

Removal Process and Quality Control of Impurity Elements in Alloy Casting Aluminum Alloy Smelting

Chaowan Yang

Yunnan Wenshan Aluminum Co., Ltd. Wenshan, Yunnan, 663100, China

Abstract

Cast aluminum alloys are extensively utilized in aerospace, automotive manufacturing, and related fields due to their lightweight and high-strength properties. However, impurity elements introduced during the melting process (such as Fe, Si, and gaseous contaminants) can significantly impair the material's mechanical properties and processing stability. This paper investigates the origins and detrimental effects of impurity elements, while providing an in-depth analysis of the mechanisms and key applications of critical removal processes including flux refining, filtration purification, vacuum melting, and gas shielded melting. By integrating quality control measures throughout the entire melting process (source control, process parameter optimization, and product inspection), the study establishes an integrated system encompassing "process optimization, process control, and quality assurance," offering theoretical and practical references for enhancing the quality of cast aluminum alloy melting.

Keywords

Cast aluminum alloy; Smelting; Impurity removal; Process optimization; Quality control

铸造铝合金熔炼过程中杂质元素的去除工艺及质量控制

杨朝万

云南文山铝业有限公司, 中国·云南文山 663100

摘要

铸造铝合金轻量化、高强度等长处广泛运用于航空航天、汽车制造等范畴, 不过其熔炼流程里带入的杂质元素(像Fe、Si、气体杂质等)会严重干扰材料的力学性能与加工稳定性。本文从杂质元素的来源与损害着手, 深刻剖析熔剂精炼、过滤净化、真空熔炼、气体保护熔炼等关键去除工艺的作用机理与应用重点, 结合熔炼全流程的质量控制办法(源头管控、过程参数优化、成品检测), 搭建“工艺优化-过程管控-质量保障”的一体化系统, 给提升铸造铝合金熔炼质量供应理论与实践参照。

关键词

铸造铝合金; 熔炼; 杂质去除; 工艺优化; 质量控制

1 引言

铸造铝合金作为现代工业中使用量最大的轻合金材料, 其性能好环直接决定终端产品的可靠性与使用时长。熔炼是铝合金铸造的核心环节, 在此过程当中, 原材料带入、熔炼设备污染、环境介质浸入等因素会造成杂质元素(金属杂质、非金属夹杂物、气体杂质)的引入。这些杂质会破坏铝合金的晶体结构完好性, 引发铸造缺陷(例如气孔、夹渣、裂纹), 降低材料的强度、韧性及耐腐蚀性能, 严重情况下甚至造成产品失效。所以, 深入研究杂质元素的去除工艺, 构建科学的质量控制系统, 对推动铸造铝合金产业高质量发展具备重要现实意义。本文围绕熔炼过程中杂质元素的去除核心技术

与全流程质量管控展开系统研讨, 给实际生产供应技术支撑^[1]。

2 铸造铝合金熔炼中杂质元素的来源与危害

2.1 杂质元素的主要来源

铸造铝合金熔炼过程中, 杂质元素的来源呈现多样性, 主要能归纳成三类。一是原材料自身携带, 包含铝锭里的残余杂质(如Fe、Cu等)、回收料(再生铝)中的混入杂质(像Si、Mg氧化物及金属碎屑), 这类杂质是熔炼前最为主要的杂质来源, 其含量直接作用于后续精炼难度。二是熔炼过程中的二次污染, 比如熔炉衬材(耐火材料)的侵蚀脱落、熔炼工具(坩埚、搅拌棒)的磨损带入, 以及燃料燃烧产生的粉尘、有害气体(如CO₂、H₂O)与铝液反应生成的新杂质。三是环境因素影响, 熔炼环境里的空气湿度、粉尘含量会造成铝液吸收水分, 进而生成Al₂O₃等非金属夹杂物, 同时空气中的氮气、氧气也会溶解于铝液中形成气体杂质^[2]。

