

“十一五”国家重点图书出版规划项目

中国有色金属丛书
中国有色金属工业协会组织编写

Al 铝材表面处理

朱祖芳 主编
王祖光 主审

Nonferrous

 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



铝材表面处理

中国有色金属工业协会组织编写

 中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

铝材表面处理/朱祖芳主编. —长沙:中南大学出版社,2010. 12
ISBN 978-7-5487-0187-3

I. 铝... II. 朱... III. 铝—金属表面处理 IV. TG178

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 012934 号

铝材表面处理

朱祖芳 主编

☐责任编辑 田荣璋

☐责任印制 文桂武

☐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 长沙市华中印刷厂

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 22.5 ☐字数 557 千字

☐版 次 2010 年 12 月第 1 版 ☐2010 年 12 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-0187-3

☐定 价 79.00 元

图书出现印装问题,请与出版社调换

中国有色金属丛书



NMS 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

张永鉴

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

中南大学出版社

乐维宁	中铝国际沈阳铝镁设计研究院
许 健	中冶葫芦岛有色金属集团有限公司
刘同高	厦门钨业集团有限公司
刘良先	中国钨业协会
刘柏禄	赣州有色冶金研究所
刘继军	荏平华信铝业有限公司
李 宁	兰州铝业股份有限公司
李凤轶	西南铝业(集团)有限责任公司
李阳通	柳州华锡集团有限责任公司
李沛兴	白银有色金属股份有限公司
李旺兴	中铝郑州研究院
杨 超	云南铜业(集团)有限公司
杨文浩	甘肃稀土集团有限责任公司
杨安国	河南豫光金铅集团有限责任公司
杨龄益	锡矿山闪星锑业有限责任公司
吴跃武	洛阳有色金属加工设计研究院
吴锈铭	中国有色金属工业协会镁业分会
邱冠周	中南大学
冷正旭	中铝山西分公司
汪汉臣	宝钛集团有限公司
宋玉芳	江西钨业集团有限公司
张 麟	大冶有色金属有限公司
张创奇	宁夏东方有色金属集团有限公司
张洪国	中国有色金属工业协会
张洪恩	河南中孚实业股份有限公司
张培良	山东丛林集团有限公司
陆志方	中国有色工程有限公司
陈成秀	厦门厦顺铝箔有限公司
武建强	中铝广西分公司
周 江	东北轻合金有限责任公司
赵 波	中国有色金属工业协会
赵翠青	中国有色金属工业协会
胡长平	中国有色金属工业协会
钟卫佳	中铝洛阳铜业有限公司
钟晓云	江西稀有稀土金属钨业集团公司
段玉贤	洛阳栾川钼业集团有限责任公司
胥 力	遵义钛厂
黄 河	中电投宁夏青铜峡能源铝业集团有限公司
黄粮成	中铝国际贵阳铝镁设计研究院
蒋开喜	北京矿冶研究总院
傅少武	株洲冶炼集团有限责任公司
瞿向东	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	金堆城钼业集团有限公司
王辉	株洲冶炼集团有限责任公司
王斌	洛阳栾川钼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
郑莆	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

在金属结构材料中,铝材仅次于钢铁材料居第二位。铝是有色金属中产量最多、运用最广的金属材料。2007 年中国铝挤压材产量已经接近 6 800 kt,冷轧铝板带材产量达到 4 200 kt。铝材的表面处理是扩大铝材使用范围、延长服役期限、提高装饰效果的关键工艺之一,一直受到铝材行业的特别关注,并且已经得到迅速的技术进步。以建筑铝型材表面处理为例,20 世纪 80 年代初期中国从日本和意大利引进铝型材阳极氧化技术和装备开始,至今已经发展到铝型材的阳极氧化、电泳涂漆、粉末静电喷涂和液相静电喷涂等,各门表面处理技术齐全,装备基本立足于国内的庞大的表面处理生产体系。铝板带材的表面处理,不仅建立了完善的辊涂生产线,也开始建设连续阳极氧化薄板带的生产装置。从铝材表面处理的技术水平和工艺完整性的角度分析,尤其在铝型材表面处理技术方面,中国已接近国际水平。

