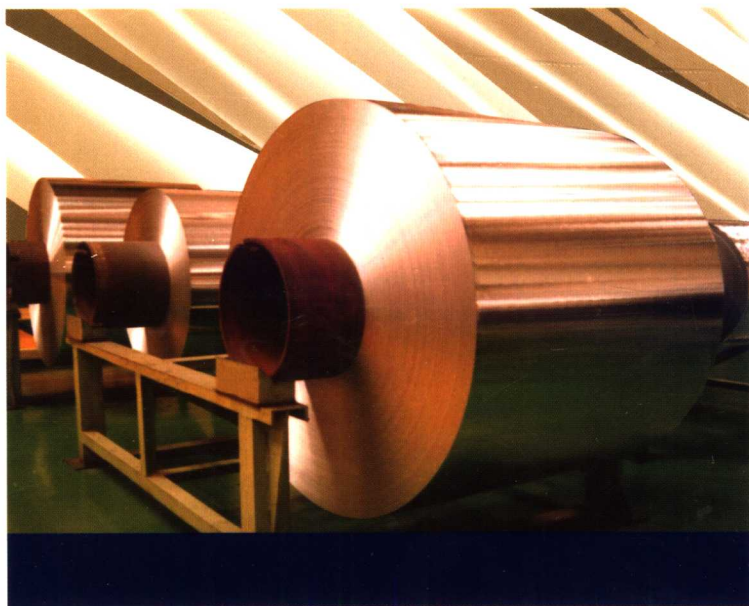


轻 合 金 丛 书

铝 箔 材 料

潘复生 张 静 等著



Chemical Industry Press



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

轻合金丛书

铝箔材料

潘复生 张静 等著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

铝箔材料/潘复生,张静等著. —北京:化学工业出版社, 2005.5
(轻合金丛书)
ISBN 7-5025-7093-4

I. 铝… II. ①潘… ②张… III. 铝-金属箔-材料
IV. TG146.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 050649 号

轻合金丛书

铝 箔 材 料

潘复生 张 静 等著
责任编辑: 窦 臻 常 青
责任校对: 周梦华
封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印装

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 14¼ 字数 188 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7093-4

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

《轻合金丛书》编委会

主 任：曾苏民

常务副主任：潘复生

副 主 任：丁文江 史文芳 韩恩厚 赵永庆
熊柏青 谢建新

秘 书 长：张 津

委 员：(按姓氏笔画排序)

丁文江	丁培道	王渠东	龙思远
史文芳	刘 正	刘 庆	刘 兵
孙东立	李焕喜	张 津	张喜燕
易丹青	罗承萍	赵永庆	黄少东
曹苏民	章宗和	韩恩厚	谢建新
熊柏青	潘复生		

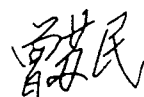
序

铝、镁、钛等金属的密度小，分别为 2.78g/cm^3 、 1.74g/cm^3 和 4.52g/cm^3 ，通常被称为轻金属，其相应的铝合金、镁合金、钛合金则称为轻合金。铝合金导热性好、易于成形、价格较低，已经在航空航天、交通运输、轻工建材、通讯、电子等部门获得广泛的应用，2003 年世界及我国铝产量已分别达到 3235 万吨和 540 万吨。镁合金具有比强度、比刚度高，阻尼性、切削加工性、导热性好，电磁屏蔽能力强等优点，在交通、通讯、电子和航空航天等领域的应用前景十分广泛，2003 年世界和我国原镁产量已分别达到 51 万吨和 34 万吨，且以每年 20% 的速度迅速增长。钛合金耐蚀性好、耐热性高，比刚度、比强度高，是航天航空、石油化工、生物医学等领域的重要材料，在尖端科学和高技术方面发挥着重要作用。2003 年世界和我国的海绵钛产量分别达到 6 万多吨和 6000 多吨。

轻合金所具有的特殊优异性能和发展潜力促使世界各国越来越重视对轻合金材料的研究开发与推广应用。除了继续系统深入开展铝合金、钛合金材料的研究与产业化发展外，近年来世界各国还投入了大量人力物力加快镁及镁合金材料的研究开发和产业化推进，突破了一批关键技术，扩大了镁合金材料的应用范围，发展势头十分强劲。我国近年来轻合金材料的发展令人瞩目，除了原材料生产持续高速增长以外，轻合金材料的基础研究、加工制造和应用水平也逐年提高，特别是在镁产业发展方面，我国已成为世界上最大的原镁生产和出口国，镁合金材料的产业化发展与推广应用也取得显著成效，国家科技部倡导和力推的我国镁资源优势向经济优势的转化正顺利进行。

