

# 铝合金铸造、挤压生产 管棒型材

LÜHEJIN ZHUZAO JIYA SHENGCHAN GUANBANGXINGCAI

肖立隆 肖菡曦 编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 铝合金铸造、挤压生产 管棒型材

肖立隆 肖菡曦 编著

北京  
冶金工业出版社  
2013

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了铝合金管棒型材的生产过程和质量控制。全书分为熔炼铸造篇、挤压篇、管材轧制与拉伸篇和热处理与精整篇，各篇内容密切结合生产实际，以各环节的新工艺、新技术、新方法贯穿全书。本书可与《电解铝液铸轧生产板带箔材》（冶金工业出版社，2011）配套使用。

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，也可供高等院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

铝合金铸造、挤压生产管棒型材/肖立隆,肖菡曦编著. —北京:冶金工业出版社, 2013. 10

ISBN 978-7-5024-6392-2

I. ①铝… II. ①肖… ②肖… III. ①铝合金—管材—生产工艺  
②铝合金—棒材—生产工艺 IV. ①TG146.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 232939 号

出版人 谭学余

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 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 曾 媛 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6392-2

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷  
2013 年 10 月第 1 版, 2013 年 10 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 16.75 印张; 406 千字; 255 页

56.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010) 64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

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

铝及铝合金管、棒、型材，在国内大都采用铝锭与中间合金重熔，通过一系列处理后，将重熔铝液铸造成空心铸锭（生产管材用）或实心铸锭（生产棒、型材用），再将铸锭进行均匀化退火后中断，然后加热，挤压成所需要的材料。特别是硬铝与超硬铝合金材料，一直沿用这种工艺生产。目前有直接采用电解铝液铸造1XXX系列，3003、6063、6061等软铝合金铸锭进行挤压生产的，这方面的技术已日臻成熟，但大多数硬铝与超硬铝、高镁铝等合金材料，因其含镁、铜、锌等化学元素较高，合金相结构比较复杂，且这些材料多用于关键结构件，对组织、性能要求较高，尚未有采用电解铝液进行合金化处理、铸造成铸锭、进行挤压生产的报道。其实，无论是生产板、带、箔材，还是生产管、棒、型挤压材，无论是铸轧还是铸造，对铝熔体的要求，基本上是相同的，如要求熔体具有尽可能少的气体含量和夹杂量，具有尽可能多的活性结晶核心和良好的变质处理效果，铸轧、铸造时能获得细小、均匀的等轴晶组织，所以在合金熔炼时对熔体的处理方法总的说来也是相同的。但是铸造与铸轧毕竟是两种不同的工艺，结晶过程中其冷却强度和结晶速度存在着明显差异，各自具有不同的特点，其处理的要求也会不尽相同。

采用电解铝液直接铸轧、铸造，充分利用其积蓄的大量热能，不仅具有可观的经济效益，而且节约能源，减少温室气体排放，同时省却铝锭重熔工序，降低原材料烧损，减少资源消耗。当前中国每年铝锭产量已达1200万吨，据估算，如将其中的500万吨电解铝液作为原材料，直接生产铝加工材，除年可创经济效益35亿元外，还能减少热量的直接排放损失 $6.8 \times 10^{12}$  kJ，减少影响大气环境的正熵流 $1.422 \times 10^{10}$  kJ/K，也即减少人类赖以生存的与之相当的负熵流的无谓消耗；减少燃料消耗，节约普通燃油22.2万吨，减少二氧化碳气体排放78万吨；同时，年可减少约12万吨的铝锭损耗，相当于节约一个大型铝厂生产所消耗的能源和不可再生的矿产资源。其节能减排的效果极其显著，意义

非常深远。因此，该生产技术符合国家节约、高效、可持续发展的产业政策，随着利用电解铝液比重的提高，其创造的价值也会随之增加，具有极其广阔、光明的发展前景。

本书对铝合金熔炼铸造中的特点进行了一些比较和分析。对于挤压工艺与控制工艺，则根据近年来的生产实践中存在的问题和出现的新工艺、新技术、新方法，做了一些介绍和探讨，供铝加工界的同仁们研究和参考，希望能为促进我国铝加工技术的提高和发展做出贡献。

