

·南山学术文库·

总主编 吴国华

铝的提炼与加工技术

张德军 张 华 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

· 南山学术文库 ·

铝的提炼与加工技术

张德军 张 华 编 著

电子工业出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书利用烟台南山学院和南山集团校企一家的优势条件,以培养实践应用型人才为目标,结合南山集团完整的铝加工产业链的优势与特色而编写。全书内容简洁易懂,注重实用性、通用性和知识的综合性。

全书共分9章,主要内容有铝土矿的筛选和氧化铝的工业生产制备、电解铝生产的主要工艺和过程、铝及其铝合金的特性和分类方法、铝合金熔炼和净化处理、铝合金的铸造过程、铝合金型材的挤压生产过程、铝合金板、带轧制生产原理及工艺技术、铝合金生产过程常用的热处理技术和工艺规范、铝合金表面氧化保护处理技术。

本书既可作为高职高专金属材料专业学习铝加工相关知识的用书,也可作为铝加工企业的职工培训用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

铝的提炼与加工技术 / 张德军, 张华编著. —北京: 电子工业出版社, 2017.7

ISBN 978-7-121-30691-4

I. ①铝… II. ①张… ②张… III. ①炼铝—高等学校—教材②铝合金—金属加工—高等学校—教材
IV.①TF821②TG146.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 313696 号

策划编辑: 朱怀永

责任编辑: 裴 杰

印 刷: 三河市良远印务有限公司

装 订: 三河市良远印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 13.75 字数: 394.2 千字

版 次: 2017 年 7 月第 1 版

印 次: 2017 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 34.00 元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888,(010) 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254608, zhy@phei.com.cn。

序——加快应用型本科教材建设的思考

一、应用型高校转型呼唤应用型教材建设

教学与生产脱节,很多教材内容严重滞后,所学难以致用。这是我们在进行毕业生跟踪调查时经常听到的对高校教学现状提出的批评意见。由于这种脱节和滞后,造成很多毕业生及其就业单位不得不花费大量时间“补课”,既给刚踏上社会的学生无端增加了很大压力,又给就业单位白白增添了额外的培训成本。难怪学生抱怨“专业不对口,学非所用”,企业讥讽“学生质量低,人才难寻”。

2010年,我国《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》指出:要加大教学投入,重点扩大应用型、复合型、技能型人才培养规模。2014年,《国务院关于加快发展现代职业教育的决定》进一步指出:要引导一批普通本科高等学校向应用技术类型高等学校转型,重点举办本科职业教育,培养应用型、技术技能型人才。这表明国家已发现并着手解决高等教育供应侧结构不对称问题。

转型一批到底是多少?据国家教育部披露,计划将600多所地方本科高校向应用技术、职业教育类型转变。这意味着未来几年我国将有50%以上的本科高校(2014年全国本科高校1202所)面临应用型转型,更多地承担应用型人才,特别是生产、管理、服务一线急需的应用技术型人才的培养任务。应用型人才培养作为高等教育人才培养体系的重要组成部分,已经被提上我国党和国家重要的议事日程。

军马未动、粮草先行。应用型高校转型要求加快应用型教材建设。教材是引导学生从未知进入已知的一条便捷途径。一部好的教材既是取得良好教学效果的关键因素,又是优质教育资源的重要组成部分。它在很大程度上决定着学生在某一领域发展起点的远近。在高等教育逐步从“精英”走向“大众”直至“普及”的过程中,加快教材建设,使之与人才培养目标、模式相适应,与市场需求和时代发展相适应,已成为广大应用型高校面临并亟待解决的新问题。

烟台南山学院作为大型民营企业南山集团投资兴办的民办高校,与生俱来就是一所应用型高校。2005年升本以来,其依托大企业集团,坚定不移地实施学校地方性、应用型的办学定位。坚持立足胶东,着眼山东,面向全国;坚持以工为主,工管经文艺协调发展;坚持产教融合、校企合作,培养高素质应用型人才。初步形成了自己校企一体、实践育人的应用型办学特色。为加快应用型教材建设,提高应用型人才培养质量,今年学校推出的包括“应用型本科系列教材”在内的“百部学术著作建设工程”,可以视为南山学院升本10年来教学改革经验的初步总结和科研成果的集中展示。

