

免热处理铝合金材料开发及其在一体化压铸中的应用

杨玉宝

中信戴卡股份有限公司 河北秦皇岛 066000

摘要: 本文聚焦免热处理铝合金材料开发及其在一体化压铸中的应用。先阐述其核心优势,如省去热处理工序、降低能耗与成本等。接着剖析材料设计原理,包括合金化元素选择、微观组织及性能平衡设计。探讨开发路径,涵盖成分优化、制备工艺创新与模拟。研究其在一体化压铸中的适配性,涉及工艺参数优化与缺陷控制。最后展望未来发展方向,为该材料的发展与应用提供参考。

关键词: 免热处理铝合金; 一体化压铸; 高强韧化

引言

在制造业追求高效、节能与高性能材料的大背景下,传统铝合金热处理工序的弊端日益凸显。免热处理铝合金应运而生,它凭借省去热处理工序等独特优势,成为铝合金材料领域的创新焦点。一体化压铸作为先进制造工艺,对材料性能要求严苛。深入研究免热处理铝合金材料开发及其在该工艺中的应用,不仅有助于提升生产效率、降低成本,还能推动相关行业技术进步,具有重要现实意义。

一、免热处理铝合金的核心优势

免热处理铝合金最核心的优势在于省去传统铝合金加工中必需的固溶时效等热处理工序,从源头降低生产能耗与成本。传统铝合金需经过多道热处理流程实现强化,不仅消耗大量电能,还延长生产周期,而免热处理铝合金通过成分设计与工艺优化,在铸造或成型后即可达到目标力学性能,大幅缩短生产流程,单批次生产效率可提升30%以上。同时,省去热处理环节减少了材料在高温处理中的氧化损耗,材料利用率提高至95%以上,降低原材料浪费。其优异的铸造流动性与成型性也是突出优势,能够适应复杂结构件的一次成型需求,尤其适配一体化压铸工艺,减少零件拼接数量,提升结构整体性^[1]。另外,免热处理铝合金在成型后尺寸稳定性更高,避免了热处理过程中因温度变化导致的零件变形,降低后续校正工序成本,同时其力学性能均匀性优异,在汽车、航空航天等关键领域的应用中展现出可靠的服役稳定性。

二、免热处理铝合金的材料设计原理

(一) 合金化元素的选择与作用机制

免热处理铝合金的合金化元素选择需围绕“成型即

强化”核心目标,精准匹配元素固溶强化与析出强化效应。硅、镁是基础强化元素,硅能提升合金铸造流动性,与镁形成 Mg_2Si 强化相,该相在铸造过程中可直接析出并弥散分布,无需后续热处理激活。铜元素可通过固溶强化提高合金强度,同时细化 Mg_2Si 相颗粒,增强相界面结合力,但添加量需控制在1.5%~3%之间,避免过量导致合金脆性增加。锰、铬等微量元素主要发挥晶粒细化作用,通过形成 Al_6Mn 、 Al_7Cr 等金属间化合物,作为异质形核核心,细化铸态晶粒,提升合金塑性。锆元素可与铝形成 Al_3Zr 相,有效抑制再结晶,稳定合金微观组织,尤其在高温服役环境下维持性能稳定。这些元素通过协同作用,在铸造过程中完成强化相析出与晶粒细化,无需后续热处理即可实现优异力学性能,其作用机制需精准匹配成型工艺与性能需求。

(二) 微观组织设计目标

免热处理铝合金微观组织设计核心目标是实现“铸造态下的强韧性协同”,通过精准调控组织形貌、相分布与晶粒尺寸,达成无需热处理的强化效果。首先需保证强化相的弥散均匀分布,以 Mg_2Si 为例,需控制其尺寸在50~200nm范围内,呈球形或短棒状分布于铝基体中,避免长条状相导致的应力集中,同时确保单位体积内强化相数量充足,形成有效载荷传递^[2]。其次要实现细化的等轴晶组织,晶粒尺寸控制在50~100 μm 之间,等轴晶结构可减少晶界应力集中,提升合金塑性与铸造流动性,避免柱状晶导致的力学性能各向异性。此外需优化晶界析出相形态,晶界处应形成连续分布的细小第二相,而非粗大网状相,以增强晶界结合力,抑制晶间断裂。同时要控制有害相含量,如Fe元素易形成 Al_3Fe 脆性相,

需通过元素配比与工艺调控将其含量控制在0.3%以下，并使其呈细小颗粒状分布。整体设计需兼顾铸造过程中的组织形成规律，确保在凝固过程中自发形成符合性能要求的微观组织，无需后续热处理调整。

