

# ZL101 铝合金熔体旋转磁场及 Al-3B 细化处理效果比较研究

王晓彤, 王 傲, 肖世林, 李大勇

(哈尔滨理工大学材料科学与化学工程学院, 黑龙江哈尔滨 150080)

**摘要:** 采用智能温度记录仪、金相显微镜、拉伸试验机, 分别研究了旋转磁场和Al-3B细化剂处理对ZL101铝合金熔体凝固过程、显微组织及力学性能的影响。对比结果显示, 在ZL101铝合金中添加Al-3B细化剂, 随细化剂中B含量增大,  $\alpha$  (Al) 的平均晶粒尺寸先减小后增大, 抗拉强度和伸率先增大后减小, 当Al-3B细化剂B含量达到0.06%时细化效果最优, 抗拉强度和伸长率分别提高9.4%和34.9%。用旋转磁场细化ZL101铝合金熔体时, 随旋转磁场电流参数增大,  $\alpha$  (Al) 的平均晶粒尺寸先减小后增大, 抗拉强度和伸率先增大后减小, 最优参数电流为80A、频率为8 Hz, 抗拉强度和伸长率分别提高10.5%和37.2%。采用最佳含量Al-3B细化剂和最优参数旋转磁场对同一成分的ZL101铝合金熔体进行细化处理效果对比表明, 旋转磁场处理效果优于细化剂细化效果。

**关键词:** ZL101铝合金; 旋转磁场; Al-3B细化剂; 显微组织; 力学性能

## 作者简介:

王晓彤(1998-), 女, 硕士, 主要研究方向为铝合金晶粒细化和力学性能影响。E-mail: m18846189570@163.com

## 通讯作者:

李大勇, 男, 教授, 博士, 博士生导师。电话: 13339315500, E-mail: dyli@hrbust.edu.cn

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)12-1519-06

## 收稿日期:

2022-05-07 收到初稿,  
2022-06-17 收到修订稿。

ZL101铝合金的铸造性能优良、流动性好、气密性高、耐蚀性强、焊接性好, 能热处理强化, 但是抗拉强度和伸长率较低<sup>[1-4]</sup>。Al-Si合金的抗拉强度和伸长率通常为锻造铝合金的60%~90%, 难以满足制造业对铸造合金越来越高的性能要求<sup>[5-7]</sup>。必须对其进行细化处理, 以获得更优的力学性能。

晶粒细化是通过控制晶粒形核和长大来实现的<sup>[8]</sup>, ZL101铝合金细化处理主要分为物理细化和化学细化<sup>[9]</sup>。常州大学李宏宝在700 °C时对Al-12.6Si合金进行0.4% Al-3B变质处理后合金的综合力学性能得到明显提高<sup>[10]</sup>。西安工业大学刘志学等人, 发现了以硼盐作为细化剂, 细化铸态铸造铝硅合金 $\alpha$ 相和共晶组织<sup>[11]</sup>。郑婷发现熔体内部温度在电磁搅拌作用下降低较快, 使凝固速度加快<sup>[12]</sup>。Reza Haghayeghi发现了RMF和USF结合起来, 电磁搅拌能有效地均匀化温度场, 有利于原子核和碎片的生长<sup>[13]</sup>。

本文主要研究Al-3B细化剂和旋转磁场处理对ZL101铝合金凝固冷却曲线、显微组织和力学性能的影响, 得到Al-3B和旋转磁场细化ZL101铝合金的最优参数, 并进一步分析Al-3B和旋转磁场细化ZL101铝合金的细化效果和细化机制, 旨在寻求化学与物理复合细化处理结合点, 为优化设计复合细化处理工艺奠定基础。

## 1 试验材料与方法

本试验以ZL101铝合金为研究对象, 合金化学成分如表1所示。

细化剂细化ZL101铝合金试验步骤: 2.5 kg的ZL101铝合金材料在电阻炉中750 °C

表1 ZL101合金化学成分  
Table 1 Chemical composition of the ZL101 alloy

	$w_B / \%$								
	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ti	Ni	Sn	Pb
	7.114	0.325 6	0.018 9	0.156 2	0.010 8	0.150 8	0.054 8	0.013 2	0.009