本书是“十一五”国家重点图书出版规划项目《中国有色金属丛书》之一种,作者在国内有关铝材表面处理专著的基础上,总结 20 年来中国铝材表面处理生产的经验撰写而成,全书分 16 章,涵盖了铝材表面处理的各个方面。主编承担了编写本书约一半的篇幅,其余邀请国内有色金属企业的高级工程师参与编写的。因此本书可以体现理论联系实际的特点,既总结了国内外的生产经验,又适当引入理论分析;既考虑到基础读物的知识性和普及性,又尽量反映工艺技术的国内外先进水平。

本书各章的撰稿人和审核人涉及到 7 个单位 10 人,编、审人员,主要邀请北京有色金属研究总院、福建南平铝厂等有色金属系统内各单位中多年从事铝材表面处理工作的资深高级工程师撰稿,第 1、2、5、6、9、14 和 15 章由朱祖芳执笔编写的;第 3 章由汪平执笔编写的;第 4 章由蔡锡昌执笔编写的;第 7 章由孙凤仙执笔编写的;第 8 章由来永春执笔编写的;第 10 章由纪红执笔编写的;第 11、12、13 和 16 章由余泉和执笔编写的;最终由主编朱祖芳统稿。有机聚合物涂层工艺即第 11 章、第 12 章和第 13 章,分别邀请王争、戴悦星和张翼鹏先生担任初审,全书由王祝堂先生审定。没有大家同心合力的辛勤工作,本书是不可能完成的。主编对于下列各位接受邀请并努力完成编、审工作的同仁,表示衷心的感谢。此外还特别要感谢有色金属系统外的企、事业单位的诸位先生的帮助,他们是黄岩精细化学品公司蔡锡昌先生、北京师范大学物理系来永春先生,中国铝塑板协

会专家委员会张翼鹏先生。

尽管本书诸位作者竭尽全力地工作，希望在促进铝材表面处理技术的提高方面尽微薄之力，但是铝材表面处理的技术和工艺的发展很快，同时表面处理涉及的知识面又很宽，本书不尽之处在所难免，敬请业内专家和读者不吝指正。尤其本书有关安全和环保的内容，我国的技术起步比较晚，表面处理的生产思路和工艺路线多种多样，而有关技术法规还正在不断完善之中，同时环境保护的技术指标和相关要求也在不断提高，尽管本书作者及相关人士作了很大努力，仍很难满足读者的期望。目前中国正在制定表面处理的安全和环保的技术标准，待有关法规颁布之后，本书的第 16 章应该随之修正和提高，以便达到尽可能完善的水平。

朱祖芳 敬识

2008 - 12 - 03

目 录



第1章 概论	1
1.1 铝的优点和缺点	1
1.2 铝的物理性质	1
1.3 铝的化学性质和表面钝性	3
1.3.1 铝的热力学稳定性	3
1.3.2 铝及铝合金的氧化膜	4
1.4 铝的腐蚀	5
1.4.1 铝自然氧化膜的稳定性	5
1.4.2 铝的局部腐蚀形态	6
1.5 铝的表面保护处理技术	8
1.5.1 阳极氧化处理	9
1.5.2 化学转化处理	10
1.5.3 有机物涂装处理	10
1.5.4 电镀或化学镀处理	11
参考文献	11
第2章 铝阳极氧化与阳极氧化膜的基础知识	12
2.1 概述	12
2.2 铝的阳极氧化过程	13
2.2.1 铝在各种电解质溶液中的阳极行为	13
2.2.2 铝阳极氧化的反应	15
2.2.3 阳极氧化膜微孔的形成	19
2.3 阳极氧化膜的结构	19
2.3.1 阳极氧化膜的结构的直接观测	19
2.3.2 阳极氧化膜的结构模型和参数	22
2.4 多孔型阳极氧化膜的厚度、结构和成分	24
2.4.1 阻挡层的厚度、结构和成分	24
2.4.2 多孔层的厚度和结构	25
2.4.3 多孔层的成分及分布	27
2.5 阳极氧化膜的生长机理	29
2.5.1 阻挡层上微孔的萌生	29
2.5.2 多孔层微孔的生长和发展	30
参考文献	31

第3章 铝材的化学预处理

33

3.1 脱脂	34
3.1.1 概述	34
3.1.2 铝材表面的原始状态	34
3.1.3 化学脱脂剂的类型	35
3.1.4 化学脱脂槽液的配制和工艺条件	36
3.1.5 脱脂缺陷及对策	37
3.2 化学抛光	38
3.2.1 化学抛光概述	38
3.2.2 光亮度表述	39
3.2.3 化学抛光机理	40
3.2.4 以磷酸为基的化学抛光工艺	42
3.2.5 磷酸为基的化学抛光设备	43
3.2.6 化学抛光操作和工艺条件	44
3.2.7 化学抛光的缺陷及对策	45
3.3 铝的浸蚀	46
3.3.1 碱浸蚀	46
3.3.2 酸性浸蚀	50
3.4 除灰	51
3.4.1 概述	51
3.4.2 硝酸除灰	51
3.4.3 硫酸除灰	52
参考文献	53

