DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.04.002

超声波功率对半连续铸造 Al–Zn–Mg–Cu 合金组织与性能的影响

王　睿[1,2],张浩宇[1],陈立佳[1],甘春雷[2],周　楠[2],王顺成[2]
(1.沈阳工业大学 材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110870;2.广东省材料与加工研究所,广东 广州 510650)

摘　要:采用超声波辅助半连续铸造工艺制备 ϕ310 mm 的 Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu 合金铸锭,研究了超声波功率对半连续铸造 Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu 合金铸锭显微组织与力学性能的影响。结果表明,超声波辅助半连续铸造工艺可以细化铸锭的晶粒和第二相,提高固溶度。超声波功率越大,铸锭的晶粒和第二相越细小,第二相分布更均匀,固溶度越高,拉伸力学性能越高。当超声波功率增大至 210 W 时,抗拉强度为 329.44 MPa,屈服强度为 242.34 MPa,伸长率为 11.97%。与未施加超声波的铸锭相比,抗拉强度、屈服强度和伸长率分别提高 5.95%、11.53%和 31.25%。

关键词:Al-Zn-Mg-Cu 合金;半连续铸造;超声波功率;晶粒细化;均匀化

中图分类号:TG146.2; TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)04-0336-05

Effect of Ultrasonic Power on Microstructure and Properties of Al–Zn–Mg–Cu Alloy Prepared by Semi–continuous Casting

WANG Rui[1,2], ZHANG Haoyu[1], CHEN Lijia[1], GAN Chunlei[2], ZHOU Nan[2], WANG Shuncheng[2]
(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 410083, China; 2. Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangzhou 510650, China)

Abstract: The as-cast Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu alloy ingots with a diameter of 310 mm were prepared by semi-continuous casting process with ultrasonic. The effects of ultrasonic power on microstructure and mechanical properties of as-cast Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu alloy ingots were investigated. The results show that the grains and second phases of ingot can be refined by the ultrasonic and the solid solubility of elements in aluminum matrix can be improved. The ultrasonic power is higher, the grain and the second phase are smaller, the second phase distribution is more uniform, the solid solubility is higher, the tensile mechanical properties are higher. When the ultrasonic power increases to 210 W, the tensile strength, yield strength and elongation are 329.44 MPa, 242.34 MPa and 11.97%, respectively. Compared with the ingot without ultrasonic, the tensile strength, yield strength and elongation were improved by 5.95%, 11.53% and 31.25%, respectively.

Key words: Al-Zn-Mg-Cu alloy; semi-continuous casting; ultrasonic power; grain refinement; homogenization

随着智能手机市场的迅猛发展,手机壳材质也成了近年来的设计热点。有色金属由于其独特的金属光泽和比强度特性,在手机壳体中得到了广泛应用,其中钛合金、镁合金、铝合金均有应用[1]。钛合金由于其高的成本以及较高密度,使其无法得到广泛应用;镁合金尽管有更好的金属光泽,但是其耐腐蚀性能差,密度较低,使其在实用性和手机质感方面均不能得到用户的青睐;相比之下铝合金成本适中,密度适中,可以保持较高的手机质感,因而得到了广泛的应用。

现阶段应用较多的手机壳材质是 6000 系铝合金,如:6013、6082、6063 等牌号,但是 6000 系铝合金最突出的弱点就是强度较低,因而在使用过程中容易出现变形,而 7000 系高强度铝合金可以完美地解决这个问题。但是在原始坯料生产中仍然存在一些问题,如铸坯中心裂纹、挤压开裂等[2,3],这都导致了大量的产品报废。

这些问题的根本原因在于原始铸坯质量不高,于是提高熔体质量,制备高质量的 7000 系合金铸锭成了一个急需解决的问题。超声波作为一种物理场可以改善合金铸锭质量,并且已得到了科学家们的广泛认可,英国 A. Das 等[4]将超声系统应用于改善铝硅合金的第二相,并探讨了超声场对凝固过程的影响;国内李晓谦等[5,6]则致力于超声波辅助大规格

收稿日期:2018-12-24
基金项目:广东省科学院院属骨干科研机构创新能力建设项目资助(2018GDASCX-0117),广东省科技厅公益研究与能力建设项目资助(2017A070701029),中山市重大科技计划项目资助(2016A1001)
作者简介:王　睿(1993-),辽宁沈阳人,硕士生.研究方向:超声波辅助半连续铸造.电话:13840565037,E-mail:2370653198@qq.com

