

熔模铸造硅溶胶型壳清理问题及处理措施研究

张志峰 潘伟芳 徐建

浙江遂金特种铸造有限公司 浙江省丽水市遂昌县 323300

DOI:10.32629/ems.v8i6.20576

[摘要] 熔模铸造硅溶胶型壳工艺是生产高精度、复杂结构铸件的核心技术。但浇注后型壳清理困难，特别是复杂内腔及盲孔处的残留型壳，已成为影响铸件合格率与生产效率的关键因素。本文从熔模铸造硅溶胶型壳工艺特点出发，在明确型壳面剥蚀、残余强度过高及玻璃相生成等清理问题成因基础上，提出基于材料优化、工艺参数控制与辅助清理技术的系统性处理措施，以此为解决铸件清壳难题提供参考，为推动精密铸造高质量发展做出应有贡献。

[关键词] 熔模铸造；硅溶胶型壳；清理问题；处理措施

引言

熔模铸造是通过制造可溶性蜡模，在表面涂覆多层耐火材料制备型壳，经脱蜡、焙烧后获得铸型并浇注金属液的工艺，所生产的铸件具有尺寸精度高、表面粗糙度低等显著优势，广泛应用于航空、航天、医疗及汽车等高端制造领域。硅溶胶作为环境友好型无机粘结剂，因型壳高温强度高、尺寸稳定性好，成为现代精密铸造的主流制壳材料。但航空及汽车用铸件普遍具有多腔体、深孔、复杂弯曲流道等结构特征，浇注后的陶瓷型壳清理极困难。采用常规的机械振动、抛丸等方式，无法彻底清除内腔型壳，甚至因强力清壳导致铸件变形或开裂。部分高温合金或铝合金铸件在浇注过程中，型壳面层材料被金属液剥蚀并卷入铸件表层，形成“夹壳”缺陷，直接导致产品报废。系统研究硅溶胶型壳清理困难的根本原因，并提出针对性处理措施，对提升精铸件成品率、降低制造成本具有重要意义。

1、熔模铸造硅溶胶型壳工艺特点

1.1 硅溶胶粘结剂的胶凝与固化机理

硅溶胶是二氧化硅胶体微粒在水中形成的稳定分散体系，胶凝过程是型壳获得强度的关键。制壳过程中，在环境温度、湿度及风速控制下，涂料中的自由水持续蒸发。研究显示，随着水分减少，硅溶胶胶粒间的接触概率增加，布朗运动导致胶粒在接触点通过 Si-O-Si 键合发生聚集。该过程分为两个阶段：前期为近线性变化阶段，pH 值从 9.5~10.0 缓慢下降，SiO₂ 含量相对上升，涂料粘度呈线性增加；后期为急剧变化阶段，当含水量降至临界点，胶粒迅速聚集成空间网络结构，形成凝胶^[1]。在随后的高温焙烧过程中，凝胶

进一步脱水，硅羟基缩合形成牢固的硅氧键网络，同时耐火粉料颗粒被此网络包裹并烧结连接，赋予型壳优异的高温强度。该胶凝反应不可逆，且过度烧结是导致型壳残余强度过高的直接原因。

1.2 不同类型粘结剂型壳工艺对比

目前工业中主要应用硅溶胶和水玻璃两种粘结剂体系，工艺特性对比如表 1 所示。

表 1 水玻璃型壳与硅溶胶型壳工艺特性对比

工艺特性	水玻璃型壳	硅溶胶型壳
粘结剂体系	水玻璃（硅酸钠）	硅溶胶（SiO ₂ 胶体）
硬化方式	化学硬化（氯化铵/铝）	物理干燥硬化
制壳周期（典型值）	15~24 小时	15 小时至 5 天
典型焙烧温度	700~850℃	870~1050℃
铸件表面粗糙度	Ra 12.5~25 μm	Ra 1.6~6.3 μm
高温强度	较低，易变形	高，抗热变形能力强
残余强度	低，易清理	高，清理困难
环保性	酸雾、氯盐污染严重	清洁，零酸碱排放

