



现代交通运输装备用铝手册系列

汽车

用铝材料手册

Handbook of Aluminum Applications in Automobiles



王祝堂 熊慧 编著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

现代交通运输装备用铝手册系列

汽车用铝材手册

王祝堂 熊 慧 编著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

汽车用铝材手册/王祝堂,熊慧编著.

—长沙:中南大学出版社,2012.9

ISBN 978-7-5487-0521-5

I. ①铝... II. ①王... ②熊... III. ①汽车-工程材料-铝-研究 IV. ①U465.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 086937 号

汽车用铝材手册

王祝堂 熊 慧 编著

☐责任编辑 刘颖维

☐责任印制 文桂武

☐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:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙市华中印刷厂

☐开 本 720×1000 B5 ☐印张 28.5 ☐字数 556 千字

☐版 次 2012 年 9 月第 1 版 ☐2012 年 9 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-0521-5

☐定 价 98.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

铝是一种绿色金属,是节能减排最可观的金属,是赫赫有名的循环经济金属材料,是被誉为天上飞的金属、地上奔驰的金属、水面疾驶如飞的金属。没有铝就没有今天这样快捷便利的航空事业,地球也就不会如同一个“村”;没有铝也不会出现舒适的高速列车与磁悬浮列车;没有铝汽车也不会跑得这么快,外形也不会这么美观。铝还具有密度小、塑性高、成形性能好、热与电的传导性高、抗腐蚀性强,特别是资源丰富、对人体无害、对环境友好和可回收性强等一系列优点;没有铝就没有给人们带来如此舒适生活与光辉灿烂的世界电力工业。铝早在 20 世纪 50 年代就已成为人类使用的第二大金属。2010 年全世界原铝产量约 42150 kt;中国的产量 18120 kt(笔者统计,国家统计局的数据为 16194.5 kt);中国再生铝的产量约 5600 kt(笔者统计),铝的表观总消费量约 23720 kt,中国铝材产量约 17900 kt(笔者统计,国家统计局的数据为 20260.5 kt)。压铸件及铸件的产量 5580 kt。

就全球来说,2010 年交通运输业的用铝量约占铝的消费总量的 31.86%,为铝的第一大用户。而中国铝的第一大用户为建筑及结构产业,其次才是交通运输装备产业,约 6000 kt,占铝总消费量的 25.3%。从 2009 年起,中国成为汽车第一大国,年汽车总产量为 1620 万辆,2010 年为 1826.47 万辆,2011 年为 1841.89 万辆,这种独占鳌头的局面将会继续下去,但小轿车的用铝量约 125 kg/辆,比美国、德国、日本的 148.6 kg/辆低 16%;中国箱式货车车厢体的铝化率还不到 2%,比北美洲的 93%低 91 个百分点。铝是当前唯一最可替代铸铁、钢以降低车自身质量的金属,有着特别重要的节能减排意义,小轿车在城市公路上行驶时,84.5%的油耗消耗于自身质量。

铝在提取过程中的确要消耗大量的能量,2010 年中国氧化铝综合能耗达到 632.4 kg 标煤/t,比 2005 年的降低了 365.83 kg 标煤/t;电解铝直流电耗全国平均值 13084 kWh/t-Al;综合交流电耗 13979 kWh/t-Al,比 2005 年的降低了 440 kWh/t-Al 和 595 kWh/t-Al。2010 年由于每辆车使用了 125 kg 铝,使车的自重下降了约 55 kg,根据估算,轿车在服务 6.55 服役年限(相当于行驶 200000 km)后所节约的能源就相当于提取铝所消耗的总能源,或者说以后所节约的能源就是净节约的。节约能源就意味着相应地减少温室气体排放。

在汽车产业消费的铝中铸造铝合金约占 80%,而在这 80%的铝中又有 78% 以上为再生铝合金,也就是说汽车所用铝中再生铝合金约占 65%,这不但有利于

节约用铝与发展循环经济,而且对节能减排有着重要意义,生产再生铝的能耗与温室气体的排放量仅相当于原铝生产的5%左右。

中国汽车用铝与发达国家的相比还有较大差距,一是单车的用铝量低,二是厢式车与专用车的铝化率还很低,三是轿车车体用薄板还不能批量生产,四是深加工产品品种不多、量也少,五是汽车用铝合金及铝材生产技术开发力量薄弱。大致还有15年这些问题都可望得到解决,当中国成为汽车产业强国之时,也就是这些问题获得圆满解决之日。加速解决宜采取的措施有:加大研发投入;组建汽车铝产品中心;国家出台更加严厉的节能减排政策,加速汽车轻量化与铝化率的提升等。

