

脉冲磁场强度对3003铝合金熔体净化与晶粒细化的影响

赵民^{1,2} 张少帆^{1,2} 郎瑞卿^{1,2} 麻永林^{1,2} 唐远路³ 吴建新³ 邢淑清^{1,2}

(1. 内蒙古科技大学材料科学与工程学院, 包头 014010; 2. 内蒙古自治区新金属材料重点实验室, 包头 014010;
3. 中铝瑞闽股份有限公司, 福州 350316)

摘要 研究了脉冲磁场与泡沫陶瓷过滤器的协同作用对3003铝合金熔体净化和晶粒细化的影响。通过施加不同电流(60、80、100和120 A)的脉冲磁场,探究含Fe夹杂物的去除效果、显微组织的晶粒细化及硬度变化的规律。结果表明,单独的过滤处理对针状Fe相的去除效果有限;施加脉冲磁场后,铁相逐渐由针状转变为不规则块状和球状,Fe含量随电流增加呈现先降低后升高的趋势。当电流为100 A时,Fe含量(质量分数,下同)降至0.97%,除Fe率达到17.8%,晶粒尺寸降至133.83 μm ,较未处理试样降低了22.2%,组织均匀性显著改善;硬度(HV)达到51.6,较未处理试样提高了7.9%。

关键词 3003铝合金;脉冲磁场;熔体净化;晶粒细化

中图分类号 TG146.21;TG292

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250014

Effects of Pulsed Magnetic Field Intensity on Melt Purification and Grain Refinement of 3003 Aluminum Alloy

ZHAO Min^{1,2}, ZHANG Shaofan^{1,2}, LANG Ruiqing^{1,2}, MA Yonglin^{1,2}, TANG Yuanlu³, WU Jianxin³, XING Shuqing^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010; 2. Key Laboratory of New Metal Materials of Inner Mongolia Ancient Autonomous Region, Baotou 014010; 3. Chalco Ruimin Co., Ltd., Fuzhou 350316)

Abstract: The synergy of pulsed magnetic fields and foam ceramic filters on melt purification and grain refinement of 3003 aluminum alloy melts was investigated. Pulsed magnetic fields with different currents (60, 80, 100, 120 A) were applied to analyze the removal effect of iron inclusions, grain refinement in the microstructure, and hardness variation. The results indicate that single filtering treatment has limited effect on removal effect of needle-like iron phases. After applying pulsed magnetic field, the iron phase is gradually transformed from a needle-like shape to irregular blocky and spherical shapes. Fe content is decreased initially and then increased with increasing current, which is reduced to 0.97% at 100 A, achieving an iron removal efficiency of 17.8%. The grain size is declined to 133.83 μm , which is reduced by 22.2% compared to that of untreated ones, and microstructural uniformity is significantly improved. The hardness is increased to 51.6 HV, which is enhanced by 7.9% compared to that of untreated ones.

Key Words: 3003 Aluminum Alloy, Pulsed Magnetic Field, Melt Purification, Grain Refinement

3XXX系铝合金是以Mn为主要合金元素的非热处理强化型铝合金,具有优异的性能,被广泛应用于新能源汽车领域和航空航天、电子及微电子工业等领域^[1-4]。在3XXX系铝合金中,3003铝合金的应用最为广泛,被用于制造汽车散热器和空调等^[5]。随着研究的不断发展,铝合金的产品种类越来越多,社会对铝合金产品的需求也在不断增加,铝合金的熔炼和铸造技术

得到了快速发展,对其性能的要求也随之提高。但是,铝合金在实际生产过程中极易产生气孔和各种夹杂等缺陷,严重影响铝合金产品的综合性能^[6]。铝合金熔体中最常见的夹杂包括氧化物、碳化物以及含Fe、Si金属夹杂等^[7],其中,铁夹杂的危害尤为严重。Fe作为铝合金中的常见杂质元素,主要来源于生产过程中的铁质工具或熔炼设备的污染。当Fe含量超过一定值时,其

收稿日期:2025-01-07;修订日期:2025-02-24

基金项目:内蒙古科技大学基本科研业务费专项资金资助项目(2024QNJS028,2023RCTD004);一流学科研究专项资助项目(YLXKZX-NKD-019)

第一作者:赵民,男,1999年出生,硕士研究生,E-mail:zm1124895024@163.com

通信作者:郎瑞卿,女,1988年出生,讲师,E-mail:langruiqing2@163.com

引用格式:赵民,张少帆,郎瑞卿,等.脉冲磁场强度对3003铝合金熔体净化与晶粒细化的影响[J].特种铸造及有色合金,2026,46(6):909-914.

