加工前的均

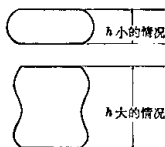


图 1-4 宽度方向的鼓肚变形

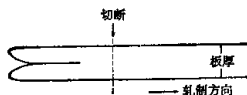


图 1-5 鱼尾形

热时间及加工过程中的成分扩散,使偏析均匀化;②使树枝状晶体变形和破坏;③通过热轧,使变形的晶粒在冷却过程中进行再结晶而细化;④偏析或夹杂物向变形方向伸长,形成纤维组织,提高纤维方向的韧性。

图 1-6 表示钢在热轧时的组织变化。变化后,在冷却过程中再结晶,即按变形程度和温度而形成的具有一定晶粒度的奥氏体,在冷却过程中重新转变成铁素体和珠光体。因此,热轧后,室温冷却的组织与退火状态完全相似。当终轧温度略高于临界点时,组织变得更细。

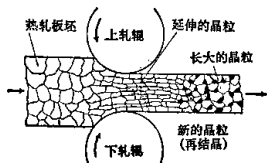


图 1-6 钢在热轧中的晶粒变化

在冷轧中,由于晶粒发生滑移变形,使位错数目增加,晶粒间发生扭曲,彼此相互制约,从而使继续滑移变形困难,因此发生加工硬化现象,晶粒沿轧制方向伸长,晶粒的取向在转动后,使轧件组织形成了加工变形织构。如钢的组织由铁素体和渗碳体组成时,由于铁素体软,可能发生较大的变形,而渗碳体硬,会阻碍变形,在残留的畸变能积蓄后,逐步加快了加工硬化。但在细晶粒的层状珠光体组织内,渗碳体随同铁素体延伸,形成比较相似的层状组织,所以加工后强度更高,韧性更好。为了使轧件能适应更大的变形,必须形成球状珠光体组织。

最近,为了获得高强度钢材,已经采用了比普通热轧温度低的温度控制轧制和进行低温轧制。

(二) 压下量和压下率

在轧制过程中,加工变形的程度通常用压下量或压下率来表示。压下量 Δh 等于轧制前板厚 h_1 减去轧制后板厚 h_2 , 即

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad (1-1)$$

压下率等于轧制前板厚除压下量,即

$$\Delta h / h_1 = (h_1 - h_2) / h_1 \quad (1-2)$$

压下率用百分数表示。

(三) 接触角(或咬入角)

轧辊与轧件接触的部分所夹的中心角 α 称为接触角或咬入角。关于咬入条件,如图

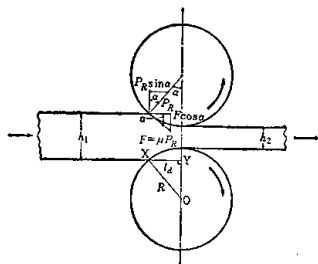


图 1-7 轧辊和轧件之间的作用力

1-7 所示,利用轧辊中心力 P_R 的作用,和轧辊旋转所产生的切向摩擦力 F 向轧辊接触线方

向发生的作用,使轧件被轧辊咬住。设咬入力的水平分量为 H ,轧辊和轧件之间的摩擦系数为 μ ,当摩擦力 F 的水平分量 $F \cos \alpha$ 不能克服中心力 P_R 的水平分量 $P_R \sin \alpha$ 时,轧件就不能被咬入,因此,要使轧件被轧辊咬入,必须满足以下条件:

$$H = F \cos \alpha - P_R \sin \alpha > 0 \quad (1-3)$$

$$F \cos \alpha > P_R \sin \alpha$$

$$F/P_R > \tan \alpha$$

$$\mu > \tan \alpha \quad (1-4)$$

(四)接触弧水平投影长度

轧辊和轧件之间的接触部分的水平投影长度 l_d 称为接触弧水平投影长度,在图1-7的 $\triangle OXY$ 中, l_d 值可用下式求得:

$$l_d^2 = R^2 - \overline{OY}^2 = R^2 - [R - (h_1 - h_2)/2]^2 = R(h_1 - h_2) - (h_1 - h_2)^2/4$$

