

# 脉冲磁场对 A356 铝合金凝固组织及硬度的影响

宋志起 王 军 胡朝晟 赵旭东 刘永珍 麻永林  
(内蒙古科技大学材料与冶金学院)

**摘 要** 采用蔡司显微镜(OM)、场发射扫描电镜(FESEM)和维氏硬度计研究了不同电流强度下的脉冲磁场对 A356 铝合金凝固组织和硬度的影响。结果表明,脉冲磁场可以显著细化 A356 铝合金凝固组织中初生  $\alpha$ -Al 相和共晶 Si 相并提高其硬度,其中电流为 100 A 时脉冲磁场细化效果最佳。与未处理相比,脉冲处理试样中初生  $\alpha$ -Al 晶粒平均尺寸下降了 30.97%,共晶 Si 平均尺寸下降了 68.6%,硬度提高了 19.6%。分析了脉冲磁场作用下形核过程,结果表明,脉冲磁场能降低形核激活能,使熔体中原子团的数目增加、尺寸减小,提高形核率。

**关键词** A356 铝合金;脉冲磁场;凝固组织;初生  $\alpha$ -Al 相

**中图分类号** TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.07.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Effects of Pulsed Magnetic Field on Solidification Microstructure and Hardness of A356 Aluminum Alloy

Song Zhiqi, Wang Jun, Hu Chaosheng, Zhao Xudong, Liu Yongzhen, Ma Yonglin  
(Materials and Metallurgy College, Inner Mongolia University of Science and Technology)

**Abstract:** The effects of pulsed magnetic field on the solidification microstructure and hardness of A356 aluminum alloy under different current intensities were investigated by Zeiss microscope(OM), field emission scanning electron microscope(FESEM) and Vickers hardness tester. The results indicate that the primary  $\alpha$ -Al phase and eutectic silicon phase in the solidification structure of A356 aluminum alloy can be refined and the hardness can be improved by pulse magnetic field, where the pulse magnetic field with current intensity of 100 A exhibits the desirable refining effect. Compared with untreated ones, the average size of primary  $\alpha$ -Al grains and eutectic silicon is decreased by 30.97% and 68.6%, respectively, and the hardness is increased by 19.6%. The nucleation process under the action of pulsed magnetic field was analyzed. The results reveal that pulsed magnetic field can reduce the activation energy of nucleation, leading to the increase of atomic clusters and nucleation rate as well as reduction of size in the melt.

**Key Words:** A356 Aluminum Alloy, Pulsed Magnetic Field, Solidification Structure, Primary  $\alpha$ -Al Phase

A356 铝合金流动性好、无热裂倾向、线收缩小及气密性好,且具有密度小、耐腐蚀性良好、易焊接及随铸件壁厚增加强度降低程度小的特点,广泛应用于航空、汽车、动力仪表、工具及民用器械制造等领域<sup>[1-4]</sup>。

随着科技创新与汽车轻量化的不断发展,A356 铸造铝合金产品遇到了由于凝固均质化过程不可控带来的力学性能难以提高的瓶颈<sup>[5-6]</sup>。A356 铝合金微观组织主要是由初生  $\alpha$ -Al 相和共晶 Si 组成。改善初生  $\alpha$ -Al 相和共晶 Si 相的形貌和尺寸是提高 A356 铝合金力学性能、降低铸造缺陷的重要途径。通常从改变相结构

及晶体形态来控制凝固组织,其中,相结构直接受到合金成分和冷却参数等影响,而晶体形态及晶粒尺寸是由凝固过程所决定的。过冷熔体增加过冷度可显著增加固液相吉布斯自由能差、降低临界形核功,这种体系能量干预可达到晶粒细化的目的。如快速凝固技术,尽管能得到细小的晶粒尺寸,甚至纳米晶,但由于其无法制备大尺寸铸锭而难以实现工业化生产<sup>[7]</sup>。异质形核则更容易实现大截面铸锭的晶粒细化,如在铝合金中加入 Al-5Ti-1B 中间合金能实现晶粒的显著细化,但形成的 TiB<sub>2</sub> 在金属中偏聚会损害最终产品的性能<sup>[8-10]</sup>。

收稿日期:2022-08-17;修改稿收到日期:2022-09-30  
基金项目:内蒙古自治区科技计划资助项目(2021GG0096)  
第一作者简介:宋志起,男,1995 年出生,硕士研究生,内蒙古包头(014010),E-mail:1670341030@qq.com  
通信作者:王军,男,1968 年出生,副教授,内蒙古包头(014010),E-mail:jwkwj@imust.edu.cn  
引用格式:宋志起,王军,胡朝晟,等. 脉冲磁场对 A356 铝合金凝固组织及硬度的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(7):917-922.  
SONG Z Q, WANG J, HU C S, et al. Effects of pulsed magnetic field on solidification microstructure and hardness of A356 aluminum alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(7):917-922.