ZHAO M, ZHANG S F, LANG R Q, et al. Effects of pulsed magnetic field intensity on melt purification and grain refinement of 3003 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(6): 909-914.

会在铝合金中生成不同种类的富 Fe 相,尤其是长针状铁相,由于其显著的形状各向异性,会对基体起到“切割”作用,使铝合金的铸造性能降低,恶化铝合金铸件性能^[8]。因此,如何有效减少铁夹杂、改善铁相形态成为研究者关注的重点。

目前,铝熔体净化技术分为吸附净化和非吸附净化两大类。吸附净化主要包括过滤法、熔剂法等,而非吸附净化主要包括电磁净化和超声净化等^[9]。泡沫陶瓷过滤器是广泛应用于铝熔体净化的设备之一,具有成本低、操作便捷等特点^[10]。VOIGT C 等^[11]研究了陶瓷泡沫氧化铝过滤器的表面粗糙度对铝熔体过滤效率的影响,发现当过滤器孔径一致时,粗糙度较大的过滤器过滤效率较高,其原因可能为过滤器中较高的过滤速度使流动阻力变大。

近年来,电磁净化技术因其高效去除夹杂物的能力受到了越来越多的关注,主要包括交流磁场、高频磁场以及电磁搅拌等^[12]。GUO Q T 等^[13]利用电磁技术在各种参数组合下,在直流电场和高频磁场中对熔体进行了多次净化试验,取得了明显的净化效果。已有研究表明,脉冲磁场具有高效、低能耗以及无污染等特点,还可以细化铝合金晶粒从而提高其力学性能^[14-15]。但针对脉冲磁场的研究报道相对较少。

为了探究脉冲磁场结合泡沫陶瓷过滤器对 3003 铝合金熔体中铁夹杂的净化效率,以及脉冲磁场对铝合金微观组织和宏观性能的影响,通过将 3003 铝合金和 Al-10Fe 中间合金按质量比为 99:1 混合制备试样,研究不同脉冲磁场电流参数对富 Fe 相净化效果和晶粒细化程度的作用机制,旨在为优化铝合金净化工艺提供参考。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验材料为某公司生产的 3003 铝合金和 Al-10Fe 中间合金,3003 铝合金的化学成分见表 1。

表 1 3003 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 3003 aluminum alloy %				
w_B				
Mn	Fe	Cu	Si	Al
1.01	0.38	0.14	0.14	余量

1.2 试验方法

本试验所用装置主要包括脉冲磁场装置、电阻炉、过滤装置、石墨粘土坩埚、铁型以及温度记录设备等。脉冲磁场装置由脉冲电源柜、感应线圈和叠片铁芯组成,用于对铝熔体施加脉冲磁场;电阻炉包括箱式电阻

炉和小型电阻炉,其中箱式电阻炉用于预热过滤装置,小型电阻炉用于熔化铝合金熔体;过滤装置由泡沫陶瓷过滤板(30 ppi)和刚玉管组成,用于去除熔体中的夹杂物;石墨粘土坩埚用于盛装和转移熔体;铁型用于试样的凝固成形。温度记录设备由 K 型热电偶和温度记录仪组成,用于实时监控和记录熔体温度。图 1 为试验装置图。

