

# 铝及铝合金 轧制技术

LÜ JI LÜHEJIN ZHAZHI JISHU

胥福顺 陈德斌 岳有成 田怡 编著



冶金工业出版社  
www.cnmp.com.cn

# 铝及铝合金轧制技术

胥福顺 陈德斌 岳有成 田怡 编著

北京

冶金工业出版社

2019

## 内 容 提 要

全书分上、下篇,共14章,较为全面地介绍了铝及铝合金的生产过程,包括生产工艺、技术装备、日常维护、安全环保、常见质量问题分析与对策等。

本书可供从事铝及铝合金生产加工技术的工程技术人员、科研人员阅读,也可供大专院校相关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

铝及铝合金轧制技术/胥福顺等编著. —北京:冶金工业出版社, 2019. 1

ISBN 978-7-5024-7903-9

I. ①铝… II. ①胥… III. ①铝—轧制 ②铝合金—轧制 IV. ①TG339

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 235632 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 yjgbs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 彭子赫 版式设计 禹蕊

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7903-9

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2019年1月第1版,2019年1月第1次印刷

169mm×239mm;13印张;251千字;194页

58.00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 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)



# 前 言

---

铸造与轧制是铝及铝合金板带材生产流程中非常重要和关键的生产工序，通过轧制将铝及铝合金铸造组织转变为加工组织。铸造组织有着强烈的遗传性，对轧制工序的变形组织、表面质量以及板形状况有着强烈的影响。铝及铝合金的铸造与轧制工艺对最终产品的质量情况起着决定性的作用。因此，本书从铝及铝合金的合金配比、熔炼、铸造工艺控制以及轧制技术等关键工序着手，系统阐述了铝及铝合金铸造与轧制技术的影响因素及质量提升措施。

作者从事铝及铝合金生产及技术开发工作多年，将积累的非常丰富的生产经验以及收集到的国内外相关资料进行整理并编著成书。全书分为上、下篇，较为全面地介绍了铝及铝合金的生产过程，包括生产工艺、技术装备、日常维护、安全环保、常见质量问题分析与对策等。本书在内容上突出实用性，绝大部分数据与质量问题分析均来自作者的实际生产经验，内容丰富、翔实，对从事铝及铝合金生产加工技术及大中专院校教学将有很大的帮助。

本书上篇共5章，其中，胥福顺、陈德斌编写第1章、第2章、第3章，岳有成、田怡编写第4章、第5章；下篇共9章，陈德斌、谭国寅编写第6章、第8章，胥福顺、岳有成、田怡编写第7章、第9章、第10章，田怡、孙彦华编写第11章、第12章，陈德斌编写第13章，胥福顺、岳有成编写第14章；全书由田怡、邱哲生、孙彦华审校。

在本书的编写过程中，得到了云南省科学技术厅、云南铝业股份有限公司及其各分（子）公司的领导与专业技术人员支持。本书的出版，也感谢云南省科技计划项目（2016BA011、2018ZE014）的支持，在此一并表示感谢！

随着科技的进步，中国工业水平日渐提高，新技术、新装备的发展及应用日新月异，铝及铝合金轧制技术的发展突飞猛进，而我们的经验和水平有限，书中不妥之处，欢迎读者批评指正。

作 者

2018年7月

# 目 录

## 上篇 铝及铝合金铸轧

1 铝及铝合金基础知识 .....	3
1.1 铝及铝合金的特点及应用 .....	3
1.1.1 特点 .....	3
1.1.2 应用 .....	3
1.2 铝及铝合金分类 .....	4
1.2.1 铝及铝合金分类 .....	4
1.2.2 变形铝合金的分类 .....	4
1.3 变形铝及铝合金的牌号和化学成分 .....	4
1.3.1 国际四位数字体系牌号的划分 .....	4
1.3.2 变形铝合金产品状态及表示方法 .....	5
1.4 常见铝及铝合金 .....	6
1.4.1 1×××系工业纯铝 .....	6
1.4.2 3×××系铝合金 .....	9
1.4.3 5×××系铝合金 .....	11
1.4.4 8011 合金 .....	12
1.5 变形铝合金的加工 .....	13
1.5.1 常用的轧制方法 .....	13
1.5.2 常用的挤压方法 .....	13
1.5.3 主要的锻造方法 .....	13
1.5.4 常见铝加工术语 .....	13
2 铝及铝合金熔炼 .....	16
2.1 熔炼的目的及原理 .....	16
2.1.1 熔炼的目的 .....	16

