

偏析法制备高纯铝研究进展

莫文彬¹ 贾桂龙² 黄奎² 楼岳¹ 伍志铭² 吴剑¹

(1.广西正润日轻高纯铝科技有限公司; 2.广西容创新材料产业研究院有限公司)

摘要 偏析法制备高纯铝技术是一种比电化学精炼法更高效节能的物理冶金方法。综述了国内外偏析法制备高纯铝技术,简要介绍了对定向凝固技术的基础研究进展,并对其发展进行了展望。

关键词 高纯铝;偏析法提纯;定向凝固

中图分类号 TG146.21 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.04.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Research Progress in Preparation of High Purity Aluminum by Segregation Method

Mo Wenbin¹, Jia Guilong², Huang Kui², Lou Yue¹, Wu Zhiming², Wu Jian¹

(1.Guangxi Zhengrun Nikkei High Purity Aluminum Technology Co., Ltd.;
2.Guangxi Rongchuang Materials Industry Research Institute Co., Ltd.)

Abstract: Segregation method is a more efficient and energy-saving physical metallurgy method than electrochemical refining for preparing high purity aluminum. The preparation of high purity aluminum by segregation method was reviewed in detail at home and abroad, and the basic research progress of directional solidification technology was briefly introduced, and its development direction was prospected.

Key Words: High Purity Aluminum, Segregation Purification, Directional Solidification

国际上通常将使用霍尔-埃鲁电解法生产的铝熔体称为原铝,将质量分数为 99.7% 的原铝经过三层电解法或偏析法精炼的精铝称为高纯铝^[1]。高纯铝具有密度小,热导率、电导率、光反率高,优异的抗腐蚀性能,良好的加工成型性能,且不具有低温脆性等特点。另外,高纯铝的纯度越高、杂质含量越低,其物理和化学性能越优异^[2]。高纯铝的优良特性使其在某些高精尖领域成为不可代替的材料。如在航空航天领域,高纯铝是生产火箭推进器和透平叶片超级合金的必须材料,也是开发制备推动航天器运行“太阳帆”的重要材料;在轨道交通领域,高纯铝以其低导磁率、高导电性等特点,成为制造悬浮列车轨道的首选材料;在研究领域,高纯铝制备超大直径天文望远镜反射面已经得到了成功的应用。此外,高纯铝在集成电路、铝电解电容器、超导体材料及半导体等领域均具有重要地位^[3]。

目前,原铝精炼提纯技术主要有电化学精炼法和物理偏析法两种。电化学精炼法^[4,5]主要有三层液电解法和有机溶液电解法。三层液电解法能制备出 4N (99.99%,下同)、5N 纯度的高纯铝,但是该方法耗电量

大、成本高;有机溶液电解法可以制备 5N 以上纯度的高纯铝,但是该方法中的化合物有毒性且易燃,同时生产效率极低,目前还无法实现工业化生产。

物理偏析法相对于电化学精炼法具有低能耗、无污染、经济效益和生产效率高等优点,可实现大规模工业化生产,也可实时根据市场需求调整产能,是比较成熟的高纯铝制备工艺,国内有些厂家已率先引用法国、日本偏析法技术生产高纯铝。本课题主要对目前国际上出现的偏析法生产高纯铝技术进行详细的论述,同时对偏析法中定向凝固技术的基础研究进展进行了介绍,并对未来定向凝固提纯技术的发展趋势进行了展望。

1 偏析法制备高纯铝技术

1.1 偏析法提纯原理

偏析法又称凝固提纯法,其原理是金属在凝固过程中溶质原子会在固相和液相产生溶质再分配,利用了溶质在固-液两相中存在浓度差异现象对金属进行提纯。平衡分配系数 K_0 ($K_0 = C_s/C_L$) 是解释偏析原理的重

收稿日期:2020-11-04;修改稿收到日期:2020-11-27

基金项目:广西创新驱动发展专项基金资助项目(桂科 AA17202004)

第一作者简介:莫文彬,男,1977 年出生,工程师,广西贺州(542899),E-mail:mowb@zrrq.com

通信作者:贾桂龙,男,1989 年出生,博士,广西贺州(542899),E-mail:jiaguilong@126.com

引用格式:莫文彬,贾桂龙,黄奎,等. 偏析法制备高纯铝研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(4):434-438.
MO W B, JIA G L, HUANG K, et al. Research progress in preparation of high purity aluminum by segregation method[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(4):434-438.