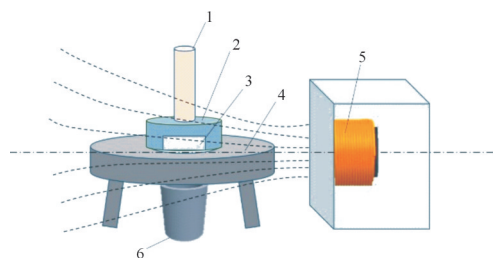


图 1 试验装置图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

1.引流刚玉管 2.耐火密封圈 3.陶瓷过滤板 4.可升降底座 5.带铁芯线圈 6.坩埚

试验过程中,将 3003 铝合金与 Al-10Fe 中间合金按质量比 99:1 混合后置于石墨粘土坩埚中,通过 TSX1400 型智能马弗炉加热至完全熔化,同时将过滤装置放入 SX13-BYL 箱式电阻炉中预热至 800 ℃。将熔体温度升至 850 ℃并保温 10 min,以确保 Al-10Fe 中间合金中的 Fe 元素与铝合金基体充分混合并完全溶解,将熔体放置于感应线圈的作用范围内。为了确保脉冲磁场能够有效作用于熔体,感应线圈距离熔体中心约 50 mm,脉冲磁场的施加持续时间为 30 s。随后取出预热后的过滤装置,在过滤过程中,熔体通过预热的泡沫陶瓷过滤器流入石墨黏土坩埚中。过滤装置置于脉冲磁场作用范围内,且过滤装置中心距离感应线圈约 50 mm。将过滤后的熔体浇注入铁型中进行凝固,自然冷却至室温后取出。浇注温度为 740 ℃,铁型的温度为室温(20 ℃)。试验参数见表 2。

表 2 不同电流脉冲磁场试验参数

Tab.2 Experimental parameters of different current pulsed magnetic fields

工艺	是否过滤	电流/A	电压/V	频率/Hz	占空比/%	磁感应强度/mT
1	否	—	—	—	—	—
2	是	—	—	—	—	—
3	是	60	500	20	20	28.4
4	是	80	500	20	20	39.2
5	是	100	500	20	20	48.8
6	是	120	500	20	20	55.2

为研究熔体净化及组织细化效果,将浇注的试样进行线切割截取金相试样,尺寸为 15 mm×12 mm×10 mm,取样位置见图 2。金相试样经过打磨、抛光后,首先使用 Keller 试剂(体积分数为 1% 的 HF+1.5% 的

HCl+2.5% 的 NH_4OH +95% 的 H_2O) 进行化学腐蚀,但由于化学腐蚀后的晶粒尺寸难以准确统计,因此进一步对试样进行电解腐蚀。电解腐蚀液采用体积分数为 5% 的氟硼酸溶液,腐蚀条件是阴极为不锈钢片,阳极 为试样,电压为 20 V,电流不超过 0.2 A,腐蚀时间为 50 s。通过 Axio Observer Z1 光学显微镜在偏光模式下 进行凝固组织观察,并采用 Image Pro Plus 用截线法测 量试样的晶粒尺寸;通过双离子束场发射扫描电镜 (TESCAN GALA 3) 观察物相的形貌;通过 SmartLab 型 X 射线衍射仪对试样进行定性分析;通过安捷伦 5800 电感耦合等离子体发射光谱仪对试样进行元素定量分

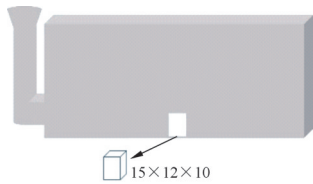


图 2 金相取样位置
Fig.2 Sampling position for metallographic specimen

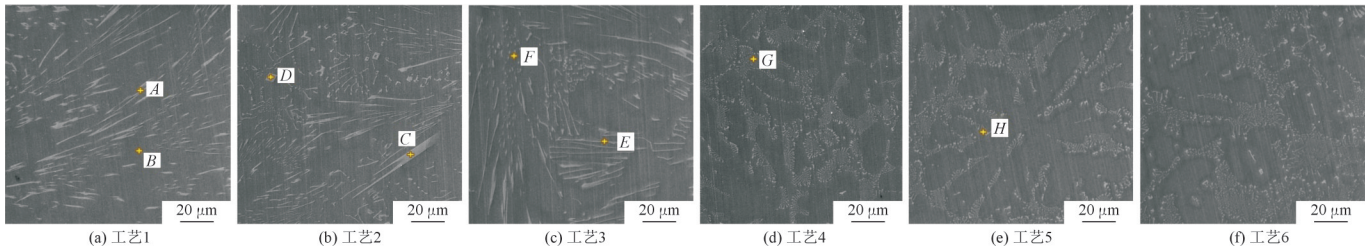


图 3 不同电流脉冲磁场处理后 3003 铝合金 SEM 组织
Fig.3 SEM images of 3003 aluminum alloy treated with different current pulse magnetic fields

