

施振温度对超声振动-真空差压协同作用下 铝合金微观组织及力学性能的影响

严青松, 潘 飞, 芦 刚, 杨普超, 王 清

(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, 江西 南昌 330063)

摘 要:通过金相、扫描电镜、力学性能测试等技术考察了施振温度对超声振动-真空差压协同作用铝合金初生相组织、共晶硅形貌及力学性能的影响。结果表明,施振温度对超声振动-真空差压协同作用铝合金的微观组织和力学性能影响显著。适当升高超声施振温度,初生相组织得到明显细化,最佳超声施振温度为 720 °C,合金初生相由部分树枝晶或蔷薇状晶变成细小的等轴晶,共晶硅形貌也发生了由粗大的针片状向纤维状的转变;同时合金的抗拉强度和延伸率达到最大值,分别为 326.96 MPa 和 5.57%,较超声重力铸造铝合金抗拉强度和延伸率分别提高 14.49%和 22.15%,较真空差压铸造铝合金抗拉强度和延伸率分别提高 6.33%和 8.16%。

关键词:超声施振温度;真空差压铸造;铝合金;微观组织;力学性能

中图法分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)06-1842-06

细小的晶粒有助于改善合金的微观组织,提高合金的力学性能。物理场^[1-5]处理具有细化效果显著、无污染等特点。超声波处理是一种高效、无污染的物理细晶凝固技术,可显著细化合金的凝固组织,消除铸造缺陷。然而在超声振动过程中,熔体温度影响着超声振动产生的空化效应和声流效应,从而影响合金的形核率和成长率。李晓谦等^[6]研究了超声施振对金属熔体冷却时间和凝固组织的影响,发现在 640~625 °C 范围内,对金属熔体连续施加超声振动,所得到的凝固组织细化效果明显好于施振温度在 625~590 °C 范围内的合金凝固组织。程和法等^[7]在熔体温度 620~680 °C 之间采用高能超声波对 Al-20%Si 合金进行熔体处理,发现熔体在 660 °C 左右施加高能超声,对初晶硅的细化效果最佳。张志强等^[8]研究了不同超声施振温度对相形貌及微观组织的影响。研究表明不同温度(650 和 700 °C)的熔体经超声振动后的微观组织都得到了显著的细化。

真空差压铸造作为一种在真空条件下低压充型,高压下结晶的新型铸造工艺,施加的压力可克服补缩阻力,使枝晶间的有效补缩可以较易实现。在真空差压铸造过程中,液态金属熔体的补缩能力除与凝固结晶压力、升压时间、充型压力、真空度有关之外,它也与补缩通道和熔体粘度有关,而这些又与补缩熔体温度直接相关。熊博文等^[9]研究了不同熔体温度对真空差压铸造

分级加压凝固 A357 合金的影响。结果表明在 590 °C 的熔体温度进行分级加压凝固,有利于形成较强的补缩流,碎断初生相使补缩通道畅通,提高致密度,细化了组织,获得了最佳的综合力学性能。

目前,研究学者已经对在超声振动和压力凝固条件下,熔体温度影响晶粒细化效果进行了大量的研究,且获得了许多有价值的结论。但对超声振动-真空差压协同作用下铝合金的组织性能很少报道,特别是超声施振温度对真空差压铸造铝合金微观组织和力学性能的影响很少研究。因此,研究施振温度对超声振动-真空差压协同作用下铝合金微观组织和力学性能的影响,将为超声熔体处理技术与真空差压铸造技术结合生产大型薄壁复杂精密铸件的应用提供理论基础与技术支持。

1 实 验

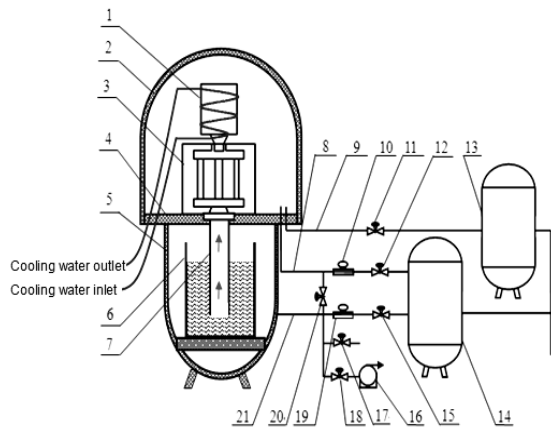
通过在自制的 VCPC 型真空差压铸造设备上引入超声振动进行实验,系统示意图如图 1 所示。实验采用 TJS-3000 智能数控超声波发生器 V6.0 超声发生装置,主要由压电陶瓷换能器、工具头、变幅杆以及 19.3~20.3 kHz 超声智能控制器组成,超声功率范围为 0~1 kW。