2、熔模铸造硅溶胶型壳清理问题

2.1 复杂结构内腔型壳残留与清理盲区

对于具有深孔、细长弯曲流道、交叉油路或封闭型腔的航空、汽车精铸件，清壳过程存在物理性清理盲区。常规的机械振动清壳依靠型壳与铸件本体因振动加速度差产生的惯性力使型壳破碎脱落。但在内腔尺寸小于 10 mm 的狭窄通道中，抛丸介质无法有效到达。同时，内壁型壳受金属液凝固压力的包裹，与铸件界面结合紧密^[2]。针对轮廓尺寸为 250 mm

×250 mm×110 mm、平均壁厚 4 mm 的铝合金复杂腔体铸件, 浇注后采用振幅 0.8~1.2 mm、频率 50 Hz 的振动清壳台处理 30 分钟后, 内腔凹槽及交叉孔深处仍残留厚度 2~4 mm 的致密型壳层。碱煮可辅助清理, 但对镁合金等活泼金属有腐蚀风险, 且废液处理成本高。对于盲孔深度与直径比大于 3 的结构, 物理与化学方法均难以奏效, 型壳残留成为必然, 直接导致该部位后续机加工时刀具崩损或铸件功能失效。

2.2 高温金属液对型壳面层的侵蚀与剥蚀

在浇注过程中, 高温金属液对型壳面层产生强烈的物理化学侵蚀, 形式包括熔蚀、渗透与剥蚀。以铝合金熔模铸造为例, 当面层与过渡层结合强度不足时, 铝液在静压力作用下渗入两层之间的孔隙。研究通过扫描电镜观察发现, 焙烧后型壳面层与过渡层结合处孔隙率显著增高, 界面结合强度降低。浇注后, 面层材料被铝液整体剥蚀并卷入铸件表层, 形成“夹壳”或“粘砂”缺陷。X 射线探伤显示, 卷入的面层碎块密度低于金属基体, 在底片上呈现不规则暗影。尤当铸件壁厚较大时, 凝固时间长, 金属液对型壳的浸润和侵蚀程度加剧^[3]。对于采用锆英石面层材料的硅溶胶型壳, 高温下锆英石分解生成的 SiO_2 与铝液发生反应: $4\text{Al} + 3\text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Si}$, 反应生成的硅可能固溶于铝或形成脆性相, 而 Al_2O_3 则残留在铸件表面, 形成硬质点, 严重恶化加工性能和表面质量。

2.3 型壳背层玻璃相生成与残余强度过高

型壳残余强度是指型壳经高温焙烧并冷却至室温后所保留的力学强度, 理想的型壳应具备高温高强度、室温低残余强度特性, 但高岭土熟料在高温焙烧和金属液热作用下, 会发生复杂的物理化学变化。从显微形貌分析, 焙烧后型壳背层中出现大量水滴状或无定形玻璃相。该玻璃相由耐火材料中的杂质与 SiO_2 在高温下形成的低熔点共熔物构成。这些玻璃相在高温下具有粘性流动能力, 可填充颗粒间隙, 显著提高型壳的高温强度。但当型壳冷却后, 玻璃相发生凝固, 导致残余强度异常升高。

2.4 型壳材料、粒度级配与焙烧工艺的负面影响

型壳清理难度与原材料选择及工艺参数密切相关。首先, 面层材料活性直接影响界面反应程度。对于钛合金铸造, 采用硅溶胶粘结剂时, 若 SiO_2 含量从 8% 增至 14%, 型壳抗弯强度从不足 1.0 MPa 升至 2.5 MPa 以上, 同时铸件表面污染层

厚度从 120 μm 增至 260 μm , 这是由于高活性 SiO_2 与钛液剧烈反应所致。对于铝合金, 锆英石砂中若杂质总含量超过 0.5%, 分解温度从 1600℃ 以上降至 1400℃ 以下, 加剧与铝液的反应倾向^[4]。若面层锆英石粉中粗颗粒比例过高, 无法形成紧密堆积, 涂料干燥后孔隙率高, 为金属液渗透提供通道。最后, 过度焙烧是残余强度升高的直接诱因。研究表明, 将焙烧温度从 800℃ 提高至 1050℃ 并延长保温时间, 型壳莫来石相转化率增加, 玻璃相充填更充分, 残余强度可提升 2~3 倍。部分企业为彻底去除型壳中水分和有机物, 采取“高温、长时间”的保守焙烧工艺, 反而恶化清壳性能。

