

现代铝加工生产技术丛书

主编 赵世庆 钟利

铝合金熔炼与铸造技术

LÜHEJIN RONGLIAN YU ZHUZAO JISHU

唐剑 王德满 刘静安 苏堪祥 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

国家“十二五”重点图书出版项目

主编 王德成 副主编

铝合金熔炼与铸造技术

ALUMINUM MELTING AND CASTING TECHNOLOGY

王德成 王德成 王德成 王德成 王德成

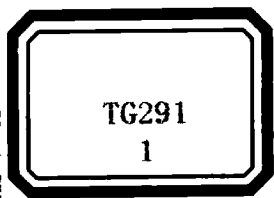


冶金工业出版社

北京



现代
主编



丛书
刊

铝合金熔炼与铸造技术

唐 剑 王德满 刘静安 苏堪祥 编著

北 京

冶金工业出版社

2009

内 容 简 介

本书是《现代铝加工生产技术丛书》之一，详细介绍了铝合金熔炼与铸造技术、工艺与设备等。全书共分9章，内容包括：绪论、中间合金的制备技术、铝合金的熔炼技术、铝合金的熔体净化、铸造工具的设计与制造、铝及铝合金的铸造、铝及铝合金铸锭均匀化与加工、铝合金铸锭的质量检验及缺陷分析、铝合金熔铸设备等。在内容组织和结构安排上，力求理论联系实际，切合生产实际需要，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

铝合金熔炼与铸造技术/唐剑等编著. —北京: 冶金工业出版社, 2009. 4

(现代铝加工生产技术丛书)

ISBN 978-7-5024-4836-3

I. 铝… II. 唐… III. ①铝合金—熔炼 ②铝合金—铸造 IV. TG291

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 028436 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 王楠 美术编辑 李心 版式设计 张青

责任校对 栾雅谦 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4836-3

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2009 年 4 月第 1 版, 2009 年 4 月第 1 次印刷

148mm × 210mm; 9.625 印张; 282 千字; 286 页; 1-3000 册

32.00 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	钟 利		
常务副主编	谢水生	刘静安		
副 主 编	尹晓辉	吕新宇	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可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），连续五年位居世界榜首；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、华北铝业有限责任公司的代表。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、华北铝业有限责任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。

《现代铝加工生产技术丛书》编委会

2008年6月

前 言

熔炼与铸造是变形铝合金材料制备与加工的第一道工序，也是控制铝合金材料冶金质量的关键工序，而且熔铸缺陷在后续加工中具有遗传性，对产品的终身质量都有影响，因此，提高锭坯的质量对提高产品的质量有着极其重要的意义。

为了高速、优质、低成本、高效益生产变形铝合金的锭坯，各国政府、企业界、学术界均投入了大量人力、物力和财力开展了研发工作，并取得了许多可喜成果，如先进熔体净化技术、晶粒细化技术、LHC 低液位铸造技术等。我国也做了大量工作，在熔体净化、晶粒细化、电磁搅拌、蓄热节能喷嘴、可调铸造工具等方面也有所突破。但从总体来看，我国在铝合金熔炼与铸造技术方面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铝合金熔炼与铸造方面的先进技术，并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，以期对我国铝合金熔炼与铸造技术、工艺和设备的发展有所裨益。

本书详细介绍了铝合金熔炼与铸造技术、工艺与设备等，全书共分9章，内容包括：绪论、中间合金的制备技术、铝合金的熔炼技术、铝合金的熔体净化、铸造工具的设计与制造、铝及铝合金的铸造、铝及铝合金铸锭均匀化与加工、铝合金铸锭的质量检验及缺陷分析、铝合金熔铸设备等。在内容组织和结构安排上，力求理论联系实际，切合生产实际需要，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4~7章和第9章由唐剑编写，第2、3章由王德满、苏堪祥编写，第1章和第8章由刘静安编写。全书由刘静安教授和谢水生教授审定。

