2018 年 8 月 August 2018

DOI: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2018.08.03

# 超声振动−真空差压协同场下 ZL114A 合金共晶硅的生长特性



严青松,杨普超,芦 刚,王 清,段勇标 (南昌航空大学 航空制造工程学院,南昌 330063)

摘 要:采用 SEM 和 XRD 等手段,分析超声功率与凝固压力对 ZL114A 合金共晶硅的生长取向及形貌的影响, 探讨超声振动--真空差压协同场下 ZL114A 合金共晶硅的生长特性。结果表明:超声振动--真空差压协同作用对 ZL114A 合金共晶硅的生长取向及形貌的影响显著。随着超声功率的增加,ZL114A 合金共晶硅的择优生长取向面 (111)、(220)及(331)逐渐被抑制;当超声功率 600 W 时,基本不存在择优取向,同时共晶硅由粗大片状转变为细 小的短棒状,且分布均匀;当超声功率超过 600 W 时,共晶硅择优生长取向抑制减弱,且细化效果有所减弱;随 着凝固压力的增加,ZL114A 合金共晶硅的 3 个主要择优生长取向面逐渐被抑制,共晶硅细化效果越来越显著。 超声功率 600 W 和凝固压力 350 kPa 为最佳超声功率与凝固压力的协同作用效果。

关键词: 超声功率; 凝固压力; 共晶硅; 生长取向; 形貌

文章编号: 1004-0609(2018)-08-1507-09

中图分类号: TG249.2

文献标志码: A

铸造 Al-Si 系合金由于其具有低密度、高耐磨性 及耐热性等性能,而被广泛应用在机械、航空航天、 交通运输等相关领域<sup>[1-3]</sup>。目前,军工领域应用较多的 ZL114A 合金为可热处理强化的亚共晶铝硅合金,其 铸态组织为初生α(Al)基体相和共晶硅相。然而,在常 规铸造下铝硅系合金的硅相极易形成粗大片状的组 织,甚至粗大的板条状,严重地割裂了铝合金基体, 极大地降低了铝合金的力学性能,特别是塑性和韧性。 因此,采用新的铸造技术来细化铝硅合金硅相以及基 体组织,同时控制硅的分布及生长方向,从而达到提 高铝硅合金的综合性能。

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<sup>[4-5]</sup>来细化合金组织,但是由于 细化剂、变质剂的添加会对合金及环境造成污染而受 到了质疑。超声、电磁、压力等<sup>[6-8]</sup>物理场处理具有高 效、无污染,并且可以有效地细化合金组织的特点而 被越来越多的学者关注。尤其以超声最为突出,超声 场带来的空化效应和声流效应可以显著细化合金组 织<sup>[9]</sup>,改善合金的微观偏析<sup>[10]</sup>。KOMAROV等<sup>[11]</sup>在金 属熔体凝固过程中进行超声振动处理,发现当超声波 振幅超过一定值后,可以改善金属熔体凝固组织,同 时对初晶硅的细化十分有效; ZHANG 等<sup>[12]</sup>发现在铝 硅合金凝固过程中引入超声波,可以有效地细化初生 硅相,使其由块状或者针状变为细小的硅晶粒,尺寸 减小至约 10 um。但是已有的超声处理在铸造中的应 用主要集中在单一超声场的作用下,虽然超声处理可 以改善合金组织及性能,但是在单一场的作用时是十 分有限的,无法充分细化晶粒,特别是对强硬相硅的 细化。真空差压铸造是一种先进的反重力铸造技术, 它是在低压下充型、高压下凝固的,因此铸件在凝固 过程中一直受到高压力场的作用,可以获得组织细小 的铸件[13-15]。前期研究表明[16-17],在压力下凝固时, 压力可以使铝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,在凝 固期间已形成一定骨架的枝晶都具有一定的强度,当 产生的挤渗力大于枝晶的强度时, 枝晶会发生显微塑 性变形直至断裂,有利于细化晶粒。同时,进一步探 讨了超声功率与凝固压力协同作用对真空差压铸造铝 合金二次枝晶间距的影响<sup>[18]</sup>,认为超声效应与凝固压 力挤渗效应共同影响真空差压铸造铝合金二次枝晶间 距,并建立了真空差压铸造 ZL114A 铝合金二次枝晶 间距与超声功率及凝固压力的关系。

收稿日期: 2017-06-02; 修订日期: 2018-04-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51261025);上海航天科技创新基金资助项目(SAST2016046)