【作者简介】杨朝万(1992—), 男, 中国云南文山人, 初级工程师, 从事铸造铝研究。

2.2 杂质元素的核心危害表现

差异化特征于不同类型杂质元素对铸造铝合金性能的危害中呈现,然结构与性能两方面的负面影响均会被造成。金属杂质范畴内,Fe为危害较大且最常见之元素,Al₃Fe等脆性金属间化合物由其与Al形成,晶界处针状或片状分布着这些化合物,铝合金的塑性与韧性会被显著削弱,材料的切削加工性能同时受到作用;Si含量处于过高状态时,铝合金硬度的提升、韧性的下降会被促使,高塑性要求的铸件(像汽车发动机缸体)所受危害尤为突出。Al₂O₃、MgO、SiO₂等非金属夹杂物,细小颗粒状或聚集态多为其存在形式,铝合金基体的连续性会遭到破坏,应力集中点成为其角色,受力进程中裂纹扩展易被引发,材料的强度与疲劳寿命随之降低,铝合金的铸造流动性这类夹杂物还会对其产生影响,浇不足、冷隔等铸造缺陷进而出现。气体杂质于铝液凝固过程中,因溶解度下降而析出,气孔缺陷得以形成,材料的致密度被降低之余,力学性能亦被削弱,严重情形下铸件渗漏会发生,密封要求的满足无法达成^[1]。

3 铸造铝合金熔炼中杂质元素的去除工艺

3.1 熔剂精炼工艺状况

熔剂精炼作为铝合金熔炼中运用最广的杂质去除手段,熔剂与杂质元素间物理化学的相互作用(吸附、溶解、化学反应等形式)被利用,杂质的分离去除得以实现,此为其核心原理所在。功能差异下,熔剂有覆盖剂、精炼剂和变质剂之划分,其中精炼剂在杂质去除方面起着关键作用。精炼剂的选择,需将熔点低于铝合金熔炼温度、密度小于铝液、与杂质亲和力强等条件予以满足,氯化物系(例如NaCl-KCl混合盐)、氟化物系(如Na₃AlF₆)以及复合熔剂(氯化物-氟化物复配类型)为常见种类。氯化物系精炼剂,挥发所产生的气泡对铝液中的非金属夹杂物进行携带使其上浮,此为主要方式,同时与铝液中的水分发生反应生成HCl气体,除气效果得以达成;氟化物系精炼剂,则能够与Al₂O₃等氧化物展开化学反应,低熔点、易上浮的复合化合物(如Na₃AlF₆-Al₂O₃)被生成,氧化物杂质的去除目标得以实现。应用进程中,熔剂的加入量、加入温度以及搅拌方式,精炼效果会受到其直接作用:加入量过多,熔剂残留现象会出现,新的杂质随之形成;加入温度过低,熔剂充分熔化并发挥作用无法实现,一般将温度控制在铝合金液相线以上50-100℃范围;搅拌需呈现均匀温和状态,铝液二次氧化或更多气体的卷入需要避免。另外,为使精炼效率得到提升,“底吹熔剂”或者“惰性气体-熔剂复合精炼”方式可被采用,气体搅拌的方式对熔剂与铝液的接触面积进行增强,杂质吸附与分离效果得以强化^[4]。

3.2 过滤净化工艺构建

过滤净化工艺构建是凭借过滤介质的物理拦截动作,达成铝液之内非金属夹杂物剔除的关键技艺塑造,尤其适配

于粒径超越10μm的固体杂质剔除场景,往往充当熔剂精炼工序之后的深度净化阶段构造。过滤介质的筛选事宜属于过滤成效的核心构成,常见应用类型涵盖陶瓷泡沫过滤装置、纤维过滤装置、刚性多孔过滤装置等品类。陶瓷泡沫过滤装置(CFF)作为当下工业制造进程中应用范畴最为广泛的过滤介质类型,其具备三维网状构造形态,拥有70%—90%的高孔隙率特征,能够借助机械拦截效应、惯性碰撞效应、吸附效应等多重作用形式实现夹杂物的捕捉作业。于使用流程当中,过滤装置的孔径选取需要依照杂质粒径状况实时调整操作,一般选用具备10-50PPI(每英寸孔隙数量)指标的过滤装置,针对高精度铸件生产可采取多级过滤模式布局^[5]。

