



卓越工程师
教育培养计划配套教材

■ 宋仁伯 编著

轧制工艺学

The Technology of Rolling



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



卓越工程师
教育培养计划配套教材

轧制工艺学

宋仁伯 编著

北京
冶金工业出版社
2014

内 容 提 要

本书根据“卓越工程师教育培养计划”的教学要求和专业特点,在阐明轧制工艺理论的基础上,既介绍工程应用技术,也介绍应用实例及发展前景。全书共6章,主要内容包括轧钢工艺概述、钢坯生产、型钢生产、型钢孔型设计、板带钢生产和钢管生产;侧重于基本概念、基本原理、典型生产工艺及设备的讲解;同时介绍不同钢材品种的轧制方法、生产工艺、质量控制技术的相关案例。

本书可作为“卓越工程师教育培养计划”中材料科学与工程专业(材料成型及控制工程方向)或相关专业的教材,也可供从事金属材料研究、生产和使用的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

轧制工艺学/宋仁伯编著. —北京:冶金工业出版社,
2014.4

卓越工程师教育培养计划配套教材

ISBN 978-7-5024-6506-3

I. ①轧… II. ①宋… III. ①轧制—教材 IV. ①TG33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 055783 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 谢冠伦 李维科 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6506-3

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京慧美印刷有限公司印刷

2014 年 4 月第 1 版, 2014 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 19.5 印张; 426 千字; 302 页

39.00 元

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

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

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

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)



前 言

“卓越工程师教育培养计划”的本科教学要求是：“厚学科基础、宽专业领域、重创新实践、强工程训练、懂经营管理”，有别于普通本科的要求。其中材料科学与工程专业（材料成型及控制工程方向）本科学生的培养，更强调专业知识的实践性、应用性和技术性，对于实际的工程技术和应用能力的要求更加迫切。与此相应，就需要编写符合材料科学与工程专业“卓越工程师”人才特点，符合“卓越工程师教育培养计划”课程设置，突出高级应用技术型人才培养特色，具有灵活性、实践性和前瞻性的特色教材。

轧制工艺作为材料科学与工程专业的重要研究领域，迫切需要一本基础理论系统、内容翔实、反映轧制技术发展趋势的新教材。本书在分析现有专业教材的基础上，根据“卓越工程师教育培养计划”教学要求和专业特点，在编写内容上力求突出应用性和针对性，以培养学生分析、解决问题的能力及工程实践能力，力求体现以下特色：

(1) “专业”特色。针对培养钢铁工业高级应用型技术人才关于知识积累的要求，内容在选取上有的放矢，重点放在轧制工艺的设计、控制及应用上，同时对轧制工艺设计理论、轧制设备布置原则等内容也进行了必要的介绍。

(2) “产品”特色。本书用典型钢铁产品生产及研发案例将轧制工艺及技术、轧制产品质量控制原理及手段引出、讲解，进而细化，通过典型轧制产品及工艺引入工程应用背景和工程知识，以求达到良好的教学效果。

(3) “应用”特色。有关基础理论的内容以必需、够用为度，以掌握概念、强化应用为重点，简化了繁杂的理论分析及公式推

演过程,以缓解日益缩减的理论学时与不断扩充的新知识、新内容之间的矛盾。通过典型轧制工艺案例,将轧制理论、钢铁材料、轧钢机械、工艺设计等知识点以工程应用为纽带结合在一起,为学生培养正确的思维方法打下基础。

本书承蒙北京科技大学刘雅政教授、孙建林教授、赵志毅教授和辽宁科技大学李胜利教授对书稿进行审阅,在此向他们表示衷心的感谢!

