



## 交变磁场-真空差压协同场下 ZL205A 合金 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相的生长特性

黄朋朋, 芦 刚, 严青松, 罗贵敏

(南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 南昌 330063)

**摘 要:** 采用 SEM 和 XRD 等手段, 分析励磁电流和凝固压力对 ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的生长取向及形貌的影响, 探讨交变磁场-真空差压协同场下 ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的生长特性。结果表明, 交变磁场-真空差压协同作用对 ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的生长取向以及形貌的影响显著。随着励磁电流的增大, ZL205A 合金的择优生长取向面(110)、(211)、(112)、(310)和(202)逐渐被抑制, 当励磁电流增加至 10 A 时, (112)晶面已经完全被抑制, 同时 ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相形貌出现了粗化现象; 当励磁电流超过 10 A 增加至 15 A 时,  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的择优生长取向只剩(110)和(211)两个晶面, 其他生长取向被完全抑制, 而大部分  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相组织由连续的树枝网络状转变为细小的碎片状; 随着凝固压力的增加, ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的主要择优生长取向面(110)、(211)、(112)和(202)被逐渐抑制,  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的细化效果越来越显著; 励磁电流为 15 A、凝固压力为 350 kPa 时, 交变磁场与凝固压力协同作用效果最佳。

**关键词:** 交变磁场; 凝固压力;  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相; 生长取向; 形貌

**文章编号:** 1004-0609(2020)-11-2540-10

**中图分类号:** TG249.6

**文献标志码:** A

ZL205A 合金由于其具有低密度、高强度以及良好的耐腐蚀性等性能, 广泛应用于航空、航天及汽车工业等相关领域<sup>[1-3]</sup>。然而, 大型 ZL205A 合金铸件中普遍存在无法避免的 Cu 元素偏析, 其偏析组织为共晶组织, 由  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相和  $\alpha(\text{Al})$  相构成<sup>[4]</sup>。在常规铸造条件下, ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相极易形成连续的网状甚至粗大的骨骼状组织, 严重割裂了 ZL205A 合金的基体组织, 降低了铝合金的力学性能, 特别是伸长率<sup>[5]</sup>。因此, 采用新的铸造技术来细化 ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相以及基体组织, 同时控制  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的分布及生长方向, 从而达到提高 ZL205A 合金综合性能的效果。

目前, 大部分研究学者通过在合金熔体中添加细化剂或者变质剂的方法来细化合金组织<sup>[6-8]</sup>, 但由于添加细化剂和变质剂会对环境造成严重的污染, 因而受到国内外研究学者的广泛质疑。超声、电磁以及压力等物理场处理因具有高效、无污染以及能够有效细化合金组织等优点被越来越多的专家学者关注<sup>[9-11]</sup>。其中在铸造过程中施加交变磁场相对较为突出, 交变磁场与感应电流的交互作用能够产生电磁力, 并在熔体

中引发熔体强制对流和反复震荡, 在细化晶粒、减少铸造偏析缺陷及改善铝合金铸件表面质量等方面效果显著, 具有其他化学、机械以及物理场等熔体处理技术无法比拟的优点<sup>[12-16]</sup>。STEINBACH 等<sup>[17]</sup>发现旋转磁场能明显改变 Al-Si-Mg 合金的铸态组织。ZHANG 等<sup>[18]</sup>认为磁场可以降低合金元素在晶界处的析出, 且频率越低, 作用越明显。LIM 等<sup>[19]</sup>研究发现, 在使用电磁搅拌之后, 铸造所得合金的初生相较未使用前会变得更加细小、圆整。但是已有的交变磁场处理在铸造中的应用主要集中在研究单一场交变磁场的作用, 虽然施加交变磁场能够改善合金的组织和性能, 但单一场的作用效果有限, 无法充分细化晶粒。真空差压铸造是一种低压充填、高压凝固的反重力铸造技术, 由于在凝固过程中受到高压场的作用, 可以获得性能良好的铸件<sup>[20-22]</sup>。相关研究结果表明<sup>[23-24]</sup>, 在压力下凝固时, 压力可以使合金熔体通过凝固枝晶间的狭窄通道向孔隙间流动, 存在一种挤渗作用。从理论上讲, 在真空差压铸造工艺中施加交变磁场, 铝合金熔体会受电磁力与凝固压力场的协同作用, 电磁力引发的熔体强迫对流与凝固压力产生的挤渗流互相融合促进,

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51861027); 江西省优势科技创新团队重点项目(20181BCB19001)

**收稿日期:** 2019-12-02; **修订日期:** 2020-05-28

**通信作者:** 芦 刚, 副教授, 博士; 电话: 0791-86453167; E-mail: aimulalg@163.com

或使金属液在铝合金铸件凝固过程产生更加强劲的挤渗, 进一步改善铸件的微观组织。

因此, 本文作者以 ZL205A 合金为研究对象, 结合交变磁场和真空差压铸造的优点, 制备交变磁场-真空差压协同铸造 ZL205A 合金试样, 并借助 SEM 和 XRD 技术, 分析 ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的生长取向和形貌的变化规律, 研究交变磁场-真空差压协同场下 ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的生长特性, 为获得组织致密、晶粒细小且力学性能优异的精密铝合金铸件提供良好的理论指导和技术支撑。

## 1 实验

采用南昌航空大学自主研制的 VCPC 型真空差压铸造设备, 并在此设备的基础上引入交变磁场发射器, 设备示意图如图 1 所示。当真空差压铸造抽真空结束时, 开启交变磁场发射器, 使其在充型、升压以及保压阶段持续施加交变磁场, 直到卸压阶段再关闭交变磁场发射器, 实施交变磁场-真空差压协同作用, 交变磁场协同真空差压铸造工艺曲线如图 2 所示。试样采用外形尺寸为  $d 30 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  的圆棒, 铸型由酚醛树脂覆膜砂制成, 预热温度设为  $120^\circ\text{C}$ , 合金为 ZL205A, 浇注温度设为  $720^\circ\text{C}$ , 分别采用真空度为  $20 \text{ kPa}$ 、充型压差为  $50 \text{ kPa}$ 、保压时间为  $180 \text{ s}$ 、励磁