熔化,保温5~10 min后,炉温升至780 ℃,保温15 min后加入Al-3B细化剂,含量分别为0.03%B、0.04%B、0.06%B、0.08%B,用无毒精炼剂精炼,保温5 min并降温至720 ℃浇入 $\Phi 86$  mm $\times$ 150 mm的金属型中,用MR-T8型智能温度记录仪记录试样凝固冷却曲线。

旋转磁场处理ZL101铝合金试验步骤:2.5 kg的ZL101铝合金材料在电阻炉中750 ℃熔化,保温5~10 min后,用无毒精炼剂进行精炼,保温5 min并降温至720 ℃,浇入放在电磁搅拌器中尺寸为 $\Phi 86$  mm $\times$ 150 mm的金属型中,通入旋转磁场电流参数为50 A、80 A、120 A,频率为8 Hz。在凝固过程中进行电磁搅拌,用MR-T8型智能温度记录仪记录试样凝固冷却曲线。

在凝固试样中部截取拉伸试样和金相试样用料,经切片、磨样、抛光的金相试样,采用光学显微镜进行显微组织观察,用Nano Measurer软件测量 $\alpha$ (Al)晶粒的平均直径。拉伸试样形状及尺寸如图1所示,采用MTS-E44304拉伸试验机测定抗拉强度和伸长率,每组试样拉伸四次取平均值作为测试结果。

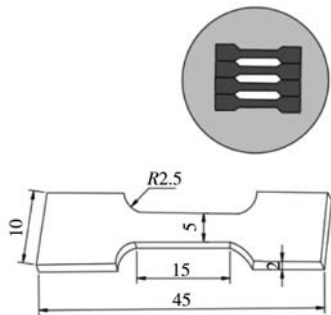


图1 拉伸试样形状及尺寸示意图

Fig. 1 Diagram of shape and size of the tensile specimen

## 2 试验结果及分析

### 2.1 冷却曲线对比分析

图2所示为在ZL101铝合金中加入不同B含量Al-3B细化剂的凝固冷却曲线变化。图中五条曲线分别为未

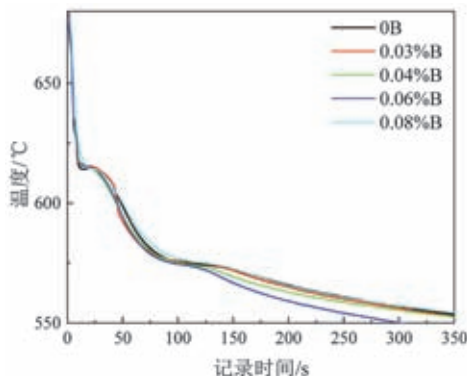


图2 ZL101加入不同B含量Al-3B的凝固冷却曲线

Fig. 2 The solidification and cooling curves of the ZL101 added with different B contents

添加细化剂、添加0.03%B、0.04%B、0.06%B、0.08%B的Al-3B。用 $T_c$ (℃)表示初晶生长温度, $\Delta T_1$ (℃)表示初晶过冷度<sup>[9]</sup>。不同B含量细化剂作用下,凝固冷却曲线特征值见表2。

表2 ZL101加入不同B含量细化剂的热分析特征值  
Table 2 Thermal analysis characteristic values of the ZL101 with different B content refiners

Al-3B的B含量	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta T_1/^\circ\text{C}$
无添加	614.35	1.3
0.03%B	615.32	0.87
0.04%B	615.66	0.69
0.06%B	615.80	0.45
0.08%B	614.89	0.72

由表2可知,在ZL101铝合金中随着Al-3B的B含量增大,初晶生长温度 $T_c$ 升高, $\Delta T_1$ 逐渐变小后再增大,在添加含0.06%B的Al-3B时,过冷度达到最小。随着Al-3B加入量增加,熔体中出现大量晶核,促进了 $\alpha$ (Al)的形核和生长,不需要过高的过冷度形核,使得过冷度降低, $\Delta T_1$ 随着晶粒的细化而减小<sup>[10]</sup>。由凝固冷却曲线可以看出,冷却速度没有明显变化,共晶生长温度也没有显著变化, $\alpha$ (Al)的形核率增大。