通信作者: 严青松, 教授, 博士; 电话: 0791-83953326; E-mail: yanqs1973@126.com

因此,本文作者以 ZL114A 为研究对象,结合超 声振动及真空差压的优点,制备超声振动--真空差压 协同场下的铝合金试样,并借助 SEM 和 XRD 技术, 分析铝合金中共晶硅的生长取向及形貌的变化规律, 研究超声振动--真空差压协同场下共晶硅的生长特 性,为获得晶粒细小、组织致密复杂铝合金铸件提供 理论指导。

#### 1 实验

采用自制的 VCPC-I 型真空差压铸造设备,并在 此设备上引入超声振动装置,示意图如图1所示。当 真空差压铸造抽真空阶段结束时,开启超声装置,使 其在充型、升压、凝固保压阶段持续施加超声振动直 至泄压,实施超声振动-真空差压协同作用,超声功 率-凝固压力协同作用工艺曲线如图 2 所示。试样采 用直径 12 mm×100 mm 圆棒,铸型采用金属型,预 热温度为 270 ℃,合金为 ZL114A(ZAISi7Mg1A),浇 注温度 720 ℃,分别采用真空度 20 kPa、充型压差 35 kPa、保压时间 80 s、超声功率(0 W、300 W、600 W、 900 W)、凝固压力(200 kPa、250 kPa、300 kPa、350 kPa) 等工艺参数浇注真空差压铸造 ZL114A 合金试样。

在超声振动-真空差压铸造的试样上距离振动头相同的部位分别取样,经研磨、抛光后,用体积分数为 0.5%的 HF 酸溶液腐蚀,腐蚀的时间为 15~20 s,



图 1 超声振动下真空差压铸造工作原理示意图 Fig. 1 Schematic diagram of working theory of vacuum counter-pressure casting under ultrasonic vibration: 1— Ultrasonic device; 2—Upper kettle; 3—Mould; 4—Clapboard; 5—Down kettle; 6—Crucible; 7—Rising tube; 8, 9, 21—Gas tube; 10, 19—Regulating valve; 11, 12, 15, 17, 18, 20—Switch valve; 13, 14—Gas jar; 16—Vacuum pump

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,实验条件为 Cu 靶,加速电 压为 40 kV,工作电流为 40 mA, Psi 角的范围是 20°~80°, Phi 角的范围为 0°~360°,步长为 5°,计数 时间 2 s;采用型号为 Quanta200 型扫描电子显微镜观 察试样共晶硅的形貌。



图2 超声振动-真空差压协同作用工艺曲线

Fig. 2 Process graph of synergistic action between ultrasonic power and vacuum counter-pressure

### 2 结果与分析

#### 2.1 超声振动-真空差压协同场对 ZL114A 合金共晶 硅生长取向的影响

图 3 所示为在 350 kPa 和 600 W 下随着超声功率 及凝固压力的变化 ZL114A 合金试样同一部位的 XRD 谱。

从图 3 中可以看出,在超声振动--真空差压协同 场下,凝固压力及超声功率均对试样组织中共晶硅的 生长方向有显著地影响。当超声功率一定时,共晶硅 的生长择优取向随着凝固压力的增加而逐渐减弱。当 凝固压力为 200 kPa 时,试样中共晶硅的生长取向所 对应的三强峰的晶面依次为(111)、(220)及(331),且晶 面(111)为最强峰;在协同场下凝固压力逐渐增加到 300 kPa 时,试样中共晶硅的生长择优取向三强峰基本 消失,特别是较弱的(220)及(311)晶面;当凝固压力增 加到 350 kPa 时,3 个晶面的择优取向被完全抑制。在 凝固压力一定时,随着超声功率的增加,共晶硅的生 长取向变化明显。当协同场下超声功率为0W时,试 样中共晶硅的择优生长取向三强峰所对应的晶面依次 为(111)、(220)及(331),与未加入外场时 ZL114A 合金 择优生长取向一致;当超声功率增加到 600 W 时,试 样中共晶硅的择优生长取向三强峰基本消失,共晶硅 的择优取向被完全抑制;然而当超声功率达到 900 W 时,试样中共晶硅的择优生长取向三强峰又重新出现, 这是因为当超声波功率较大时,超声会产生较显著的 热效应,使得共晶硅在凝固后期有充分的时间在择优 面上生长。