2.1.2	熔炼过程中的物理化学作用 .....	16
2.1.3	夹杂的来源及减少夹杂的途径 .....	19
2.1.4	气体的存在形态及来源 .....	20
2.2	熔体净化的目的及原理 .....	21
2.2.1	铝熔体净化的目的 .....	21
2.2.2	熔体净化方法分类 .....	21
2.2.3	气体精炼法 .....	21
2.2.4	熔剂精炼法 .....	23
2.2.5	炉外连续精炼 .....	25
2.2.6	熔体的过滤 .....	27
2.3	熔炼和精炼操作技术 .....	28
2.3.1	铝液配制 .....	28
2.3.2	熔炼、精炼技术 .....	33
2.3.3	测氢 .....	36
2.4	熔炼及精炼设备 .....	37
2.4.1	熔炼炉和静置炉 .....	37
2.4.2	炉底感应式电磁搅拌器 .....	37
2.4.3	在线除气装置的维护保养及注意事项 .....	38
3	铝及铝合金铸轧 .....	41
3.1	铸轧理论 .....	41
3.1.1	铸轧基本原理 .....	41
3.1.2	铸轧工艺参数 .....	42
3.1.3	晶粒细化的主要途径 .....	45
3.2	铸轧工艺及操作技术 .....	47
3.2.1	换辊 .....	47
3.2.2	新辊的清洗和预热 .....	47
3.2.3	调节辊缝 .....	48
3.2.4	铸嘴的安装 .....	48
3.2.5	供流系统准备 .....	49
3.2.6	石墨喷涂准备 .....	50
3.2.7	除气箱的准备 .....	50
3.2.8	立板 .....	51
3.2.9	正常维护 .....	53

3.2.10	卸卷操作	54
3.2.11	停机操作	54
3.3	铸轧质量缺陷及控制	55
3.3.1	质量因素及控制要点	55
3.3.2	粗大晶粒和晶粒不均	55
3.3.3	板形缺陷	57
3.3.4	粘辊	61
3.3.5	热带	61
3.3.6	缺边和飞边	61
3.3.7	裂边	62
3.3.8	板面条纹	62
3.3.9	气道、孔洞	63
3.3.10	板面氧化膜	64
3.3.11	其他质量缺陷	64
3.4	铸轧设备	65
3.4.1	设备组成	65
3.4.2	设备点检及维护	65
3.4.3	铸轧辊	66
4	风水气	71
4.1	压缩空气	71
4.1.1	工艺流程	71
4.1.2	美国英格索兰空气压缩机	71
4.2	氮气	71
4.2.1	氮气的制取方法	71
4.2.2	变压吸附法制氮原理	72
4.2.3	FDA 空分制氮机工艺流程	72
4.2.4	氮气纯度控制	73
4.3	水处理	74
4.3.1	水处理的内容	74
4.3.2	水处理工艺过程	75
5	生产安全	76
5.1	熔炼工序	76
5.2	铸轧工序	76



## 下篇 板带轧制

6 铝及铝合金轧制理论 .....	81
6.1 轧制的基本原理 .....	81
6.1.1 简单轧制过程及变形参数 .....	81
6.1.2 轧制过程基本原理 .....	82
6.2 轧制时轧件的流动与变形 .....	89
6.2.1 影响轧件流动与变形的因素 .....	89
6.2.2 轧制过程中的纵向变形——前滑和后滑 .....	90
6.2.3 轧制过程中的横向变形——宽展 .....	92
7 板带材生产的板形控制与厚度控制 .....	94
7.1 板形与横向厚度精度控制 .....	94
7.1.1 辊型与辊缝形状 .....	94
7.1.2 板形与横向厚差 .....	95
7.1.3 板形与横向厚差的关系 .....	97
7.1.4 辊型的选择与配置 .....	98
7.1.5 辊型控制 .....	100
7.2 板带材纵向厚度控制 .....	101
7.2.1 影响板带材纵向厚度的因素 .....	101
7.2.2 轧机的弹性变形 .....	102
7.2.3 板厚控制原理 .....	106
8 板带材生产的基本工艺及相关设备 .....	107
8.1 板带材生产工艺流程 .....	107
8.2 冷轧工艺 .....	108
8.2.1 冷轧的特点 .....	108
8.2.2 冷轧机组成 .....	108
8.2.3 冷轧工艺 .....	110
8.2.4 铸轧坯料要求 .....	112
8.3 退火工艺 .....	113