式中: $(h_1 - h_2)^2/4$ 可以忽略不计,则接触弧水平投影长度 l_d 可近似地以下式表示:

$$l_d = \sqrt{R(h_1 - h_2)} = \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (1-5)$$

上式只有在轧辊为正圆时才成立,对于轧辊发生压扁变形时的 l_d 值,将在后面讨论。

(五)中性点(又称中性面)

当轧件相当宽时,宽展量与总宽相比显得很小,可以忽略不计,根据体积不变定律,轧件在轧制前后的体积保持不变,因此,在单位时间内,轧件通过变形区的任一截面的体积相等(秒流量相等)。如轧件宽度一定,则其厚度 h 与通过速度 v 的乘积也应该是常数。在此情况下,假设轧制前轧件的断面垂直,而轧制后轧件的断面也是垂直的,密度也不变,则下式成立:

$$h_1 v_1 = h_2 v_2 = h v \quad (1-6)$$

因为 $h_1 > h_2$,所以 $v_1 < v_2$,即轧件从进入轧辊入口处到接近出口处的过程中,速度加快了,故在变形区内,存在着轧件表面速度与轧辊圆周速度的水平分量相等的一点,此点称为中性点或称无滑动点。

从轧辊入口到中性点的一段变形区内,轧辊的圆周速度的水平分量大于轧件的表面速度,当达到中性点时就相等了。但从中性点到轧辊出口的一段变形区内,轧件的表面速度比轧辊圆周速度的水平分量大,这是因为在中性点前后,摩擦力方向正好相反。这些条件相当于冷轧时的滑动摩擦状态。

(六)前滑率

从中性点到轧辊出口处,轧件速度比轧辊圆周速度的水平分量大,因此,轧件在轧辊上力图向前滑动。设轧辊圆周速度为 v_R ,轧件在轧辊出口处的速度为 v_2 ,则轧件前滑的程度就可以用 $(v_2 - v_R)/v_R$ 表示,称为前滑率。如图1-8所示。图中 ϕ 角为中性角,中性点上的板厚为 h_ϕ ,水平速度为 v_ϕ ,根据金属的秒流量相等的法则:

$$h_2 v_2 = h_\phi v_\phi = h_\phi \cdot v_R \cos \phi \quad (1-7)$$

中性点的轧件厚度 h_ϕ 为

$$h_\phi = h_2 + 2R(1 - \cos \phi)$$

因此

$$v_2 = v_R \cos \phi \times \{h_2 + 2R(1 - \cos \phi)\} / h_2 \quad (1-8)$$

所以,前滑率

$$v_2 - v_R / v_R = (1 - \cos \phi) (2R \cos / h_2 - 1) \quad (1-9)$$

为了求轧辊中性角 ϕ , 设接触角为 α , 摩擦系数为 μ , 则得:

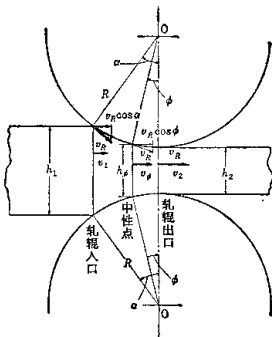


图 1-8 中性点与前滑

口侧, 则产生前滑。但是在热轧中, 轧件表面与轧辊以同等速度移动, 在轧件内可能产生切应力, 因而形成挤压倾向, 或是轧件表面在轧辊而上也可能产生滑动, 关于此点尚未明确。当轧件与轧辊以相等速度在轧辊接触弧长度的全长上移动时, 则称为粘着摩擦。一般认为, 热轧容易产生粘着摩擦条件。但根据不同的情况, 也可以考虑为形成粘着摩擦和滑动摩擦的混合状态。