中南大学出版社为响应国家的节能减排与建设低碳经济的号召,配合中国有色金属工业协会推广铝在交通运输装备中的应用,及时组织本系列手册的编写与优先出版发行,着实难能可贵。本手册系列共分5册,约3000千字:《汽车用铝材手册》《轨道车辆用铝材手册》《航空航天器用铝材手册》《船舶用铝材手册》《铝合金厚板生产技术与应用手册》。计划2013年出齐。

《汽车用铝材手册》共分5章:铝的提取与基本性能,铝合金的性能及铝材生产工艺,铝与汽车工业的发展,汽车压铸及铸造铝合金,先进的当代汽车铝材。全面系统地介绍了铝及铝合金的基本特性,铝材生产工艺,汽车变形铝合金与铸造铝合金的性能,压铸件与铸件的生产,论述了汽车减重与节能减排的关系,推广铝在汽车中应用的意义与社会效益,对拉动内需的效应与建设低碳经济的作用。本手册中的资料截止到2011年。

在本书编写过程中,多方面得到高级工程师及资深分析师王伟东及其他人士帮助,书中浸透着他们的汗水与心意,同时参考与引用了许多专家、学者的资料,在此表示深深的感谢。同时,也特别感谢北京安泰科信息开发有限公司各级领导的鼎力支持,否则本系列手册不能这么快与顺利完稿。

由于作者学识有限,书中不可避免地会存在一些错误与不妥之处,敬请读者批评斧正。

编者

2011年12月

目 录

第 1 章 铝的提取与基本性能	(1)
1.1 铝在地壳中的存在及提取	(1)
1.1.1 铝在地壳中的存在	(1)
1.1.2 原铝的提取	(2)
1.1.3 精铝的提取	(4)
1.1.4 研发中的新炼铝法	(9)
1.1.5 铝合金锭的化学成分	(10)
1.2 再生铝生产	(14)
1.2.1 可回收的废铝	(14)
1.2.2 发展再生铝工业的主要意义	(17)
1.2.3 再生铝生产工艺	(17)
1.3 纯铝的基本性能	(19)
第 2 章 铝合金的性能及铝材生产工艺	(23)
2.1 铝及铝合金的分类	(23)
2.2 铝材结构	(24)
2.3 热处理可强化合金及热处理不可强化合金材料的比例	(25)
2.4 变形铝合金	(25)
2.4.1 中国变形铝及铝合金牌号和状态表示方法	(26)
2.4.2 中国变形铝合金化学成分	(26)
2.4.3 铝材生产工艺及状态代号	(49)
2.4.4 变形铝合金的基本特性	(65)
2.5 铸造铝合金	(106)
2.5.1 铸造铝合金的分类	(106)
2.5.2 Al-Si 系铸造铝合金	(113)
2.5.3 Al-Cu 系铸造铝合金	(123)
2.5.4 Al-Mg 系铸造铝合金	(126)
2.5.5 Al-Zn 系铸造铝合金	(127)
2.5.6 其他铸造铝合金	(129)

2.5.7 铸造铝合金的力学性能	(129)
2.5.8 欧洲非标准铸造铝合金的力学性能	(134)
2.6 汽车铝合金的化学成分	(136)
参考文献	(146)
第3章 铝与汽车工业的发展	(147)
3.1 铝与汽车工业的发展概述	(147)
3.1.1 铝在汽车中的应用	(147)
3.1.2 汽车铝材结构	(159)
3.2 铝合金板材在汽车中的应用	(164)
3.2.1 汽车铝合金	(165)
3.2.2 铝合金与汽车轻量化	(168)
3.2.3 汽车铝合金的分类	(170)
3.2.4 车身铝板材	(174)
3.3 挤压汽车铝材	(191)
3.3.1 挤压铝合金	(192)
3.3.2 用挤压铝材制造的典型汽车零部件	(197)
3.3.3 精密拉拔管与口琴管	(206)
3.4 汽车铝合金锻件及冲挤件	(214)
3.4.1 汽车锻件铝合金	(215)
3.4.2 铝合金冲挤件在汽车中的应用	(229)
3.5 汽车热交换铝材	(233)
3.5.1 热交换铝合金及铝材	(234)
3.5.2 水箱散热铝材	(236)
3.5.3 空调热交换铝材	(242)
3.5.4 复合散热板、带、箔	(243)
3.5.5 热交换复合铝材的生产工艺	(258)
3.5.6 铝热交换器的结构	(262)
3.5.7 展望	(263)
参考文献	(264)
第4章 汽车压铸及铸造铝合金	(267)
4.1 汽车铸件及压铸件	(267)
4.1.1 各种汽车铝材所占比例	(269)
4.1.2 铸造铝合金及压铸铝合金	(272)