8.3.1	退火炉的简介 .....	113
8.3.2	退火炉主要组成系统及功能 .....	113
8.3.3	板带材退火基础知识 .....	113
8.3.4	影响退火产品的质量因素 .....	116
8.3.5	操作注意事项 .....	118
8.4	横切工艺 .....	118
8.4.1	横切机列的概述、组成及技术参数 .....	118
8.4.2	矫直原理及板形调整 .....	122
8.4.3	横切工艺操作要点 .....	122
8.4.4	质量控制 .....	125
8.5	包装工艺 .....	127
8.5.1	包装要求 .....	128
8.5.2	包装方式 .....	128
8.5.3	标识 .....	131
9	板带材生产中的质量缺陷 .....	133
9.1	概述 .....	133
9.2	板带材主要缺陷的产生原因及预防措施 .....	133
9.2.1	几何尺寸 .....	133
9.2.2	板面质量 .....	135
9.2.3	板形质量 .....	138
9.2.4	外观质量 .....	139
9.2.5	组织性能 .....	139
10	轧制油及其使用 .....	141
10.1	轧辊冷却润滑系统的介绍 .....	141
10.1.1	轧辊冷却润滑系统简介 .....	141
10.1.2	轧制油的基本要求 .....	142
10.1.3	轧制油的作用 .....	142
10.1.4	轧制油的组成 .....	143
10.2	轧制油的过滤 .....	148
10.2.1	轧制油过滤的必要性 .....	148
10.2.2	轧制油的循环系统 .....	148

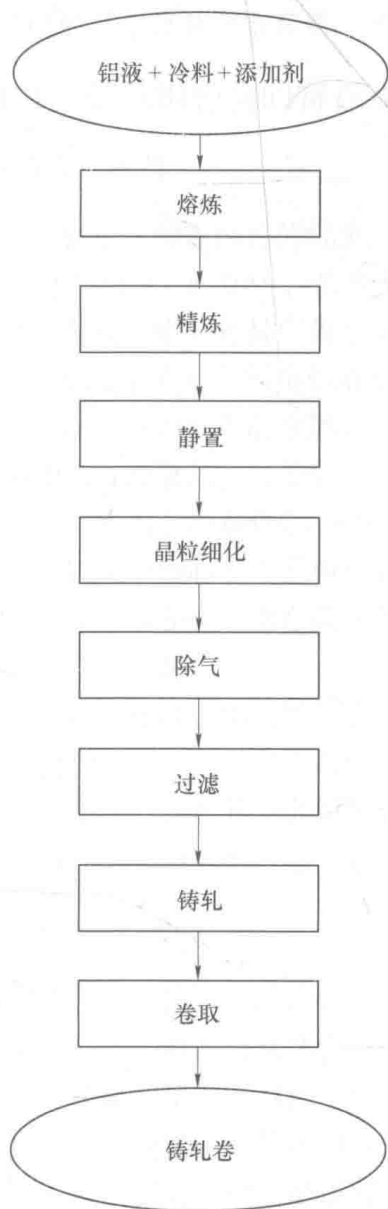
10.2.3	板式过滤器	148
10.2.4	过滤原理	149
10.3	日常生产中轧制油的管理	150
10.3.1	添加剂的品种与加入量	150
10.3.2	轧制油的检测	151
10.3.3	防止机械油泄漏	151
10.3.4	防止轧制油老化	151
<b>11</b>	<b>冷轧 CO<sub>2</sub> 灭火系统的设计原理及操作规程</b>	<b>152</b>
11.1	概述	152
11.2	灭火系统原理	152
11.2.1	CO <sub>2</sub> 灭火系统的灭火范围和操作方式	152
11.2.2	CO <sub>2</sub> 灭火系统各部分组成及工作原理	153
11.2.3	系统设置	155
11.3	操作方法	156
11.3.1	自动灭火	156
11.3.2	电气手动(手操电动)灭火	158
11.3.3	手动灭火	159
11.3.4	注意事项	160
11.4	日常维护与保养	160
11.4.1	日常管理	160
11.4.2	半年检查	161
11.4.3	年度检查	161
11.4.4	安全膜片的更换方法	161
11.5	手提式 CO <sub>2</sub> 灭火器和手推式干粉灭火器的使用	162
11.5.1	手提式 CO <sub>2</sub> 灭火器	162
11.5.2	手推式干粉灭火器	163
<b>12</b>	<b>冷轧辊的管理、使用与磨削技术</b>	<b>164</b>
12.1	冷轧辊的管理、使用与故障预防	164
12.1.1	轧辊管理	164
12.1.2	轧辊使用	164
12.1.3	事故预防	165