本书得到湖南科技大学自然科学基金（E51375）的资助，得到中南大学、湖南科技大学领导和实验工作人员的大力支持与协助，在此深表感谢。

由于编著者水平所限，书中不足之处在所难免，恳请指正。

编著者

2013年6月

## 冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价(元)
电解铝液铸轧生产板带箔材	45.00
铝冶炼生产技术手册(上册)	239.00
铝冶炼生产技术手册(下册)	229.00
铝合金管、棒、线材生产技术	42.00
铝合金型材生产技术	39.00
铝加工技术实用手册	248.00
现代铝加工生产技术丛书	
铝箔生产技术	28.00
铝合金熔炼与铸造技术	32.00
铝合金热轧及热连轧技术	30.00
铝合金型材表面处理技术	39.00
铝合金挤压工模具技术	35.00
铝合金生产安全及环保技术	29.00
铝合金中厚板生产技术	38.00
铝合金特种管、型材生产技术	36.00
铝及铝合金粉材生产技术	25.00
当代铝熔体处理技术	69.00
氧化铝厂设计	69.00
氧化铝生产工艺	28.00
氧化铝生产知识问答	29.00
电解铝生产工艺与设备	35.00
拜耳法生产氧化铝	36.00
铝用炭阳极技术	46.00
现代铝电解	148.00
铝电解炭阳极生产与应用	58.00
铝电解生产技术	39.00
原铝及其合金的熔炼与铸造	59.00
铝合金熔铸生产技术问答	49.00
电解法生产铝合金	26.00
铝合金阳极氧化工艺技术应用手册	29.00
铝合金材料主要缺陷与质量控制技术	42.00
铝电解和铝合金铸造生产与安全	55.00
铝合金生产设备及使用维护技术	38.00
铝合金无缝管生产原理与工艺	60.00
铝合金材料及其热处理技术	53.00
铝合金锻造技术	48.00



# 目 录

## 熔炼铸造篇

1 合金熔炼 .....	1
1.1 挤压材合金的分类 .....	1
1.2 熔炼时的加料顺序 .....	1
1.2.1 加装废料 .....	2
1.2.2 加装中间合金 .....	2
1.2.3 注入高温电解铝液(或装入重熔铝锭) .....	3
1.2.4 铜的加入 .....	3
1.2.5 锌的加入 .....	4
1.2.6 铅的加入 .....	4
1.2.7 镁的加入 .....	6
1.3 合金熔炼炉内的精炼 .....	6
1.3.1 炉子的分类和选择 .....	7
1.3.2 合金熔体的精炼 .....	7
1.4 合金静置炉内的精炼 .....	9
1.5 合金的在线精炼 .....	10
1.6 合金熔体的在线过滤 .....	11
2 合金铸造时的晶体生长 .....	13
2.1 几个基本概念 .....	14
2.2 浓度场、分凝系数在结晶中的作用 .....	15
2.3 在纯扩散条件下溶质边界层的形成和作用 .....	16
2.4 对流条件下的溶质分凝边界层 .....	18
2.5 固液界面的稳定性和组分过冷的关系 .....	19
2.5.1 温度梯度的影响 .....	19
2.5.2 浓度梯度的影响 .....	20
2.5.3 界面能对界面稳定性的影响 .....	20
2.6 组分过冷对结晶形态的影响 .....	21
2.7 产生组分过冷的条件 .....	22
2.8 界面稳定性动力学 .....	24
2.9 干扰波长对界面稳定性的影响 .....	25

2.10	不同因素对界面稳定性的影响 .....	25
2.11	界面稳定性动力学理论与组分过冷的关系 .....	26
<b>3</b>	<b>组分过冷理论与铸造实践 .....</b>	<b>27</b>
3.1	铝合金铸造的特点 .....	27
3.2	组分过冷区与结晶形核 .....	28
3.3	温度梯度与冷却方式的关系 .....	29
3.3.1	一次水冷与二次水冷对温度梯度的影响 .....	30
3.3.2	铸件表面与结晶器内壁之间的气隙对温度梯度的影响 .....	30
3.4	生产条件下对流对边界层的影响 .....	31
3.5	动力学理论与生产实践 .....	32
3.6	液穴深度的影响与工艺控制 .....	33
<b>4</b>	<b>铸造工艺与质量控制 .....</b>	<b>35</b>
4.1	变质处理 .....	35
4.1.1	熔体变质机理 .....	35
4.1.2	悬浮粒子的成核条件 .....	35
4.1.3	界面失配与成核行为 .....	36
4.1.4	界面结构的共格关系 .....	37
4.1.5	半共格面的错合度 .....	37
4.1.6	位错对界面能的影响 .....	39
4.1.7	界面失配对成核行为的影响 .....	40
4.1.8	不同形核方式的成核能比较 .....	41
4.1.9	变质剂的选择和使用方法 .....	43
4.2	铸造机类型简介 .....	45
4.3	主要铸造工具 .....	48
4.4	铸造工艺 .....	51
4.4.1	铸造实心锭 .....	51
4.4.2	单模铸造空心锭 .....	51
4.4.3	同水平绝热多模铸造空心锭 .....	52
4.5	铸造工艺参数的控制 .....	54
4.6	铸造工艺示例 .....	57
<b>5</b>	<b>铸锭质量检验与分析 .....</b>	<b>64</b>
5.1	铸锭质量检验方法 .....	64
5.2	铸锭主要质量缺陷分析 .....	65
5.2.1	缺陷分类 .....	65
5.2.2	主要缺陷分析 .....	66



