

电解铝液铸轧生产 板带箔材

肖立隆 肖菡曦 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

电解铝液铸轧生产板带箔材

肖立隆 肖菡曦 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2011

内 容 提 要

本书系统介绍了电解铝液铸轧生产板带箔材的工艺技术和质量控制。本书从分析电解铝液的特点入手,在铸轧篇分析了铸轧工艺生产组织细小均匀、表面光洁、板形优良铸轧带坯的理论基础与技术措施;在冷轧篇简要介绍了冷轧中的板形控制、摩擦润滑、轧辊磨削以及退火、拉伸矫直等工序的理论与实践;在箔轧篇介绍了铝箔轧制的特点、基础理论与各生产工序中的技术条件与要求。书中对某些工序列出了工艺参数,可为生产实践提供参考。本书针对铸轧、冷轧、退火、箔轧等工序中的主要质量缺陷,在形成原因和机理上进行了探讨,提出了可能消除的途径和方法。

本书可供铝加工领域的技术人员、生产人员和管理人员阅读,也可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电解铝液铸轧生产板带箔材/肖立隆,肖菡曦编著. —北京:
冶金工业出版社, 2011. 1

ISBN 978-7-5024-5375-6

I. ①电… II. ①肖… ②肖… III. ①炼铝—电解冶金
IV. ①TF821

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010) 第 196038 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5375-6

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011 年 1 月第 1 版, 2011 年 1 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 14 印张; 335 千字; 212 页

45.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

长期以来,生产铝板带箔材,特别是生产优质板带材和双零铝箔材,一般均采用铝锭重熔—铸造锭坯—热轧—冷轧或铝锭重熔—铸轧—冷轧生产工艺,以保证产品的加工性能和最终质量。采用电解铝液直接铸轧生产软铝合金板带箔材新工艺,可简化生产工序,大幅度减少能耗,节约资源,降低成本,符合国家倡导的低碳环保、节能高效、可持续发展的要求,具有良好的经济效益和社会效益。

采用电解铝液直接铸轧生产板带箔材,在理论上和技术上是一次突破和创新。本书在铸轧篇首先分析了电解铝液的特点,探讨了电解铝液铸轧生产板带箔材在理论上的可行性,并根据其特点,从理论和实践的結合上提出了解决电解铝液存在缺点的技术措施,例如:配比一定的固体料,快速降温增核;根据情况选择合适的精炼剂,确定最佳精炼工艺,降低熔体含气量;合理设计和选用过滤器,优化过滤条件,降低含渣量;选择优质变质剂,优化变质工艺,提高变质效果;合理设计铸轧参数,稳定铸轧工艺,生产优质铸轧坯料。也就是说,尽最大努力,提高熔体洁净度,细化晶粒组织,获得组织细小均匀、表面光洁、板形优良的铸轧带坯。

在冷轧篇根据铸轧坯料生产的特点,简要介绍了冷轧中的板形控制、摩擦润滑、轧辊磨削以及退火、拉伸矫直等工序的理论与实践;在箔轧篇介绍了铝箔轧制的特点、基础理论与各生产工序中的技术条件与要求。书中对某些工序列出了工艺参数,可为生产实践提供参考。

本书针对铸轧、冷轧、退火、箔轧等工序中产品产生的主要缺陷,在形成原因和机理上进行了探讨,提出了可能消除的途径和方法。

本书较全面地介绍了采用电解铝液直接铸轧生产板带箔材的原理、设备、工艺、过程控制和质量控制等内容,兼顾理论性和实用性,可为有关铝加工工业的技术人员和生产工人阅读借鉴,也可供大专院校有关专业师生参考。