电流( $0$ 、 $5$ 、 $10$  和  $15 \text{ A}$ )、凝固压力( $250$ 、 $300$  和  $350 \text{ kPa}$ )等工艺参数浇注真空差压铸造 ZL205A 合金试样。

在交变磁场-真空差压协同铸造 ZL205A 合金试样相同位置分别取样, 经研磨、抛光后, 采用 Keller 试剂( $1 \text{ mL HF} + 1.5 \text{ mL HCl} + 2.5 \text{ mL HNO}_3 + 95 \text{ mL H}_2\text{O}$ )对试样进行腐蚀, 腐蚀时间为  $10 \sim 15 \text{ s}$ 。采用型号为 Bruker D8 Discover 型的 X 射线衍射仪进行试样生长取向度测试, 采用型号为 Quanta 200 型扫描电子显微镜对试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的形貌进行观察。

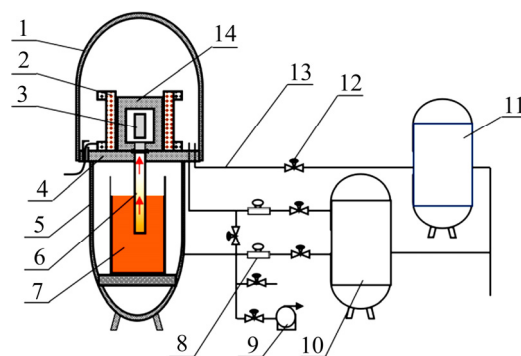


图 1 交变磁场-真空差压协同铸造设备图

Fig. 1 Alternating magnetic field-vacuum counter-pressure synergistic casting equipment: 1—Upper kettle; 2—Excitation coil; 3—Casting; 4—Clapboard; 5—Down kettle; 6—Rising tube; 7—Melting; 8—Regulating valve; 9—Vacuum pump; 10, 11—Gas jar; 12—Switch valve; 13—Gas tube; 14—Mould

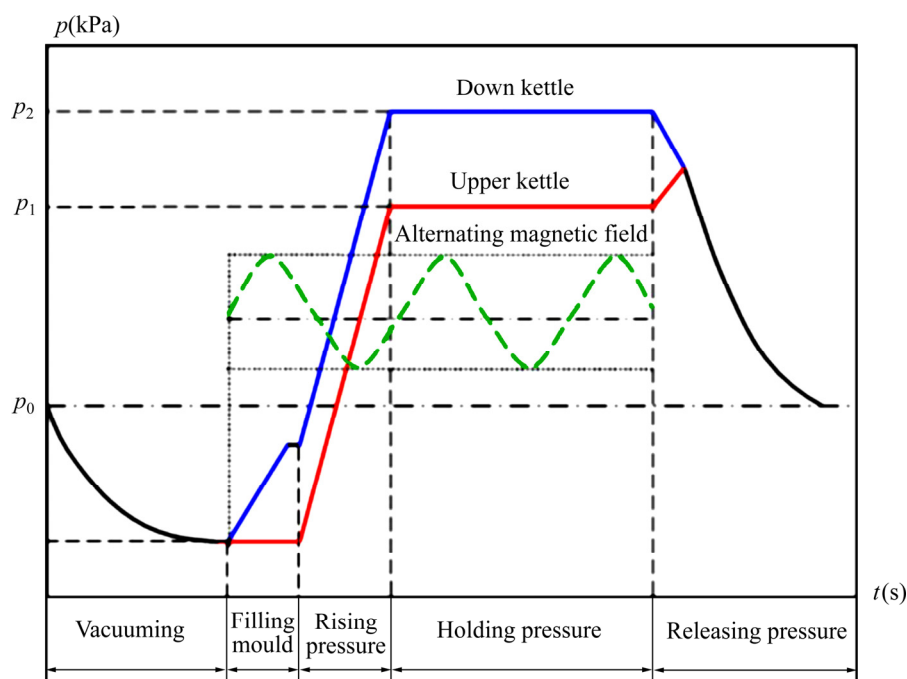


图 2 交变磁场协同真空差压协同作用工艺曲线

Fig. 2 Process graph of synergistic action between alternating magnetic field and vacuum counter-pressure

## 2 结果与分析

### 2.1 交变磁场-真空差压协同场对 ZL205A 合金中 $\text{Al}_2\text{Cu}$ 相生长取向的影响

图3所示为在15 A和350 kPa下随着凝固压力和励磁电流的变化 ZL205A 合金试样同一部位的 XRD

谱。从图3中可以看出, 交变磁场协同真空差压铸造 ZL205A 合金物相主要由  $\alpha(\text{Al})$  相和  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相组成,  $\alpha(\text{Al})$  相的主要生长晶面主要有(111)、(200)、(220)和(311),  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的生长晶面主要有(110)、(211)、(112)、(310)和(202)。但凝固压力和励磁电流对  $\alpha(\text{Al})$  相择优生长取向的影响较小, 而对试样组织中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的生长取向具有显著的影响。当励磁电流一定时,  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的择优生长取向随着凝固压力的增大而逐