4.1.3	典型汽车铸造铝产品的生产与性能	(290)
4.1.4	发展趋势	(312)
4.2	铝合金车轮的生产与性能	(312)
4.2.1	铝合金车轮	(314)
4.2.2	车轮铝合金	(315)
4.2.3	铝合金车轮生产工艺	(324)
4.2.4	铸造车轮的加工与精整	(341)
4.2.5	养护	(344)
	参考文献	(345)
第5章	先进的当代汽车铝材	(347)
5.1	易燃易爆运输储存抑爆铝箔	(347)
5.1.1	铝合金抑爆材料	(347)
5.1.2	抑爆铝材的应用	(359)
5.1.3	带有抑爆铝合金网(球)的液化气瓶的制作	(361)
5.1.4	亟待研发新的抑爆材料	(362)
5.2	泡沫铝性能及制备技术	(363)
5.2.1	泡沫铝的性能	(364)
5.2.2	泡沫铝的制备	(370)
5.2.3	泡沫铝的应用	(377)
5.2.4	发展趋势	(382)
5.3	高速凝固粉末冶金铝合金	(382)
5.3.1	高速凝固粉末的制备	(383)
5.3.2	工业高速凝固粉末冶金铝合金	(397)
5.3.3	发展趋势	(425)
5.4	铝基复合材料的性能与制备	(426)
5.4.1	复合材料的发展	(426)
5.4.2	颗粒、晶须增强铝基复合材料制造	(433)
5.4.3	发动机材料选用	(445)
5.4.4	展望	(445)
	参考文献	(446)

第1章 铝的提取与基本性能

1.1 铝在地壳中的存在及提取

1.1.1 铝在地壳中的存在

铝在地壳中分布很广，其含量约为地壳质量的7.3%，是仅次于氧和硅的第3大元素，而在金属元素中，铝居首位。在地壳内铝存在于250种左右的矿物组成中。其中最主要的矿物组成为硅酸盐化合物，其风化产物为黏土。另一类非常重要的含铝矿物为水合氧化物类矿物，如铝土矿，它是当今生产铝的主要原料。

表1-1列出了地壳中主要的含铝矿物。

表1-1 地壳中主要的含铝矿物

名 称	含量 $w/\%$		
	Al_2O_3	SiO_2	R_2O
刚玉	100	—	—
一水软铝石	85	—	—
一水硬铝石	85	—	—
三水铝石	65.4	—	—
蓝晶石	63	37	—
红柱石	63	37	—
硅线石	63	37	—
霞石	32.3 ~ 36.0	38.0 ~ 42.0	19.6 ~ 21.0
长石	18.4 ~ 19.3	65.5 ~ 69.3	11.0 ~ 11.2
白云母	38.5	45.2	11.8
绢云母	38.5	45.2	11.8
石榴石	23.5	55	21.5
高岭石	39.5	46.4	—
明矾石	37	—	11.8
斯钠铝石	35.4	—	21.5
粉煤灰	14.59 ~ 40.12	34.3 ~ 55.76	51.11 ~ 4.10

除此之外,天然冰晶石也是一种含铝矿物,其化学组成为 $3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$ 或 Na_3AlF_6 。其熔体为离子化合物,具有一定的溶解 Al_2O_3 的能力,故被称为 Al_2O_3 的溶剂,是铝电解槽电解质熔体的主要成分。目前在世界上发现的天然冰晶石矿物产地只有丹麦的格陵兰岛,而工业上应用的冰晶石为人造的。