要参数,其中 C_s 和 C_L 分别为某种杂质在固相和液相中的浓度,因此凡是 $K_0 < 1$ 的杂质如 Fe、Si、Cu 等均可以通过偏析法去除,因为这些杂质元素会在液相中富集,通过多次偏析反复提纯可以最大限度地除去这些杂质;相反的,凡是 $K_0 > 1$ 的杂质如 Ti、Cr 等则不能通过偏析法去除,因为这些杂质元素会在固相中富集,通常需要添加 B 元素生成不溶于铝的硼化物进行去除;而 $K_0 \approx 1$ 的杂质则很难通过偏析法分离,因为这些杂质在固相和液相中的浓度接近^[6]。

1.2 偏析法提纯技术

偏析法制备高纯铝按照所采取的具体工艺差异,总体上分为分步结晶法、区域熔炼法和定向凝固法^[6]。

分步结晶法制备高纯铝典型的提纯装置结构见图 1。经典装置见图 1a,其原理是将待精炼的铝熔体装到石墨坩埚中,且保证铝熔体的温度保持在略高于熔点的温度,将带水冷的结晶器插入熔体中,促使铝晶体在结晶器上生长,然后将结晶器上结晶的铝刮至坩埚底部,再通过保温压榨的方式将晶体间包裹的低熔点富含杂质的液体挤出,进而达到提纯的目的^[5]。日本的偏析法技术通过改变冷却方式、增加带孔洞石墨捣盘对上述提纯装置加以改造,形成了新的分步结晶法提纯装置,其结构见图 1b,其提纯的原理是将经过前处理的铝熔体装到石墨坩埚中,铝熔体仍然保持在略高于熔点的温度,向冷却管内通入冷却气体,受到冷却的坩埚内壁上就会析出高纯度铝晶体,随后通过上下移动石墨捣盘,将坩埚内壁上的铝晶体刮下。细小的铝晶体通过石墨捣盘上的孔洞被收集在坩埚底部,随后被向下运动的捣盘压实,此时石墨捣盘的压实动作还起到了将晶体之间富含杂质元素的铝熔体挤出的作用,如此反复动作就在坩埚底部获得高纯铝。

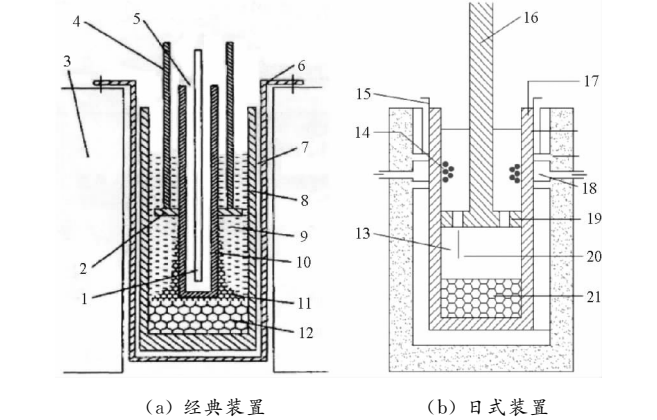


图 1 分步结晶法提纯装置^[7,8]

Fig.1 Purification device by multi-stage crystallization
1,18.冷却管 2.石墨环 3.竖炉 4,16.石墨棒 5.气体出口 6.不锈钢凸缘 7.热绝缘体 8,17.石墨坩埚 9,13.铝熔体 10.石墨内管 11,14.初晶体 12,21.高纯铝 15.外壳 19.石墨捣盘 20.金属流动孔

