

超声波-电磁复合物理场对 M174 耐热铝合金熔体脱气行为的作用及机制

边羿宁, 李军文

(大连交通大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116028)

摘要: 系统探讨了超声波场、电磁场及其序贯复合物理场对M174耐热铝合金熔体除气行为与凝固组织的影响规律。试验结果表明, 超声波功率与电磁频率等关键参数对熔体除气效率及后续铸锭力学性能具有决定性作用, 在优化工艺参数条件下(超声波功率1 500 W, 电磁频率90 kHz, 采用超声波-电磁序贯施加方式)可获得最佳综合效果: 铸锭密度指数降至0.094 3, 氢含量显著降低至10.23 mL/100 g, 同时抗拉强度提升至261 MPa, 较未处理样品性能提升显著, 该结果充分证实超声波-电磁复合场能通过空化效应与电磁搅拌的协同作用有效促进气体及夹杂物的去除, 从而大幅提升熔体纯净度与最终制品质量, 本研究为高性能铝合金熔体净化工艺的优化提供了坚实的理论依据与试验支撑。

关键词: 铝合金; 超声波; 电磁场; 除气

中图分类号: TG146.2⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 02-0159-09

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0023

作者简介:

边羿宁(2001-), 男, 硕士生, 研究方向为基于多物理场净化耐热铝合金。电话: 15941629791, E-mail: bayananb@163.com

通信作者:

李军文, 男, 教授, 博士生导师。电话: 18841104160, E-mail: Joelee0527@163.com

基金项目:

国家自然科学基金(No. U2241232)。

收稿日期:

2025-03-31 收到初稿,
2025-05-08 收到修订稿。

引用格式:

边羿宁, 李军文. 超声波-电磁复合物理场对 M174 耐热铝合金熔体脱气行为的作用及机制 [J]. 铸造, 2026, 75(2): 159-167. BIAN Yining, LI Junwen. Effect of ultrasonic wave-electromagnetic composite physical field on the degassing behavior of M174 heat-resistant aluminum alloy melt and its mechanism [J]. Foundry, 2026, 75(2): 159-167.

在现代工业制造中, 铝合金因其优异的性能被广泛应用于航空航天、汽车、轨道交通等高端装备制造领域。其中, M174耐热铝合金作为一种具有良好力学性能和热稳定性的材料, 正逐步在高温环境下的关键部件中发挥重要作用。然而, 在铝合金熔炼与铸造成形过程中, 氢气等气体极易溶解于液态金属中, 形成气孔缺陷, 严重影响铸锭组织的致密性与力学性能^[1]。因此, 提升铝合金熔体的除气效率, 是保障其最终产品质量的关键技术环节。

传统的除气方法如氩气吹炼^[2]、化学试剂除气^[3]等, 在一定程度上可以减少熔体中的气体含量, 但仍存在除气效率有限、设备能耗高、生成有毒气体等问题。近年来, 物理场辅助除气技术因其绿色高效的优点而受到广泛关注, 尤其是超声波与电磁场的应用, 展现出良好的除气潜力。超声波通过空化效应促进气泡生成、合并与上浮, 从而加速气体逸出^[4]; 而电磁场则能引起熔体内部的电磁搅拌作用, 增强气泡的运动与扩散效率^[5]。

本研究以M174耐热铝合金为研究对象, 系统开展了超声波场、电磁场及其复合物理场对熔体除气行为的影响试验, 分析了超声波功率、电磁频率等关键参数对除气效果的作用规律, 旨在为高性能铝合金材料的制备提供理论依据与技术支持。

1 试验过程

本试验首先采用高纯铝与预制母合金配制200 g M174铝合金(Al-12Si-4Cu-2Ni-0.9Mg-0.7Fe-0.3Mn)。试验所得合金中各元素通过电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)实测, 所得的实际成分分别为: 79.99%Al、12.11%Si、3.98%Cu、2.02%Ni、0.86%Mg、0.73%Fe、0.31%Mn, 合金中元素的检测结果符合合金标准比重。

将预先按成分设计要求配制好的M174铝合金原料装入定制的石墨-粘土复合坩埚(上沿内径为60 mm, 下底内径为40 mm, 内部高度为90 mm), 内壁预涂氮化硼涂层以防铝液渗蚀; 随后将坩埚置于SG-2型低频感应电阻炉(额定功率15 kW,

工作频率50 Hz, 控温精度 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$)的均温区内, 在动态氩气保护气氛(流量5 L/min, 纯度99.99%)下进行熔炼; 熔炼过程采用程序控温, 以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 $(750 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保温30 min, 期间通过机械搅拌(转速200 r/min, 每10 min搅拌2 min)确保合金元素充分扩散与成分均匀。为防止在外场处理过程中铝液过早凝固, 熔炼温度设定为液相线温度(T_L)上升 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 即 $777\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在合金完全熔化后, 保持恒温30 min以确保成分均匀。

外场处理前, 首先使用石墨棒搅拌熔体, 使其成分均匀, 通过铸铁勺清除熔体表面的浮渣。随后进行超声波处理(UST), 将图1所示的超声波探头垂直插入铝液中心位置(超声波探头采用高纯度钛制造, 其工作端表面预先涂覆水玻璃-碳粉复合防护涂层, 涂覆后于室温环境下静置48 h完成初步固化风干, 随后转移至鼓风干燥箱内以 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温热处理10 min, 通过该工艺使涂层充分脱水并形成致密稳定的保护层, 从而确保探头在高温熔体环境中能够有效抵抗铝液的热腐蚀与润湿侵蚀), 插入深度约为5 mm。超声波处理持续一定时间后, 接着施加电磁搅拌处理。为系统研究外场施加顺序这一关键工艺因素对铸锭综合质量的影响规律, 本试验在已有超声波-电磁搅拌序贯处理方案的基础上, 增设了一组施加顺序相反的对比试验组, 即采用先电磁搅拌后超声波处理的工艺路径, 旨在通过控制单一变量(仅改变场序)来揭示外场协同作用中