## 挤 压 篇

<b>6 挤压加工的理论基础</b> .....	85
6.1 挤压形式的分类 .....	85
6.2 挤压金属流动特点 .....	86
6.2.1 挤压阶段的划分及特点 .....	86
6.2.2 反向挤压的金属流动 .....	93
6.2.3 静液挤压 .....	94
6.3 挤压力的实测与计算 .....	95
6.3.1 挤压力实测及影响挤压力的因素 .....	95
6.3.2 确定挤压力的解析法 .....	95
6.3.3 挤压力公式中参数的确定 .....	100
6.3.4 穿孔力及其计算 .....	104
<b>7 挤压过程控制</b> .....	107
7.1 挤压过程中术语简介 .....	107
7.1.1 比压 .....	107
7.1.2 挤压系数 .....	107
7.1.3 分流比 .....	108
7.1.4 挤压速度与制品流出速度 .....	108
7.1.5 挤压残料 .....	108
7.1.6 几何废料与技术废品 .....	109
7.2 挤压准备工作 .....	109
7.2.1 铸锭准备 .....	109
7.2.2 工、模具准备 .....	114
7.2.3 铸块、挤压筒加热示例 .....	122
7.3 挤压 .....	123
7.3.1 正挤压与反挤压 .....	123
7.3.2 固定针挤压与随动针挤压 .....	134
7.3.3 挤压过程工艺控制 .....	139
<b>8 挤压质量检验与缺陷分析</b> .....	147
8.1 质量检验 .....	147
8.2 挤压制品主要缺陷分析 .....	147
8.2.1 表面质量问题 .....	147
8.2.2 尺寸不合格 .....	150

8.2.3 组织缺陷 .....	153
------------------	-----

## 管材轧制与拉伸篇

<b>9 管材轧制</b> .....	157
9.1 管材轧制的基本方法 .....	157
9.1.1 二辊周期式冷轧管法 .....	157
9.1.2 多辊周期式冷轧管法 .....	158
9.1.3 周期式冷轧管法的缺点及其改进方法 .....	158
9.2 冷轧管的理论基础 .....	159
9.2.1 金属的变形过程 .....	159
9.2.2 压下量沿变形锥的分布 .....	160
9.2.3 变形区内的应力状态 .....	163
9.2.4 冷轧管时金属对轧辊压力的影响因素 .....	164
9.2.5 金属对轧辊压力的计算 .....	166
9.3 二辊冷轧管的孔型结构 .....	167
9.3.1 孔型轧槽结构 .....	167
9.3.2 轧槽底部和芯头结构 .....	168
9.3.3 轧槽断面的结构尺寸 .....	172
<b>10 管材拉伸</b> .....	174
10.1 管材拉伸的基本方法 .....	174
10.2 空拉 .....	174
10.2.1 管材空拉时的变形与应力 .....	174
10.2.2 影响空拉时壁厚变化的因素 .....	175
10.2.3 空拉时管材偏心的纠正 .....	175
10.3 固定芯头拉伸 .....	176
10.4 游动芯头拉伸 .....	176
10.4.1 游动芯头的受力状态 .....	177
10.4.2 游动芯头拉伸时的力学平衡条件 .....	177
10.4.3 芯头在拉伸中的作用和影响 .....	178
10.4.4 游动芯头与拉伸模具的匹配关系 .....	181
<b>11 管材生产工艺与质量控制</b> .....	183
11.1 管材毛料的质量要求 .....	183
11.1.1 表面质量 .....	183
11.1.2 尺寸偏差 .....	183
11.1.3 材料性能及加工前的准备 .....	183
11.2 管材加工过程中的工艺控制 .....	184