区域熔炼法制备超高纯铝的典型提纯装置见图 2,其提纯的原理是将高纯铝棒置入特制加热炉内,并按照一致的方向缓慢移动加热区,高纯铝中的杂质会随着熔区的移动而迁移,然后利用杂质在固相与液相两相间的分布差异来达到去除铝中杂质的目的^[8]。当熔区自左向右以极慢的速度移动时, $K_0 < 1$ 的杂质就会逐渐向右边富集; $K_0 > 1$ 的杂质则会向左边富集,而对于 $K_0 \approx 1$ 的杂质,则要通过预先化学处理的方法除杂。该方法可以制备纯度 99.999 5% 以上的高纯铝,如利用多次提纯或使用一系列的加热器的方法^[9],则能够制备 7N 纯度的极纯铝。目前,区域熔炼法的生产效率极低,还无法实现工业化生产,因此其超纯铝产品多应用于高精尖领域。

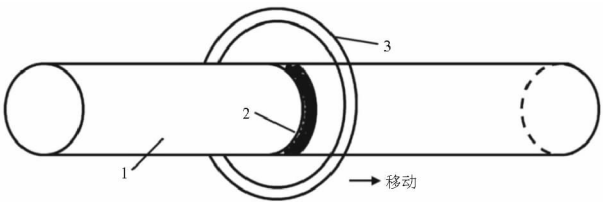


图 2 区域熔炼法提纯装置^[8]

Fig.2 Purification device by zone melting
1.铝棒 2.熔融带 3.加热线圈

定向凝固法通过强制冷却或加热达到使凝固方向背离热流传递方向的目的,同时以连续单向结晶的方式获得高纯铝^[5~7]。在提纯过程中,需要使用电磁搅拌技术对铝熔体进行持续性强制搅拌,以降低固-液界面前沿液相中溶质富集层的厚度, $K_0 < 1$ 时加快杂质元素向液相中扩散速度。与此同时,冷却面上凝固析出铝结晶,然后晶体不断长大就得到高纯铝。定向凝固法根据凝固方式的差异还分为冷却管凝固法、底部凝固法、旋转偏析法、凝固拉晶法等。

冷却管凝固法提纯装置见图 3,其提纯过程是将旋转式冷却器插到铝熔体中,向冷却器中通入冷却介质提

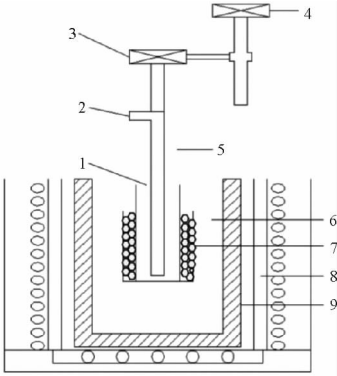


图 3 冷却管凝固法提纯装置^[7]

Fig.3 Purification device by cooling tube solidification
1.冷却气体出口 2.冷却气体入口 3.搅拌电机 4.升降电机 5.冷却管 6.铝液 7.高纯铝 8.电阻加热 9.石墨坩埚

供冷却,启动冷却器旋转模式,A1 就持续在运动的冷却器表面结晶。在此过程中,晶体凝固界面前沿聚集的杂质熔体层通过搅拌进入铝熔体中,枝晶间隙富集杂质的熔体则在离心力作用下被甩出;提纯一定时间后停止旋转,取出冷却器并收集其表面的结晶铝,便得到高纯铝。

底部凝固法提纯装置见图 4,其生产过程是将铝熔体倒入外有电加热系统的石墨坩埚内,放下并开启石墨搅拌器,同时在坩埚底部通入冷却介质使其冷却,受冷的坩埚底部便会凝固析出铝晶体,高速旋转的搅拌器产生的离心力能够使凝固界面前沿富集杂质熔体层的厚度减薄。提纯一定时间后终止操作,将坩埚吊出并倾倒掉富集杂质的残液,取出坩埚内已凝固的铝晶体,就获得了高纯铝。

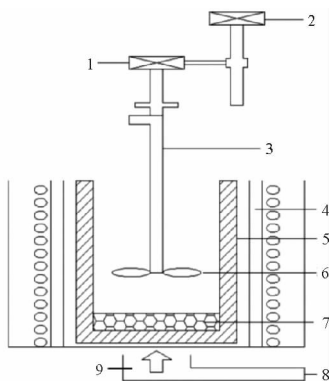


图 4 底部凝固法提纯装置^[7]