脉冲磁场作为一种新型晶粒细化方法,适用于多种铝合金,操作方便,可以满足铝合金洁净度要求、节能等特点。脉冲磁场可以产生较大的  $dB/dt$ ,这种间歇的非接触式能量渗入对凝固结构有较强的冲击效应,是铝合金晶粒细化方法的研究热点之一<sup>[11]</sup>。张磊等<sup>[12]</sup>研究发现,在低压脉冲磁场作用下,Al-12.4Si 合金凝固组织中的初生  $\alpha$ -Al 相和共晶 Si 相均得到明显细化,且随着放电电压增加,共晶 Si 相的平均尺寸逐渐减小。GAO Y L 等<sup>[13]</sup>将脉冲磁场应用于纯铝,发现纯铝的组织均转变为均匀细小的等轴晶。周全等<sup>[14]</sup>在 ZL114A 合金的凝固过程中施加低压脉冲磁场处理,研究其对凝固组织的影响,发现施加脉冲磁场处理能够使初生  $\alpha$ -Al 晶粒由发达的树枝晶转变为细小的蔷薇状晶粒。谢东原等<sup>[15]</sup>研究了脉冲磁场对石墨型铸造 Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金凝固组织和力学性能的影响,发现当单次脉冲能量在 0~57.6 J 范围内或脉冲周期在 0.1~1 s 范围内时,随着单次脉冲能量的增加或脉冲周期的减小,合金晶粒尺寸逐渐减小,第二相体积分数逐渐增加,合金的室温和高温力学性能逐渐提高。但是这些研究都是在合金凝固过程中施加脉冲磁场,而对在合金液相线温度以上的熔体状态下进行脉冲磁场处理的研究报道较少。本研究基于脉冲磁场携带能量和较强冲击的特性,在液相线温度以上对 A356 铝合金熔体施加脉冲磁场,并分别对未施加和施加脉冲磁场铸造生产的 A356 铝合金铸锭进行微观组织观察与性能检测,分析脉冲磁场对 A356 铝合金微观组织与硬度的影响,并进行机理探究,旨在为其应用提供参考。

1 试验方法

本试验所用设备由顶置脉冲磁场晶粒细化装置(感应线圈与叠片铁芯)、电阻加热炉、专用脉冲电源柜、不锈钢结晶器组成,试验装置见图 1。试验材料为 A356 铝合金,其化学成分见表 1。将 A356 铝合金铸坯经电阻加热炉重熔至 750 ℃后,保温 300 s,静置至 735 ℃时,启动脉冲电源,施加脉冲磁场,待熔体温度降至 720 ℃时浇入碳钢模具中进行凝固冷却(模具预热至 300 ℃)。设定电压为 100 V,频率为 20 Hz,占空比为 20%,电流分别为 80、100 和 120 A。待铸锭凝固温度降到 300 ℃左右,将铸锭取出并放入冷却水中冷却。取未施加磁场与不同磁场参数作用下的铸锭进行径向切割,截取 10 mm×9 mm×10 mm 的试样,取样位置为铸锭 R/2 处的上、下两层部分,见图 2。然后在 120、200、400、600 和 800 号砂纸上依次打磨,之后在 HMP-2AB 型自动抛光机上抛光。再用 Keller 试剂腐蚀 15 s 后,采用无水酒精清洗并用冷风吹干。采用蔡司 Smart

Zoom 5 显微镜(OM)、Sigma-300 场发射扫描电镜(FESEM)和 JED-2300T 能谱仪(EDS)观察分析 A356 铝合金微观组织并利用 Image-pro plus 6.0 软件测量晶粒尺寸,采用 Q10A+全自动维氏硬度计(HV)进行硬度检测,腐蚀剂采用 Keller 试剂。

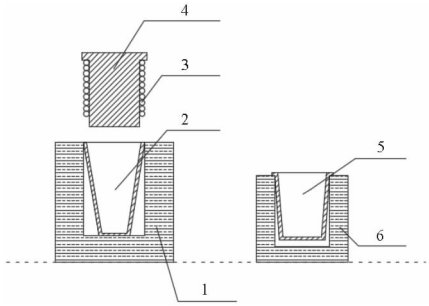


图 1 试验装置

Fig.1 Apparatus for test

1、6.电阻加热炉 2.石墨坩埚 3.感应线圈 4.叠片铁芯 5.碳钢模具

表 1 A356 铝合金的化学成分

| Tab.1 Chemical composition of A356 aluminum alloy % |       |         |         |       |         |       |       |         |    |
|-----------------------------------------------------|-------|---------|---------|-------|---------|-------|-------|---------|----|
| $w_B$                                               |       |         |         |       |         |       |       |         |    |
| Si                                                  | Fe    | Cu      | Mn      | Mg    | Zn      | Ti    | Ni    | Sr      | Al |
| 7.33                                                | 0.114 | 0.002 8 | 0.016 3 | 0.377 | 0.012 1 | 0.113 | 0.004 | 0.010 0 | 余量 |