12.2 冷轧机工作辊的磨削技术 .....	172
12.2.1 M84100B 磨床的基本参数 .....	172
12.2.2 操作方法及磨削工艺选择 .....	173
12.2.3 轧辊表面缺陷的主要形式及产生原因 .....	175
12.2.4 总结 .....	176
<b>13 CVC 冷轧技术 .....</b>	<b>178</b>
13.1 CVC 技术的关键 .....	178
13.2 CVC6-HS 冷轧机控制手段 .....	180
13.2.1 CVC 辊窜动 .....	180
13.2.2 CVC 曲线方程的选定 .....	182
13.2.3 弯辊系统 .....	182
13.2.4 轧制油系统 .....	183
13.3 CVC6-HS 冷轧机板形控制策略 .....	183
<b>14 铝及铝合金中厚板缺陷分类与检验 .....</b>	<b>185</b>
14.1 铝及铝合金中厚板的缺陷分类 .....	185
14.1.1 铝及铝合金中厚板的尺寸精度和形状缺陷 .....	185
14.1.2 铝及铝合金中厚板表面缺陷 .....	186
14.1.3 铝及铝合金中厚板内部缺陷 .....	189
14.2 铝及铝合金中厚板材的检验方法 .....	190
<b>附录 加工常用词语英汉对照 .....</b>	<b>191</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>194</b>

# 上篇

## 铝及铝合金铸轧

铸轧工艺流程图





# 1 铝及铝合金基础知识

随着科学技术的飞速发展,铝及铝合金得到了极为广泛的应用,工业、农业、医药、航空、航天、国防乃至人们的日常生活,无不广泛地应用铝及铝合金。铝及铝合金之所以得到广泛的应用,除了铝蕴藏量丰富、冶炼较简单外,更重要的是铝及其合金有着一系列的优良特性。

## 1.1 铝及铝合金的特点及应用

### 1.1.1 特点

铝是一种银白色的轻金属,在自然界中的分布极为广泛,蕴藏量占地壳总质量的7.45%~8.20%,是铁蕴藏量的一倍多,比其他有色金属蕴藏量的总和还多,是地壳中分布最广的金属元素。

铝具有良好的导电性和导热性,仅次于银和铜。

铝是比较活泼的金属,在空气中极易氧化,生成致密而坚固的氧化膜,可以防止铝继续氧化,对于处在固态和液态的铝均有良好的保护作用。

铝的熔点为660℃,沸点为2467℃,密度为2.7g/cm<sup>3</sup>。

铝属于面心立方晶格结构,可塑性好,能进行各种形式的压力加工。

无低温脆性。铝在摄氏零度以下,随着温度的降低,强度和塑性不仅不会降低,反而提高。

反射性强。铝的抛光表面对白光的反射率达80%以上,纯度越高,反射率越高。同时,铝对红外线、紫外线、电磁波、热辐射等都有良好的反射性能。

美观。铝及其合金经机加工后可达到很高的光洁度和光亮度。经阳极氧化和着色,可获得五颜六色、光彩夺目的制品。

### 1.1.2 应用

由于纯铝的强度较低,一般不做结构材料使用。如果在铝中加入其他元素制成铝合金,可以提高其力学性能,某些铝合金的比强度可以与钢相媲美,其比刚度甚至超过了钢。因此,铝及铝合金在交通运输、化工、机械、电力、仪表、建筑、农业及轻工业领域中得到了广泛的应用。在航空、航天及许多国防工业部门中,铝及铝合金更是必不可少的材料。