关于热轧时的摩擦系数, 按脱菲尔(Tafoel)^[2]的方法为: 求得可能咬入的最大接触角 α , 并设它与摩擦角 f 相等, 根据 $\mu = \tan f = \tan \alpha$, 求出摩擦系数。其结果如图 1-9 所示。

众所周知, 粗面轧辊比光面轧辊的摩擦系数大, 轧辊圆周速度加快时, 其摩擦系数降低。艾克龙特(Ekelund)^[3]用同样方法使轧制温度变化, 求得摩擦系数 μ 。当轧制温度高于 700°C 时, 得到下式。式中 t 为轧制温度($^\circ\text{C}$)。

钢轧辊

$$\mu = 1.05 - 0.0005t \quad (1-11)$$

研磨钢轧辊

$$\mu = 0.82 - 0.0005t \quad (1-12)$$

杰里基(Goleji)考虑到轧制速度的影响, 用下式加以修正。设轧制速度为 v 米/秒, 则

$$\mu = 1.05 - 0.0005t - 0.056v \quad (1-13)$$

$$\mu = 0.82 - 0.0005t - 0.056v \quad (1-14)$$

在冷轧中, 当增加轧制速度时, 摩擦系数减低, 图 1-10 表示用棕榈油润滑时, 斯东(Stone)^[4]将轧制压力测定值代入轧制理论公式求出摩擦系数和速度的关系。从以前的冷轧实验结果来看, 在轧制速度小、变形抗力大的情况下, 其摩擦接近于金属相互间的静止摩

$$\sin \phi = \{\sin \alpha + (\cos \alpha - 1)\mu\} / 2 \quad (1-10)$$

因此, 就可以计算前滑率 $(v_2 - v_R) / v_{R0}$ 。

前滑率的测定方法为: 在轧辊表面刻一个凹痕, 轧制后测定留在轧件表面的印痕之间的距离。在热轧中, 温度上升, 前滑率变小, 这是由于摩擦系数减少的原因。而在冷轧中, 粗面轧辊的前滑率也比光面轧辊大, 这也是受摩擦系数的影响。从理论公式得知, 如中性点与轧辊入口速度一致时, 前滑率为最大值。

(七) 摩擦系数

轧辊与轧件之间的摩擦, 对轧制来说是极为重要的因素, 但其本质尚未完全弄清。一般认为: 在冷轧过程中都符合于滑动摩擦条件, 在中性点前后, 轧件表面在轧辊面上产生滑动, 在中性点上, 它与轧辊表面速度一致, 而在轧辊出口侧, 则产生前滑。

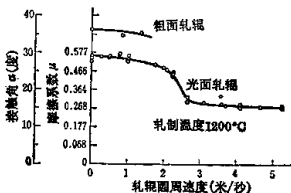


图 1-9 钢在热轧时接触角与摩擦系数的关系(脱菲尔)

擦,但轧制速度大时,就成为滑动摩擦。在高速而润滑好的情况下,则成为流体润滑状态。当变形抗力小时,由于润滑的效果,从低速开始时,摩擦系数便呈现小值。在无润滑的情况下,随着轧制速度增加,摩擦系数变大。

(八)宽展

经过轧制的轧件,不仅在轧制方向上有很大的变形,而且在宽度方向上也会有变形,即宽度增加。在大钢锭进行初轧以及轧制各种型材和厚板时,宽展量较大,而轧制薄板时则较小。一般认为影响轧件宽展的因素有轧件的宽度和厚度、材质、压下量、轧辊直径、轧辊材质、摩擦系数等。但是因为理论分析困难,所以大都采用实验公式来求宽展量。

用平轧辊轧制矩形断面时,可根据赛伯尔(Siebel)公式^[5]求宽展量:

$$b_2 - b_1 = \Delta b = C \sqrt{R \cdot \Delta h} \cdot \Delta h / h_1 \quad (1-15)$$