由于作者水平所限,书中不妥之处,诚请广大读者批评指正。

宋仁伯

2013年12月

目 录

1 轧钢工艺概述	1
1.1 轧钢生产工艺基本概念	1
1.1.1 钢材的品种和用途	1
1.1.2 轧钢生产系统	4
1.1.3 轧钢生产工艺过程及其制定	5
1.1.4 轧钢生产各基本工序的作用	9
1.2 现代轧钢生产现状及技术发展	17
1.2.1 热轧带钢生产和轧制技术的发展现状	18
1.2.2 冷轧带钢生产和轧制技术的发展现状	18
1.2.3 长材生产和轧制技术的发展现状	19
1.2.4 无缝钢管生产和轧制技术的发展现状	19
1.2.5 实验研究平台的发展现状	20
1.2.6 当前轧钢技术创新的重点问题和发展方向	20
1.3 钢材产品标准和技术要求	25
思考题	27
2 钢坯生产	28
2.1 钢坯生产概述	28
2.2 连铸坯生产	29
2.2.1 连铸法的历史及发展趋势	29
2.2.2 连铸生产工艺	29
2.2.3 连铸坯的结构特点	32
2.2.4 连铸生产的现状及未来	33
2.2.5 薄板坯连铸连轧工艺	34
思考题	35

3 型钢生产	36
3.1 型钢生产概述	36
3.1.1 型钢产品种类	36
3.1.2 型钢生产方式	39
3.1.3 型钢生产特点	40
3.2 普通型钢生产	41
3.2.1 大中型型钢生产	41
3.2.2 小型型钢生产	43
3.2.3 钢轨生产	43
3.3 棒、线材生产	48
3.3.1 棒、线材生产概述	48
3.3.2 棒、线材生产的工艺过程及特点	50
3.3.3 棒、线材生产设备及平面布置	51
3.3.4 高速无扭线材轧制	54
3.3.5 棒、线材轧制的控制冷却和性能控制	55
3.4 H型钢生产	57
3.4.1 H型钢的用途及发展	57
3.4.2 H型钢的生产方式及特点	58
3.4.3 H型钢的生产工艺过程	63
3.5 型钢生产的发展及新技术	66
3.5.1 型钢生产的发展趋势	66
3.5.2 型钢生产发展的新技术	70
思考题	71
4 型钢孔型设计	72
4.1 孔型设计的基本知识	72
4.1.1 孔型设计的内容与要求	72
4.1.2 孔型设计的基本原则及程序	74
4.1.3 孔型的组成及各部分的作用	78
4.1.4 孔型在轧辊上的配置	81
4.1.5 孔型在轧辊上的配置步骤	89



4.1.6 孔型配置例题	90
4.2 延伸孔型设计	90
4.2.1 延伸孔型的概念及种类	90
4.2.2 箱形孔型系统	91
4.2.3 菱-方孔型系统	94
4.2.4 菱-菱孔型系统	98
4.2.5 椭圆-方孔型系统	101
4.2.6 六角-方孔型系统	103
4.2.7 椭圆-立椭圆孔型系统	104
4.2.8 椭圆-圆孔型系统	106
4.2.9 混合孔型系统	107
4.2.10 延伸孔型的设计方法	108
4.2.11 延伸孔型设计例题	113
4.2.12 无孔型轧制法	119
4.3 简单断面钢材孔型设计	121
4.3.1 简单断面型材的生产	121
4.3.2 方钢孔型设计	122
4.3.3 圆钢孔型设计	122
4.3.4 扁钢孔型设计	125
4.3.5 角钢孔型设计	128
4.4 复杂断面型钢孔型设计	130
4.4.1 复杂断面型钢孔型设计基础	130
4.4.2 工字钢的孔型设计	135
4.4.3 H型钢孔型设计	142
思考题	150
5 板带钢生产	151
5.1 中厚板生产	151
5.1.1 中厚板轧机型式及布置	151
5.1.2 中厚板生产工艺过程	156
5.1.3 轧机压下规程制定	159
5.2 热连轧带钢生产	162
5.2.1 带钢热连轧机型式及其特点	163
5.2.2 带钢热连轧车间及生产工艺过程	165