本书在编写过程中得到了西北铝加工厂、中南大学、湖南科技大学等有关单位的专家、领导、同仁的大力支持，提出了许多宝贵意见，在此致谢！

由于作者水平所限，书中不足之处在所难免，恳请读者指正赐教，深表谢忱。

肖立隆 肖菡曦
2010年7月

目 录

绪论	1
----------	---

铸 轧 篇

1 铝液熔炼	3
1.1 电解铝液的特点	3
1.2 电解铝液的熔炼	5
1.3 电解铝液的精炼	8
1.3.1 精炼的基本原理	9
1.3.2 精炼剂的选择与使用方法	9
1.3.3 使用精炼剂时应注意的技术特点	10
1.4 熔体中气体含量的测定	15
2 铝熔体铸轧	17
2.1 熔体过滤	17
2.1.1 刚玉管式过滤	17
2.1.2 泡沫陶瓷过滤	18
2.1.3 深床过滤	20
2.1.4 不同过滤方法比较	21
2.2 熔体变质	23
2.2.1 均匀形核	23
2.2.2 变质处理	26
2.3 铸轧	28
2.3.1 铸轧参数及其计算	30
2.3.2 铸轧生产实践	43
3 电磁铸轧	49
3.1 电磁铸轧设备	49
3.1.1 电磁发生器	49
3.1.2 底盘系统	50
3.1.3 供液系统	51
3.1.4 变频发生器	51
3.2 电磁铸轧工艺	52

3.3 电磁铸轧的效果与分析	52
3.3.1 晶粒细化	52
3.3.2 改善枝晶网结构	55
3.3.3 改善表面质量	58
3.4 电磁铸轧存在的问题	58
4 铸轧质量控制	60
4.1 铸轧过程的质量检验	60
4.2 主要质量缺陷分析	61
4.2.1 尺寸超差	61
4.2.2 表面质量缺陷	62
4.2.3 组织缺陷	67
4.3 铸轧辊套的影响与维修	72
4.3.1 铸轧辊的结构和功能	72
4.3.2 铸轧辊套的受力状态分析	72
4.3.3 铸轧辊的维修管理	74

冷 轧 篇

5 冷轧轧制变形基础理论	77
5.1 基本概念	77
5.1.1 弹性变形	78
5.1.2 塑性变形	78
5.1.3 不均匀变形	82
5.1.4 残余应力	84
5.1.5 咬入弧、咬入角	85
5.1.6 前滑	87
5.1.7 宽展	89
5.1.8 轧制力计算	91
5.2 轧制工艺的选择与确定	95
5.2.1 金属变形量	95
5.2.2 轧制制度的确定	96
5.2.3 冷轧生产工艺制度举例（参考）	100
6 冷轧过程及控制	102
6.1 板形控制	102
6.1.1 板形的基本概念	102
6.1.2 板形的影响因素	104
6.1.3 改善板形的方法	110