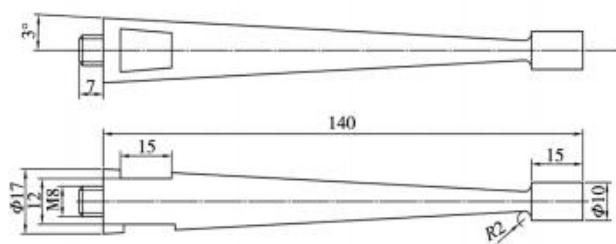


图1 超声波探头的尺寸

Fig. 1 The size of the ultrasound probe

表1 试验条件与参数

Tab. 1 Experimental conditions and parameters

变量参数	数值
超声波功率/W	500, 1 000, 1 500
超声波频率/kHz	20
电磁频率/kHz	30, 60, 90
电流强度/A	60
超声波处理时间/s	20
电磁处理时间/s	20

时序效应的影响机制。各阶段处理的具体参数见表1。

将外场处理后的熔体分别浇注至两个相同型号的钛坩埚(A, B)中, 钛坩埚的上沿内径为30 mm, 下底内径为15 mm, 内部高度为25 mm, 其中A坩埚中的熔体在常温常压条件下自然凝固, 冷却时间统一为20 min, B坩埚中的熔体在完成外场处理后立即转移至减压凝固测试(RPT)装置中, 通过快速抽真空使密闭腔体在3 s内压力降至 0.1 kPa (绝对压力), 并在该低压环境下保持3 min, 促使熔体内溶解的气体因过饱和而析出、聚集并上浮至液面区域; 保压结束后解除真空状态, 取出已完全凝固的铸锭试样, 在室温空气中冷却17 min至与环境温度平衡, 该减压测试过程旨在通过可控低压环境诱导气体析出行为, 为后续计算密度指数(反映含气量)和观察宏观孔隙形貌提供标准化预处理样本。最终获得单个样品的质量约50 g。为确保试验数据的可靠性与重现性, 上述每组试验条件均独立重复进行三次, 并采用相同的工艺参数与检测标准; 将所有重复试验获得的原始数据进行统计分析, 计算其算术平均值作为最终报告值, 并以标准偏差作为数据离散度的量化指标, 最终在相应图表中以误差棒的形式直观呈现该标准偏差值, 其长度代表数据点的波动范围, 以此客观评估试验结果的精密度并减小随机误差的影响。

待铸锭完全凝固后, 采用密度天平按照阿基米德原理分别测量A、B两组铸锭的密度。在获得实际密度值的基础上, 进一步计算铸锭的密度指数, 其计算公式如下所示^[6]:

$$D_i = \frac{D_a - D_v}{D_a} \times 100\% \quad (1)$$

式中: D_i 表示铸锭的密度指数; D_a 表示在常温常压条件下凝固的铸锭的密度; D_v 指在RPT条件下凝固的铸锭的密度。

可见, 铸锭的含气量越大, A, B两铸锭的密度差值越大, 密度指数越大, 反之铸锭含气量越小, 密度指数值越小。

为对熔体除氢效果进行定量评估并交叉验证孔隙率分析结果的可靠性, 本研究进一步采用LECO RHEN602氢分析仪(测量精度 $\pm 0.01\text{ mL}/100\text{ g}$)对铸锭试样中的氢含量进行精确测定, 该设备通过惰性气体熔融-热导检测原理, 能够准确量化单位质量金属中溶解氢的体积浓度, 从而为不同外场处理工艺的除气效率提供直接的数据支撑。氢含量检测过程严格遵循ASTM E2792标准, 首先使用硬质合金冲头从铸锭指

定位置（距底部1/3高度处）钻取直径6 mm、质量约5 g的屑状样品（每组试验选取三个样本进行取样并测量），取样过程控制钻速低于300 r/min，并采用氩气保护防止样品氧化；取得的样品立即置于无水乙醇中进行超声波清洗5 min以去除表面吸附的污染物，经真空干燥后精确称重（精度0.000 1 g）并投入氢分析仪的脱气坩埚内，在超高纯度氦载气（流量450 mL/min）环境下通过高频感应炉将样品快速加热至1 500 ℃使其完全熔融，熔体中析出的氢随载气进入经钽膜纯化的热导检测器，通过测量热导率变化并对比标准曲线（使用NIST氢标准钢样校准）计算出单位质量样品中的氢含量（结果以mL/100 g表示），每个试样重复测定三次取算术平均值。

分别对A、B两组铸锭进行制样与孔隙形貌表征：A铸锭经电火花线切割获取代表性试样（边长为10 mm的立方体），依次使用400[#]至5 000[#]碳化硅砂纸逐级研磨，随后采用金刚石抛光膏（粒径至1 μm）进行镜面抛光，获得无损划痕的观测表面；利用三维光学显微镜（50倍物镜，NA=0.55）对抛光截面进行三维形貌表征，通过Z轴层叠成像（步距0.5 μm）获取包含高度信息的景深数据，原始图像经Wiener滤波与景深融合算法处理以增强轮廓清晰度。B铸锭则沿其浇注方向纵向对称剖开，剖切面经相同工艺研磨抛光后，直接采用高分辨率相机进行大面积拍摄（孔隙与基体的迈克尔逊对比度为0.7），以获取全截面尺度的宏观孔隙分布形貌。两组样品的观测结果共同构成了从微观三维形貌到宏观二维分布的多尺度孔隙分析数据集。

