

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2021.06.003

铝合金熔体在线净化系统关键技术创新及应用

陈亚仁

(福建省南平铝业股份有限公司,福建 南平 353000)

摘要: 通过对引进的铝合金熔体在线净化系统主要参数的研究,优化与改进了净化系统的结构设计,包括反应器、氩气控制系统和石墨转子等核心部件,实现了铝合金熔体在线净化装备的升级创新,其除气除杂效果显著,分别超过 40% 和 85%,铝合金熔体纯净度达到高等级。

关键词: 铝合金熔体;在线净化;反应器、石墨转子;氩气

中图分类号: TS912+3

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)06-0520-04

Key technology innovation and application of on-line purification system for aluminum alloy melt

CHEN Yaren

(Fujian Nanping Aluminum Co., Ltd., Nanping 353000, China)

Abstract: By studying the main parameters of the imported aluminum alloy melt on-line purification system, the structural design of the purification system was optimized and improved, including the design of the reactor, argon control system and graphite rotor and other core components. Such improvements realized the upgrading and innovation of on-line purification equipment for aluminum alloy melt. The system has significant gas and impurity removal capacity, the degassing and purifying efficiencies were over 40% and 85% respectively. The purity of aluminum alloy melt reaches the metallurgical quality with high-grade purity.

Keywords: aluminum alloy melt; online purification; reactor; graphite rotor; argon

铝合金材料熔炼过程中主要靠除气除杂净化工艺技术与装备来保证纯净度,炉外旋转喷吹在线精炼是目前较先进的净化处理工艺,在此基础上开发了 FILD、SNIF、MINT 等在线净化系统^[1]。这类系统主要依靠惰性气泡吸附氢和夹杂物进行净化,单级旋转喷吹净化效果有限,处理后的氢含量仍然高达 1.5~2.0 mL/kg Al,无过滤条件下除杂率约为 70%^[2-3],难以满足铝材高精尖加工时的品质要求。为提高净化效果,需要采用多级的旋转喷吹结构,所需设备庞大,占地面积大。此外,这类设备安装在铝水流槽下侧,浇注结束后旋转喷吹炉内会有铝水残留,影响铝水的利用率。

本研究突破传统的单一依靠惰性气体在线喷

吹的净化工艺,采用旋转喷吹与真空复合的净化方法,在吸收消化国外引进的 SIR 铝液在线净化系统技术的基础上,设计改进了一种结构紧凑,净化效果好,且无铝水残留的在线铝液净化装置,并建立超高冶金质量的铝合金熔铸生产线。

1 旋转喷吹与真空复合净化原理

1.1 结构原理

旋转喷吹与真空复合在线净化系统的结构原理如图 1 所示。该系统的核心部件为密闭的反应器,该反应器用挡板隔成两个上部相通的处理室(铝水输入室和输出室),底部安装两个转子,向铝熔体喷吹氩气,通过弥散的氩气泡吸附氢原子

收稿日期: 2021-10-06

基金项目: 福建省科技创新平台建设项目计划(2018H2003)

作者简介: 陈亚仁(1970—),男,福建莆田人,高级工程师,研究方向:有色金属材料工程和设备。

或夹杂物,并随气泡上浮至熔体液面。顶部装有抽真空系统,让反应器保持一定的真空度,一方面在负压作用下反应器内的铝熔体液面会不断升高,直至达到压力平衡,另一方面液面的真空环境可以改善气泡的上浮动力学条件,从而实现铝熔体在线除杂除气净化处理。

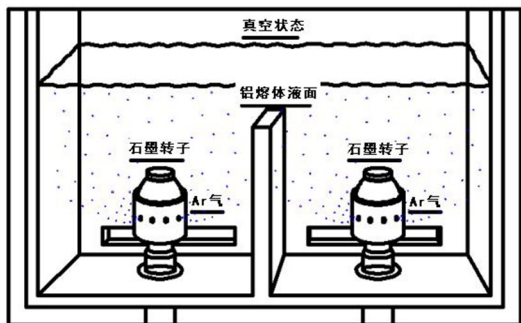


图1 旋转喷吹与真空复合净化原理图

Fig.1 Schematic diagram of rotary degassing combined with vacuum purification

1.2 机理分析

采用氩气对铝熔体除杂除气的过程如图2所示。分为4个阶段,第一阶段通过对流和扩散,氢原子或颗粒状夹杂物迁移到氩气泡的气-液界面;第二阶段氢原子和夹杂物吸附到气-液界面上,氢原子在界面上聚集后,结合成氢分子;第三阶段氢分子扩散进入气泡内。第四阶段吸附着氢气和夹杂物的氩气泡上浮至铝熔体表面,通过扒渣后去除。