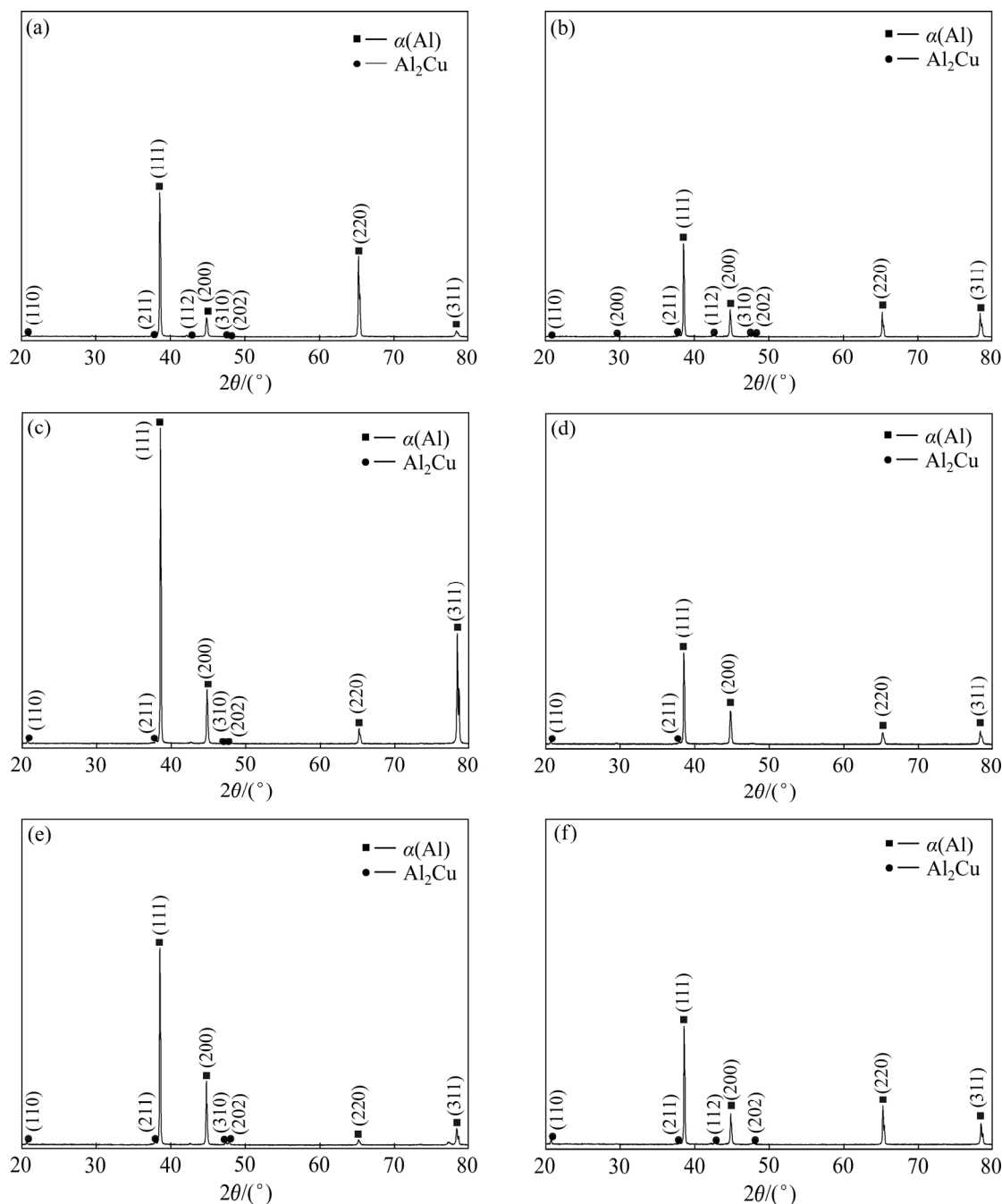


图3 协同场下凝固压力和励磁电流对试样 XRD 谱的影响

**Fig. 3** Effects of solidification pressure and excitation current on XRD patterns of samples under synergistic field: (a) 0 A, 350 kPa; (b) 5 A, 350 kPa; (c) 10 A, 350 kPa; (d) 15 A, 350 kPa; (e) 15 A, 300 kPa; (f) 15 A, 250 kPa

渐减弱。当凝固压力为 250 kPa 时, 试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的择优取向衍射强峰为(110)、(211)、(112)和(202), 且(110)为最强峰; 随着凝固压力增加到 300 kPa 时, 试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的择优生长取向衍射强峰基本消失, 尤其是衍射强度较弱的(112)和(202)晶面; 随着凝固压力逐渐增加到 350 kPa,  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相择优取向衍射峰强度完全被抑制。当凝固压力一定时,  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的择优生长取向随着励磁电流的增大也在逐渐减弱。当励磁电流为 0 A 时,  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的择优取向衍射强峰为(110)、(211)、(112)、(310)和(202), 与交变磁场重力铸造时试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的择优取向基本一致; 随着励磁电流逐渐增加, 在 5~10 A 时,  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的择优取向衍射强峰基本消失, 当励磁电流增加到 10 A 时, (112)晶面已经完全被抑制; 当励磁电流增加到 15 A 时,  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的择优生长取向只剩(110)和(211)两个晶面, 其他生长取向也完全被抑制。由此可知, 随着凝固压力和励磁电流逐渐增大,  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的择优生长取向逐渐减弱, 且凝固压力和励磁电流越大, 减弱效果越强烈。

## 2.2 交变磁场-真空差压协同场对 $\text{Al}_2\text{Cu}$ 相生长形貌的影响

图 4 所示为重力铸造条件下 ZL205A 合金试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的 SEM 像。从图 4 中可以看出, 未施加交变磁场条件下, 重力铸造 ZL205A 合金试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相主要为粗大的网状或骨骼状组织, 且团聚现象极为严重。

图 5 所示为凝固压力在 350 kPa 时不同励磁电流条件下制备的 ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的 SEM 像。

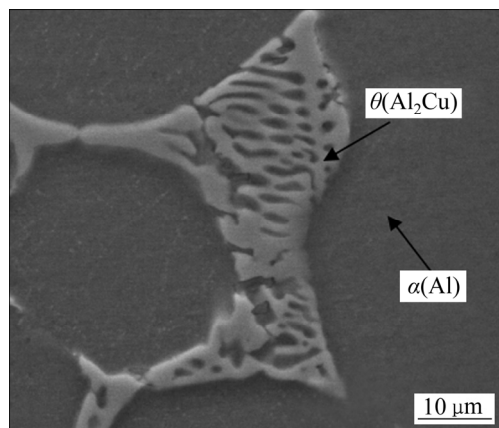


图 4 重力铸造下 ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相形貌

Fig. 4 Morphology of  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  phase in ZL205A alloy under gravity casting