图3所示为向ZL101铝合金施加不同参数旋转磁场的凝固冷却曲线变化。图中四条曲线分别为不同磁场、磁场电流参数为50 A/8 Hz、80 A/8 Hz、120 A/8 Hz时的凝固冷却曲线。四条冷却曲线上的特征值见表3。

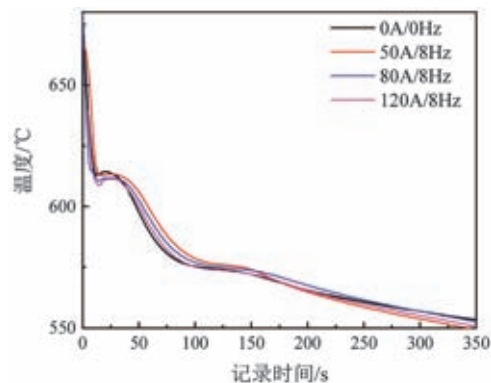


图3 ZL101施加不同参数旋转磁场的凝固冷却曲线

Fig. 3 Solidification cooling curves of the ZL101 applied rotating magnetic field with different parameters

表3 ZL101施加不同参数旋转磁场的热分析特征值  
Table 3 Thermal analysis characteristic values of the ZL101 applied rotating magnetic fields with different parameters

旋转磁场参数	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta T_1/^\circ\text{C}$
无磁场	614.35	1.3
50 A/8 Hz	612.9	2.56
80 A/8 Hz	610.8	3.10
120 A/8 Hz	613.3	2.87

由表3可知,向ZL101铝合金施加旋转磁场,在频率恒定条件下,随着磁场电流逐渐增大,初晶生长温度 $T_c$ 降低, $\Delta T_i$ 逐渐增大后再减小,在旋转磁场电流为50 A频率为8 Hz时,过冷度达到最大。在电磁搅拌过程中,产生电磁力推动熔体运动,使树枝晶端部产生剪切,造成枝晶碎断,增加形核核心。此外,电磁力还可以加速传质,使凝固界面前沿扩散边界层减薄而浓度梯度增大,过冷度 $\Delta T_i$ 增大,从而增加形核率<sup>[13-14]</sup>。从凝固冷却曲线变化可以看出,旋转磁场作用下的熔体冷却速度明显比无磁场作用时冷却速度快,熔体内产生对流,加快熔体内热量的散失,从而使冷却速度变快,共晶生长温度变化幅度较小,过冷度增大, $\alpha$ (Al)形核率增大。

从凝固冷却曲线可以看出,细化剂细化ZL101铝合金冷却速度基本不变,过冷度减小,初晶生长温度升高。而旋转磁场细化ZL101铝合金冷却速度增大,过冷度增大,初晶生长温度降低。两者共晶生长温度变化幅度都较小。细化剂细化ZL101铝合金的细化机制为增加异质形核, $\alpha$ (Al)形核率增大,形核不需要过高的

冷度。而旋转磁场细化ZL101铝合金的细化机制为,在磁场作用下加快熔体散热,加快冷却速度,电磁力推动熔体运动,使树枝晶端部产生剪切造成枝晶碎断,形成晶核,使 $\alpha$ (Al)形核率增大,过冷度增大,单位时间内形成的晶核数量增加。

## 2.2 微观组织对比分析

图4所示为ZL101铝合金添加Al-3B细化剂细化的金相组织。由图4a可以看出,存在少量的 $\alpha$ (Al),黑色放射状共晶硅密集分布在 $\alpha$ (Al)之间,共晶硅面积分数为13.627%。将图4b-e与图4a对比,可以发现, $\alpha$ (Al)数量明显增多, $\alpha$ (Al)由大块状变为小块状,放射状共晶硅的长度变短,分布变得稀疏,部分变成细小纤维或层片状。共晶硅面积分数先减小后增大,在0.06%B时,共晶硅面积分数由13.627%减少为8.281%,达到最小。由于Al-3B的异质形核作用,促进了 $\alpha$ (Al)的形核和生长,抑制了共晶组织生长,在随后的生长过程中相互碰撞而形成细小的颗粒状,从而改善合金力学性能<sup>[15]</sup>。

