

铝合金表面处理膜层 性能及测试

朱祖芳 编著



化学工业出版社

铝合金表面处理膜层 性能及测试

朱祖芳 编著



化学工业出版社
· 北京 ·

铝合金表面阳极氧化和有机涂料涂装后的膜层性能,为研发、生产和用户广泛关注。本书简要地向读者介绍铝合金表面处理,着重分章阐述阳极氧化膜层和有机涂层的各项性能及其测试方法,包括性能的概念和含义、性能的意义、性能的影响因素、性能的表征方法、性能的测试手段等,列举了当前国内外各项性能的表征和测试标准。本书作者长期从事铝合金表面处理研究和开发工作,近年来参与制定了铝合金表面处理方面的多项国家标准。本书中包含了作者多年的实践经验和研究思考的成果。

本书是铝材开发机构和生产企业技术人员、铝合金表面处理科研和教学培训单位、有色冶金产品质量监督检验单位不可多得的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

铝合金表面处理膜层性能及测试/朱祖芳编著. —北京:
化学工业出版社, 2012. 2
ISBN 978-7-122-12672-6

I. 铝… II. 朱… III. 铝合金-金属表面处理
IV. TG178

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 217306 号

责任编辑: 段志兵
责任校对: 宋 玮

装帧设计: 杨 北

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 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 18½ 彩插 1 字数 309 千字 2012 年 4 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: 68.00 元

版权所有 违者必究

前言

经过 20 多年的发展，我国已成为变形铝合金加工工业名副其实的世界强国，尤其是铝合金建筑型材的表面处理技术，其工艺的多样性和先进性以及产品的质量都已经达到国际先进水平。除了传统的阳极氧化处理技术之外，铝合金材料的表面处理工艺中的化学转化处理、静电粉末喷涂、静电液相喷涂、阳极氧化/电泳涂装、铝合金板带卷材的辊涂和铝合金卷材连续阳极氧化等技术，在我国都已经实现工业化的批量生产，生产规模已经稳居世界首位。

我国目前建筑和装饰用铝合金挤压型材的表面处理中，阳极氧化处理（含电泳涂漆工艺）仍占有大约一半的市场规模。就技术问题和工艺难点而言，阳极氧化在理论与实践方面，都仍然占有特殊的技术位置。近几年来，铝合金板带材的辊涂工艺已经在我国得到广泛运用和发展，并且建立了许多条生产线，已经形成相当大的生产规模。铝合金卷材的连续阳极氧化的市场需求日趋迫切，而目前我国铝合金卷材的连续阳极氧化技术水平，如生产线设计、设备选型、工艺规范等却还处于起步阶段，远没有达到我国铝合金建筑型材阳极氧化技术的工艺水平。铝合金板带卷材的阳极氧化膜的质量，与板带卷材本身的组织结构关系非常大，也就是说，其质量与铝合金板带卷材的压力加工工艺路线关系很大，而在这方面的研究我国还不够具体和深入。此外铝合金机械零部件的硬质阳极氧化工艺或特殊阳极氧化工艺，目前也还不够规范化，产品质量还存在一些问题。总之，铝合金板带材和机械零部件（尤其是铝合金压铸件）的阳极氧化技术与建筑铝型材阳极氧化比较，就其技术难度和生产工艺规范的紧迫性而言是有过之而无不及的，但是我国目前的技术水平及工艺规模却远远落后于生产和市场的需要，也与国际先进水平存在一定的差距。

尽管我国建筑用铝合金挤压型材的阳极氧化生产的技术水平，已经达到国际先进的工艺水平和装备水平。但是就技术发展水平和产品质量而言，各地区发展还是非常不平衡的。我国铝合金阳极氧化生产的总体技术管理水平和全国产品的平均质量水平，与世界先进水平相比较仍然存在一定差距，从而制约着高质量产品发展和生产效率的提升，实际上也制约了企业利润水平的提高。尤其铝合金阳极氧化生产，在降低能源和资源消耗、减少污染物排放、促进良性