从图 5 中可以看出, 在凝固压力和交变磁场的协同作用下, ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的形貌发生了明显的变化; 当凝固压力为 350 kPa 时, 随着励磁电流强度的增大,  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相先变得粗大, 而后逐渐被细化。当励磁电流为 0 A 时, 交变磁场-真空差压协同铸造 ZL205A 合金试样与重力铸造条件下 ZL205A 合金试样相比,  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的形貌并没有发生本质的变化, 两种试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相大部分呈连续网状和树枝状, 且存在明显的团聚现象; 当励磁电流为 5 A 时, 由于励磁电流强度较小, 交变磁场对  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的作用并不是很明显, 此时试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相形貌与未施加励磁电流时制备的试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相形貌几乎相似; 当励磁电流为 10 A 时, 试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的形貌出现了粗化现象, 虽然  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相形貌特征并未发生明显改变, 但是骨架变得更加粗大; 然而, 当励磁电流增加到 15 A 时, 试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相形貌得到充分细化, 可以看出, 试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的连续网络骨架数量明显减少, 大部分  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相呈细小散乱的碎片状, 虽然组织中仍然存在网络骨架状的  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相组织, 但总体上看  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的形貌已经得到显著改善。

图 6 所示为励磁电流在 15 A 时不同凝固压力条件下制备的 ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的 SEM 像。从图 6 中可以看出, 当励磁电流为 15 A 时, 随着凝固压力的增大, 试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的形貌发生了明显的改变, 由连续的网络骨架状逐渐向细小散乱的碎片状转变。当凝固压力为 250 kPa 时, 试样中大量  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相组织以连续的网络骨架状存在; 当凝固压力为 300 kPa 时, 试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相偏析组织形貌只是略微有所改善, 虽然极少部分  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相被细化, 但细化效果并不明显, 大部分  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相仍然为连续的网络骨架状; 当凝固压力为 350 kPa 时, 试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的形貌发生了显著改变, 大部分发达的  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相枝晶骨架被破碎, 转变成了细小的碎片状,  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相组织得到了较大程度的细化。

## 2.3 分析与讨论

图 7 所示分别为重力铸造、交变磁场重力铸造、真空差压铸造和交变磁场-真空差压协同铸造 ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的 SEM 像。由图 7 可以看出, 在 ZL205A 合金熔体凝固过程中施加交变磁场或凝固压力可以显著改善组织中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的形貌。图 7(a)所示为重力铸造条件下  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的形貌, 可以看出, ZL205A 合金试样中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相主要为发达

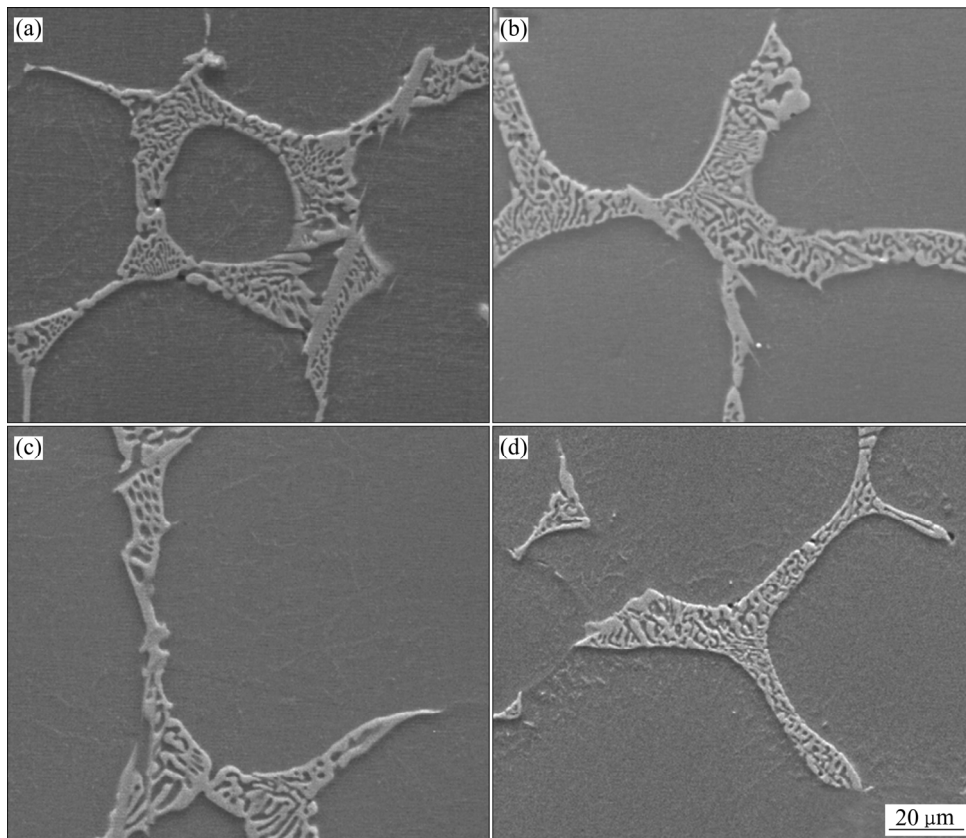


图5 协同场下不同励磁电流制备的ZL205A合金中 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相的SEM像

**Fig. 5** SEM images of  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  phase in ZL205A alloy prepared at different excitation currents in synergistic field: (a) 0 A; (b) 5 A; (c) 10 A; (d) 15 A