2010 年 8 月 30 日,中国大唐国际内蒙古再生资源开发有限公司一条生产能力为 200 kt/a 从粉煤提取氧化铝的项目正式投产,这是全世界首条这类生产线,中国拥有全部自主知识产权。中国将尽快启动在内蒙古准格尔、托克托两地建设大型循环经济示范区。从粉煤灰提取氧化铝对解决铝土矿资源不足将起到重要作用。

1.1.2 原铝的提取

铝自 1824 年首次被人类发现以来,至今已有 180 多年的历史。1886 年美国大学生霍尔(C. M. Hall)和法国大学生埃罗(P. C. Heroult)几乎同时用电解冰晶石(Na_3AlF_6)熔体中 Al_2O_3 的方法生产出了铝,并分别在美国与法国取得了专利。1888 年 11 月霍尔建的匹兹堡冶金公司第一次用自己的技术生产出了铝,次年瑞士的纽豪森(Neu-hausen)首次用埃罗特的专利技术生产出了铝。

1888 年 8 月,奥地利化学家拜耳(Bayer)注册了一个德国专利,该专利是一个改进了的从铝土矿中提取氧化铝的方法,几乎在同一时间,低成本的水力发电技术诞生。

霍尔、埃罗和拜耳的专利和低成本电能的同时出现,使铝电解工业在欧洲和美国快速发展。

自 1886 年到现在,霍尔、埃罗的冰晶石-氧化铝熔盐电解法已有 120 多年的历史了。在此期间,电解炼铝的工艺和方法原理上没有变化,然而实施冰晶石-氧化铝熔盐电解法炼铝的主体设备——电解槽的结构却发生了很大变化。铝电解生产由最初的电耗 40 kWh/kg-Al [电流效率 75% (1889 年埃罗槽)] 和电耗 31 kWh/kg-Al [电流效率 80% (1892 年霍尔槽)] 降到了现在的 12.9 kWh/kg-Al (直流电耗),电流效率达 94% 以上。电解槽的容量(电流)由最初的几千安增加到现在的 500 kA 或更大。电解槽的结构型式也发生了很大变化(图 1-1 ~ 图 1-3)。2010 年中国电解铝直流电耗平均为 13084 kWh/t-Al , 综合电耗平均为 13979 kWh/t-Al 。

从电解槽抽出的铝熔体被称为原铝,当前生产原铝的纯度为 99% ~ 99.9%,铸成各种形状的重熔用铝锭或经成分配制后铸成加工用合金扁锭、圆锭等。中国生产的重熔用铝锭(GB/T 1196—2008)有 8 个牌号: Al-99.90, Al-99.85, Al-99.70, Al-99.60, Al-99.50, Al-99.7E, Al-99.6E。

在中国将纯度为 99.95% ~ 99.995% 的铝称为精铝,生产的精铝有 7 种(YS/T 665—2009): Al-99.995A, Al-99.993A, Al-99.99A, Al-99.98, Al-99.95 等。

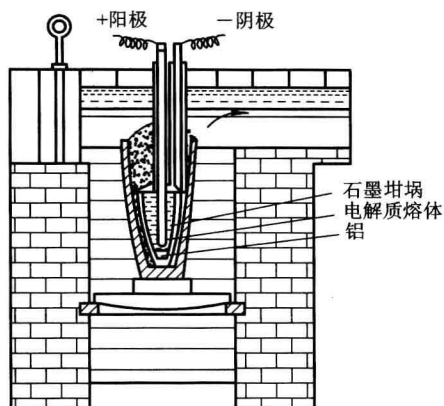


图 1-1 1886 年埃罗申请专利的铝电解槽简图

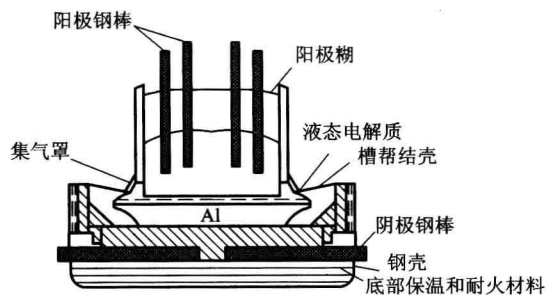


图 1-2 上插阳极棒自焙阳极电解槽(当前国内外仍有少量使用)