环境效应方面的技术水平，与国际先进水平的差距较大。究其原因，可能与目前工业生产的实际水平的地区不平衡性有关，尤其在工艺管理和人员素质等方面有很大的关系。环境效应问题的核心可能还是与生产管理人员的环境意识和质量意识，包括工艺管理、质量监测、质量标准和检测方法等的正确理解、掌握和贯彻实施的程度有很大关系。

20 世纪 80 年代中期，我国建筑用铝合金挤压型材的表面处理只有单一的阳极氧化技术，其工艺水准也只是处于引进国外技术、刚刚起步的阶段。1986 年，当时的中国有色金属总公司科技局，根据一些专家的意见及时草拟了《关于建筑铝型材阳极氧化膜性能测试方法和指标》的文件，在当时起到了规范铝合金建筑型材阳极氧化产品的质量和推动生产发展的极好作用。鉴于 1980 年代我国只有阳极氧化处理的单一工艺，该文件建议检测铝型材阳极氧化膜的六项性能。由于当时技术水平和检测方法的限制，该文件只对于目视外观色差、氧化膜厚度和封孔质量提出了具体的指标要求，而对于耐盐雾腐蚀性、耐磨性和耐光性（即以后定义的耐候性）只是提出一个监测项目，具体的检测方法和验收指标都没有做出具体规定，这实际上与当时国家标准尚不完备有关系。就我国目前生产情况和质量指标分析，尽管当时有色金属总公司文件的内容和要求还不够完善和具体，但是这个文件在当时起到了规范铝型材阳极氧化膜质量的良好作用。

20 世纪 90 年代之前，当时我国建筑铝型材表面处理膜层的检测方法和质量指标，基本上都等同采用国际标准或外国先进标准的规定，还根本谈不上建立我国自己的标准化质量体系，即便是铝型材阳极氧化膜的性能检测方法标准也不完备，同时我国铝型材产品表面处理膜层的性能数据积累又很不完整。20 多年来，我国铝合金建筑型材工业迅速发展，不仅生产规模和产品质量已经达到国际先进水平，相应的阳极氧化膜的检测方法及其性能指标的国家标准已经得到完善、扩充和提高，并且已经逐渐与国际标准和外国先进标准的方法和指标接轨，形成了我国自己的铝合金阳极氧化膜的标准化质量体系。

20 世纪 90 年代后半期以后的 10 多年中，铝合金的阳极氧化/电泳涂漆复合膜和有机聚合物静电喷涂膜的工艺技术，已经在我国铝型材生产中得到迅速发展和推广。铝合金建筑型材的静电喷涂工艺的规模已与阳极氧化工艺规模平分秋色，铝合金阳极氧化工艺不再是一统天下的铝合金型材的表面处理方法，铝合金建筑型材阳极氧化（含电泳涂漆）的市场比例也已经下降到建筑铝型材总产量的一半左右。与此同时，铝合金板带连续辊涂技术也得到迅速发展，铝合金材料表面有机聚合物涂层不仅具有色彩丰富、外观靓丽的新颖装饰

效果，而且在耐各种恶劣大气环境腐蚀、提高使用效果方面迈上新的高度。因此在铝合金表面处理膜层的性能项目及检测方法上，必须具有比阳极氧化膜更多、更新、更全面和更完善的内容，才可能与我国铝材表面处理生产的迅速发展和技术进步相适应，也才能够与国际先进水平接轨，从铝合金加工工业大国登上加工工业真正的强国地位。