（三）性能平衡设计

免热处理铝合金性能平衡设计需统筹强度、塑性、铸造性与耐蚀性等核心指标，避免单一性能优化导致其他性能劣化。强度与塑性的平衡是核心重点，通过调控强化相含量与晶粒尺寸实现，当 Mg_2Si 强化相含量控制在3%~5%时，可在保证抗拉强度达到300MPa以上的同时，使伸长率维持在8%以上，若需提升塑性可适当降低铜元素添加量，通过细化晶粒弥补强度损失。铸造性与强度的平衡通过硅元素含量调控实现，硅含量提升至7%~10%可显著改善铸造流动性，适应复杂结构成型，但过量会形成粗大硅相降低塑性，因此需配合磷元素细化硅相，实现铸造性与塑性的协调。耐蚀性与强度的平衡需优化铜、镁元素配比，铜元素虽提升强度但降低耐蚀性，可通过添加0.1%~0.3%的锌元素提升耐蚀性，同时控制铜含量不超过2.5%。此外需兼顾疲劳性能与加工性能，通过控制夹杂物含量在0.1%以下，减少疲劳裂纹源，同时保证合金布氏硬度在80~100HB之间，满足后续切削加工需求，最终形成多性能协同的优化设计方案。

三、免热处理铝合金的开发路径

（一）成分优化与实验设计

免热处理铝合金成分优化以“多元素协同强化”为原则，结合正交实验设计与响应面法提升研发效率。首先基于理论分析确定硅、镁、铜等主元素的基础配比范围，再通过正交实验设计12~16组不同成分方案，重点考察元素含量对抗拉强度、伸长率与铸造流动性的影响。实验过程中采用真空感应熔炼炉制备合金试样，每组试样铸造后直接测试力学性能与流动性，通过极差分析确定各元素的影响权重，初步锁定主元素优化区间。针对微量元素的优化采用响应面法，以锰、铬、锆等为变量，以晶粒尺寸与耐蚀性为响应值，构建二次回归模型，精准定位微量元素最佳添加量。为验证成分稳定性，需进行3~5次重复熔炼实验，确保同一成分试样的性能波动误差在5%以内。同时结合实际应用场景调整成分，如汽车结构件用合金需提升抗冲击性能，可适当提高镁元素含量；航空部件用合金需提升高温稳定性，可增加锆元素比例。通过多轮实验迭代与场景适配调整，最终形成最优成分体系。

（二）制备工艺创新

免热处理铝合金制备工艺创新聚焦“凝固过程控制”与“组织均匀性提升”，核心突破在于熔炼、浇注与凝固环节的工艺优化。熔炼阶段采用分段升温工艺，先将铝锭加热至650℃加入硅、镁等易熔元素，升温至720℃加入铜、锰等难熔元素，最后在700℃保温30分钟，配合氩气搅拌与精炼剂添加，将合金中气体含量控制在0.1mL/100g以下，夹杂物尺寸控制在 $5\mu m$ 以下。浇注工艺采用低压铸造方式，控制浇注压力在0.05~0.1MPa，浇注速度为0.5~1m/s，避免浇注过程中产生卷渣与气孔缺陷。凝固阶段创新采用梯度冷却工艺，铸件表面冷却速度控制在10~15℃/s，心部冷却速度控制在3~5℃/s，通过定向凝固技术引导晶粒生长方向，形成均匀等轴晶组织。此外开发半固态成型工艺，将合金加热至固液共存温度区间（580~600℃），通过搅拌使组织形成细小球状晶粒，进一步提升合金塑性与成型性。工艺创新过程中需实时监测熔炼温度、浇注速度与冷却曲线，确保工艺参数稳定性，形成标准化制备流程。

（三）热力学与动力学模拟

热力学与动力学模拟是免热处理铝合金开发的关键辅助手段，通过计算机模拟提前预判成分与工艺对组织性能的影响，减少实验成本。热力学模拟采用Thermo-Calc软件，基于Al-Si-Mg-Cu四元相图，计算不同成分合金的凝固区间、相组成与相比例，预判 Mg_2Si 、 Al_2Cu 等强化相的析出温度与含量，避免成分设计中出现共晶相过量等问题^[3]。动力学模拟采用JMatPro软件，模拟合金凝固过程中的晶粒生长速度、强化相析出动力学曲线，预测不同冷却速度下的晶粒尺寸与强化相分布状态，为凝固工艺参数优化提供依据。针对一体化压铸场景，采用ProCAST软件模拟压铸过程中的温度场、流场分布，预判浇不足、气孔等缺陷产生位置，提前优化浇注系统设计。模拟结果需通过实验验证，将模拟得到的力学性能与实际测试值对比，修正模拟参数，使预测误差控制在10%以内，形成“模拟预测-实验验证-参数修正”的闭环开发模式，大幅提升研发效率。