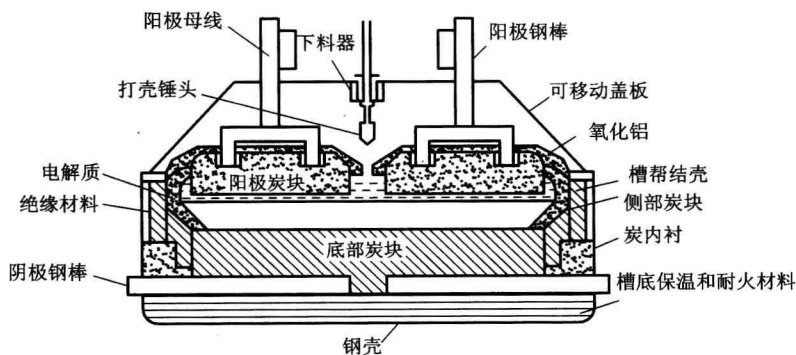


图 1-3 当代预焙阳极电解槽

现代铝电解生产流程如图 1-4 所示。铝电解生产主要采取冰晶石-氧化铝熔盐电解法,采用炭素阳极和炭素阴极。直流电流通入电解槽,在阴极和阳极上发生电化学反应。电解产物在阴极上是原铝,阳极上是 CO_2 和 CO 气体。用真空抬包抽出原铝,经净化浇铸成商品铝锭,其质量达到 99.5%~99.9% 的 Al。阳极气体中含有 70%~80% 的 CO_2 和 20%~30% 的 CO , 还含有少量氟化物和 CO_2 等气体混合物,经过净化之后,废气排入大气,回收的固体氟化物返回电解槽。

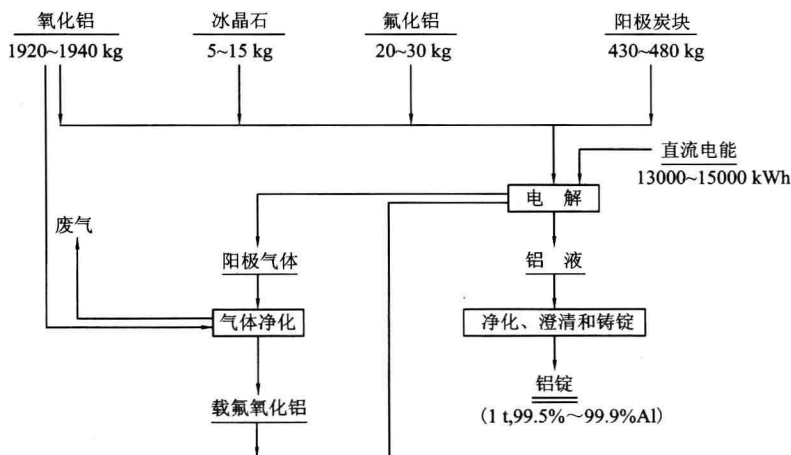


图 1-4 现代铝电解生产流程简图

1.1.3 精铝的提取

1.1.3.1 三层液电解法

精铝是以原铝为原料用三层液电解法或偏析法或联合法制取的。前者是美国铝业公司胡普斯(W. Hoopes)发明的,1922 年开始工业化生产。槽内三层液体,各层密度不同;下层是 67% 的原铝加 33% 铜的合金(密度 3 g/cm^3),作为阳极,其中铜是加重剂;中层是 17% NaF 、23% AlF_3 、60% BaCl_2 的电解质(密度 2.7 g/cm^3),其中 BaCl_2 是加重剂,或其他成分电解质;上层是电解产物精铝(密度 2.3 g/cm^3),用作阴极。电解温度 $720 \sim 800^\circ\text{C}$ 。电解槽壁用绝缘材料(镁砖)砌筑(图 1-5)。

精炼电解时,铝从阳极合金中转移到阴极,而原铝中的杂质元素都留在阳极合金中,使铝得到精炼。此法中的阴极电流效率达到 97%~99%。中国是三层液电解精铝生产大国,2011 年的生产能力约 75 kt/a。常用的电解质有两类:氟氯化物和纯氟化物系,见表 1-2。