#### 2.2 超声振动-真空差压协同场对 ZL114A 合金共晶 硅生长形貌的影响

图 4 所示为传统铸造条件下 ZL114A 合金的硅相的形貌图。由图 4 可以看出,传统铸造中的共晶硅组织为粗大的板条状,且团聚现象十分严重,同时在同一个方向上充分生长,硅相的长宽比较大。

图 5 所示为凝固压力 350 kPa 下不同超声功率时 制备的 ZL114A 合金共晶硅 SEM 像。从图 5 可以看出, 在超声功率和凝固压力协同作用下,试样共晶硅的形 貌发生了明显的变化。当凝固压力一定时,随着超声 波功率的增加,试样共晶硅的形貌也逐渐改善,由板 条状向细小的短棒状转变。当超声功率为0W时,试 样共晶硅为板条状,有些为块状,并且存在团聚现象;



Fig. 3 Effects of solidification pressure((a)-(a3)) and ultrasonic power((b)-(b3)) on XRD patterns in synergetic fields



图 4 传统铸造下 ZL114A 合金的硅相形貌

**Fig. 4** Morphology of silicon phase of ZL114A alloy under traditional casting

当超声功率为300W时,试样共晶硅的形貌发生了较大的改变,板条状的共晶硅转变为细小的短棒状,虽然组织中仍有部分板条状硅存在,但是共晶硅已经得到了较大程度的细化;当超声功率增加到600W,可以发现试样中的共晶硅组织已经被完全细化,共晶硅基本上全部转化为短棒状;然而,当超声功率增加到

900 W 时,试样共晶硅组织不但没有进一步细化,反而出现了粗化现象,出现了少量的板条状的共晶硅。

图 6 所示为超声功率 600 W 下不同凝固压力制备 的 ZL114A 合金共晶硅 SEM 像。从图 6 可以看出,在 超声功率一定时,随着凝固压力的增加,试样共晶硅 的形貌发生了明显的改变,由板条状向细小的短棒状 逐渐转变。当凝固压力为 200 kPa 时,试样共晶硅存 在大量的板条状;当凝固压力为 250 kPa 时,试样共 晶硅的形貌发生了改变,由原来粗大的板条状共晶硅 转变为较为细小的纤维状,虽然组织中仍有部分板条 状硅存在,但是共晶硅已经得到了较大程度的细化; 当凝固压力为 300 kPa 时,可以发现试样中的共晶硅 组织进一步被细化,共晶硅基本上全部转化为短棒状, 仍有部分粗大的板条状共晶硅存在;当凝固压力为 350 kPa 时,试样共晶硅组织被完全转变细小的短棒状。

#### 2.3 分析与讨论

图 7 所示分别为重力铸造、超声重力铸造、真空 差压铸造以及超声振动-真空差压协同场下 ZL114A 合金共晶硅的 SEM 像。

由图 7 可以看出,在 Al-Si 系合金熔体凝固过程 中引入超声振动或凝固压力,可以显著改善组织中共



图 5 协同场下不同超声功率下制备的 ZL114A 合金中共晶硅 SEM 像 Fig. 5 SEM images of eutectic silicon of ZL114A alloy prepared with different ultrasonic power in coordination field: (a) 0 W; (b) 300 W; (c) 600 W; (d) 900 W



图 6 协同场下不同凝固压力下制备的 ZL114A 合金中共晶硅的 SEM 像 Fig. 6 SEM images of eutectic silicon of ZL114A alloy prepared with different solidification pressures in coordination field: (a) 200 kPa; (b) 250 kPa; (c) 300 kPa; (d) 350 kPa



图 7 不同外场作用下 ZL114A 合金中共晶硅的 SEM 像 Fig. 7 SEM images of eutectic silicon of ZL114A alloy under different field effect: (a) Gravity casting; (b) Ultrasonic power of 600 W; (c) Solidification pressure of 350 kPa; (d) Power 600 W and pressure 350 kPa