Fig.4 Purification device by bottom solidification

- 1.搅拌电机 2.升降电机 3.搅拌轴 4.电阻加热 5.石墨坩埚
6.石墨叶片 7.高纯铝 8.冷却气体 9.底部进气口

旋转偏析法典型的提纯装置见图 5,其提纯过程是将净化后的铝液倒入石墨坩埚中,将石墨坩埚放入自制的提纯炉内,开启加热系统使铝液温度保持在稳定状态;随后将旋转装置插入坩埚合理的位置上并开启旋转运动,同时在冷却装置中通入冷却气体使坩埚受冷。受冷的坩埚底部和侧壁上会凝固析出铝晶体,随着提纯过程的进行铝晶体不断长大,提纯到一定时间后倾倒入富集杂质的尾液,凝固在坩埚底部和侧壁上的铝晶体即为高纯铝^[10]。

凝固拉晶法按照不同的拉晶方向又分为上引法、下引法和横向法,其中昆明冶金研究院自制的下引法提纯装置见图 6,其提纯过程是先将装有铝锭的石墨坩埚放入定向凝固炉内,然后对凝固炉抽真空以保护熔化后的铝液不发生氧化,并能延长石墨坩埚的使用寿命;打开加热系统熔炼铝锭,待铝锭完全熔化后开启电磁搅拌系统,使得坩埚内的铝液温度均匀且稳定;随后启动定向拉晶对铝液进行提纯,在此过程中向铜质的结晶器和引晶头中通入冷却水,在径向、轴向两个方向上对铝液进行凝固,同时通过调节拉晶速度、调整不同线圈的加热

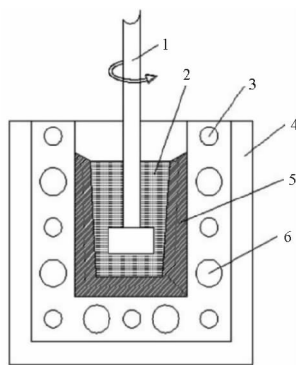


图 5 旋转偏析法提纯装置^[11]

Fig.5 Purification device by rotating segregation

- 1.旋转装置 2.铝残液 3.冷却装置 4.保温系统
5.高纯铝 6.加热装置

功率来提供特定的温度梯度;受冷的结晶器上凝固析出铝晶体,并随着拉晶过程的进行不断长大,保证提纯过程的持续进行;拉晶结束,切去结晶锭的头部和尾部就获得了高纯铝^[12]。

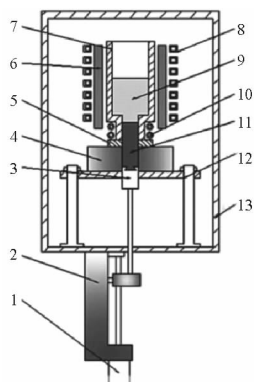


图 6 下引法定向凝固提纯装置^[13]

Fig.6 Purification device by down-drawing directional solidification

- 1.驱动电机 2.下引装置 3.结晶台 4.冷却器 5.绝热垫片 6.保温层
7.坩埚 8、10.感应线圈 9.铝熔体 11.铝锭 12.支架 13.真空炉室

2 定向凝固提纯技术的研究进展

平衡分配系数 K_0 是在平衡凝固条件下(即固相与液相接近平衡状态时)得到的理论值。但是实际结晶过程并不是在无限缓慢的、接近平衡状态下进行的,这是因为在固-液界面处永远存在一个溶质的富集层,这个富集层会对结晶体固相中的杂质浓度产生重要的影响,直接影响高纯铝的纯度。为了描述实际凝固过程中固-液界面前沿杂质再分配现象,实际分配系数 K_e 被提出, K_e 与 K_0 两者之间的关系为:

$$K_e = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0) \exp(-\frac{R\delta}{D})}$$

