

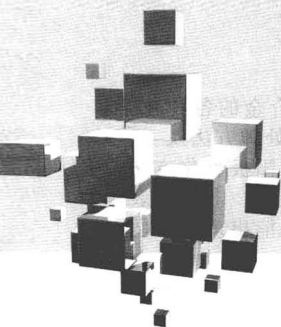
实用电镀技术丛书 **第二版**

中国表面工程协会电镀分会 组织编写

铝镁及其合金电镀与涂饰

李 异 黎樵燊 刘定福 等编著

化学工业出版社



实用电镀技术丛书 **第二版**

中国表面工程协会电镀分会 组织编写

铝镁及其合金电镀与涂饰

常州大学图书馆

藏书章

李

昂

黎樵森

刘定福

等编著



化学工业出版社

·北京·

本书从实用角度出发,理论联系实际地阐述了铝镁及其合金的各种化学、物理、力学及加工性能;铝镁及其合金制品的表面处理前后的处理方法及工艺;常用的化学转化膜工艺、阳极氧化处理工艺、最新研发的特种阳极氧化方法及工艺;同时还介绍了以转化膜为底层、表面再进行化学膜、电镀、电泳涂装及固体粉末喷涂处理方法的应用范围及应用实例,加工过程中可能出现的问题及解决方法。

本书内容丰富,系统性、综合性及操作实用性强,可供从事表面工程,特别是电镀化工、涂装行业等表面处理技术工作的工程技术人员、科技工作者参考,也可以作为大专院校有关专业的教师、学生进行教学、科研、实验的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

铝镁及其合金电镀与涂饰/李异,黎樵桑,刘定福等
编著. —2版. —北京:化学工业出版社,2012.5
(实用电镀技术丛书)
ISBN 978-7-122-13620-6

I. 铝… II. ①李…②黎…③刘… III. 铝镁合金-
镀合金-工艺学 IV. TQ153.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第028414号

责任编辑:杜进祥 宋薇
责任校对:宋夏

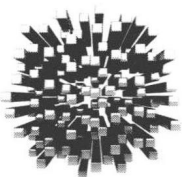
文字编辑:孙凤英
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印装:三河市延风印装厂
850mm×1168mm 1/32 印张15½ 字数473千字
2012年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:48.00元

版权所有 违者必究



序言

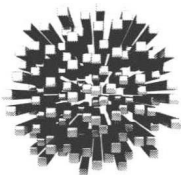
《实用电镀技术丛书》自 2003 年陆续问世以来，一直受到广大电镀工作者的热烈欢迎。在相同类型书籍已琳琅满目的今天，仍能取得如此好的成绩，绝不是偶然的。这首先是因为电镀技术面对的应用对象极其广泛，对专业书籍的需求量的确很大。通过电镀能达到保护金属基体免遭腐蚀、能使金属与非金属器件表面获得美丽的外观、可赋予器件表面机械物理与化学的各种特殊功能、得以用较薄的镀层来取代实体的贵重金属材料等。在各行各业中为实现这些目的，自然要极大地关注它。其次，应得益于丛书选定的各册内容都比较系统而且全面。它既包括了各个镀种的重点工艺，又有镀液与镀层的检测手段，还对大家十分关心的清洁生产及添加剂的选用问题列出专册加以论述。另外还有一个原因就是参加编写的人员均系国内知名的专家学者。他们不但学识渊博，而且有着相当好的生产实践经验。在编写过程中注意到了理论与实际的结合，并在选材上认真贯彻了这部丛书的实用二字。

电镀技术属于生产技术性学科。在学科发展上它有别于基础理论。一般来说，基础理论性学科的发展比较缓慢，它有一定的相对稳定性，而生产工艺性学科则不然，它的发展变化是相当快的。自《实用电镀技术丛书》开始出版至今已七年有余，在此期间有关电镀的新工艺、新技术、新材料、新设备会不断涌现。这些革新自然应当在书中有所体现，才能使之紧紧跟随上科学技术前进的步伐。显然，丛书