2.5 型芯技术缺失导致的内腔清理难题

对于带复杂内腔的熔模铸件, 通常需要预置型芯以形成内部流道。然而, 目前成熟且适用于硅溶胶熔模铸造工艺的型芯技术严重缺乏。与砂型铸造不同, 熔模铸造用型芯在蜡模压制阶段即需嵌入, 随后要经受蜡料冲击、脱蜡时蜡料体积膨胀的挤压以及型壳 950~1050℃ 高温焙烧的热冲击。现有型芯材料存在明显缺陷: 盐芯强度低、易吸潮开裂; 有机类型芯芯发气量大, 易导致铸件气孔; 普通陶瓷型芯虽然强度高, 但脱芯困难, 常需高温高压碱煮设备, 设备投资大、效率低且不适用于细长弯曲的孔道。因此, 在缺乏高性能、易溃散型芯的情况下, 铸造厂被迫采用“实心铸件+后续机加工”的方式成形内腔, 或简化铸件设计, 这极大地限制熔模铸造技术的应用范围, 也使许多本可通过型芯成型的内腔在铸态下成为无法清理的死角。

3、熔模铸造硅溶胶型壳清理措施

3.1 优化面层与过渡层结合强度, 抑制金属液剥蚀

针对面层剥蚀导致的表面夹壳问题, 核心策略是提高面层与过渡层的界面结合强度及致密度。具体措施包括: 第一, 优化面层与过渡层粉料的粒度级配。采用双峰或三峰粒度分布的耐火粉料, 使细粉填充粗粉的间隙, 将面层涂料的粉液比从 2.0~2.2 提升至 2.4~2.8, 同时涂料粘度控制在 35~45 秒, 将涂层干燥后的体积密度提高 15~20%, 孔隙率降低 30% 以上, 有效阻止金属液渗入^[5]。第二, 在过渡层涂料中添加适量烧结助剂或纤维。例如, 加入质量分数 0.1%~0.3% 的 α - Al_2O_3 纳米粉或钛酸铝纤维, 可促进面层与过渡层在焙烧过程中的界面扩散与烧结颈长大, 使两层结合界面处的抗剪切

强度提高 40%以上。第三, 严格控制制壳干燥工艺。面层干燥时间不小于 3 小时, 湿度控制在 50%~60%, 风速 3~5 m/s, 确保胶粒充分迁移与胶凝, 形成致密、连续的膜层。实施上述优化后, 铝合金铸件表面夹壳缺陷率可降低 60%~80%, X 射线检测中因面层剥蚀导致的暗影显著减少。

3.2 调控背层玻璃相含量与晶化, 降低型壳残余强度

降低型壳残余强度的根本在于抑制有害玻璃相的生成并促进向高熔点晶体转化, 先选用高纯耐火材料。严格控制背层用高岭土熟料中 K_2O 、 Na_2O 、 Fe_2O_3 等强助熔剂杂质的质量分数总和低于 0.5%, 将 Fe_2O_3 含量从 1.2% 降至 0.3% 时, 型壳在 1000℃ 下生成的玻璃相体积分数可从 25% 降至 8%, 残余抗弯强度可降低 40%~50%。采用“低温长时”分阶段焙烧替代“高温短时”工艺, 首先在 600~700℃ 保温 1 小时, 使有机物充分分解排出; 随后升温至 850~900℃ 保温 1.5~2 小时, 促进方石英析出及莫来石晶核形成; 避免长时间处于 950℃ 以上的高温区。通过控制升温速率和最高温度, 可使型壳在获得足够高温强度的同时, 残余强度降至 1.0 MPa 以下。在背层涂料中添加质量分数 1%~2% 的 MgO 或 TiO_2 微粉, 诱导玻璃相在冷却过程中析出堇青石或钛酸铝等高熔点晶相, 这些晶相与骨料颗粒间以点接触为主, 结合强度弱, 型壳冷却后更易沿晶界开裂, 从而提升溃散性。