5.2.3	轧制规程的制定方法	169
5.2.4	热轧双相钢的轧制工艺设计及控制	171
5.2.5	辊型设计	176
5.3	冷轧带钢生产	176
5.3.1	冷轧带钢工艺特点	176
5.3.2	轧机型式	182
5.3.3	冷轧生产工艺过程	185
5.3.4	压下规程的制定	190
5.3.5	冷轧硅钢生产工艺	194
5.4	板带钢厚度及辊型控制	198
5.4.1	影响厚度的主要因素	198
5.4.2	板带钢厚度控制方式	200
5.4.3	厚度自动控制方法	201
5.4.4	辊型控制	203
5.5	板带钢生产新技术	206
5.5.1	中厚板生产新技术	206
5.5.2	热带钢生产新技术	207
5.5.3	冷轧板带生产新技术	207
	思考题	208
6	钢管生产	209
6.1	钢管生产概述	209
6.1.1	钢管的品种、用途和分类	210
6.1.2	钢管热轧生产方法	211
6.1.3	焊接钢管生产方法	213
6.1.4	钢管冷加工法	213
6.2	热连轧无缝钢管生产	214
6.2.1	连轧钢管机组	215
6.2.2	管坯准备和加热	217
6.2.3	管坯穿孔	224
6.2.4	毛管轧制	232
6.2.5	钢管的再加热、定径与减径	240
6.2.6	钢管冷却与精整	243
6.3	轧制表的编制	247
6.3.1	编制原则和程序	247



6.3.2 编制轧制表的要求	248
6.3.3 轧制表编制的步骤	248
6.3.4 轧制表编制方法	248
6.3.5 编制实例	248
6.4 热轧无缝钢管生产工具与工艺控制	252
6.4.1 斜轧工具设计	252
6.4.2 连轧管机工具设计	257
6.4.3 张减机工具设计	265
6.4.4 连轧钢管生产工艺控制技术	272
6.5 焊接钢管生产	275
6.5.1 高频直缝连续电焊管生产工艺过程	275
6.5.2 高频直缝电焊管成型法	277
6.5.3 直缝连续电焊管电焊焊接法及电焊原理	278
6.5.4 成型辊孔型设计一般问题	282
6.5.5 UOE 直缝电焊管生产	284
6.5.6 螺旋电焊管生产工艺	286
6.5.7 连续炉焊管生产	287
6.6 冷轧管生产	288
6.6.1 冷轧管生产特点	288
6.6.2 冷轧的生产工艺过程	288
6.6.3 钢管的冷轧	289
6.6.4 轧管机的组成及工具	291
6.7 钢管生产发展与新技术	292
6.7.1 无缝钢管穿孔技术的发展	292
6.7.2 无缝钢管轧制发展与新技术	292
6.7.3 电焊钢管生产技术的发展趋势	294
6.7.4 冷轧钢管生产的技术发展	296
思考题	297
参考文献	298
关键词索引	300



1 轧钢工艺概述

【本章概要】

本章首先介绍了轧钢生产工艺基本概念，其中包括钢材的品种和用途，轧钢生产系统，轧钢生产工艺过程及其制定，轧钢生产各基本工序的作用；并简要叙述了现代轧钢生产现状及技术发展；最后对钢材产品标准和技术要求进行了阐述。

【关键词】

型钢，板带钢，钢管，线材，轧钢生产系统，轧钢生产工艺过程，塑性，变形抗力，导热系数，摩擦系数，相图，淬硬性，缺陷，加热温度，加热速度，加热时间，轧制，变形程度，变形温度，变形速度，冷却，精整，力学性能，组织，技术要求，产品标准

【章节重点】

本章应重点掌握轧钢生产工艺过程的主要工序及其作用，在此基础上熟悉轧制工艺参数制定的依据和原则；了解轧钢生产工艺、技术及产品的现状及发展趋势；掌握合格钢材的验收标准及技术条件。

1.1 轧钢生产工艺基本概念

1.1.1 钢材的品种和用途

轧制钢材的断面形状和尺寸总称为钢材的品种规格。目前，以轧制方法生产的钢材品种规格已达数万种。根据钢材形状特征之不同，可分为板带钢、钢管、型钢和线材等数类。

型钢和线材是广泛使用的钢材，在工业先进的国家中一般占总钢材 30% ~ 50%。型钢的品种很多，按其用途可分为常用型钢（方钢、圆钢、扁钢、角钢、槽钢、工字钢等）及专用型钢（钢轨、钢桩、球扁钢、窗框钢等）。按其断面形状可分为简单断面型钢、复杂断面型钢和异型断面型钢。

板带钢是应用最广泛的钢材，各工业先进国家多占 50% ~ 60% 以上，美国达 66% 以上，按制造方法可分为热轧板带和冷轧板带；按用途可分为锅炉板、桥梁板、造船板、汽车板、镀锡板、电工钢板等；按产品厚度一般分为：（1）厚板：厚 4 ~