经修改后的再版很有必要。此外，任何一部书出版后，无论是学术内容上，还是文字叙述上总会存在一些令作者本人感到不够满意的地方，也就是说，总会存在一些令人遗憾之处。同时，还会有热心的读者提出一些理应修改的建设性意见，也需要有个改正的机会。这是个很普遍的现象。这也正是丛书再版时应当完成的任务。经过作者们的努力，我们期待着再版后的新书，会受到更多读者的欢迎。

郭砢桐

中国表面工程协会电镀分会名誉理事长



前言

铝镁及其合金质量轻、比强度高，并具有优良的物理、力学性能及加工成型性能，已成为继钢铁之后的第二、三大金属工程材料。广泛应用在国防、航空航天、机械制造、电子电器、交通运输、建筑装饰及日用品制造等工业部门。随着科学技术的飞速发展，市场对铝镁及其合金产品的需要不断增加，产品的应用范围还在不断扩大。

铝镁及其合金化学活性高，其制品在各种环境中容易被腐蚀。因此这些金属制品都必须经过表面处理，以便保护材料质量不受破坏的同时，还增添材料本身没有而希望拥有的性能，如耐蚀性、装饰性等。达到提高产品技术含量，满足高技术性能要求，提高产品的可靠性、观赏性，延长产品使用寿命的目的。增强产品在市场中的竞争能力。

铝镁及其合金产品的表面处理工艺一直以来是以转化膜工艺为主。近年来在传统的工艺基础上研发了新的特种表面处理工艺。另一方面则是以化学转化膜为底层，再对表面进行化学镀、电镀等镀覆各种金属镀层和涂覆各种有机涂层的表面处理新工艺、新技术和新方法。以便获得高质量的产品，满足越来越大的市场需求。

本书从实用出发，除了阐述常用的表面处理工艺外，重点介绍铝镁及其合金制品表面所做的特种阳极氧化处理、各种化学镀、电镀、电泳涂饰、固体粉末喷涂及涂装新技术、新工艺、新方法及其研究成果和生产应用实例。编写中力求理论联系实际，以应用技术为主，为科技开发及制造业服务，以供广大从事表面工程技术行业等领域的科技工作者、工程技术人员、大专院校有关专业的师生参考。

本书由华南理工大学李异负责筹组织编写并编写第一章至第四章，刘定福编写第七章、第八章，广东工业大学黎樵桑编写第五章、

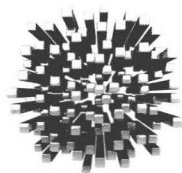
第六章。张超玲、李桢、杨成、莫桂惠等协助完成。

在编写过程中参考了大量的国内外有关著作及文献资料。谨在此向原著及文献的作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限及实际经验不足，难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正，并多提宝贵意见。

编著者

2012 年 1 月于华南理工大学



目录



第一章 概述 1

第一节 铝镁及其合金的开发与应用	1
一、铝及其合金的开发与应用	1
二、镁及其合金的开发与应用	2
第二节 铝及铝合金的性能	4
一、铝的物理性能	4
二、铝及其合金的力学性能	5
三、铝及其合金的加工性能	5
四、铝及其合金的耐蚀性能	6
第三节 镁及其合金的性能	9
一、镁及镁合金的物理性能	9
二、镁的力学性能	10
三、镁及镁合金的加工性能	11
四、镁及其合金的耐蚀性能	11
第四节 铝镁及其合金表面处理	14
一、铝镁及其合金表面处理的意义	14
二、铝镁及其合金表面处理的方法	15
第五节 铝镁及其合金表面处理前的准备	18
一、制品表面处理前准备工作的重要性	18
二、影响铝镁及其合金表面处理质量的因素	18
三、铝镁及其合金制件的预处理方法	20
四、铝镁及其合金制件表面预处理的质量要求	21