表 3 不同工艺下能谱分析结果

Tab.3 EDS results under different processing conditions

位置	$x_B/\%$				第二相形貌
	Al	Fe	Mn	Si	
A	85.97	6.73	2.58	4.72	长针状
B	100	—	—	—	—
C	84.77	6.39	4.12	4.72	长块状
D	85.63	6.02	3.63	4.72	块状
E	85.29	7.54	2.59	4.58	长针状
F	84.81	6.70	3.69	4.79	颗粒状
G	90.49	5.59	2.58	1.34	颗粒状
H	82.51	10.25	2.72	4.52	小块状

在施加脉冲磁场处理后,第二相形貌逐渐优化。60 A 条件下(见图 3c),仍可见部分针状相。80 A 条件下(见图 3d),针状相基本消失,第二相以小块状和球状形式存在,分布较为均匀,尺寸显著降低。100 A 条件下(见图 3e),相比 80 A,第二相进一步弥散分布,未出现明显的聚集现象,组织细化效果最佳。120 A 条件下(见图 3f),尽管整体上仍以块状和颗粒状相为主,但在部分区域出现较大的块状相,表明过高的磁场强度可能导致某些富 Fe 相再聚集或长大。

析;通过 Qness 全自动显微维氏硬度计进行硬度测试,载荷为 9.8 N,保持时间为 15 s,在每个试样表面选 10 个序列点进行硬度测试,每个测试点间隔 0.7 mm,取平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 脉冲磁场对泡沫陶瓷净化 3003 铝合金的影响

图 3、表 3 分别为不同电流脉冲磁场处理后 3003 铝合金 SEM 组织和能谱分析结果。可以看出,3003 铝合金中 Mn 与 Al 会生成 MnAl_6 ,其为 3003 铝合金中主要的第二相^[16]。在 3003 铝合金中加入 Al-10Fe 中间合金后,由于 Fe 在铝合金中的固溶度低,少量的 Fe 会与铝合金中的其他元素形成各种富 Fe 相,损害铝合金性能。从图 3a 可见,大量富 Fe 相以长针状分布,其最长尺寸约为 40 μm ,与文献报道的结果一致^[8]。部分区域存在不规则块状相。经过过滤处理(见图 3b),针状相的数量有所减少,部分转变为条状和块状相,但仍然可见细长的富 Fe 相。

EDS 分析结果(表 3)表明,除 B 点外,其他点均含有 Al、Fe、Mn、Si 元素,确认这些相主要为 AlFeMnSi 类金属间化合物。图 4 为不同工艺下 3003 铝合金的 XRD 图谱。结合表 3 和图 4 可知针状相(A、E)为 AlFeMnSi 和 AlFe ,但 EDS 未检测到纯 AlFe 相的特征成分,但 XRD 分析中检测到了 AlFe 相的衍射峰,进一步佐证了 AlFe 相的存在,这可能是由于点扫区域的局限性或 AlFe 相与 AlFeMnSi 相共存,难以单独分离。随着磁场作用增强,富 Fe 相逐渐由 AlFeMnSi 和 AlFe 的长针状形貌转变为小块状和颗粒状。

图 5 为不同电流脉冲磁场处理后 3003 铝合金中的 Fe、Mn 含量。Mn 作为 3003 铝合金主要合金元素,在不同工艺下,Mn 含量的波动较小,范围为 0.79%~0.90%,Fe 含量呈先降低后升高的趋势。工艺 1 中,Fe 含量为 1.18%,经过泡沫陶瓷过滤处理后(工艺 2),Fe 含量降至 1.16%,较工艺 1 减少了 1.69%,这说明过滤器可以过滤一部分铁夹杂物,但其效果有限。当施加 60 A 脉冲磁场处理(工艺 3)时,Fe 含量进一步降低至 1.06%,较工艺 1 减少了 10.17%。此时,脉冲磁场作用

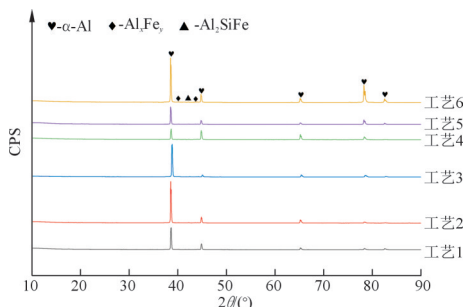


图4 不同电流脉冲磁场处理后3003铝合金XRD图谱

Fig.4 XRD pattern of 3003 aluminum alloy treated with different current pulsed magnetic fields