当真空差压铸造抽真空阶段结束时,开始在充型、升压、凝固保压阶段施加超声振动直至卸压,实施超声振动-真空差压协同作用,工艺曲线如图 2 所示。试样

收稿日期: 2017-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(51261025); 航空基金(2015ZE56015)

作者简介: 严青松,男,1973 年生,博士,教授,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,江西 南昌 330063,电话: 0791-83953326, E-mail: yanqs1973@126.com



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

图1 超声振动下真空差压铸造工作原理图

Fig.1 Working mechanism of vacuum counter-pressure casting under ultrasonic vibration

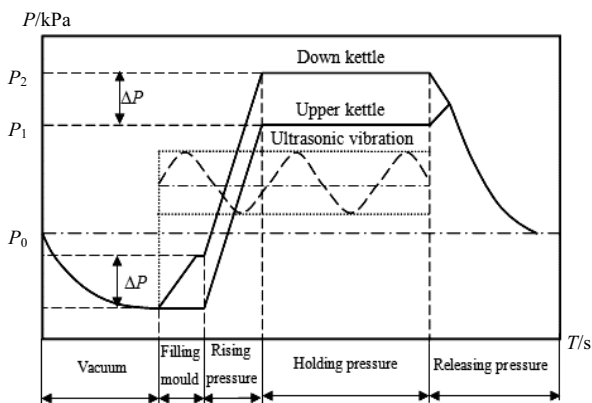


图2 超声振动-真空差压协同作用工艺曲线

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

采用外形尺寸为 $\Phi 12 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 圆棒。铸型采用金属型,预热温度为 270°C ,合金为 ZL114A(ZAlSi7Mg1A),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 600 W、凝固压力 350 kPa、不同超声施振温度 (680°C 、 700°C 、 720°C 、 740°C) 等工艺参数进行真空差压铸造铝合金试样。

在真空差压铸造的试样相同部位分别取样,经研磨、抛光后,用体积分数为 0.5% 的 HF 酸溶液腐蚀,腐蚀时间为 15~20 s。采用 XJP-6A 型金相显微镜进行金相观察。采用 WDW-50 型电子万能材料试验机对拉伸试样进行拉伸试验,应变速率为 1 mm/min ,使用 Quanta200

型扫描电子显微镜观察试样显微组织和拉伸断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 施振温度对超声振动-真空差压协同铸造铝合金初生相组织的影响

图 3 为不同施振温度下超声振动-真空差压协同作用铝合金微观组织。从图 3 中可以看出,随着超声施振温度的升高,超声振动-真空差压协同铸造铝合金的初生相形貌发生显著转变。当超声施振温度为 680°C 进行超声振动-真空差压铸造时,没有出现发达的树状枝晶,主要为蔷薇状晶,局部出现了细小的粒状晶,如图 3a 所示;当超声施振温度为 700°C 进行超声振动-真空差压协同铸造时,条状或柱状晶粒变成了少部分的圆整、细小的初生 $\alpha\text{-Al}$ 晶粒,数量大大减少,可是总的来说,组织还是分布较不均匀,如图 3b 所示;当超声施振温度为 720°C 进行超声振动-真空差压协同铸造时,初生 $\alpha\text{-Al}$ 晶粒得到了明显细化,树枝晶锐减,长条状的晶粒大部分被破碎,变得更圆整,更均匀,如图 3c 所示;当超声施振温度上升到 740°C 进行超声振动-真空差压协同铸造时,合金初生相组织形貌虽大部分晶粒仍能保持基本圆整的形态,但晶粒尺寸相对粗大且重新出现少量的柱状晶,如图 3d 所示。

