

现代铝加工生产技术丛书

主编 赵世庆 周江

铝合金热轧及热连轧技术

LÜHEJIN REZHA JI RELIANZHA JISHU

赵世庆 王华春 郭金龙 潘 祯 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

现代铝加工生产技术丛书

主编 赵世庆 周 江

铝 合 金 热 轧 及 热连轧技术

赵世庆 王华春 郭金龙 潘 楦 编著

北 京

冶金工业出版社

2010

内 容 简 介

本书是《现代铝加工生产技术丛书》之一,详细介绍和论述了铝及铝合金热轧及热连轧的工作原理,分类与特点,生产工艺、技术、设备及产品质量控制等。全书共分5章,内容包括:概论、热轧原理、热轧设备、铝及铝合金热轧工艺、铝合金热轧产品的质量控制等。本书在内容组织和结构安排上,力求理论联系实际,突出实用性、先进性和行业特色,为读者提供一本实用的技术著作。

本书是铝加工生产企业工程技术人员和管理人员必备的技术读物,也可供从事有色金属材料与加工的科研、设计、教学、生产和应用等方面的技术人员与管理人员使用,同时可作为大专院校有关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

铝合金热轧及热连轧技术/赵世庆等编著. —北京:
冶金工业出版社,2010.6

(现代铝加工生产技术丛书)

ISBN 978-7-5024-5274-2

I. ① 铝… II. ① 赵… III. ① 铝合金—热轧—生产
工艺 IV. ① TG3

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第085048号

出 版 人 曹胜利

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 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 张登科 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 栾雅谦 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5274-2

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2010年6月第1版;2010年6月第1次印刷

148mm×210mm;8.625印张;252千字;259页

30.00元

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(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

《现代铝加工生产技术丛书》

编辑委员会

主 编	赵世庆	周 江		
常务副主编	谢水生	刘静安		
副 主 编	吕新宇	尹晓辉	李建荣	熊柏青
	杨焕文	吴小源	李学朝	
编 委	(按姓氏笔画排列)			
	马英义	王华春	尹晓辉	方清万
	王德满	田 树	左宏卿	李 迅
	李 响	李学朝	李建荣	李念奎
	李建湘	刘 庆	刘玉珍	刘志铭
	刘静安	朱 毅	闫维刚	吕新宇
	何 峰	吴小源	陈昌云	陈思仁
	杨志兵	杨焕文	张宏伟	张登科
	宋晓辉	苏堪祥	周 江	单长智
	范生艳	武红林	周学博	钟 利
	侯 绎	侯 波	姜文举	赵世庆
	郭金龙	贺金宇	段瑞芬	凌 杲
	聂 波	唐 剑	黄 凯	黄国杰
	谢水生	谢延翠	谭学余	熊柏青
	樊建中	魏长传		

《现代铝加工生产技术丛书》

主要参编单位

西南铝业(集团)有限责任公司

东北轻合金有限责任公司

中国铝业股份有限公司西北铝加工分公司

北京有色金属研究总院

广东凤铝铝业有限公司

广东中山市金胜铝业有限公司

上海瑞尔实业有限公司

《丛书》前言

节约资源、节省能源、改善环境越来越成为人类生活与社会持续发展的必要条件，人们正竭力开辟新途径，寻求新的发展方向 and 有效的发展模式。轻量化显然是有效的发展途径之一，其中铝合金是轻量化首选的金属材料。因此，进入 21 世纪以来，世界铝及铝加工业获得了迅猛的发展，铝及铝加工技术也进入了一个崭新的发展时期，同时我国的铝及铝加工产业也掀起了第三次发展高潮。2007 年，世界原铝产量达 3880 万 t（其中：废铝产量 1700 万 t），铝消费总量达 4275 万 t，创历史新高；铝加工材年产量达 3200 万 t，仍以 5%~6% 的年增长率递增；我国原铝年产量已达 1260 万 t（其中：废铝产量 250 万 t），连续五年位居世界首位；铝加工材年产量达 1176 万 t，一举超过美国成为世界铝加工材产量最大的国家。与此同时，我国铝加工材的出口量也大幅增加，我国已真正成为世界铝业大国、铝加工业大国。但是，我们应清楚地看到，我国铝加工材在品种、质量以及综合经济技术指标等方面还相对落后，生产装备也不甚先进，与国际先进水平仍有一定差距。