晶硅的大小及形貌。图 7(a)所示为重力铸造时共晶硅 的形貌,试样组织中共晶硅主要为粗大的板条状,且 聚集成簇;图7(b)和(c)所示为单独施加超声振动和凝 固压力共晶硅的形貌,可以发现共晶硅组织得到了充 分的细化,虽然仍存在板条状及块状的共晶硅组织, 但是已经被细化分散;图7(d)所示为超声振动-真空差 压协同作用共晶硅的形貌,可以看到组织中已经不存 在板条状及块状的共晶硅组织,全部转化为细小的短 棒状共晶硅,部分已经圆整化,且均匀分布在初生α(Al) 的晶界处。进一步测试并比较其力学性能,在单独施 加 600 W 超声功率时,试样的抗拉强度增加到 301.41 MPa, 伸长率增加到 4.98%; 当单独施加 350 kPa 的凝 固压力时,试样的抗拉强度为 307.5 MPa,伸长率为 5.15%; 在超声振动-真空差压协同作用下,试样抗拉 强度为 323.41 MPa, 伸长率为 5.61%, 因此, 在铝合 金熔体凝固过程中施加超声振动或凝固压力,可以改 善组织中共晶硅的大小及形貌,提高铝合金的力学性 能。

当在熔体凝固过程引入超声波时,超声波会在熔体中产生强烈的空化效应,空化效应是由超声空化气泡形成、生长和崩溃造成的,当空化泡在金属熔体中形成后,随着超声振动的进一步作用,空化泡将会继续长大,当达到其空化阈值后,空化泡将会崩溃,此时,在空化泡周围将会产生强大的瞬时高温高压。英国的物理学家 RAYLEIGH<sup>[19]</sup>通过理论推导出了超声波在熔体中产生声流效应及空化效应时的高温高压具体计算公式:

$$p_{\max} \approx p_{v} \left[ \frac{p_{m}(\gamma - 1)}{p_{v}} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$
 (1)

$$T_{\max} \approx T_{\min} \frac{p_{\mathrm{m}}}{p_{\mathrm{v}}} (\gamma - 1)$$
 (2)

式中:  $p_{max}$ 为瞬态空化泡崩溃时泡内最大压力, Pa;  $T_{max}$ 为瞬态空化泡崩溃时泡内最高温度;  $T_{min}$ 为环境 温度, K;  $p_m$ 为空化泡在崩溃过程中受到的总压力, Pa;  $p_v$ 为空化泡内的蒸汽压, Pa;  $\gamma$ 为蒸汽的比热比。

由式(1)和 (2)计算出在空化泡闭合或者崩溃时, 在空化壁上将产生 1×10<sup>8</sup>~1×10<sup>9</sup> Pa 的高压,与此同 时空化壁上将产生 1×10<sup>3</sup>~1×10<sup>4</sup> K 的瞬时高温,瞬 时的高温高压可以轻易的将刚形核长大的板状共晶硅 击碎;同时超声作用还将产生声流效应,将破碎的枝 晶带向金属液内部,增加形核率。

因此,当在 Al-Si 系合金熔体凝固过程中引入超 声振动--真空差压协同作用时,超声波产生的空化效 应和声流效应在凝固压力的作用下将产生更加强烈的 作用,由式(1)可知空化泡崩溃时,当外界压强 p 增大时,空化泡崩溃时产生的高压也随着升高;与此同时, 当空化泡的崩溃将初生相破碎后,枝晶间的通道变宽, 声流作用在凝固压力的共同作用下,将产生更大的声流速度,将破碎的共晶硅及初生 a(AI)带向金属熔体的 更深层。因此对合金组织中共晶硅的作用更加剧烈。 超声振动-真空差压协同场下空化效应对共晶硅细化 示意图如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 超声振动-真空差压协同场对 铝合金组织中共晶硅的细化效果十分显著。图 8(a)所 示为未添加任何外场下 Al-Si 系合金凝固的组织。从 中可以看出, 初生 α(Al)长成了粗大的树枝状晶粒, 在 初生的 α(AI)晶界处析出大量的共晶硅,其以粗大的板 条状存在,而且聚集在一起,当铸件完全凝固后,粗 大的板条状的共晶硅严重的割裂了基体,大大的影响 了合金的力学性能。当在 Al-Si 系合金熔体凝固过程 中引入超声振动-真空差压协同场后,由于超声与压 力的共同作用,在铝合金凝固中期,初生α(Al)已经长 成了树枝状,共晶硅大量析出在晶界处,此时超声波 在铝合金内部产生强大的空化效应,空化效应产生的 空化泡分布在枝晶四周,尤其分布在共晶硅的边上(见 图 8(b)),随着超声波不断作用,超声空化泡在收缩-膨胀过程随着凝固压力及超声声流效应产生的压力在 金属液中流动。当空化泡达到临界值后, 气泡将会崩 溃; 空化泡崩溃时, 其周围将会产生局部的瞬时高温 高压,由于空化泡的破碎就在共晶硅的四周,因此产 生的瞬时高温高压将直接对共晶硅产生冲击,虽然共 晶硅为较硬相,但是空化将产生 $1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^9$  Pa的 高压及 1×10<sup>3</sup>~1×10<sup>4</sup> K 的高温,在凝固压力下,压 力及温度将会更高,同时共晶硅在实际的共晶过程中, 共晶硅板条上存在很多的缺陷,特别是板条状共晶硅 还出现了大量的搭接现象,共晶硅的组织中还有孪晶、 位错及亚晶界等缺陷<sup>[20]</sup>。因此,这些共晶硅在力学性 能上是十分不稳定的,当其受到剪切力或者轴向的应 力时,将会发生断裂,当凝固压力及超声作用较弱时, 只能将有较大缺陷的共晶硅击碎(见图 8(c)), 当凝固压 力和超声作用较强时,强大的瞬时高温高压使得共晶 硅完全被击碎(见图 8(d)),被击碎的颗粒会随着声流 效应的作用在枝晶间流动,成为新的形核质点,极大 的提高了形核率。压力及声流效应的作用将使得金属 液被迫在枝晶间流动,金属液的流动导致枝晶间的温 度场更加均匀,溶质富集区域减少,因此成分过冷区 域相应减少, 使得晶核更加趋向于各向同性生长而非 各向异性生长,最终形成了细小弥散的短棒状共晶硅 组织。