## 1.2 铝及铝合金分类

### 1.2.1 铝及铝合金分类

纯金属的特点是强度和硬度较低，塑性较高，导电性和导热性好，并且电阻温度系数大。但纯金属的性能“单纯”，不够多样化，用途受到限制。因此，人们将纯金属制成合金，以满足更广泛的要求。以铝为基础（铝质量分数大于50%）加入一种或几种其他元素，使之熔合在一起，构成一种新的金属组成物，称之为铝合金。

铝合金内所添加的金属元素，因合金的用途不同而异，一般来说加入的合金元素有铜、镁、锌、锰、铬、镍、钒、钛等，铁和硅作为杂质加入，但有时也作为合金元素加入，如 $4 \times \times \times$ 系 Al-Si 合金中的硅。

按生产方法的不同，铝合金可分为铸造铝合金和变形铝合金两大类。铸造铝合金合金元素的含量高一些，具有较多的共晶体，有较好的铸造性能，但塑性低，不宜进行压力加工而用于铸造零件；变形铝合金塑性较好，可用压力加工方法制成各种形式的半成品。

### 1.2.2 变形铝合金的分类

变形铝合金的分类方法很多。目前，世界上绝大部分国家通常按以下三种方法进行分类：

(1) 按合金状态图及热处理特点分为可热处理强化铝合金和不可热处理强化铝合金两大类。不可热处理强化铝合金如：纯铝、Al-Mn、Al-Mg、Al-Si 系合金。可热处理强化铝合金如：Al-Mg-Si、Al-Cu 系合金。

(2) 按合金性能和用途可分为：工业纯铝、防锈铝、硬铝、超硬铝、锻铝、特殊铝等。

(3) 按合金中所含主要元素成分可分为： $1 \times \times \times$ 系（纯铝）、 $2 \times \times \times$ 系（Cu）、 $3 \times \times \times$ 系（Mn）、 $4 \times \times \times$ 系（Si）、 $5 \times \times \times$ 系（Mg）、 $6 \times \times \times$ 系（Mg、Si）、 $7 \times \times \times$ 系（Zn）、 $8 \times \times \times$ 系（其他元素）及 $9 \times \times \times$ 系（备用合金组）。

## 1.3 变形铝及铝合金的牌号和化学成分

### 1.3.1 国际四位数体系牌号的划分

国际四位数体系牌号的第一位数字表示组别，如下所示：

工业纯铝（铝含量不小于99.00%）  $1 \times \times \times$

合金组别按下列主要合金元素划分：

Cu  $2 \times \times \times$



Mn	3 × × ×
Si	4 × × ×
Mg	5 × × ×
Mg + Si	6 × × ×
Zn	7 × × ×
其他元素	8 × × ×
备用组	9 × × ×

### 1.3.1.1 1 × × × 牌号系列

1 × × × 组表示工业纯铝（铝含量不小于 99.00%），其最后两位数字表示最低铝百分含量中小数点后面的两位。

牌号的第 2 位数字表示合金元素或杂质极限含量的控制情况：如果第 2 位为 0，则表示其杂质极限含量无特殊控制；如果是 1~9，则表示对一项或一项以上的单个杂质或合金元素极限含量有特殊控制。

### 1.3.1.2 2 × × × ~ 8 × × × 牌号系列

2 × × × ~ 8 × × × 牌号中的最后两位数字没有特殊意义，仅用来区分同一组中不同的铝合金。第 2 位表示改型情况，如果第 2 位为 0，则表示为原始合金；如果是 1~9，则表示为改型合金。

## 1.3.2 变形铝合金产品状态及表示方法

### 1.3.2.1 基础状态代号

变形铝及铝合金的基础状态分为 5 种，见表 1-1。

表 1-1 基础状态代号、名称、说明与应用

代号	名 称	说明及应用
F	自由加工状态	适用于在成型过程中，对于加工硬化和热处理条件无特殊要求的产品，该状态产品的力学性能不作规定
O	退火状态	适用于经完全退火获得最低强度的加工产品
H	加工硬化状态	适用于通过加工硬化提高强度的产品
W	固溶热处理状态	适用于经固溶热处理后，在室温下自然时效的一种不稳定状态，该状态不作为产品交货状态，仅表示产品处于自然时效阶段
T	不同于 F、O、H 状态的热处理状态	适用于固溶热处理后，经过（或不经过）加工硬化达到稳定状态的产品