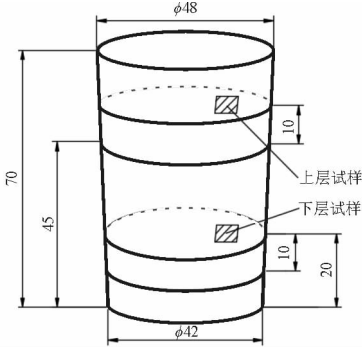


图 2 取样位置

Fig.2 Sampling position

2 试验结果与讨论

2.1 脉冲磁场对 A356 铝合金初生  $\alpha$ -Al 相的影响

图 3 为不同电流下脉冲磁场处理后 A356 铝合金的金相组织。可以看出,施加脉冲磁场处理后,A356 铝合金凝固组织中的初生  $\alpha$ -Al 相得到了显著细化。未施加脉冲磁场处理时,A356 铝合金凝固组织中的初生  $\alpha$ -Al 相呈粗大的树枝状和花瓣状,见图 3a、图 3e;施加电流为 80 A 的脉冲磁场处理后,初生  $\alpha$ -Al 相的树枝状和花瓣状晶粒细化,呈等轴化趋势,见图 3b、图 3f;施加电流为 100 A 的脉冲磁场处理后,初生  $\alpha$ -Al 相的晶粒进一步细化,出现了大量等轴状短棒的晶粒,见图 3c、图 3g;施加电流为 120 A 的脉冲磁场处理后,初生  $\alpha$ -Al 相晶粒的等轴化趋势减小,但与未施加脉冲磁场处理的初

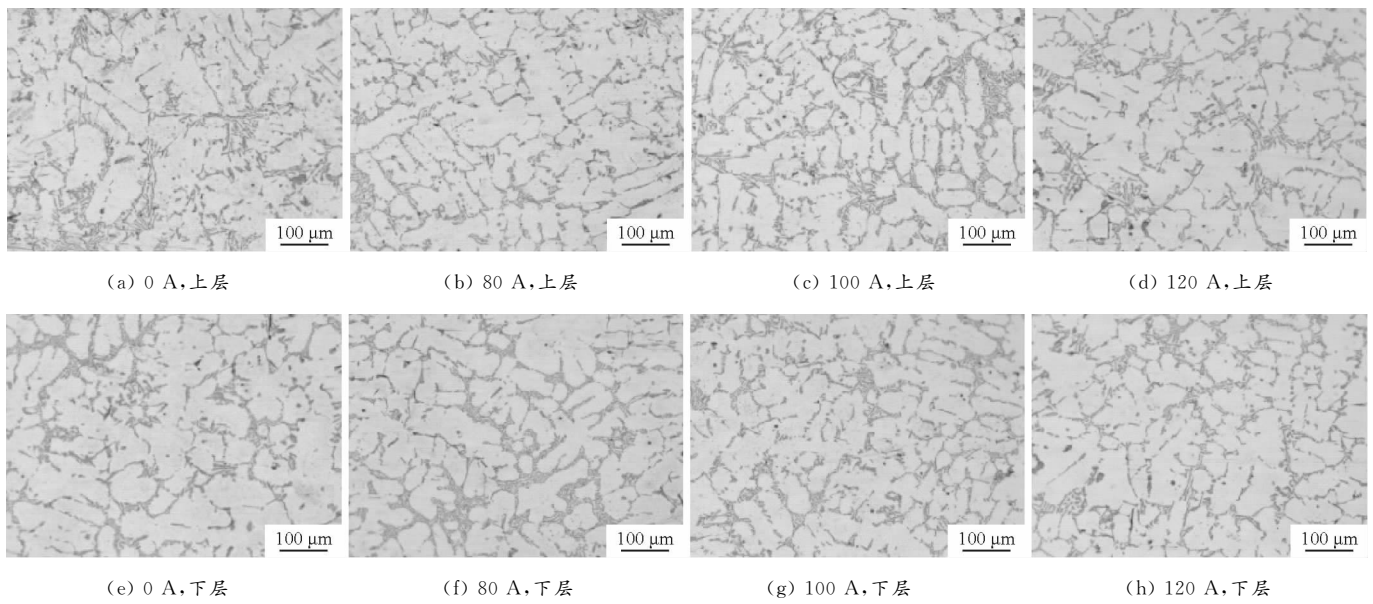


图 3 不同电流下脉冲磁场处理后 A356 铝合金的金相组织

Fig.3 Metallographic structure of A356 aluminum alloy treated by pulsed magnetic field with different current intensities