500mm 或以上, 宽至 5000mm, 长 25m 以上, 一般成块供应。(2) 薄板: 厚 0.2 ~ 4mm, 宽至 2800mm, 可剪成定尺长度, 也可成卷供应。(3) 箔材: 厚 0.2 ~ 0.001mm 或以下, 宽 20 ~ 660mm, 一般成卷供应。各种钢板宽度及厚度的组合已超过 5000 种, 宽度对厚度的比值达 10000 以上。异型断面钢板、变断面钢板等新型产品正不断出现。板带钢不仅作为成品钢材使用, 而且也常用作制造弯曲型钢、焊接型钢和焊接钢管等的原料。

钢管用途也很广, 一般约占总钢材的 8% ~ 15%。它的规格用外形尺寸 (外径或边长) 和内径及壁厚表示。它的断面一般为圆形, 但也有多种异型钢管及变断面钢管。按用途分为输送管道用钢管、锅炉管、地质钻探管、轴承钢管、注射针管等; 按制造方法分为无缝钢管、焊接钢管及冷轧拔管等。各种钢管的规格按直径与壁厚组合也非常多, 其外径最小可达 0.1mm, 最大可至 4m, 壁厚薄达 0.01mm, 厚至 100mm。随着科学技术的不断发展, 新的钢管品种也在不断增多。

用轧制方法生产钢材, 生产效率高、质量好、金属消耗少及生产成本低。随着轧制钢材产量的不断提高, 钢材品种必将日益扩大。

以下为现今比较常见的钢材品种及其用途:

(1) 大型型钢。大型型钢是指高度不小于 80mm 的 H 型钢、I 型钢 (工字钢)、U 型钢 (槽钢)、角钢、Z 字钢、丁字钢、T 型钢、钢板桩等。

(2) 中小型号钢。中小型号钢是指高度小于 80mm 的 H 型钢、I 型钢 (工字钢)、U 型钢 (槽钢)、角钢、T 型钢以及球扁钢、窗框钢等。

(3) 棒材。棒材是指产品断面形状为圆形、方形、矩形 (包括扁形)、六角形、八角形等简单断面, 并通常以直条交货的钢材, 不包括混凝土用钢筋。

(4) 钢筋。钢筋是指钢筋混凝土用和预应力钢筋混凝土用钢材, 例如: 按照 GB1499、GB4463、GB13013、GB13014、GB13788 等标准组织生产的钢材。其横截面为圆形, 有时为带有圆角的方形; 包括光圆钢筋、带肋钢筋、扭转钢筋; 通常以直条交货, 不包括线材轧机生产的钢材。

(5) 线材 (盘条)。线材是指经线材轧机热轧后卷成盘状交货的钢材, 又称盘条。其横截面通常为圆形、椭圆形、方形、矩形、六角形、八角形、半圆形等。碳含量在 0.6% 以上的线材俗称硬线, 在 0.6% 以下的俗称软线。线材主要用于建筑和拉制钢丝及其制品。热轧线材直接使用时多用于建筑业, 充当光圆钢筋。

(6) 特厚板。特厚板是指厚度不小于 50mm 的钢板, 一般用可逆式热轧特厚板轧机生产, 主要用于锅炉、造船、航空、军工国防、建筑、桥梁及容器等。

(7) 厚板。厚板是指厚度大于 20mm 而小于 50mm 的钢板, 一般用可逆式热轧中厚板轧机生产, 主要用于锅炉、造船、航空、军工国防、建筑、桥梁及容器等。

(8) 中板。中板是指厚度大于 3mm 而小于 20mm 的钢板, 可以是可逆式热轧中厚板轧机生产的, 也可以是连续式宽带钢热轧机所生产的热轧带钢的剪切产品, 其薄规格产品还可以经过冷轧机的加工。中板主要用于锅炉、造船、火车车厢、汽车、集装箱、军工国防、建筑、桥梁及容器等。