式中: C 是与材质有关的系数,钢为 0.313; 铅为 0.33; 铜为 0.362; 铝为 0.45, 它们的平均值 C 为 0.35。

以下为艾克龙特(Ekelund)公式:

$$(b_2^2 - b_1^2) / 2 - 4m \sqrt{R \cdot \Delta h} \cdot \Delta h - 2m(h_1 + h_2) \sqrt{R \cdot \Delta h} \cdot \ln(b_2/b_1) \quad (1-16)$$

式中: $m = \{1.6\mu \sqrt{R \cdot \Delta h} - 1.2(h_1 - h_2)\} / (h_1 + h_2)$

热轧碳钢或不锈钢时,用艾克龙特公式比较合适。该式也可计算摩擦系数 μ , 因此比较方便。

一般来说,轧件宽度较小时宽展量较大,宽度增大宽展量反而减少,如果轧辊表面摩擦较大时,宽展量也较大。

二、轧 辊 的 变 形^[6]

(一)轧辊的弯曲

轧辊为圆柱形,在轧制时,轧件对轧辊有反压力而使轧辊产生弯曲变形。若轧制压力大时,弯曲度也大。为防止轧辊弯曲,预先将辊身中部的直径制成比两端的直径稍大一些,即将辊身表面作成曲线,称之为轧辊凸度。

图 1-11 表示轧辊在承受不同的轧制压力情况下所产生的挠度变化。在轧制压力过小时,轧件中间部分压下量大,会发生中部延伸比两边大的情况。如果轧制压力过大时,轧辊的曲率增大,轧件边缘受到的压下量大,而出现波浪边。但成品钢板应尽量做到厚度均匀,从而满足高速轧制和用户的需要。

当冷轧时,如果忽略轧辊的热变形,用二辊式轧制时的压力作用点和轧辊弯曲状态则如图 1-12 所示。轧辊的弯曲应同时考虑辊身和辊颈两个方面。图中,轧制压力 P 产生的反作用力 $R = \frac{P}{2}$, 大体上可以用辊颈轴承的中点作为作用点。如轧辊的直径 D 比辊身长度 W 大时,则与圆钢棒的弯曲情况不同,除因弯曲力而产生曲率外,同时还必须考虑因剪切力而产生的曲率。

将轧辊的曲率按一般情况,即钢板的宽度小于辊身宽度来考虑。如图 1-13 所示,在计

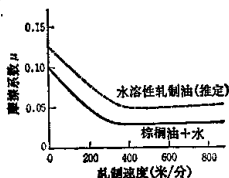


图 1-10 冷轧时的轧制速度与摩擦系数的关系(斯东)

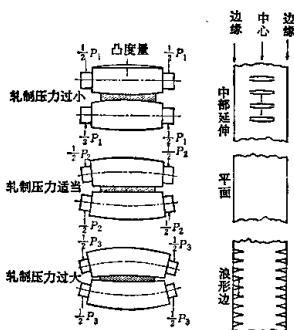


图 1-11 轧辊凸度和轧制压力以及轧制钢板形状

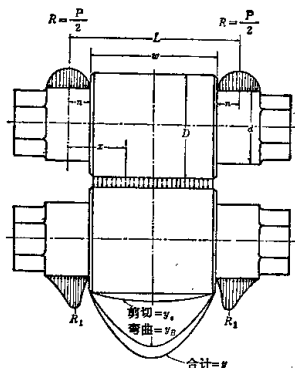


图 1-12 二辊式轧辊的作用力与曲率(艾密克 Emicko)

算由弯曲力所产生的挠度时,可设轧辊颈部从 $x=0$ 到 $x=n$ 的范围内的挠度为 y_s ; 辊身端部从 $x=n$ 到钢板端部 $x=(L-b/2)=e$ 的范围内的挠度为 y_s ; 钢板端部从 $x=e$ 到钢板中央 $x=L/2$ 的范围内的挠度为 y_s ; 辊颈及辊身截面惯性矩分别为 I_a, I_D ; 轧制压力为 P ; 轧辊材料的弹性模数为 E , 则各范围内的弯曲力矩为:

$$\left. \begin{aligned} EI_a d^2 y_1 / dx^2 &= -P \cdot x / 2 \\ EI_D d^2 y_2 / dx^2 &= -P \cdot x / 2 \\ EI_D d^2 y_3 / dx^2 &= -(P/2) \{x - (x-e)^2/b\} \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

