

“十一五”国家重点图书出版规划项目


AI

中国有色金属丛书
中国有色金属工业协会组织编写

变形铝合金 熔炼与铸造

王立娟 张万金 吴欣凤 编著

Nonferrous Metals

 中南大学出版社
www.csupress.com.cn



“十一五”国家重点图书出版规划项目



变形铝合金熔炼与铸造

中国有色金属工业协会组织编写

王立娟 张万金 吴欣凤 编著

 中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

变形铝合金熔炼与铸造/王立娟,张万金,吴欣凤编著—长沙:中南大学出版社,2010.9

(中国有色金属丛书)

ISBN 978-7-5487-0097-5

I.变... II.①王...②张...③吴... III.①铝合金-熔炼②铝合金-铸造 IV.TG292

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第168681号

变形铝合金熔炼与铸造

王立娟 张万金 吴欣凤 编著

责任编辑 刘颖维

责任印制 周颖

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

印装 长沙瑞和印务有限公司

开本 787×1092 1/16 印张 19 字数 475千字

版次 2010年9月第1版 2010年9月第1次印刷

书号 ISBN 978-7-5487-0097-5

定价 69.00元

图书出现印装问题,请与出版社调换

中国有色金属丛书
CNMS 编委会

主任：

康 义 中国有色金属工业协会

常务副主任：

黄伯云 中南大学

副主任：

熊维平	中国铝业公司
罗 涛	中国有色矿业集团有限公司
李福利	中国五矿集团公司
李贻煌	江西铜业集团公司
杨志强	金川集团有限公司
韦江宏	铜陵有色金属集团控股有限公司
何仁春	湖南有色金属控股集团有限公司
董 英	云南冶金集团总公司
孙永贵	西部矿业股份有限公司
余德辉	中国电力投资集团公司
屠海令	北京有色金属研究总院
张水鉴	中金岭南有色金属股份有限公司
张学信	信发集团有限公司
宋作文	南山集团有限公司
雷 毅	云南锡业集团有限公司
黄晓平	陕西有色金属控股集团有限公司
王京彬	有色金属矿产地质调查中心
尚福山	中国有色金属工业协会
文献军	中国有色金属工业协会

委员(以姓氏笔划排序)：

马世光	中国有色金属工业协会加工工业分会
马宝平	中国有色金属工业协会铝业分会
王再云	中铝山东分公司
王吉位	中国有色金属工业协会再生金属分会
王华俊	中国有色金属工业协会
王向东	中国有色金属工业协会钛锆铪分会
王树琪	中条山有色金属集团有限公司

王海东
乐维宁
许健
刘同高
刘良先
刘柏禄
刘继军
李宁
李凤轶
李阳通
李沛兴
李旺兴
杨超
杨文浩
杨安国
杨龄益
吴跃武
吴锈铭
邱冠周
冷正旭
汪汉臣
宋玉芳
张麟
张创奇
张洪国
张洪恩
张培良
陆志方
陈成秀
武建强
周江
赵波
赵翠青
胡长平
钟卫佳
钟晓云
段玉贤
胥力
黄河
黄粮成
蒋开喜
傅少武
瞿向东

中南大学出版社
中铝国际沈阳铝镁设计研究院
中冶葫芦岛有色金属集团有限公司
厦门钨业集团有限公司
中国钨业协会
赣州有色冶金研究所
荏平华信铝业有限公司
兰州铝业股份有限公司
西南铝业(集团)有限责任公司
柳州华锡集团有限责任公司
白银有色金属股份有限公司
中铝郑州研究院
云南铜业(集团)有限公司
甘肃稀土集团有限责任公司
河南豫光金铅集团有限责任公司
锡矿山闪星锑业有限责任公司
洛阳有色金属加工设计研究院
中国有色金属工业协会镁业分会
中南大学
中铝山西分公司
宝钛集团有限公司
江西钨业集团有限公司
大冶有色金属有限公司
宁夏东方有色金属集团有限公司
中国有色金属工业协会
河南中孚实业股份有限公司
山东丛林集团有限公司
中国有色工程有限公司
厦门厦顺铝箔有限公司
中铝广西分公司
东北轻合金有限责任公司
中国有色金属工业协会
中国有色金属工业协会
中国有色金属工业协会
中铝洛阳铜业有限公司
江西稀有稀土金属钨业集团公司
洛阳栾川钼业集团有限责任公司
遵义钛厂
中电投宁夏青铜峡能源铝业集团有限公司
中铝国际贵阳铝镁设计研究院
北京矿冶研究总院
株洲冶炼集团有限责任公司
中铝广西分公司