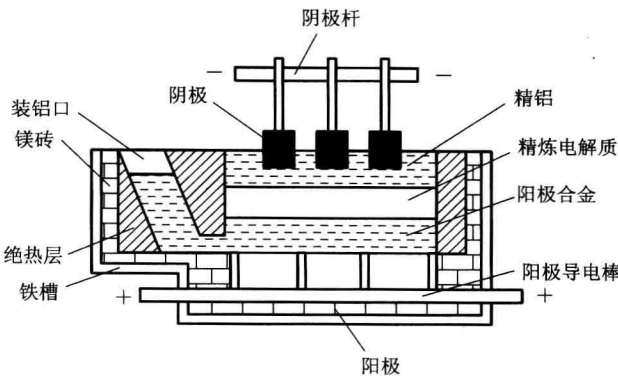


图 1-5 精铝三层液电解提取槽示意图

表 1-2 常用电解质

氟氯化物系/%		纯氟化物系/%	
AlF ₃	25 ~ 27	AlF ₃	35 ~ 48
NaF	13 ~ 15	NaF	18 ~ 27
BaCl ₂	50 ~ 60	CaF ₂	16
NaCl	5 ~ 8	BaF ₂	18 ~ 35

常用三层液电解提纯法的主要技术参数和经济指标见表 1-3。精炼槽的正常操作包括：出铝、补充原铝、添加电解质、清理、更换阴极和捞渣等。此法具有产量大、品质好等优点，因而得到广泛应用，但电耗大，且有氟等对环境不利的废弃物排放，基建投资也较大。

表 1-3 三层液提纯法主要技术参数和经济指标

技术参数		经济指标	
电流强度/kA	30 ~ 60	阴极电流效率/%	99
槽电压/V	—	直流电耗/kWh · t ⁻¹ - Al	16000
电解温度/℃	750 ~ 800	物料消耗/kg · t ⁻¹ - Al	—
电解质组成/% 冰晶石 (MR = 1.5) BaCl ₂	40	石墨/kg	7
	60	纯铜/kg	8
		原铝或重熔铝/kg	1030
阴极精铝厚度/cm	6 ~ 7	电解质/kg	65
电解质密度/g · cm ⁻³	2.72		
阳极合金/%	67Al - 33Cu		

1.1.3.2 凝固提纯法

凝固提纯法又称偏析法,由固溶体的相平衡理论可知,完全互溶的固溶体在冷凝或熔化时,固相和液相的组成不相同,因此只要将这种熔体逐步冷却凝固,便可以将某种组分富集于固相或液相中,达到分离或提纯的目的,这是原铝精炼的又一工艺。根据操作特点,凝固提纯又可以分为定向提纯、分步提纯和区域熔炼。

凝固提纯效果与杂质元素的分配系数有关。这一系数是杂质元素在固相和液相中浓度的比率,当 $K < 1$ 时,杂质元素富集于液相;当 $K > 1$ 时,它在固相中富集; $K = 1$ 时,则它在固相与液相中的浓度相等,对于这种杂质,凝固提取无能为力。铝中杂质元素的分配系数列于表 1-4。

表 1-4 原铝中杂质元素的分配系数

杂质元素	K	杂质元素	K	杂质元素	K
Ni	0.009	Ge	0.13	Sc	1
Co	0.02	Cu	0.15	Cr	2
Fe	0.03	Ag	0.20	Mo	2
Ca	0.08	Zn	0.40	Zr	2.5
Sb	0.09	Mg	0.5	V	3.7
Si	0.093	Mn	0.9	Ti	8

(1) 定向提纯法

该法是通过铝熔体的冷却凝固除去其中分配系数 $K < 1$ 的杂质,这些杂质大部分留于液相中而得以降到很低的浓度。定向提纯(偏析提纯)的两种操作程序:用括板括下炉壁上的凝固的纯固态铝,使其沉于底部,达到一定量后除去上部液态铝(图 1-6);在凝固过程中,对凝固着的液相搅拌,使固-液界面层中的杂质元素不断地扩散转移到液相(图 1-7),凝固的铝即为高纯度铝或精铝,然后放出液态铝(习称尾部, $K < 1$ 的杂质大部分富集于此)。如果对固态铝需进一步提纯精炼,可以重复上述操作,进一步分离杂质元素。显然重复的次数越多,铝的纯度越高。