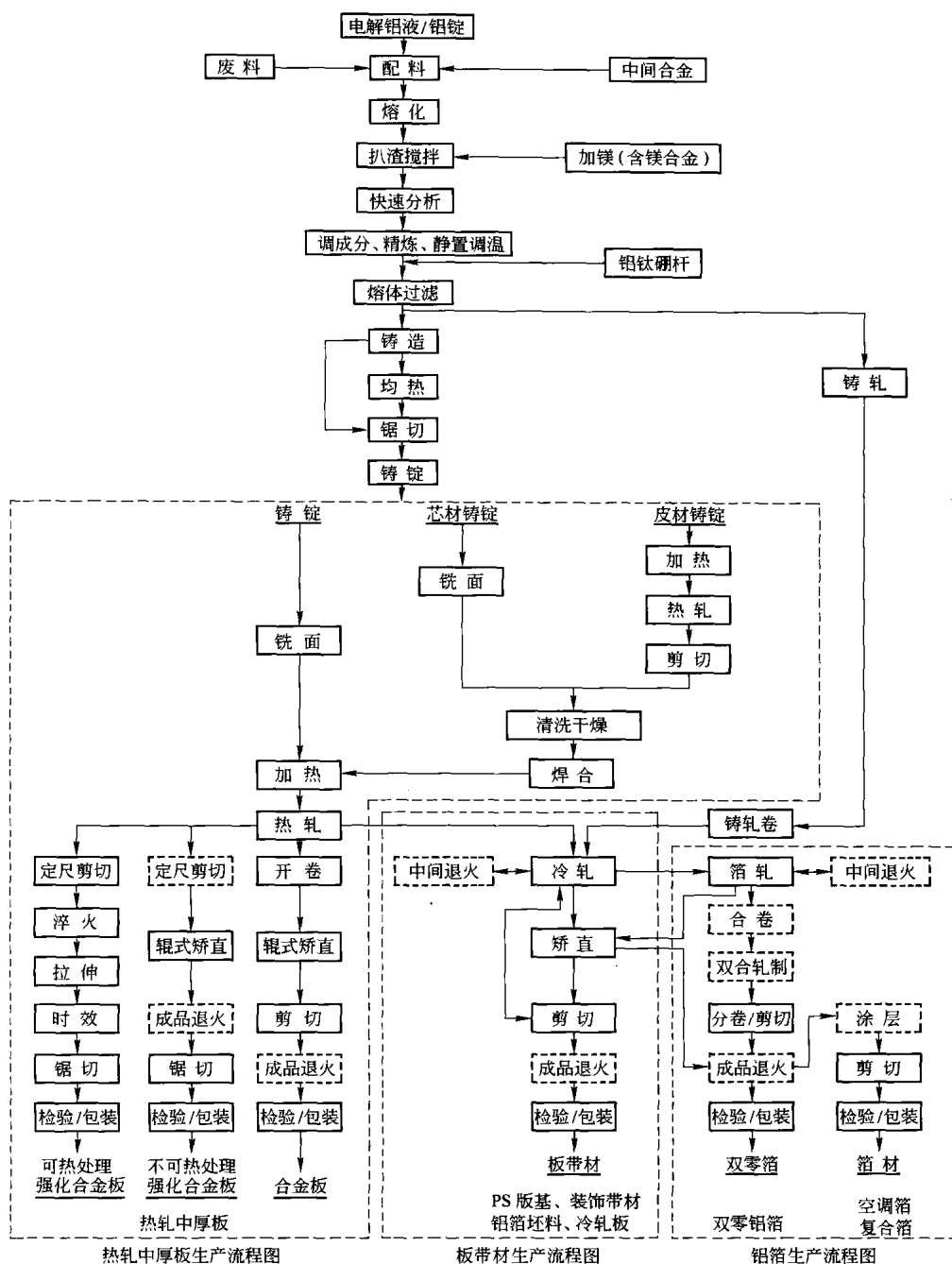
6.2 表面质量控制	116
6.2.1 冷轧加工中的润滑	117
6.2.2 润滑剂的种类及性质	121
6.2.3 轧辊的要求与磨削	128
6.3 厚度控制	129
6.3.1 带板厚度测量	130
6.3.2 带板厚度的自动控制	130
6.4 板带精整——矫直	131
6.4.1 拉弯矫直	131
6.4.2 板带材矫直总伸长率	133
6.4.3 纯拉伸矫直	135
7 再结晶退火工艺与质量控制	137
7.1 塑性冷变形后的组织性能	137
7.1.1 塑性冷变形后的组织特征	137
7.1.2 塑性变形后的力学性能	138
7.2 再结晶退火工艺基础	139
7.2.1 再结晶退火过程的组织特征	139
7.2.2 再结晶过程控制	144
7.3 变形铝及铝合金退火工艺制度	156
7.3.1 退火工艺的确定	156
7.3.2 部分铝合金退火参考工艺制度	160
7.4 成品主要质量缺陷	161
7.4.1 板形缺陷	161
7.4.2 表面缺陷	163
7.4.3 外形尺寸超差	171
7.4.4 组织力学性能超标	171

箔 轧 篇

8 箔材生产基础	173
8.1 铝箔的特点和用途	173
8.1.1 铝箔的特点	173
8.1.2 铝箔的用途	174
8.2 铝箔轧制理论与工艺	174
8.2.1 铝箔轧制特点	174
8.2.2 铝箔轧制的弹塑性曲线	176
8.2.3 制定铝箔轧制制度的原则	178

9 铝箔轧制过程及控制	181
9.1 铝箔轧制工艺	181
9.1.1 箔材轧制工艺举例	181
9.1.2 轧制各道次应注意的问题	182
9.1.3 四重高速铝箔轧机的箔材轧制特点	182
9.2 铝箔的厚度及板形控制	183
9.2.1 纵向厚度控制方法	183
9.2.2 板形与横向厚度的控制	185
9.3 铝箔生产中的轧辊及润滑油	188
9.3.1 铝箔生产对轧辊的要求	188
9.3.2 辊型设计及控制	190
9.3.3 轧制工艺润滑油	193
10 铝箔加工工艺与质量控制	196
10.1 铝箔的合卷	196
10.1.1 合卷机的种类	196
10.1.2 铝箔合卷工艺	196
10.2 箔材的剪切	197
10.2.1 剪切机的种类	197
10.2.2 铝箔剪切工艺	197
10.3 箔材成品退火	198
10.3.1 退火主要工艺参数的选择	198
10.3.2 消除退火铝箔表面污染的方法	199
10.3.3 铝箔成品退火制度（举例）	200
10.4 铝箔的质量检测与分析	200
10.4.1 铝箔质量	200
10.4.2 铝箔质量检查方法	201
10.4.3 箔材主要质量缺陷及分析	202
参考文献	212

