

彭志辉 编著

中小型铝加工厂 铝板、带、箔材生产

 中南大学出版社



中小型铝加工厂
铝板、带、箔材生产

彭志辉 编著

中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

中小型铝加工厂铝板、带、箔材生产/彭志辉编著.
—长沙:中南大学出版社,2005.9
ISBN 7-81105-089-7

I. 中... II. 彭... III. 铝-金属加工
IV. TG146.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 094143 号

中小型铝加工厂板、带、箔材生产

彭志辉 编著

☐责任编辑 秦瑞卿

☐责任印制 汤庶平

☐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:0731-8876770 传真:0731-8710482

☐印 装 中南大学印刷厂

☐开 本 850 × 1168 1/32 ☐印张 11 ☐字数 270 千字

☐版 次 2005 年 10 月第 1 版 ☐2005 年 10 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 7 - 81105 - 089 - 7/TF · 004

☐定 价 26.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内 容 提 要

本书根据目前我国中小型铝加工厂生产的实际情况,对铝板、带、箔的生产工艺进行了较全面的介绍。主要内容包括我国铝工业发展的概况和铝的基本知识;铝及铝合金的熔炼、铸造理论基础和熔炼、铸造工艺;铝板、带、箔轧制理论基础和相关工艺及操作;铝带坯料连铸连轧生产;三层复合铝板、带、箔的生产与工艺。特别是对具体操作规程及操作中所须注意事项进行了较为详细的论述。

本书可供从事铝板、带、箔加工厂生产、科研、设计的工程技术人员和操作工人参考,也可作为大专院校金属压力加工、材料学及相关专业的本科和研究生教学科研参考用书。

前 言

我国的铝板、带、箔生产经过几十年的发展，生产企业逐年增多，产品品种及质量逐年提高，特别是改革开放以来，从国外引进先进设备新建和扩建的大型铝加工厂，其生产的铝板、带、箔已达到国外同类产品质量，基本能满足国民经济建设的需要；但较多的还是全部采用国内设计制造的设备对原有设备进行改造更新的中小铝加工厂，民营企业发展迅速，已成为我国铝加工行业一支不可忽视的力量。鉴于当前有关铝板、带、箔加工生产的参考书较少，本书是在科研和现场生产实践基础上，收集国内外大量铝加工的文献资料编著而成。其目的是向各类装备的中小型铝加工厂，特别是缺乏技术力量的众多民营铝加工厂的技术人员、操作工人介绍铝加工的基础理论和操作经验；以生产工艺、操作实践为主，也介绍了一些新的设备和生产方法。本书内容包括铝加工的基础理论和从熔铸、加工到产品出厂的生产全过程。对现场生产的技术人员及操作工人有一定的参考价值。

在本书的编写过程中得到了中南大学出版社的大力支持，田荣璋教授、姜燕雄教授对本书的编写提出了许多宝贵建议，书中还引用了参考书中许多宝贵的资料，在此一并向资料的作者致以衷心的感谢。

由于编著者水平有限，书中遗漏和错误之处难免，恳请读者和同行批评指正。谢谢！

编著者谨呈

2004年10月

目 录

第一章 绪 论

- 1.1 铝工业概况 (1)
 - 1.1.1 铝的生产历史 (1)
 - 1.1.2 铝的资源 (2)
- 1.2 铝的特性、用途与生产 (3)
 - 1.2.1 铝的特性 (3)
 - 1.2.2 铝的用途 (4)
 - 1.2.3 中小铝加工企业在民用铝板、带、箔材生产中的
地位和发展前景 (5)
- 1.3 铝锭与铝合金 (6)
 - 1.3.1 重熔用铝锭牌号及化学成分 (6)
 - 1.3.2 变形铝及铝合金状态代号 (6)
 - 1.3.3 热处理不可强化铝合金 (9)
 - 1.3.4 纯铝及热处理不可强化铝合金的状态和机械性能
..... (11)
 - 1.3.5 热处理不可强化铝合金的特性及其应用 (16)

第二章 铝及铝合金的熔炼、铸造理论基础

- 2.1 铝及铝合金熔炼的基本原理 (18)
 - 2.1.1 铝的熔炼原理 (18)
 - 2.1.2 铝合金熔炼的基本原理 (20)
 - 2.1.3 铝熔体的净化方法及原理 (27)