在获取铸锭截面的宏观及微观孔隙形貌图像后，采用数字图像处理技术对孔隙特征进行系统化分析：首先通过Image-Pro Plus软件对图像进行灰度校正、阈值分割和二值化处理以精确识别孔隙区域，随

后定量提取孔隙面积百分比参数，从而将定性形貌描述转化为可量化比较的统计学指标，为评估不同工艺条件下熔体除气效果与凝固缺陷控制水平提供客观数据支撑。

为系统评估不同外场处理工艺对材料综合性能的影响，本试验依据ASTM E8/E8M标准制备并测试了各组铸锭的室温力学性能，通过电子万能试验机准确测定了抗拉强度及断后伸长率，该系列测试数据不仅为超声波-电磁复合场处理的优化效果提供了定量对比依据，而且通过建立工艺参数-显微组织-力学性能之间的关联规律，为高性能铝合金铸锭的工业化生产提供了关键性工程选材与工艺设计参考。在力学性能测试结束后，选取典型断裂试样并利用场发射扫描电子显微镜（FE-SEM，型号ZEISS Sigma 500）对其断口形貌进行高分辨率观测，以此建立断口微观特征与宏观力学性能之间的构效关系，并深入分析不同外场处理工艺通过改变孔隙率、夹杂物分布等因素对材料断裂行为的影响机制。

2 试验结果及分析

2.1 不同超声波功率对除气的影响

此部分旨在研究超声波功率对铸锭密度指数的影响，该阶段仅施加超声波处理。由图2（a）可见，随着超声波功率的逐步提高，铸锭的密度指数呈现出明显的下降趋势。在未施加任何外场处理的情况下，密度指数达到最大值0.360 1，表明铸锭中气体含量最高。当施加500 W超声波功率时，密度指数略下降至0.311 2。随后，随着超声波功率从500 W增加至1 000 W，密度指数持续降低，达到0.246 9。进一步将超声波功率提升至1 500 W时，密度指数显著下降至

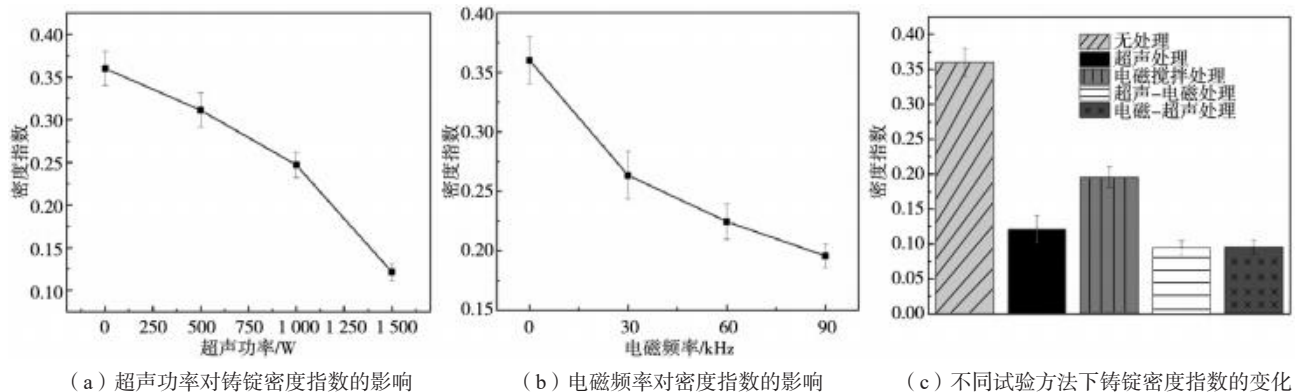


图2 不同处理条件下铸锭密度指数的变化

Fig. 2 The variation of ingot density index under different processing conditions

0.121 4, 表明此时除气效果最为显著, 达到了最佳状态。

采用氢分析仪对经不同超声波功率处理的铸锭样品进行测定, 结果显示熔体氢含量随超声波功率的提升呈现单调下降规律: 当未进行超声波处理时, 氢含量为14.26 mL/100 g; 功率增至500 W时, 氢含量降至13.92 mL/100 g; 功率进一步提升至1 000 W时, 氢含量进一步降低至13.67 mL/100 g; 而当功率达到1 500 W时, 氢含量显著下降至12.54 mL/100 g, 较未处理样品降幅达12.1%, 该数据序列明确证实超声波空化效

应能有效促进氢原子脱溶, 且除气效率与输入功率呈正相关。

图3展示了在不同超声波处理条件下所得铸锭截面的孔隙形貌变化规律。由图可观察到, 随着超声波功率的逐步提升, 铸锭截面中的孔隙数量明显减少, 孔隙尺寸也逐渐减小, 孔隙分布趋于均匀化, 表面孔隙面积百分比从3.261%下降至0.2%, 孔隙面积下降的效果十分显著。当超声波功率达到1 500 W时, 样品截面的孔隙数量与尺寸均降至最低, 孔隙分布最为稀疏,