当前生产板带箔产品，如双零箔材，高、中、低档 PS 版铝板基等材料，一般均采用



铝锭重熔—铸轧—冷轧或铝锭重熔—铸造锭坯—加热—热轧—冷轧的方式进行生产。

从生产工艺流程图看出：采用铸轧法生产板带箔材工艺与热轧开坯法生产板带箔材工艺减少了均热、锯切、铣面、加热、热轧开坯等工序，大大节省了能耗和设备投资，降低了生产成本；但是将铝锭重新加热熔化，还需要消耗大量热能。同时在熔化过程中，铝会产生烧损，既浪费资源，又污染环境，不符合国家倡导的“节能减排”精神。开发直接采用电解铝液进行铸轧，提供坯料，生产板带箔材，可节约资源，降低成本，符合低碳经济要求，减少温室气体排放，提高经济效益和社会效益，实现可持续发展，促进铝加工技术的进步。



1 铝液熔炼

1.1 电解铝液的特点

电解铝液是由特殊工艺将氧化铝在某些电解质（如冰晶石等）的参与下，通过高温电解而制得。电解铝液的温度一般在 $920 \sim 950^{\circ}\text{C}$ 之间，在槽中的停留时间长，大概每 24 小时从电解槽中抽取铝液一次，因此电解铝液不可避免地存在如下问题：

（1）含渣量。众所周知，在熔融的铝液表面覆盖着一层 α 氧化铝膜。 α 氧化膜密度为 $3.47\text{g}/\text{cm}^3$ ，是比较致密的，可以隔离熔融铝液与空气的接触，保护熔体内部不被继续氧化。但是，与此同时还存在着一种 γ 氧化铝膜。这种膜表面疏松，存在 $\phi 5 \sim 10\text{nm}$ 的小孔，易吸附水汽，在熔炼温度下含有 $1\% \sim 2\%$ 的 H_2O 。温度升高吸附的水汽量减少，但在 900°C 时仍然吸附有 0.34% 的 H_2O 。当温度高于 900°C 时， $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 转变成 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ，完全脱水，密度增大至 $3.97\text{g}/\text{cm}^3$ ，体积收缩 13% ，从而破坏了氧化铝膜的连续性。其密度大于熔融铝的 $2.3\text{g}/\text{cm}^3$ ，搅入铝液中即成为夹渣。因此，在电解铝液中的夹渣含量远高于正常熔化条件下铝锭重熔铝液的夹渣含量^[1]。

其实在高温电解铝液中，除了氧化铝夹渣外，还存在因电解产生或残留的 CaF_2 、 MgF_2 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 及富余的 Na 等众多离子或夹杂颗粒。

（2）气体含量。无论是电解铝液还是铝锭重熔铝液，都含有一定量的氢。氢含量的多少与熔体温度和在高温下停留的时间有着密切的关系。

1) 气体含量与熔体温度的关系。氢在铝熔体中的溶解度与温度和氢分压的关系可用下式表示：

$$\lg S = -\frac{A}{T} + B + \frac{1}{2}\lg p \quad (1-1)$$

式中 S ——熔体中的氢含量，即氢的溶解度， $\text{mL}/100\text{g}$ 铝；

T ——铝液温度， K ；

p ——测得的氢分压；

A, B ——与合金本质有关的常数，其数值见表 1-1。

表 1-1 铝合金气体溶解方程常数

合金成分	A	B	合金成分	A	B
Al99.9985% (液态)	2760	1.356	Al + 3% Mg	2695	1.506
Al99.9985% (固态)	2080	-0.625	Al + 3.5% Mg	2682	1.521
Al + 2% Si	2800	1.35	Al + 4% Mg	2670	1.535
Al + 4% Si	2950	1.47	Al + 5% Mg	2640	1.549
Al + 6% Si	3000	1.49	Al + 5.5% Mg	2632	1.563
Al + 8% Si	3050	1.51	Al + 6% Mg	2620	1.574
Al + 10% Si	3070	1.52	工业纯铝, 3A21, 2A16,	2760	1.356
Al + 2% Cu	2950	1.46	2A50, 2A14	2750	1.296
Al + 4% Cu	3050	1.50	6A02, 2A11	2730	1.454
Al + 6% Cu	3100	1.50	2A12, 2A70, 2A80, 5A02, 7A04, 2A06	2714	1.482
Al + 2% Mg	2720	1.469			
Al + 2.5% Mg	2710	1.491			