二、应用型本科教材研编原则

编写一本好教材比一般人想象的要难得多。它既要考虑知识体系的完整性,又要考虑知识

体系如何编排和建构；既要有利于学生“学”，又要有利于教师“教”。教材编得好不好，首先取决于作者对教学对象、课程内容和教学过程是否有深刻的体验和理解，以及能否采用适合学生认知模式的教材表现方式。

应用型本科作为一种本科层次的人才培养类型，目前使用的教材大致有两种情况：一是借用传统本科教材。实践证明，这种借用很不适宜。因为传统本科教材内容相对较多，理论阐述繁杂，教材既深且厚。更突出的是其忽视实践应用，很多内容理论与实践脱节。这对于没有实践经验，以培养动手能力、实践能力、应用能力为重要目标的应用型本科生来说，无异于“张冠李戴”，严重背离了教学目标，降低了教学质量。二是延用高职教材。高职与应用型本科的人才培养方式接近，但毕竟人才培养层次不同，它们在专业培养目标、课程设置、学时安排、教学方式等方面均存在很大差别。高职教材虽然也注重理论的实践应用，但“小才难以大用”，用低层次的高职教材支撑高层次的本科人才培养，实属“力不从心”，尽管它可能十分优秀。换句话说，应用型本科教材贵在“应用”二字。它既不能是传统本科教材加贴一个应用标签，也不能是高职教材的理论强化，其应有相对独立的知识体系和技术技能体系。

基于这种认识，我认为研编应用型本科教材应遵循三个原则：一是实用性原则。即教材内容应与社会实际需求相一致，理论适度、内容实用。通过教材，学生能够了解相关企业当前的主流生产技术、设备、工艺流程及科学管理状况，掌握企业生产经营活动中与本学科专业相关的基本知识和专业知识、基本技能和专业技能。以最大限度地缩短毕业生知识、能力与企业现实需要之间的差距。烟台南山学院研编的《应用型本科专业技能标准》就是根据企业对本科毕业生专业岗位的技能要求研究编制的基本文件，它为应用型本科有关专业进行课程体系设计和应用型教材建设提供了一个参考依据。二是动态性原则。当今社会科技发展迅猛，新产品、新设备、新技术、新工艺层出不穷。所谓动态性，就是要求应用型教材应与时俱进，反映时代要求，具有时代特征。在内容上应尽可能将那些经过实践检验成熟或比较成熟的技术、装备等人类发明创新成果编入教材，实现教材与生产的有效对接。这是克服传统教材严重滞后、理论与实践脱节、学不致用等教育教学弊端的重要举措，尽管某些基础知识、理念或技术工艺短期内并不发生突变。三是个性化原则。即教材应尽可能适应不同学生的个体需求，至少能够满足不同群体学生的学习需要。不同的学生或学生群体之间存在的差异，显著地表现在对不同知识理解和技能掌握并熟练运用的快慢及深浅程度上。根据个性化原则，可以考虑在教材内容及其结构编排上既有所有学生都要求掌握的基本理论、方法、技能等“普适性”内容，又有满足不同的学生或学生群体不同学习要求的“区别性”内容。本人以为，以上原则是研编应用型本科教材的特征使然，如果能够长期得到坚持，则有望逐渐形成区别于研究型人才培养的应用型教材体系特色。

三、应用型本科教材研编路径

1. 明确教材使用对象

任何教材都有自己特定的服务对象。应用型本科教材不可能满足各类不同高校的教学需求，其主要是为我国新建的包括民办高校在内的本科院校及应用技术型专业服务的。这是因为：近10多年来我国新建了600多所本科院校（其中民办本科院校420所，2014年）。这些本科院校大多以地方经济社会发展为其服务定位，以应用技术型人才为其培养模式定位。它们的学生毕业后大部分选择企业单位就业。基于社会分工及企业性质，这些单位对毕业生的实践应用、

技能操作等能力的要求普遍较高,而不刻意苛求毕业生的理论研究能力。因此,作为人才培养的必备条件,高质量应用型本科教材已经成为新建本科院校及应用技术类专业培养合格人才的迫切需要。