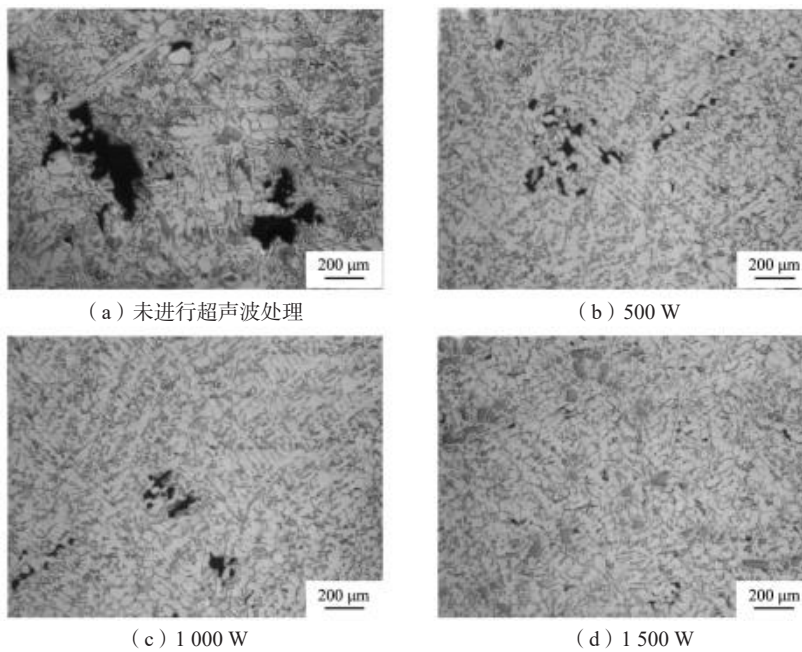


图3 不同超声波功率下铸锭截面的孔隙形貌

Fig. 3 The pore morphologies of the ingot cross-sections under different ultrasonic powers

说明超声波处理在该功率下显著促进了熔体中的气体逸出, 除气效果最为理想。该结果进一步验证了高功率超声波所产生的强烈空化作用及声流扰动对提高铝合金熔体纯净度的积极作用。

当超声波在液态金属中传播时, 会在介质内部形成如图4所示的高频正负压交替变化的声压场。在负压作用下, 液体局部区域受到拉伸应力影响而发生撕裂, 形成微小的空穴或空化气泡。受周期性声压作用, 这些气泡经历“膨胀-收缩-再膨胀”的动态演化过程, 并在随后的高压周期中发生剧烈塌陷, 释放出局部瞬时高温和高压, 伴随形成强烈的微射流和冲击波。该空化过程显著增强了熔体中的物理扰动, 有助于促使溶解态氢以氢分子形式析出并聚集成微小气泡, 进而上浮逸出, 从而有效提高除气效率^[7]。

当超声波作用于铝合金熔体时, 其除气效率与声压大小密切相关。声压越高, 所引发的空化效应越强

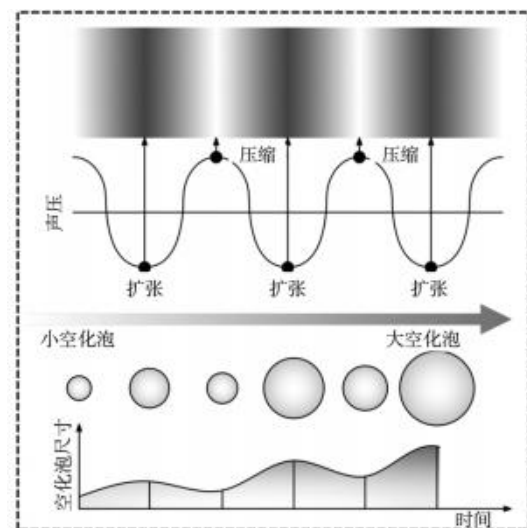


图4 空化泡随正负交替声压的变化

Fig. 4 The variation of cavitation bubbles with the alternating positive and negative sound pressure

烈,从而更有效地促进溶解气体的析出与逸出,提升除气效果。而超声波功率作为关键参数之一,对熔体内部的声压值具有直接影响,其关系可通过下列公式表示^[8]:

$$P_k = \sqrt{\frac{2P \cdot \rho_L \cdot c_L}{S}} \quad (2)$$

式中: P_k 表示铝合金熔体内的声压值; P 为超声波功率,在本试验中的值为0、500、1 000、1 500 W; ρ_L 指熔体的密度,在本试验中的值为 $4.17 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; c_L 表示声波在熔体中的传播速度,在本试验中的值为 $4.31 \times 10^3 \text{ m/s}$; S 指超声波场与熔体的有效接触面积(本试验中即为超声波探头底面的面积,值为 $3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$)^[9]。

由上述关系可知,超声波功率的增加将导致声压值相应提高。随着声压的增强,液态金属中空化作用愈加剧烈,微气泡的生成、膨胀、聚并及崩解过程更为活跃,显著促进了溶解气体的析出与迁移,从而加速除气过程。此外,更高的声压还可增强声流效应与微射流冲击,进一步提高气泡上浮速率与除气效率。因此,在一定范围内,提升超声波功率有助于改善熔体内部的动力学环境,显著增强除气效果。

2.2 不同电磁频率对除气的影响

本试验在施加电磁搅拌的条件下,研究了在电流强度保持不变的情况下,不同电磁频率对M174耐热铝合金熔体除气性能的影响。如图2(b)所示,未经过处理的铸锭密度指数为0.360 1。施加电磁频率为30 kHz时,密度指数显著下降至0.263 3,表明除气效果得到明显改善。随着电磁频率进一步增加至60 kHz,密度指数继续下降至0.224 5,但下降幅度相对减缓。当电磁频率升至90 kHz时,密度指数进一步降至最低值0.195 6,说明在该频率下除气效果最为显著,表明较高电磁频率有助于提升熔体的净化效率。