11.2.1	管材生产中的工艺润滑	184
11.2.2	压延管材工艺质量控制	185
11.3	拉伸管材的工艺控制	187
11.3.1	铝合金管材拉伸现状	187
11.3.2	拉伸工艺与质量控制	187
11.3.3	拉伸工艺示例	195
11.4	管材生产主要质量缺陷分析	195
11.4.1	飞边	195
11.4.2	压延棱子	195
11.4.3	孔型啃伤	196
11.4.4	波浪	196
11.4.5	裂纹	196
11.4.6	金属及非金属压入或压坑	198
11.4.7	擦、划伤	198
11.4.8	椭圆	199
11.4.9	跳车痕	199
11.4.10	表面粗糙	199

## 热处理与精整篇

12	退火	201
12.1	均匀化退火	201
12.2	再结晶退火	201
12.2.1	再结晶退火工艺在管、棒、型材中的分类与应用	202
12.2.2	再结晶退火工艺参数的制定	203
12.2.3	部分合金退火工艺制度示例	204
12.2.4	生产实践中再结晶退火存在的主要问题	205
12.2.5	解决组织均匀性的方法	205
13	淬火	207
13.1	淬火工艺简述	207
13.2	淬火工艺参数的确定	207
13.2.1	淬火与时效合金的特性	207
13.2.2	淬火加热温度的确定	208
13.2.3	淬火保温时间的确定	209
13.2.4	淬火冷却速度的确定	209
13.3	淬火过程中组织性能的变化	210
13.3.1	淬火过程中的组织变化	210
13.3.2	淬火过程中的尺寸变化	213

13.3.3 淬火过程中的性能变化 .....	213
13.4 淬火工艺制度示例 .....	213
<b>14 时效 .....</b>	<b>215</b>
14.1 时效概念 .....	215
14.2 时效强化相的脱溶 .....	215
14.3 脱溶的一般序列 .....	217
14.4 脱溶产物特征 .....	218
14.4.1 原子偏聚区——G. P. 区 .....	218
14.4.2 过渡相 .....	218
14.4.3 平衡相 .....	219
14.5 连续脱溶组织 .....	219
14.5.1 普遍脱溶 .....	220
14.5.2 局部脱溶 .....	220
14.6 时效过程中合金性能的变化 .....	220
14.6.1 力学性能的变化 .....	221
14.6.2 耐蚀性能的改变 .....	222
14.7 时效工艺与控制 .....	223
14.7.1 时效温度和时间与时效强化和脱溶相结构的关系 .....	223
14.7.2 时效温度对材料强度的影响 .....	224
14.7.3 时效工艺分类 .....	224
14.8 热处理合金强化机制 .....	225
14.8.1 Al-Cu-Mg 系合金 .....	226
14.8.2 Al-Mg-Si 系和 Al-Mg-Si-Cu 系合金 .....	227
14.8.3 Al-Zn-Mg 系合金 .....	228
14.9 时效工艺示例 .....	229
<b>15 精整 .....</b>	<b>231</b>
15.1 张力拉伸矫直 .....	231
15.1.1 拉伸矫直的基本概念 .....	231
15.1.2 拉伸率控制 .....	232
15.1.3 拉伸工艺质量控制 .....	233
15.2 辊式矫直 .....	234
15.3 型材辊式矫正 .....	235
15.3.1 辊式矫正的技术基础 .....	235
15.3.2 型材辊式矫正方法示例 .....	235
<b>16 热处理及精整主要质量缺陷及分析 .....</b>	<b>246</b>
16.1 组织性能缺陷 .....	246

---

16.1.1	过烧	246
16.1.2	晶粒粗大	249
16.1.3	粗晶环	249
16.1.4	力学性能不合格	250
16.1.5	裂纹	251
16.1.6	应力畸变	251
16.2	尺寸偏差	252
16.2.1	直径、壁厚超差	252
16.2.2	角度偏差	252
16.2.3	圆度	253
16.2.4	镰刀弯	253
16.3	表面质量缺陷	253
16.3.1	擦、划伤	253
16.3.2	磕碰伤	253
16.3.3	表面印痕、斑纹	254
16.3.4	油斑	254
参考文献		255