2.2	合金元素和杂质对铝材性能的影响	(42)
2.2.1	主要合金元素的影响	(44)
2.2.2	微量元素及杂质的影响	(59)
2.2.3	常用合金元素对铝物理性能的影响	(67)
2.2.4	中间合金与添加剂	(75)
2.3	铸锭组织的形成原理及铸锭均匀化退火处理 ...	(76)
2.3.1	铸锭组织的形成原理	(76)
2.3.2	铸锭晶粒细化处理	(82)
2.3.3	铝合金铸锭的均匀化处理	(84)

第三章 铝及铝合金熔炼、铸造工艺及设备

3.1	铝及铝合金的熔炼	(90)
3.1.1	配料	(90)
3.1.2	加料方法和加料顺序	(91)
3.1.3	熔铝炉温度的控制和测定	(92)
3.2	铝熔体的净化工艺	(95)
3.3	铝及铝合金的熔炼设备	(96)
3.3.1	熔炼炉的种类	(96)
3.3.2	圆形快速熔炼炉操作技术	(103)
3.4	铝坯铸造	(106)
3.4.1	铁模铸造	(106)
3.4.2	半连续铸锭	(111)
3.4.3	半连续铸锭组织缺陷及防止措施	(121)

第四章 铝板、带的轧制理论基础

4.1	塑性变形机理	(123)
4.2	铝合金的加工硬化及回复、再结晶	(128)
4.2.1	加工硬化	(128)

4.2.2	回复	(129)
4.2.3	再结晶	(130)
4.3	轧制理论	(142)
4.3.1	简单轧制过程及轧制变形区参数	(142)
4.3.2	轧制过程建立的条件	(151)
4.3.3	轧制时金属变形的规律	(155)
4.3.4	单位压力在接触弧上的分布	(163)
4.3.5	轧制压力的计算	(167)
4.3.6	轧制力矩及静负荷图	(192)
4.3.7	轧机主电机功率计算与较核	(200)

第五章 铝板、带的轧制工艺

5.1	铝板、带生产工艺流程	(203)
5.2	铝及铝合金热轧	(203)
5.2.1	铝及铝合金热轧工艺特点	(205)
5.2.2	热轧工艺参数的制定	(206)
5.2.3	热轧时的冷却与润滑	(208)
5.2.4	热轧机	(210)
5.3	铝及铝合金冷轧	(213)
5.3.1	卷带式冷轧工艺	(213)
5.3.2	冷轧压下制度	(215)
5.3.3	冷轧铝带、箔厚度测量与控制	(218)
5.3.4	铝板冷片轧工艺	(219)
5.3.5	铝板、带材热处理工艺	(221)
5.3.6	加热及热处理设备	(225)
5.4	铝板、带冷轧设备	(228)
5.4.1	中小型铝板、带冷轧机	(228)
5.4.2	中型铝卷带冷轧机	(229)

5.5 铝板、带精整设备	(235)
5.5.1 铝板矫直机(平整机)	(235)
5.5.2 剪板机	(237)
5.5.3 纵剪机	(238)
5.5.4 铝圆片冲床	(241)

第六章 铝箔轧制

6.1 概述	(244)
6.1.1 我国铝箔工业的发展	(244)
6.1.2 铝箔的定义及品种	(244)
6.1.3 铝箔轧制工艺	(245)
6.2 铝箔轧制的冷却与润滑	(252)
6.3 铝箔退火工艺	(256)
6.3.1 中间退火工艺	(257)
6.3.2 铝箔成品退火	(257)
6.3.3 铝箔成品退火炉	(259)
6.4 铝箔轧制过程中常见缺陷及产生原因	(260)
6.5 中小型铝箔轧机及辅助设备	(261)

第七章 铝带坯料连铸连轧生产

7.1 铝带坯连铸连轧工艺	(269)
7.2 铸轧工艺参数及其相互关系	(271)
7.2.1 铸轧区长度	(271)
7.2.2 铸轧速度	(273)
7.2.3 前箱铝熔体液面高度	(280)
7.2.4 铸轧坯速度	(282)
7.2.5 铸轧力	(283)
7.2.6 冷却水耗量	(284)

