

超声-电磁复合物理场对 M174 耐热铝合金熔体脱气行为及其作用机制的研究

边羿宁¹, 李军文¹

(1 大连交通大学, 辽宁大连, 116028)

*通讯作者: 李军文, 男, 教授, 工学博士。E-mail: joelee0527@163.com

摘要: 本研究探讨了超声场、电磁场及其复合物理场对 M174 耐热铝合金熔体除气效果的影响。实验结果表明, 超声功率和电磁频率等工艺参数对除气效率具有显著作用。在优化参数条件下(超声功率为 1500W, 电磁频率为 90kHz), 铸锭的密度指数降低至最低值 0.0943, 显示出良好的除气效果。结果表明, 超声-电磁复合物理场在提高 M174 铝合金熔体纯净度方面具有显著优势, 为相关铝合金净化技术的发展提供了理论依据和实验参考。

关键词: 铝合金; 超声波; 电磁场; 除气。

Study on the Degassing Behavior and Mechanism of M174 Heat-Resistant Aluminum Alloy Melt by Ultrasonic-Electromagnetic Composite Physical Field

BIAN Yi-ning¹, LI Jun-wen¹

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

Abstract: This study investigates the effects of ultrasonic fields, electromagnetic fields, and their combined application on the degassing efficiency of M174 heat-resistant aluminum alloy melt. Experimental results indicate that process parameters such as ultrasonic power and electromagnetic frequency have a significant impact on degassing performance. Under optimized conditions (ultrasonic power of 1500W and electromagnetic frequency of 90kHz), the ingot achieved a minimum density index of 0.0943, demonstrating excellent degassing efficiency. These findings confirm that the combined ultrasonic-electromagnetic field offers notable advantages in enhancing the melt purity of M174 aluminum alloy and provide theoretical and experimental support for the development of related purification technologies.

Keywords: Aluminum alloy; Ultrasonic waves; Electromagnetic field; Degassing.

1 前言

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, 在铝合金冶炼与铸造成型过程中, 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]。

本文以 M174 耐热铝合金为研究对象, 系统开展了超声场、电磁场及其复合物理场对熔体除气行为的影响实验, 分析了超声功率、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。

2 试验过程

本实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)。实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: Al: 79.99%, Si: 12.11%, Cu: 3.98%, Ni: 2.02%, Mg: 0.86%, Fe: 0.73%, Mn: 0.31%, 合金中元素的检测结果符合合金标准比重。

将配制好的 M174 铝合金置于型号为 SG-2 的低频电阻炉中进行熔炼。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°C, 即 777°C。在合金完全熔化后, 保持恒温 30 分钟以确保成分均匀。

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。随后进行超声处理 (UST), 超声波探头垂直插入铝液中心位置, 插入深度约为 5 mm。超声处理持续一定时间后, 接着施加电磁搅拌处理。各阶段处理的具体参数见表 2.1。

过后分别浇注至两个相同型号的钛坩埚 (A, B) 中, 其中 A 坩埚中的熔体在常温常压条件下自然凝固, B 坩埚中的熔体则在低压环境下进行减压测试 (RPT), 该举措目的是将熔体中的气体团聚至液面处, 用于计算密度指数, 且便于后续观察。

表 2.1 实验条件与参数

Tab. 1 Experimental conditions and parameters

变量参数	值
超声功率 (W)	500, 1000, 1500
超声频率 (kHz)	20
电磁频率 (kHz)	30, 60, 90
电流强度 (A)	60
超声处理时间 (s)	20
电磁处理时间 (s)	20

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]:

$$D_i = \frac{D_a - D_v}{D_a} \times 100\% \quad (2.1)$$

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。

随后, 将 A 铸锭切割取样, 打磨至光滑并抛光, 利用光学显微镜观察截面孔隙形貌, 将 B 铸锭沿其几何对称轴切割, 将截面打磨至光滑, 观察宏观孔

隙形貌。

3 试验结果及分析

3.1 不同超声功率对除气的影响

此部分旨在研究超声功率对铸锭密度指数的影响, 该阶段仅施加超声处理。由图 3.1(a)可见, 随着超声功率的逐步提高, 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 0.3601, 表明铸锭中气体含量最高。当施加 500 W 超声功率时, 密度指数略有下降至 0.3112。随后, 随着超声功率从 500 W 增加至 1000 W, 密度指数持续降低, 达到 0.2469。进一步将超声功率提升至 1500 W 时, 密度指数显著下降至 0.1214, 表明此时除气效果最为显著, 达到了最佳状态。