由于轻合金材料近年来发展非常迅速，在冶炼、加工、回收、应用和制造装备等多方面的重要研究进展，取得了大量的产业化成果；在轻金属的资源开发利用、轻合金产品的产量与工业规模、发展重点等方面也都有了很大的变化。而且，从事轻金属及合金材料的研究开发和产业化的从业人员数量也增长迅速。因此，特别需要出版一套图书介绍和反映轻合金材料的新进展和新应用。《轻合金丛书》的作者都是国内轻合金行业内很有成就的专家和学者。他

们根据轻合金材料产业发展的需要，编写了这套系统、完整、规范的介绍现代轻合金材料的工程技术丛书。该丛书包括《镁合金及应用》、《钛合金及应用》、《铝合金及应用》、《铝箔材料》、《镁合金表面处理技术》、《高性能变形镁合金与加工技术》、《轻合金材料新进展》，全面总结介绍了轻合金资源状况、冶炼工艺、材料设计、加工制造和应用技术等基础知识，收集汇编了近年来轻合金材料的新工艺、新产品和发展动态等技术资料，并结合作者自己的科研成果和体会，探讨了轻合金材料产业的技术与行业发展趋势。其中，《镁合金及应用》、《钛合金及应用》和《铝合金及应用》三本书以介绍镁合金、钛合金和铝合金的基本理论、基本原理、基本工艺和重要应用为主；《铝箔材料》、《镁合金表面处理技术》、《高性能变形镁合金与加工技术》和《轻合金材料新进展》四本书重点介绍最近几年的研究成果和研究进展。本丛书对从事轻合金材料研究开发及产业化的科研院所、高等院校、厂矿企业的科研与工程技术人员、在校材料及相关专业的学生有重要参考价值，对机械、能源、交通、通讯、电子、建筑等行业的相关从业人员也有一定的帮助。相信该丛书的出版发行对我国轻合金材料的研究开发和产业化发展将起到积极的促进和推动作用。



2004. 5. 13

前 言

铝箔具有质轻、密闭和包覆性好等一系列优点，是国民经济发展和人们日常生活中非常关键的产品，在包装、电气和建筑等领域有着广泛的用途。随着现代科技和现代工业的发展，尤其是 21 世纪生物工程、能源和环保等相关技术的革新，铝箔的用途和亟待开发的应用领域及相关技术的拓展必将越来越广阔，所以铝箔工业已成为当前各国十分关注的材料工业。

铝箔在生产过程中涉及从熔铸、热轧、冷轧到箔轧的所有加工工艺和热处理工艺，是铝加工生产中工序最多、加工技术难度最大的铝材产品之一。铝箔生产水平某种程度上代表着一个国家铝加工工业的先进程度和发展水平。减小铝箔厚度和进一步提高铝箔的质量已成为铝箔工业的主要发展方向。但铝箔作为一种特殊加工产品，加工设备参数的调节只能在有限范围内对产品质量进行控制，此时，铝箔组织的控制就显得尤为重要。铝箔愈趋于薄型，技术难度愈大，经济效益也愈可观。在影响铝箔质量的诸因素中，Fe、Si 固溶度以及第二相的种类、数量、尺寸和分布是最主要的影响参数，然而，目前还缺乏对这方面的系统研究，特别是第二相形成和转变规律的系统研究则更少。由于缺乏对铝箔材料熔铸、加工变形和热处理过程中第二相形成及转变的系统研究与分析，所以缺乏组织控制和工艺优化的理论依据。

在国家科技攻关项目、国家自然科学基金项目和全国高校博士点基金项目的支持下，重庆大学铝箔材料课题组经过近 20 年的艰苦工作，对铝箔材料在熔铸、均匀化、热轧、冷轧、中间退火、析出退火等制备和加工过程中的组织变化进行了系统研究，在 Fe、Si 固溶度控制以及第二相种类、数量、尺寸和分布变化规律的分析及应用方面有重要创新。本书是相关成果的总结，主要内容包括：铝箔材料的合金体系和合金相、铝箔的性能、铝箔的生产工艺、铝箔的组织控制和质量评价、铝箔材料中的高温相变、铝箔材料中的中温相变、铝箔材料中的低温相变、化学成分对铝箔组织和性能的影响、工艺参数对铝箔性能的影响等。