在铝合金表面处理工业生产全面迅速发展和工艺技术进步的背景下，在国家质检部门和广大生产企业已经大量积累铝合金建筑型材阳极氧化膜和有机聚合物喷涂膜性能检测数据和试验方法的基础上，为了适应我国铝材表面处理膜层的不断提高质量的要求，也为了将我国国家标准与国际先进水平接轨，全国有色金属标准化委员会组织北京的国家有色金属质量监督检验中心和广州的华南有色金属产品质量监督检验中心，以及南平铝业有限公司、坚美铝型材厂有限公司、兴发铝业有限公司、闽发铝业股份有限公司等四个大型铝型材企业作为技术基地，对阳极氧化膜、阳极氧化/电泳涂漆复合膜和有机聚合物静电喷涂膜分别进行全面的在线产品性能测试和专题对比试验。截至 2006 年 3 月，两个质检中心、四家企业以及其他企业的试验数据已经超过一万个。在此基础上于 2006 年 4 月总结出版了试验报告会论文集（即《2006 年铝合金建筑型材出口贸易壁垒暨试验研究报告论文集》，中国金属通报，2006 年增刊，2006 年 4 月 6 日出版），发表有关性能检测的论文 34 篇。随后为了完善测试方法和增补试验数据，同时配合中国与日本共同申请国际标准《铝及铝合金阳极氧化复合膜总规范》的要求，继续补充进行性能测试和试验方法的验证，以及质量验收指标的核对，并有更多企业参与了这项试验工作，例如凤铝铝业有限公司、新合铝业有限公司和广亚铝业有限公司等。在这个基础上于 2008 年 9 月第二次出版了研制报告专辑（即《GB 5237 铝合金建筑型材研制报告专辑》，中国金属通报，2008 年增刊，2008 年 9 月 20 日出版），其中性能检测的文章 42 篇。2009 年 11 月，又汇集从 2008 年至 2009 年间的铝合金建筑型材标准与质量试验研究的研究报告 42 篇，第 3 次出版了研究专辑（即《铝合金建筑型材标准与质量研究论文专辑》，中国金属通报，2009 年增刊，2009 年 11 月 5 日出版）。上述资料集中发表的性能数据是我国工业生产的在线产品，对于了解和认识我国当前工业在线产品之质量水平非常重要。为此本书尽量收集和汇总上述三本报告专辑披露的国内试验数据，通过去粗取精、由点到面、由此及彼、由表及里的数据对比和整理，再配合国外发表的试验数据，试图说明和归纳出一些现象、规律和观点。还有一些没有公开发表的试验数据没有纳入上述三本论文专辑之中，将以“某某企业提供的试验数据”的说明引入本书。这些

试验数据之间可能有不一致之处，除少数内容本书有明确判断而有所选择外，鉴于实验数据都是各企业根据有关标准通过认真试验的非常珍贵的资料，本书在适当说明的基础上通常都已引用在内，供读者参考。

我国铝合金建筑型材产品的产量已占世界总产量的 60% 以上，并且大量出口到国外，本书收集的性能数据一定程度上也代表了当前在线产品的国际水平。为了说明某些性能特征和规律，本书也引用国外早期发表但并未过时的重要数据。但是日本提供的有关阳极氧化/电泳涂漆复合膜的性能数据，也是比较新的试验结果，本书给以特别的关注并尽量予以印证。尽管如此，笔者真诚地认为基于上述我国自己的技术数据作出的技术分析和质量判断，应该更加具有现实意义。

笔者在参与性能试验和总结试验数据时，增添了许多思考判别的空间，获得许多非常有益的心得、概念和结论，成为撰写本书内容的技术框架的基础和技术思路的前提。笔者在三个铝合金表面处理膜层总规范性质的国家标准的修订和制定过程中，即 GB/T 8013.1 (2007)《铝及铝合金阳极氧化膜》、GB/T 8013.2 (2007)《铝及铝合金阳极氧化复合膜》、GB/T 8013.3 (2007)《铝及铝合金有机聚合物喷涂膜》，曾经阅读、参考、研究和对比了相关的国际标准、欧洲标准、美国标准和日本标准，结合我国企业的试验实践，形成了自己的技术思路并对构建本书内容起了决定性作用。笔者长期从事铝合金阳极氧化的工艺研究、生产实践和技术开发，以及随后在北京国家有色金属质量监督检验中心的性能检测的经验和表面缺陷分析的实践，奠定了笔者撰写本书的技术基础。