第二章 铝镁及其合金制件的前处理..... 26

第一节 制件表面的机械整平	26
一、机械整平的意义	26
二、制件表面的磨光	26
三、机械抛光	27
第二节 铝镁及其合金制件的表面除油	31
一、有机溶剂除油	31
二、铝镁及其合金表面化学除油	38
三、电化学除油	47
四、表面活性剂与常温除油	50
五、超声波强化除油	57
第三节 铝镁及其合金表面除膜与抛光	59
一、铝镁及其合金表面膜的退除	59
二、铝镁及其合金的化学抛光	62
三、铝镁及其合金电化学抛光	78
第四节 铝镁及其合金的浸蚀、出光及砂面处理	89
一、铝及铝合金的浸蚀	89
二、铝及铝合金浸蚀后出光	90
三、镁及镁合金的酸洗	90
四、铝合金的砂面处理	91

第三章 铝镁及其合金的化学转化膜及着色..... 93

第一节 化学转化膜概述	93
一、化学转化膜的定义	93
二、化学转化膜的性能及用途	94
三、化学转化膜的应用范围	95
四、化学转化膜的装饰功能	97
第二节 铝镁及其合金的化学氧化	97
一、铝及其合金的化学氧化原理	97
二、铝及铝合金化学氧化过程及工艺	98
三、铝合金压铸件的表面氧化处理	107
四、镁及镁合金化学氧化处理	111

第三节 铝镁及其合金的化学钝化处理	122
一、铝镁及其合金的化学钝化	122
二、铝镁及其合金无铬化学转化处理	126
三、铝镁及其合金的有机物处理	131
第四节 铝镁及其合金的磷化处理	132
一、铝及铝合金的磷化处理	132
二、镁及镁合金的磷化处理	139
第五节 铝镁及其合金的化学着色	141
一、铝及铝合金的化学着色	141
二、铝及铝合金化学氧化着色膜的性能	145
三、铝及铝合金的表面染色	145



第四章 铝镁及其合金阳极氧化 150

第一节 铝及铝合金的阳极氧化	150
一、铝的阳极氧化过程及成膜机理	150
二、铝及铝合金阳极氧化膜的结构	153
三、铝及铝合金阳极氧化膜的主要特性	154
四、铝阳极氧化膜的应用	157
五、铝及铝合金阳极氧化处理过程	158
第二节 铝及铝合金阳极氧化方法及工艺	160
一、铝及铝合金的硫酸阳极氧化	160
二、铝及铝合金的草酸阳极氧化	166
三、铬酸阳极氧化工艺	171
四、其他的阳极氧化方法	174
五、铝及铝合金阳极氧化应用实例	180
第三节 铝及铝合金的特种阳极氧化	183
一、铝及铝合金的硬质阳极氧化	183
二、铝及铝合金的瓷质阳极氧化	188
三、铝及铝合金的微弧阳极氧化	194
四、特种阳极氧化处理法应用实例	200
第四节 铝及铝合金阳极氧化膜着色与封闭	204
一、概述	204
二、铝及铝合金阳极氧化膜着色处理	207

三、铝及铝合金阳极氧化膜封闭·····	215
四、铝及铝合金的其他装饰处理·····	221
第五节 镁合金的阳极氧化和着色·····	225
一、镁合金阳极氧化与着色·····	226
二、镁合金微弧阳极氧化·····	231

第五章 铝镁及其合金的化学镀 ····· 234

第一节 概述·····	234
一、化学镀的特点·····	234
二、化学镀的基本原理与工艺·····	235
三、铝镁合金化学镀的特点及要求·····	247
四、铝镁及其合金化学镀的方法·····	249
第二节 铝及铝合金的化学镀工艺·····	256
一、铝及铝合金的化学镀镍工艺·····	256
二、铝及铝合金表面化学镀其他金属的工艺·····	287
第三节 镁合金表面化学镀·····	292
一、镁及镁合金化学镀前一般预处理工艺·····	292
二、镁及镁合金浸锌-预镀铜后再化学镀镍·····	293
三、镁及镁合金的直接化学镀镍·····	295
四、镁合金在其他预处理后再化学镀·····	298
五、镁合金表面化学镀镍层的成分、组织和性能·····	303
六、镁合金化学镀液的维护和使用周期·····	306
七、镁合金化学镀其他金属和合金·····	306