熔体温度与超声振动产生的空化效应和声流效应密切相关,并且显著影响真空差压铸造铝合金的微观组织。按照有粘度和表面张力的不能压缩液体中空化泡壁运动速度的计算公式^[10,11]:

$$U^2 = \frac{\left(\frac{\sigma}{R} - n^3 P_0 + P_\infty\right)(n^2 - 1)}{\frac{\rho}{2} - 4\mu R \ln n} \quad (1)$$

式中, P_0 为气泡内的初始蒸气压力, P_∞ 为液体中无穷远处的压力, U 为空化壁的运动速度, n 为空化气泡的压缩后半径与初始半径的比值; μ 为液体的粘度, σ 为液体的表面张力, ρ 为液体的密度, R 为气泡的半径。从式 (1) 中可得,由于 $n < 1$,使得 $\ln n$ 为负值,所以粘滞性项 $4\mu R \ln n$ 使得空化气泡的运动速度减慢。在熔体温度过低时进行超声施振,当金属凝固不断进行时,金属液的粘度会慢慢增加,空化气泡壁的运动速度减小,导致空化泡的长大和溃灭将变得特别慢,空化作用的细化效果将减弱。

在真空差压铸造过程中,当金属熔体在层流情况下,金属液的挤滤能力可按式 (2) 计算^[12]:

$$\Delta G = \frac{K \Delta P_{\text{挤}}}{\mu \Delta L} F \Delta \tau \quad (2)$$

式中: ΔG 为挤滤到缩孔中的金属容量, μ 为金属液的

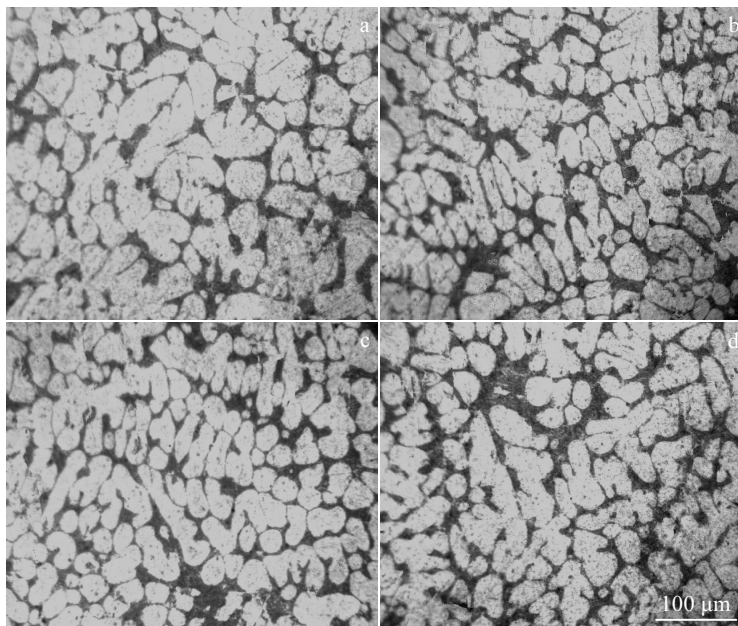


图 3 不同超声施振温度下协同作用铝合金微观组织

Fig.3 Microstructures of aluminum alloy with synergistic action at different ultrasonic vibration temperatures:

(a) 680 °C, (b) 700 °C, (c) 720 °C, and (d) 740 °C

动力粘度系数, ΔL 为挤滤深度, $\Delta P_{\text{挤}}$ 为挤滤的压力差, F 为挤滤面积, $\Delta \tau$ 为挤滤时间, K 为渗透系数。从式 (2) 可以看出, 当浇注工艺、合金成分以及压力差 $\Delta P_{\text{挤}}$ 确定后, 金属液的动力粘度与 ΔG 成反比, 即金属液的粘度增加时, 真空差压的挤滤能力减弱。