在总结我国大量试验数据和制定国家标准的过程中，笔者从中受益匪浅。特别应该感谢的是全国有色金属标准化委员会葛立新女士等，国家有色金属质量监督检验中心何耀祖先生和姚伟先生等，坚美铝合金型材有限公司卢继延先生和戴悦星先生等，南平铝业公司的冯东生先生等，兴发铝业有限公司的陈维泗先生等，他们的经验和思路或者在具体的测试方法上都给予我很多的启发和帮助。笔者还要感谢本书引用的上述全国有色金属标准化委员会的论文专辑中发表数据的很多作者（引用时在参考文献中一一列出），并借此机会向论文作者 and 所有我接触过的和给予我帮助的朋友，以及所有生产第一线的有关同志表示由衷的谢意，没有他们在生产和检测第一线积累的大量实践经验和知识，也根本不可能完成本书的写作。笔者还要借此机会感谢有色金属研究总院长期共事的朋友，包括曾经做了大量研发工作而现在已经离开有色金属研究总院的同志，本人在成书过程中，时时想念他们的富有成效的研究工作和现场工作，这

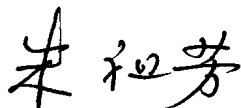
些成果也是形成本书思路和内容的基础，在这里请允许我表示敬意和感谢。

本书书名几经考虑和修改，决定为“铝合金表面处理膜层性能及测试”，内容虽然包括阳极氧化膜、阳极氧化/电泳涂漆复合膜和有机聚合物静电喷涂膜三大系列的性能及测试方法，似乎是从建筑用铝型材表面处理的现实情形出发的，但是本书叙述内容及相应的检测方法，并不限于建筑用铝合金型材的表面处理膜层，原则上同样适用于诸如铝合金板带材的表面处理膜层的性能检测、也适合于铝合金（含铸态铝合金）零部件硬质阳极氧化膜的性能检测等。本书在收集和组织撰写内容时，铝合金建筑型材以外的表面处理膜层的性能及检测要求，本书也适当选择和收集其他的重要性能及其检测方法，但是在内容上可能没有进行深度和广度的延伸，某些数据可能选自国外发表的相对而言比较早的资料。

本书分为三大部分。第1篇“铝及铝合金表面处理膜层基础知识”，分3章叙述，内容包括铝及铝合金的物理和化学性质、铝合金材料及铝合金表面处理的基础知识等；第2篇“铝及铝合金阳极氧化膜的性能及测试”，分5章叙述铝合金阳极氧化膜的各项物理、化学和力学等性能及检测方法，各项性能的定义、特征和物理意义，国内外标准对于有关性能的规定与说明、各项性能数据的国内外水平及其比较，检测方法与注意事项以及缺陷的成因与防治等；第3篇“铝及铝合金有机聚合物膜的性能及测试”，分5章叙述有机聚合物膜的各项性能要求、检测方法及性能检测结果。在第3篇中，既叙述电泳涂漆表面膜的性能及测试，又介绍有机聚合物静电喷涂膜的性能及测试。有关各项性能及相应测试方法，作为表面性能检测的方法而言，虽然必须注意其测试的适用范围，但是原则上同样可以适用于其他领域的铝合金表面处理膜层。本书每篇列出一个呼应型的参考文献表。

为方便阅读中查找资料，本书设置了4个附录，包括：铝表面处理膜层有关词汇的中英对照及释义，铝表面处理膜层的有关标准目录以及笔者发表的著作的目录和参与制订的国家标准目录。

本书是笔者花费心血最多、也是最为看重的作品，谨献给广大读者，希望对广大读者有所裨益。



于北京

目录

第1篇 铝及铝合金表面处理膜层基础知识

第1章 铝及铝合金的物理和化学性质	002
1.1 铝及铝合金的物理性质	003
1.2 铝及铝合金的化学性质及钝性	005
1.3 铝的腐蚀原因	007
1.4 铝的腐蚀形态	012
1.4.1 全面腐蚀和均匀腐蚀	012
1.4.2 局部腐蚀	013
第2章 铝合金材料简介	018
2.1 变形铝合金及铸态铝合金	018
2.1.1 变形铝合金系	018
2.1.2 变形铝合金状态	021
2.1.3 铸造铝合金	021
2.2 铝合金挤压型材和管、棒、线材	022
2.3 铝合金板带材	022
2.4 铸态铝合金及铝合金压铸件	026
第3章 铝及铝合金的表面处理	028
3.1 铝合金的阳极氧化处理	028
3.1.1 阳极氧化的表面预处理	028
3.1.2 阳极氧化	033
3.1.3 着色	037
3.1.4 封孔	040
3.2 铝合金的电泳涂漆处理	043
3.2.1 电泳涂漆原理	043
3.2.2 电泳涂装工艺	044
3.3 铝合金的静电喷涂处理	046