为了促进我国铝及铝加工技术的发展，努力赶超世界先进水平，向铝业强国和铝加工强国迈进，还有很多工作要做：其中一项最重要的工作就是总结我国长期以来在铝加工方面的生产经验和科研成果；普及和推广先进铝加工技术；提出我国进一步发展铝加工的规划与方向。

几年前，中国有色金属学会合金加工学术委员会与冶金工业出版社合作，组织国内 20 多家主要的铝加工企业、科研院所、大专院校的百余名专家、学者和工程技术人员编写出版了大型工具书——《铝加工技术实用手册》，该书出版后受到广大读者，特别是铝加工企业工程技术人员的好评，对我国铝加工业的发展起到一定的促进作用。但由于铝加工工业及技术涉及面广，内容十分

丰富,《铝加工技术实用手册》因篇幅所限,有些具体工艺还不尽深入。因此,有读者反映,能有一套针对性和实用性更强的生产技术类《丛书》与之配套,相辅相成,互相补充,将能更好地满足读者的需要。为此,中国有色金属学会合金加工学术委员会与冶金工业出版社计划在“十一五”期间,组织国内铝加工行业的专家、学者和工程技术人员编写出版《现代铝加工生产技术丛书》(简称《丛书》),以满足读者更广泛的需求。《丛书》要求突出实用性、先进性、新颖性和可读性。

《丛书》第一次编写工作会议于2006年8月20日在北戴河召开。会议由中国有色金属学会合金加工学术委员会主任谢水生主持,参加会议的单位有:西南铝业(集团)有限责任公司、东北轻合金有限责任公司、中国铝业股份有限公司西北铝加工分公司、北京有色金属研究总院、广东凤铝铝业有限公司、华北铝业有限公司的代表。会议成立了《丛书》编写筹备委员会,并讨论了《丛书》编写和出版工作。2006年年底确定了《丛书》的编写分工。

第一次《丛书》编写工作会议以后,各有关单位领导十分重视《丛书》的编写工作,分别召开了本单位的编写工作会议,将编写工作落实到具体的作者,并都拟定了编写大纲和目录。中国有色金属学会的领导也十分重视《丛书》的编写工作,将《丛书》的编写出版工作列入学会的2007~2008年工作计划。

为了进一步促进《丛书》的编写和协调编写工作,编委会于2007年4月12日在北京召开了第二次《丛书》编写工作会议。参加会议的有来自西南铝业(集团)有限责任公司、东北轻合金有限责任公司、中国铝业股份有限公司西北铝加工分公司、北京有色金属研究总院、广东凤铝铝业有限公司、上海瑞尔实业有限公司、广东中山市金胜铝业有限公司、华北铝业有限公司和冶金工业出版社的代表21位同志。会议进一步修订了《丛书》各册的编写大纲和目录,落实和协调了各册的编写工作和进度,交流了编写经验。

为了做好《丛书》的出版工作,2008年5月5日在北京召开了第三次《丛书》编写工作会议。参加会议的单位有:西南铝业(集团)有限责任公司、东北轻合金有限责任公司、中国铝业股份有限公司西北铝加工分公司、北京有色金属研究总院、广东凤铝铝业有限公司、广东中山市金胜铝业有限公司、上海瑞尔实业有限公司和冶金工业出版社,会议代表共18位同志。会议通报了编写情况,协调了编写进度,落实了各分册交稿和出版计划。