本书在编写过程中，严文锋、牟大强、杨荣东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企业的生产实例、图表和数据等，在此一并表示衷心的感谢。

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
2008年12月

目 录

1 绪论	1
1.1 铝的基本特性与应用范围	1
1.2 铝合金的分类、成分、组织与性能	4
1.2.1 铝合金的分类	4
1.2.2 铝合金的化学成分	6
1.3 铝合金的主要相组成	6
1.4 合金元素及微量元素在铝合金中的作用	9
1.4.1 铜元素	9
1.4.2 硅元素	9
1.4.3 镁元素	10
1.4.4 锰元素	10
1.4.5 锌元素	10
1.4.6 微量元素和杂质的影响	11
1.5 变形铝合金制品对锭坯的要求	14
1.5.1 对化学成分的要求	14
1.5.2 对冶金质量的要求	14
1.5.3 对铸锭组织的要求	15
1.5.4 对铸锭几何尺寸和表面质量要求	15
1.6 现代铝合金熔铸技术的发展趋势	16
1.6.1 熔铸设备	16
1.6.2 晶粒细化	17
1.6.3 熔体净化和检测	17
1.6.4 铸造技术	20
2 中间合金的制备技术	21
2.1 中间合金的使用	21

2.1.1	使用中间合金的条件和目的	21
2.1.2	对中间合金的要求	22
2.1.3	熔制中间合金的原辅材料要求	22
2.1.4	常用中间合金成分和性质	25
2.2	中间合金的熔制技术	25
2.2.1	铝-钛	26
2.2.2	铝-镍	27
2.2.3	铝-铬	27
2.2.4	铝-硅	27
2.2.5	铝-铁	28
2.2.6	铝-铜	28
2.2.7	铝-锰	29
2.3	中间合金的熔铸工艺与设备	29
2.3.1	反射炉	30
2.3.2	中频感应炉	32
3	铝合金的熔炼技术	34
3.1	概述	34
3.1.1	熔炼目的	34
3.1.2	熔炼特点	34
3.1.3	熔炼炉	36
3.1.4	熔炼方法	37
3.2	熔炼过程中的物理化学作用	39
3.2.1	炉内气氛	39
3.2.2	液态金属与气体的相互作用	40
3.2.3	影响气体含量的因素	46
3.2.4	气体溶解度	48
3.3	熔炼工艺流程及操作工艺	49
3.3.1	熔炼炉的准备	50
3.3.2	熔炼工艺流程和操作	54
3.3.3	熔炼时温度控制和火焰控制	57

3.4 化学成分的调整	61
3.4.1 成分调整	61
3.4.2 1×××系铝合金的成分控制	64
3.4.3 2×××系铝合金的成分控制	65
3.4.4 3×××系铝合金的成分控制	65
3.4.5 4×××系铝合金的成分控制	66
3.4.6 5×××系铝合金的成分控制	66
3.4.7 6×××系铝合金的成分控制	66
3.4.8 7×××系铝合金的成分控制	66
3.5 主要铝合金的熔炼特点	66
3.5.1 1×××系铝合金的熔炼	66
3.5.2 2×××系铝合金的熔炼	66
3.5.3 3×××系铝合金的熔炼	67
3.5.4 4×××系铝合金的熔炼	67
3.5.5 5×××系铝合金的熔炼	68
3.5.6 6×××系铝合金的熔炼	69
3.5.7 7×××系铝合金的熔炼	69
3.6 铝合金废料复化	70
3.6.1 废料复化前的预处理	70
3.6.2 废料的复化	70
3.6.3 复化锭的标识、保管和使用	71
4 铝合金的熔体净化	72
4.1 概述	72
4.2 铝及铝合金熔体净化原理	73
4.2.1 脱气原理	73
4.2.2 除渣原理	74
4.3 炉内净化处理	77
4.3.1 吸附净化	78
4.3.2 非吸附净化	86
4.4 炉外在线净化处理	86