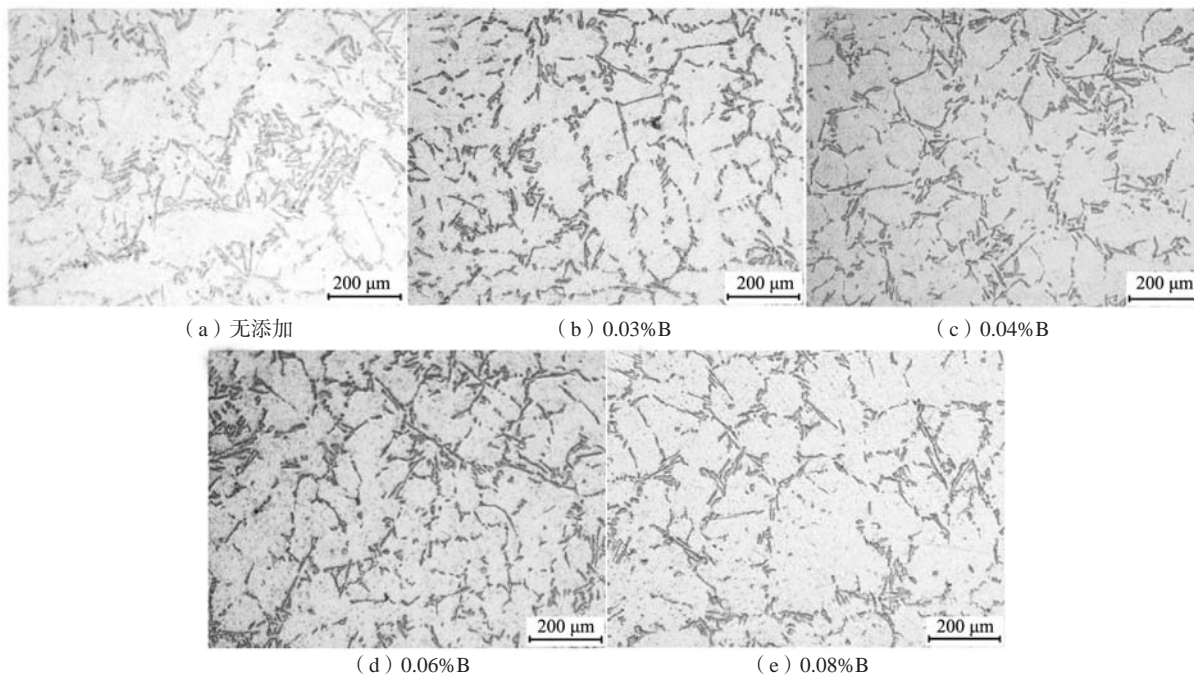


图4 ZL101铝合金添加不同B含量Al-3B金相组织

Fig. 4 Metallographic microstructures of the ZL101 aluminum alloys added Al-3B with different B contents

由图5可知,无添加细化剂ZL101铝合金的 $\alpha$ (Al)平均粒径为157.86  $\mu\text{m}$ ,图4b-e的 $\alpha$ (Al)平均粒径分别为145.35  $\mu\text{m}$ 、130.39  $\mu\text{m}$ 、122.45  $\mu\text{m}$ 、147.56  $\mu\text{m}$ 。由 $\alpha$ (Al)平均粒径大小可以看出,添加不同B含量细化剂都可以不同程度细化ZL101铝合金,但并非B含量越高细化效果越好,这与李宏宝等<sup>[10]</sup>研究一致。当添加0.08%Al-3B细化ZL101铝合金时,过量的B原子只会以