7.2.7 铸轧辊直径与铸轧角	(286)
7.2.8 铸轧时固态金属的变形特点	(288)
7.3 铸轧过程操作	(290)
7.4 铸轧工艺润滑	(294)
7.5 铸轧带坯缺陷及预防措施	(295)
7.6 铝带坯连续铸轧设备	(297)
7.6.1 双辊式铝带坯连续铸轧机	(297)
7.6.2 机前装置	(299)
7.6.3 机后装置	(301)
 第八章 铝合金复合材料的生产	
8.1 三层复合铝合金硬钎焊板、带(箔)生产	(306)
8.1.1 铝质汽车热交换器简介	(306)
8.1.2 热交换器的接合技术	(307)
8.1.3 三层复合铝合金硬钎焊板、带(箔)简介	(308)
8.1.4 三层复合铝合金硬钎焊板、带(箔)生产工艺 ...	(311)
8.1.5 铝合金三层复合板、带(箔)包覆率的控制	(312)
8.1.6 合金元素对三层复合铝合金钎焊板、带(箔)的 钎焊性能的影响	(313)
8.1.7 芯材化学成分和加工工艺对三层复合铝合金板、 带(箔)的抗下垂性能的影响	(315)
8.2 不锈钢铝复合板生产技术	(317)
 附录 日本工业标准 JIS3263—1992	(320)
 参考文献	(337)

第一章 绪 论

1.1 铝工业概况

铝是当今有色金属中消耗量最大的金属之一;铝是英国科学家 H·戴维1807 年首先发现的。铝工业历经了近 200 年的发展,已对全人类科学技术的进步和物质文明建设起到了积极的作用,作出了巨大的贡献。铝材的应用已经深入到建筑、电器、包装、机械、五金、仪表、化工、造币、航天、汽车等各个工业领域。最近由中南大学、西南铝业和北京有色研究总院研制成功的车辆用大型铝材,已成功地应用于火车车箱、集装箱等的制造。铝材已成为人民日常生活不可缺少的材料,其中铝板、带、箔材的消费量占了铝生产总量的一半以上。

1.1.1 铝的生产历史

铝是英国科学家 H·戴维1807 年首先发现的,1809 年他在电弧炉中炼出了第 1 炉铝铁合金。在其后的 77 年中,德国的 F·活勒德,丹麦科学家 H·奥斯戴和法国的 H·S·德维尔分别用金属钾、钾汞齐、金属钠和氧化铝混合加热炼出了被称为“粘土中的银子”——金属铝。价格特贵,视为宝石。拿破仑三世用这种铝制成头盔,并为其子做了一个拨浪鼓玩具。

1886 年,美国科学家 C·M·霍尔和法国科学家 P 埃鲁特几乎同时(独立)发明了电解炼铝法,才真正使铝的工业生产和应用成为可能。在电解铝法发明中,关键是在于发现了一种能溶解氧化

铝的冰晶石(学名为氟铝酸钠)作电解质,即,这种物质在高温下化学性能十分稳定,而且价格低廉,资源丰富。

为了不断提高铝的应用范围,众多材料科学家为改善和提高铝材料的各项性能进行了不懈努力研究,开发了具有各种特性的铝合金新品种。1906年,德国科学家 A 维尔姆发明了硬铝合金(Al - Cu - Mg 合金),使铝的强度提高两倍以上,第一次世界大战期间,德国军用飞机就是用 Al - Mg、Al - Mn、Al - Cu - Mg、Al - Mg - Si、Al - Zn - Mg - Cu 等不同成分、不同热处理制度的铝合金制作零部件。现在铝合金已发展到 180 多个品种和牌号。铝的丰富资源和优异特性是其得到迅速发展的根本原因。

1.1.2 铝的资源

铝的资源十分丰富,在地壳中的丰度约为 8%,高于铁(5%)、镁(2%)、铜(0.01%)、锌(0.004%)、锡(0.004%)。由于铝的化学亲和力很强,在自然界中不能以金属铝状态存在,只能与多种元素化合反应而形成化合物,如氧化铝、硅酸铝、硫酸铝等化合物和它们的复合盐或水合物等状态存在于自然界中。当前用于生产金属铝的主要矿物是: SiO_2 含量低于 8%, Al_2O_3 含量为 40% ~ 60% 的铝土矿(又称为铝矾土)。最典型的生产工艺方法是用烧碱浸出法(拜耳法)从铝矾土中生产纯氧化铝,然后以冰晶石 - 氧化铝为电解质,用电解法(霍尔 - 埃鲁特法)生产金属铝。生产 1 吨金属铝约需 2 吨氧化铝,而生产 2 吨氧化铝则约需 4 吨铝矾土。