3.3.1 化学转化处理	047
3.3.2 静电粉末喷涂	047
3.3.3 静电液相喷涂	048
参考文献	049

第2篇 铝及铝合金阳极氧化膜的性能及测试

第4章 铝合金多孔型阳极氧化膜	052
4.1 铝多孔型阳极氧化膜的结构	052
4.2 铝多孔型阳极氧化膜的厚度和组成	055
4.2.1 铝阳极氧化膜阻挡层的厚度	055
4.2.2 铝阳极氧化膜多孔层的厚度	056
4.2.3 铝阳极氧化膜阻挡层的组成	057
4.2.4 铝阳极氧化膜多孔层的组成	058
4.3 铝合金阳极氧化膜的性能及测试方法	059
第5章 铝阳极氧化膜的外观、颜色和厚度及测试方法	063
5.1 铝阳极氧化膜的外观及测试方法	063
5.2 铝阳极氧化膜的颜色与色差及测试方法	065
5.3 铝阳极氧化膜常见的外观缺陷	067
5.4 铝阳极氧化膜厚度及测试方法	072
5.4.1 铝阳极氧化膜厚度	072
5.4.2 铝阳极氧化膜的厚度测定方法	076
5.4.3 铝阳极氧化膜的表面密度和表观密度	080
第6章 铝阳极氧化膜的耐腐蚀性能及测试方法	083
6.1 铝阳极氧化膜的封孔品质及测试方法	084
6.1.1 铝阳极氧化膜的封孔质量	085
6.1.2 铝阳极氧化膜封孔质量的检验方法	093
6.2 铝阳极氧化膜的耐候性及测试方法	100
6.2.1 铝阳极氧化膜的自然耐候性	101
6.2.2 自然耐候性试验方法	102
6.2.3 铝阳极氧化膜加速耐候性及试验方法	104
6.3 铝阳极氧化膜耐盐雾腐蚀性试验方法	106
6.3.1 NASS, AASS 和 CASS 盐雾腐蚀试验方法	107
6.3.2 不同膜厚级别铝阳极氧化膜的 CASS 试验的耐腐蚀性能	110

6.4 铝阳极氧化膜的耐碱腐蚀性及其测试方法	113
6.4.1 滴碱腐蚀试验	115
6.4.2 电动势法测量耐碱性试验	117
6.5 铝阳极氧化膜的其它耐腐蚀性及其测试方法	118
第7章 铝阳极氧化膜的物理和力学性能及测试	123
7.1 铝阳极氧化膜的硬度及其测试方法	123
7.1.1 铝阳极氧化膜的显微硬度特征	124
7.1.2 铝阳极氧化膜的显微硬度测试方法	125
7.2 铝阳极氧化膜的耐磨性及其测试方法	127
7.2.1 铝阳极氧化膜的耐磨性	127
7.2.2 铝阳极氧化膜耐磨性的测试方法	130
7.3 铝阳极氧化膜的耐光性及其测试方法	139
7.4 铝阳极氧化膜力学性能及其测试方法	140
第8章 铝阳极氧化膜的其它性能及测试方法	142
8.1 铝阳极氧化膜的电学性能及电绝缘性测试方法	143
8.1.1 铝阳极氧化膜的电学性能	143
8.1.2 阳极氧化膜击穿电位测量的电绝缘性测试方法	146
8.2 铝阳极氧化膜的热学性能及其测试方法	147
8.2.1 铝阳极氧化膜的热学性能	148
8.2.2 铝阳极氧化膜的抗热裂性的测试方法	150
8.3 铝阳极氧化薄膜的抗弯曲破裂性及测试方法	152
8.4 阳极氧化薄膜的连续性及测试方法	154
8.5 阳极氧化膜光学性能及其测试方法	155
8.5.1 镜面反射率和镜面光泽度的测量	157
8.5.2 铝阳极氧化膜反射特性的测量	158
参考文献	160