图8 超声振动--真空差压协同作用下共晶硅细化示意图

**Fig. 8** Simulation of eutectic silicon refinement by ultrasonic vibration-vacuum counter-pressure: (a) Introduction of field; (b) Introduction of synergy field; (c) In weak coordination field; (d) In strong coordination field

## 3 结论

1) 在超声振动--真空差压协同作用下,随着超声 功率的增加,ZL114A 合金共晶硅的择优生长取向面 (111)、(220)及(331)逐渐被抑制,当超声功率 600 W 时, 基本不存在择优取向,同时共晶硅由粗大片状转变为 细小的短棒状,且分布均匀,当超声功率超过 600 W 时,共晶硅择优生长取向抑制减弱,且细化效果有所 减弱;随着凝固压力的增加,ZL114A 合金共晶硅的 3 个主要择优生长取向面逐渐被抑制,共晶硅细化效果 越来越显著。

2) 超声振动--真空差压协同作用对 ZL114A 合金 共晶硅的生长取向及形貌的影响显著,获得了超声功 率 600 W、凝固压力 350 kPa 为最佳超声功率与凝固 压力协同作用效果。

#### REFERENCES

- [1] BAREKAR N S, DAS S, YANG X, HUANG Y, FAKIR O E, BHAGURKAR A G, ZHOU L, FAN Z. The impact of melt conditioning on microstructure, texture and ductility of twin roll cast aluminium alloy strips[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 650(5): 365–373.
- [2] 蒋文明, 樊自田, 刘德均. 真空低压消失模壳型铸造和消失 模铸造铝合金组织和性能对比[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(1): 22-28.

JIANG Wen-ming, FAN Zi-tian, LIU De-jun. Comparison of microstructures and properties of aluminum alloy between expendable pattern shell casting with vacuum and low-pressure and lost foam casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(1): 22–28.

- [3] SHIN J S, KO S H, KIM K T. Development and characterization of low-silicon cast aluminum alloys for thermal dissipation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 644(25): 673–686.
- [4] 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. The combination effect of Al-3Ti-4B and Al-10Sr master alloy on ZL104 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(6): 579–583.

- [5] 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. Effects of melt thermal treatment and modification on solidification microstructure of Al-20%Si alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(9): 2075-2083.
- [6] 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. Research on morphology evolution of primary phase in semisolid A356 alloy under chaotic advection[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(2): 177–183.

- [7] CHENG Shu-jian, ZHAO Yu-hong, HOU Hua, JIN Yu-chun, GUO Xiao-xiao. Preparation of ZL101 aluminum semi-solid slurry by snake channel method[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1820–1825.
- [8] 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, YIN Peng-fei, WU Yao-yan. Study on grain refinement mechanism of hypoeutectic Al-7%Si alloy under low voltage alternating current pulse[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(2): 192–200.

[9] ESKIN G I. Ultrasonic treatment of light alloy melts[M]. CRC Press, 1998: 66–69.