溶质原子的形式或以 $\text{AlB}_2$ 相的形式存在于熔体中, $\alpha$ (Al)平均粒径增大是由于过量的细化剂会发生团聚并未发挥有效的异质形核作用,从而使形核率下降。因此,0.06%Al-3B为细化ZL101铝合金的最优添加量。

图6所示为不同参数旋转磁场作用下的ZL101铝合金金相组织。由图6b-d可以看出,共晶硅在 $\alpha$ (Al)基体上分布更加均匀, $\alpha$ (Al)数量增多,共晶硅分布不

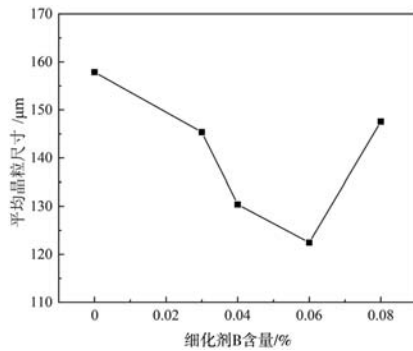


图5 细化剂B含量与合金平均晶粒尺寸关系  
Fig. 5 Relationship between the content of the refiner B and the average grain size of the alloy

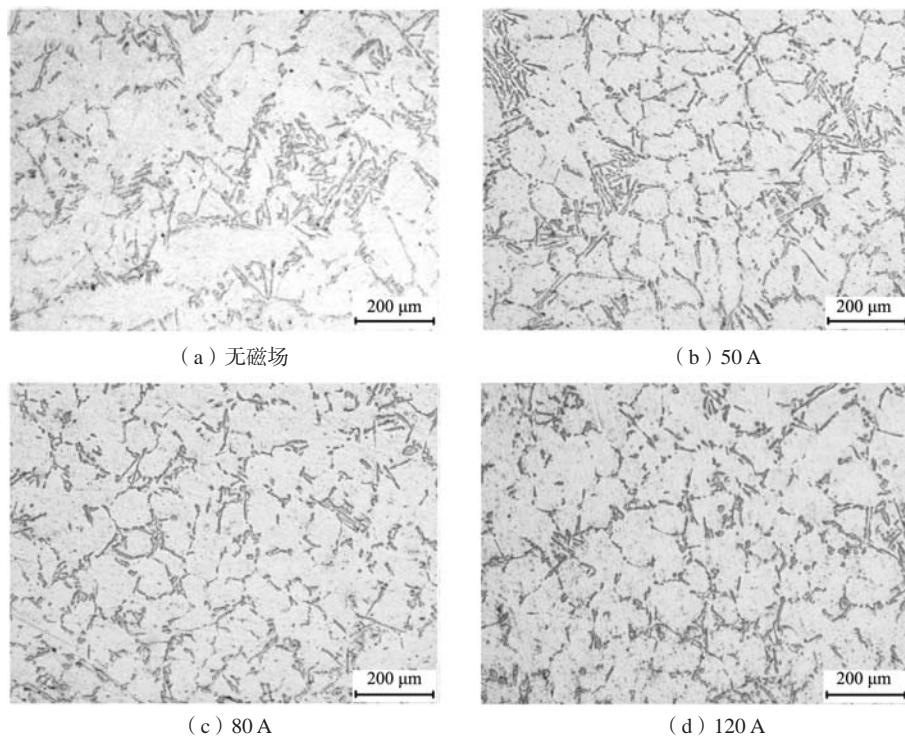


图6 旋转磁场对ZL101铝合金金相组织的影响

Fig. 6 Effect of rotating magnetic field on metallographic microstructure of the ZL101 aluminum alloy

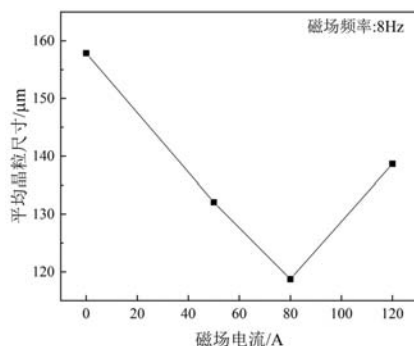


图7 旋转磁场参数与合金平均晶粒尺寸关系  
Fig. 7 Relationship between the rotating magnetic field parameters and average grain size of the alloy