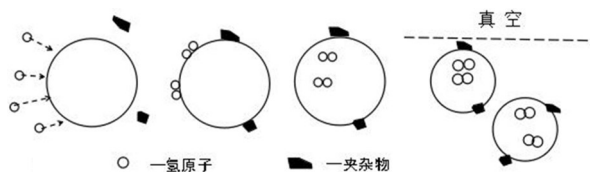


图2 气泡除气除杂过程示意图

Fig.2 Process of degassing and purifying with bubbles

第一阶段中,氢原子向惰性气泡迁移的传质通量如公式(1)^[4]:

$$n_1 = -2At(C_m - C_{ms}) \left(\frac{2Dv}{\pi r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: n_1 为氢原子传质通量, $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$; A 为惰性气泡表面积, cm^2 ; t 为除气时间, s ; C_m 为铝液内部氢原子浓度, g/cm^3 ; C_{ms} 为惰性气泡表面氢原子浓度, g/cm^3 ; D 为氢原子扩散系数, cm^2/s ; v

为惰性气泡运动速度, cm/s ; r 为惰性气泡半径, cm 。

第二和第三阶段,氢分子的传质通量如公式(2)^[4]:

$$n_2 = AtK_L \varepsilon (P_{e(i)} - P_{g(i)}) \sqrt{\frac{1}{M_i T_{ms}}} \quad (2)$$

式中: n_2 为氢分子传质通量, $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$; K_L 为Langmuir方程系数; ε 为凝结系数; $P_{e(i)}$ 为铝液上方或惰性气泡内气体 i 的饱和蒸气压, MPa ; $P_{g(i)}$ 为惰性气泡表面气体 i 的饱和蒸气压, MPa ; M_i 为气体 i 的相对原子质量; T_{ms} 为铝液温度, K 。

由式(1)和式(2)可知,真空可以增大气体原子的蒸气压差 $P_{e(i)} - P_{g(i)}$,通过旋转喷头的优化设计可以使惰性气体气泡变得细小,增大气泡表面积 A ,且将喷头安装在反应器底部也可以增加惰性气体与氢原子的作用时间 t ,这些都有利于提高氢原子向气泡的传质能力,从而提高氩气泡的除气和除杂效果。

2 在线净化系统的主要工艺参数

挪威海德鲁铝业公司对所开发的SIR铝液在线净化系统的净化处理工艺参数(如铝液流量、夹杂物尺寸和氩气泡大小等)进行研究^[5]。结果表明,铝熔体流量较大时(如52或63 t/h),除氢率略有降低,流量较小时(如10或25 t/h),除氢率较高。但在保证足够的气液流量比情况下,熔体流量对除杂率并没有显著影响,综合除杂率达到80%以上。

夹杂物原始尺寸对除杂率影响较大,夹杂物尺寸越大,在线净化系统的除杂效果越好,对直径40 μm 以上的大尺寸夹杂物,除杂率可达到85%以上,而直径小于20 μm 时,除杂率约为50%。当氩气泡尺寸为5~10 mm时,气泡尺寸越小,除杂率越高。

3 在线净化系统的净化装备结构优化设计

3.1 总体结构图与工作流程

在线净化系统总体结构如图3所示,其中,反应器安装在流槽侧面上方。工作时,铝熔体将反应器的出入口堵住后,启动旋转石墨转子,并通氩气,待流槽中熔体高度达到120 mm后,启动抽真

空系统,反应器中的铝熔体液在负压作用下,开始上升,当反应器内铝液高度达到 500 mm 后,石墨转子转速提高至 700 r/min,当反应器内铝液高度达到 900 mm 以上,铝熔体从反应器输入室进入,从输出室流出,并进入铸机。在处理过程中,铝液高度保持在 950 mm,真空度维持在 $-2\ 150\ \text{kPa}$ 。净化处理结束后,关闭抽真空系统,反应器内的铝液可从出入口流入流槽,在反应器内不会有铝液残留,可直接更换处理的铝合金类型,整套系统采用数字化,并通过传感器控制铝液高度。