将 (1-17) 式用两次积分定积分常数, 则在钢板宽 b 的轧材范围求弯曲力所产生的挠度为:

$$y_B = (P/384EI) \{8(3L^2 - b^2)(x-n) - 32(x^3 - n^3) + (2x-L+b)^4/b\} \quad (1-18)$$

然后, 求剪切力所产生的挠度。设轧辊横断面内剪切应力分布均匀, 轧辊的刚度为 G , 则与弯曲情况相应的各范围为:

$$\left. \begin{aligned} Gd y_1 / dx &= 2P / (\pi d^2) \\ Gd y_2 / dx &= 2P / (\pi D^2) \\ Gd y_3 / dx &= 2P(L-2x) / (b\pi D^2) \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

在钢板宽为 b 的范围内由剪切力所产生的挠度为:

$$y_s = (P/2\pi G D^2) [4x(L-x) - (L-b)^2 - 4bn] / b \quad (1-20)$$

所以, 挠度总量应由弯曲力和剪切力所产生的两方面挠度的总和, 即:

$$y = y_B + y_s \quad \text{但} \quad (L-b)/2 \leq x \leq L/2 \quad (1-21)$$

如认为辊身上同样有轧制压力作用时, 则可用 $b=L-2n$ 代入 (1-18) 式和 (1-20) 式,

即:

$$y_B = [P(x-n)/24EI] \cdot \{(x-n)^3/w + L^2 + 2wn - 2x(x+n)\} \quad (1-22)$$

$$y_B = [2P/\pi G D^3] [x(L-x) - n(L-n)]/w \quad (1-23)$$

故挠度总量是:

$$y = y_B + y_S \quad \text{但} \quad n \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (1-24)$$

轧辊凸度的确定,其目的是为了得到平直的轧板,所以如图 1-12 所示,必须设计最适当的辊型。图 1-14 是拉尔克(Larke)从安全考虑,按辊身受均匀分布的最大轧制力时所计算出来的凸度量。

在使用支承辊的四辊轧机上,工作辊的弯曲大为减少。支承辊和工作辊均为圆柱形,如果它们同时弯曲,而弯曲力被考虑为只产生挠度时,则支承辊和工作辊两者挠度相同,可近似地用下列公式表示^[7]:

$$\begin{aligned} y &\approx (P_1/884E_1I_1)(12Lw^2 - 7w^3) \\ &\approx (P_2/884E_2I_2)(12Lw^2 - 8w^3 + b^3) \end{aligned} \quad (1-25)$$

式中: P_1 、 P_2 ——作用于支承辊和工作辊上的压力,

E_1 、 E_2 ——支承辊和工作辊的弹性模数,

I_1 、 I_2 ——支承辊和工作辊截面惯性矩。

(二) 轧辊的热膨胀

在轧制过程中,轧辊温度上升,其辊身的温度分布状态为中部高、两端低。因此,辊身中部热膨胀最大,产生了与上述的曲率相反方向的轧辊变形。一般称之为热凸度。影响轧辊温度上升的因素有轧件的热量、轧辊的冷却方法、加工发热、轧辊表面摩擦、压下率、辊颈轴承的摩擦热等。而且这些因素还影响轧制速度和轧辊尺寸,其关系极为复杂。最关键的是要尽量做到使轧制状态和冷却状态必须保持稳定,同时使轧辊温度分布也必须保持稳定。