3.3 开发与应用高效环保的辅助清壳技术

对于机械振动无法触及的复杂内腔, 需采用化学或物理化学复合清理方法。对于铝合金铸件, 配置浓度 25%~35% 的 $NaOH$ 或 KOH 溶液, 加热至 120~180℃ 循环冲刷型壳内腔。该过程中, 碱液与型壳中的 SiO_2 发生反应: $2NaOH + SiO_2 \rightarrow Na_2SiO_3 + H_2O$, 使硅氧网络解聚, 型壳逐层溶解。同时向碱液中添加络合剂加速 Al_2O_3 的溶解, 采用高温高压碱煮设备, 将深孔内型壳的清理时间从数天缩短至 4~6 小时。利用 100~300 MPa 的超高压水射流, 通过特制喷嘴导入铸件内腔, 利用水的冲击力与剪切力破碎和冲刷型壳。此方法对铝合金、镁合金等低硬度合金铸件无损伤, 且无化学废液问题。对微型复杂结构, 将铸件浸没于水中并施加 20~40 kHz 的超声波震荡, 利用“空化效应”产生的微射流和冲击波剥离细孔道内的残余型壳粉末, 清理率可达 95% 以上。

3.4 改进型壳材料体系与快速制壳工艺

从材料源头降低清理难度是关键。对于钛、铝活泼金属, 选用 Y_2O_3 、 $CaZrO_3$ 等惰性更高的耐火材料作为面层。例如, 以电熔氧化钇为粉料, 搭配有机锆或低钠硅溶胶, 可显著降低界面反应层厚度。同时, 在面层材料中添加质量分数 2%~5% 的石墨粉、硫铁矿粉或 CaF_2 , 利用在高温下分解产生的气体形成还原性气氛, 防止金属氧化, 并在型壳中留下微孔, 降低残余强度。应用硅溶胶快速制壳技术。借鉴东风精铸的成功经验, 采用添加自主研发的快干剂和复合强化纤维的涂料体系。该体系不仅将制壳周期缩短 50% 以上, 由于快干剂在焙烧后完全分解, 型壳中获得大量分布均匀的微孔, 透气性提高 20%~30%, 残余强度降低 15%~25%。配合“温度+湿度+风速”的精准管控及底部风管送风模式, 可实现型壳薄壁、高强且易破碎的良好综合性能。

4、结束语

熔模铸造硅溶胶型壳清理问题, 不仅是影响铸件生产效率和成本的具体工艺难题, 更是制约复杂精密铸件向大型化、整体化方向发展的关键技术因素。对铸造企业而言, 必须切实转变传统“重浇注、轻清壳”的理念, 强化对型壳全生命周期性能的认知与管控, 从材料配方、工艺设计到辅助清理技术进行系统性创新。通过构建“低反应-高溃散”型壳材料体系、优化“控玻璃相-促晶化”的焙烧工艺、结合机械、化学、水力学等多模式清壳方法, 才能有效攻克清理难关, 以此为推动精密铸造行业向绿色、高效、高质量方向发展做出更大贡献。

[参考文献]

- [1] 伍林, 姜卫国, 郝悦, 等. 熔模铸造用硅溶胶面层涂料关键参数动态演化过程及胶凝机理 [J]. 铸造, 2025, 74 (07): 967-974.
- [2] 常化强, 杨莹, 乔海滨, 等. 硅溶胶中 SiO_2 含量对钛合金精铸型壳的影响 [J]. 铸造, 2025, 74 (06): 776-780.
- [3] 刘松良. 熔模铸造硅溶胶型壳清理问题分析 [J]. 铸造工程, 2023, 47 (01): 54-58.
- [4] 赵鹏, 洪润洲, 周永江, 等. 镁合金熔模铸造技术及应用 [J]. 铸造, 2023, 72 (12): 1542-1547.
- [5] 牛森. 现代熔模铸造工艺技术设计与管理 [J]. 山西冶金, 2023, 46 (05): 88-90+96.