氢分析结果表明,随着电磁场频率从0(未处理)逐步增加至30 kHz、60 kHz和90 kHz,对应铸锭中的氢含量呈现持续下降趋势,测定值分别为14.26 mL/100 g、13.22 mL/100 g、12.86 mL/100 g和12.67 mL/100 g,最高频率处理条件下氢含量较未处理样品降低了11.2%,这一规律证实提高电磁频率可通过增强熔体内部微湍流与表面更新效应,有效促进溶解氢的析出与逸出。

图5展示了在不同电磁搅拌频率条件下铸锭截面孔隙形貌的变化情况(三维光学显微镜下拍摄),图(a2-d2)、(a3-d3)分别在平面和立体的角度显示了图(a1-d1)的景深情况。由图可见,随着电磁频率的

增加,铸锭截面中的孔隙数量逐渐减少,孔隙尺寸也相应减小,整体分布趋于均匀。当电磁频率达到90 kHz时,孔隙数量与尺寸均降至最低水平,孔隙分布最为稀少,表明此时除气效果最为显著。该结果说明,较高频率的电磁场能够增强熔体内部的电磁搅拌强度,促进气泡上浮与逸出,从而有效提升铝合金熔体的净化效率,为优化电磁除气工艺参数提供了有力依据。

电磁场对熔体的搅拌作用在促进气泡迁移和逸出方面发挥着重要作用,而电磁频率则是决定搅拌效果的关键参数之一。在电磁频率为30 kHz和60 kHz(中低频)时,电磁力的穿透深度较大,能够在更广泛的熔体范围内形成流动,有助于将内部微小气泡和夹杂物带至液面,从而实现一定程度的净化。然而,此频率下的搅拌强度相对较弱,难以对气泡产生足够扰动,限制了其进一步合并和逸出。当电磁频率提升至90 kHz(高频)时,电磁力主要集中于熔体的表层区域,尽管作用深度有所降低,但搅拌强度显著增强,能够有效破坏微小气泡的稳定性,促进其合并长大并快速上浮,从而显著提高除气效率^[6]。此外,电磁场频率的调整会显著改变磁场在熔体中的穿透行为,其影响规律由趋肤效应主导^[6]:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (3)$$

式中: δ 表示电磁场对熔体的穿透程度; μ 为磁导率,取 $1.257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$; σ 为电导率,取 $4 \times 10^6 \text{ S/m}$; f 为电磁频率,本试验中为30、60、90 kHz。

如表2所示,当频率从低频(如30 Hz)向中高频(如90 Hz)提升时,穿透深度急剧减小,导致电磁力更集中于熔体表层;这种分布变化虽削弱了对心部区域的搅拌强度,却能在熔体表面附近产生更高的剪切速率与能量密度,不仅强化了表面更新与气泡脱附过程,还有效抑制了顶部氧化膜的再生,从而提供了更洁净的界面^[10-11]。该现象表明,适当提高电磁频率有助于优化熔体流动状态,从而提升除气效果。

表2 电磁频率对电磁场穿透程度的影响
Tab. 2 Influence of electromagnetic frequencies on the penetration degrees of electromagnetic fields

电磁频率/kHz	穿透程度
30	0.045
60	0.032
90	0.026

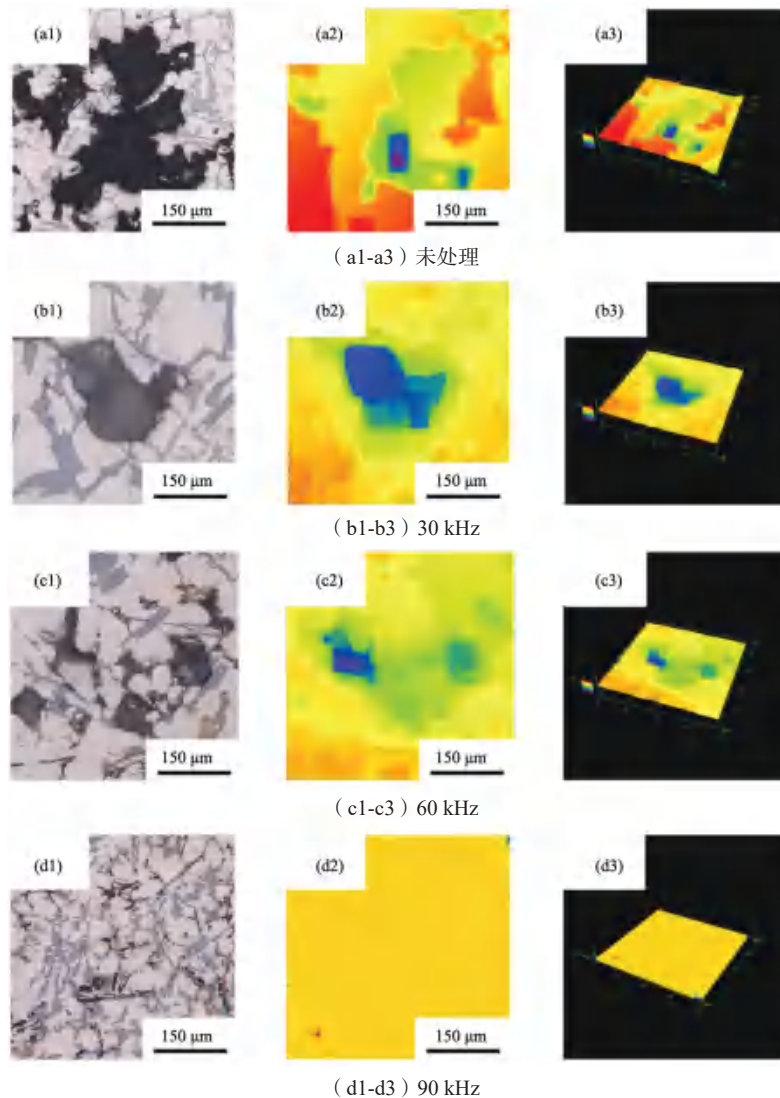


图5 不同电磁频率下铸锭截面的孔隙形貌

Fig. 5 The pore morphologies of the ingot cross-sections under different electromagnetic frequencies