生  $\alpha$ -Al 相晶粒相比,仍然细化,见图 3d、图 3h。

图 4 为施加不同电流脉冲磁场处理后 A356 铝合金初生  $\alpha$ -Al 相平均尺寸和上、下两层部分试样平均晶粒尺寸差。可以看出,未施加脉冲磁场处理时,试样上层初生  $\alpha$ -Al 相晶粒平均尺寸为 128.54  $\mu\text{m}$ ,下层为 112.75  $\mu\text{m}$ ,上、下两层部分试样平均尺寸差为 12.28%。施加电流为 80、100 和 120 A 的脉冲磁场处理后,试样上层初生  $\alpha$ -Al 相晶粒的平均尺寸分别为 101.90、88.73 和 104.20  $\mu\text{m}$ ;下层初生  $\alpha$ -Al 相晶粒的平均尺寸分别为 97.71、86.80 和 98.10  $\mu\text{m}$ ;上、下两层部分试样平均尺寸差降为 4.11%、2.17% 和 5.85%。可以看出,不同电流的脉冲磁场对 A356 铝合金凝固组织中初生  $\alpha$ -Al 相的细化效果不同,其中施加电流强度为 100 A 脉冲磁场处理时,初生  $\alpha$ -Al 相晶粒细化效果最佳,上、下层部分试样初生  $\alpha$ -Al 相晶粒平均尺寸较未处理试样相比分别减小了 30.97% 与 23.02%。分析可知,脉冲磁场产生

的电磁能作用于熔体体系的原子团,使形核激活能降低,晶核数目增加,形核率提高,初生  $\alpha$ -Al 相显著细化。施加脉冲磁场处理后,铸锭上、下部分初生  $\alpha$ -Al 晶粒平均尺寸相差减小,说明脉冲磁场作用下使得整体合金凝固组织中初生  $\alpha$ -Al 晶粒分布更加均匀。施加脉冲磁场后,合金熔体内 Al-Al 原子团尺寸减小,数目增加,使得凝固过程中初生  $\alpha$ -Al 晶粒结晶形核数目增加,这是促使晶粒细化且均匀分布的主要原因。

2.2 脉冲磁场对 A356 铝合金共晶 Si 相的影响

图 5 为不同电流强度脉冲磁场下 A356 铝合金中共晶 Si 相的 FESEM 照片。可以看出,经过脉冲磁场处理后的 A356 铝合金试样中共晶 Si 相形貌和尺寸均有较大变化。未施加脉冲磁场处理时,共晶 Si 相呈粗大的长针状和片状,共晶 Si 平均尺寸为 28.86  $\mu\text{m}$ ,共晶 Si 之间的间距为 12.43  $\mu\text{m}$ ,见图 5a。当电流为 80 A 时,共晶 Si 相由粗大的长针状和片状转变为长纤维状,片状共晶 Si 尺寸大幅度减小,共晶 Si 平均尺寸为 15.50  $\mu\text{m}$ ,共晶 Si 间距为 8.75  $\mu\text{m}$ ,见图 5b;随着电流增加,共晶 Si 相得到进一步的细化,当电流增大到 100 A 时,共晶 Si 相呈现细小的短纤维状和少量的颗粒状,共晶 Si 平均尺寸为 9.07  $\mu\text{m}$ ,共晶 Si 间距为 5.42  $\mu\text{m}$ ,见图 5c。当电流增大到 120 A 时,共晶 Si 相的尺寸又逐渐增大,出现长纤维状(见图 5d),共晶 Si 平均尺寸为 18.12  $\mu\text{m}$ ,共晶 Si 间距为 9.83  $\mu\text{m}$ 。与未施加脉冲磁场试样的共晶 Si 相相比,施加电流为 80、100 和 120 A 的脉冲磁场后,其共晶 Si 平均尺寸分别减小了 46.3%、68.6% 和 37.3%,共晶 Si 的间距分别减小了 29.6%、56.4% 和 20.9%(见图 6)。当向 A356 铝合金熔体施加

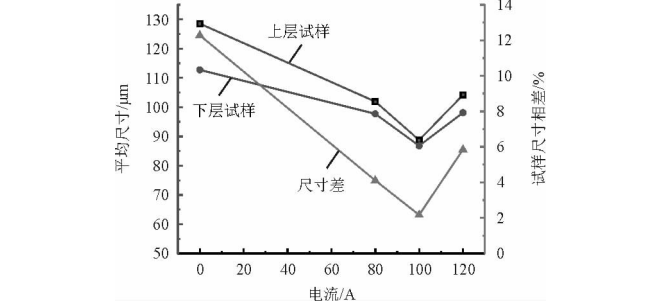


图 4 不同电流脉冲磁场作用下 A356 铝合金试样  $\alpha$ -Al 晶粒平均尺寸变化

Fig.14 Average grain size variation of A356 aluminum alloy specimen under pulsed magnetic field with different current intensities