全书主要由潘复生和张静负责撰写，汤爱涛完成了第 1 章、第 8 章全文及

第9章部分内容的撰写工作，彭建参加了第9章部分章节的撰写工作。参加铝箔材料课题组研究工作的还有丁培道、王文高、左汝林等。曾苏民院士、李正邦院士和汪凌云教授等对该技术成果的发展提出了很好的建议和意见。部分研究成果已获得国家发明专利。

该书对从事铝箔材料开发和应用的科技人员有较高参考价值，可作为高等学校和院所材料专业和冶金专业教师、研究生的教学及科研参考书。由于时间、知识和研究手段等方面的差异，本书肯定会有不当之处，敬请读者指正。

潘复生

2005年3月

内 容 提 要

铝箔是国民经济发展和人们日常生活中非常重要的产品，在包装、电气和建筑等领域有着广泛的用途，是生产工序最多、加工技术难度最大的铝材产品之一。本书对铝箔材料熔铸、均匀化、热轧、冷轧、中间退火、析出退火等制备和加工过程中的研究成果进行了系统的总结，主要内容包括：铝箔材料的合金体系和合金相、铝箔的性能、铝箔的生产工艺、铝箔的组织控制和质量评价、铝箔材料中的高温相变、铝箔材料中的中温相变、铝箔材料中的低温相变、化学成分对铝箔组织和性能的影响、工艺参数对铝箔性能的影响等。

本书可作为高等学校和科研院所材料专业与冶金专业教师和研究生的教学及科研参考书，对从事铝箔材料生产和应用的科技人员也有重要参考价值。

目 录

第 1 章 绪言	1
1.1 铝箔的分类	1
1.2 铝箔的应用领域	2
1.2.1 烟箔	3
1.2.2 电解电容器用铝箔	3
1.2.3 装饰用箔	3
1.2.4 药用铝箔	4
1.2.5 电缆箔	4
1.2.6 空调箔	4
1.2.7 软包装铝箔	5
1.2.8 其他铝箔	5
1.3 中国铝箔生产的发展历史和现状	6
1.4 铝箔的产量、进出口量与消费量	8
1.4.1 铝箔产量与消费量	8
1.4.2 铝箔进出口量	9
1.5 当代铝箔生产的特点和发展趋势	10
<hr/>	
第 2 章 铝箔材料的合金体系和合金相	15
2.1 铝箔材料的合金体系和化学成分	15
2.2 铝箔材料中二元合金相图和二元化合物	17
2.2.1 铝箔材料中的二元合金相图	17
2.2.2 铝箔材料中的二元化合物	22
2.3 铝箔材料中的三元合金相图	28
2.4 铝箔材料中的多元化合物	39
2.4.1 1×××系及 8×××系合金的多元化合物	39

2.4.2 其他合金系中多元化合物	47
-------------------------	----

第3章 铝箔的性能	53
3.1 铝箔的防潮性能	53
3.2 铝箔的绝热性能	54
3.3 铝箔的热学性能	54
3.4 铝箔的电学性能	56
3.5 铝箔的针孔限制	57
3.6 铝箔的尺寸要求	58
3.7 铝箔的力学性能	59

第4章 铝箔的生产工艺、组织控制和质量评价	69
4.1 铝箔的生产方法	69
4.1.1 叠轧法	69
4.1.2 带式轧制法	69
4.1.3 沉积法	70
4.2 铝箔的生产工艺	70
4.2.1 熔炼和铸锭	71
4.2.2 铸锭均匀化	72
4.2.3 热轧	73
4.2.4 冷轧	74
4.2.5 中间退火	74
4.2.6 铝箔的双合和分卷	75
4.2.7 铝箔的软化退火	77
4.2.8 脱脂	78
4.2.9 铝箔的分切	79
4.2.10 铝箔的二次加工	80
4.3 铝箔轧制过程几个重要参数的确定	81
4.3.1 道次轧制率编制原则	81
4.3.2 箔材轧制力的计算	82
4.3.3 轧制速度的选定	83

4.3.4	前后张力的选择和调节	84
4.4	铝箔毛料的质量评价体系和影响因素	85
4.4.1	铝箔毛料的来源和生产方法	85
4.4.2	铝箔毛料的组织控制	87
4.4.3	铝箔毛料的质量评价体系	90
4.5	铝箔产品的质量评价和影响因素	93