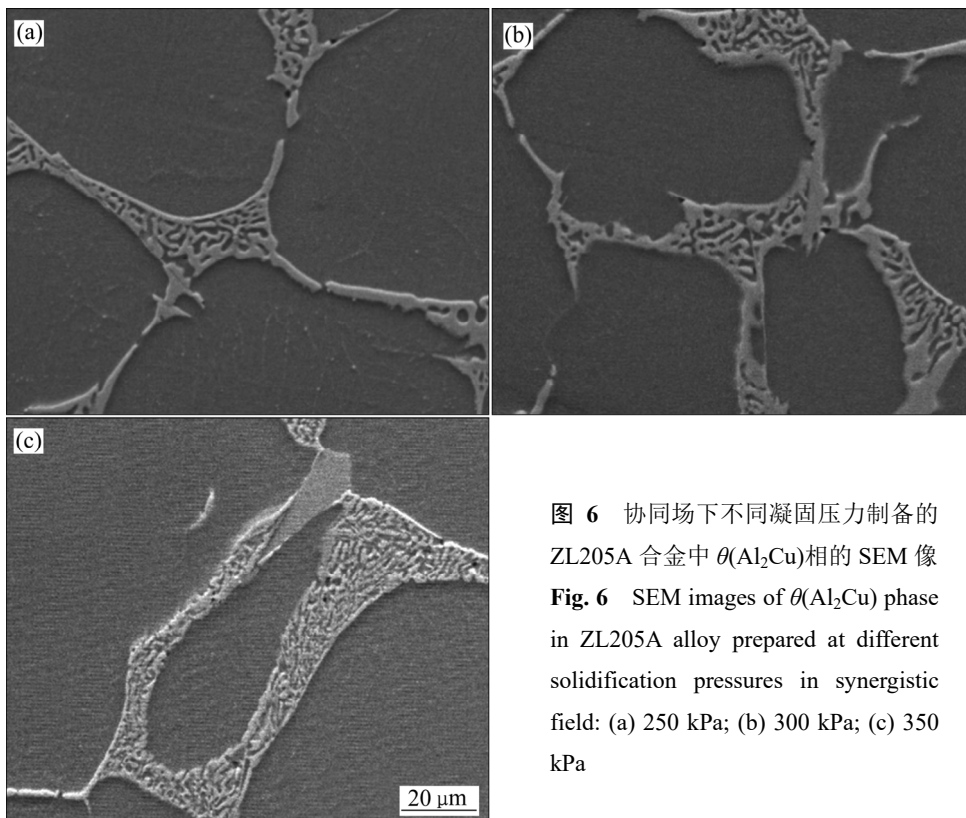


图6 协同场下不同凝固压力制备的ZL205A合金中 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相的SEM像

**Fig. 6** SEM images of  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  phase in ZL205A alloy prepared at different solidification pressures in synergistic field: (a) 250 kPa; (b) 300 kPa; (c) 350 kPa



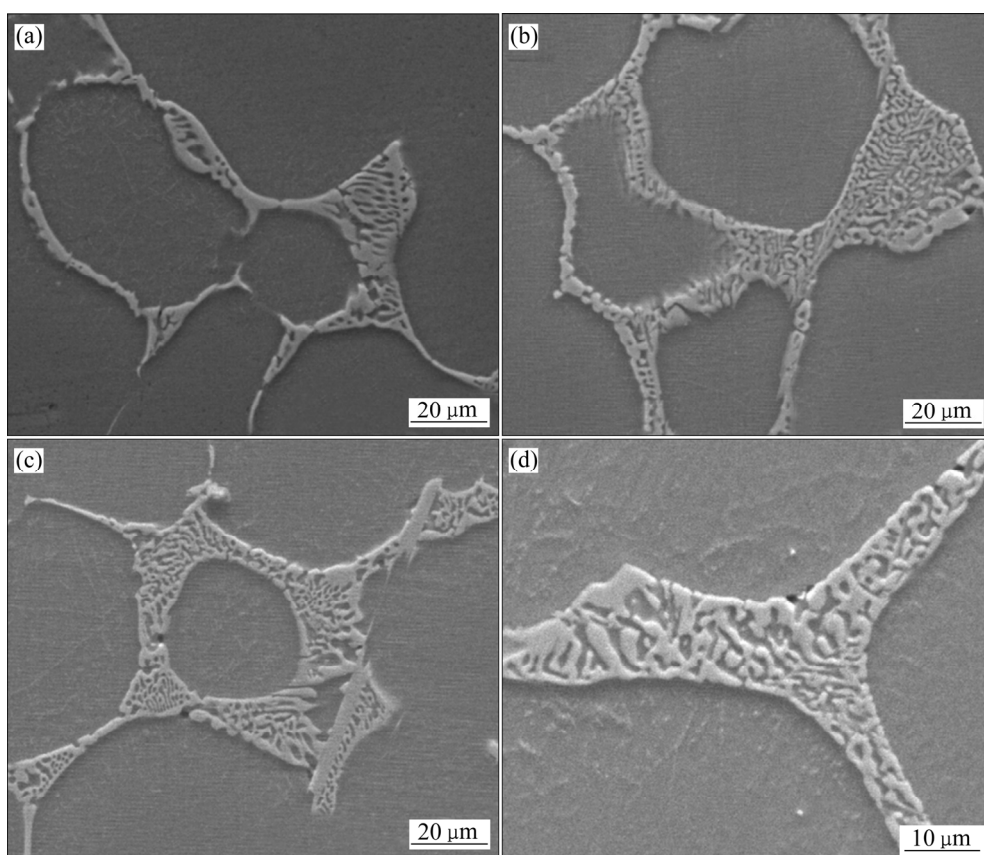


图 7 不同外场作用下 ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的 SEM 像

**Fig. 7** SEM images of  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  phase in ZL205A alloy under different external fields: (a) Gravity casting; (b) Excitation current of 15 A; (c) Solidification pressure of 350 kPa; (d) Excitation current of 15 A and solidification pressure of 350 kPa