2.3 超声波-电磁复合场的除气效率

本实验分别采用“先超声波后电磁”、“先电磁后超声波”的顺序对铝合金熔体进行外场处理，分别取单场的最佳参数进行处理。如图2(c)所示，不施加任何处理的铸锭密度指数最高(0.360 1)，经过超声波场或电磁场处理的铸锭相较于前者均有降低，但超声波场对熔体的除气效果要明显优于电磁场的处理效果。当二者复合时，取得了有效成果，先超声波后电磁铸锭的密度指数达到了最低值0.094 3，而先电磁后超声波的铸锭密度指数略低于前者，但二者的密度指数非常接近。

氢分析结果显示，无外场处理的对照组铸锭氢含量为14.26 mL/100 g，经1 500 W超声波单场处理后降至12.54 mL/100 g，而经90 kHz电磁单场处理后的氢含量

为12.67 mL/100 g；当采用超声波-电磁序贯复合场处理时，氢含量显著降低至10.23 mL/100 g，而电磁-超声波反向序贯处理亦使氢含量降至10.46 mL/100 g，该数据明确证实复合场处理较单场具有协同增效作用，且超声波优先的场序在除气效率方面略占优势。

图6展示了在不同处理方式下，经RPT处理后的M174铸锭截面宏观孔隙形貌对比情况。由图可观察到，未处理样品中孔隙分布广泛，数量较多；单一物理场处理（如超声波或电磁搅拌）后，孔隙数量和尺寸均有所减少，表明一定程度的除气效果。而在超声波与电磁场复合处理条件下，铸锭截面中的宏观孔隙明显减少，孔隙分布最为稀疏且尺寸最小。该结果进一步验证了复合外场在熔体净化过程中的协同增强作用。

如图7所示，相较于单一物理场作用，超声波与

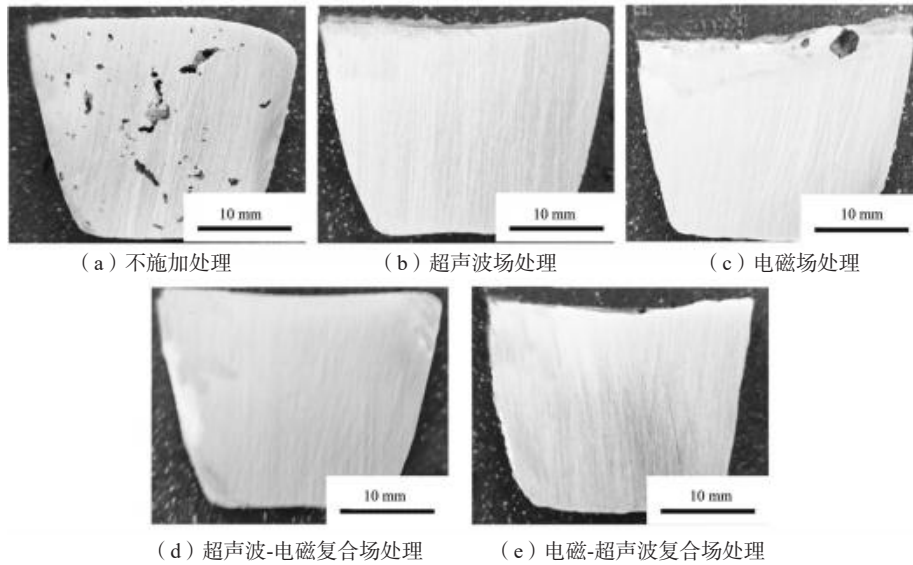


图6 不同处理方式下铸锭截面的宏观孔隙形貌

Fig. 6 Macroscopic pore morphologies of the ingot cross-sections under different treatment methods