第3篇 铝及铝合金有机聚合物膜的性能及测试

第9章 铝表面有机聚合物膜的结构、厚度和测试方法	166
9.1 铝的阳极氧化电泳涂漆复合膜	170
9.1.1 铝阳极氧化电泳涂装复合膜的结构	171
9.1.2 铝阳极氧化电泳涂漆复合膜的成分与厚度	172
9.1.3 铝阳极氧化电泳涂漆复合膜的厚度测试方法	173

9.2 铝的有机聚合物喷涂膜	174
9.2.1 有机聚合物喷涂膜的底层	174
9.2.2 有机聚合物喷涂膜的成分与厚度	177
9.2.3 有机聚合物喷涂膜的厚度测试方法	178
第10章 铝的有机聚合物膜的外观和附着性及测试方法	179
10.1 铝的有机聚合物膜外观及测试方法	180
10.1.1 有机聚合物膜的颜色与色差及测试方法	181
10.1.2 有机聚合物膜的光泽度及测试方法	182
10.2 铝的有机聚合物膜的外观缺陷及防治措施	183
10.3 铝的有机聚合物膜的附着性及测试方法	183
10.3.1 阳极氧化电泳涂漆复合膜的附着性及测试方法	191
10.3.2 有机聚合物喷涂膜的附着性及测试方法	192
第11章 铝的有机聚合物膜的耐腐蚀性、耐候性及测试方法	196
11.1 铝的有机聚合物膜的耐盐雾腐蚀性及其测试方法	196
11.1.1 阳极氧化电泳涂漆复合膜的耐盐雾腐蚀性	199
11.1.2 静电喷涂膜的耐盐雾腐蚀性	201
11.1.3 有机聚合物膜的耐盐雾腐蚀测试方法	204
11.2 铝的有机聚合物膜的耐含二氧化硫的潮湿大气腐蚀性及其测试方法	207
11.3 铝的有机聚合物膜的耐马丘腐蚀性及其测试方法	209
11.4 铝的有机聚合物膜的耐湿热腐蚀性及其测试方法	210
11.5 铝的有机聚合物膜耐候性及测试方法	213
11.5.1 有机聚合物膜自然耐候性的大气曝露试验方法	215
11.5.2 有机聚合物膜耐候性的实验室加速试验方法	217
11.6 铝的有机聚合物膜耐沸水性及检测方法	223
第12章 铝的有机聚合物膜的耐化学品稳定性及测试方法	226
12.1 铝的有机聚合物膜的耐酸性及其测试方法	226
12.2 铝的有机聚合物膜的耐碱性及其测试方法	229
12.3 铝的有机聚合物膜的耐砂浆性及其测试方法	232
12.4 铝的有机聚合物膜的耐洗涤剂性及其测试方法	234
12.5 铝的有机聚合物膜的耐溶剂性及其测试方法	235
12.5.1 电泳涂漆膜的耐溶剂性及其测试方法	236
12.5.2 静电喷涂膜的耐溶剂性及其测试方法	237
第13章 铝的有机聚合物膜的硬度、耐磨性等其他物理和力学特性及测试	