中国有色金属丛书
CNMS 学术委员会

主任：

王淀佐 院士 北京有色金属研究总院

常务副主任：

黄伯云 院士 中南大学

副主任(按姓氏笔划排序)：

于润沧 院士 中国有色工程有限公司
古德生 院士 中南大学
左铁镛 院士 北京工业大学
刘业翔 院士 中南大学
孙传尧 院士 北京矿冶研究院
李东英 院士 北京有色金属研究总院
邱定蕃 院士 北京矿冶研究院
何季麟 院士 宁夏东方有色金属集团有限公司
何继善 院士 中南大学
汪旭光 院士 北京矿冶研究院
张文海 院士 南昌有色冶金设计研究院
张国成 院士 北京有色金属研究总院
陈景 院士 昆明贵金属研究所
金展鹏 院士 中南大学
周廉 院士 西北有色金属研究院
钟掘 院士 中南大学
黄培云 院士 中南大学
曾苏民 院士 西南铝加工厂
戴永年 院士 昆明理工大学

委员(按姓氏笔划排序)：

卜长海 厦门厦顺铝箔有限公司
于家华 遵义钛厂
马保平 金堆城铝业集团有限公司
王辉 株洲冶炼集团有限责任公司
王斌 洛阳栾川铝业集团有限责任公司

王林生	赣州有色冶金研究所
尹晓辉	西南铝业(集团)有限责任公司
邓吉牛	西部矿业股份有限公司
吕新宇	东北轻合金有限责任公司
任必军	伊川电力集团
刘江浩	江西铜业集团公司
刘劲波	洛阳有色金属加工设计研究院
刘昌俊	中铝山东分公司
刘侦德	中金岭南有色金属股份有限公司
刘保伟	中铝广西分公司
刘海石	山东南山集团有限公司
刘祥民	中铝股份有限公司
许新强	中条山有色金属集团有限公司
苏家宏	柳州华锡集团有限责任公司
李宏磊	中铝洛阳铜业有限公司
李尚勇	金川集团有限公司
李金鹏	中铝国际沈阳铝镁设计研究院
李桂生	江西稀有稀土金属钨业集团公司
吴连成	青铜峡铝业集团有限公司
沈南山	云南铜业(集团)公司
张一宪	湖南有色金属控股集团有限公司
张占明	中铝山西分公司
张晓国	河南豫光金铅集团有限责任公司
邵武	铜陵有色金属(集团)公司
苗广礼	甘肃稀土集团有限责任公司
周基校	江西钨业集团有限公司
郑萧	中铝国际贵阳铝镁设计研究院
赵庆云	中铝郑州研究院
战凯	北京矿冶研究总院
钟景明	宁夏东方有色金属集团有限公司
俞德庆	云南冶金集团总公司
钱文连	厦门钨业集团有限公司
高顺	宝钛集团有限公司
高文翔	云南锡业集团有限责任公司
郭天立	中冶葫芦岛有色金属集团有限公司
梁学民	河南中孚实业股份有限公司
廖明	白银有色金属股份有限公司
翟保金	大冶有色金属有限公司
熊柏青	北京有色金属研究总院
颜学柏	陕西有色金属控股集团有限责任公司
戴云俊	锡矿山闪星锑业有限责任公司
黎云	中铝贵州分公司

总序



有色金属是重要的基础原材料，广泛应用于电力、交通、建筑、机械、电子信息、航空航天和国防军工等领域，在保障国民经济建设和社会发展等方面发挥了不可或缺的作用。

改革开放以来，特别是新世纪以来，我国有色金属工业持续快速发展，已成为世界最大的有色金属生产国和消费国，产业整体实力显著增强，在国际同行业中的影响力日益提高。主要表现在：总产量和消费量持续快速增长，2008年，十种有色金属总产量2 520万吨，连续七年居世界第一，其中铜产量和消费量分别占世界的20%和24%；电解铝、铅、锌产量和消费量均占世界总量的30%以上。经济效益大幅提高，2008年，规模以上企业实现销售收入预计2.1万亿以上，实现利润预计800亿元以上。产业结构优化升级步伐加快，2005年已全部淘汰了落后的自焙铝电解槽；目前，铜、铅、锌先进冶炼技术产能占总产能的85%以上；铜、铝加工能力有较大改善。自主创新能力显著增强，自主研发的具有自主知识产权的350 kA、400 kA大型预焙电解槽技术处于世界铝工业先进水平，并已输出到国外；高精度内螺纹铜管、高档铝合金建筑型材及时速350 km高速列车用铝材不仅满足了国内需求，已大量出口到发达国家和地区。国内矿山新一轮找矿和境外矿产资源开发取得了突破性进展，现有9大矿区的边部和深部找矿成效显著，一批有实力的大型企业集团在海外资源开发和收购重组境外矿山企业方面迈出了实质性步伐，有效增强了矿产资源的保障能力。