全世界可供开采的铝土矿储量超过 233 亿吨,按当前原铝生产量计算,可供 250 年,我国已探明的铝土矿为 13 亿吨以上,占世界第 5 位。除含铝量较高的铝土矿外,还有含铝量较低的明矾矿等也可用于冶炼金属铝,但生产成本较高。

1.2 铝的特性、用途与生产

1.2.1 铝的特性

(1) 纯铝的密度约为 $2\,689\text{ kg/m}^3$ (20°C)，约为钢铁密度的 $1/3$ ，密度小是铝的重要物理特征之一。

(2) 抗腐蚀性能优良。铝之所以具有优异的抗腐蚀性，主要是得益于铝与氧能形成一层薄而致密的三氧化二铝膜，无色透明的氧化铝膜牢固地覆盖在铝基体表面，有效地阻断了氧与铝的接触，防止氧进一步对铝的氧化。同时，氧化铝不与水、大部分酸碱反应，从而防止了铝的侵蚀，提高了铝的抗蚀性能。铝材经过阳极氧化处理后，能增加表面氧化膜厚度，进一步提高了铝的抗腐蚀性能。

(3) 铝本身的强度不高，但添加各种合金元素后的铝合金，经过适当的热处理和冷硬处理后，能提高铝材的强度，有的铝合金已达到或超过了低碳钢的强度。可用于制造各种容器和结构件。此外，铝的低温机械性能高于室温性能，并不易发脆。

(4) 塑性好。纯铝和变形铝合金可以进行热轧、冷轧、挤压、拉延、冲压及切削加工。制成各种形状的如管、板、箔、型、棒、线等材料。

(5) 导热导电性好。纯铝的导电率相当于铜的 62% 、导热率相当于铜的 60% ，而密度约为铜的 30% 。

(6) 弹性模量高。铝合金的弹性模量 $E = 7.2 \times 10^4\text{ MPa}$ ，约为钢的 $1/3$ ；而高强度铝合金的屈服强度却高于低碳钢的屈服强度，抗冲击性能比同截面钢构件要好。

(7) 反射率高。工业纯铝对可见光和红外线的反射率在 80% 以上，含铝量超过 99.9% 的高纯铝和铝-镁合金的反射率更

高。

(8) 易回收再生利用。所有废铝都可以直接进炉熔炼回收,回收废铝与冶炼原铝相比,可节约能源 95% 以上。

铝虽具有以上优点,也有如下不足之处:

(1) 铝的生产能耗高。电解生产 1 吨铝需消耗 15000 kWh 电能以上;

(2) 铝的钎焊较容易,但熔焊较困难,需在氩气保护下进行;

(3) 高温下强度低,铝构件只能在 200 ℃ 以下环境使用;

(4) 高强度铝合金对应力腐蚀很敏感,抗腐蚀性较差,而且热处理工艺较复杂;

(5) 铝的表面硬度低,易划伤,给包装和运输提出了较高要求。

1.2.2 铝的用途

铝的优异特性决定了铝的广泛用途。

(1) 铝的密度小,比强度高,并可通过合金化和热处理达到结构钢的强度,所以铝已成为航空、航天工业不可替代的主要材料,制造飞机用铝约占飞机用材总重的 85%。汽车车身、汽车热交换器、轮箍、发动机部件、火车车厢、座椅、船舶的舱板、隔墙、家具等铝化后可减轻重量,降低能耗、提高行驶速度。

(2) 铝的抗蚀性能好,铝制品在空气中能长期保持金属光泽,无需油漆。人民日常生活中使用众多的铝制品,如铝盆、铝锅、铝桶、铝制家具、洗衣机、冰箱、门窗等等。可以说铝与人民的日常生活密不可分。