第4章 铝合金的阳极氧化

54

4.1 硫酸阳极氧化	54
4.1.1 硫酸阳极氧化工艺操作规范	54
4.1.2 阳极氧化工艺参数的影响	55
4.1.3 硫酸槽液中铝离子和杂质的影响	64
4.1.4 膜厚及其均匀性的控制	66
4.1.5 阳极氧化膜的缺陷及其防止方法	67
4.1.6 硫酸交流阳极氧化	69
4.2 草酸阳极氧化	69
4.3 其他溶液阳极氧化	71
4.3.1 铬酸阳极氧化	71
4.3.2 磷酸阳极氧化	72
4.4 通用阳极氧化生产工艺示例	73
参考文献	74

第5章 铝阳极氧化膜的着色	76
5.1 电解着色技术	76
5.2 锡盐电解着色工艺	78
5.2.1 典型的锡盐电解着色工艺	78
5.2.2 稳定锡盐着色槽液的方法	79
5.2.3 添加剂的开发现状与方向	80
5.2.4 锡盐电解着色的工艺参数	81
5.3 镍盐电解着色工艺	84
5.3.1 镍盐电解着色的优缺点	84
5.3.2 交流镍盐电解着色	84
5.3.3 “直流”镍盐电解着色	86
5.4 电解着色机理	88
5.4.1 阳极氧化膜中电解还原沉积物质的状态 和位置	89
5.4.2 电解着色时金属离子和氢离子的竞争放电	90
5.4.3 阻挡层及其散裂脱落	91
5.4.4 电解着色的电源波形	91
5.4.5 电解着色的散射光发色原理	92
5.5 干涉光发色的电解着色	93
5.5.1 多色化工艺的特点和发展	93
5.5.2 利用中间处理扩孔实现多色化	93
5.5.3 利用中间处理调整阻挡层实现多色化	95
5.5.4 典型的多色化着色工艺	95
5.6 铝阳极氧化膜的染色技术	96
5.6.1 多孔型阳极氧化膜是染色的基础	96
5.6.2 有机染料的选择	97
5.6.3 染料染色的机制	97
5.7 有机染料染色工艺	97
5.7.1 有机染料染色的工艺规范	98
5.7.2 染色溶液中杂质的影响	100
5.7.3 染色膜的封孔处理	100
5.8 无机颜料染色工艺	101
参考文献	102
第6章 铝阳极氧化膜的封孔	103
6.1 封孔技术概述	103
6.2 热-水合封孔处理工艺	104
6.2.1 沸水封孔和高温蒸气封孔	104
6.2.2 沸水封孔工艺参数的影响	105
6.2.3 热-水合封孔机理	107

6.3	冷封孔处理工艺	110
6.3.1	溶液成分	110
6.3.2	工艺参数	111
6.3.3	后处理	112
6.3.4	工艺规范	114
6.3.5	冷封孔的机理	114
6.4	其他无机盐封孔处理工艺	116
6.4.1	铬酸盐封孔处理	116
6.4.2	硅酸盐封孔处理	117
6.4.3	乙酸盐中温封孔处理	117
6.5	环境友好中温封孔工艺	119
6.5.1	无镍中温封孔处理	119
6.5.2	无重金属中温封孔处理	121
6.6	有机物封孔工艺	121
6.6.1	有机酸封孔处理	121
6.6.2	非水溶液的有机物封孔处理	123
6.7	封孔品质的检测方法	123
	参考文献	125
第7章	铝材硬质阳极氧化	127
7.1	概述	127
7.1.1	铝合金材料对硬质阳极氧化的影响	127
7.1.2	硬质阳极氧化与普通阳极氧化	129
7.2	硬质阳极氧化工艺	129
7.2.1	硫酸硬质阳极氧化	129
7.2.2	草酸硬质阳极氧化	131
7.2.3	混合酸硬质阳极氧化	131
7.2.4	复合硬质阳极氧化	133
7.3	硬质阳极氧化工艺参数的影响	134
7.4	硬质阳极氧化生产操作方法	140
7.5	硬质阳极氧化膜的性能及检验	141
7.6	脉冲硬质阳极氧化膜的性能	146
7.7	铸造铝合金硬质阳极氧化	147
	参考文献	149
第8章	铝的微弧氧化	150
8.1	概述	150
8.2	微弧氧化设备与工艺	151
8.3	微弧氧化现象及其特点	154
8.4	微弧氧化膜的主要性能	157
8.4.1	微弧氧化膜的硬度及其分布	157