的优化设计图如图 5 所示。

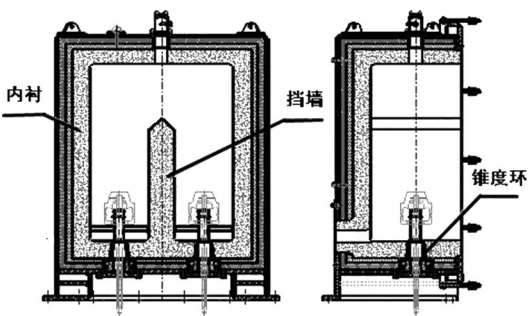


图 4 反应器设计结构图

Fig.4 Structural design of the reactor

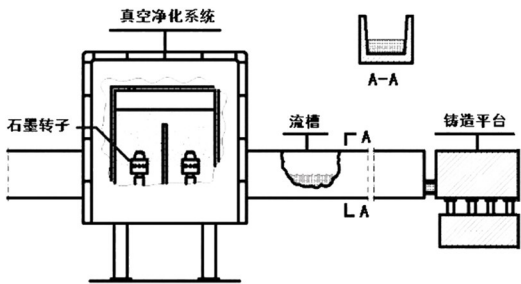


图 3 在线净化工作流程图

Fig.3 Process of on-line purification system

3.2 反应器结构及内衬改进

反应器是在线净化系统的主体部件,优化设计提升反应器高度为 2 200 mm,以强化除杂和除气效果。原装置内衬的中间挡墙和转子安装锥度环部位为分体式安装组合在箱体内衬中,在生产使用过程中存在如下问题:中间挡墙与箱体内衬间缝隙渗铝,造成中间挡墙向外移位,外端面凸出箱体表面影响门密封;转子安装锥度环容易开裂,不利于转子安装的同心度控制,同时铝液渗入内部缩短了密封材料寿命。改进设计为制造组合式内衬模具将中间挡墙、转子安装锥度环与箱体内衬设计为整体式,一次浇筑成型、养护烧结,较好地解决了原有除气箱体内衬存在问题,改进的内衬结构如图 4 所示。

3.3 石墨转子的试制

石墨转子是反应器的核心部件,置于反应器的底部,在铝熔体表面不存在漩涡的情况下,能够提高非金属物质的净去除效率,降低带走熔融表面物质的几率,也促进铸件表面变得光滑。

通过转子设计、材料优化、转子试制和在线检测,石墨转子用高纯石墨材料制成,均匀开设 12 个出气孔,并进行表面抗氧化处理,石墨转子结构

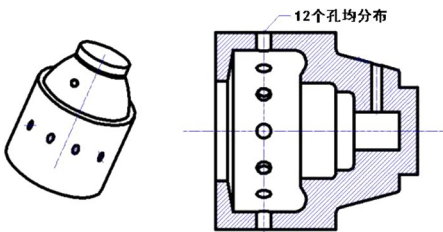


图 5 石墨转子设计结构图

Fig.5 Structure design of the graphite rotor

3.4 氩气系统的优化设计

氩气控制系统优化结构图如图 6 所示,设有一个入口和两个出口,分别连接两个旋转喷头。设计了流量控制器,用于调整氩气流量的大小;设计过滤器,用于去除氩气中的固态杂质。设计压力传感器和压力调节器,确保氩气的平衡输送。氩气入口气压为 500~1 600 kPa,流速可小于 200 L/min。

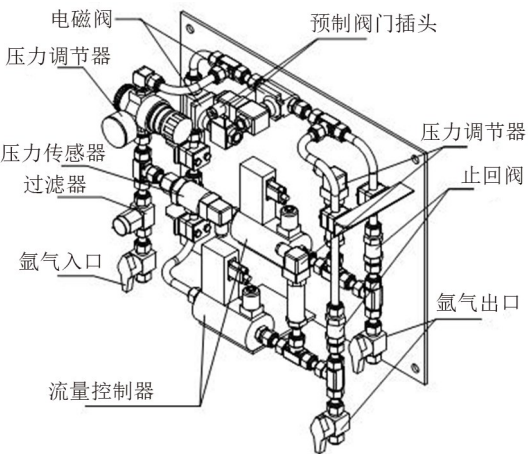


图 6 氩气系统结构图

Fig.6 Structure of the argon flow controlling system

4 在线净化系统的应用效果与分析

应用上述自主优化设计的在线净化系统处理铝合金熔体,随机取涵盖 1 系、2 系、3 系、6 系、7 系铝合金共 8 炉次的除气和除杂效果数据进行分析评价,用 Alscan 铝液测氢仪在线测试氢含量,结果如图 7 所示,用 PoDFA 离线测渣法测试夹杂物含量,结果如图 8 所示。