方法	239
13.1 铝的有机聚合物膜的硬度及测试方法	239
13.1.1 阳极氧化电泳涂装复合膜的硬度及测试方法	239
13.1.2 有机聚合物喷涂膜的硬度及测试方法	240
13.2 铝的有机聚合物膜的耐磨性及测试方法	241
13.2.1 阳极氧化电泳涂漆复合膜的耐磨性及测试方法	241
13.2.2 有机聚合物喷涂膜的耐磨性及测试方法	244
13.3 铝的有机聚合物喷涂膜的力学性能及试验方法	245
13.3.1 有机聚合物喷涂膜的耐冲击性及试验方法	247
13.3.2 有机聚合物喷涂膜的耐杯突性及试验方法	248
13.3.3 有机聚合物喷涂膜的耐弯曲性及试验方法	249
13.3.4 有机聚合物喷涂膜的机械加工性能试验方法	249
参考文献	250
附录	253
附录1 铝表面处理膜层性能及检测有关词汇的中英对照及释义	253
附录2 铝合金表面处理膜层的有关标准	263
附表2-1 铝合金表面处理膜层膜性能及检测的相关中国标准	263
附表2-2 铝合金阳极氧化膜和有机聚合物喷涂膜性能及检测的国外 主要相关标准	267
附录3 本书作者发表的论著目录	273
附录4 本书作者参与制定的国家标准目录	277

第1篇

铝及铝合金 表面处理膜层基础知识

第1章

铝及铝合金的物理和化学性质

铝是元素周期表中位于ⅢA族的主族元素，原子序13，原子量26.98。铝自1825年由丹麦科学家H. C. Oersted发现以来，已有180多年的历史。假如按照1886年铝熔融盐电解法问世，实现铝的工业化规模生产算起，铝的问世也已经经历了120余年的历史。铝及铝合金具有一系列优良的物理、化学和力学性能，从国民经济各部分到人民生活的各个领域已经得到广泛的使用，而且其运用范围愈来愈大。

各种各样铝合金的研发首先是从考虑提高铝的力学性能出发的，目前国际上有据可查的变形铝合金牌号已经超过400个，我国常用的铝合金牌号也已经超过100个。如此大量的铝合金数目，应该有一个科学分类的方法。通常可以按照铝合金的加工生产方法，将铝合金分为变形铝合金和铸造铝合金（含压铸铝合金）两大类。在变形铝合金中，通常可以分为不可热处理强化的铝合金和可热处理强化的铝合金两大类。由于变形铝合金的数目特别庞大，按照铝合金的成分将变形铝合金分成9个铝合金系比较方便，目前比较常用的是7个铝合金系。我国的变形铝合金分类原则目前与国际标准和世界大多数国家分类原则相同。

变形铝合金的分类，我国与国际上分类原则基本相同，目前是按照主要合金元素来决定的，由4位数字（或有一位英文字母）组成。1XXX是纯铝，铝含量不少于99.00%，最后两位数字表示最低铝百分含量小数点后的两位数字，如1050和1060分别表示铝的含量最低为99.50%和99.60%。2XXX到7XXX是铝合金，第二位数字为0则表示原始合金，如果数字是1~9则为改型合金，最后两位数字表示识别合金的序号。第二位也可以采用英文字母表示原始合金的改型，A是原始合金而B~Y表示改型合金。表1-1是表示1XXX到7XXX变形铝合金的分类、意义、特性及常用的加工形态。早期我国采用旧的国家标准，将铝合金分类为纯铝（L）、防锈铝（LF）、硬铝（LY）、超硬铝（LC）、锻铝（LD）和特殊铝（LT）等，这种分类办法目前基本上已经不再使

用，但是在旧的文献资料中仍然能见到。

表 1-1 变形铝合金系（1XXX 到 7XXX）的分类、意义、特性和常用加工形态

铝合金系	铝合金分类意义	特性及常用材料的加工形态
1XXX	纯铝	常用管、线、板、棒和型材
2XXX	Al-Cu-Mg 系,可热处理强化合金	冲压性、可焊性和耐蚀性均佳。常用管、线、板、棒、型和锻材
3XXX	Al-Mn 系,不可热处理强化合金	成形性、可焊性和耐蚀性均佳。用薄板较多
4XXX	Al-Si 系,不可热处理强化合金	主要用于铝合金焊接材料,如钎焊板、焊条和焊丝等,也用于制造活塞及耐热零件
5XXX	Al-Mg 系,不可热处理强化合金	可焊性和耐蚀性均好。较多用板、薄板、丝材
6XXX	Al-Mg-Si 系,可热处理强化合金	综合性能较好,常用管、棒、型材
7XXX	Al-Zn 系,可热处理强化合金	高强合金。常用锻件、中厚板、挤压件。可用包铝的板材