改善了熔体的流动性,促进了铁夹杂物的迁移并使其更容易被过滤器拦截。随着电流增加到80 A(工艺4),Fe含量进一步降低至1.02%,相较工艺1减少了13.56%。当电流增加至100 A(工艺5)时,Fe含量降至最低,为0.97%,较工艺1减少了17.80%,这是净化效果理想的工艺条件。进一步增加电流至120 A(工艺6)后,Fe含量回升至1.17%,净化效果明显下降,仅较工艺1减少了0.85%。

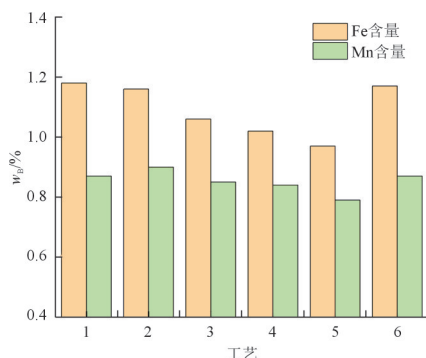


图5 不同电流脉冲磁场处理后3003铝合金中Fe、Mn含量

Fig.5 Fe and Mn contents in 3003 aluminum alloy treated with different current pulsed magnetic fields

综上所述,在脉冲磁场作用下,显著降低了3003铝合金中的Fe含量,同时有效抑制了针状铁相的形成与生长。可见,通过过滤结合脉冲磁场处理,可以有效促进富Fe相的形貌演变,由长针状、条状转变为小块状及颗粒状。同时,显著降低了3003铝合金中Fe含量,且在100 A处理条件下效果最佳。

2.2 脉冲磁场对3003铝合金显微组织及性能的影响

图6和图7分别为不同电流脉冲磁场处理对3003铝合金的显微组织及平均晶粒尺寸的影响。从图6a可见,3003铝合金晶粒明显粗大,分布不均,组织较为粗糙,其平均晶粒尺寸为171.93 μm 。经过泡沫陶瓷过滤处理(图6b),晶粒尺寸减小至165.37 μm ,降低了3.8%,但晶粒细化效果较为有限,仍存在明显的粗大晶粒。当施加脉冲磁场处理后,晶粒细化现象逐渐显现,

并随电流强度增加呈现规律性变化。当电流为60 A时(图6c),晶粒尺寸进一步减小至164.66 μm ,较工艺1降低了4.2%,呈现一定的等轴化趋势,但细化效果仍较弱。随着电流增加至80 A(图6d),晶粒细化效果显著增强,粗大的晶粒基本消失,平均晶粒尺寸显著减小至142.41 μm ,较工艺1降低了17.2%,组织均匀性得到明显改善。当电流增加至100 A时(图6e),晶粒尺寸进一步降至133.83 μm ,较工艺1降低了22.2%,此时细化效果达到最佳,晶粒均匀且组织最为致密。然而,当电流进一步升高至120 A(工艺6)时,晶粒开始重新长大,其尺寸增加至148.34 μm ,这是因为组织中部分晶粒异常长大,导致细化效果减弱,均匀性有所下降。可见不同电流脉冲磁场处理显著改善了3003铝合金的显微组织与晶粒尺寸,且当电流为100 A时(工艺5),晶粒细化效果最佳,其组织均匀性和平均晶粒尺寸均达到了最优状态。

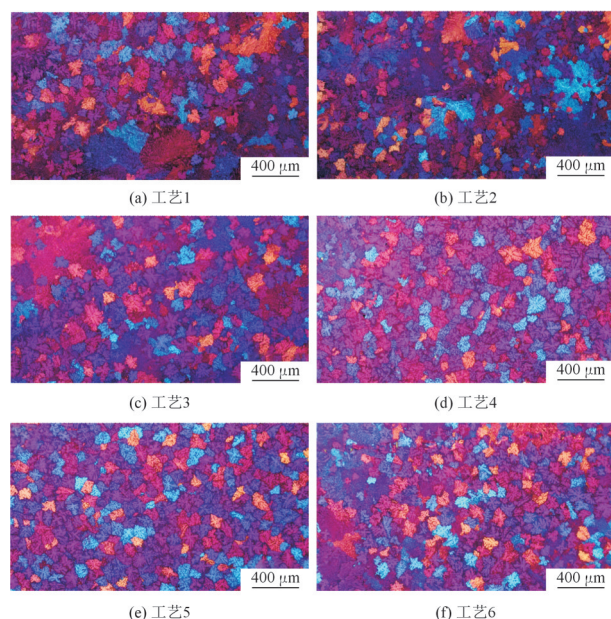


图6 不同电流脉冲磁场处理后3003铝合金的金相组织

Fig.6 Metallographic structure of 3003 aluminum alloy treated with different current pulsed magnetic fields