脉冲磁场时,增加了合金液的能量,增大了合金熔体的能量起伏与结构起伏,减小了形核激活能,使 A356 铝合金熔体的液态结构发生改变,增加了熔体体系中 Al-

Si 原子团数目。当 A356 铝合金熔体达到凝固条件时,大量存在的 Al-Si 原子团便成为结晶核心,共晶 Si 的数目显著增加,尺寸减小,共晶 Si 相得到显著细化。

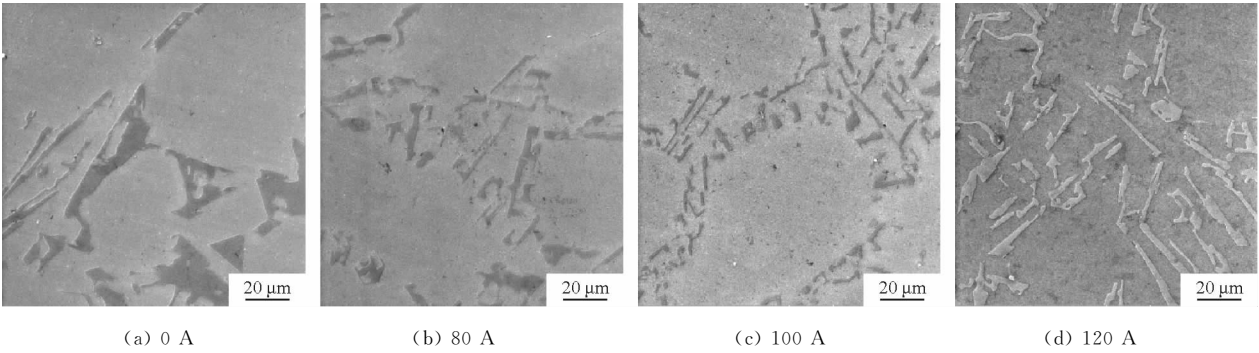


图 5 不同电流脉冲磁场下 A356 铝合金共晶 Si 相的 FESEM 照片

Fig.5 FESEM images of eutectic Si phase in A356 aluminum alloy specimen under pulsed magnetic field with different current intensities

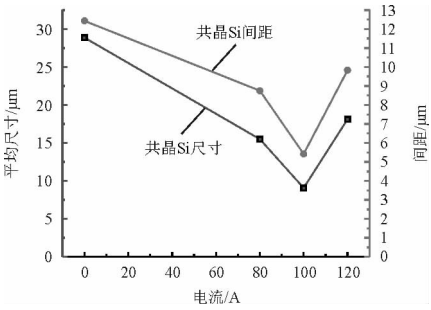


图 6 不同电流脉冲磁场下 A356 铝合金中共晶 Si 平均尺寸和间距

Fig.6 Average size variation of eutectic Si particles in A356 aluminum alloy specimen under pulsed magnetic field with different current intensities

2.3 A356 铝合金中 Fe 相的形貌

一般情况下,当 Al-Si 合金中 Fe 含量不高于 0.6% 时,铸件组织中只出现汉字状、鱼骨状或不规则块状的  $\alpha$ -Fe 相,呈亮灰色<sup>[16-17]</sup>。图 7 为不同形貌  $\alpha$ -Fe 相的 FESEM 及 EDS 分析,发现此  $\alpha$ -Fe 相由 Al、Fe 和 Si 组成,分别占 86.55%、6.05%和 7.39%,见图 7c。图 7b 的 FESEM 照片中出现裂解状的块状  $\alpha$ -Fe 相,发现此 Fe 相由 Al、Fe、Si 和 Mg 组成,分别占 55.55%、14.95%、24.78%和 4.72%,见图 7d。Mg 的加入不会改变原有  $\alpha$ -Fe 相的形貌<sup>[18]</sup>,但 Mg 对富 Fe 相粒子具有裂解作用,使  $\alpha$ -Fe 相断裂、裂解,最终呈块状裂解状,且块状 Fe 相周围的细小颗粒为  $\alpha$ -Fe 相外围盘旋状结构的断