第六章 铝镁及其合金的电镀 ····· 312

第一节 概述·····	312
一、电镀及其基本原理·····	312
二、铝镁及其合金表面电镀的应用、特点和要求·····	326
三、铝镁及其合金电镀的主要方法·····	327
第二节 铝及铝合金电镀的工艺·····	329
一、铝及铝合金浸镀后电镀·····	329
二、铝合金阳极氧化后和化学转化后电镀·····	343
三、铝合金表面上直接电镀金属·····	348

四、铝合金条件化处理后电镀	356
五、化学镀镍后电镀	357
六、铝及铝合金的电刷镀	359
第三节 镁合金的电镀	361
一、概述	361
二、镁合金浸锌-预镀铜后电镀	362
三、镁合金化学镀镍后电镀	364
四、镁合金的其他电镀工艺	365

第七章 铝镁及其合金电泳涂装 370

第一节 电泳涂装的原理及其特点	370
一、电泳涂装的原理	370
二、电泳涂装的特点	371
第二节 电泳涂料的分类和特点	372
一、电泳涂料的分类	372
二、电泳涂料的特点	375
第三节 电泳涂装工艺及主要设备	376
一、电泳涂装的种类及工艺流程	376
二、电泳涂装主要设备	377
第四节 铝镁及其合金电泳涂装	382
一、铝镁及其合金电泳涂装的特点与要求	382
二、铝合金电泳涂装工艺	383
三、镁合金电泳涂装工艺	403

第八章 铝镁及其合金静电粉末涂装 420

第一节 静电粉末喷涂的原理及其特点	420
一、高压静电粉末喷涂的原理	420
二、摩擦静电粉末喷涂的原理	421
三、静电粉末喷涂的特点	424
第二节 粉末涂料的特点和分类	424
一、粉末涂料的特点	425
二、粉末涂料的分类	425
第三节 建筑铝型材粉末涂料	426

一、建筑铝型材粉末涂料的性能要求·····	426
二、建筑铝型材用聚酯粉末涂料·····	428
三、建筑铝型材用粉末涂料的发展方向·····	430
第四节 静电粉末喷涂工艺及设备·····	432
一、静电粉末喷涂工艺流程·····	432
二、静电粉末喷涂主要设备·····	433
第五节 铝镁及其合金静电粉末喷涂·····	439
一、铝镁及其合金粉末喷涂的特点与要求·····	439
二、铝合金静电粉末喷涂工艺·····	440
三、镁合金静电粉末喷涂工艺·····	464

 参考文献·····	471
--	-----

第一章 概述

第一节

铝镁及其合金的开发与应用

一、铝及其合金的开发与应用

铝在地壳中的含量很大，仅次于氧和硅，是最多的金属元素之一。在各种金属的产量中仅次于钢铁。1980 年全世界有色金属的产量为 3500 万吨，而铝的产量为 1600 万吨，差不多占了一半。在各种金属的产量中，铝仅次于钢铁，占第二位。我国有丰富的铝矿产资源，是世界上生产电解铝的大国。随着我国工业化的发展，铝材及其工业制品的生产已得到很大的增长。目前世界上铝及其合金制品的产量在以 5%~9% 的速度增长着。