的连续网状、树枝状或骨骼状组织, 网状曲线线条之间近似平行, 且存在明显的团聚现象。图 7(b)所示为单独施加交变磁场条件下  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的形貌, 可以看出, 此时更多的  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相组织得到细化, 以细小散落的碎片状或近球状存在, 虽然仍存在骨骼状的  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相组织, 但  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相得到了较大的细化。图 7(c)所示为真空差压铸造条件下  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的形貌, 可以看出, 真空差压铸造 ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的形貌与重力铸造大致相似, 并未产生明显的变化, 这说明凝固压力并不会对凝固后期析出的  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相组织产生破碎细化作用。图 7(d)所示为交变磁场-真空差压铸造条件下  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的形貌, 可以看出,  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的形貌和大小发生了明显变化, 大部分发达的  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相枝晶骨架被破碎, 转变成了细小的碎片状。进一步测试并比较其力学性能发现, 在重力铸造条件下, 试样的抗拉强度为 350.54 MPa, 伸长率为 0.74%; 当单独施加 15 A 的励磁电流时, 试样的抗拉强度为 352.75 MPa, 伸长率为 1.37%; 当单独施加 350

kPa 的凝固压力时, 试样的抗拉强度为 391 MPa, 伸长率为 3.14%; 而在交变磁场-真空差压协同作用下, 试样的抗拉强度为 414.39 MPa, 伸长率达到 3.71%, 力学性能达到最佳。因此, 在 ZL205A 合金熔体凝固过程中, 施加交变磁场和凝固压力能够改善组织中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的形貌和大小, 并提高铝合金的力学性能。

图 8 所示为重力铸造和交变磁场-真空差压协同铸造 ZL205A 合金试样断口形貌。从图 8 中可以看出, 重力铸造 ZL205A 合金断口形貌特征为典型的晶间脆性断裂, 断口上原始粗大的晶粒轮廓清晰可见, 只存在少量细小韧窝, 此时试样塑性极差; 与重力铸造相比, 交变磁场-真空差压协同铸造 ZL205A 合金断口形貌中韧窝数量显著增加, 且韧窝较深, 尺寸较大, 说明协同铸造条件下 ZL205A 合金的塑性显著高于重力铸造条件下合金的塑性。

SPITZER 等<sup>[25]</sup>通过研究发现, 处于交变磁场中的合金熔体内部任一单元体会在电磁力的影响下受到切向力的作用, 其计算公式如式(1)所示:

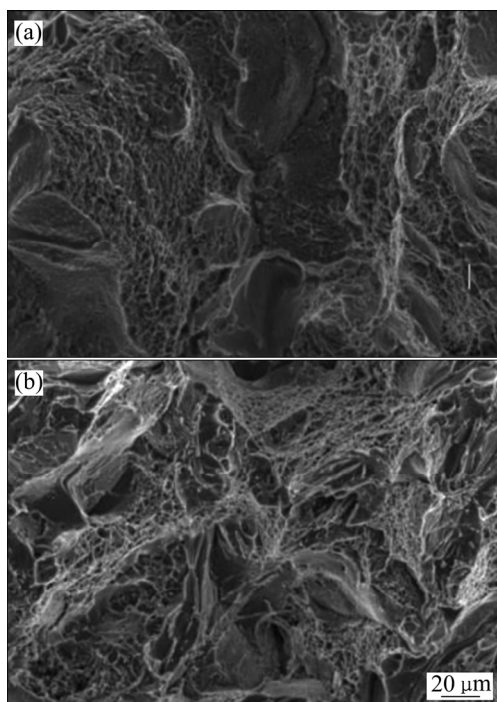


图8 重力铸造及交变磁场-真空差压协同铸造 ZL205A 合金试样断口形貌

Fig. 8 Fracture morphologies of gravity casting and alternating magnetic field-vacuum counter-pressure synergistic casting ZL205A alloys: (a) Gravity casting; (b) Alternating magnetic field-vacuum counter-pressure synergistic casting

$$\overline{F_{\theta}} = -\frac{1}{2} B_0^2 \sigma_e \left( \omega - \frac{v_{\theta}}{r} \right) r \quad (1)$$

式中： $\overline{F_{\theta}}$  为切向电磁力分量； $B_0$  为熔体边界处磁感应强度； $\omega$  为角速度； $v_{\theta}$  为切线速度； $\sigma_e$  为电导率； $r$  为半径。

此外，交变磁场与感应电流的交互作用将会对金属液产生震荡作用，电磁震荡分量如式所示<sup>[26]</sup>：

$$f_t = \frac{1}{2} \zeta \cdot Ha^2 \left( \dot{B} \cdot \nabla \dot{B} - \frac{1}{2} \nabla \dot{B}^2 \right) \cos(2\omega t) \quad (2)$$

式中： $\zeta$  为磁 Prandtl 数； $Ha$  为 Hartmann 数； $\dot{B}$  为磁感应强度  $B$  的复振幅； $\omega$  为交变电流的角频率； $t$  为时间，s。

由式(1)和式(2)可知，首先，交变磁场与其感应电流交互作用引发的电磁力会使得 ZL205A 合金在充型和凝固过程中受到两种影响，即沿垂直方向的电磁力  $\overline{F_{\theta}}$  会促使熔体边缘金属液呈环形流动而引发熔体的强制对流，在垂直方向上的有旋分量引起涡流形成的强制对流将对金属液产生搅拌作用；其次，电磁力方

向交替变化将对金属液产生振荡作用，电磁振荡力的存在不仅使熔体内部出现共振效应从而迫使金属液流动，还将对金属液进行反复的拉伸和压缩，提高熔体对高温化合物及原子团的润湿条件，降低了以高温化合物及其他原子团为异质形核质点的形核临界自由能，使形核率增加。

因此，当在 ZL205A 合金熔体凝固过程中施加交变磁场-真空差压协同作用时，电磁力产生的强制对流和反复震荡在凝固压力的作用下将会产生更加强烈的作用。当未施加任何外场作用时，晶界处的共晶  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相主要呈现为发达的连续网状、树枝状或骨骼状，且存在明显的团聚现象，当铸件完全凝固后，这些粗大的连续网状  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相严重割裂基体，大大降低了合金的综合力学性能；当在 ZL205A 合金熔体凝固过程中施加交变磁场-真空差压协同作用时，由于受到电磁力与压力的共同作用，在铝合金凝固中后期， $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相已经在晶界处大量析出，此时，电磁力产生的剧烈强制对流和反复震荡一并作用在  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相中，随着励磁电流的逐渐增强，电磁搅拌力和振荡力显著得到提升，对金属液起到了有效的搅拌作用，使得初生  $\text{Al}_2\text{Cu}$  枝晶骨架发生碎断，促进了离异共晶生长，导致  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相转变为细小碎片状。