《丛书》因各分册由不同单位承担,有的分册是合作编写,编写进度有快有慢。因此,《丛书》的编写和出版工作是统一规划,分步实施,陆续尽快出版。

由于《丛书》组织和编写工作量大,作者多和时间紧,在编写和出版过程中,可能会有不妥之处,恳请广大读者批评指正,并提出宝贵意见。

另外,《丛书》编写和出版持续时间较长,在编写和出版过程中,参编人员有所变化,敬请读者见谅。

《现代铝加工生产技术丛书》编委会
2008年6月

前 言

热轧是变形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，通过热轧将铸造组织转变为加工组织。热轧不但为冷轧工序提供坯料，而且还能直接轧制成品厚板。热轧的组织、表面质量和板形状况对后部工序有着强烈的遗传性，甚至对最终产品的质量状况起着决定性作用。

热轧水平决定了一个企业生产优质铝及铝合金板带材的水平，我国在近几年通过从国外引进和自己设计制造等方式投入了多条热连轧生产线，较快提高了我国热轧装机水平和热轧板坯的质量水平。但从总体上来看，我国铝及铝合金热轧和热连轧生产技术与国际先进水平仍有一定差距。因此，在中国有色金属学会合金加工学术委员会与冶金工业出版社的组织下，作者参阅了国内外有关热轧和热连轧生产技术方面的大量文献资料，并到国内外许多热轧和热连轧生产线观摩学习，同时结合作者本人长期在生产一线的实践经验和科研成果，编写了本书，以期对我国铝及铝合金热轧和热连轧生产技术的发展有所帮助。

本书是《现代铝加工生产技术丛书》之一，详细介绍和论述了铝及铝合金热轧及热连轧的工作原理、分类与特点，生产工艺、技术、设备及产品质量控制等。全书共分5章，内容包括：概论、热轧原理、热轧设备、铝及铝合金热轧工艺、铝合金热轧产品的质量控制在。本书在内容组织和结构安排上，力求理论联系实际，突出实用性、先进性和行业特色，为读者提供一本实用的技术著作。

本书是铝加工生产企业工程技术人员和管理人员必备的技术读物,也可供从事有色金属材料与加工的科研、设计、教学、生产和应用等方面的技术人员与管理人员使用,同时可作为大专院校有关专业师生的参考书。

本书第1章由赵世庆编写,第2章由郭金龙编写,第3章由潘祯、郭金龙编写,第4、5章由王华春编写。全书由刘静安教授、谢水生教授审定。

本书在编写过程中,邓运来、罗建军、叶陶勇等同志做了大量工作,同时得到不少专家和工人师傅的指导,并参阅了国内外有关专家、学者的一些文献资料和一些生产实例、图表和数据等,在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作 者
2010年4月

目 录

1 概论	1
1.1 铝及铝合金热轧的特点	2
1.1.1 铝及铝合金热轧方法及分类	2
1.1.2 铝及铝合金热轧组织与性能变化	3
1.2 铝及铝合金热轧主要产品及常用合金	5
1.2.1 铝及铝合金热轧产品的品种与规格	5
1.2.2 铝及铝合金热轧用典型合金性能	7
1.3 铝及铝合金热轧技术的发展概况与趋势	9
1.3.1 世界铝热轧技术的发展概况与趋势	9
1.3.2 我国铝热轧技术的发展概况与趋势	20
2 热轧原理	26
2.1 平辊轧制理论知识	26
2.1.1 轧制过程与变形参数	26
2.1.2 轧制时的金属流动与变形	32
2.2 轧制压力和轧制力矩	40
2.2.1 概述	40
2.2.2 单位轧制压力的计算	40
2.2.3 轧制力矩	41
2.2.4 轧机主电机功率计算	43
2.3 平辊轧制过程的控制	44
2.3.1 轧制的弹塑曲线及板厚纵向控制	44
2.3.2 板材横向厚差与板形控制	53
3 热轧设备	62
3.1 概述	62
3.2 辅助设备	62