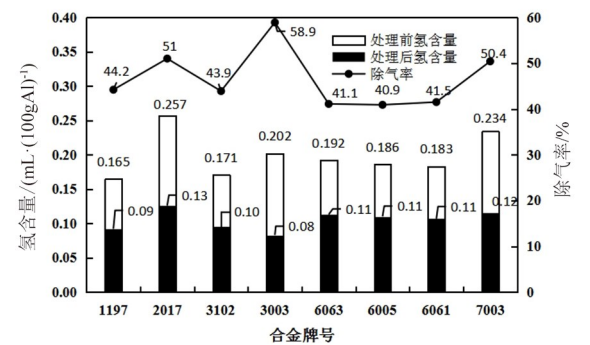


图 7 在线净化系统现场应用除气效果数据统计
Fig.7 Statistics of degassing effect of on-site application of the online purification system

由图 7 可以看出,在取样测试的 8 个炉次中,处理前氢含量为 0.165~0.257 mL/100gAl,处理后氢含量为 0.083~0.126 mL/100gAl,除气率为 41.1%~58.9%,合金元素对除气效果基本无影响,表明该系统对各类铝合金具有普遍适用性。初始氢含量越高,除气率也相应较高,如氢含量大于 0.2 mL/100gAl 的 2017、3003、7003 三种牌号铝合金,其除气率都达到 50% 以上。

参考文献：

[1] 周策. 添加 AlF₃ 铝熔体除碱热力学分析及其在 HX 系统中应用[J]. 福建工程学院学报, 2018, 16(3): 210-214, 218.

[2] 韦远飞, 罗洪方. 铝熔体在线精炼除气工艺及装置的发展[J]. 新技术新工艺, 2017(8): 11-14.

[3] ZHANG L F, LV X, TORGERSON A T, et al. Removal of impurity elements from molten aluminum; a review[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2011, 32(3): 150-228.

[4] 柯东杰, 陈群, 李宇航. 铝熔体在线除气净化机制研究[J]. 轻合金加工技术, 2012, 40(8): 13-22.

[5] STEEN I K, MYRBOSTAD E, HAKONSEN A, et al. Hycast I-60 SIR-a unique concept for inline metal refining[C] // TMS Annual Meeting. America: Minerals, Metals & Materials Society, 2010: 121-124.

由图 8 可见,处理前渣含量为 0.104~0.310 mm²/kg,处理后渣含量为 0.007~0.024 mm²/kg,除杂率为 84.7%~94.1%,除气除杂效果显著,且除杂率明显高于除气率,可以有效保证铝合金熔体的高纯净度。

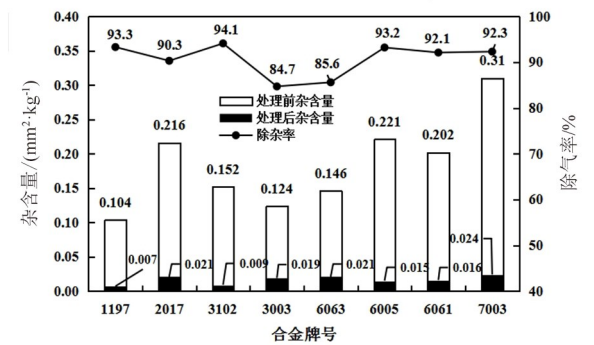


图 8 在线净化系统现场应用除渣效果数据统计
Fig.8 Statistics of purification effect of on-site application of the online purification system

5 结语

采用石墨转子底部旋转喷吹氩气和真空复合净化铝熔体方法,通过增大氢气的蒸气压、减小氩气泡的尺寸、提高气泡与铝液的作用时间,能显著改善除杂除气的动力学条件。

通过对国外引进的在线净化系统的消化吸收,对在线净化系统结构进行优化,形成了反应器尺寸改良、内衬结构改善和氩气系统设计等多项再创新,在线净化系统除气除杂效果优良,除气率达到 40% 以上,除杂率达到 85% 以上。铝熔体冶金质量达到高精尖铝合金产品的纯净度要求。