1.1 铝及铝合金的物理性质

铝是仅次于镁的最轻的结构金属元素，铝合金的密度通常在 $2.65 \sim 2.75 \text{g/cm}^3$ 范围，只有钢铁的 $1/3$ 左右。Al-Mg 系合金的密度小于 2.70g/cm^3 ，而 Al-Cu 系合金的密度则大于 2.70g/cm^3 。

铝的导电性仅次于银、金和铜，而纯度愈高则导电性愈好。99.97% 的纯铝，其导电率是铜的 65.4%。由于铝的密度比铜低得多，因此只要用一半的铜的重量，就可以通过与铜大致相同的电量。为此电力工业上推广以铝代铜或复合材料，作为电线、电缆导线等，经济前景很好。

铝的导热性很好。在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 之间，其导热系数为 $2.26 \text{J}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ 。虽然铝的热导率约为铜的 50%，但是单位重量的热导率仍然高于铜。因此铝材在食品工业、化学工业、石油工业，甚至航空工业等新兴工业，已经是热交换器的常用材料。

铝对于光和热都有很好的反射性能，铝的纯度愈高，则反射性能愈好。高纯铝，如 99.99% Al 的热反射系数达到 85%~95%。抛光的铝表面对于无线电波、可见光波、直至红外光波都具有极强的反射性。

铝及其合金的塑性很好，压力加工非常方便，通过挤压、轧制、拉拔等加工工艺可以容易地加工成各种形状，如板材、管材、棒材、型材、线材和箔材

等。铝合金还可以进行车、铣、镗、刨等机械加工。通过铸造工艺还可以方便地制备铝合金零部件和工艺品等,铝合金的压铸件已经非常普遍地用在汽车等机械工业。

铝的回收再生性比较好。铝的熔点比较低,只有 650°C 左右,其碎屑和废料很容易再生回收,回收再生的能耗只有冶炼的 3%。

铝的物理性质和力学性能见表 1-2 所示。高纯铝与工业纯铝的物理性质有些差别,在表中分别表示。而力学性能是与加工状态或退火状态密切相关,表中分别列出冷轧板材和退火板材的力学性能。冷轧铝板的强度明显高于退火板,而冷轧铝板的延伸率却比退火铝板低得多,这已经是众所周知的事实。

表 1-2 铝的物理性质和力学性质

物理性质项目	高纯铝(99.996%)	工业纯铝(99.5%)
熔点/ $^{\circ}\text{C}$	660.5	650
沸点/ $^{\circ}\text{C}$	2060	—
固体密度(20°C)/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.698	2.71
熔化潜热/ $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	1.08×10^{-4}	—
蒸发潜热/ $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	31033.8	31080
100°C 比热容/ $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	0.934920	0.9617
电导率(IACS)/%	64.94	59(软状态) 57(硬状态)
热导率(20°C)(CGS)	0.56	0.53(软状态)
20°C 电阻温度系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	0.00429	0.004
20°C 电阻率/ $10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}$	2.655	2.922(软状态)
热反射率 ^① /%	85~95	—
折射率 ^① (白色光)	—	0.078~0.148
吸收率 ^① (白色光)	—	2.85~3.95
辐射率 ^① (20°C ,大气中)/%	100	—
凝固时体积收缩率/%	6.7	6.6
力学性能项目	冷轧板材	退火板材
拉伸强度(σ_b)/MPa	150	80
屈服强度($\sigma_{0.2}$)/MPa	100	30
剪切强度(σ_c)/MPa	—	55
延伸率(δ)/%	6	35
断面收缩率(ψ)/%	60	80
纵向弹性模量/ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	71000	71000
横向弹性模量/ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	26000	26000
剪切模量/ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	27000	27000
泊松系数(μ)	0.31	0.31
布氏硬度(HB)	32	25
疲劳强度(σ_{-1})	42~63 ^②	35

① 数据值与表面状态有关。② 数据值与冷轧板材的变形速度有关。