纯铝熔体中氢的溶解度示于图 1-1。

氢在熔体中的溶解度与氢分压的关系可改写成下述表达式:

$$S = K \sqrt{p_{H_2}}$$

或

$$S = K p_{H_2}^n \quad (1-2)$$

式中 K ——常数;

n ——指数 (气体呈原子态时为 $1/2$, 呈分子态时为 1)。

由式 1-1 和图 1-1 看出, 铝液温度越高, 氢的溶解度越高。熔体超过 850°C 以后, 铝液的氧化铝薄膜遭到严重破坏, 使溶解度急剧增加。在 900°C 的条件下, 其饱和溶解度远超过 $2.2\text{mL}/100\text{g}$ 铝。因此, 在使用铝锭重新熔化的生产中, 必须严格控制熔体温度。但用电解铝液直接生产, 熔体温度已经高达 920°C 左右, 就电解铝液本身再控制其熔体温度是不现实的。

2) 熔体停留时间与含气量的关系。不言而喻, 铝熔体在空气中停留, 氢在其中的溶解度未达到饱和之前, 总是在不断地与空气中的水汽发生反应, 吸收氢。因此, 熔体停留时间越长, 吸气越多, 含气量越高 (图 1-2)。

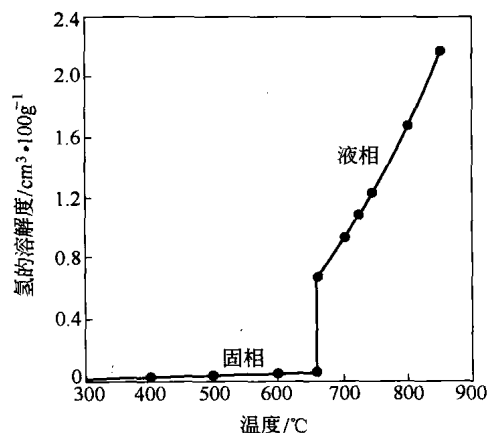


图 1-1 纯铝 (99.99%) 中氢的溶解度与温度的关系

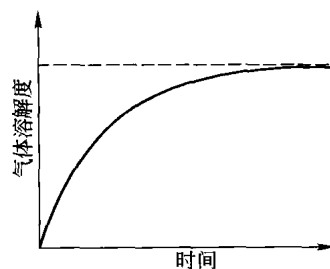


图 1-2 铝熔体中氢含量与停留时间的关系

实践表明,电解铝液中氢含量虽然远未达到饱和,出槽时经过去气精炼,但经转注至铸轧车间时,最高含气量仍可能达 0.3 ~ 0.8 mL/100g 熔体。

(3) 熔体中结晶核心。电解铝液由氧化铝电解生成,且较长时间处于高温条件下,出现严重的过热状态,其中存在的活性结晶核心极其稀少。一般认为,发生严重过热的铝熔体,必须使其降温凝固后再熔化,才能获得有效的活性结晶核心,在铸轧或铸造后,能得到正常的结晶组织。直接将过热的高温熔体进行铸造或铸轧,必然会产生粗大的晶粒组织,伴随出现各种铸造或铸轧缺陷。这一点我们将在后面的有关章节中详细讨论。

1.2 电解铝液的熔炼

电解铝液存在的上述特点,是生产优质板带箔材的重大障碍,需要采取有效的技术措施,减小或消除其存在的不利影响。就电解铝液铸轧而言,主要应做好如下方面的工作:

(1) 固液成分比。上面已经说过,高温电解铝液中缺乏活性结晶核心,采用 100% 的电解铝液,很难获得合格、优质的铸轧坯料。

生产和试验证明,全部电解铝液采用铝钛硼、铝钛碳作变质处理,并改进和调整工艺参数进行铸轧,都很难使晶粒细化;但加入 15% 以上的废料,在后续工序采取相应的技术措施,即可获得满意的铸轧带坯。