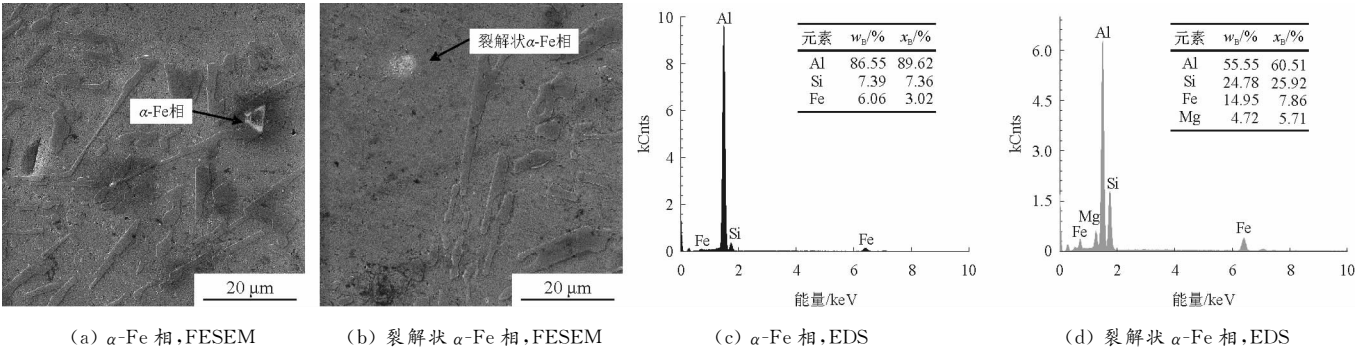


图 7 不同形貌  $\alpha$ -Fe 相的 FESEM 及 EDS 能谱

Fig.7 FESEM images and EDS results of  $\alpha$ -Fe phases with different morphologies

面。

2.4 脉冲磁场对 A356 铝合金硬度的影响

图 8 为不同电流脉冲磁场下 A356 铝合金的硬度。可以看出,随着脉冲磁场电流的增加,试样的硬度呈现先增大后减小的变化。未施加脉冲磁场处理时试样的硬度(HV)为 68.7,当电流为 80、100 和 120 A 时,试样

的硬度(HV)分别为 77.4、82.16 和 75.06,较未处理的分别增加了 12.7%、19.6%和 9.3%。A356 铝合金的硬度主要取决于合金凝固组织中共晶 Si 的尺寸和形貌,共晶 Si 的尺寸与间距越小,合金的硬度越高。结合图 6 可知,电流为 100 A 时的脉冲磁场作用下,铸锭凝固组织中的共晶 Si 平均尺寸与颗粒间距最小,因此硬度最高。

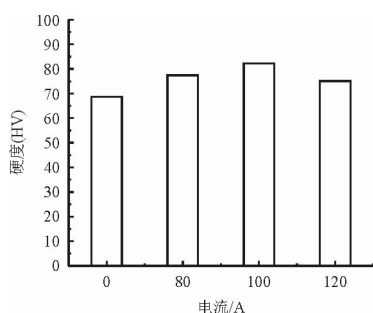


图8 不同电流脉冲磁场下 A356 铝合金的硬度

Fig.8 Hardness variation of A356 aluminum alloy under pulsed magnetic field with different current intensities

## 2.5 脉冲磁场作用下形核理论分析

本试验是在石墨坩埚上方对 A356 铝合金熔体进行脉冲磁场处理。施加脉冲磁场后,在脉冲磁场携带的能量和冲击效应作用下,金属熔体内的原子团大量聚集。脉冲磁场处理温度是在液相线温度以上,在液相线以上一定温度范围内,原子团的尺寸较大,原子团的数量、大小与分布比较均匀。脉冲磁场处理后,合金熔体内原子团进行相互碰撞与结合,原子团分布更加均匀,在能量起伏与结构起伏下,原子团更容易形成晶胚<sup>[19]</sup>。

对脉冲磁场作用下晶粒的形核机制进行分析,由均态核化速率条件可知,在不考虑应变能时,脉冲磁场作用下系统总自由能变化( $\Delta G_{\text{tot}}$ )为<sup>[20]</sup>:

$$\Delta G_{\text{tot}} = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_m + 4\pi r^2 \sigma_{\text{sl}} \quad (1)$$

式中, $\Delta G_m$ 为单位体积磁场中固液相吉布斯自由能增量,是形核驱动力; $r$ 为晶核能稳定生长的临界半径; $\sigma_{\text{sl}}$ 为液-固界面能。当脉冲磁场作用于合金熔体,磁场中固-液相吉布斯自由能增量计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$\Delta G_m = \Delta G_v + \frac{\mu_0 \Delta \chi^{(\text{S-L})} H^2}{2} \quad (2)$$

式中, $\Delta G_v$ 为单位体积吉布斯自由能差; $\mu_0$ 为真空磁导率; $\Delta \chi^{(\text{S-L})}$ 为固液相体积磁化率的变化; $H$ 为磁场强度。