凝固提纯可以连续作业,图 1-7 是连续凝固提纯的流程和设备示意图。连续法的产量明显高于间断作业的。

(2) 分步提纯法

由上述可知,定向提纯只能除去原铝中 $K < 1$ 的杂质元素,为进一步除去 $K > 1$

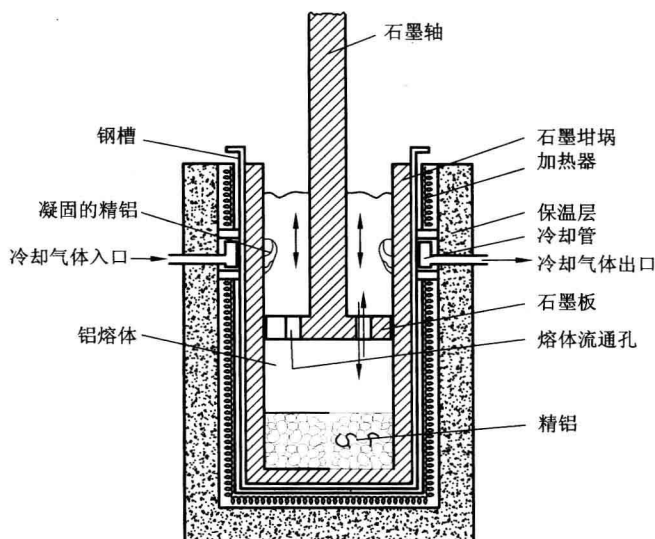


图 1-6 精铝偏析法提取炉示意图

的杂质，则可采用分步提纯法。分步法的要点是采用化学方法除去 $K > 1$ 的杂质。其原理是使杂质元素和硼形成不溶于铝熔体的硼化物。其操作过程是向铝熔体加入铝硼合金，杂质就立即与硼生成硼化物沉渣。放出铝液后，经澄清，然后进行定向提纯，所得的铝既除去了 $K > 1$ 的杂质，又除去了 $K < 1$ 的杂质。

(3) 区域熔炼

该法实质上是定向提纯法的另一种形式，所不同的是该法只是部分熔化，而且熔化区域在不断地移动。

区域熔炼的操作过程是加热器（高频感应线圈）沿着被处理的固体长条铝锭缓慢移动，在加热器所在位置造成一个熔融区，金属中 $K < 1$ 的杂质大部分将富集在熔液中。随着熔区的移动，杂质也随着移动，当达到端头时， $K < 1$ 的杂质就凝固下来，切去端头后的铝就是提纯了的铝。当杂质的 $K > 1$ 时，情况与上述相反，即杂质集中始端；如果这些杂质都存在则将两端切去，中间部分即为高纯铝。熔炼反复次数越多，所得铝的纯度越高。区域熔炼装置如图 1-8 所示。还应指出，整个操作过程应在有保护气体的情况下进行。

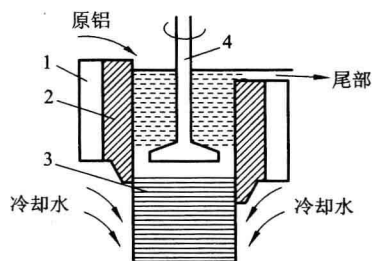


图 1-7 连续凝固提纯流程设备

- 1—保温炉；2—石墨模；
- 3—精铝锭；4—搅拌器

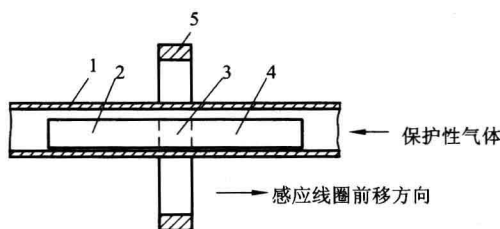


图 1-8 区域熔炼示意图

1—石英管；2—熔炼后凝固的铝；3—熔炼区；
4—尚未熔炼的铝；5—感应线圈（加热器）

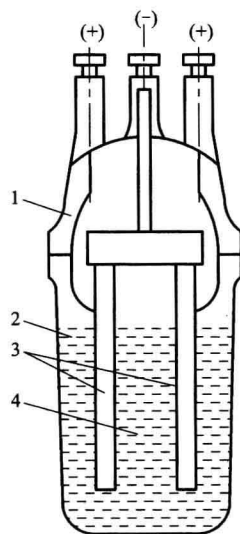
1.1.3.3 有机熔液电解精炼

齐格勒(Ziegler)等人利用有机熔液电解法制得了高纯铝(99.999%)。他们所用的电解质是氟化钠与三乙基铝的配合物 $[\text{NaF} \cdot 2\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3]$ 。