式中, R 为凝固速度; δ 为扩散层厚度; D 为扩散系数。

为了提高提纯率,应使 K_e 向 K_0 靠近,除了 D 是物

理常数无法改变外,要尽可能降低凝固速度 R , 减薄扩散层厚度 δ 。

戴飞^[11]、于洋等^[14]根据偏析法提纯原理,分别自制了旋转偏析装置,研究发现铝的结晶过程相当于定向凝固过程,以冷却面结晶为基准,共晶杂质(如 Fe、Si)的质量分数是由内向外逐渐升高,包晶杂质(如 V、Ti)的质量分数是由内向外逐渐递减,说明在结晶时共晶杂质由内向外不断排放,而包晶杂质的排放路线与共晶杂质相反,因此最里层冷却面上的结晶铝纯度最高,并且由内向外铝的纯度逐渐降低。研究还发现,随着搅拌强度提升,凝固铝与熔体的相对速度被提高,结晶铝中尚未完全凝固的杂质就会在离心力的作用下被甩回熔体中,同时搅拌使熔体产生强制对流,加快了固相铝中杂质向液相的传输速度,使得提纯效果显著增加;当冷却速度和凝固速度均较快时,铝的提纯效果更好,大的温度梯度更有利于偏析提纯。

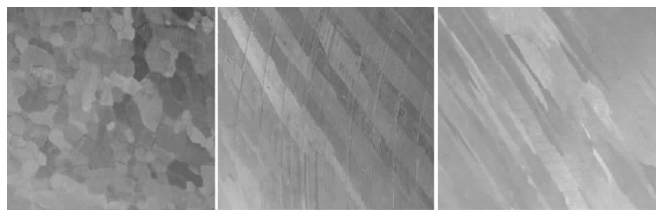
赵伟等^[12]、李玉章等^[15]在设置温度场等条件恒定的基础上,将上引法制备高纯铝中的拉晶速度等同于理论计算得到的提纯速度,研究了提纯速度对杂质浓度的影响,发现拉晶速度越慢,铝液中杂质元素的浓度越低。随着拉晶速度逐渐降低,杂质元素的提纯效率趋于稳定,当拉晶速度无限接近 0 时,结晶体内与液体中的杂质浓度之比越低。

张佳等^[16]自制真空定向凝固炉,利用下引法制备了高纯铝,试验固定了搅拌频率、电流、拉晶速度等工艺参数,研究了铝液温度对除杂率的影响。研究发现,随着铝液温度升高,杂质原子的扩散能力增强,固-液界面的温度梯度升高,导致偏析提纯的除杂率提高。

李玉章等^[17]在制备大直径高纯铝试验中,研究了不同电磁搅拌强度下杂质元素在径向的分布行为,发现无电磁搅拌时,铝液的温度等温线有一个明显的凸度,固-液界面存在一定的弯曲度;当外加电磁搅拌时,加快了热量在径向上的传导,铝液的温度等温线趋于平缓,固-液界面的弯曲度减小。通过分析还发现,杂质元素径向的偏析同等温线弯曲幅度成正比,随着搅拌强度增加,杂质元素径向浓度相对标准偏差逐渐减小,直至杂质元素浓度已无规律性差别。

赵瑞敏等^[18]利用偏析法制备高纯铝,研究了杂质元素在结晶过程中的偏析行为。随着结晶过程进行, Si、Fe、Ga、Ni 的含量逐渐增加, V、Ti 的含量逐渐降低, Zn 含量变化不大,这是因为 $K_0 > 1$ 的杂质如 V、Ti 在结晶初期是由液相迁移至固相,因此在初晶中两种杂质元素的含量最高, $K_0 < 1$ 的杂质如 Si、Fe 在结晶过程中不断扩散至液相,并在液相中富集,因此在提纯结束时的晶体中含量最多。

定向凝固过程中固-液界面平面状、胞状、树枝状的形态会直接影响固-液界面前沿溶质的再分配。贾志宏等^[19]、ZHANG J 等^[20]、戴飞^[21]研究了高纯铝定向凝固过程中固-液界面的结构特性,发现高纯铝纵截面的显微组织呈现出规律的底部细柱状晶区、中间粗大柱状晶区、顶部树枝晶区特征(见图 7)。当金属以枝晶形态凝固时,晶内偏析排出的杂质就陷落在枝晶的晶间臂内而不易排出;当以胞状晶形态在平面界面或上凸界面凝固时,偏析的杂质元素则可以顺利的扩散排出,因此在整个凝固过程中,固相中杂质元素的含量在凝固初期、凝固中期、凝固后期呈现先高、后低、又升高的变化趋势。