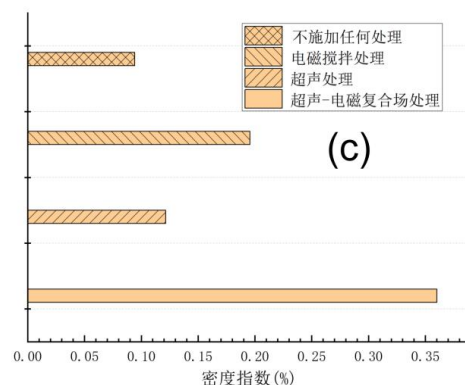
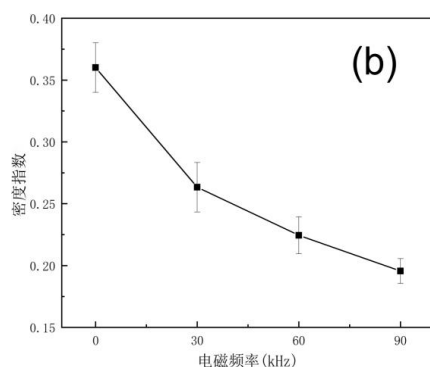
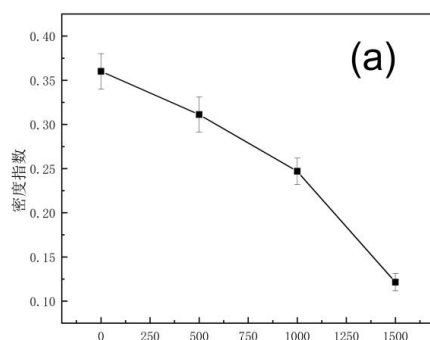


图 3.1 不同处理条件下铸锭密度指数的变化

Fig. 1 The variation of ingot density index under different processing conditions

图 3.2 展示了在不同超声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。当超声功率达到 1500 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, 说明超声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 3.3 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]:

$$P_k = \sqrt{\frac{2P \cdot \rho_L \cdot c_L}{S}} \quad (3.1)$$

式中: P_k 表示铝合金熔体内的声压值;

P 为超声功率;

ρ_L 指熔体的密度。

c_L 表示声波在熔体中的传播速度。

S 指超声场与熔体的有效接触面积(本实验中即为超声探头底面的面积)。

由上述关系可知, 超声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、聚并及其崩解过程更为活跃, 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。

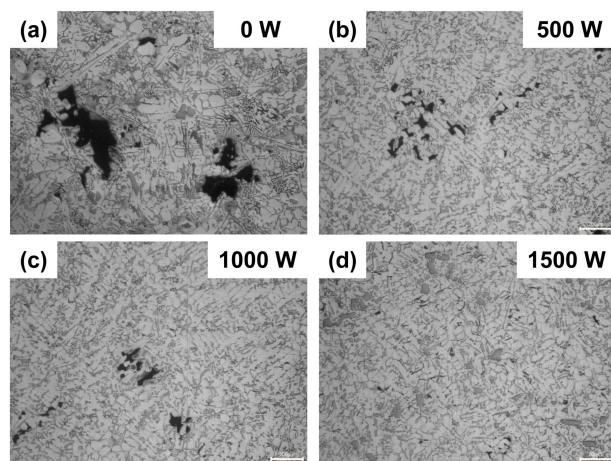


图 3.2 不同超声功率下铸锭截面的孔隙形貌: (a) 0 W; (b) 500 W; (c) 1000 W; (d) 1500 W。

Fig. 2 The pore morphology of the ingot cross-section under different ultrasonic powers: (a) 0 W; (b) 500 W; (c) 1000 W; (d) 1500 W.