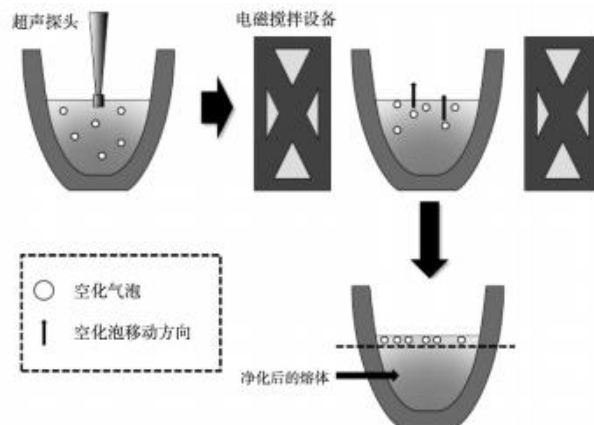


图7 超声波-电磁复合场的除气机理

Fig. 7 The degassing mechanism of the ultrasonic-electromagnetic composite field

电磁场的复合处理在铝合金熔体除气过程中展现出显著的协同增效作用。在超声波-电磁的组合场下，超声波场在熔体中诱发强烈的空化效应，产生大量空化气泡，有效促进溶解气体的析出；同时，电磁场通过感应搅拌作用增强熔体内部流动，有助于将悬浮于熔体中的气泡和夹杂物团聚并迁移至液面，从而加速其逸出。二者联合作用显著提升了除气效率，使熔体纯净度得到明显改善。而在电磁-超声波组合场下，熔体首先在电磁搅拌作用下形成宏观对流，初步打破溶质边界层并促使微小气泡预团聚；随后施加的超声波场则进一步对预团聚的气泡群施加空化溃灭与微射流作用，不仅细化气泡尺寸、增加气-液反应界面，更通过声流效应强化气泡间的碰撞聚合概率，从而在更短时间内实现气体的高效脱除，这一时序依赖性协同机制表明，外场施加顺序是优化除气工艺的关键因素。

2.4 力学性能的改变

本试验系统探究了不同外场处理工艺对铸锭室温拉伸性能的影响规律，其结果如图8所示，未施加任何处理的对照组试样抗拉强度为227 MPa，经1 500 W超声波单场处理后强度提升至238 MPa，而经90 kHz电磁单场处理后强度为235 MPa；当采用超声波-电磁序贯复合场处理时，抗拉强度显著提高至261 MPa，电磁-超声波反向序贯处理亦达到260 MPa，该数据序列充分证实复合场处理通过多物理场耦合效应可更有效地改善铸锭力学性能，且场序对强度提升效果影响较小。

图9展示了不同外场处理条件下拉伸断口的SEM形貌特征，由于熔体中固有的氧化物、碳化物等非金属夹杂物具有绝缘特性，在电子束照射下因电荷积累效应呈现亮白色衬度；如图9 (a-c) 所示，未处理组及超

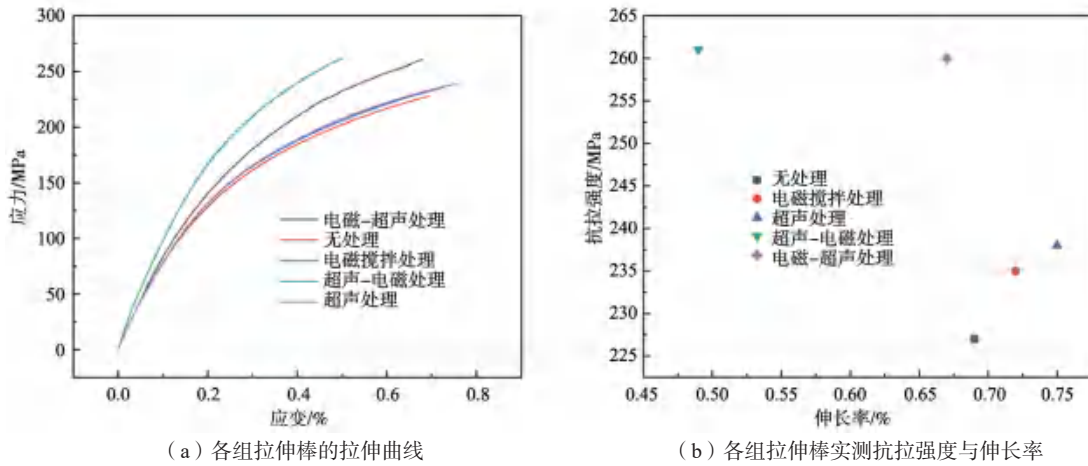


图8 不同试验方法下样品的力学性能

Fig. 8 Mechanical properties of samples under different experimental methods

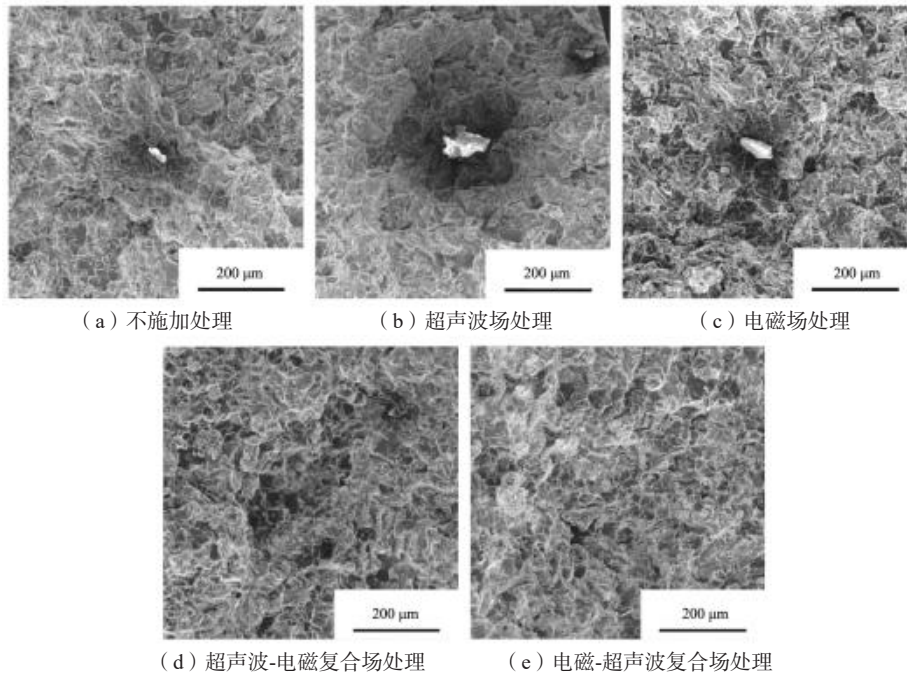


图9 不同试验方法下拉伸断口的SEM图像

Fig. 9 SEM images of tensile fractures under different experimental methods

声波/电磁单场处理组的断口表面均存在大量分布密集的亮白色斑点,表明这些条件下熔体净化效果有限,未能有效去除作为裂纹源的夹杂物;与之形成鲜明对比的是,图9(d,e)中经超声波-电磁复合场处理的断口表面显著洁净,亮白色夹杂物颗粒数量急剧减少且尺寸细化,证明复合场产生的空化微射流与电磁搅拌协同作用能有效促进气泡-夹杂物复合体的上浮逸出,从而大幅提升熔体纯净度并改善材料力学性能。