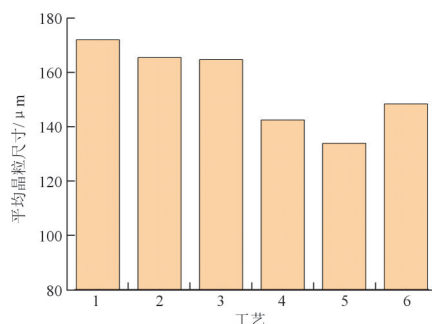


图7 不同电流脉冲磁场处理后3003铝合金的平均晶粒尺寸

Fig.7 Average grain size of 3003 aluminum alloy treated with different current pulsed magnetic fields

图 8 为不同电流脉冲磁场处理后 3003 铝合金试样的硬度变化。可以看出,脉冲磁场处理对试样硬度有显著影响。未经过滤及脉冲磁场处理的工艺 1 试样硬度(HV)为 47.8,硬度值分布较为离散。经过泡沫陶瓷过滤处理后(工艺 2),试样硬度(HV)提升至 50.1,较工艺 1 增加了 4.8%。这主要是由于过滤装置去除了熔体中的部分夹杂物,提高了熔体纯净度,减少了缺陷,从而有助于改善合金的力学性能。然而,单纯过滤对晶粒尺寸的影响较小,硬度仍存在一定波动,表明过滤对组织的优化效果有限。当施加 60 A 脉冲磁场处理(工艺 3)时,试样硬度(HV)仍为 47.8,与工艺 1 相比基本无变化。这表明在较低的电流条件下,脉冲磁场作用较弱,未能显著改变熔体凝固过程中的组织特征,晶粒细化效果不明显,硬度未发生明显提升。随着脉冲磁场电流增加至 80 A(工艺 4),试样硬度(HV)提升至 50.6,较工艺 1 增加了 5.9%。此时,脉冲磁场的电磁力作用增强,熔体的流动性得到改善,促进晶粒细化并提高组织均匀性。晶界数量的增加有效阻碍了位错的滑移,导致硬度有所提升。当脉冲磁场电流增加至 100 A(工艺 5)时,试样硬度(HV)达到最大值,为 51.6,较工艺 1 增加了 7.9%。结合显微组织分析,100 A 脉冲磁场处理条件下,晶粒细化效果最佳,组织均匀性显著改善。根据霍尔-佩奇公式,材料的硬度与晶粒尺寸呈负相关关系,晶粒细化导致单位体积内的晶界数量大幅增加,晶界对位错的阻碍作用增强,从而提高了硬度。然而,当脉冲磁场电流进一步增加至 120 A(工艺 6)时,试样硬度(HV)较工艺 5 略有下降,为 50.3,这可能是部分晶粒出现异常长大使组织均匀性降低,导致硬度值出现小幅下降。

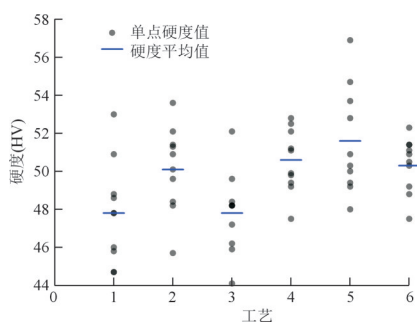


图 8 不同电流脉冲磁场处理后 3003 铝合金试样硬度变化
Fig.8 Hardness variation of 3003 aluminum alloy specimens treated with different current pulse magnetic fields

3 机理分析

分析可知,在液相线温度以上对 3003 铝合金熔体施加脉冲磁场时,脉冲磁场产生的电磁能瞬时高能渗

入铝合金熔体内部,增加了铝合金熔体中的能量起伏,显著降低了临界形核半径和形核壁垒,进而促进了形核过程^[17]。

在脉冲磁场作用下,激活能 ΔG_m^* 可表示为^[18]:

$$\Delta G_m^* = \frac{16\pi\sigma^3}{3\Delta G_m^2} = \frac{16\pi\sigma^3}{3(\Delta G_v + \mu_0\Delta\chi^{l-s}|H|^2/2)^2}$$