3.2.1	铣床	62
3.2.2	加热(均热)炉	65
3.2.3	轧辊磨床	69
3.3	热轧主机	72
3.3.1	概述	72
3.3.2	铝热连轧主体设备的组成	73
3.3.3	铝热连轧辅助设备	86
3.3.4	国内外典型热轧设备技术参数	89
4	铝及铝合金热轧工艺	95
4.1	铝及铝合金热轧坯料的准备与质量要求	95
4.1.1	铸锭的制备与质量要求	95
4.1.2	热轧前铸锭表面处理	97
4.2	热轧工艺	106
4.2.1	轧制方式与特点	106
4.2.2	影响轧制的几个重要因素	107
4.2.3	铝热连轧技术	160
4.2.4	常规热轧工艺的制定	168
5	铝合金热轧产品的质量控制	186
5.1	厚度控制	186
5.1.1	热粗轧厚度控制系统	186
5.1.2	热精轧厚度控制系统	190
5.2	板形与凸度控制	195
5.2.1	板形板凸度调控手段和方法	196
5.2.2	板形和凸度控制系统与控制模式	202
5.2.3	板形和凸度控制技术的发展方向	204
5.3	温度控制	205
5.3.1	炉前测温与控制	206
5.3.2	厚剪前测温与控制	206
5.3.3	薄剪前测温与控制	206

5.3.4 连轧机出口测温与控制	206
5.3.5 卷材测温与控制	211
5.4 乳液控制	211
5.4.1 工作辊冷却与辊型控制	211
5.4.2 工作辊咬入润滑	213
5.4.3 轧制中的工艺润滑	215
5.5 热轧常见缺陷与控制	222
5.5.1 尺寸缺陷与控制	222
5.5.2 板形缺陷与控制	224
5.5.3 组织性能缺陷与控制	225
5.5.4 表面缺陷与控制	225
5.5.5 其他缺陷与控制	229
5.5.6 剪切质量控制	231
附录	236
1. 变形铝及铝合金化学成分表	236
2. 国内主要的铝合金热轧生产线	252
3. 世界 10 大铝板带热连轧生产线	254
4. 四台世界大型热连轧主机设备技术参数简介	254
参考文献	259

1 概 论

铝元素在地壳中的含量仅次于氧和硅,居第三位,是地壳中含量最丰富的金属元素之一。在金属材料中,仅次于钢铁,为第二大类金属。铝及铝合金板带材具有质轻、比强度高、耐蚀、可焊、易加工、表面美观等优点而被广泛应用于国民经济的各行业,特别是航空航天、包装印刷、建筑装饰、电子家电、交通运输等领域。

第二次世界大战以后,铝材的应用从军事工业转向民用工业,继而进入人民生活的各个方面,成了发展科学技术和国民经济与提高人民物质生活、文化生活的重要基础材料。社会需求迅速增长,应用领域不断拓宽。在两次世界大战中,铝材作为重要的军事战略物质,主要用来制造飞机、舰艇、坦克、战车、火箭、导弹等军需品,几乎占去了铝材总量的70%以上。1950年以后,军品铝材急剧下降到20%以下,而民用铝材,如电气、电子、机械制造和日用消费品工业等用铝材的份量明显增加。20世纪60年代是建筑业迅速发展的年代,建筑用铝材占耗铝总量的25%以上,其他民用工业用铝材仍在增加,而军用铝材比例则不断下降。20世纪70年代后,随着全铝易拉罐和软包装业的兴起,极大地促进了铝合金板带生产技术的快速发展和铝合金板带产能、产量的大幅度增长,使容器包装用铝材占耗铝总量的20%以上。而到20世纪80年代末、90年代初,由于铁道车辆的高速化,客、货列车与汽车的轻量化,使铝材在交通运输上用量达到耗铝总量的30%以上。