2008年9月份以来，我国有色金属工业受到了国际金融危机的严重冲击，产品价格暴跌，市场需求萎缩，生产增幅大幅回落，企业利润急剧下降，部分行业

已出现亏损。纵观整体形势，我国有色金属工业仍处在重要机遇期，挑战和机遇并存，长期发展向好的趋势没有改变。今后一个时期，我国有色金属工业发展以控制总量、淘汰落后、技术改造、企业重组、充分利用境内外两种资源，提高资源保障能力为重点，推动产业结构调整和优化升级，促进有色金属工业可持续发展。

实现有色金属工业持续发展，必须依靠科技进步，关键在人才。为了提高劳动者素质，培养一大批高水平的科技创新人才和高技能的技术工人，由中国有色金属工业协会牵头，组织中南大学出版社及有关企业、科研院校数百名有经验的专家学者、工程技术人员，编写了《中国有色金属丛书》。《丛书》内容丰富，专业齐全，科学系统，实用性强，是一套好教材，也可作为企业管理人员和相关专业大学生的参考书。经过编写、编辑、出版人员的艰辛努力，《丛书》即将陆续与广大读者见面。相信它一定会为培养我国有色金属行业高素质人才，提高科技水平，实现产业振兴发挥积极作用。

康翔

2009年3月

前 言

为了普及变形铝及铝合金铸锭生产的基础知识，帮助变形铝合金熔铸系统的中、高级技术工人，专业技术人员尽快了解和掌握本专业基础理论及迅速发展的铝熔铸技术，提高现场工人的操作水平，出版了《中国有色金属丛书》铝业职工读本系列之《变形铝合金熔炼与铸造》。

本书介绍了变形铝及铝合金熔铸原理及各系合金的主要熔铸工艺特点。并以操作流程为主线，系统介绍了中间合金和熔剂的制备、配料、熔炼及化学成分控制、熔体净化、铸造、铸造工具及主要熔铸设备、均匀化退火、机械加工、铸锭常见缺陷、熔铸新工艺和新技术。

本书内容丰富、全面、实用，密切联系生产实际，针对性强，是一线工程技术人员长期实践经验的总结。本书既可作为教材使用，又可为铝合金熔铸工作者提供参考。相信本书对提高铝合金熔铸行业中、高级技术工人的理论水平和操作技能、推动我国的铝加工事业的发展具有重要意义。

尽管经过反复修改，不当之处在所难免，恳请读者提出宝贵意见。

编者
2010年9月

目 录



第1章 铝及铝合金概述	1
1.1 铝的性质和应用	1
1.2 我国铝及铝合金的化学成分	1
1.3 各系铝合金的主要特点	8
1.3.1 1×××系铝合金	8
1.3.2 2×××系铝合金	9
1.3.3 3×××系铝合金	13
1.3.4 4×××系铝合金	14
1.3.5 5×××系铝合金	15
1.3.6 6×××系铝合金	17
1.3.7 7×××系铝合金	18
1.3.8 8×××系铝合金	21
第2章 中间合金和熔剂的制备	22
2.1 中间合金的制备	22
2.1.1 使用中间合金的目的	22
2.1.2 合金化元素需以中间合金形式加入的情况	22
2.1.3 对中间合金的要求	23
2.1.4 常用中间合金的成分和性质	23
2.1.5 熔制中间合金的原、辅材料要求	23
2.1.6 中间合金的熔制方法	27
2.1.7 中间合金的熔铸工艺	27
2.1.8 几种中间合金的熔制	30
2.2 熔剂的制备	32
2.2.1 熔剂的分类	32
2.2.2 对熔剂的要求	32
2.2.3 熔剂组成	33
2.2.4 常用熔剂的成分及用途	35
2.2.5 熔剂的制作	35
第3章 原材料的验收、管理、使用及配料计算	40
3.1 原材料的验收、管理、使用	40
3.1.1 纯金属的验收和管理	40

