

超声辅助过滤技术对 M174 耐热铝合金脱气效果的影响

万政晓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: 通过控制 M174 合金的氢含量对于航空航天领域应用至关重要, 然而传统的除气方法 (气泡浮法) 效率低下不能满足实际需求。本研究提出一种新型超声辅助混合过滤系统, 创新性的将超声场与陶瓷过滤器相结合, 并通过改变超声波功率 (1000-3000W), 过滤器孔隙率 (10-20ppi)、堆叠构型 (1-3 层) 来确定最优工艺参数, 以实现协同熔体净化。通过实验 20 kHz/3000W 超声波与三层陶瓷过滤器 (20 ppi) 的净化效果最好, 铸锭的密度指数仅为 0.078。显示出良好的净化效果。该工作建立了超声-过滤协同的“工艺-结构-性能”关联机制, 为高端航空航天合金制造提供了可扩展的解决方案。

关键词: 铝合金; 超声波; 陶瓷过滤器; 除气

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

WAN Zheng-xiao¹, LI Jun-wen¹

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

Abstract: Controlling the hydrogen content of M174 alloy is essential for aerospace applications, but the traditional degassing method (bubble floating) is inefficient and cannot meet the actual needs. In this study, a new type of ultrasonic-assisted hybrid filtration system was proposed, which innovatively combined the ultrasonic field with the filter screen, the straight-bore filter and the ceramic filter, and determined the optimal process parameters by changing the ultrasonic power (1000-3000W), filter porosity (10-20ppi) and stacking configuration (1-3 layers) to achieve synergistic melt purification. Through experiments, 20 kHz/3000W ultrasonic wave and double-layer ceramic filter (20 ppi) had the best purification effect, and the density index of the ingot was only 0.078. This work establishes a "process-structure-performance" correlation mechanism of ultrasonic-filtration synergy, which provides a scalable solution for high-end aerospace alloy manufacturing.

Keywords: Aluminum alloy; Ultrasonic; ceramic filters; Degassing

1 前言

航空航天领域对轻量化、耐高温材料的迫切需求, 推动了先进铝合金的发展。M174 铝合金是一种通过添加 Cu、Ni、Mg 元素强化的高性能铸造铝硅 (Al-Si) 合金, 因其卓越的热稳定性和抗疲劳裂纹扩展性能脱颖而出。专为需承受高温稳定性和优异抗疲劳性能的航空航天部件设计。然而传统

除气方法 (如惰性气体旋转除气) 受限于效率与可扩展性, 通常难以将熔体氢含量降至航空航天高完整性铸件要求的 0.1 mL/100g Al 以下。

近年来, 超声波熔体处理技术 (USMT) 通过空化效应促进气泡形核与合并, 展现出优异的除气动力学特性, 但超声波场与过滤系统的协同净化机制尚未明确, 尤其在多级孔隙结构优化方面缺乏系统研究。气孔缺陷会显著降低铸件的力学性能与抗

疲劳特性。

本文以 M174 耐热铝合金为研究对象,系统开展了超声波与过滤器协同对熔体除气行为的影响实验,分析了超声功率、过滤器孔隙率、堆叠构型等关键参数对除气效果的作用规律,此项工作为解决夹杂缺陷提供了可扩展的解决方案,为高端航空航天合金制造奠定了技术基础。

2 试验过程

本实验研究合金为 M174 耐热铝合金,由纯铝锭(含量 99%)与各种中间合金配比而成。其元素比例如表 2.1 所示:

表 2.1 元素比例

Tab. 1 Element proportions

合金牌 号	化学成分 (wt.%), 余量为 Al					
	Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Mn
M174	12	4.0	0.6	2.0	0.7	0.3

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,其熔炼温度为 700℃。在熔炼过程中用石磨棒轻轻搅拌,使其成分均匀化。在合金完全熔化后,保持恒温 30 分钟以确保成分均匀。