# 熔 炼 铸 造 篇

电解铝液在冶炼过程中,长时间处于高温条件下,吸收了大量气体,同时产生大量的氧化夹杂物,熔体质量远低于铝锭重熔铝液的质量。关于这些问题已经在《电解铝液铸轧生产板带箔材》(冶金工业出版社,2011)一书中做了比较详细的阐述,这里对铸造中出现的问题将会给予重点说明。

## 1 合金熔炼

无论是采用铸轧生产板、带、箔材,还是采用铸造、挤压生产管、棒、型材,都会产生一定的几何废料和技术废品。这些废料在合金熔炼时都要按一定比例配入炉料中。这样做既能节省资源,节约成本,也能为改善电解铝液或重熔铝液性能,提高熔体的结晶核心数量和活性创造条件,为生产合格乃至优质铝材奠定基础。

### 1.1 挤压材合金的分类

挤压材合金品种繁多,用途和性能各异。按材质的力学性能可分为软合金和硬合金,按热处理性能可分为热处理可强化合金和热处理不可强化合金,按主要用途可分为防锈铝合金和结构件铝合金,按所含化学成分可分为铝锰系、铝镁系、铝铜系、铝镁硅系合金等。但这些分类都有一定的局限性,不够严谨。因此,要对其进行严格的科学分类是比较困难的。为了方便探讨合金的熔铸性能和其后续的挤压加工性能,我们将其粗略地分为软铝合金(含工业纯铝、3A21、5A02、6063、6061、6A02等),硬铝合金(含2A11、2A12、2A70等),超硬铝合金(含7A03、7A04、7A09等),防锈铝合金(含5A01、5A03、5A05、5A12、5A13等)。

软铝合金化学成分比较单一,或组元含量较低,防锈铝合金主要添加元素为镁或锰,虽然成分单一,但有的含量较高,使得铸造难度和加工难度增加。硬铝合金和超硬铝合金添加元素较多,且含量较高,熔铸时会形成复杂的相组成物,通过后续的工艺处理,可显著提高材料的力学性能,因此相对于软铝合金而言,也明显地增加了铸造难度和加工难度。

### 1.2 熔炼时的加料顺序

如上所说,生产都要配比一定量的废料。即使在采用铝锭重熔铝液铸造生产时,不加入一定比例的废料,其铸造工艺难度相对增大,铸造晶粒度在同等变质条件下容易粗化,



铸造时易产生裂纹等缺陷。为了提高产品质量，提高金属的实收率和成品率，必须根据各金属元素的物理化学特性及其在铝中的固溶度，查阅铝与所加入元素的状态图，合理安排加料顺序。

采用中间合金配料时，一般加料顺序如下。

### 1.2.1 加装废料

将废料平铺于炉底，小块料置于下层，大块料置于上层。这样能借助于炉子的余热，烘干废料表面的吸着水，去除表面黏附的油脂，尽量降低因废料带来的不利影响。

### 1.2.2 加装中间合金

铝合金中含铁、硅、锰、铬、镍等合金元素时，因其熔化温度较高（表 1-1），远高于铝的熔点；而在铝中的固溶度又比较小（表 1-2，图 1-1 ~ 图 1-5），因此，在铝的熔炼温度下，这些添加元素既不能熔化，又不能充分溶解。为保证化学成分合格、均匀，一般将其制成一定比例含量的中间合金，于装炉时加入，置于废料之上。但是随着铝加工技术的进步，有人将这些元素先制成粉末，再将粉末与熔剂和黏结剂按一定比例混合，制成饼状添加剂，在调整化学成分时加入。

表 1-1 铁、硅、锰、铬、镍的熔点

元 素	Fe	Si	Mn	Cr	Ni
熔点/℃	1535	1440	1101	1800	1465

表 1-2 铁、硅、锰、铬、镍在铝中的最大固溶度

元 素	Fe	Si	Mn	Cr	Ni
温度/℃	655	580	660	660	640
固溶度（质量分数）/%	0.052	1.65	1.82	0.77	0.05