3.1.2	中间合金的验收、管理和使用	44
3.1.3	废料的验收、管理和使用	45
3.1.4	添加剂和化工材料的验收、管理和使用	48
3.2	配料计算	48
3.2.1	成分计算的原则	48
3.2.2	炉料组成及配料比的确定	49
3.2.3	合金化元素加入方式的确定	49
3.2.4	配料计算程序及举例	50
第4章	铝及铝合金的熔炼	56
4.1	概述	56
4.1.1	熔炼目的	56
4.1.2	熔炼特点	56
4.1.3	熔炼方法	57
4.2	熔炼炉	58
4.2.1	熔炼炉的分类	58
4.2.2	熔炼炉的要求	59
4.2.3	几种典型的熔炼炉	59
4.2.4	提高火焰式熔炼炉热效率的途径	89
4.3	熔炼过程中的一些物理化学行为	92
4.3.1	炉内气氛	92
4.3.2	液态金属与气体的相互作用	93
4.3.3	影响气体含量的因素	97
4.3.4	气体溶解度	98
4.3.5	熔融金属与炉衬的相互作用	99
4.4	熔炼工艺流程及操作	99
4.4.1	熔炼炉的准备	100
4.4.2	熔炼工艺流程和操作	102
4.4.3	熔炼过程中温度的控制	107
4.5	各系铝合金的熔炼工艺和熔炼特点	109
4.5.1	1×××系铝合金的熔炼	109
4.5.2	2×××系铝合金的熔炼	110
4.5.3	3×××系铝合金的熔炼	112
4.5.4	4×××系铝合金的熔炼	112
4.5.5	5×××系铝合金的熔炼	113
4.5.6	6×××系铝合金的熔炼	114
4.5.7	7×××系铝合金的熔炼	115
4.6	铝合金废料复化	115
4.6.1	废料复化的目的	115

4.6.2	废料复化范围	116
4.6.3	废料复化前的预处理	116
4.6.4	复化工艺及操作	116
4.6.5	复化锭的标识、保管和使用	116
第5章	铝及铝合金熔体净化	117
5.1	铝及铝合金熔铸过程中易产生的缺陷	117
5.1.1	气体缺陷	117
5.1.2	夹杂缺陷	117
5.1.3	碱金属缺陷	117
5.2	熔体净化的目的和意义	117
5.3	熔体净化的原理及分类	118
5.3.1	脱气原理	118
5.3.2	除渣原理	118
5.3.3	熔体净化方法分类	120
5.4	炉内净化方法	120
5.4.1	吸附净化	120
5.4.2	非吸附净化	125
5.5	炉外净化方法	126
5.5.1	在线除气	126
5.5.2	熔体过滤	131
5.5.3	除气+过滤	133
5.6	熔体净化技术的发展趋势	134
5.6.1	炉内处理的发展趋势	134
5.6.2	炉外在线净化技术的发展	134
第6章	晶粒细化技术	136
6.1	控制过冷度	136
6.1.1	形核率与过冷度的关系	136
6.1.2	增加过冷度的方法	136
6.2	动态晶粒细化	137
6.3	变质处理	137
6.3.1	变质处理方法	137
6.3.2	形核变质剂	137
6.3.3	吸附变质剂	142
6.3.4	变形铝合金常用细化剂	143
6.4	枝晶细化程度对铸锭质量的影响	144
第7章	铝及铝合金的铸造	145
7.1	概述	145