之后进行超声(UST)与过滤器协同处理,将超声水平放置,并放置泡沫陶瓷过滤器,改变过滤器孔隙率、堆叠构型。各阶段处理的具体参数见表 2.2。

表 2.2 实验条件与参数

Tab. 1 Experimental conditions and parameters

过滤器种类	变量参数	值
泡沫陶瓷过滤器	超声功率 (W)	0, 1000, 2000, 3000
	超声频率 (kHz)	20
	过滤器孔隙 率 (ppi)	15, 20, 30
	堆叠构型(n)	1, 2, 3
	超声处理时 间 (s)	20

将其浇筑坩埚中并分为两组凝固,其中一组在常温常压下自然凝固,另一组低压环境下进行减压测试(RPT),由于气体在低压情况下膨胀,更有利于观察气孔分布,因而在 RPT 的情况下铸锭的

气孔较大。

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。并进一步计算铸锭的密度指数,其计算公式如下所示(2.1):

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

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。

可由公式可知在相同的环境下,其密度指数越小,表明净化效果越好。

随后将铸锭打磨成标准尺寸样式,观察其宏观气孔率和微观组织。

3 试验结果及分析

3.1 泡沫陶瓷过滤器孔隙率、层叠结构对除气的影响

如图 3.1 所示,在不同孔隙密度(0、10、15、20 ppi)条件下陶瓷泡沫过滤器的密度指数。

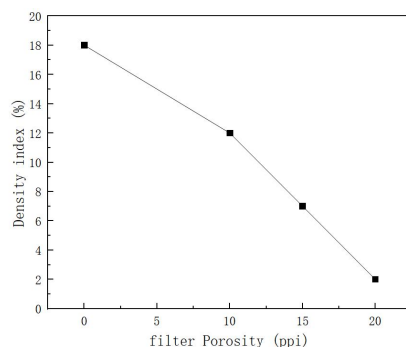


图 3.1 不同孔隙密度(0、10、15、20 ppi)条件下陶瓷泡沫过滤器的密度指数

如图所示,氢含量从基准值 0.18 mL/100g Al 降至 10 ppi 时的 0.15 mL/100g Al,而 20 ppi 过滤器可进一步降至 0.09 mL/100g Al。此 40%的提升源于更小孔径和曲折因子。在 20ppi 的情况下平均孔径仅为 0.8 mm,这进一步使气泡-界面接触面积增加 2.3 倍有利于降低氢含量的降低。同时曲折因子的增大使得熔体滞留时间延长 52%。 $\tau=3.2$ (20 ppi) 对比 $\tau=2.1$ (10 ppi) 进一步降低了氢含量。

如表 3.2 所示,在不同层叠结构(0、1、2、3)条件下陶瓷泡沫过滤器的密度指数。

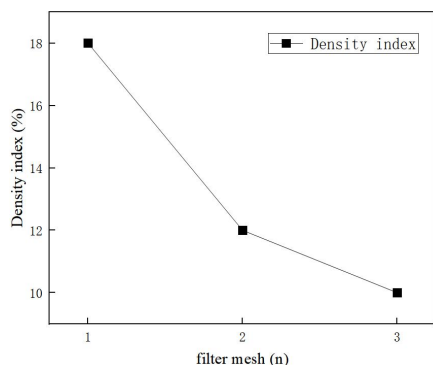


图 3.2 不同不同层叠结构（0、1、2、3）条件下陶瓷泡沫过滤器的密度指数。

如图 3.2 所示多层过滤（1-3 层）实现杂质分级去除，单层过滤器使 $\geq 5 \mu\text{m}$ 夹杂物密度降至 80%，氢含量达 0.20 mL/100g Al。而三层堆叠进一步将夹杂物降至 99%，氢含量达 0.11 mL/100g Al。单孔层捕获宏观夹杂物 ($>50 \mu\text{m}$)，多孔层截留微气泡 ($5-20 \mu\text{m}$)。