式中, ΔG_v 为液相和固相的吉布斯自由能差; ΔG_m 为电磁能吉布斯自由能; σ 为固-液界面能; μ_0 为真空磁导率; $\Delta\chi^{l-s}$ 为固液相体积磁化率的变化; H 为磁场强度。根据式(1),施加脉冲磁场时,电磁能引入了额外的驱动力,使固-液界面附近的能量分布发生变化,显著降低了体系内单个晶核形成的活化能垒。这种能量的降低使晶核更易形成,从而促进了形核率的提高,实现晶粒的细化。

关于除铁的机制,主要包括泡沫陶瓷过滤器的深层过滤作用和脉冲磁场在熔体中产生的电磁力对富 Fe 相的辅助捕捉作用。

泡沫陶瓷过滤器因其具有三维网状结构,曲折弯曲的内孔增加了其吸附细小夹杂物的机率,由于 30 ppi 泡沫陶瓷过滤器的孔径非常大,夹杂物附着于过滤壁的深层过滤机制是夹杂去除的主要机制。深层过滤中的夹杂物捕获是两个连续事件的结果,即颗粒从大块熔体转移到过滤孔的内部以及颗粒附着在孔壁上^[19]。

在施加脉冲磁场后,富 Fe 相的形貌发生显著变化,这一变化与磁场对熔体中含铁相的驱动和影响密切相关。当脉冲电流通过感应线圈在熔体中产生梯度磁场 B 时,熔体中还会感应出脉冲涡电流 J ,两者相互作用生成电磁力 $F=J\times B$ 。需要注意的是,该电磁力并非完全沿熔体轴向垂直分布,而是在横截面内以一定角度作用于熔体,见图 9。电磁力主要作用于导电性较好的铝液,而对富 Fe 相施加的电磁力较小。尽管如此,电磁力通过反向体积力或电磁排斥力作用于富 Fe 相,使得富 Fe 相发生迁移^[20]。特别是在低电流强度下,富 Fe 相呈针状或长块状,但在较高电流强度下,富 Fe 相会受到电磁力的影响,发生断裂、重组,最终转变为不规则块状或球状。球状和小块状的富 Fe 相相比于针状相具有更强的稳定性,因此脉冲磁场的施加有效促进了富 Fe 相的形态转变。

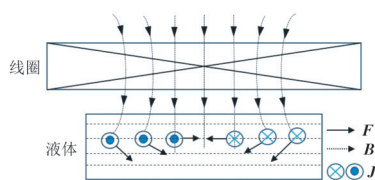


图 9 熔体中的感应磁场与感应电流
Fig.9 Induced magnetic field and induced current in melt

Fe含量的降低本质上是脉冲磁场和过滤机理协同作用的结果。施加脉冲磁场后,富Fe相发生迁移,电磁力的作用促使富Fe相向过滤器表面集中,过滤器则通过其深层过滤机制捕捉富Fe相。当电流强度适中时,电磁力和过滤器的作用达到最佳配合,富Fe相的捕捉效率显著提高,导致熔体中的Fe含量有效降低。通过脉冲磁场的引导作用,铁夹杂物迁移至过滤器并被高效捕捉,而过滤器的深层过滤机制进一步保证了熔体中铁的去除。随着电流强度的增加,脉冲磁场作用的增强促进了富Fe相的迁移和形态变化,但过高的电流强度可能会导致熔体流动不均,富Fe相的迁移速度受到局部扰动的影响,从而导致Fe含量回升。因此,二者协同作用下Fe含量降低的本质原因是脉冲电磁场通过增强熔体的流动性和富Fe相的迁移,同时促使富Fe相的形态发生转变,结合过滤器的高效捕捉作用,实现了对Fe的有效去除。

4 结 论

(1)通过泡沫陶瓷过滤器与脉冲磁场的协同作用,有效促进了3003铝合金熔体中Fe夹杂物的去除。当电流为100 A时,Fe含量由初始的1.18%降至0.97%,除铁率达到17.8%,效果理想。