### 3 结论

1) 在交变磁场-真空差压协同作用下，随着励磁电流的增大，ZL205A 合金的择优生长取向面(110)、(211)、(112)、(310)和(202)逐渐被抑制，当励磁电流增加至 10 A 时，(112)晶面已经完全被抑制；当励磁电流超过 10 A 增加至 15 A 时， $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的择优生长取向只剩(110)和(211)两个晶面，其他生长取向被完全抑制；随着凝固压力的增加，ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的主要择优生长取向面(110)、(211)、(112)和(202)被逐渐抑制。

2) 在交变磁场-真空差压协同作用下，随着励磁电流的逐渐增大，ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相先变得粗大，当励磁电流增加到 10 A 时， $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相组织才逐渐开始细化；随着凝固压力的增加， $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的细化效果越来越显著。

3) 交变磁场-真空差压协同作用对 ZL205A 合金中  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相的生长取向和形貌的影响显著；励磁电流为 15 A、凝固压力为 350 kPa 时，交变磁场与凝固压力协同作用效果最佳。

## REFERENCES

- [1] 贤福超, 郝启堂, 范理. ZL205A 合金块状偏析形成机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(4): 941–945.  
XIAN Fu-chao, HAO Qi-tang, FAN Li. Formation mechanism of bulk segregation in ZL205A alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(4): 941–945.
- [2] 严青松, 芦刚, 王清, 段勇彪. 脉冲超声工艺对 ZL205A 合金微观组织及偏析的影响[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(2): 279–285.  
YAN Qing-song, LU Gang, WANG Qing, DUAN Yong-biao. Effect of pulse ultrasonic process on microstructure and segregation of ZL205A alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(2): 279–285.
- [3] 郭廷彪, 李红贤, 梁佳思, 苏毅, 张锋. 添加微量 Y 对 ZL205A 合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(9): 2175–2181.  
GUO Ting-biao, LI Hong-xian, LIANG Si-jia, SU Yi, ZHANG Feng. Effect of adding trace Y on microstructure and properties of ZL205A alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(9): 2175–2181.
- [4] 贤福超, 郝启堂, 李新雷, 肖文丰. ZL205A 合金晶界偏析行为研究[J]. 铸造技术, 2012, 33(12): 1391–1393.  
XIAN Fu-chao, HAO Qing-tang, LI Xin-lei, XIAO Wen-feng. Study on the segregation behavior of ZL205A alloy grain boundary[J]. Foundry Technology, 2012, 33(12): 1391–1393.
- [5] 贾泮江, 陈邦峰. 显微共晶偏析对 ZL205A 合金力学性能的影响[J]. 材料工程, 2008(2): 1–4.  
JIA Pan-jiang, CHEN Bang-feng. Effect of micro-eutectic segregation on mechanical properties of ZL205A alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2008(2): 1–4.
- [6] ZUO M, LIU X, DAI H, LIU Xiang-jun. Al-Si-P master alloy and its modification and refinement performance on Al-Si alloys[J]. Rare Metals, 2009, 28(4): 412–417.
- [7] 李建国, 马洪涛, 张柏清, 方鸿生, 马晓华. Al-3Ti-4B 细化剂和 Al-10Sr 变质剂对 ZL104 合金的联合作用[J]. 金属学报, 2000, 36(6): 579–583.  
LI Jian-guo, MA Hong-tao, ZHANG Bo-qing, FANG Hong-sheng, MA Xiao-hua. Combined action of Al-3Ti-4B refiner and Al-10Sr modifier on ZL104 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(6): 579–583.
- [8] 王连登, 朱定一, 陈永禄, 魏喆良, 李秋菊, 黄利光, 宋伟, 吴海彬. 熔体温度处理及变质对 Al-20%Si 合金凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(9): 2075–2083.  
WANG Lian-deng, ZHU Ding-yi, CHEN Yong-lu, WEI Zhe-liang, LI Qiu-ju, HUANG Li-guang, SONG Wei, WU Hai-bin. Effect of melt temperature treatment and modification on solidification structure of Al-20%Si alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(9): 2075–2083.
- [9] 刘政, 张嘉艺, 罗浩林, 邓可月. 混沌对流下的半固态 A356 铝合金初生相形貌演变研究[J]. 金属学报, 2016, 52(2): 177–183.  
LIU Zheng, ZHANG Jia-yi, LUO Hao-lin, DENG Ke-yue. Evolution of the primary phase morphology of semi-solid A356 aluminum alloy under chaotic convection[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(2): 177–183.
- [10] CHENG Shu-jian, ZHAO Yu-hong, HOU Hua, JIN Yu-chun, GUO Xiao-xiao. Preparation of semi-solid ZL101 aluminum alloy slurry by serpentine channel[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1820–1825.
- [11] 李宁, 张蓉, 张利民, 邢辉, 殷鹏飞, 吴耀燕. 低压交流电脉冲下 Al-7%Si 合金晶粒细化机理研究[J]. 金属学报, 2017, 53(2): 192–200.  
LI Ning, ZHANG Rong, ZHANG Li-min, XING Hui, YING Peng-fei, WU Yao-yan. Study on grain refinement mechanism of Al-7%Si alloy under low voltage AC pulse[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(2): 192–200.
- [12] 罗贵敏. 交变磁场协同真空差压铸造 ZL205A 合金凝固组织及生长特性研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.  
LUO Gui-min. Study on solidification structure and growth characteristics of ZL205A alloy by alternating magnetic field and vacuum differential pressure casting[D]. Nanchang: Nanchang Aviation University, 2018.
- [13] 陈志俊, 高桂丽, 张立鑫, 石德全. 旋转磁场对 Al-4.5%Cu 合金凝固组织的影响[J]. 铸造, 2017, 66(3): 238–241.  
CHEN Zhi-jun, GAO Gui-li, ZHANG Li-xin, SHI De-quan. Effect of rotating magnetic field on solidification structure of Al-4.5%Cu alloy[J]. Foundry, 2017, 66(3): 238–241.
- [14] 苏鑫, 李孟男, 张爱平, 肖尧, 许光明. 电磁场对双辊铸轧 7075 铝合金微观形貌的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(10): 2354–2358.  
SU Xin, LI Meng-nan, ZHANG Ai-ping, XIAO Xiao, XU Guang-ming. Effect of electromagnetic field on micro-