再绵密, 尺寸变细小。共晶硅面积分数先减小后增大, 在旋转磁场电流参数为80 A、8 Hz时, 面积分数达到最小为10.427%。随着电流增大, 增加了共晶反应过程中先析出Si相的形核数量, 从而使放射状共晶硅的长度变短, 分布变得稀疏, 部分变成细小纤维<sup>[10]</sup>。由于旋转磁场在金属液中产生感应电流, 产生电磁力推动熔体运动, 当电磁力超过枝晶自身的强度时, 造成枝晶破碎, 形成游离晶体, 从而促使 $\alpha$  (Al) 形核率增大<sup>[16-18]</sup>。

图6b-d的 $\alpha$  (Al) 平均粒径分别为132.07  $\mu\text{m}$ 、118.73  $\mu\text{m}$ 、138.66  $\mu\text{m}$ 。旋转磁场电流强度与 $\alpha$  (Al) 平均粒径尺寸的关系如图7所示, 其中80 A、8 Hz旋转磁场作用下 $\alpha$  (Al) 平均粒径达到最小118.73  $\mu\text{m}$ 。但并非磁

场电流越高越好, 磁场电流过高, 受焦耳热的影响, 合金冷却速度降低, 使晶粒不能达到较好的细化效果。当旋转磁场电流为80 A、频率8 Hz时, 处理ZL101铝合金效果最好。

细化剂和旋转磁场处理ZL101铝合金均使 $\alpha$  (Al) 形核率增加,  $\alpha$  (Al) 平均粒径变小。从定量分析可知, 细化剂细化ZL101铝合金的 $\alpha$  (Al) 平均粒径最小达到122.45  $\mu\text{m}$ , 而旋转磁场细化ZL101铝合金的 $\alpha$  (Al) 平均粒径最小达到118.73  $\mu\text{m}$ , 旋转磁场处理可以获得尺寸更小的 $\alpha$  (Al) 晶粒。细化剂通过增加异质形核增加熔体中的 $\alpha$  (Al) 形核数量, 从而细化铸态组织, 并且共晶硅的长度和厚度明显减小。旋转磁场

通过强制对流使枝晶难以长大或者被剪切,形成新的晶核,增加 $\alpha$ (Al)的形核率,同时强制对流将凝固前沿形成的晶核带到温度较高的熔体中部,进一步抑制晶核的长大,减小晶核生长速度。相比于Al-3B细化剂细化处理的ZL101铝合金,旋转磁场处理后的ZL101铝合金组织均匀性更好,并且旋转磁场细化熔体在形成大量晶核的同时又抑制了晶粒的生长速度。定量和定性分析表明,旋转磁场细化处理ZL101铝合金的细化效果优于细化剂处理。

### 2.3 拉伸性能对比分析

图8所示为不同电流参数旋转磁场处理后的ZL101铝合金的力学性能对比。经相同频率不同电流旋转磁场处理的ZL101铝合金的抗拉强度及伸长率均比未处理的有显著提高。但随着电流增大,抗拉强度与伸长率都呈现先增大后减小的趋势,旋转磁场和电流参数为80 A/8 Hz时,抗拉强度和伸长率均达到最大值,相比于未处理的ZL101铝合金抗拉强度提高10.5%,伸长率提高37.2%,可以确定旋转磁场处理ZL101铝合金的最佳电流参数为80 A/8 Hz。

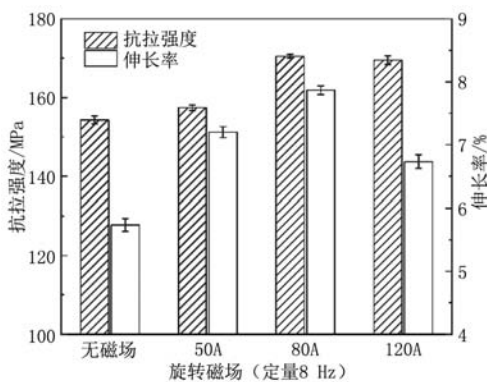


图8 旋转磁场处理ZL101铝合金的力学性能

Fig. 8 Mechanical properties of the ZL101 aluminum alloys treated by rotating magnetic field