热膨胀在辊身中心部分最大,此处,轧辊半径的增加量为:

$$y_t(\text{最大}) = D\theta(T_m - T_e)/2 \quad (1-26)$$

式中: D ——轧辊直径,

θ ——线膨胀系数,

T_m ——辊身中心温度,

T_e ——辊身端部温度。

设热凸度的形状为抛物线,则凸度的曲线公式为:

$$y_t = k(w - x_1)x_1 \quad (1-27)$$

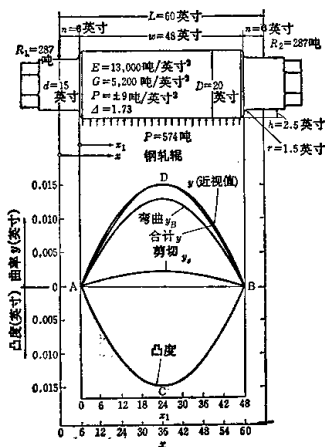


图 1-14 最大轧制压力在辊身上均匀分布时,轧辊凸度的计算

因 $x_1 = w/2$, 即在辊身中心 $y_1 = y_1(x_1)$, 则可定出 k 值, 从而得到下式:

$$y_1 = 2D\theta (T_m - T_s) (w - x_1) x_1 / w^2 \quad (1-28)$$

(三) 轧辊的压扁变形

轧制时, 轧辊和轧件接触部分会发生微小的弹性变形。如为热轧时, 在其变形抗力小的情况下, 则不成问题; 但是如冷轧薄板时, 在轧件的变形抗力大的情况下, 轧辊就会产生压扁变形, 使接触弧变长, 尽管增加轧制压力, 但单位压力反而变低, 薄板厚度并不减小。此种当上下轧辊之间发生变形而轧件不变形的情况, 在轧制极薄钢板时, 特别容易发生。为此必须减小轧辊直径和使用硬质材料的轧辊。

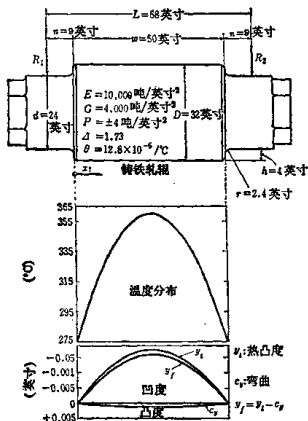


图 1-15 热凸度的示例 (拉克 Larko)

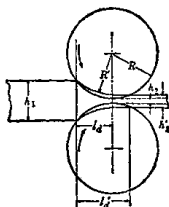


图 1-16 轧辊的压扁变形

希考克 (Hitchcock)^[2] 假设接触弧上的压力分布为椭圆形, 轧辊发生弹性变形后也呈圆弧形状, 并且不考虑轧件的弹性变形, 推导出下式:

$$l_d = \sqrt{\{8R(1-\nu^2)p_m/\pi E\}^2 + R \cdot \Delta h + 8R(1-\nu^2)p_m/\pi E} \quad (1-29)$$

式中: l_d 是压扁变形时的接触弧水平投影长度, p_m 是压扁变形时的平均轧制压力, ν 是泊松比。

根据压扁变形时轧辊半径由 R 变为 R' , 则得:

$$R' = R(1 + 2cP/b\Delta h) \quad (1-30)$$

式中: $c = 8(1-\nu^2)/\pi E$

当考虑压扁变形时各轧制理论公式中的 R , l_d 应改用 R' , l_d 。

三、轧机的变形

轧制时, 除了轧辊以外, 轧机的其他部分也都受到轧制压力的影响, 因而反复产生微小的弹性变形, 尽管表面上对轧机的强度没有影响, 但是辊缝增大了, 这种现象称之为轧机弹跳。

在轧机上承受轧制压力的各结构部分见图 1-17, 作用在轧辊上的轧制压力, 为了顶开轧辊, 力的传递顺序为: 轧颈 → 轴承座 → 压下螺丝 → 机架。轴承如为油膜轴承, 则油膜厚度发