(9) 热轧薄板。热轧薄板通常用连续式宽带钢热轧机、炉卷轧机、薄板坯连铸连轧设备生产的热轧宽带钢经过剪切得到。单张生产或叠轧生产的热轧薄板生产工艺属于淘汰工艺。

(10) 冷轧薄板。冷轧薄板可以用可逆式冷轧机单张轧制,也可以用可逆式冷轧机或连续式宽带钢冷轧机生产的冷轧宽带钢经过剪切得到。

(11) 镀层板(带)。镀层板(带)是指在基板(带)的表面镀有一层金属的钢材。

镀锌板是指表面镀有一层锌的钢板。镀锌是一种经常采用的经济而有效的钢板防腐方法。镀锌板按生产工艺分为热镀锌板和电镀锌板。热镀锌板的镀层较厚,用于抗蚀性强的部件。电镀锌板的镀层较薄且均匀,多用于涂漆或室内用品。

镀锡板,俗称马口铁,是指表面镀有一薄层金属锡的钢板。其具有良好的抗腐蚀性能,有一定的强度和硬度,成型性好又易焊接,锡层无毒无味,能防止铁溶进被包装物,且表面光亮,印制图画可以美化商品;主要用于食品罐头工业,还可用于化工油漆、油类、医药等包装材料。镀锡板按生产工艺分为热镀锡板和电镀锌板。

(12) 涂层板(带)。涂层板(带)是指以镀锌板、镀铝板、镀锌铝合金板、冷轧板等作为基体材料,表面涂上一层或两层有机涂料(如环氧酯、聚酯、丙烯酸酯、塑料溶胶等)或者覆上一层塑料薄膜而得到的产品。由于可以制成不同的颜色或压出花纹,也称为彩色钢板。这种钢板广泛用于建筑、交通运输、容器、轻工、电器、家具及仪表等。

(13) 无缝钢管。无缝钢管是指由整块金属制成的、表面没有接缝的钢管,按生产方法可分为热轧管、冷轧管、冷拔管、挤压管和旋压管,按断面形状可分为圆形和异形两种。无缝钢管的最大直径可达650mm(扩径管),最小直径为0.3mm(毛细管)。按壁厚不同又可分为厚壁管和薄壁管。无缝钢管主要用作石油地质勘探管、石油化工用裂化管、锅炉管、轴承管以及汽车、航空用高精度结构钢管等。

(14) 焊接钢管。焊接钢管是指用钢带或钢板弯曲变形为圆形、方形等预期形状后再焊接成的、表面有接缝的钢管,按焊接方法不同可分为电弧焊管、高频或低频电阻焊管、气焊管、炉焊管、邦迪管等,按焊缝形状可分为直缝焊管和螺旋焊管。电焊钢管主要用于石油钻采和机械制造业等;炉焊管可用作水煤气管等,大口径直缝焊管用于高压油气输送等;螺旋焊管用于油气输送、管桩和桥墩等。焊接钢管与无缝钢管相比成本低、生产效率高。

(15) 其他钢材。

1) 冷弯型钢。冷弯型钢是指用钢板或钢带在冷状态下弯曲成的、各种断面形状的成品钢材。除能弯曲成一般的角钢、Z字钢和槽钢之外,还能弯曲成很多种用热轧法不能获得的型材。冷弯型钢主要用于金属结构、金属家具、运输机械、农业机械以及管道等。

2) 复合钢板。复合钢板是以碳素钢或低合金钢作为母材,在其外面包覆不锈钢、钛合金之类的复合材料,或在两层钢材之间夹有其他金属或非金属材料,经压力



或爆破加工而成的复层钢板。其主要用于制作化工设备及化学品储罐，或者获得减震等特殊功能。复合钢板的制造方法有轧制法、爆炸法等，但大多采用轧制法。

3) 减振复合钢板。减振复合钢板是把钢板与减振性能优异的黏弹性物质（如树脂）复合（粘贴或涂覆）而成的一种结构型功能材料。它有效地把金属材料 and 黏弹性物质的特性结合起来，从而使产品具有优异的减振降噪功能。其应用领域涵盖汽车、家电、建筑和工程机械等行业。