2. 加强教材作者选择

突出理论联系实际,特别注重实践应用是应用型本科教材的基本质量特征。为确保教材质量,严格选择教材研编人员十分重要。其基本要求:一是作者应具有比较丰富的社会阅历和企业实际工作经历或实践经验。这是研编人员的阅历要求。不能指望一个不了解社会、没有或缺乏行业企业生产经营实践体验的人,能够写出紧密结合企业实际、实践应用性很强的篇章;二是主编和副主编应选择长期活跃于教学一线、对应用型人才培养模式有深入研究并能将其运用于教学实践的教授、副教授等专业技术人员担纲。这是研编团队的领导人要求。主编是教材研编团队的灵魂。选择主编应特别注意理论与实践结合能力的大小,以及“研究型”和“应用型”学者的区别;三是作者应有强烈的应用型人才培养模式改革的认可度,以及应用型教材编写的责任感和积极性。这是写作态度的要求。实践中一些选题很好却质量平庸甚至低下的教材,很多是由于写作态度不佳造成的;四是在满足以上三个条件的基础上,作者应有较高的学术水平和教材编写经验。这是学术水平的要求。显然,学术水平高、教材编写经验丰富的研编团队,不仅可以保障教材质量,而且对教材出版后的市场推广将产生有利的影响。

3. 强化教材内容设计

应用型教材服务于应用型人才培养模式的改革。应以改革精神和务实态度,认真研究课程要求、科学设计教材内容,合理编排教材结构。其要点包括:

(1) 缩减理论篇幅,明晰知识结构。编写应用型教材应摒弃传统研究型人才培养思维模式下重理论、轻实践的做法,确实克服理论篇幅越来越多、教材越编越厚、应用越来越少的弊端。一是基本理论应坚持以必要、够用、适用为度。在满足本学科知识连贯性和专业课需要的前提下,精简推导过程,删除过时内容,缩减理论篇幅;二是知识体系及其应用结构应清晰明了、符合逻辑,立足于为学生提供“是什么”和“怎么做”;三是文字简洁,不拖泥带水,内容编排留有余地,为学生自我学习和实践教学留出必要的空间。

(2) 坚持能力本位,突出技能应用。应用型教材是强调实践的教材,没有“实践”、不能让学生“动起来”的教材很难产生良好的教学效果。因此,教材既要关注并反映职业技术现状,以企业岗位或岗位群需要的技术和能力为逻辑体系,又要适应未来一定期间内技术推广和职业发展要求。在方式上应坚持能力本位、突出技能应用、突出就业导向;在内容上应关注不同产业的前沿技术、重要技术标准及其相关的学科专业知识,把技术技能标准、方法程序等实践应用作为重要内容纳入教材体系,贯穿于课程教学过程的始终,从而推动教材改革,在结构上形成区别于理论与实践分离的传统教材模式,培养学生从事与所学专业紧密相关的技术开发、管理、服务等必须的意识 and 能力。

(3) 精心选编案例,推进案例教学。什么是案例?案例是真实典型且含有问题的事件。这个表述的涵义:第一,案例是事件。案例是对教学过程中一个实际情境的故事描述,讲述的是这个教学故事产生、发展的历程;第二,案例是含有问题的事件。事件只是案例的基本素材,但并非所有的事件都可以成为案例。能够成为教学案例的事件,必须包含有问题或疑难情境,并且可能包含有解决问题的方法。第三,案例是典型且真实的事件。案例必须具有典型意义、能给读者带来一定的启示和体会。案例是故事但又不完全是故事。其主要区别在于故事可以杜

撰，而案例不能杜撰或抄袭。案例是教学事件的真实再现。

案例之所以成为应用型教材的重要组成部分，是因为基于案例的教学是向学生进行有针对性的说服、思考、教育的有效方法。研编应用型教材，作者应根据课程性质、课程内容和课程要求，精心选择并按一定书写格式或标准样式编写案例，特别要重视选择那些贴近学生生活、便于学生调研的案例。然后根据教学进程和学生理解能力，研究在哪些章节，以多大篇幅安排和使用案例。为案例教学更好地适应案例情景提供更多的方便。

最后需要说明的是，应用型本科作为一种新的人才培养类型，其出现时间不长，对它进行系统研究尚需时日。相应的教材建设是一项复杂的工程。事实上从教材申报到编写、试用、评价、修订，再到出版发行，至少需要 3~5 年甚至更长的时间。因此，时至今日完全意义上的应用型本科教材并不多。烟台南山学院在开展学术年活动期间，组织研编出版的这套应用型本科系列教材，既是本校近 10 年来推进实践育人教学成果的总结和展示，更是对应用型教材建设的一个积极尝试，其中肯定存在很多问题，我们期待在取得试用意见的基础上进一步改进和完善。