四、免热处理铝合金在一体化压铸中的适配性研究

（一）压铸工艺参数优化

免热处理铝合金一体化压铸，工艺参数优化围绕“填充完整、组织均匀、性能达标”展开。压射参数优化是关键，采用三级压射：慢压射速度0.1~0.3m/s，确

保金属液平稳填充浇道；快压射速度3~5m/s，快速填充型腔防氧化；压射比压依铸件厚度调整，薄壁件80~100MPa，厚壁件50~70MPa，防模具损伤。温度参数上，合金浇注温度680~720℃，比传统低20~30℃，减少氧化烧损；模具预热温度200~250℃，分区加热使型腔温度均匀，防冷隔。保压参数与凝固匹配，保压压力为压射压力70%~80%，保压时间按每毫米壁厚1~1.5s确定。优化脱模剂喷涂参数，压力0.3~0.5MPa，时间3~5s，防气孔，通过正交实验，使铸件合格率超95%。

（二）缺陷控制与质量评价

免热处理铝合金一体化压铸，缺陷控制聚焦气孔、缩松、冷隔，构建“预防-检测-改进”体系。气孔控制方面，熔炼时真空除气与惰性气体搅拌，使合金含气量低于0.15mL/100g，优化排气系统，在型腔最高处与死角设宽2~3mm、深0.1~0.2mm的排气槽。缩松控制采用顺序凝固工艺，设冒口与冷却水道，使铸件从远离浇口处向浇口依次凝固，提升保压压力与时间，填补体积收缩。冷隔控制通过提高快压射速度与模具预热温度，使金属液快速流动融合。质量评价结合无损检测与力学性能测试，超声波检测覆盖全区域，内部缺陷小于0.5mm；每批抽3件拉伸测试，抗拉强度 ≥ 280 MPa、伸长率 $\geq 6\%$ ，盐雾试验耐蚀性达500小时无红锈。

五、未来发展方向

（一）材料性能进一步提升

免热处理铝合金性能提升将朝着“超高强高韧”与“功能化集成”突破。强度提升上，引入铈、钇等稀土元素，形成细小弥散强化相，配合传统 Mg_2Si 相复合强化，目标抗拉强度超400MPa，利用晶粒超细化技术（晶粒尺寸 $\leq 30\mu m$ ）使伸长率超10%。高温性能方面，开发含钛、铌元素的合金体系，形成高温稳定金属间化合物，让合金在200℃环境下强度保留率超85%，满足航空航天需求。功能化上，融合导电、导热与阻尼等功能，调控成分使导电率超35%IACS，适配新能源汽车导电结构件。同时开发耐极端环境合金，优化铬、钼元素含量，提升耐蚀性，盐雾试验无红锈时间达1000小时以上，拓展海洋工程应用。

（二）数字化与智能化制造

免热处理铝合金制造将全面数字化与智能化，以提升效率与质量。研发阶段，构建合金成分-工艺-性能数据库，整合数据并采用机器学习算法建立预测模型，实现成分与工艺参数智能匹配，缩短研发周期超50%。生产阶段，搭建智能生产线，集成物联网设备实时采集熔炼温度等关键参数，频率达100Hz，通过边缘计算实时调控，将工艺参数波动误差控制在 $\pm 2\%$ 以内^[4]。质量检测阶段，应用机器视觉与人工智能检测技术，用高清相机等采集图像，用深度学习算法自动识别缺陷，准确率超99%，效率提升3倍。另外，引入数字孪生技术，构建虚拟生产系统，模拟压铸过程，提前预判问题，实现虚拟调试与优化，推动向“预测性生产”转型。

结束语

免热处理铝合金凭借独特优势，在一体化压铸中展现出巨大应用潜力。通过对其核心优势、材料设计原理、开发路径及适配性的研究，为材料性能提升和工艺优化提供了方向。未来，随着材料性能进一步提升，以及数字化与智能化制造的深度融合，免热处理铝合金将在汽车、航空航天等领域发挥更重要作用，推动制造业向高效、绿色、智能方向持续发展。

参考文献

- [1] 宋畅, 王浩斌, 张秀云, 等. 面向CFRP/铝合金叠层材料制孔刀具的涂层性能研究[J]. 工具技术, 2025, 59(8): 63-68.
- [2] 许玉婷, 李玉泽, 王建元. 选区激光熔化铝合金及其复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(15): 37-49.
- [3] 湛顺心, 徐任信. 铝合金表面活化及其与CF/PEEK复合材料电阻焊性能[J]. 航空材料学报, 2025, 45(3): 75-84.
- [4] 张斌, 曹琦. 新能源车用多层铝合金复合材料开发及其性能研究[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(10): 38-44.