3.3 真空熔炼工艺体系

真空熔炼工艺体系主要针对气体杂质成分与挥发性金属杂质成分的去除目标,其核心作用原理是借助真空环境条件降低气体分压水平,推动铝液当中溶解气体的析出过程,同时运用杂质元素与铝元素的蒸气压差异特征,达成挥发性杂质的蒸发分离进程。该工艺体系尤其适配于纯度要求较为严苛的航空航天领域用铸造铝合金材料(例如A356、6061系合金)生产场景。真空熔炼的实施效果主要取决于真空度指标、熔炼温度指标与保温时间指标。真空度水平越高,气体分压数值越低,气体杂质成分(如H₂)的析出动力越显著,一般控制在10—100Pa范围;熔炼温度参数需要高于铝合金常规熔炼温度数值20-50℃幅度,用以提升铝液流动性能,促进气体成分与杂质成分的扩散分离进程,但温度数值过高会造成铝液挥发损失量增加问题;保温时间参数需要依照合金成分构成与杂质含量水平实施调整操作,通常处于30—60分钟区间,确保杂质成分实现充分分离效果。另外,真空熔炼作业进程中需要规避铝液与坩埚装置的过度反应现象,可选用石墨坩埚装置或涂层坩埚装置(如Al₂O₃涂层类型),减少因坩埚侵蚀问题带来的二次污染影响。该工艺体系的优势体现在能够同步实现气体杂质成分与挥发性金属杂质成分(如Pb、Bi元素)的去除效果,但存在设备投资成本较高问题,能耗需求较大,适配于高端铝合金铸件产品的生产场景。

3.4 气体保护熔炼工艺构建

气体保护熔炼工艺的构建重点是运用惰性气体类别(像Ar、N₂成分)或者还原性气体类型(例如CO物质)覆盖至铝液表层范围,实施空气同铝液接触的隔绝举措,从起始源头位置降低氧化杂质以及气体杂质的生成状况,与此同时能够辅助开展部分已存杂质的去除作业。惰性气体实施保护属于最为常用的形式情形,在其中Ar气由于化学性质呈现稳定状态、不会与铝液产生反应现象,获得最为广泛的应用局面。Ar气借助喷枪装置吹入铝液内部区域,一方面形成保护性的气氛环境,防范铝液出现氧化问题;另一方面气泡在上升移动的过程当中会携带部分气体杂质以及细小夹杂

物产生上浮表现,达成精炼处理的效果情况。吹气量数值与吹气压力参数需要进行严格化的控制操作,吹气量处于过大状态或者压力处于过高状态会引发铝液产生飞溅现象,增添二次氧化的风险概率;吹气量处于过小状态则不能形成有效的保护作用。

4 铸造铝合金熔炼过程的质量控制措施

4.1 源头质量管控手段

源头实施管控是减少杂质元素产生引入的关键要点,核心内容在于原材料实施管控以及设备开展预处理操作。在原材料进行选择方面,需要优先选用契合国家标准要求的优质铝锭材料,严格控制回收材料的混入比例数值,并对回收材料开展预处理作业。与此同时,需要建立起原材料的检验工作机制,针对每批次原材料的化学成分构成、杂质含量状况开展检测工作,保证其契合熔炼作业的要求标准。在设备开展预处理的方面,熔炼作业之前需要对熔炉装置、坩埚器具、搅拌棒工具等设备设施开展彻底性的清理工作,清除表面位置的氧化皮物质、残留杂质成分与油污污渍;对坩埚器具进行预热处理操作,缩小坩埚器具同铝液之间的温差数值,规避铝液出现快速降温导致的凝固夹杂问题;对熔炼作业的工具进行涂层处理操作,降低工具产生磨损带来的杂质污染影响。