2016 年国庆前夕于龙口

前 言

铝及其合金是工业中应用最广泛的一种有色金属结构材料,在航空、航天、汽车、机械制造、船舶及化学工业中已大量应用。2014年,中国电解铝产量占了全球的52%,消费量占了全球的49%,氧化铝产量占全球的45.6%,再生铝产量占全球的46%,铝材产量超过全球的55%,铝土矿进口量占全球进口量的48%;废铝进口量占全球进口量的26%;铝材出口量占全球出口量的23%。中国已经成为名副其实的铝加工大国,各个专业学生和相关技术人员迫切需要掌握更多的铝加工知识。本书在编写过程中从实用的角度出发,介绍了铝加工的基本原理和基本概念,通过阅读本书可以使读者对铝加工的整个过程有个初步认识 and 了解。

南山铝业是国内唯一以铝材为主业的上市公司,始终坚持“立足高起点、利用高科技、创造高品质”的可持续发展思路,拥有从能源、氧化铝、电解铝到铝型材、高精度铝板、带、箔的全球唯一最短距离最完整铝产业链。为充分利用烟台南山学院和南山集团校企一家的优势条件,推动学校培养与企业培训、教学过程与生产过程之间的嵌套,培养实践应用型人才,在人才培养上发挥企业集团办学、校企一家的独特优势,实施校企合作、产学研融合发展战略,本书结合南山集团完整的铝加工产业链的优势与特色而编写,内容全面广泛,涵盖了从铝土矿的筛选、氧化铝的制备、电解铝生产、铝合金的熔炼与铸造和铝合金的压力塑性加工等整个铝加工的产业链过程。知识综合性较强,同时注重各个生产环节中的实用型知识,本书既可作为高职、高专类金属材料专业学习铝加工相关知识的教材,也可作为铝加工企业的职工培训教材。

本书共分9章,主要内容有铝土矿的筛选和氧化铝的工业生产制备、电解铝生产的主要工艺和过程、铝及其铝合金的性能和分类方法、铝合金熔炼和净化处理、铝合金的铸造过程、铝合金型材的挤压生产过程、铝合金板、带轧制生产原理及工艺技术、铝合金生产常用的热处理技术和工艺规范、铝合金表面氧化保护处理技术。

本书由烟台南山学院和山东南山铝业股份有限公司合作编写,具体分工如下:第1章、第2章由南山铝业有限责任公司的张华编写,第3章、第4章和第7章由烟台南山学院的张德军编写,第5章和第6章由烟台南山学院的林春梅编写,第8章由烟台南山学院的晋宏炎编写,第9章由烟台南山学院的孟文霞编写。全书由张德军统稿修改。

由于作者的学术水平和实践经验有限,对本书中存在的不当之处敬请同行和读者指正!

作者向在本书中所引用著作、论文及交流报告内容的所有作者和研究人员表示衷心感谢,感谢他们的辛勤劳动成果!

为了方便读者阅读和学习本书章节内容,本书编写人员精心组织和开发了配套的文档、视频、动画、图片等形式的数字化学习资源,以章为单位制作了数字化学习资源的链接二维码,放在每章的开始处。读者使用手机等智能终端扫描二维码即可在线查看。

作 者

目 录

绪论	1
0.1 铝加工产业总论	1
0.2 氧化铝生产技术	1
0.3 原铝电解生产技术	2
0.4 铝合金熔铸生产技术	2
0.5 铝合金挤压生产技术	4
0.6 铝合金轧制生产技术	4
0.7 铝合金表面处理技术	5
第1章 氧化铝生产	6
1.1 铝土矿及其他铝矿石	6
1.1.1 铝土矿	6
1.1.2 其他铝矿石	7
1.2 氧化铝生产方法概述	8
1.3 拜耳法的原理和基本工艺流程	9
1.3.1 拜耳法生产氧化铝的原理	9
1.3.2 拜耳法生产氧化铝的基本工艺流程	9
1.4 烧结法的原理和基本工艺流程	11
1.4.1 碱石灰烧结法生产氧化铝的原理	11
1.4.2 碱石灰烧结法生产氧化铝基本工艺流程	12
1.5 拜耳法赤泥分离和洗涤工艺流程	13
1.6 高压溶出矿浆的稀释	15
1.7 铝酸钠溶液晶种分解的机制	16
1.7.1 铝酸钠溶液晶种分解的机制	16
1.7.2 影响晶种分解过程的主要因素	17
1.8 氧化铝焙烧	20
1.8.1 氢氧化铝的煅烧机制	21
1.8.2 焙烧的方法	21