4.4.1	在线除气	87
4.4.2	熔体过滤	93
4.4.3	除气 + 过滤	97
4.5	熔体净化技术的发展趋势	98
4.5.1	炉内处理的发展趋势	99
4.5.2	炉外在线净化技术的发展	99
5	铸造工具的设计与制造	102
5.1	铸造工具设计与制造的原则	102
5.1.1	设计结晶器的基本原则	102
5.1.2	结晶器材料的基本要求	102
5.1.3	结晶器高度对铸锭质量的影响	103
5.2	铸造工具的设计	103
5.2.1	立式半连续(连续)铸造工具	103
5.2.2	横向连续铸造工具	117
5.3	铸造工具的制造	118
5.3.1	结晶器	118
5.3.2	底座(引锭杆)	119
5.3.3	液流转注及控制装置	120
6	铝及铝合金的铸造	121
6.1	概述	121
6.1.1	锭模铸造	121
6.1.2	连续及半连续铸造	122
6.2	铸锭的结晶和组织	123
6.2.1	铸锭的典型组织	123
6.2.2	铸锭组织特征	124
6.3	晶粒细化	126
6.3.1	控制过冷度	126
6.3.2	动态晶粒细化	127
6.3.3	变质处理	127

6.4 铸造工艺对铸锭质量的影响	133
6.4.1 冷却速度对铸锭质量的影响	133
6.4.2 铸造速度对铸锭质量的影响	135
6.4.3 铸造温度对铸锭质量的影响	136
6.4.4 结晶器高度对铸锭质量的影响	138
6.5 铸造工艺流程与操作技术	138
6.5.1 工艺流程	138
6.5.2 操作技术工艺	138
6.6 铝及铝合金扁锭铸造	143
6.6.1 纵向压延扁锭的铸造	143
6.6.2 横向压延扁锭的铸造	144
6.7 铝及铝合金圆锭铸造	149
6.7.1 圆锭铸造的基本操作	149
6.7.2 小直径圆锭的铸造工艺特点	151
6.7.3 大直径圆锭的铸造工艺特点	151
6.7.4 锻件用铸锭的铸造工艺特点	151
6.7.5 铸造工艺参数	152
6.8 铝及铝合金空心圆锭铸造	154
6.8.1 工艺特点	154
6.8.2 铸造与操作工艺	155
6.8.3 铸造工艺参数	156
6.9 铸造技术的发展趋势	158
6.9.1 电磁铸造技术	158
6.9.2 脉冲水和加气铸造	159
6.9.3 气滑铸造	160
6.9.4 可调结晶器	160
6.9.5 低液位铸造技术	161
6.9.6 ASM 新式扁锭结晶器	161
6.9.7 刮水技术	161
6.9.8 自动液位技术	161

7 铝及铝合金铸锭均匀化与加工	162
7.1 铝合金铸锭均匀化退火	162
7.1.1 均匀化退火的目的	162
7.1.2 均匀化退火对铸锭组织与性能的影响	162
7.1.3 均匀化退火温度及时间	163
7.1.4 常见均匀化制度	165
7.2 铸锭的机械加工	167
7.2.1 锯切	167
7.2.2 表面加工	172
8 铝合金铸锭的质量检验及缺陷分析	175
8.1 常规检查方法	175
8.1.1 圆铸锭的质量检查	175
8.1.2 扁铸锭的质量检查	175
8.2 先进检测方法	177
8.3 铝合金铸锭内部缺陷及分析	178
8.3.1 偏析与偏析瘤	178
8.3.2 缩孔	182
8.3.3 疏松与气孔	182
8.3.4 夹杂与氧化膜	186
8.3.5 白亮点	190
8.3.6 白斑	191
8.3.7 光亮晶粒	193
8.3.8 羽毛状晶	195
8.3.9 粗大晶粒	197
8.3.10 晶层分裂	199
8.3.11 粗大金属化合物	200
8.3.12 过烧	203
8.3.13 枞树组织	206
8.4 铝合金表面及外形缺陷及分析	207