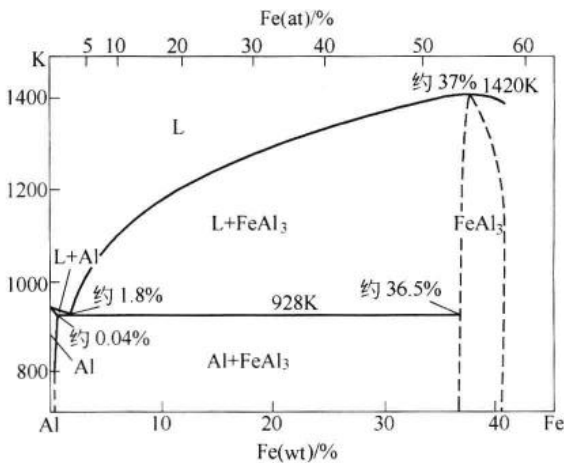


图 1-1 铝铁状态图

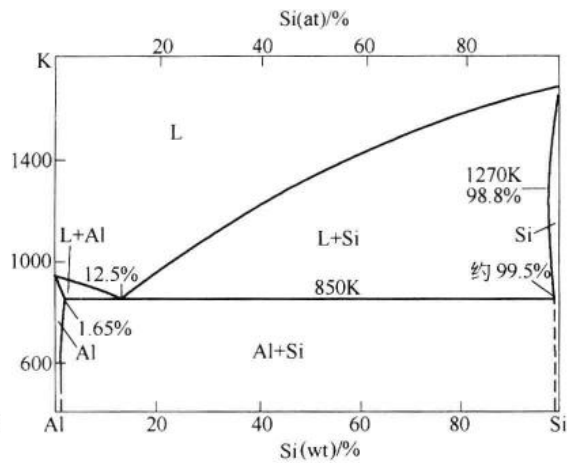


图 1-2 铝硅状态图

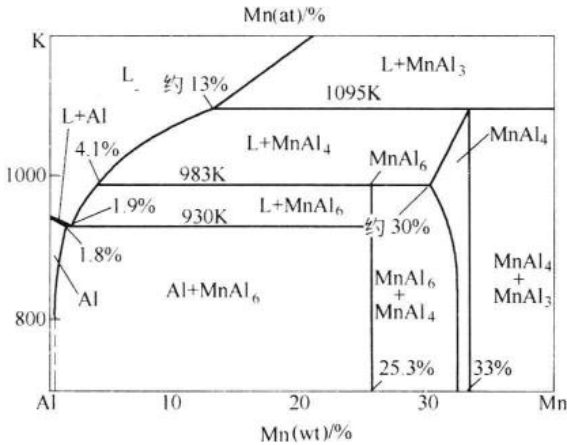


图 1-3 铝锰状态图

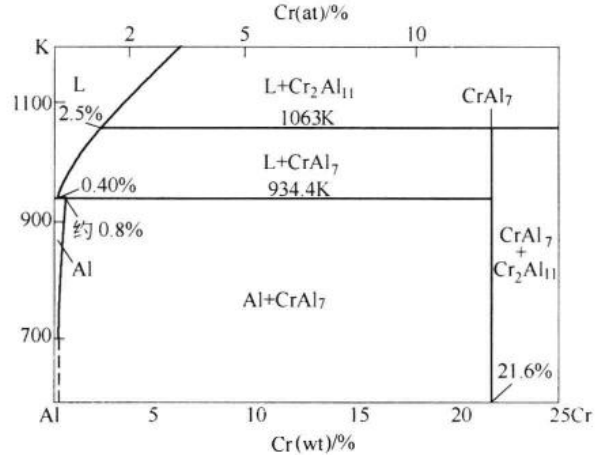


图 1-4 铝铬状态图

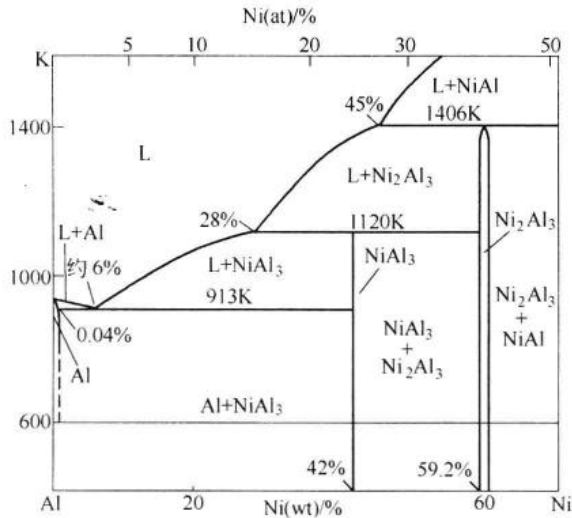


图 1-5 铝镍状态图

### 1.2.3 注入高温电解铝液（或装入重熔铝锭）

注入铝液时，使废料和中间合金浸没于铝液之下；若用铝锭重熔，则将铝锭铺盖于废料之上，升温时铝锭先行熔化。

注入的高温电解铝液或铝锭先行熔化的熔体使废料迅速升温。根据热平衡计算，其熔融状态决定于废料或固体料的加入量。加入量少时，固体料完全熔化，熔体温度降低；加入量达到一定比例时，高温铝液的余热不足以使固体料熔化，这时高温熔体凝固，释放出结晶潜热，使固体料加热升温。因此随着固体料加入量的变化，整个炉料的状态也发生变化。固体料加入少，炉料高于凝固点而成液态；固体料加入多时，炉料可能转变成半熔融状态或全凝固状态，但固体料的温度提高了。当炉料温度低时，需要继续加热升温至正常熔炼温度<sup>[1]</sup>。

### 1.2.4 铜的加入

合金含铜时，虽然铜的熔点较高（1083℃），但其在铝中的固溶度较大，550℃时仍为 5.67%

(图 1-6), 可直接将铜加入铝熔体中。不过铜在高温下暴露于空气中极易与氧发生反应:



当然生产实践表明, 随后  $\text{CuO}$  浸入铝熔体中, 又会与铝反应, 还原成铜:

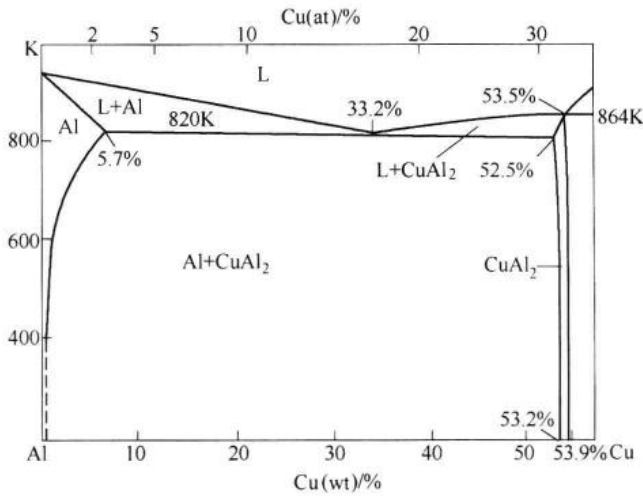