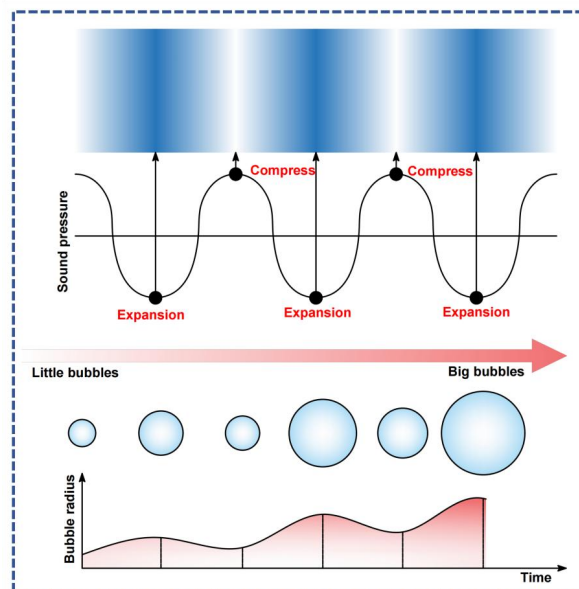


图 3.3 空化泡随正负交替声压的变化

Fig. 3 The variation of cavitation bubbles with the alternating positive and negative sound pressure

3.2 不同电磁频率对除气的影响

本实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 3.1(b)所示, 未经处理的铸锭密度指数为 0.3601。施加电磁频率为 30 kHz 时, 密度指数显著下降至 0.2633, 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 0.2245, 但下降幅度相对减缓。当电磁频率升至 90 kHz 时, 密度指数进一步降低至最低值 0.1956, 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。

图 3.4 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。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。

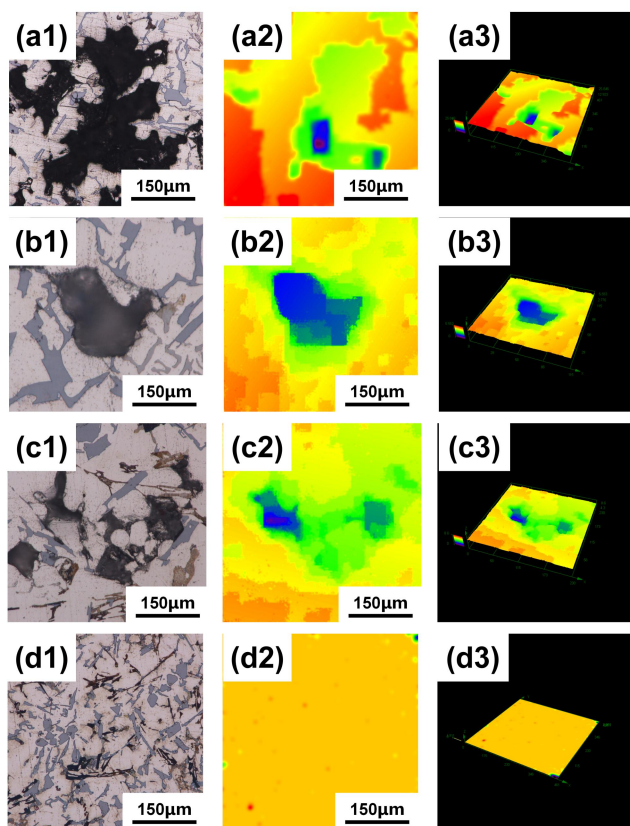


图 3.4 不同电磁频率下铸锭截面的孔隙形貌:
(a1-a3) 0 kHz; (b1-b3) 30 kHz; (c1-c3) 60 kHz;
(d1-d3) 90 kHz。

Fig. 4 The pore morphology of the ingot cross-section under different electromagnetic frequencies: (a1-a3) 0kHz; (b1-b3) 30kHz; (c1-c3) 60kHz; (d1-d3) 90kHz.

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。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^[6]。

3.3 超声-电磁复合场的除气效率

本实验采用“先超声,后电磁”的顺序对铝合金熔体进行外场处理,分别取二者的最佳参数进行处理,如图 3.1(c)所示,不施加任何处理的铸锭密度指数最高(0.3601),经过超声场或电磁场处理的铸锭相较于前者均有降低,但超声场对熔体的除气效果要明显优于电磁场的处理结果,当二者复合时,取得了有效成果,铸锭的密度指数达到了最低值 0.0943。