在超声振动-真空差压协同作用下, 随着熔体温度的升高, 合金的凝固组织同样是先细化后粗大。当超声施振温度为 680 °C 时, 协同作用一段时间后, 固相含量增多, 液相减少, 导致熔体的粘度增大, 空化泡的长大和溃散将变得特别慢, 空化作用的细化效果大大减弱。此时熔体温度较低, 熔体流速减慢。当晶粒数目达到一定数量时, 结成有阻力且连续的网络, 一定的液流压力不能克服该阻力时, 熔体停止流动, 其微观组织主要为蔷薇状晶。当超声施振温度为 700 °C 时, 熔体温度升高, 熔体的粘度有所降低, 空化作用开始增强, 但枝晶也容易形成强度较高的骨架。当真空差压保压压力一定时, 液相便不能流动难以补缩, 金属液的挤滤能力降低, 其微观组织为条状或柱状晶粒, 局部出现了圆整、细小的初生 α -Al 晶粒。随着超声施振温度的进一步升高, 达到 720 °C 时, 一方面, 超声波空化效应的过冷形核效应及使熔体中细小杂质活化成为基底作用一起促进形核。另一方面, 超声波空化破碎作用和声流的振动搅拌作用使固液界面正在形核长大的晶坯脱落下来, 作为一种新的形核基底, 在超声波振动作用下, 晶粒会被带到熔体的各个位置, 结果使合金的初生晶粒比较细小, 分布也

较为均匀。与此同时, 真空差压所形成的补缩流将对 α -Al 树枝晶产生冲刷作用, 将使 α -Al 树枝晶碎断或发生塑性变形, 形成更多的晶核, 使初生 α -Al 晶粒得到了明显细化。但超声施振温度继续升高到 740 °C 时, 超声作用在熔体中会产生热效应。在熔体中所形成的空化泡发生崩散时产生的空化作用足以在瞬时产生 10 000 K 上下的高温, 大量空化泡的崩溃所产生的热量被熔体吸收, 使部分晶核发生重熔, 高温也使得金属熔体过热度增加且其中的晶核减少。另外在真空差压过程中, 熔体内部剩余液相的凝固速率增大, 使得晶核的线生长速度高于液相的形核速率, 最终得到的凝固组织虽大部分能保持基本圆整的形态, 但晶粒尺寸相对粗大且重新出现少量的柱状晶。

2.2 施振温度对超声振动-真空差压协同铸造铝合金共晶硅形貌的影响

图 4 为不同施振温度下超声振动-真空差压协同作用铝合金共晶相形貌。由图 4 中可以看出, 超声施振温度为 680 °C 时, 共晶硅以粗大的针片状或者杆状形式存在于基体中; 在超声施振温度为 700 °C 时, 共晶硅呈细小的珊瑚状, 共晶硅明显细化, 但仍有部分区域为块状; 随着超声施振温度上升到 720 °C 时, 共晶硅的尺寸进一步减小, 呈纤维状, 共晶硅分布形态比较致密、均匀, 大大改善了合金的显微组织; 超声施振温度为 740 °C 时, 部分位置的共晶硅尺寸开始增大、粗化, 呈纤维状+部分粗大块状。

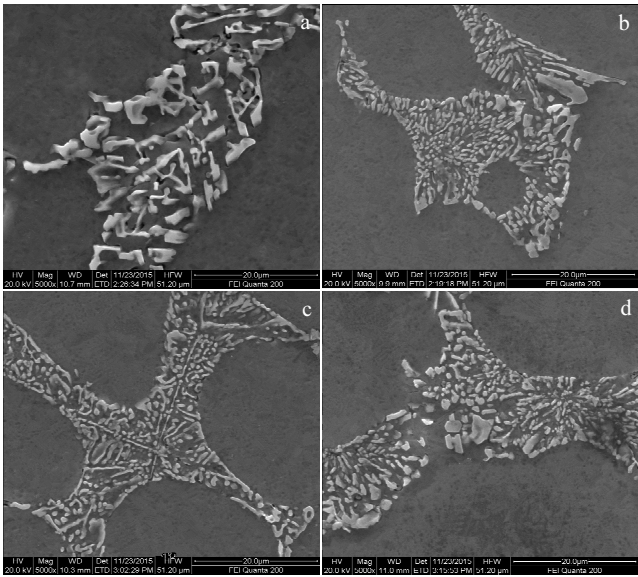


图 4 不同超声施振温度下协同作用铝合金共晶硅 SEM 像
Fig.4 SEM images of eutectic phase of aluminum alloy with synergistic action at different ultrasonic vibration temperatures: (a) 680 °C, (b) 700 °C, (c) 720 °C, and (d) 740 °C