目前,全世界的铝消费量(原铝+再生铝)已超过4000万t,而铝材的消费量达3000万t以上,其中用于交通运输(包括铁道车辆、汽车、摩托车、自行车、舰艇船舶以及集装箱、桥梁等)的铝材约占36%左右,用于建筑工业的铝材约占20%左右,用于包装工业的铝材约占20%左右,而用于军需工业的铝材已经下降到3%以下。铝板带世界平均消费量占铝材消费总量的约56%,美国铝板带消费量最高达66%、日本达47%,然而中国只有世界平均水平的1/3,可见差距十分

明显。其原因主要之一是国内铝板带供坯结构、坯料质量等与国外相比存在很大差距,表现在热轧装备和生产技术水平落后,直接影响了国内铝板带高质量高效率的生产。

1.1 铝及铝合金热轧的特点

热轧是指在金属再结晶温度以上进行的轧制。热轧充分利用了金属的高温特性,能有效改善金属及其合金的组织结构和加工性能,且生产规模大、生产效率高,特别适合采用大铸锭生产高质量冷轧坯料。热轧过程由于在再结晶温度以上,轧制变形过程中金属加工硬化和回复同时进行,金属随变形程度的增加会有一定的加工硬化。但在热轧范围内,回复过程起主要作用,金属的再结晶通常不完全,其合金组织主要显现为再结晶组织并同时存在变形组织。热轧加工硬化不明显、塑性较高、变形抗力较低,金属能承受大的变形量且能耗少。

铝及铝合金热轧主要具有以下特点:

(1) 铝及铝合金热轧能耗低,热轧金属塑性加工性能良好,变形抗力低,加工硬化不明显,易进行轧制,大大减少了金属变形所需的能耗;

(2) 热轧通常采用大铸锭、大压下量轧制,生产节奏快,产量大,这样为规模化大生产创造了条件;

(3) 普通热轧产品由于精轧温度控制不稳定导致性能存在一定的差异,性能精确控制难度大;现代化热连轧道次分配、压下量和温度精准控制(不大于 $\pm 8^{\circ}\text{C}$)对热轧产品性能稳定性有很大提高;

(4) 普通热轧由于检测和控制手段限制,而热轧产品厚度尺寸精确控制又较困难,其产品厚度尺寸偏差较大;现代化的热连轧机采用多种 AGC 控制和多级协调补偿控制,热轧产品尺寸精度大幅提升,厚度偏差不大于 $\pm 0.7\%$,凸度偏差不大于 $\pm 0.2\%$ 。

1.1.1 铝及铝合金热轧方法及分类

铝及铝合金热轧按产品形态分为块片式热轧和卷式热轧。块片式热轧又可分为二辊热轧和四辊热轧两种,四辊热轧机有专门为生产航空材料的专用热轧线。首条厚板专用热轧线如美国铝业公司达文波特轧制厂的 5580 mm 轧制线,这是全球最大的航空板带与中厚板厂,在

可预见的未来时期,世界也不会再建第二条这么大规格的热轧生产线;另外有我国西南铝业(集团)有限责任公司的 4300 mm 厚板生产线和东北轻合金有限责任公司在建的 3950 mm 厚板生产线。铝铸锭热轧法是生产加工铝合金厚板与航空级铝合金板坯的唯一工艺,即使在民用铝板带占绝对优势的今天,中厚板和冷轧用热轧板坯的产量仍占铝及铝合金板带材总消费量的 63.5% ~ 65%。

卷式热轧按轧辊数量分为两辊式热轧和四辊式热轧;按卷取方式又可以分为:“二人转”热轧、二辊热轧、单卷取热轧和双卷取热轧;按机架数量又可以分为单机架热轧、热粗轧 + 热精热轧(即:1 + 1)和热粗轧 + 热连热轧(即:1 + 3、1 + 4、1 + 5 等)。