脉冲磁场作用下形核激活能的计算为<sup>[22]</sup>:

$$\Delta G_r^* = \frac{16\pi \sigma_{\text{sl}}^3}{3 (\Delta G_m)^2} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)可得:

$$\Delta G_r^* = \frac{16\pi \sigma_{\text{sl}}^3}{3 (\Delta G_v + \frac{\mu_0 \Delta \chi^{(\text{S-L})} H^2}{2})^2} \quad (4)$$

脉冲磁场的电磁能计算为<sup>[23]</sup>:

$$\omega = \frac{B^2}{2\sqrt{\mu_r \mu_0}} \quad (5)$$

式中, $\omega$ 为磁场密度; $B$ 为磁感应强度; $\mu_r$ 为相对磁导

率。

磁感应强度:

$$B = H \mu_0 \mu_r \quad (6)$$

将式(5)、式(6)代入式(4)可得到:

$$\Delta G_r^* = \frac{16\pi \sigma_{\text{sl}}^3}{3 (\Delta G_v + \omega \Delta \chi^{(\text{S-L})} \mu_0 / \sqrt{\mu_r})^2} \quad (7)$$

分析式(7)可知,脉冲磁场作用下, $\Delta G_r^*$ 减小,即合金熔体结晶所需的形核激活能降低。

图9为施加脉冲磁场后形核激活能的变化趋势。由图9可知,在铝合金熔体的过冷度不变时,脉冲磁场带来的脉冲电磁能将减小形核所需的形核激活能,而形核激活能的降低将会影响液相线以上一定温度区间内原子团的演变规律<sup>[24-25]</sup>:

$$R(T) = r^* \left\{ \alpha \frac{Z_1}{2} \left[ \frac{1 + C_0}{C_0} \exp \frac{\Delta G_r^*}{k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_m} \right) \right] - 1 \right\} \quad (8)$$

$$(T_0 \leq T \leq T_c)$$

式中, $R(T)$ 为  $T$  温度下原子团的平均半径; $\alpha$ 为几何形状因子, $0 < \alpha \leq 1$ ;  $Z_1$ 为金属熔化前的配位数; $r^*$ 为原子团中原子之间的距离; $k$ 为玻尔兹曼常数; $C_0$ 为熔点处被激活原子的相对浓度; $T_m$ 为熔点; $T_0$ 为过冷熔体中临界形核温度; $T_c$ 为熔体从液态到气态转变过程中发生第一次原子团失稳的温度。

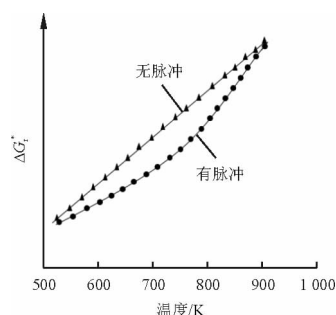


图9 施加脉冲磁场后形核激活能的变化趋势

Fig.9 Variation of nucleation activation energy after applying pulsed magnetic field

从式(8)可知,形核激活能的变化,会影响原子团的平均半径,激活能减小,熔体中原子团尺寸减小,数目则会增多,这是形核过程中形核率提高的主要原因<sup>[26]</sup>。在此试验中脉冲磁场改变了 A356 铝合金熔体的结构,且脉冲磁场作用下,Al-Al、Al-Si 原子团数目增多,分布更加均匀,当 A356 铝合金熔体达到凝固条件时,大量存在的 Al-Al、Al-Si 原子团便成为结晶核心,形核并长大,使凝固过程发生改变,从而使 A356 铝合金凝固组织中的初生  $\alpha$ -Al 相和共晶 Si 相得到显著细化,最终提高了其硬度。

### 3 结 论

(1) 脉冲磁场可以显著细化 A356 铝合金凝固组织中初生  $\alpha$ -Al 相和共晶 Si 相, 电流为 100 A 的脉冲磁场细化效果最佳。与未处理相比, 试样初生  $\alpha$ -Al 晶粒平均尺寸最大下降了 30.97%, 共晶 Si 平均尺寸下降了 68.6%。

(2) 脉冲磁场处理可以提高 A356 铝合金的硬度, 电流为 100 A 时试样硬度(HV)最高, 为 82.16, 较未处理时增加了 19.6%。

(3) 脉冲磁场作用于合金熔体, 可以降低形核激活能, 使 A356 铝合金熔体中 Al-Al、Al-Si 原子团尺寸减小, 数目增加, 形核率提高, 最终使凝固组织中的初生  $\alpha$ -Al 相和共晶 Si 相得到显著细化。