- morphology of twin roll casting 7075 aluminum alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(10): 2354–2358.
- [15] 张丰收, 寇宏超, 李金山, 贺跃辉, 傅恒志, 刘 林. 交变磁场作用下特种合金的凝固特性[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2005, 10(4): 205–210.
- ZHANG Feng-shou, KOU Hong-chao, LI Jin-shan, HE Yue-hui, FU Heng-zhi, LIU Lin. Solidification characteristics of special alloys under the action of alternating magnetic field[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2005, 10(4): 205–210.
- [16] BOETTINGER W J, CORIELL S R, GREER A L, KARMA A, KURZ W, RAPPAPAZ M, TRIVEDI R. Solidification microstructures: recent developments, future directions[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(1): 43–70.
- [17] STEINBACH S, RATKE L. The effect of rotating magnetic fields on the microstructure of directionally solidified Al-Si-Mg alloys[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2005, 413/414: 200–204.
- [18] ZHANG Bei-jiang, CUI Jian-zhong, LU Gui-min, ZHANG Qin, BAN Chun-yan. Effect of electromagnetic field on macrosegregation of continuous casting 7075 alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2003, 13(1): 158–161.
- [19] LIM S C, LEE H B, KIM K H, KWON H C. The effect of electromagnetic stirring on the semi-solid microstructure of high-melt alloys[J]. *Semi-solid Processing of Alloys and Composites*, 2006, 116/117: 542–545.
- [20] 熊博文, 余 欢, 严青松, 徐志峰, 蔡长春, 王嘉辉, 杨振. 真空差压铸造薄壁铸件的研究进展[J]. *特种铸造及有色合金*, 2012, 32(3): 238–242.
- XIONG Bo-wen, YU Huan, YAN Qing-song, XU Zhi-feng, CAI Chang-chun, WANG Jia-hui, YANG Zhen. Research progress of vacuum differential pressure casting thin-walled castings[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2012, 32(3): 238–242.
- [21] 董选普, 黄乃瑜, 吴树森. 真空差压铸造法金属液流动形态的研究[J]. *铸造*, 2002, 51(7): 415–419.
- DONG Xuan-pu, HUANG Nai-yu, WU Shu-sen. Study on flow pattern of metal liquid in vacuum differential pressure casting[J]. *Foundry*, 2002, 51(7): 415–419.
- [22] 严青松, 余 欢, 魏伯康, 徐志峰, 蔡长春. 真空差压铸造工艺的凝固补缩特性与模型[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(6): 1051–1057.
- YAN Qing-song, YU Huan, WEI Bo-kang, XU Zhi-feng, CAI Chang-chun. Solidification feeding characteristics and model of vacuum differential pressure casting process[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(6): 1051–1057.
- [23] YAN Q S, YU H, XU Z F, XIONG B W, CAI C C. Effect of holding pressure on the microstructure of vacuum counter-pressure casting aluminum alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 501(2): 352–357.
- [24] 严青松, 余 欢, 芦 刚, 熊博文, 卢百平, 邹 勋. 结晶压力对真空差压铸造铝合金二次枝晶间距的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 14(5): 1194–1199.
- YAN Qing-song, YU Huan, LU Gang, XIONG Bo-wen, LU Bai-ping, ZOU Xun. Effect of crystallization pressure on secondary dendritic spacing of vacuum differential pressure casting aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 14(5): 1194–1199.
- [25] SPITZER K H, DUBKE M, SCHWERDTFEGGER K. Rotational electromagnetic stirring in continuous casting of round strands[J]. *Metallurgical Transactions B*, 1986, 17(1): 119–131.
- [26] 胡文瑞. 宇宙磁流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1–17.
- HU Wen-rui. *Cosmic magnetohydrodynamics*[M]. Beijing: Science Press, 1987: 1–17.

## Growth characteristics of $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ phase in ZL205A alloy under synergistic field between alternating magnetic field and vacuum counter-pressure

HUANG Peng-peng, LU Gang, YAN Qing-song, LUO Gui-min

(National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology Institute,  
Nanchang Aeronautical University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** The effects of excitation current and solidification pressure on the growth orientation and morphology of  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  phase in ZL205A alloy were analyzed by means of SEM and XRD. The growth characteristics of  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  phase in ZL205A alloy under alternating magnetic field-vacuum counter-pressure were investigated. The results show that the synergistic effect of alternating magnetic field-vacuum counter-pressure on the growth orientation and morphology of  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  phase in ZL205A alloy is significant. With the increase of excitation current, the preferred growth orientation planes (110), (211), (112), (310) and (202) of ZL205A alloy are gradually suppressed. When the excitation current is increased to 10A, the (112) crystal plane is completely suppressed, and the  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  phase morphology in ZL205A alloy is coarsened. When the excitation current exceeds 10 A and increases to 15 A, the preferred growth orientations of  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  phase are only (110) and (211), and the other growth orientations are completely suppressed. And most of the  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  phase structure changes from a continuous branch network to a fine fragment. With the increase of solidification pressure, the main growth preferred orientation planes (110), (211), (112) and (202) of  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  phase in ZL205A alloy are gradually suppressed, and the refinement effect of  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  phase is more remarkable. Meanwhile, the optimal synergistic effect is obtained when the excitation current is 15 A and solidification pressure is 350 kPa.

**Key words:** alternating magnetic field; solidification pressure;  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  phase; growth orientation; morphology

**Foundation item:** Project(51861027) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (20181BCB19001) supported by the Advantage Science and Technology Innovation Team Key Project of Jiangxi Province, China

**Received date:** 2019-12-02; **Accepted date:** 2020-05-28

**Corresponding author:** LU Gang; Tel: +86-791-86453167; E-mail: aimulalg@163.com

(编辑 何学锋)