[10] 黎正华,李晓谦,张 明,许显华. 超声作用下半连铸 7050 铝合金的偏析行为及形成机制[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(2): 318-324.
LI Zheng-hua, LI Xiao-qian, ZHANG Ming, XU Xian-hua.
Segregation behavior and formation mechanism of 7050 aluminum alloy produced by semi-continuous casting under ultrasonic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(2): 318-324.

- [11] KOMAROV, SEGREY1, ISHIWATA. Industrial application of ultrasonic vibrations to improve the structure of Al-Si hypereutectic alloys: Potential and limitations[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 46(7): 2876–2883.
- [12] ZHANG Yu-bo, LU Yi-ping, JIE Jin-chuan, FU Ying, ZHONG De-shui, LI Ting-ju. Ultrasonic treatment of aluminum-silicon

alloy in the process of overflow[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 26(11): 3242–3248.

- [13] 熊博文,余 欢,严青松,徐志锋,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 in vacuum counter-pressure casting thin-walled components[J].
- Special Casting and Nonferrous Alloys, 2012, 32(3): 238-242.
  [14] 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 morphology of metal liquid in vacuum differential pressure casting[J]. Foundry, 2002, 51(7): 415-419.
- [15] 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 behavior and model of vacuum counter-pressure casting technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(6): 1051–1057.

- [16] YAN Qing-song, YU Huan, XU Zhi-feng, XIONG Bo-wen, CAI Chang-chun. Effect of holding pressure on the microstructure of vacuum counter-pressure casting aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 501: 352–357.
- [17] 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, 24(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 casting aluminum alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5): 1194-1199.
- [18] 严青松,芦 刚,李 成,沈加利. 超声功率-凝固压力协同 作用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,2017,27(1):51-56.

YAN Qing-song, LU Gang, LI Cheng, SHEN Jia-li. Effect of synergistic action between ultrasonic power and solidification pressure on secondary dendrite arm spacing of vacuum counter-pressure casting aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(1): 51–56.

- [19] MONDOLFO L F. Structure and properties of aluminum alloys[M]. London: Butterworths Press, 1976: 200–400.
- [20] 赵君文, 吴树森, 万 里, 陈启华, 安 萍. 超声场中金属半 固态浆料组织的演化[J]. 金属学报, 2009, 45(3): 314-319. ZHAO Jun-wen, WU Shu-sen, WAN Li, CHEN Qi-hua, AN Ping. Evolution of microstructure of semisolid metal slurry in ultrasonic field[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(3): 314-319.

## Growth characteristics of ZL114A alloy eutectic silicon under synergistic field between ultrasonic vibration and vacuum counter-pressure

YAN Qing-song, YANG Pu-chao, LU Gang, WANG Qing, DUAN Yong-biao

(School of Aeronautic Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** The effects of ultrasonic power and solidification pressure on the growth orientation and morphology of ZL114A eutectic silicon were analyzed by SEM and XRD, the eutectic silicon growth characteristics of ZL114A alloy under synergistic field between ultrasonic vibration and vacuum counter-pressure were discussed. The results indicate that the synergistic effect of ultrasonic vibration and vacuum counter-pressure on the growth orientation and morphology of ZL114A eutectic silicon is significant. With the increase of ultrasonic power, the preferential growth orientations (111), (220) and (331) of ZL114A eutectic silicon are gradually suppressed, when the ultrasonic power is 600W, there is no preferred orientation, meanwhile, eutectic silicon turns from coarse flakes into small short rod-like and evenly distribute. When the ultrasonic power is more than 600 W, the preferential growth orientation of eutectic silicon decreases and the refinement effect decreases. With the increase of the solidification pressure, the three major preferred orientation surfaces of ZL114A alloy eutectic silicon are gradually restrained, and the refinement effect of eutectic silicon is more and more significant. Meanwhile, the optimal synergistic effects are obtained as ultrasonic power of 600 W and solidification pressure of 350 kPa.

Key word: ultrasonic power; solidification pressure; eutectic silicon; growth orientation; morphology

Foundation item: Project(51261025) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (SAST2016046) supported by the Aerospace Science and Technology Innovation Foundation of Shanghai, China

Received date: 2017-06-02; Accepted date: 2018-04-23

Corresponding author: YAN Qing-song; Tel: +86-791-83953326; E-mail: yanqs1973@136.com

(编辑 龙怀中)