1.1.2 轧钢生产系统

由于世界连铸技术的飞速发展，目前其已取代模铸钢锭技术。采用钢水直接通过连铸形成一定断面形状和规格的钢坯，省去了铸锭、初轧等许多工序，大大简化了钢材生产工艺过程。连铸坯生产会在第2章中详细叙述。连铸的优点主要有节约金属、提高成材率、节约燃料消耗、降低生产成本、改善劳动条件、提高劳动生产率及改善枝晶偏析、提高钢材质量等。

一般在组织生产时，根据原料来源、产品种类以及生产规模之不同，将连续铸钢装置与各种成品轧机配套设置，组成各种轧钢生产系统。例如，按生产规模分为大型、中型及小型的生产系统；按产品种类分为板带钢、型钢、钢管以及混合生产系统。每一种生产系统的车间组成、轧机配置及生产工艺过程又是千差万别的。因此，在这里只举几种较为典型的例子，大致说明一般钢材的生产过程及生产系统的特点。

(1) 板带钢生产系统。近代板带钢生产系统由于广泛采用了连续轧制方法，生产规模越来越大。例如，一套现代化的宽带钢热轧机年产量达300万~600万吨；一套宽厚板轧机年产量约100万~200万吨。

(2) 型钢生产系统。型钢生产系统的规模往往并不是很大，就其本身规模而言又可分为大型、中型和小型三种生产系统。一般年产100万吨以上的可称为大型的系统，年产30万~100万吨的可称为中型的系统，年产30万吨以下的可称为小型的系统。

(3) 钢管生产系统。钢管生产系统通常指生产各类无缝钢管的轧钢生产系统。虽然无缝钢管在热轧材中的比例不大，但无缝钢管具有广泛的用途，对管坯的质量要求又比较高，故这种单一型的轧钢生产系统已逐步成为钢管生产的发展方向，并且正在朝着冶炼、铸造（或连铸）、轧制、管端加工一体化的方向发展。一套现代化的热轧无缝钢管车间年产量可达60万吨以上。

(4) 混合生产系统。若钢铁企业中可同时生产板带钢、型钢或钢管，这类轧钢系统称为混合系统。无论在大型、中型或小型的企业中，混合系统都比较多，其优点是可以满足多品种的需要。但单一的生产系统有利于产量和质量提高。

(5) 合金钢生产系统。由于合金钢的用途、钢种特性及生产工艺都比较特殊，材料也比较稀少昂贵，产量不大而产品种类繁多，故它常属中型或小型的型钢生产系统或混合生产系统。由于有些合金钢塑性较低，故开坯设备除轧机以外，有时还采用锻锤。

现代化的轧钢生产系统向着大型化、连续化、自动化的方向发展,原料断面及重量日益增加,生产规模日益加大。但应指出,近年来大型化的趋向已日渐消退,而投资省、收效快、生产灵活且经济效果好的中小型钢厂在不少国家(如美国及很多发展中国家)却有了较快的发展。

1.1.3 轧钢生产工艺过程及其制定

将钢锭或钢坯轧成具有一定规格和性能的钢材这一系列加工工序的组合被称为轧钢生产工艺过程。

组织轧钢生产工艺过程首先是为了获得合格的(即合乎质量要求或技术要求的)产品,也就是说,保证产品质量是轧钢生产工作中的一个主要目标。因此,拟定某种产品的生产工艺过程,就必须以该产品的质量要求或技术要求作为主要依据。

组织轧钢生产工艺过程的另一项任务是,在保证产品质量的基础上努力提高产量。这一任务的完成不仅取决于生产工艺过程的合理性,而且取决于时间和设备的充分利用程度。此外,在提供好的质量和产量的同时,还应该力求降低成本。因此,如何能够优质、高产、低成本地生产出合乎技术要求的钢材,乃是制定轧钢生产工艺过程的总任务和总依据。

在了解钢材技术要求的同时,我们还必须充分了解各种钢的内在特性,尤其是加工工艺特性及组织性能变化特性,即该钢种的固有内在规律;然后,利用这些规律,才能正确地制定生产工艺过程并采用有效的工艺手段,达到生产合乎技术要求的产品的目标。

为了正确制定钢材的生产工艺过程和规程,必须深入了解所轧钢材的钢种特性,即其固有的内在规律。下面分述与生产工艺过程和规程相关的钢种特性:

(1) 塑性。纯金属和固溶体有较高的塑性,单相组织比多相组织的塑性要好,而杂质元素和合金元素越多或相数越多,尤其是有化合物存在时,一般都会使塑性降低(稀土元素例外),尤其是硫、磷、铜和铅等易熔金属更是如此。因此,一般纯铁和低碳钢的塑性最好,碳含量越高,塑性越差;低合金钢的塑性也较好,高合金钢一般塑性较差。钢的塑性,一方面取决于金属的本性,这主要是与组织结构中变形的均匀程度,即与组织中相的分布、晶界杂质的形态与分布等有关,同时也与钢的再结晶温度有关,再结晶开始温度高、速度慢,往往表现出塑性差。另一方面,塑性还与变形条件,即与变形温度、变形速度、变形程度及应力状态有关,其中变形温度影响较大,故必须了解塑性与温度的变化规律,掌握适宜的热加工温度范围。此外,在较低的变形速度下轧制,或采用三向压应力较强的变形过程,如采用限制宽展或包套轧制等,都有利于金属塑性的改善。

(2) 变形抗力。一般地说,随着碳含量及合金含量的增加,钢的变形抗力将提高。由加工原理可知,凡能引起晶格畸变的因素都使抗力增大。合金元素尤其是碳、硅等元素的增加使铁素体强化。合金元素尤其是稳定碳化物形成元素,在钢中一般都能使奥氏体晶粒细化,使钢具有较高的强度。合金元素还通过影响钢的熔点和再结晶



温度与速度,通过相的组成及化合物的形成,以及通过影响表面氧化铁皮的特性等来影响变形抗力。在这里还要指出,在高温时由于合金钢一般熔点都较低,因而合金钢变形抗力可能大为降低,例如,高碳钢、硅钢等在高温时甚至比低碳钢还要软。

(3) 导热系数。随着钢中合金元素和杂质含量的增多,导热系数毫无例外地都要降低。碳素钢的导热系数一般在 $13.7 \sim 43.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间,随着合金元素的增多,导热系数将降低。钢的导热系数还随温度而变化,一般是随着温度升高而增大,但碳钢在大约 800°C 以下是随温度升高而降低。铸造组织比经轧制加工的组织的导热系数要小,故在低温阶段,尤其是对钢坯铸造组织进行加热和冷却时,应该特别小心谨慎。

合金钢的导热系数越低,则在钢锭凝固时冷却越缓慢,因而使树枝状结晶(枝晶)越发达和粗大,甚至横穿整个钢坯,这种组织称为柱状晶或横晶。这种柱状晶组织可能本身并不十分有害,但由于不均匀偏析较严重,当有非金属夹杂或有脆性组织成分存在时,则使塑性降低,轧制时容易开裂。因而在制订加热和轧制规程时必须加以注意。

(4) 摩擦系数。合金钢的热轧摩擦系数一般都比较大,因而宽展也较大。各种钢的摩擦系数的修正系数见表 1-1。由该表可见,很多合金钢的摩擦系数要比碳素钢大,因而其宽展也大。这主要是因为这些合金钢中大都含有铬、铝、硅等元素。铬含量高的钢形成黏团性的氧化铁皮,使摩擦系数增加,宽展加大;含少量铬的钢则具有中等的宽展。同样,含铝、硅的钢的氧化铁皮也较软而黏,因而摩擦系数也较大。但与此相反,含钒、镍和高硫的钢则使摩擦系数降低。合金钢的摩擦系数和宽展的这种变化,在拟订生产工艺过程和制订压下规程及孔型设计时必须加以考虑。

表 1-1 各种钢的摩擦系数的修正系数

钢 种	钢 号	对摩擦系数的修正系数
碳素钢	10	1.0
莱氏体钢	W18Cr4V	1.1
珠光体、马氏体钢	GCr15	1.24 ~ 1.35
奥氏体钢	Cr14Ni14W2MoTi	1.36 ~ 1.52
奥氏体钢(含少量铁素体)	1Cr18Ni9Ti	1.44 ~ 1.53
奥氏体钢(含碳化物)	1Cr17Al5	1.55
铁素体	Cr15Ni60	1.56 ~ 1.64