铸锭工艺的研究，但是他们主要研究航空航天用铝,针对于手机壳材质的研究较少。因此,本文采用超声波辅助半连续铸造工艺制备 ϕ310 mm 的 Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu 合金铸锭，研究了超声波功率对半连续铸造 Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu 合金铸锭显微组织与力学性能的影响。

1　实验材料及方案

实验材料为 Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu 合金,采用商业纯铝(99.7%,质量分数,下同)、Al-10Cu 中间合金、纯锌(99.9%)和纯镁(99.95%)配制而成,并在 EMQ-250 型电阻炉中进行熔炼。待金属完全熔化后控制熔体温度在 725 ℃，随后充分搅拌并取 ϕ30 mm 的小型铸锭,利用 ICP-AES 方法[7]进行合金成分的测定,测定结果如表 1 所示。

表1 合金的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of alloy

Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Ti	Al
5.96	0.88	0.22	0.04	0.15	0.01	余量

实验设备包括:300 Kg 熔炼炉，立式直接水冷连铸机，超声波系统,SPECTRO-MAXx 型直读光谱仪,XQ-2B 型热镶嵌机,PG-2DA 型金相试样抛光机,LEICA-DMI3000M 光学显微镜和 Nova NanoSEM 430 型扫描电子显微镜。

随后进行铸前处理,具体包括:精炼处理(740 ℃)、扒渣、保温。首先采用纯度为 99.99%氩气与一定量的精炼剂混合对合金熔体进行精炼处理，随后在 730 ℃进行 30 min 静置保温。制备 ϕ310 mm,长度为 2 000 mm 的圆形铸锭，连铸初期不施加超声波,连铸至 500 mm;此时将超声工具杆端面作用于熔体液面下方 30 mm 处,施加 70 W 的超声,频率为 15±0.5 KHz;此后每隔 500 mm,调换超声功率,分别加入 140 W 和 210 W 的超声波,其他条件不变。其中引锭器速度为 65 mm/min,冷却水流量为 3 000 m^3/h,水温为 29 ℃。

对 4 种工艺的坯料进行取样处理。分别在圆形铸锭截面的 1/2 半径位置取样，随后对试样进行研磨、抛光和腐蚀处理后,分别在光学显微镜和扫描电子电镜上进行显微组织观察，并利用 EDS 对合金的第二相和 α-Al 基体元素固溶度进行检测，最后在 DNS200 电子拉伸试验机上进行室温拉伸,拉伸速度为 2 mm/min,依据GB/T16865-2013 制备圆棒拉伸试样,试样具体尺寸如图 1。

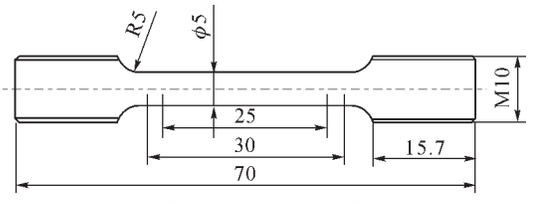
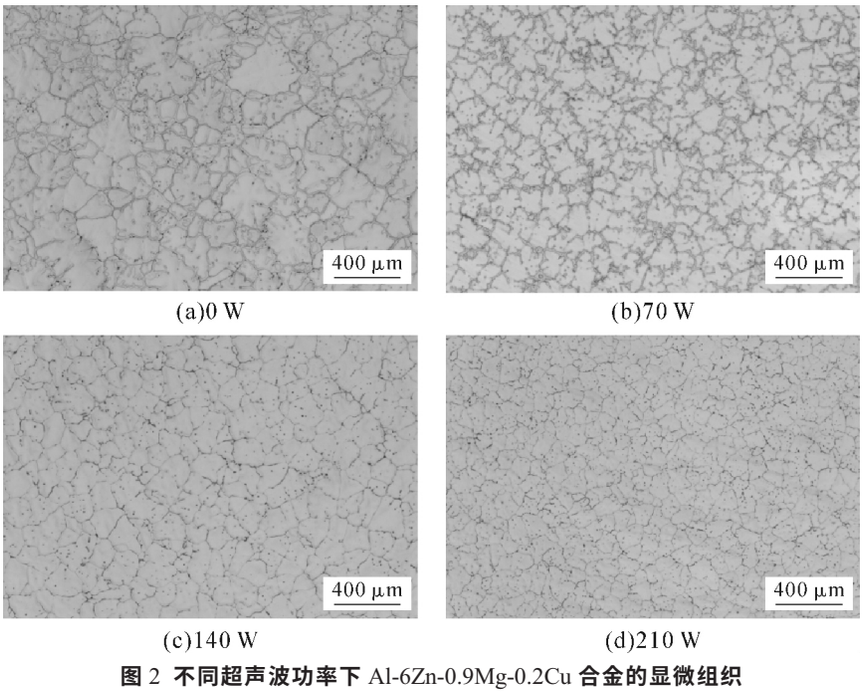