3 总结与展望

(1) 随着超声波功率的增加, M174铝合金铸锭

的密度指数持续降低,说明除气效果逐步增强。当超声波功率达到1 500 W时,密度指数降至最低值0.121 4,表明此功率下除气效率最优。

(2) 在电流强度恒定的条件下,电磁搅拌频率的提高有效促进了气体逸出,密度指数呈下降趋势。当频率为90 kHz时,密度指数最低(0.195 6),表明高频电磁搅拌更有利于熔体净化。

(3) 当超声波功率设定为1 500 W、电磁频率为90 kHz时,联合处理下铸锭密度指数达到最低值0.094 3,显著优于单一物理场处理,验证了超声波与电磁场在除气方面的协同增强效应。

参考文献:

- [1] ZHOU W, LI J W, BIAN Y N, et al. The impact of frequency and power on the ultrasonic purification of aluminum alloy [J]. *Ultrason. Sonochem.*, 2024, 109: 107006.
- [2] LIU X, ZHANG Z Q, HU W Y, et al. Study on hydrogen removal of AZ91 alloys using ultrasonic argon degassing process [J]. *Ultrason. Sonochem.*, 2015, 26: 73–80.
- [3] HE Q, ZHANG G Z, ZHANG S, et al. Microstructural characterization of recycled Al-Mg-Si-based alloys upon the synergistic effect of ultrasonic technology (UT) and novel refiners [J]. *J. Mater. Res. Technol.*, 2024, 31: 481–495.
- [4] XU H B, MEEK T T, HAN Q Y. Effects of ultrasonic field and vacuum on degassing of molten aluminum alloy [J]. *Mater. Lett.*, 2007, 61: 1246–1250.
- [5] REN Y S, CHEN H, MA W H, et al. Purification of aluminium-silicon alloy by electromagnetic directional solidification: degassing and grain refinement [J]. *Sep. Purif. Technol.*, 2021, 277: 119459.
- [6] ZHOU W, LI J W, JIANG J F, et al. Effect of electromagnetic stirring on degassing and mechanical properties of M174 heat-resistant alloy [J]. *J. Mater. Res. Technol.*, 2024, 29: 3824–3831.
- [7] ESKIN G I. Cavitation mechanism of ultrasonic melt degassing [J]. *Ultrason. Sonochem.*, 1995, 2 (2): S137–S141.
- [8] JIA Z, YU B, LAN Q, et al. Effect of ultrasonic field treatment on degassing of 2024 alloy [J]. *China Foundry*, 2021, 18: 124–130.
- [9] BIAN Y N, LI J W, ZHOU W, et al. Understanding the mechanisms of degassing in heat-resistant Al-Si alloy: the synergistic effect of Si content and ultrasound [J]. *J. Mater. Res. Technol.*, 2025, 37: 4582–4594.
- [10] SHI Z H, ZHANG Y G, ZHANG G W, et al. Effect of electromagnetic stirring current on the microstructure, mechanical and tribological properties of copper/steel bimetal [J]. *Mater. Today Commun.*, 2025, 47: 113126.
- [11] FEI P, MIN Y, LIU C J, et al. Effect of continuous casting speed on mold surface flow and the related near-surface distribution of non-metallic inclusions [J]. *Int. J. Miner., Metall. Mater.*, 2019, 26: 186–193.

Effect of Ultrasonic Wave-Electromagnetic Composite Physical Field on the Degassing Behavior of M174 Heat-Resistant Aluminum Alloy Melt and Its Mechanism

BIAN Yi-ning, LI Jun-wen

(School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China)

Abstract:

The influence laws of ultrasonic field, electromagnetic field and their sequential composite physical field on the degassing behaviors and solidification microstructure of M174 heat-resistant aluminum alloy melt have been systematically investigated. The experimental results show that key parameters such as ultrasonic power and electromagnetic frequency play a decisive role in the degassing efficiency of the melt and the mechanical properties of the subsequent ingot. Under the conditions of optimized process parameters (ultrasonic power of 1 500 W, electromagnetic frequency of 90 kHz, and sequential application of ultrasonic wave and electromagnetic fields), the best comprehensive effect can be achieved: the density index of the ingot is reduced to 0.094 3, the hydrogen content is significantly reduced to 10.23 mL/100 g, and the tensile strength is increased to 261 MPa, which is significantly improved compared to the untreated sample. This result fully confirms that the ultrasonic wave-electromagnetic composite field can effectively promote the removal of gases and inclusions through the synergistic effect of cavitation and electromagnetic stirring, thereby significantly improving the purity of the melt and the quality of the final product. This study provides a solid theoretical basis and experimental support for the optimization of the purification process of high-performance aluminum alloy melts.

Key words:

aluminum alloy; ultrasonic wave; electromagnetic field; degassing