(5) 相图形态。合金元素在钢中影响相图的形态,影响奥氏体的形成与分解,因而影响到钢的组织结构和生产工艺过程。例如,铁素体钢和奥氏体钢都没有相变,因而不能用淬火的方法进行强化,也不能通过相变改变晶粒组织结构,而且在加热过程中晶粒往往容易粗大。了解一种钢的相图变化规律和特点,是制订好该种钢的生产工艺过程及规程的必要基础。

(6) 淬硬性。合金钢往往较碳素钢易于淬硬或淬裂。除钴以外,合金元素一般皆会使奥氏体转变曲线往右移,亦即延缓奥氏体向珠光体的转变,降低钢的临界淬火

速度,甚至如马氏体钢在常化的冷却速度下也可得到马氏体组织。这样使钢的硬度和强度增高,对于塑性较差的钢也就很容易产生冷却裂纹(冷裂或淬裂)。由于合金钢容易淬硬和冷裂,因而在生产过程中便时常采取缓冷、退火等工序,以消除应力及降低硬度,以便清理表面或进一步加工。

(7) 对某些缺陷的敏感性。某些合金钢比较倾向于产生某些缺陷,如过烧、过热、脱碳、淬裂、白点、碳化物不均等。这些缺陷在中碳钢和高碳钢中也都可能产生,只不过是某些合金钢由于合金元素的加入对于某些缺陷更为敏感,例如,不同成分及用不同方法冶炼的钢的过热敏感性也不相同。一般来说,钢中的合金元素多,可在不同程度上阻止钢的晶粒长大,尤其是铝、钛、铌、钒、锆等元素有强烈抑制晶粒长大的作用,故大多数合金钢较之于碳素钢的过热敏感性要小。但是,碳、锰、磷等元素由于能扩大奥氏体(γ)区,却往往有促使晶粒长大的趋势。又如钢的化学成分对脱碳的影响,首先表现在碳含量较高的钢,其脱碳倾向也较大;钢中含少量的铬有利于阻止脱碳,但硅、铝、锰、钨却起着促进脱碳的作用。所以,通常在硅钢片生产中能利用脱碳退火的方法来降低碳含量,而在生产弹簧钢 60Si2Mn 时却比 60Si2CrA 更加要注意防止脱碳。淬裂或冷裂是在冷却过程中因热应力而产生的由表面向中心发展的一种裂纹,而白点是分布在钢材内部的一种特殊形式的细微裂纹。只要钢材断面积较大,氢气就不容易扩散,而且冷却时各部分相变的时间也会不同,这必将导致较大的组织应力,容易形成白点。

以上只是简要论述了合金钢与碳素钢相比几点值得注意的主要钢种特性。实际上,每种钢的具体特性是各不相同的,在制订某种产品的生产工艺过程和规程时,就必须对它的钢种特性作详尽的调查研究,如果是文献资料或经验资料不够,还必须进行实验研究,以求得必要的工艺性能参数,作为制订生产工艺规程的依据。

碳素钢和合金钢的一般生产工艺过程如图 1-1 和图 1-2 所示。

(1) 碳素钢的生产工艺过程,一般可分为四个基本类型:

1) 采用连续铸坯的生产系统的工艺过程,其特点是不需要大的开坯机,无论是板钢或型钢,一般多是一次加热轧出成品。显然这是先进的生产工艺,现在已得到广泛的应用。

2) 采用铸锭的大型生产系统的工艺过程,其特点是必须有能力强大的初轧机;钢锭重量大的,一般采用热锭作业及二次或三次加热轧制的方式。

3) 采用铸锭的中型生产系统的工艺过程,其特点是一般采用 $\phi 650 \sim 900\text{mm}$ 二辊或三辊开坯机。这种系统不仅可用来生产碳素钢钢材,而且也常常用来生产合金钢钢材。

4) 采用铸锭的小型生产系统的工艺过程,其特点是通常在中、小轧机上用冷的小钢锭经一次加热轧制直接轧成成品。不管是哪一种类型,其基本工序是:原料准备(清理)—加热—轧制—冷却与精整清理。

(2) 合金钢的生产工艺过程,可分为冷锭和热锭以及正在发展的连续铸坯三种作业方式。由于按产品标准对合金钢成品钢材的表面质量和物理力学性能等技术要求