7.1.1	铸造概念	145
7.1.2	对铸锭的基本要求	145
7.1.3	铸造方法	145
7.2	非连续铸造	146
7.2.1	锭模铸造	146
7.2.2	沉浸铸造	148
7.3	连续或半连续铸造方法	149
7.3.1	连续(或半连续)铸造概念	149
7.3.2	连续(或半连续)铸造分类	149
7.3.3	几种典型的连续(半连续)铸造方法	151
7.4	铸锭的结晶和组织	163
7.4.1	凝固过程的热交换	163
7.4.2	铸锭的结晶	165
7.4.3	结晶过程	171
7.4.4	铸锭的典型结晶组织	172
7.4.5	铸锭组织特征	173
7.5	铸造工艺参数与铸锭质量的关系	173
7.5.1	普通模铸造工艺的各种参数对铸锭质量的影响	173
7.5.2	绝热膜、热顶的工艺参数的选择	179
7.5.3	气滑热顶铸造工艺参数的控制	181
7.5.4	矮结晶器铸造工艺参数的控制	182
7.5.5	电磁铸造参数的控制	183
7.5.6	复合同步铸造工艺参数的控制	183
7.6	铸造机及其他设备	183
7.6.1	链带式卧式铸造机	183
7.6.2	钢丝绳铸造机	185
7.6.3	液压铸造机	187
7.6.4	丝杠式铸造机	190
7.7	铸造工具	190
7.7.1	铸造工具分类	190
7.7.2	结晶器	190
7.7.3	底座	205
7.7.4	液流转注装置	207
7.7.5	结晶器内液面控制装置	209
7.7.6	润滑装置	212
7.7.7	铸造工具的发展趋势	213
7.8	铸造工艺流程和操作技术	213
7.8.1	铸造工艺流程	213

7.8.2	铸造前的准备	215
7.8.3	铸造的开头	216
7.8.4	铸造过程	217
7.8.5	铸造的收尾	217
7.9	铸造工艺	218
7.9.1	软合金、 $4 \times \times \times$ 合金扁锭的铸造	218
7.9.2	硬合金扁锭的铸造	222
7.9.3	圆锭的铸造	225
7.9.4	空心锭的铸造	229
7.10	铸造技术的发展趋势	232
7.10.1	电解铝液直接铸造	232
7.10.2	铸造机的发展	232
7.10.3	辅助系统的发展	232
7.10.4	结晶器和液面控制装置的发展趋势	232
7.10.5	自动控制系统的的发展	233
第8章	铸锭的均匀化退火	234
8.1	影响均匀化退火的因素	234
8.1.1	均匀化退火的目的	234
8.1.2	均匀化退火对铸锭组织与性能的影响	234
8.1.3	影响均匀化程度的因素	234
8.2	均匀化退火制度	236
8.3	均匀化退火炉组	237
8.3.1	均匀化退火炉组分类	237
8.3.2	几种均匀化退火炉组	237
8.3.3	均匀化退火炉的发展趋势	245
8.4	均匀化退火操作	245
8.4.1	对炉子的要求	245
8.4.2	对装炉的要求	245
8.4.3	时间的计算	245
8.4.4	加强检查	245
第9章	铸锭质量检验和加工	246
9.1	铸锭质量检验	246
9.1.1	化学成分检查	246
9.1.2	尺寸偏差检查	247
9.1.3	表面质量检查	247
9.1.4	低倍检验	247
9.1.5	断口检验	248
9.1.6	高倍显微检验	249

9.1.7	印记检查	249
9.1.8	超声波探伤检测	249
9.1.9	测氢	250
9.1.10	测氧化物含量	251
9.1.11	在线检测晶粒细化和变质处理效果	251
9.2	铸锭的机械加工	252
第10章	铝合金铸锭缺陷分析	254
10.1	裂纹	254
10.1.1	裂纹分类	254
10.1.2	扁锭裂纹形式	255
10.1.3	实心圆锭裂纹形式	258
10.1.4	空心圆锭裂纹	260
10.1.5	晶间裂纹	261
10.1.6	晶层分裂	262
10.2	铸锭表面缺陷	263
10.2.1	冷隔	263
10.2.2	拉裂和拉痕	264
10.2.3	竖道皱褶	264
10.2.4	弯曲	266
10.2.5	偏心	266
10.2.6	尺寸不符	266
10.2.7	周期性波纹	267
10.2.8	竹节	267
10.2.9	偏析瘤	267
10.2.10	表面气泡	268
10.2.11	搭接式表面和汗珠式表面	269
10.3	铸锭的组织缺陷	269
10.3.1	偏析	269
10.3.2	缩孔	271
10.3.3	疏松	272
10.3.4	气孔	273
10.3.5	非金属夹杂	274
10.3.6	金属夹杂	275
10.3.7	氧化膜	275
10.3.8	白亮点	276
10.3.9	白斑	277
10.3.10	光亮晶粒	278
10.3.11	羽毛状晶	279

10.3.12	粗大晶粒	280
10.3.13	椒树组织	281
10.3.14	粗大金属化合物	281
10.3.15	过烧	283
10.3.16	初晶硅	284
10.3.17	共晶硅	285
参考文献		286