第2章 电解铝生产	23
2.1 铝电解生产工艺	23
2.1.1 铝电解工业生产采用霍尔—埃鲁冰晶石—氧化铝熔盐电解法	23
2.1.2 铝电解生产工艺流程	25
2.1.3 电解铝所用的原料及质量要求	26
2.2 铝电解槽简介	29
2.2.1 铝电解槽的发展	29
2.2.2 铝电解槽的构造	30
2.3 铝电解生产环境保护	31
2.3.1 电解铝生产有害烟气对环境的影响	31
2.3.2 电解烟气治理工艺与水平	32
2.4 精铝生产	33
第3章 铝及铝合金的性能及分类	35
3.1 铝的基本特性与应用范围	35
3.2 铝及铝合金的分类	37
3.3 变形铝合金分类及牌号	37
3.3.1 变形铝合金的分类	37
3.3.2 中国变形铝合金的牌号及表示方法	38
3.4 中国变形铝合金状态代号及表示方法	39
3.4.1 基础状态代号	39
3.4.2 细分状态代号	40
3.5 ISO 铝合金的编号方法及其状态代号	44
3.6 美国铝合金的编号方法及其状态代号	46
3.6.1 合金牌号	46
3.6.2 状态代号	46
3.7 非热处理型铝合金的品种、状态、性能与典型用途	48
3.7.1 纯铝系合金(1×××系)	48
3.7.2 Al-Mn 系合金(3×××系)	49
3.7.3 Al-Si 系合金(4×××系)	50
3.7.4 Al-Mg 系合金(5×××系)	51
3.8 热处理型铝合金品种、状态、性能与典型用途	54
3.8.1 Al-Cu 系合金(2×××系)	54
3.8.2 Al-Mg-Si 系合金(6×××系)	56
3.8.3 Al-Zn-Mg 系合金(7×××系)	57
3.8.4 Al-其他元素合金(8×××系)	60

3.9 常用挤压铝合金及其特性	60
3.9.1 挤压材常用铝合金	60
3.9.2 几种典型挤压铝合金及其特性	63
第4章 铝合金的熔炼	71
4.1 铝合金熔炼的配料及其计算	71
4.1.1 工业纯金属——新料	71
4.1.2 废料——回炉料	72
4.1.3 配料计算	74
4.2 铝合金熔炼	75
4.2.1 熔炼目的	76
4.2.2 熔炼特点	76
4.2.3 熔炼方法	77
4.2.4 碎屑的复化	77
4.3 熔炼过程中的一些物理化学行为	78
4.3.1 炉内气氛	78
4.3.2 熔融态铝与气体间的相互作用	79
4.3.3 影响气体含量的因素	82
4.4 铝合金的熔炼工艺流程及操作	84
4.4.1 熔炼炉的准备	84
4.4.2 熔炼工艺流程和操作	85
4.5 合金元素和杂质含量控制	88
4.5.1 合金成分的控制	88
4.5.2 杂质含量的控制	89
4.6 主要铝合金的熔炼特点	90
4.6.1 软铝合金的熔炼	90
4.6.2 硬铝合金的熔炼	91
4.6.3 锻造铝合金的熔炼	93
4.7 铝及铝合金熔体净化处理	94
4.7.1 炉内净化处理	94
4.7.2 炉外净化处理	96
4.7.3 炉外在线净化处理新技术	97
4.7.4 铝合金精炼过程注意事项	99
第5章 铝合金铸造	101
5.1 概述	101
5.2 铸锭的结晶和组织	103