如图9所示为不同B含量的Al-3B细化剂处理ZL101铝合金的力学性能。随着B含量的增大,抗拉强度与伸长率都呈现先增大后减小的趋势,含量为0.06%B的Al-3B处理合金的抗拉强度和伸长率均达到最大值,相比于未经细化处理的ZL101铝合金,抗拉强度提高9.4%,伸长率提高34.9%,B含量0.06%为Al-3B细化剂最佳含B量。

Al-3B细化剂和旋转磁场处理提升ZL101铝合金力学性能与合金微观组织密切相关。由上述金相组织对比可知,在ZL101铝合金中加入0.06%B的Al-3B细化剂可使 $\alpha$ (Al)平均粒径达到最小,对ZL101铝合金施加

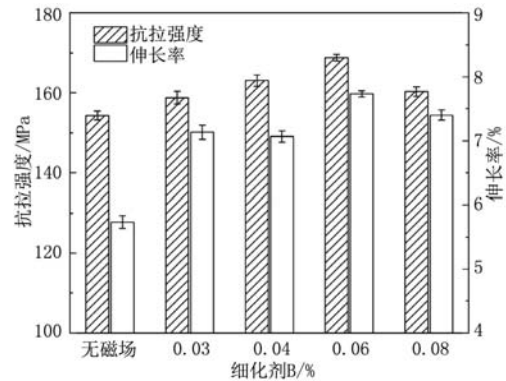


图9 Al-3B细化剂处理ZL101铝合金的力学性能

Fig. 9 Mechanical properties of the ZL101 aluminum alloys treated with the Al-3B refiner agent

电流为80 A,频率为8 Hz的旋转磁场可使 $\alpha$ (Al)平均粒径达到最小。由于 $\alpha$ (Al)相的塑性比共晶组织更好,从而使合金的伸长率得到大幅度的提高。基于细化剂与旋转磁场处理对ZL101铝合金细化处理的不同效果和不同机制,进一步研究化学与物理复合处理的优化参数及工艺,对于实现铝合金力学性能再提升将具有重要的现实意义。

## 3 结论

(1) 随着ZL101铝合金中Al-3B细化剂含B量增大, $\alpha$ (Al)平均晶粒直径呈现先减小后增大的变化趋势,当Al-3B的B含量为0.06%时, $\alpha$ (Al)的平均晶粒直径达到最小。抗拉强度和伸长率比未处理ZL101铝合金分别提高9.4%和34.9%。

(2) 对ZL101铝合金施加旋转磁场,随着磁场电流增大, $\alpha$ (Al)平均晶粒直径呈现先减小后增大的变化趋势,当旋转磁场电流参数为80 A、8 Hz时, $\alpha$ (Al)平均晶粒直径达到最小,与未处理ZL101铝合金相比,抗拉强度和伸长率分别提高了10.5%和37.2%。

(3) Al-3B细化剂处理ZL101铝合金的细化机制是增加异质形核,使过冷度降低,抑制共晶硅生长,促进 $\alpha$ (Al)的形核和生长。旋转磁场处理ZL101铝合金的细化机制是电磁力推动熔体运动,造成枝晶碎断,导致形核速率增加,同时强制对流将凝固前沿形成的晶核带到温度较高的熔体中部,抑制晶核的长大,减小晶核生长速度。