在板带箔生产中,自熔炼开始,其成品率一般在 55% ~ 80% 之间,生产废料约为 20% ~ 45%,因此往电解铝液中加入 20% ~ 40% 的固体废料其来源是没有问题的。这样还可以充分利用铝液的高温余热,熔化固体废料。同时将废料埋入液态铝中,可减少固态废料熔化过程中的氧化作用,降低能源消耗和节约资源,提高经济效益,减小环境污染。

在生产过程中,将固体废料或重熔用固态铝锭先装入热炉中,使固体料充分吸收倒炉后的余热,让废料或铝锭表面吸着的水分蒸发。然后注入高温电解铝液,使固体废料或铝锭尽可能淹没在熔融铝液中,这样既可使固体料充分吸收高温铝熔体的过热的热量,加快固体料的熔化,迅速降低过热熔体的温度,甚至使过热熔体在与固体料接触的急冷区域发生凝固,达到快速降温增核的目的;同时提高热效率,并让固体料在与空气隔绝的条件下熔化,减少烧损。

根据热量守恒定律,固体料在炉内吸收热量,温度升高。当达到铝的熔点时 (660℃) 开始熔化。熔化完成后,还将继续加热升温 (700 ~ 760℃)。在这个过程中所需要的热量为:

$$Q_1 = \int_{20}^{T_M} c_1 dT + L + \int_{T_M}^T c_2 dT \quad (1-3)$$

式中 c_1 ——固体比热容,取 1.138 kJ/(kg · K);

c_2 ——液体比热容,取 1.046 kJ/(kg · K);

L ——熔化潜热,取 393.56 kJ/kg;

T_M ——熔点,℃。

如加入 250kg 的固体料和 750kg 的过热熔体,按混合后吨熔体计算。设铝液从电解槽抽出,转入熔炼炉中,其液体温度下降至 880℃,加入的固体料料温经预热后为 60℃。固体料吸热熔化的热量为:

$$250 \times 1.138 \times (660 - 60) + 250 \times 393.56 = 269090 \text{ kJ}$$

熔体降至凝固点所能释放的热量为：

$$750 \times 1.046 \times (880 - 660) = 172590 \text{ kJ}$$

显然在这种固液比例条件下，仅靠熔体降温所释放的热量还不足以使固体料升温至熔点温度。为了实现两物体间的热平衡，铝熔体需凝固释放出结晶潜热。若全部凝固，其结晶潜热为：

$$750 \times 393.56 = 295170 \text{ kJ}$$

结晶潜热很大。熔体只要有三分之一发生结晶，就可将固体料加热到 660℃。

通过固体料加入的多少，可以控制过热熔体在热交换中的凝固量。加入的固体料少，熔体结晶的量少，降温增核的几率小；相反，加入的固体料多，降温增核的几率增加。由此可见，控制加入的固体量，就可以在在一定程度上控制熔体的活性结晶核心。

(2) 温度控制。一般地说，当在铝熔体中加入一定量的固体料后，其整体温度将下降至接近铝的熔点温度，甚至低至使铝熔体凝固，应随即加热升温。升温速度在不引起铝熔体局部过热的前提下，可尽快加速，因为铝的烧损与熔化时间成正比（见图 1-3），并控制温度在 700 ~ 760℃ 之间。超过 760℃ 将会使固体料快速熔化新增加的活性结晶核心减少或钝化，对质量产生不良影响。

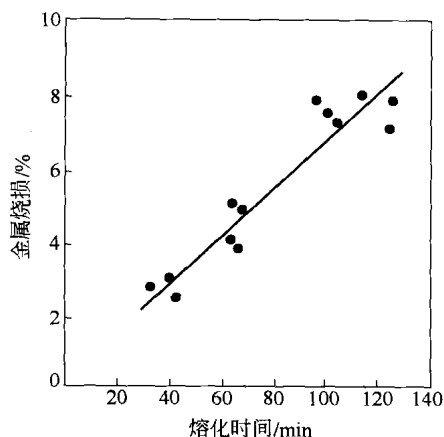


图 1-3 熔化时间对金属烧损的影响

(3) 化学成分调整。对纯铝系列而言，其铁、硅含量以及铁、硅含量之间的比例对铸轧晶粒度的影响是很重要的。在加 Al-Ti 合金变质、相同的工艺条件下，1070、1050、1235 合金的铸轧晶粒度如表 1-2 所示。