5.2.1	结晶过程的热交换	103
5.2.2	铸锭的结晶	104
5.2.3	结晶过程	107
5.2.4	铸锭的典型结晶组织	108
5.3	晶粒细化	109
5.3.1	晶粒细化的一般原理	109
5.3.2	晶粒细化的途径	110
5.4	铸造工艺参数与铸锭质量的关系	110
5.4.1	冷却速度	110
5.4.2	铸造速度	111
5.4.3	铸造温度	112
5.4.4	结晶器内的液面高度	113
5.5	铸造工具	113
5.5.1	扁锭结晶器	113
5.5.2	圆铸锭结晶器	114
5.5.3	液流转注和控制工具	115
5.6	铸造流程及操作	117
5.6.1	铸造前的准备	117
5.6.2	铸造开头	118
5.6.3	铸造过程中	119
5.6.4	收尾处理	119
第6章	铝合金挤压	121
6.1	铝合金挤压加工概述	121
6.1.1	挤压生产技术的发展简况	121
6.1.2	挤压成型的特点	122
6.1.3	挤压方法的分类	123
6.2	铝合金挤压的基本变形条件与工艺特点	125
6.2.1	铝合金挤压时金属流动特性	125
6.2.2	挤压时金属的流动	126
6.2.3	缩尾与成层	126
6.2.4	影响金属流动的主要因素	127
6.2.5	影响挤压力的主要因素	128
6.2.6	铝合金挤压制品的组织特性	128
6.3	铝合金挤压制品的力学性能	130
6.3.1	力学性能的不均匀性	130

6.3.2 挤压效应·····	131
6.3.3 影响挤压效应的因素·····	131
6.4 挤压工艺参数的选择·····	132
第7章 铝合金板、带轧制 ·····	137
7.1 轧制理论基础·····	137
7.1.1 轧制的基本概念·····	137
7.1.2 轧件的咬入·····	139
7.1.3 宽展·····	142
7.1.4 轧制时的前滑与后滑·····	143
7.1.5 轧制速度与变形速度·····	144
7.1.6 轧制力与传动力矩·····	145
7.2 热轧过程中的温度变化·····	150
7.2.1 热辐射引起的温降·····	150
7.2.2 热对流引起的温降·····	151
7.2.3 因轧辊热传导引起的温降·····	151
7.2.4 因变形功引起的温升·····	151
7.3 铝合金轧制坯料的准备与质量要求·····	152
7.3.1 铸锭的制备·····	152
7.3.2 铸锭铣面·····	153
7.3.3 铸锭及包铝板的蚀铣·····	154
7.3.4 铸锭加热·····	154
7.4 热轧·····	155
7.4.1 热轧制度的设计·····	155
7.4.2 热粗轧、热精轧轧制规程的制定·····	158
7.4.3 热精轧张力控制·····	158
7.4.4 热轧时的冷却与润滑·····	159
7.5 冷轧·····	160
7.5.1 冷轧基本概念·····	160
7.5.2 铝合金冷轧压下制度·····	161
7.5.3 铝合金冷轧张力·····	162
7.5.4 冷轧工艺润滑·····	163
7.5.5 冷轧轧制油的理化指标·····	164
7.5.6 铝及铝合金薄板的精整技术·····	165
7.5.7 铝合金板带加工过程热处理·····	169
7.5.8 制定铝合金板带工艺流程的原则·····	171

第 8 章 铝合金的热处理技术	172
8.1 前言	172
8.2 提高强度的热处理	172
8.2.1 固溶和淬火处理	173
8.2.2 时效和析出处理	175
8.2.3 挤压在线热处理	176
8.3 改善加工性能的热处理	177
第 9 章 铝合金的表面氧化处理	180
9.1 装饰性氧化	181
9.1.1 化学氧化	181
9.1.2 电化学氧化	183
9.2 硬质阳极氧化	187
9.2.1 硬质阳极氧化的特点、用途和类型	187
9.2.2 硬质阳极氧化工艺	188
9.3 特种阳极氧化	190
9.3.1 瓷质阳极氧化	190
9.3.2 阳极氧化与丝网印刷工艺	192
9.4 染色与着色	195
9.4.1 吸附染色法（即化学染色法）	196
9.4.2 电解着色	198
9.4.3 整体发色法（或一步电解发色法）	200
9.5 封闭处理	200
9.5.1 热水封闭	201
9.5.2 蒸汽封闭	201
9.5.3 盐溶液封闭	201
参考文献	203

绪 论

0.1 铝加工产业总论

铝是工业生产中的重要原材料,铝及其合金广泛地应用于航空、机械制造、国防、交通、电器和无线电、原子能、化学、建材、食品和日用品工业等方面。铝加工产业包括氧化铝制备,原铝的电解生产,铝合金的熔炼与铸造,铝及铝合金板、带、条、箔材,管、棒、型、线材,锻件和模锻件,粉材及深加工产品的生产与经营。它是一个涉及面很广,对国防军工现代化、国民经济发展和人民生活水平提高有重大影响的行业,是一个技术含量和附加值很高的产业。发展铝加工产业不仅有巨大的社会效益,而且有明显的经济效益。