3.2 超声波功率的影响

如图 3.3 所示，在不同超声功率 0、1000w、2000w、3000w 条件下陶瓷泡沫过滤器的密度指数。

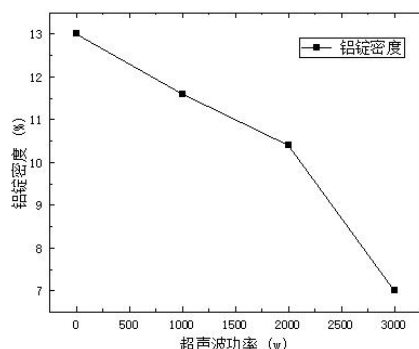


图 3.3 不同超声功率 0、1000w、2000w、3000w 条件下陶瓷泡沫过滤器的密度指数

实验表明，在 3000w 的情况下其密度指数最低。其主要受以下机理影响，首先是空化阈值效应，在 2000 W 以下声压 ($<1.8 \text{ MPa}$) 不足以突破铝熔体空化阈值，限制气泡形核。在 2000-3000 W 时声压 $>2.0 \text{ MPa}$ ，气泡密度呈指数增长。其次是氧化膜破碎阈值，在临界功率 (2500 W) 产生 $>150 \text{ m/s}$ 微射流，在 3000w 时流速最快。因而超声功率为 3000w 时，密度指数最低。

3.3 宏观气孔形貌及微观组织分析

图 3.4 展示了不同孔隙率、层叠结构、超声功率下，耐热铝合金铸锭的宏观气孔形貌。其中图 a

为在常温常压下自然凝固的铸锭。由图可知，氢气孔与缩孔共存于铸锭中，特征差异显著其中氢气孔主要集中于凝固界面上部，气孔尺寸向界面方向递增 ($200-800 \mu\text{m}$)，且形貌趋近球形且内壁光滑，图 b 所示其形成机制是由于在慢冷速条件下氢在固液界面前沿富集，促进气泡形核生长，因而形成如上分布。缩孔则位于铸锭芯部，尺寸细小 ($50-200 \mu\text{m}$) 其为不规则形状伴枝晶粗糙内壁，这是由于铸型快速凝固收缩所致，如图 c 所示。

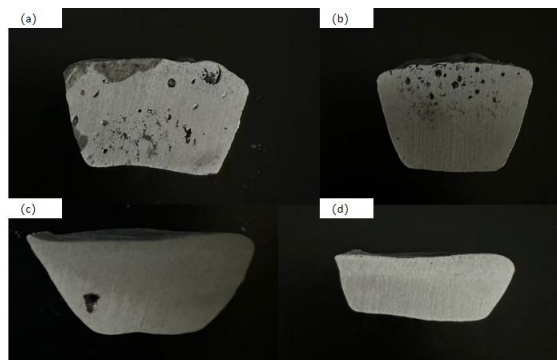


图 3.4 不同孔隙率、层叠结构、超声功率下，耐热铝合金铸锭的宏观气孔形貌

通过对图示中的气泡进一步分析发现得出，在超声功率为 3000w，孔隙率为 20ppi，层叠结构为 3 时，其铸锭宏观气泡最少，如图 d 所示。

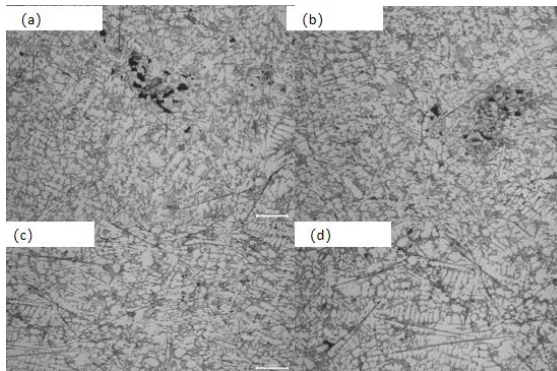


图 3.4 不同孔隙率、层叠结构、超声功率下，耐热铝合金铸锭的微观组织

由图 3.4 可知基体枝晶状 $\alpha\text{-Al}$ 相，二次枝晶臂粗大。共晶硅层片/针状结构形成互连网络。缺陷晶间暗区 ($5-25 \mu\text{m}$)，为缩孔 (I 型) 与含气孔洞 (II 型)。