(3) 铝的导电性能好,被用来制造电线、电缆、导电排、电容器等。导热性能好而用来制造烹调器皿、汽车热交换器、空调散热片等。

(4) 铝合金材料强度高、耐冲击,用来制造自行车车身、跳水板、跳高撑杆、桥梁构件等。

(5) 铝对热辐射、光辐射的反射率高,用来作屋面板和墙壁板有利于室内保温隔热,此外铝不透水、不透气、不透光的特性使它成为食品、香烟、胶卷等的理想包装材料。

1.2.3 中小铝加工企业在民用铝板、带、箔材生产中的地位和发展前景

我国中小铝加工企业制造的民用铝板、带、箔材占总产量的三分之一以上,在国民经济中具有很重要的地位。但由于工艺装备大多处于 20 世纪初期的水平,铁模铸锭,铸锭在 100kg 以下,二辊热轧开坯,二辊和四辊冷轧等,其生产工艺落后,成材率低等制约了小企业的发展。一般只能生产铝板、带产品。少数企业依靠科学技术改进生产工艺,能生产铝箔,但厚度公差难于控制,不能满足客户要求。80 年代以来建设的中小型铝加工厂,所用的半连铸锭坯为 1~2 t,采用可逆二辊热轧开坯,四辊冷轧生产铝板、带箔,其成材率和生产能力都得到了较大的提高。由于中小企业在铝加工业中具有投资小,建厂快,占地面积小,生产成本低等优势,在改革开放初期,乡镇企业大发展高潮中,全国各地纷纷上马了一大批中小铝加工厂。尽管产品质量差,在过去求大于供的市场态势下,尚有一席之地。但随着近年现代化的大型铝板、带、箔加工企业的迅速发展,大量的质优铝板、带、箔产品进入市场,抢占了大部分市场;近几年来,中小铝加工企业纷纷破产歇业,中小铝加工企业的发展出路只有一条,依靠科学技术,进行技术改革,更新设备,提高产品质量,不断开发新产品,充分发挥生产成本低的优势和提高售后服务质量,以保住市场份额。

1.3 铝锭与铝合金

1.3.1 重熔用铝锭牌号及化学成分

重熔用铝锭，即电解法生产的原生铝，按纯度的高低分为 6 个牌号，其化学成分如表 1-1 所示。

表 1-1 重熔用铝锭化学成分及标记(选自 GB/T1196-1993)

牌号	化学成分/%								红线 标记
	Al 不小于	杂质，不大于							
		Fe	Si	Cu	Ga	Mg	其他 每个	总和	
A199.85	99.85	0.12	0.08	0.005	0.03	0.03	0.015	0.15	二横线
A199.80	99.80	0.15	0.10	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02	一横线
A199.70	99.70	0.20	0.13	0.01	0.03	0.03	0.03	0.40	一竖线
A199.60	99.60	0.25	0.18	0.01	0.03	0.05	0.03	0.05	二竖线
A199.50	99.50	0.50	0.45	0.02	0.03	0.05	0.03	0.50	三竖线
A199.00	99.00	0.50	0.45	0.02	0.05	0.05	0.05	1.00	四竖线

化学成分为质量分数，以下不再说明

1.3.2 变形铝及铝合金状态代号

1. 基础状态代号

基础状态代号共分为 5 种，如表 1-2 所示。

表 1-2 基础状态代号、名称及说明与应用(选自 GB/T16475-1996)

代号	名称	说明与应用
F	自由加工状态	适用于成型过程中,对于加工硬化和热处理条件无特殊要求的产品,该状态产品的力学性能不作规定。
O	退火状态	适用于完全退火获得最低强度的加工产品
H	加工硬化状态	适用于通过加工硬化提高强度的产品,产品在加工硬化后可经过(也可不经过)使强度有所降低的附加热处理。 H 代号后面必须跟随 2 位或 3 位阿拉伯数字
W	固溶热处理状态	一种不稳定状态,仅适用于固溶热处理后,室温时效的合金,该状态产品仅表示产品处于自然时效阶段。
T	热处理状态 (不同于 O、F、H 状态)	适用于热处理后,经过(或不经过)加工硬化达到稳定状态的产品,T 代号后面必须跟有 1 位或多位阿拉伯数字

2. H 的细分状态

HXX 状态 H 后面的第 1 位阿拉伯数字表示获得该状态的基本处理程序,如下表示:

H1——单纯加工硬化状态。适用于未经附加热处理,只经加工硬化即获得所需强度的状态。

H2——加工硬化及不完全退火的状态。适用于加工硬化程度超过成品规定要求后,经不完全退火,使强度降低到规定指标的产品。对于室温下自然时效软化的合金,H2 与对应的 H3 具有相同的最大极限抗拉强度值;对于其他合金,H2 与对应的 H4 具有相同的最小极限抗拉强度值,但延伸率比 H1 稍高。

H3——加工硬化及稳定化处理的状态。适用于加工硬化后