近年来,铝加工产业发展十分迅猛,成为很多国家和地区的支柱产业之一。世界铝及铝加工产业发展很快,已具有相当规模,中国已成为铝业大国,但还不是铝业强国,而且产品的比例仍不够协调,需要加大产业与产品结构调整。中国的年增长速度已经连续多年大大高于世界各国平均水平,在不久的将来很快会赶上世界先进水平。

0.2 氧化铝生产技术

氧化铝生产是铝产业生产的第一道工序,氧化铝是从铝矿石中提炼出来的,采用的生产方法很多,这些方法大致可归纳成三类:碱法、酸法、酸碱联合法。目前工业生产大都采用碱法从铝矿石中制取氧化铝,根据矿石中氧化铝转入铝酸钠溶液方法的不同,可分为烧结法、拜耳法和拜耳烧结联合法。

1887—1892年奥地利化学家 K. J. 拜耳发明了生产氧化铝的拜耳法,用拜耳法处理高品位铝土矿,特别是处理三水铝石型矿石时,流程简单,作业方便,产品质量好,经济效果极佳。目前,全世界 90%以上的氧化铝是用拜耳法生产的。

法国人勒·萨特里于 1858 年就提出了碳酸钠烧结法,烧结碳酸钠和铝土矿组成的炉料得到固体铝酸钠的熟料,将其用稀碱溶液溶出便可得到铝酸钠溶液,再往溶液中通入 CO_2 气体,促使铝酸钠分解析出氢氧化铝,氢氧化铝经脱水燃烧后便得产品氧化铝。

1880 年,米尤列尔提出了往碳酸钠、铝土矿炉料中添加石灰(石灰石)再进行烧结,把

碳酸钠烧结法发展为碱石灰烧结法的建议。加入石灰具有重大意义，由于它可以在很大程度上减弱 SiO_2 的危害，使 Al_2O_3 和 NaO 的损失大为减少，因而使烧结法对处理高硅铝土矿和各种铝硅酸盐有了实际应用价值。

尽管烧结法生产和拜耳法生产有区别，但都是利用化学反应的方法进行化工单元操作。所以归结到一点，氧化铝生产是利用化学反应的方法，通过各种类型的化工单元操作将铝矿石中的氧化铝提炼出来。

0.3 原铝电解生产技术

原铝的工业生产中一直采用冰晶石—氧化铝熔盐电解法。铝矿石在专门的氧化铝厂生产出高纯度的氧化铝作为电解生产原料。白色的氧化铝粉末熔点很高（ 2050°C ），若采用直接熔化生产铝困难很多。但固体氧化铝可以部分地溶解在熔点较低的冰晶石熔融液体中形成均匀熔体，并且此熔体具有良好的导电性，这就可以使铝的电解生产在低于氧化铝熔点很多的情况下进行。铝电解的原理是使直流电通过以氧化铝为原料、冰晶石为溶剂组成的电解质，在 $950\sim 970^\circ\text{C}$ 下使电解质溶液中的氧化铝分解为铝和氧。可用下式表示：



由于比重的差别在阴极上析出的铝液汇集于电解槽槽底，而在阳极上析出二氧化碳和一氧化碳气体，铝液从电解槽中析出，经过净化去除氢气、非金属和金属杂质并澄清后，铸成各种铝锭。

0.4 铝合金熔铸生产技术

熔铸是变形铝加工的第一道工序，为轧制、锻造、挤压等生产提供合格的锭坯，铸锭质量的高低直接与各种铝材的最终质量密切相关。熔铸分为熔炼和铸造两个环节，熔炼的基本目的是熔炼出化学成分符合要求，并且获得纯洁度高的铝合金熔体，为铸造成各种形状的铸锭创造有利条件。铸造是将符合铸造要求的液体金属通过一系列浇注工具浇入具有一定形状的铸模中，冷却后得到一定形状和尺寸的铸锭的过程。要求所铸出的铸锭化学成分和组织均匀、内外质量好、尺寸符合技术标准。

合金材料的组织和性能，除了工艺条件的影响外，还要靠化学成分来保证。如果某一成分或杂质一旦超出标准，就要按废品处理，造成很大的损失。同时，在合金成分范围内对一些元素含量进行调整，可提高铸锭成形性，减少裂纹废品的产生，获得化学成分均匀并且符合要求、纯洁度高的铝合金熔体。