8.4.2 微弧氧化膜的耐磨特性	158
8.4.3 微弧氧化膜的耐蚀性能	159
8.4.4 微弧氧化膜的绝缘特性	160
8.4.5 微弧氧化膜的其他特性	160
8.5 微弧氧化技术的应用	161
参考文献	164
第9章 铝的电镀和化学镀	165
9.1 概述	165
9.2 铝的镀前预处理	165
9.2.1 常规化学预处理	166
9.2.2 特殊化学预处理	168
9.3 铝的电镀工艺	171
9.3.1 铝的镀锌层上电镀工艺	171
9.3.2 铝的阳极氧化膜上电镀工艺	174
9.3.3 铝上“直接”电镀工艺	175
9.4 铝的化学镀工艺	176
9.4.1 铝化学镀镍的工艺路线	176
9.4.2 化学镀镍工艺	178
9.4.3 铝化学镀镍层的加热后处理	181
参考文献	181
第10章 铝的化学转化处理	182
10.1 概述	182
10.1.1 化学转化处理的发展	182
10.1.2 化学转化的处理方法	183
10.2 水合氧化法	183
10.2.1 水合氧化膜的性能	183
10.2.2 水合氧化膜的反应历程	184
10.2.3 水合氧化膜的用途	185
10.3 铬酸盐转化法	185
10.3.1 铬酸盐转化膜的性能	186
10.3.2 铬酸盐转化膜的处理工艺	186
10.3.3 铬酸盐转化膜的反应历程	187
10.4 磷铬酸盐转化法	188
10.4.1 磷铬酸盐转化膜的性能	188
10.4.2 磷铬酸盐转化膜的处理工艺	189
10.4.3 磷铬酸盐转化膜的反应历程	190
10.5 无铬转化法	191
10.5.1 锆/钛盐类转化膜	191
10.5.2 稀土盐类转化膜	193

10.5.3	硅烷处理	195
10.5.4	溶胶-凝胶处理	196
10.5.5	有机酸转化处理	197
10.6	铝化学转化膜的检验	197
10.6.1	外观检验	197
10.6.2	膜厚检验	197
10.6.3	附着性检验	198
10.6.4	耐腐蚀性试验	198
	参考文献	198
第 11 章	铝阳极氧化膜的电泳涂漆	200
11.1	电泳涂料及涂装简介	200
11.1.1	电泳涂料的组成	200
11.1.2	铝材电泳涂料简介	200
11.1.3	铝材电泳涂漆特点	202
11.2	电泳涂装原理	203
11.3	铝材电泳涂装工艺	204
11.4	影响铝材电泳涂漆的主要因素	207
11.5	铝材电泳涂漆主要设备	209
11.6	铝材电泳涂漆产品的品质要求	211
11.7	铝材电泳涂漆产品常见缺陷及防治措施	212
11.8	铝材氧化、电泳工艺失误造成的缺陷	214
11.9	铝材彩色及消光电泳涂漆工艺	215
11.9.1	彩色及消光电泳	215
11.9.2	铝材彩色电泳涂漆原理	215
11.9.3	铝材彩色消光电泳涂漆工艺	216
11.9.4	铝材彩色消光电泳的特点	217
11.9.5	铝材彩色消光电泳工艺的优越性	217
	参考文献	218
第 12 章	铝材的静电喷涂	219
12.1	静电喷涂原理	219
12.1.1	粉末静电喷涂原理	219
12.1.2	液相静电喷涂原理	220
12.2	粉末静电喷涂	221
12.2.1	粉末涂料概述	221
12.2.2	粉末静电喷涂涂装工艺流程	223
12.2.3	粉末静电喷涂涂装主要设备	224
12.2.4	影响粉末静电喷涂涂装的主要因素	227
12.2.5	铝材粉末静电涂装产品质量要求	230
12.2.6	粉末静电喷涂产品常见缺陷及防治措施	231