铝及铝合金属于轻金属，它的密度小 (2.7g/cm^3)，约为钢铁的 $\frac{1}{3}$ 。因此，比强度高，导热性和导电性好、无磁性、无低温脆性、反光性能好，色泽亮丽美观。铝及铝合金的可塑性及成型性好，在冷态和热态下都能挤压成型，或碾压、模压成产品。此外，也能切割和焊接、铸造，易于加工制作，铝制品具有良好的耐蚀性和装饰性。在铝中加进镁、硅、锰、锌、铜等合金元素制成的合金，可以大大提高其机械强度和力学性能。铝合金由于重量轻、强度高，首先被用于航空工业上制造飞机及航天产品。随着科学技术的不断创新及工业的迅速发展，铝及铝合金已广泛应用于电子、电器、机械制造、交通车辆、化工食品设备及包装，建筑型材及装饰灯具，以及日常生活中的各种用具的制造。



铝合金不仅大量地应用于地面及空间的各个领域，同时也应用于海洋设施方面。发达国家早已应用高级铝合金，通过表面处理技术和先进的防护措施制造潜艇、登陆快艇等服务于海军。民用方面则制造游艇、邮轮、海上采油平台设施等。随着铝合金高级品种的不断增多以及铝合金表面处理技术的不断开发和创新，铝合金将会更多地用于高端的工业设备和国防航天领域上。

铝合金的种类很多，有多种名称及各种系列，在工业上用得较多的是铸造铝合金和防锈铝等。铸造铝合金为铝硅和铝镁合金，它们的强度高，密度小，在海水中都有良好的稳定性和耐蚀性，且具有良好的铸造性能，用变形的处理方法可以大大地提高它的力学性能。防锈铝是由铝镁锰组成的合金，它的耐蚀性和抛光性能优良，并能长期保持其光亮表面。因此，多用于制造各种机械设备及零部件，以及各种民用器具等。

二、镁及其合金的开发与应用

镁合金是现代工业用的合金中密度最小、最轻的一种合金，它的密度为 1.74g/cm^3 ，约为铝的 $2/3$ 、钢铁的 $1/4$ 。镁在地壳中分布较广，约占地壳重量的 2.3% ，是第八种最丰富的元素。已知的 1500 种矿物中，镁的化合物占 200 多种。典型的镁矿是光卤石 ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、菱镁矿 (MgCO_3)、白云石 ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$)、海泡石 ($\text{Mg}_2\text{Si}_3\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、滑石或皂石 [$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$] 和水镁石 [$\text{Mg}(\text{OH})_2$]，其中以白云石分布最广；另外，海水和盐湖的水中也含有镁。镁的氯化物和硫酸盐都易溶于水，因此镁也存在于地下水

中。我国的镁资源十分丰富，由于过去技术落后，曾认为我国缺少镁矿，曾经一度用海水或青海盐湖水提炼镁，效率低，设备的腐蚀十分严重，因此生产成本极高。改革开放后，在青海、甘肃、宁夏、广东、广西等地发现白云石、菱镁矿等，开采了大量的镁矿，使镁的产量大大提高。我国在镁资源的储量、产量、出口量以及生产成本四个方面都占世界第一位。世界上目前镁金属产量为 (45~50) 万吨，我国年产量为 (20~30) 万吨，接近一半。但是由于镁合金开发应用的技术滞后，大部分的镁都是作为镁锭等低级产品出口，是一种典型的

以牺牲资源和环境为代价的原料出口型工业。因此，如何更好地发展镁合金的制造和加工技术，使镁资源的优势转变成经济优势，是摆在我国科技及工业上的一大课题。

由于镁合金具有优异的强度重量比，所以对于要求减轻重量有特殊意义的结构件，例如飞机、导弹、航空航天器材、卫星上的零部件，使用镁合金制造就很有价值。因此，镁合金就首先在航空、航天工业部门得以广泛的应用。近年来，由于科技的创新和发展，镁合金的制造和加工成本不断降低，使得镁合金也大量用于汽车的零配件和日用电器制造领域。镁合金已逐步成为继钢铁、铝合金之后的第三大金属工程材料，被称为“二十一世纪绿色工程材料”。