(4) Al-3B细化剂和旋转磁场处理ZL101铝合金熔体的细化效果比较分析表明,二者细化效果及细化机制均有不同,如何用适当级别的细化剂与恰当的磁场参数以优化的方式相复合,对ZL101实施复合处理以获得更好的细化效果,值得进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] 邹明聪, 赵忠兴, 冯志军, 等. ZL101钠盐变质处理过冷度、变质时间和加入量的关系研究 [J]. 铸造, 2019, 68 (2): 158-161.
- [2] 刘政, 胡咏梅. 稀土细化剂对ZL101半固态组织影响的研究 [J]. 铸造, 2008 (6): 596-599.
- [3] 毛卫民, 李树索, 赵爱民, 等. 电磁搅拌Al-24%Si合金的显微组织 [J]. 中国有色金属学报, 2001 (5): 819-823.
- [4] ZHU Cheng, ZHAO Zhi-hao, ZHU Qing-feng, et al. Structures and macrosegregation of a 2024 aluminum alloy fabricated by direct chill casting with double cooling field [J]. China Foundry, 2022, 19 (1): 1-8.
- [5] 袁文文. 铝合金熔体快速热分析系统的研制 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [6] 黄长虹, 秦华, 叶锦华. ZL101铝硅合金中钛硼细化剂添加比例的影响 [J]. 精密成形工程, 2018, 10 (2): 3.
- [7] LI Mingjun, MURAKAMI Yuichiro, MATSUI Isao, et al. Imposition time dependent microstructure formation in 7150 aluminum alloy solidified by an electromagnetic stirring technique [J]. Materials Transactions, 2018.
- [8] 邢清源, 孟令刚, 杨守杰, 等. 电磁搅拌对5356铝合金显微组织的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (2): 112-117.
- [9] 袁文文. 铝合金熔体快速热分析系统的研制 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [10] 李宏宝, 涂浩, 彭浩平, 等. Al-3B变质共晶铝硅合金的显微组织与力学性能 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29 (8): 1599-1605.
- [11] 刘志学, 李伟伟, 程巨强. 硼细化处理方法对铸造铝硅合金组织和性能的影响 [J]. 中国铸造装备与技术, 2016 (4): 27-29
- [12] 郑婷. 旋流自孕育Al-Si合金铸锭的组织性能研究 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2019.
- [13] LI Y Z, MANGELINCK-Noël N, ZIMMERMANN G, et al. Modification of the microstructure by rotating magnetic field during the solidification of Al-7 wt. % Si alloy under microgravity [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 836.
- [14] 余建波. 电、磁复合效应对金属凝固组织的影响 [D]. 上海: 上海大学, 2009.
- [15] 李庆林, 兰晔峰, 王富寿, 等. 热扩散处理对Al-24%Si合金中初晶硅形态的影响 [J]. 材料热处理学报, 2010 (12): 29-32.
- [16] 赵龙志, 李洋, 张坚, 等. 振动频率对间接超声辅助铸造Al-24%Si合金的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2016, 26 (6): 1167-1174.
- [17] 邢清源, 孟令刚, 杨守杰, 等. 电磁搅拌对5356铝合金显微组织的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (2): 112-117.
- [18] 曹富春. Al-5Ti-1B和Al-10Sr-X对ZL101铝合金晶粒细化的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2013, 41 (8): 3.

## Comparative Study on the Effects of Rotating Magnetic Field and Al-3B Refiner Treatment on ZL101 Aluminum Alloy Melt

WANG Xiao-tong, WANG Ao, XIAO Shi-lin, LI Da-yong

(School of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

### Abstract:

The effects of rotating magnetic field and Al-3B refiner treatment on the solidification process, microstructure and mechanical properties of ZL101 aluminum alloy melt were studied by using intelligent temperature recorder, metallographic microscope and tensile testing machine. The comparison results showed that the average grain size of  $\alpha(\text{Al})$  decreased first and then increased with the increase of B content in the refiner, and the tensile strength and elongation increased first and then decreased with the increase of the B content in the refiner. When the B content of Al-3B refiner reached 0.06%, the refining effect was the best. The tensile strength and elongation increased by 9.4% and 34.9%, respectively. With the increase of rotating magnetic field current parameters, the average grain size of  $\alpha(\text{Al})$  decreased first and then increased, tensile strength and elongation increased first and then decreased. The optimal parameter current was 80A, frequency was 8Hz, and the tensile strength and elongation increased 10.5% and 37.2%, respectively. The results showed that the effect of the rotating magnetic field was better than that of the refiner for the ZL101 alloy melt with the same composition.

**Key words:** ZL101 alloy; rotating magnetic field; Al-3B refiner; microstructure; mechanical properties