其细化机制孔隙介导的局部晶粒细化如图 b 所示。孔隙附近晶粒尺寸 (较基体区) $\downarrow 46.9\%$ 。共晶硅变质：纤维状形貌 (长径比 ≈ 3) 取代针状结构。其成因由于孔隙界面处冷速 $>10^\circ\text{C/s}$ 抑制枝晶生长。缺陷形成路径 I 不规则形状带枝晶表面，由枝晶桥连孤立液相形成。II 型球状孔洞，氧化夹

杂辅助气泡形核所致。

3.4 过滤器孔隙率与超声场的协同机制

20ppi 过滤器使氢含量降低 40%源于双重机制, 首先是界面面积放大小孔径使气泡-滤器接触面积增加 2.3 倍。滞留时间延长。再者是高曲折因子使熔体通过时间增加 52%, 氢扩散更充分。同时多层堆叠的分级过滤机制进一步净化熔体。三层过滤器实现 99%夹杂物去除。

超声功率依赖的空化动力学在 3000 W (20 kHz) 时, 实现了空化阈值突破声压 >2.0 MPa (铝熔体临界值) 产生 5.8×10^4 气泡/ cm^3 , 破碎氧化膜至 <20 μm 。加之声流效应。氢传输速度较纯扩散提升 6.8 倍。

因而在最优工艺 (3000 W + 20 ppi+三层堆叠) 下, 由于 氢含量降至 0.08 mL/100g Al (低于形核阈值) 加之氧化膜破碎消除缩孔形核点, 最终将消除 92%大气孔, 进一步实现了熔体的净化。

4 结果或结论

(1) 实验结果表明, 在 3000 W/20 kHz 超声空场与三层陶瓷过滤器 (20 ppi) 耦合, 较基准氢含量降低 55.6%, 密度指数达 0.078。

(2) 超声功率 3000 W 的情况下, 氢含量下降 40%, 在过滤器孔隙率 20 ppi 条件下, 熔体滞留时间增加 52% ($\tau=3.2$) 夹杂物下降 99%堆叠 3 层的条件下分级去除效率 $>99.5\%$ 。

(3) 该工作构建的“超声-过滤”协同平台为新一代可重复运载火箭提供可扩展解决方案, 其揭示的机制为高完整性合金制造奠定理论基础。

参考文献:

- [1] Eskin, G.I.(2017). Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts (2nd ed.). CRC Press.
- [2] Zhang, X.M., et al(2018). High-temperature fatigue behavior of M174 heat-resistant aluminum alloy. Acta Metallurgica Sinica, 54(8), 1123-1132.[3] Li, C.G., et al.(2020). Quantitative characterization of tortuosity in ceramic foam filters. Foundry Technology, 41(5), 456-460.
- [3] Zhang, L., et al.(2021). Hierarchical filtration design for inclusion removal in Al-Si alloys. Journal of Materials Processing Technology, 295, 117152.
- [4] ASTM F1119-13(2018). Standard Test Method for Hydrogen Content of Aerospace Alloys. ASTM International.
- [5] 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.
- [6] Wang, Q., et al.(2020). Synchrotron X-ray tomography of pore formation in Al-Cu-Ni alloys. Acta Materialia, 188, 41-53
- [7] Mirihanage, W.U., et al(2019). Acoustic streaming in molten aluminum under ultrasound. Ultrasonics Sonochemistry, 58, 104648.