无论是冶炼厂供应的金属或回炉的废料，往往含有杂质、气体、氧化物或其他夹杂物，必须通过熔炼过程，借助物理或化学的精炼作用，排除这些杂质、气体、氧化物等来提高熔体金属的纯洁度。多年来，铝合金制品对铸锭的内部质量尤其是清洁度的要求不断提高，而熔体净

化是提高铝熔体纯洁度的主要手段。熔体净化可分为炉内处理和在线净化两种方式。

1. 炉内处理

炉内熔体处理主要有气体精炼、溶剂精炼和喷粉精炼等方式。炉内处理技术的发展较慢,国内只有 20 世纪 90 年代中期出现的喷粉精炼相对较新,其除气除渣效果较气体精炼和溶剂精炼稍好,但因精炼杆靠人工移动,精炼效果波动较大。

国外先进的炉内净化处理都采用了自动控制,较有代表性的有两种,一种是从炉顶或炉墙向炉内熔体中插入多根喷枪进行喷粉或气体精炼,但由于该技术存在喷枪易碎和密封困难的缺点并未广泛应用。另一种是在炉底均匀安装多个可更换的透气塞,由计算机控制精炼气流和精炼时间,该方法是比较有效的炉内处理方法。

2. 在线净化

炉内处理对铝合金熔体的净化效果是有限的,要进一步提高熔体纯洁度,尤其是进一步降低氢含量和去除非金属夹杂物,必须采用高效的在线净化技术。

(1) 在线除气

在线除气装置是各大铝熔铸厂重点研究和发展的对象,种类繁多,典型的有 MINT 等采用固定喷嘴的装置和 SNIF、Alpur 等采用旋转喷头的设备。我国从 20 世纪 80 年代末起不少厂家先后从国外购买了 MINT、SNIF、Alpur 等装置,此后,在引进装备的基础上,也自行开发了多种除气设备,这些除气设备都采用 N_2 或 Ar 作为精炼气体,能有效去除铝熔体中的氢。

(2) 熔体过滤

过滤是去除铝熔体中非金属夹杂物最有效和最可靠的手段,从原理上讲有滤饼过滤和深层过滤之分。过滤方式有多种,效果最好的有过滤管和泡沫陶瓷过滤板。床式过滤器体积大,安装和更换过滤介质费时费力,仅适用于大批量单一合金的生产,因而使用的厂家较少。在我国目前很少应用,其最新的进展是挪威科技大学等正研制的紧凑深床过滤器。该装置中,铝液向下流动,装置底部中央有一透气塞加入惰性气体,与透气塞上方的铝液上升管形成一个气体提升泵,可调节出口金属水平,目的是在提高过滤效率的同时,更有效地利用过滤球,此装置小巧紧凑,易于装填、清空和移动。刚玉管过滤器过滤效率高,但价格较昂贵、使用不方便,在日本使用较多。相反,泡沫陶瓷过滤板因使用方便、过滤效果好、价格低,在全世界广泛应用。

(3) 晶粒细化

众所周知,在铝液中加入晶粒细化剂,可以明显改善铸锭的组织,晶粒细化的方法有多种,使用最广泛的是二元合金 Al-Ti 和三元合金 Al-Ti-B,产品主要有 Al-4Ti 和 Al-5Ti-1B 块状或棒状细化剂,块状在调整好铝熔体成分后加入,而棒状在铸造流槽中加入,细化效果显著提高,产品有 Al-5Ti-1B、Al-5Ti-0.2B、Al-3Ti-1B、Al-6Ti 等,国内很多厂家在生产高质量产品时,一般采用进口的棒状细化剂。

20 世纪 90 年代以来,特别是 21 世纪初,国内熔铸技术得到了迅速的发展和提高,不断追求“提质(提高质量)、降耗(降低能耗)和减损(减少烧损)”,某些方面甚至达到了国际先进水平。但从整体上看,我国的熔铸技术水平同国际先进水平相比,还存在一定的差距。

铸锭质量的好坏不仅取决于液体金属的质量,还与铸造方法和工艺有关。目前国内应用较多的是不连续铸造(锭模铸造)、连续铸造及半连续铸造。半连续铸造是世界上应用最普遍、历史最悠久的铝合金铸造技术,对于铝合金铸造,除达到铸锭成型的基本目的之外,各铝加工