超声振动-真空差压协同作用后，铝合金熔体会同时受到超声作用及凝固压力的作用，超声施振温度的升高，有助于增强超声振动空化、声流效果，提高真空差压的挤滤能力。因此，在超声振动空化效应产生的空化泡成长长大过程中，来自凝固压力挤渗效应产生的挤压会使空化泡更容易崩溃破灭，使局部区域产生瞬时的高温、高压和强烈的冲击波，冲击波击碎共晶片层或改变片层取向，阻碍硅以台阶生长机制长成片状，使原本平滑的生长变得凹凸不平，改变了生长方向，促成共晶硅“粗大的针片状-纤维状”的形态转变。

2.3 施振温度对超声振动-真空差压协同铸造铝合金力学性能的影响

图 5 为不同施振温度下超声振动-真空差压协同铸造铝合金抗拉强度和延伸率的变化趋势。表 1 为超声施振温度为 720 °C 时超声重力铸造、真空差压铸造和超声振动-真空差压协同铸造 3 种不同工艺下铝合金的抗拉强度和延伸率。从图 5 和表 1 中可以看到，超声施振温度对铝合金抗拉强度和延伸率影响显著。随着超声施振温度的升高，铝合金抗拉强度和延伸率呈现先增大后减小的趋势。当超声施振温度为 720 °C，铝合金抗拉强度和延伸率均达到最大，分别为 326.96 MPa、5.57%，与超声重力铸造铝合金的抗拉强度和延伸率相比分别提高 14.49%和 22.15%，与真空差压铸造铝合金的抗拉强度和延伸率最大值相比分别提高 6.33%和 8.16%。由此可以看

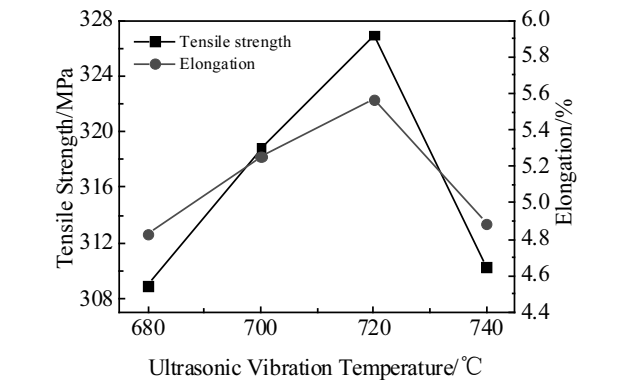


图 5 协同作用铝合金抗拉强度和延伸率随不同超声施振温度的变化曲线
Fig.5 Changing curves of tensile strength and elongation of aluminum alloy with synergistic action at different ultrasonic vibration temperatures

到，超声施振温度为 720 °C 时进行超声振动-真空差压协同作用可以更好地提高铝合金的抗拉强度和延伸率。金属材料的强度和晶粒尺寸的关系可由 Hall-Petch 公式表示^[13]：

$$\sigma = \sigma_0 + k d^{-\frac{1}{2}}$$
(3)

式中： σ_0 为金属材料的强度， k 为与材料有关的常数； d 为晶粒平均直径。从式 (3) 中可以看出，晶粒尺寸越小，合金的抗拉强度越高，同时晶粒细化可使合金的延伸率提高。这种细晶强化的方式，是一种可以同时改善合金的抗拉强度和延伸率的方法。超声振动-真空差压协同铸造铝合金微观组织大部分为圆整、细小的初生 α -Al 晶粒。由位错理论可知，晶粒越细小，则晶界越多，增加了晶界对位错运动的阻碍作用，较大幅度地提高了合金的强度。另外，细小弥散分布的晶粒，共晶硅形貌由粗大的片层状向纤维状转变，使组织中应力集中得到改善，减少针片状共晶硅对合金基体的割裂，降低了合金开裂的可能性，从而也提高了合金的塑性，增强合金的延伸率。