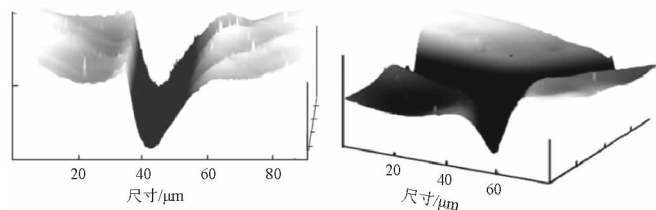


(a) 底部细柱状晶区 (b) 中部粗大柱状晶区 (c) 顶部树枝晶区

图 7 高纯铝纵截面显微组织^[21]

Fig.7 Longitudinal-section microstructure of high purity aluminum

张佼等^[22]利用原子力显微镜对定向凝固提纯的高纯铝晶界结构特性进行了研究,并计算了固相晶界的溶质浓度分布。结果发现,高纯铝胞状晶晶界边缘存在微观的沟槽、隆起和皱褶(见图 8),而造成这些晶界微观结构变化的原因在于微观溶质分布不均衡。晶界处溶质越富集,晶界边缘的皱褶深度越大,当溶质浓度或生长速度超过临界值时,深度较大的皱褶就会优先发生增殖合并,形成新的晶界、产生新的晶粒。



(a) 两晶晶界形貌 (b) 三晶晶界形貌

图 8 高纯铝胞状晶晶界形貌^[13]

Fig.8 Grain boundary morphology of after cell crystal in high purity aluminum

3 定向凝固提纯技术的发展方向

定向凝固提纯技术的发展方向必将朝着温度梯度不断提高、冷却速度不断加快的方向演变;在定向凝固技术中,固-液界面的形状决定晶粒生长形态,进而影响界面前沿的溶质再分配^[7]。由此可见,如何实现有效的、稳定的控制凝固过程工艺参数的匹配,并将提纯过

程中的晶粒生长方式同高纯铝的提纯效率、生产效率达成步调一致,是未来定向凝固的主要发展方向^[22]。根据定向凝固提纯技术的发展趋势,用于制备高纯铝的提纯工艺可围绕以下几个方面开展。

(1)改善熔体外部环境气氛 为避免氧化,降低吸气几率,精炼提纯的原材料熔化和凝固采用真空熔炼,并向真空炉室内通入高纯氩气等来改善熔体外部环境气氛。

(2)使用高精度拉伸设备 采用光学单晶体生长的高精度拉伸装置,获得精确的拉晶速度和平稳的拉晶过程,提高提纯效率。

(3)采用非接触式熔体搅拌技术 采用非接触式的电磁搅拌技术促使固-液界面前沿富集的杂质元素快速扩散至液相中,提升杂质元素的排出效率;同时可提高凝固界面的温度梯度,加快铝结晶的生长速度,改善提纯效率对生长速度的敏感性。

(4)双区加热获得大的温度梯度 双区加热并辅助以侧面及底部强冷的方式能够获得稳定的、更高的温度梯度,保证晶体在生长过程中保持平界面,有利于杂质元素的排出。以下是获得更高温度梯度的方式:①提高凝固界面前沿熔体的温度,强化输入界面的热流;②强化已凝固相内的散热,提高固相侧的冷却能力;③采取隔热性能较高的挡板将高温、低温加热区加以隔离,保证两区具有较高的温度差;④在定向凝固过程中尽量缩小凝固界面位置与高温区之间的距离。

(5)间歇式吸出法清除杂质元素 该方法具体实施过程是吸取并排出凝固界面前沿富集杂质的熔体来提高提纯效率。

(6)晶体生长速度与温度梯度自协调控制技术 通过对温度场数据的测量和采集,并利用计算机对数据进行模拟计算,使用温度控制仪自反馈模糊控制技术,通过实时测量、反馈和监控温度场变化,实现提纯过程中固-液界面前沿温度梯度与晶体生长速度的协调稳定。