表 1-2 1070、1050、1235 合金在相同工艺条件下的铸轧晶粒度

合金	工艺条件 I							工艺条件 II						
	投料 卷数	两面三级		一面三级 一面五级		两面五级		投料 卷数	两面三级		一面三级 一面五级		两面五级	
		卷	%	卷	%	卷	%		卷	%	卷	%	卷	%
1070	102	46	45.1	28	27.5	28	27.5	142	47	33.1	44	31.0	51	35.9
1050	44	21	47.7	9	20.5	14	31.8	35	12	34.3	9	25.7	14	40.0
1235	31	16	51.6	6	19.4	9	29.0	45	22	48.9	9	20.0	14	31.1
合计	177	83	46.9	43	24.3	51	28.8	222	81	36.5	62	27.9	79	35.6

由表 1-2 看出，随着铁、硅含量的增加，在同等条件下，晶粒度趋于细化；在铁、硅总量相同的条件下，合理调整铁、硅含量的比例，一般 Fe/Si 为 2.5 ~ 4 之间，晶粒度趋于细化。因此，控制铁、硅含量及其比例，是细化纯铝系列铸轧晶粒的有效方法之一^[2]。

(4) 熔体转注。将电解铝液用浇包注入熔化炉或将熔炼好的铝液转注入静置炉时，应特别注意过程中的熔体落差。落差大，熔体下落时会产生很大的冲击。这样做，一是容易

裹入气体, 增加熔体的含气量; 二是高温熔体与空气发生反应, 产生大量的氧化夹渣, 既对熔体造成污染, 又降低生产成品率。因此, 一般采取的方法是尽可能减小落差, 或在熔体转注过程中, 采用竖立圆管。圆管靠近炉底, 使熔体在竖立圆管中满管流动。在下落过程中, 防止熔体与空气接触产生氧化和裹入气体。这种方法虽然有效, 但不能根本解决裹气和氧化问题。最有效的方法是采用压缩空气引流, 虹吸密闭转注, 喷射氮氯 (氩氯) 精炼铝熔体, 可完全防止裹气和转注中的氧化现象发生。

转注装置原理如图 1-4 所示。

由图看出, 虹吸管一头插入熔炼炉 (或熔体浇包内), 另一头置于静置炉 (或熔化炉内)。另外, 在风管 4 处接出一风管, 装上阀 1、阀 2, 阀 1 接压缩空气。在阀 1 与阀 2 之间再接出一风管装上阀 3, 接氮气、氯气或氩氯气体。

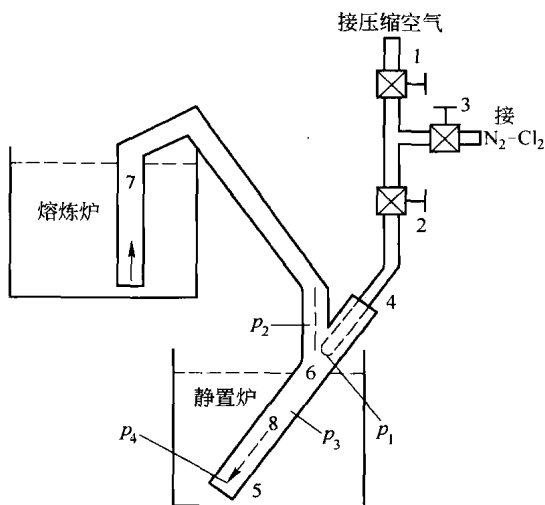


图 1-4 虹吸、精炼装置原理图

虹吸产生的原理与压头: 将阀 3 关闭, 阀 1、阀 2 开启, 压缩空气通过风管 4 流入

虹吸管, 在 6 处产生喷射, 将压缩空气的压强转换为射流的动能。即由于压缩空气在 6 处速度很大, 达到声速, 在管 7 处产生负压, 形成抽力。

设 $G_1 \sim G_3$ 分别为喷射流体、输送流体、混合流体的质量流量; $Q_1 \sim Q_3$ 分别为喷射流体、输送流体、混合流体的体积流量; $\rho_1 \sim \rho_3$ 分别为喷射流体、输送流体、混合流体的密度; $u_1 \sim u_3$ 分别为喷射流体、输送流体、混合流体的流速; $A_1 \sim A_3$ 分别为喷射流体、输送流体、混合流体的横截面积; 根据气体流动连续方程有:

$$G_1 + G_2 = G_3 \quad (1-4)$$

或

$$Q_1 \rho_1 + Q_2 \rho_2 = Q_3 \rho_3 \quad (1-5)$$

故混合流体的密度为:

$$\rho_3 = \frac{G_1 + G_2}{\frac{G_1}{\rho_1} + \frac{G_2}{\rho_2}} \quad (1-6)$$

如将喷射器中的摩擦阻力忽略不计, 其动量方程为:

$$\rho_1 A_1 u_1^2 + \rho_2 A_2 u_2^2 - \rho_3 A_3 u_3^2 = A_3 (p_3 - p_1) \quad (1-7)$$

式中 p_1 ——喷射流体压力;

p_3 ——混合流体压力。

设虹吸管出口端 5 处的气体压力为 p_4 , 则:

$$p_4 = p_3 + \frac{\varphi \rho_3 u_3^2}{2} \quad (1-8)$$

式中, φ 为扩张段的压力恢复系数。喷射器所产生的压力为:

$$h = p_4 - p_1 \quad (1-9)$$

在该装置中, 当铝熔体通过之前, 喷射流体所产生的负压力只起着抽气的作用, 故 h 为喷射器的吸力。在实践中, 若虹吸管内径为 $\phi 52\text{mm}$, 压缩空气压力 (表压) 为 6.7kgf/cm^2 , 其产生的抽力 (即负压) 为 370mmHg , 换算成对铝熔体的抽力为:

$$h_{\text{Al}} = \frac{\rho_{\text{Hg}} h_{\text{Hg}}}{\rho_{\text{Al}}} = 2180\text{mmAl}$$

实验证明, 这个数据是正确的。用这种方法将铝熔体从熔炼炉转入静置炉, 在全封闭的管道中运行, 转注中不与空气接触, 可完全避免氧化、造渣和裹气现象, 有效地提高了转注质量。如果再引入氮氯 (或氩氯) 精炼 (这一点在后面的精炼部分予以详细讨论), 更可以提高精炼质量, 实现边转注边精炼, 减少后续的精炼时间^[3]。

1.3 电解铝液的精炼

如上所述, 电解铝液熔体中无论是含气量, 还是含渣量, 都远远超过重熔铝液。溶解在铝液中的气体随着熔体温度的下降, 溶解度随之减小。在铸造或铸轧过程中, 熔体急剧冷却, 凝成固体, 溶解在铝中的气体就可能出现严重的过饱和状态。欲使结晶过程中析出的气体, 在无外来核心的条件下, 依靠自身的过饱和度, 聚集成核, 扩散, 使气泡长大, 然后上浮逸出, 是不可能的。原因如下: (1) 熔体在铸轧过程中, 结晶速度很快, 溶解的气体来不及成核、生长, 结晶就已经完成; (2) 即使本身形成了核心, 但核心尺寸处于临界状态时, 很不稳定, 又可能重新溶解于熔体中; (3) 纵使核心长大成气泡, 但能否上浮逸出, 还得满足气泡与熔体表面分开的浮力大于吸附气泡的表面张力时, 气泡才能逸出。即:

$$p_1 = B_1(\rho_1 - \rho_2)d^3 \quad (1-10)$$

$$p_2 = B_2\sigma d^2 \quad (1-11)$$

式中 p_1 ——气泡的浮力;

p_2 ——气泡与熔体界面的表面张力。

当 $p_1 \geq p_2$ 时, 得:

$$d \geq A \frac{\sigma}{\rho_1 - \rho_2} \quad (1-12)$$

式中 ρ_1 ——熔体密度;

ρ_2 ——气体密度;

σ ——熔体的表面张力;

d ——气泡直径;

B_1, B_2, A ——常数。

气泡脱离熔体表面时应具有的最小直径 d_0 , 可由下式确定:

$$d_0 = 0.002Q \frac{\sigma}{\rho_1 - \rho_2} \quad (1-13)$$