第5章 铝箔材料中的高温相变

5.1	凝固过程中的高温相变	97
5.1.1	竞争形核和竞争生长	97
5.1.2	亚稳相图	100
5.1.3	凝固组织图	103
5.2	高温均匀化热处理中的相变	105
5.2.1	$\text{FeAl}_6 \rightarrow \text{FeAl}_3$ 的相变	105
5.2.2	$\text{FeAl}_m \rightarrow \text{FeAl}_3$ 的相变	109
5.2.3	$\alpha\text{-FeAlSi} \rightarrow \text{FeAl}_3$ 的相变	111
5.2.4	其他三元 FeAlSi 相的相变	111
5.2.5	铸锭组织及其遗传性	112
5.2.6	均匀化工艺的选择	115

第6章 铝箔材料中的中温相变

6.1	中间退火后的金相显微组织和第二相尺寸分布	117
6.2	中间退火过程中析出相的透射电子显微镜 (TEM) 研究	119
6.3	中间退火过程中 $\beta_p(\text{AlFeSi})$ 相变的晶体学位向关系	124
6.4	化合物相的 X 射线衍射分析结果	127
6.5	中间退火后的晶粒大小	128
6.6	中间退火后铝箔毛料的固溶贫化点	130
6.7	固溶贫化点和第二相析出及转变的若干分析	131
6.7.1	影响铝箔毛料轧制性能的主要因素	131
6.7.2	中间退火过程中的最佳固溶贫化点现象	132
6.7.3	中间退火工艺对铝箔毛料显微组织和析出物的影响	133

6.7.4	中间退火工艺的选择	135
6.7.5	铝箔毛料热处理和加工变形过程中 β_p (AlFeSi) 相的 形成、遗传和转变	136
<hr/>		
第 7 章	铝箔材料中的低温相变	139
7.1	0.35mm 厚冷轧坯料析出退火前后的金相显微组织和第二 相尺寸分布	139
7.2	析出退火工艺中析出相的 TEM 分析结果	144
7.3	析出退火后化合物相的 X 射线衍射分析结果	146
7.4	析出退火后基体中的固溶硅含量	148
7.5	析出退火后的晶粒大小	149
7.6	析出退火后铝箔毛料的硬度	151
7.7	冷轧变形量对析出退火的影响	151
7.8	析出退火工艺的选择	154
7.9	工业纯铝箔毛料中第二相的形成、遗传和转变及其工艺 控制的综合分析	155
<hr/>		
第 8 章	化学成分对铝箔组织和性能的影响	161
8.1	化学成分对工业纯铝箔组织和性能的影响	161
8.2	化学成分对电子铝箔组织和性能的影响	163
8.2.1	电解电容器铝箔的杂质成分和存在形式	164
8.2.2	杂质元素对电子用铝箔组织和性能的影响	165
8.2.3	合金元素对电子用铝箔组织和性能的影响	170
<hr/>		
第 9 章	工艺参数对铝箔性能的影响	181
9.1	工艺参数对包装用铝箔性能的影响	181
9.1.1	工艺参数对铝箔力学性能和成品率的影响	182
9.1.2	工艺参数对铝箔显微组织的影响	184
9.1.3	工艺参数对铝箔毛料电阻率的影响	186
9.2	工艺参数对电子铝箔性能的影响	186
9.2.1	低杂质含量时工艺参数对电子铝箔性能的影响	187

9.2.2 高杂质含量时工艺参数对电子铝箔性能的影响	190
9.3 工艺参数和显微组织影响铝箔性能的综合分析	197
参考文献	203

第 1 章

绪 言

1.1 铝箔的分类

铝箔一般是指厚度小于 0.2mm、断面为长方形的轧制产品，但不同国家的厚度划分界限并不完全相同（表 1-1），低于厚度界限的铝箔也越来越多。

表 1-1 不同国家铝箔的厚度界限

国 别	厚度/mm	标 准	国 别	厚度/mm	标 准
中国	0.006~0.2	GB 3198—82	日本	0.007~0.2	JIS H 4160:74
美国	0.0064~0.15	ASTM B479:73	前苏联	0.005~0.2	ГОСТ618:72
法国	0.004~0.2	NF A 50-171:1981	德国	0.007~0.02	DIN 1784

铝箔的分类有多种方法，按铝箔的厚度、形状、状态或材质都可以进行分类。

铝箔按厚度差异可分为厚箔、单零箔和双零箔。①厚箔：厚度为 0.1~0.2mm 的箔。②单零箔：厚度为 0.01mm 和小于 0.1mm 的箔。③双零箔：所谓双零箔就是在其厚度以 mm 为计量单位时小数点后有两个零的箔，通常为厚度小于 0.0075mm 的铝箔。用英文表达时，厚箔称为“heavy gauge foil”，单零箔称为“medium gauge foil”，双零箔称“light gauge foil”。国外有时把厚度 $\leq 40\mu\text{m}$ 的铝箔称为 light gauge foil，而把厚度 $> 40\mu\text{m}$ 的铝箔统称为 heavy gauge foil。