#### 参 考 文 献

- [1] EJIOFOR J M, REDDY R G. Effects of porous carbon on sintered Al-Si-Mg matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1997, 6(6): 785-791.
- [2] ATXAGA G, PELAYO A, IRISARRI A M. Effect of microstructure on fatigue behavior of cast Al-7Si-Mg alloy[J]. Mater. Sci. Tech., 2001, 17(44): 446-450.
- [3] SEBAIE O E I, SAMUEL A M, SAMUEL F H, et al. The effects of mischmetal, cooling rate and heat treatment on the hardness of A319.1, A356.2 and A413.1 Al-Si cast-ing alloys[J]. Mater. Sci. Eng., 2008, A456: 241-252.
- [4] FARAJI M, KATGERMAN L. Distribution of trace elements in a modified and grain refined aluminium-silicon hypoeutectic alloy[J]. Micron, 2010, 41: 554-559.
- [5] 周尧和, 胡壮麒, 介万奇. 凝固技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [6] 沈宁福, 汤亚力, 关绍康, 等. 凝固理论进展与快速凝固[J]. 金属学报, 1996, 32(7): 673-684.
- [7] 弗得良捷尔. 高强度变形铝合金[M]. 吴学译. 上海: 上海科学技术出版社, 1963.
- [8] 李建国, 马洪涛, 张柏清, 等. Al-Ti-B 合金的组织分析[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 801-805.
- [9] SIGWORTH G K. Communication on mechanism of grain refinement in aluminum[J]. Scripta Materialia, 1996, 34(6): 919-922.
- [10] 闫敬明, 黎平, 左孝青, 等. Al-Ti-B 晶粒细化剂研究进展: 细化机理及第二相控制[J]. 材料导报, 2020, 34(9): 9 152-9 157.
- [11] 闫春雷, 麻永林, 邢淑清, 等. 磁场对 Al-Si-Cu-Mg 合金微观组织与宏观偏析的影响[A]//第五届全国电磁冶金与强磁场材料科学年会论文集[C]. 重庆, 2020.
- [12] 张磊, 袁秀妹, 尧军平. 低压脉冲磁场对 Al-12.4Si 合金组织与力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(11): 1 074-1 077.
- [13] GAO Y L, LI Q S, GONG Y Y, et al. Comparative study on structural transformation of low-melting pure Al and high-melting stainless steel under external pulsed magnetic field[J]. Materials Letters, 2007, 61(18): 4 011-4 014.

- [14] 周全, 陈乐平, 尹健. 低压脉冲磁场和微量 Sr 对 ZL114A 合金凝固组织的影响[J]. 铸造技术, 2011, 32(2): 206-209.
- [15] 谢东原, 刘峰, 周全, 等. 脉冲磁场对石墨型铸造 Mg-Y-Cu-Zr-Sr 合金凝固组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(9): 1 109-1 114.
- [16] 汪黎. Fe 对 A356 铸造铝合金性能的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [17] 唐奇. A356 铝合金中富 Fe 相组织演变规律及控制[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [18] 彭淳. 铸造铝合金中有害铁相的变质及去除技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [19] FAN Z, WANG Y, XIA M, et al. Enhanced heterogeneous nucleation in AZ91D alloy by intensive melt shearing[J]. Acta Materialia, 2009, 57(16): 4 891-4 901.
- [20] BAI Q, MA Y, XING S, et al. Refining of a DC-casting aluminum alloy structure using surface electromagnetic pulsing[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(12): 1 828-1 834.
- [21] BAI Q, MA Y, XING S, et al. Nucleation and grain refinement of 7A04 aluminum alloy under a low-power electromagnetic pulse[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(2): 857-863.
- [22] 鲍鑫宇. 矩形波磁场下 7A04 铝合金凝固数值模拟和实验研究[D]. 内蒙古包头: 内蒙古科技大学, 2019.
- [23] 张玉民, 戚伯云. 电磁学(第 2 版)[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [24] 弭光宝, 李培杰, 何良菊. 金属熔体的结构与性质 II——液相线以上不高温区间原子集团的演变[J]. 中国科学, 2010, G40(9): 1 071-1 078.
- [25] 弭光宝, 李培杰, 王晶, 等. 近液相线铸造 Al-Si 合金浆料非枝晶组织的形成与演变[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(3): 560-569.
- [26] 闫春雷. 电磁能对半连续铸造 Al-Si-Cu-Mg-Ni 活塞合金微观组织与成分偏析的影响[D]. 内蒙古包头: 内蒙古科技大学, 2021.

(编辑: 栗万仲)

欢迎关注  
“特种铸造”  
微信公众号



- |        |         |        |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网  | ● 行业动态  | ● 联系我们 |
| ● 微商城  | ● 铸造前沿  | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例  | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂  | ● 产品库  |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库  |