断口形貌是合金力学性能好坏的直观反映。图 6 为不同施振温度下协同作用铝合金断口形貌。图 7 为不同工艺下铸造铝合金的断口形貌。通过对比可以发现，

表 1 不同工艺下铸造铝合金的抗拉强度和延伸率		
Table 1 Tensile strength and elongation of cast aluminum alloy under various processes		
Conditions	σ_b /MPa	δ %
Ultrasonic gravity casting	285.56	4.56
Vacuum counter-pressure casting without ultrasonic vibration	307.50	5.15
Synergistic action between ultrasonic vibration and vacuum counter-pressure	326.96	5.57

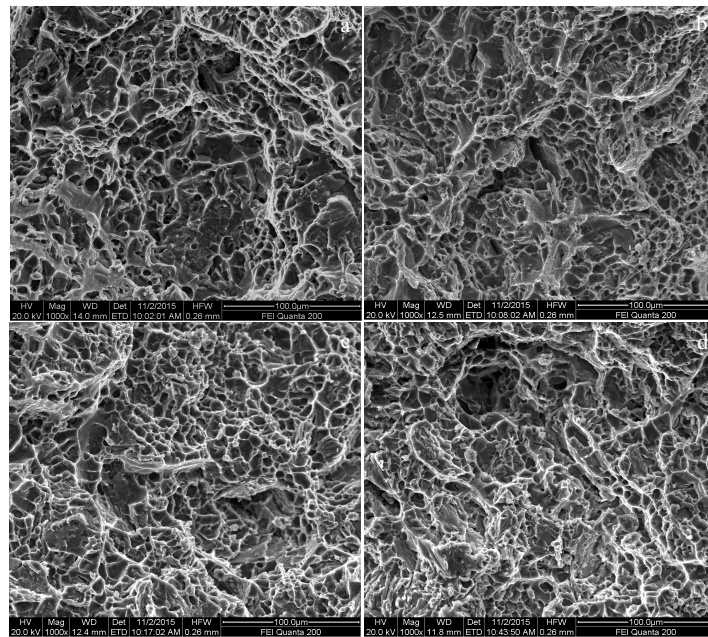


图 6 不同超声施振温度下协同作用铝合金断口形貌

Fig.6 Fracture morphologies of aluminum alloy with synergistic action at different ultrasonic vibration temperatures: (a) 680 °C, (b) 700 °C, (c) 720 °C, and (d) 740 °C

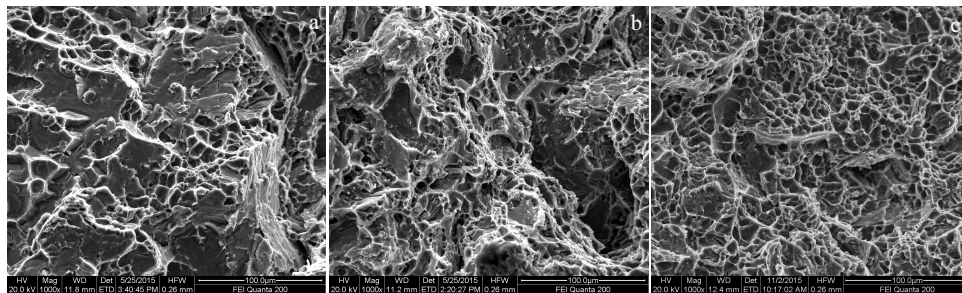


图 7 不同工艺下铸造铝合金的断口形貌

Fig.7 Fracture morphologies of casting aluminum alloy under various processes: (a) ultrasonic gravity casting, (b) vacuum counter-pressure casting without ultrasonic vibration, and (c) synergistic action between ultrasonic vibration and vacuum counter-pressure

超声振动-真空差压协同铸造铝合金断口形貌相对于超声重力铝合金和真空差压铸铝合金的断口形貌解理面和解理台阶都明显减少,并且出现数量很多、形状大小规则的断口韧窝,韧窝形状也比采用前两种方法铸造的铝合金韧窝更圆、更小,韧性断裂程度有所增加,因此合金的抗拉强度和延伸率相比之下都有所增加。当超声施振温度为 720 °C 时,断口形貌达到最佳,其力学性能达到最高值。韧窝大小代表着合金塑性的好坏,这与晶粒大小有关。由于晶粒度是影响韧窝大小的一个因素,因此合金断口形貌也印证了晶粒细化对其力学性能的改善作用。