(2)施加脉冲磁场不仅显著细化晶粒,还提高了3003铝合金的硬度。当电流为100 A时,平均晶粒尺寸降至133.83 μm ,较未处理试样降低了22.2%,组织均匀性显著改善;同时,硬度(HV)达到51.6,较未处理试样提高了7.9%。晶粒细化使晶界数量增加,晶界对位错运动的阻碍作用增强,从而提升了材料硬度。然而,过高的电流(120 A)可能导致晶粒异常长大,细化和硬化效果均有所减弱。

(3)脉冲磁场的电磁能增加了形核驱动力,降低了体系的形核壁垒,形核率增加,促进了晶粒细化,使3003铝合金的组织更加均匀。同时,脉冲磁场与泡沫陶瓷过滤器协同作用,通过电磁力驱动夹杂物迁移,并利用过滤器的深层过滤机制高效捕捉夹杂物,显著提升了熔体净化效率。

参 考 文 献

- [1] 邓运来,张新明.铝及铝合金材料进展[J].中国有色金属学报,2019,29(9):2 115-2 141.
- [2] 王生宁,巩晓平,王强,等.退火温度对铸轧3003铝合金冷轧板带材冲压制耳率的影响[J].有色金属工程,2024,14(5):19-25.
- [3] HÅKON W Å, ANTONIUS T J V H, KNUT M. Orientation

- dependent pinning of (sub)grains by dispersoids during recovery and recrystallization in an Al-Mn alloy[J]. Acta Materialia, 2023, 248: 118 761.
- [4] ZHOU Y L, YANG Y, TAN Y B, et al. Recrystallization behavior and texture evolution during annealing of cryogenic-rolled 3003 aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 997: 174 818.
- [5] DEHMAS M, AEBY-GAUTIER E, ARCHAMBAULT P. et al. Interaction between eutectic intermetallic particles and dispersoids in the 3003 aluminum alloy during homogenization treatments[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2013, A44: 1 059-1 073.
- [6] 李荣,袁尧衡,陈朝铁,等.铝材中夹杂物研究进展[J].有色金属科学与工程,2024,15(5): 660-669.
- [7] 贾银翠.铝熔体中氢与夹杂物的研究[D].沈阳:东北大学,2010.
- [8] SUN Y M, HUANG X S, LIU C H, et al. Impurity iron separation from molten secondary aluminum by pulsed electric current[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 934: 167 903.
- [9] 袁尧衡,陈朝铁,李军旗,等.铝熔体净化研究现状与趋势[J].中国冶金,2023,33(4):9-16.
- [10] YANG J W, BAO S, AKHTAR S. et al. The influences of grain refiner, inclusion level, and filter grade on the filtration performance of aluminum melt [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2021, B52: 3 946-3 960.
- [11] VOIGT C, DIETRICH B, BADOWSKI M, et al. Impact of the filter roughness on the filtration efficiency for aluminum melt filtration[C]//Light Metals 2019. San Antonio, 2019.
- [12] SHU D, SUN B D, LI K, et al. Continuous separation of non-metallic inclusions from aluminum melt using alternating magnetic field[J]. Materials Letters, 2002, 55(5): 322-326.
- [13] GUO Q T, CAO Z Q, ZHANG Z T, et al. Separation efficiency of alumina particles in Al melt under high frequency magnetic field[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(1): 153-157.
- [14] 白庆伟,麻永林,邢淑清,等.可控电磁能(CEME)时效处理下Al-Zn-Mg-Cu合金的析出及强化机理研究[J].材料导报,2021,35(20):20 143-20 148,20 160.
- [15] 鲍鑫宇,麻永林,程桥,等.脉冲磁场熔体处理对Al-Si-Mg-Cu-Ni合金DC铸造凝固组织和力学性能的影响[J].机械工程学报,2024,60(6):279-286.
- [16] 李骁.铸轧3003铝合金热加工性能及组织演变研究[D].江苏镇江:江苏大学,2021.
- [17] 鲍鑫宇,王军,白庆伟,等.脉冲电磁能对7A04铝合金凝固组织细化机理的影响[J].材料热处理学报,2019,40(5):71-77.
- [18] 白庆伟,麻永林,邢淑清,等.铝合金表面脉冲电磁场对半连续铸造晶粒的细化[J].工程科学学报,2017,39(12):1 828-1 834.
- [19] DAMOAH L N W, ZHANG L F. Removal of inclusions from aluminum through filtration[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2010, B41: 886-907.
- [20] 孙迪.铝熔体除铁研究[D].辽宁大连:大连理工大学,2010.

(编辑:栗万仲)