单卷取热轧于最后一道次卷取,如东北轻合金有限责任公司的 2000 mm 四辊可逆式热轧生产线,双卷取热轧如美铝昆山铝业有限公司的 1650 mm 四辊可逆式热轧生产线。二辊可逆式热轧一般都用于生产普通 $1 \times \times \times$ 、 $3 \times \times \times$ 、部分 $8 \times \times \times$ 及个别 $5 \times \times \times$ 系软合金板、带材。四辊可逆式单机架热轧生产线的产品有两种,一种专业化程度较高,产品专一,轧制几种软合金产品,如巨科铝业有限公司的 1850 mm 可逆式热轧生产线;另一种是万能式的,用于生产所有的变形铝合金。

现代化高精尖铝热轧卷产品生产主要用热粗轧 + 热连轧方式生产,目前在热轧卷生产方面正逐渐取代老式热轧生产线。

1.1.2 铝及铝合金热轧组织与性能变化

1.1.2.1 热变形对铸态组织的改善

铝合金在高温下塑性高、抗力小,加之原子扩散过程加剧,伴随有完全再结晶,有利于组织的改善。在三向压缩应力状态占优势的情况下,热变形能最有效地改变铝及铝合金的铸态组织,给予适当的变形量,可以使铸态组织发生下述有利的变化:

一般热变形是通过多道次的反复变形来完成的。由于在每一道次中硬化和软化过程是同时发生的,变形破碎了粗大的柱状晶粒,反复的变形,使材料的组织成为较均匀细小的等轴晶粒,同时,还能使某些微小的裂纹得以愈合。

由于应力状态中静水压力的作用,可促进铸态组织中存在的气泡焊合,缩孔压实,疏松压密,变为较致密的组织结构。

由于高温原子热运动能力加强,在应力作用下,借助原子的自由扩散和异扩散,有利于铸锭化学成分的不均匀性相对地减少。

通过热变形,铸锭组织改变成了变形组织(或加工组织),并具有较高的密度、均匀细小的等轴晶粒及比较均匀的化学成分,因而塑性和强度指标都有明显的提高。

铝及铝合金的铸态组织与热轧组织如图 1-1 所示。

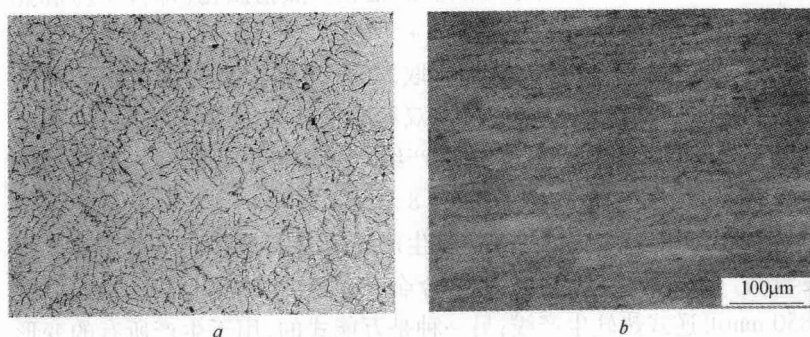


图 1-1 铸态组织与热轧组织

a—铸态组织;b—热轧组织

1.1.2.2 热变形制品晶粒度的控制

热变形后制品晶粒度的大小,取决于变形程度和变形温度(主要是加工终了温度)。在完全软化的温度范围内加工铝及铝合金材料时,为了获得均匀细小的晶粒,每道次的变形量应大于临界变形程度。通常每道次的变形量应大于 10%,如 2024 合金的临界变形程度,在变形速度大时(如冲击变形时),为 2%~8%,在变形速度小时(如在液压机上模锻或挤压时),应大于 10%。

1.1.2.3 热变形时的纤维组织

在热变形过程中,金属内部的晶粒、杂质和第二相及各种缺陷将沿最大延伸主变形方向被拉长、拉细,而形成纤维方向的强度高于材料其他方向的强度,材料表现出不同程度的各向异性。此外,热变形时也可