3 结 论

1) 超声振动-真空差压协同作用时,随着超声施振

温度的升高,合金初生相组织发生显著改变,由部分树枝晶或蔷薇状晶变成细小的等轴晶,共晶硅形貌也发生了由粗大的针片状向纤维状的转变。超声施振温度过低、过高都会减弱细化效果,最佳超声施振温度为 720 °C。

2) 超声振动-真空差压协同作用下铝合金的抗拉强度和延伸率随超声施振温度的升高先增加后减小。当超声施振温度为 720 °C 时,铝合金的抗拉强度和延伸率达到最大值,分别为 326.96 MPa 和 5.57%。较超声重力铸造铝合金抗拉强度和延伸率分别提高 14.49% 和 22.15%,较真空差压铸铝合金分别提高 6.33% 和 8.16%。

参考文献 References

[1] Zhang Chenyang(张晨阳), Zhao Shengdun(赵升吨), Wang

- Yongfei(王永飞). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2015, 25(7): 1781
- [2] Farid Haddadi, Fadi Abu-Farha. *Materials and Design*[J], 2016, 89: 50
- [3] Su Xin(苏 鑫), Li Mengnan(李孟男), Zhang Aiping(张爱平) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(10): 2354
- [4] Zhao Zhongmin(赵忠民), Zhang Long(张 龙), Yang Runze(杨润泽) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(S1): 724
- [5] Ma X P, Li Y J, Yang Y S. *Journal of Materials Research*[J], 2009, 24(8): 2670
- [6] Li Xiaoqian(李晓谦), Li Kaiye(李开晔), Chen Ming(陈 铭) *et al. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程)[J], 2011, 16(2): 249
- [7] Cheng Hefa(程和法), Huang Xiaomei(黄笑梅), Yang Jun(杨 俊) *et al. Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2011, 32(3): 35
- [8] Zhang Zhiqiang(张志强), Le Qichi(乐启炽), Cui Jianzhong(崔建忠) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(3): 574
- [9] Xiong Bowen(熊博文), Yu Huan(余 欢), Yan Qingsong(严青松) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2013, 33(9): 789
- [10] Li Ke(李 克), Gao Ting(高 挺), Bi Qiu(毕 秋) *et al. Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2010, 31(3): 320
- [11] Huang Jitang(黄继汤). *The Principle and Application of Cavitation and Cavitation Erosion*(空化与空蚀的原理及应用)[M]. Beijing: Tsinghua University press, 1991
- [12] Yan Qingsong, Yu Huan, Xu Zhifeng *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2010, 501: 352
- [13] Huang Xiaoxu(黄晓旭). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2014, 50(2): 137

Effect of Ultrasonic Vibration Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloy Under Synergistic Action Between Ultrasonic Vibration and Vacuum Counter-Pressure

Yan Qingsong, Pan Fei, Lu Gang, Yang Puchao, Wang Qing

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

Abstract: Using OM, SEM and electronic universal tester, the effect of ultrasonic vibration temperature on the primary phase microstructure, eutectic phase morphology and mechanical properties of vacuum counter-pressure casting aluminum alloy was investigated. The results show that the effect of ultrasonic vibration temperature on the microstructure and mechanical properties of the aluminum alloy is significant under the synergistic action between ultrasonic vibration and vacuum counter-pressure. With the increase of ultrasonic vibration temperature, the microstructure of the primary phase of the alloy is obviously refined, and some dendrites or rosette crystals are transformed into fine equiaxed grains. The morphology of eutectic silicon changes from coarse needle-plate to fibrous. The optimal ultrasonic vibration temperature is 720 °C. The tensile strength and elongation of the aluminum alloy reach the maximum of 326.96 MPa and 5.57%, respectively, which is 14.49% and 22.15% higher than that of ultrasonic gravity casting aluminum alloy, and 6.33% and 8.16% higher than vacuum counter-pressure casting aluminum alloy, respectively.

Key words: ultrasonic vibration temperature; vacuum counter-pressure casting; aluminum alloy; microstructure; mechanical property

Corresponding author: Lu Gang, Ph. D, Associate Professor, National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, Tel: 0086-791-83953326, E-mail: aimulalg@163.com