4 总结与展望

随着科学技术的高速发展,高纯铝应用的前景会越来越广阔,特别是高精尖领域对高纯铝纯度的要求也会越来越苛刻。中国已成为高纯铝生产强国,但大多企业仍然是采用能耗高、污染大的三层液电解法,可以预见的是在不久的未来,优点突出的偏析法技术会越来越受到重视。我国具有自主知识产权的偏析法原铝净化技术仍处于起步阶段,主要是因为国内偏析法技术起步较晚,并且从实验室到产业化、从试产到量产、技术的适用

性、设备的适配性、控制的精准性,包括人员的培训都是一个漫长的过程,这些都是制约国产技术产业化应用的客观原因,但是在未来必然会有越来越多的高纯铝新技术不断涌现。

参考文献

- [1] 王祝堂. 话说高纯铝(一)[J]. 金属世界, 2004(3): 33-39.
- [2] 王祝堂. 话说高纯铝(二)[J]. 金属世界, 2004(4): 36-37.
- [3] 王祝堂. 说说精铝与高纯铝的应用[J]. 轻金属, 2015(11): 62-63.
- [4] 兰文兰. 综述原铝精炼提纯工艺技术[J]. 轻金属, 2012(6): 28-31.
- [5] 张小东, 赵飞燕, 郭昭华, 等. 高纯铝的精炼工艺研究及生产现状[J]. 无机盐工业, 2018, 50(4): 1-14.
- [6] 王祝堂. 话说高纯铝(三)[J]. 金属世界, 2004(5): 33-37.
- [7] 戴飞. 高纯铝定向凝固提纯技术应用研究[J]. 铝加工, 2014(5): 26-30.
- [8] 赵伟. 偏析法制备高纯铝设备研发及其工艺探究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [9] WAN H L, ZHAO J Y, YANG B, et al. Study on the effective distribution coefficient of impurity separation in the preparation of high purity aluminum[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 10 366-10 376.
- [10] 于洋, 胡志强, 王海权, 等. 原铝旋转偏析净化工艺原理及进展[J]. 材料导报, 2014, A28(3): 128-132.
- [11] 戴飞. 电解原铝连续旋转偏析净化工艺研究[J]. 铝加工, 2019(4): 9-12.
- [12] 赵伟, 杨钢, 张希俊, 等. 上引法制备高纯铝工艺的试验研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(23): 49-51.
- [13] 安少云, 张佼. 纯铝定向凝固中晶界结构和溶质分布特性的研究[J]. 铸造技术, 2014, 35(5): 1 013-1 018.
- [14] 于洋, 胡志强, 王海权, 等. 原铝旋转偏析法净化工艺[J]. 大连工业大学学报, 2015, 34(4): 282-285.
- [15] 李玉章, 杨钢, 谭国寅, 等. 偏析提纯中提纯速度对杂质浓度的影响[J]. 铸造技术, 2016, 37(6): 1 195-1 201.
- [16] 张佳, 李玉章, 杨钢, 等. 偏析提纯工艺中铝液温度对除杂率的影响[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(4): 12-15.
- [17] 李玉章, 吴慧, 李雨耕, 等. 电磁搅拌对铝偏析提纯中溶质径向分布的影响[J]. 云南冶金, 2019, 48(3): 70-73.
- [18] 赵瑞敏, 李玉章, 杨钢, 等. 用偏析法提纯铝过程中不同杂质元素的偏析行为研究[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44(12): 20-22.
- [19] 贾志宏, 马铭泽, 徐亮, 等. 高纯铝定向凝固中的组织与成分研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(1): 59-61.
- [20] ZHANG J, SHU D, RAO Q L, et al. Nucleation and growth of high purity aluminum grains in directional solidification bulk sample without electromagnetic stirring[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(1): 1-7.
- [21] 戴飞. 高纯铝定向凝固过程中固液界面特性研究[J]. 铝加工, 2018(3): 4-8.
- [22] 张佼, 何博, 孙宝德, 等. 定向凝固的进展对高纯铝偏析法提纯工艺的影响[J]. 铸造技术, 2003, 24(3): 269-271.

(编辑:栗万仲)