图 3.5 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。

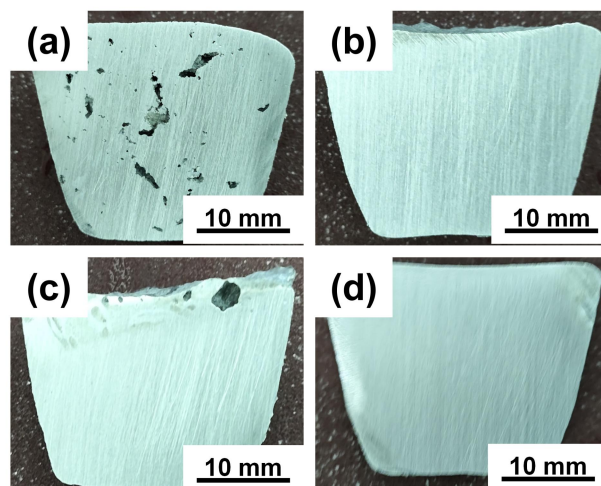


图 3.5 不同处理方式下铸锭截面的宏观孔隙形貌:
(a) 不施加处理; (b) 超声场处理; (c) 电磁场处理; (d) 超声-电磁复合场处理。

Fig. 5 Macroscopic pore morphology of the ingot cross-section under different treatment methods: (a) No treatment is applied; (b) Ultrasonic field treatment; (c) Electromagnetic field treatment (d) Ultrasonic-electromagnetic composite field treatment.

如图 3.6 所示, 相较于单一物理场作用, 超声波与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。超声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。

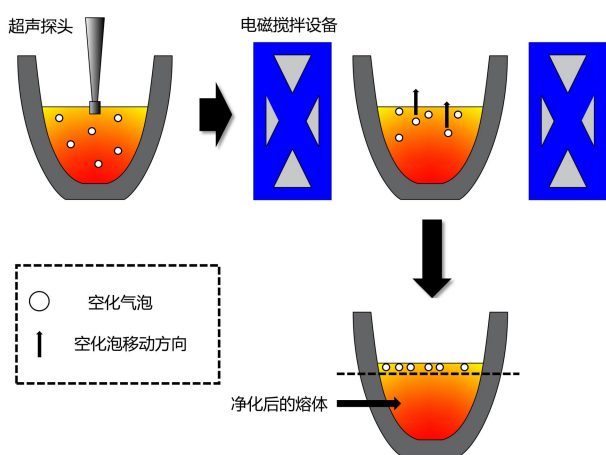


图 3.6 超声-电磁复合场的除气机理

Fig. 6 The degassing mechanism of the ultrasonic-electromagnetic composite field

4 结果或结论

(1) 实验结果表明, 随着超声功率的增加, 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。当超声功率达到 1500 W 时, 密度指数降至最低值 0.1214, 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 (0.1956), 表明

高频电磁搅拌更有利于熔体净化。

(3) 当超声功率设定为 1500 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 0.0943, 显著优于单一物理场处理, 验证了超声与电磁场在除气方面的协同增强效应。

参考文献:

- [1] W. Zhou, J.W. Li, Y.N. Bian, X.M. Han, J.F. Jiang, R.G. Guan. The impact of frequency and power on the ultrasonic purification of aluminum alloy[J]. Ultrason. Sonochem. 2024, 109: 107006.
- [2] X. Liu, Z.Q. Zhang, W.Y. Hu, Q.C. Le, L. Bao, J.Z. Cui, J.J. Jiang. Study on hydrogen removal of AZ91 alloys using ultrasonic argon degassing process[J]. Ultrason. Sonochem. 2015, 26: 73-80.
- [3] Q. He, G.Z. Zhang, S. Zhang, D. Teng, H.F. Jia, J.W. Li, R.G. Guan. 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] H.B. Xu, T.T. Meek, Q.Y. Han. Effects of ultrasonic field and vacuum on degassing of molten aluminum alloy[J]. Mater. Lett. 2007, 61: 1246-1250.
- [5] Y.S. Ren, H. Chen, W.H. Ma, Y. Lei, Y. Zeng. Purification of aluminium-silicon alloy by electromagnetic directional solidification: Degassing and grain refinement[J]. Sep. Purif. Technol. 2021, 277: 119459.
- [6] W. Zhou, J.W. Li, J.F. Jiang, Z.C. Gai, X.M. Han, R.G. Guan. Effect of electromagnetic stirring on degassing and mechanical properties of M174 heat-resistant alloy[J]. J. Mater. Res. Technol. 2024, 29: 3824-3831.
- [7] G.I. Eskin. Cavitation mechanism of ultrasonic melt degassing[J]. Ultrason. Sonochem. 1995, 2: S137-S141.
- [8] Z. Jia, B. Yu, Q. Lan, T. Wang, L. Fu, Y.L. Ma, Q.C. Le, J.Z. Cui. Effect of ultrasonic field treatment on degassing of 2024 alloy[J]. China Foundry. 2021, 18: 124-130.