赫尼伯乐(Hannibal)等人研究了三乙基铝的有机溶液提纯原铝的电解法。其实验装置如图 1-9 所示。实验所用电解质是 $\text{NaF} \cdot 2\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ 和甲苯。其中 $\text{NaF} \cdot 2\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ 的含量为 50%，其电导率(100℃)为 $4.2 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{mm}/\text{cm}$ 。实验条件是：电解温度 100℃，槽电压 1~1.5 V，电流密度 0.3~0.5 A/dm^2 ，极距 2~3 cm。电解过程中铝从阳极上溶解，而从阴极上析出，从而达到精炼目的。他们指出，在上述条件下，电流效率接近 100%。目前该法已达到半工业性试验阶段，电解槽的容积达数百升，阴极面积为数平方米，用纸质隔膜承接电解过程产生的阳极泥，电解槽采用油热恒温器间接加热，并用氮气保护电解质。

由上可见，有机溶液电解精炼法具有电解温度低、电能消耗小等优点，而且能除去凝固提纯法不能分离的杂质($K \approx 1$)，但该法的商业化生产还有待于进一步研究与完善。

如以有机溶液电解与凝固提纯串联，可制得超纯度铝。预先经过有机溶液电解的铝再经过几次区域熔炼，可在最纯区段得到 $\text{Al} \geq 99.99995\%$ 的产品。

图 1-9 原铝有机溶液
电解精炼槽(实验室)

1—玻璃电解槽；2—电解质；
3—阳极(原铝)；4—阴极(高纯铝)

中国生产的高纯铝(YS/T 275—2008)有两个牌号: Al-5N, Al-5N5。
美国通常按下列纯度分类,见表1-5。

表1-5 美国铝按纯度分类

铝 $w/\%$	名称
99.50 ~ 99.79	工业纯铝 (commercial purity)
99.80 ~ 99.949	高纯铝 (high purity)
99.950 ~ 99.9959	超纯铝 (super purity)
99.9960 ~ 99.9990	极纯铝 (extreme purity)
> 99.9990	特纯铝 (ultra purity)

在工业纯铝中铜、铁和硅是主要杂质,还有不同数量的镓、钛、钒、钠、锰、镍和锌,它们的含量决定于原料来源和冶炼工艺等,但通常比铁和硅的含量低一数量级。在电解精炼铝中,铁仍是主要杂质,但锌、铜、镁和钠的百分比可能接近于铁的,而高于硅的。在区域熔炼提纯中,情况则不一样,有些元素例如铬、锰和钒,在区域熔炼中很难除去,富集在提纯的铝中而成为主要的杂质。

铝也可以在熔炼过程进行一定的提纯。实际上只有锂和钠是比铝氧化得更快的杂质。钠含量则完全取决于铝处于液态的时间和温度,每熔一次,钠的含量就降低一些,加热到 930 ~ 1130℃,可使它减少 9/10,锂也容易氧化并形成浮渣。

通常用氯清除工业纯铝中的弥散氧化物以及溶解的或被残留的气体。镁、钠和钙也在氯处理中被清除,用含硼的合金或化合物处理作为导电体的铝,以清除其中的钛、钒、锆和强烈降低电导率的其他杂质。

1.1.4 研发中的新炼铝法

用熔盐电解法提取铝的工艺已有 120 多年的历史,看来至少在今后 20 年内,研发中的新炼铝法还不会成为主流。开发中的新炼铝法:氯化铝熔盐电解法,电热法熔炼铝-硅合金,惰性阳极可湿性阴极熔盐电解法,高炉炼铝法,锰还原法等。

美国铝业公司致力于研究惰性阳极可湿性阴极电解法已有 30 多年,在澳大利亚的一家铝厂内建了一系列中间试验电解槽,取得了阶段性成就,但离商业化生产还有不少技术难题需要解决。氯化铝电解法是以氯化铝为原料,以碱金属和碱土金属为电解质进行电解铝的方法。该法源远流长,可以追溯到 1854 年。1973 年 1 月美国铝业公司宣布,他们历时 15 年研发,投入 2500 万美元,获得氯化铝电解提铝成功,并在德克萨斯州建了一条生产能力为 15 kt/a 的中间试验生产线,试运行 3 年,最终因许多关键技术问题难以解决,不得不停止试验。

电热法熔炼铝-硅合金。电热炼铝法是一种非电解质炼铝法,实际上是用碳