图 1-6 铝铜状态图

表面上看, 铜还原后, 没有损失, 随炉料加入问题不大。其实不然, 原因是: (1) 如果  $\text{CuO}$  混入炉渣中, 不能浸入铝熔体中与铝发生接触, 而是随炉渣扒出, 该部分氧化的铜即损耗了。(2) 从式 (1-2) 看出, 虽然铜被还原, 但这是以铝被氧化为代价的。铜还原了, 部分铝又损耗了, 这是不允许的。所以, 铜须在固体料基本上熔化后加入, 并将铜浸没于熔体中, 防止其与空气接触而发生氧化。

### 1.2.5 锌的加入

锌的熔点和沸点都很低, 熔点为  $419.4^\circ\text{C}$  (图 1-7), 沸点为  $906^\circ\text{C}$ 。锌在各温度的饱和蒸气压较高 (表 1-3)。一般情况下, 该系合金熔炼温度为  $700 \sim 750^\circ\text{C}$ , 在  $700^\circ\text{C}$ , 锌的蒸气压为  $7982.0\text{Pa}$ 。而在该温度下的固溶度达 80% 以上。蒸气压高表明锌容易挥发损耗, 固溶度大表明制造铝锌合金不易发生成分偏析。所以生产超硬铝合金时, 调整好成分后如果停留时间长, 锌含量会降低, 可能超出标准值, 需及时补料, 但不会因锌、铝的密度差异大而产生区域偏析。因此, 在炉料基本熔化好后将锌锭加入, 以减少其在炉中的停留时间, 降低损耗。

表 1-3 锌在各温度下的饱和蒸气压

温度/ $^\circ\text{C}$	419.4	500	700	900	906
蒸气压/ $\text{Pa}$	18.5	169.3	7982.0	96018.8	101325

### 1.2.6 铅的加入

有些合金为了提高材料的耐磨性能, 需添加一定比例的铅。铅的熔点为  $327.4^\circ\text{C}$ , 沸