镁合金可以分为铸造镁合金和变形镁合金两大类，而铸造镁合金比变形镁合金用得更多、使用范围更广泛。铸造镁合金是航空工业领域用得最多的一种轻型合金材料。如用镁合金铸件替代铝合金铸件，在设计强度要求相同的条件下，可使工件的重量减轻 25%~30%。因此，已成为一种极为重要的结构材料，它主要用于比强度要求很高而防震性能又好的结构上，例如导弹引导系统、起落轮毂、发动机壳等零部件上。

镁合金按添加成分的不同，变形镁合金又可分为 Mg-Mn 系、Mg-Al-Zn 系、Mg-Zn-Zr 系、Mg-稀土系、Mg-Tb 系及 Mg-Li 系等系列产品。

按照腐蚀特性的不同，变形镁合金可分成两大类。

(1) 无应力腐蚀倾向的合金 这类合金有 Mg-Mn 合金、Mg-Mn-Ce 系列合金和 Mg-Zn-Zr 系列合金。

(2) 有应力腐蚀倾向的合金 这类合金有 Mg-Al-Zn 系列合金。

镁合金还可以分为可热处理强化合金和不可热处理强化合金两大类。对于不能热处理强化的合金，退火处理成为其唯一的热处理形式。对于可热处理强化的合金，热处理的形式则有退火、淬火及淬火人工时效。但是，所有变形镁合金主要都是靠控制加工过程而非靠热处理来达到其最高强度。因此，在一般情况下，镁合金淬火后不经过时效，只是在要求有高的屈服强度值和稳定组织（例如要求在高温情况下工作）时，才采用时效。原因是时效处理对提高镁合金的抗拉强度作用不大，反而会降低镁合金的塑性，但却能提高其屈服强度。

第二节

铝及铝合金的性能

一、铝的物理性能

铝的物理性能包括它的原子序数、相对原子质量、晶体常数、密度、熔点、沸点等晶体结构及热学性能，膨胀系数，电学性能等。具体例于表 1-1。

表 1-1 铝的各种物理性能

序号	性能名称	高纯铝(99.99%)	工业纯铝(99.5%)
1	原子序数	13	—
2	相对原子质量	26.985	—
3	晶格常数(20℃)/ $\times 10^{-10}\text{m}$	4.0494	4.04
4	密度(20℃)/(kg/m ³)	2.698	2.710
	(700℃)/(kg/m ³)	—	2.373
5	熔点/℃	660.24	650
6	沸点/℃	2060	—
7	熔解热/(J/kg $\times 10^5$)	3.961	3.894
8	燃烧热/(J/kg $\times 10^7$)	3.094	3.108
9	凝固体积收缩率/%	—	6.6
10	比热容(100℃)/[J/(kg $\cdot$ K)]	934.92	964.74
11	热导率(25℃)/[W/(m $\cdot$ K)]	235.2	222.6(O 状态)
12	线膨胀系数(20~100℃)/[$\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	24.58	23.5
	(100~300℃)/[$\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	25.45	25.6
13	音速/(m/s)	—	2625
14	电导率/(S/m)	64.94	59(O 状态) 57(H 状态)
15	电阻率(20℃)/ $\mu\Omega\cdot\text{m}$	0.0267(O 状态)	0.02922(O 状态) 0.03020(H 状态)
16	电阻温度系数/(n $\Omega\cdot\text{m}/\text{K}$)	0.1	0.1
17	体积磁化率/ $\times 10^{-7}$	6.27	6.26
18	磁导率/(H/m)	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
19	反射率($\lambda=2500\times 10^{-10}\text{m}$)/%	—	87
	($\lambda=5000\times 10^{-10}\text{m}$)/%	—	90
	($\lambda=20000\times 10^{-10}\text{m}$)/%	—	97
20	折射率(白光)/%	—	0.78~1.48
21	吸收率(白光)/%	—	2.85~3.92
22	辐射率/%	100	—