4.2 过程参数管控途径

熔炼作业过程当中的参数优化处理是保障杂质去除效果的核心内容,需要重点针对熔炼温度指标、熔炼时间长度、搅拌速度数值等关键参数实施控制操作。熔炼温度数值应当依据合金具体类型实施严格化控制,一般处于700-760℃区间范围,规避温度处于过高状态引发铝液出现过度氧化现象以及晶粒变得粗大问题,同时防范温度处于过低状态造成熔解作业不够充分、杂质分离存在困难的情况。熔炼时间长度需要进行合理性的把控操作,过长的熔炼时间周期会增添铝液同环境条件、设备设施的反应时间数量,引发杂质产生积累现象;过短的时间则会造成杂质无法实现充分性分离,一般控制在1.5—3小时范围。搅拌操作行为需要遵循“温和均匀化”的原则要求,搅拌速度数值控制在30-60r/min区间,规避剧烈搅拌造成铝液卷入空气物质,同时保证熔剂材料与铝液实施充分性接触,提升精炼处理的效果水平。

4.3 成品质量检测

成品检测作为质量控制终端节点,目的在于验证杂质剔除成效,保障铸件契合使用规范。检测条目主要涵盖化学

成分剖析、非金属夹杂物检验、气体含量测定与力学性能测试。化学成分剖析可运用光谱分析手段迅速精准测算合金内主要元素及杂质元素(像Fe、Si)的含量数值,保证其处于标准范围之内;非金属夹杂物检验可借助金相显微镜观测或图像分析系统,统计夹杂物的数量多寡、粒径大小与分布形态,评估过滤净化成果;气体含量测定可采用液氮冷却办法或真空减压方式,测量铝液中的 H_2 含量情况,确保其低于0.2mL/100g标准;力学性能测试通过拉伸试验项目、硬度试验内容等测定铸件的抗拉强度指标、屈服强度数据、伸长率参数等,间接体现杂质剔除效果。针对检测未达标的产品物件,需剖析成因缘由,采取具备针对性的改进举措办法,保障后续生产的质量稳定状态。

5 结语

铸造铝合金熔炼环节中的杂质元素剔除与质量管控工作,是提升材料性能水平与产品可靠程度的核心关键环节。熔剂精炼工艺、过滤净化技术、真空熔炼方法、气体保护熔炼手段等各有独特优势,需依据合金类别类型、产品需求条件与生产实际状况合理做出选择,在必要情形下采用多工艺复合运用模式,达成杂质元素的高效剔除目标。质量管控应当贯穿“源头起始点—过程进行中—成品完成态”全流程环节,通过原材料的管控措施减少杂质引入情况,通过过程参数的优化操作保障精炼实际效果,通过成品检测的实施验证质量达标状况。在未来发展阶段,伴随高端制造业领域对铝合金质量要求的持续提升,杂质剔除工艺将会朝向高效化发展方向、精准化操作方向、绿色化生产方向迈进,例如新型复合熔剂的研究开发工作、智能化过滤设备的应用实践过程、真空—惰性气体复合熔炼技术的优化提升阶段等,同时质量管控体系会愈发完善健全,通过数字化监测手段与大数据分析实现熔炼过程的实时调控操作,进一步提升铸造铝合金的生产质量水准与市场竞争能力。

参考文献

- [1] 刘培德,董垒,温晓妮.铸造铝合金熔炼工艺研究[J].世界有色金属,2018,(02):14-15.
- [2] 皮远岸.铸造铝合金熔炼过程的质控原理与实践[J].科技创新与应用,2014,(14):18-19.
- [3] 文献速报[J].铸造,2002,(07):453-454.
- [4] 黄汉云.铝合金熔炼镁的变化和影响[J].江苏冶金,2002,(03):12-14.
- [5] 洪文安,鞠复明.电磁搅拌技术在铸造铝合金熔炼中的应用[J].轻金属,1996,(07):47-49.