铝箔按形状可分为卷状铝箔和片状铝箔。铝箔深加工毛料大多数呈卷状供应,只有少数手工业包装场合才用片状铝箔。

铝箔按状态可分为硬质箔、半硬箔和软质箔。①硬质箔:轧制后未经软化处理(退火)的铝箔,不经脱脂处理时,表面上有残油。因此硬质箔在印刷、贴合、涂层之前必须进行脱脂处理,如果用于成形加工则可直接使用。②半硬箔:铝箔硬度(或强度)在硬质箔和软质箔之间的铝箔,通常用于成形加工。③软质箔:轧制后经过充分退火而变软的铝箔,材质柔软,表面没有残油。目前大多数应用领域,如包装、复合、电工材料等,都使用软质箔。

铝箔按表面状态可分为一面光铝箔和两面光铝箔。①一面光铝箔:双合轧制的铝箔,分卷后一面光亮,一面发乌,这样的铝箔称为一面光铝箔。一面光铝箔的厚度通常不超过0.025mm。②两面光铝箔:单张轧制的铝箔,两面和轧辊接触,铝箔的两面因轧辊表面粗糙度不同又分为镜面二面光铝箔和普通二面光铝箔。二面光铝箔的厚度一般不小于0.01mm。

铝箔按加工状态可分为素箔、压花箔、复合箔、涂层箔、上色铝箔和印刷铝箔。①素箔:轧制后不经任何其他加工的铝箔,也称光箔。②压花箔:表面上压有各种花纹的铝箔。③复合箔:把铝箔和纸、塑料薄膜、纸板贴合在一起形成的复合铝箔。④涂层箔:表面上涂有各类树脂或漆的铝箔。⑤上色铝箔:表面上涂有单一颜色的铝箔。⑥印刷铝箔:通过印刷在表面上形成各种花纹、图案、文字或画面的铝箔,可以是一种颜色,最多的可达12种颜色。

1.2 铝箔的应用领域

铝箔具有质轻、密闭和包覆性好等一系列优点,故在国民经济许多部门及人们日常生活中获得广泛的应用,但目前它主要用于包装、机电和建筑三大领域。

1.2.1 烟箔

素铝箔经涂胶与衬纸复合后而成为裱纸烟箔。裱纸烟箔具有高的柔软性、装饰性和防潮性。烟箔一般用 1235 合金生产，厚度为 6.0~7.0 μm ，宽度为 460mm、350mm、545mm、1090mm 等。对烟箔的质量要求主要是厚度要均匀，针孔尺寸要小，针孔数量要少，板型要好。

我国是世界上最大的卷烟生产和消费国。目前，我国约有 150 家大型卷烟厂，年产卷烟总量 3400 万大箱，基本都采用香烟箔包装，其中 30% 采用喷镀箔，70% 采用压延铝箔（压延铝箔消耗量 35kt）。随着人们健康意识的增强以及国外进口香烟的冲击，我国烟箔需求量的增长明显减缓，预计近几几年仅会略有增加。我国香烟包装箔占到双零箔总量的 70%，目前国内有两三家企业能生产优质烟箔。

1.2.2 电解电容器用铝箔

电解电容器用铝箔是一种在极性条件下工作的腐蚀材料，对铝箔的组织结构有较高要求，所用铝箔分为三种：阴极箔，厚度为 0.015~0.06mm；高压阳极箔，厚度为 0.065~0.1mm；低压阳极箔，厚度为 0.06~0.1mm。

铝电解电容器的阳极铝箔使用的是工业高纯铝，纯度要求均在 99.93%（质量）以上，按 GB 3190—1982 标准，主要使用 LG3、LG4 和 LG5 高纯铝。其中，高压电解电容器用阳极铝箔的纯度要求达到 99.99%（质量）。工业高纯铝中的主要杂质为 Fe、Si、Cu，其次尚有 Mg、Zn、Mn、Ni、Ti 等微量元素。我国国家标准仅对 Fe、Si、Cu 的含量有规定，但作为杂质元素，其限定含量明显高于国外同类优质铝箔。从国内外的趋势来看，电解电容器铝箔不但对 Fe、Si、Cu 含量要求控制得更低，而且对其他微量杂质元素含量也做了严格的规定。

1.2.3 装饰用箔

装饰箔是通过铝-塑复合形式应用的装饰材料，利用了铝箔着色