图 1 拉伸试样示意图
Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen

2　实验结果与分析

2.1　显微组织

图 2 为不同超声波功率下半连续铸造 Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu 合金铸锭的显微组织。从图 2 可看到,未施加超声波处理时,铸锭的显微组织为粗



(a)0 W　(b)70 W　(c)140 W　(d)210 W

图 2 不同超声波功率下 Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu 合金的显微组织
Fig.2 Microstructures of Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu alloy with different ultrasonic powers

大的 α-Al 枝晶，晶界较宽且连续成网状，如图 2(a)所示。施加超声波处理后，铸锭的 α-Al 晶粒逐渐从粗大的树枝晶向等轴晶转变，超声波功率越大，α-Al 晶粒尺寸越小，晶界越细，组织越均匀。当超声波功率增大到 210 W 时，铸锭的显微组织为细小均匀的等轴晶，如图 2(d)所示。结果表明，超声波起到了细化晶粒和晶界的效果，且这种细化效果会随着功率的提高而提高。这主要是因为超声波功率的提升改善了合金熔体的原有结晶方式，使晶粒更加细小均匀。

图 3 为不同超声波功率下 Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu 合金的扫描电镜图。经扫描电镜能谱分析，图 3 中亮白色化合物为 $Al_2Zn_3Mg_3$ 相，暗灰色化合物为 Al_3Fe 相。可见，未施加超声波处理时，$Al_2Zn_3Mg_3$ 相呈粗大球形状分布在 α-Al 基体上，少部分 $Al_2Zn_3Mg_3$ 相呈条状分布在 α-Al 晶界上，Al_3Fe 相呈粗大网状，如图 3 (a) 所示。施加超声波处理后，$Al_2Zn_3Mg_3$ 相和 Al_3Fe 相都得到细化，并且超声波功率越大，$Al_2Zn_3Mg_3$ 相和 Al_3Fe 相的尺寸越细小，如图 3(d)，当功率达到 210 W 时，$Al_2Zn_3Mg_3$ 相呈现出细小的球状，Al_3Fe 相也呈小块状且不连续分布。综上所述，超声波可以改善第二相的分布以及第二相的形貌，且随着超声波功率的增加，第二相分布会更加均匀，第二相也会变得细小。

2.2 元素固溶度

图 4 为半连续铸造 as-cast-Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu 合金铸锭中 Zn、Mg 元素的固溶度与超声波功率之间的关系曲线。从图 4 可看到，随着超声波功率的增大，Zn、Mg 元素在 α-Al 基体中的固溶度逐渐提高。未施加超声波处理时，Zn、Mg 元素的固溶度分别为 3.3%和 0.38%，当超声波功率增大到 210 W 时，Zn、Mg 元素在 α-Al 基体中的固溶度分别提升到了 3.91%和 0.46%，与未施加超声波处理相比，此时 Zn、Mg 元素的固溶度分别提高了 15.44%和 19.9%。

2.3 力学性能

图 5 为半连续铸造 Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu 合金拉伸力学性能随超声波功率的变化曲线。未施加超声波时，合金铸锭的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 310.9 MPa，217.3 MPa 和 9.12%。随着超声波功率的增加，铸锭组织大幅度改善，晶粒变得细小均匀，第二相也由粗大球状、网状变成了细小块状，且 α-Al 基体中 Zn、Mg 的固溶度也得到了提高。因此，当超声功率达到 210 W 时，合金铸锭的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别提高到了 329.44 MPa、242.34 MPa 和 11.97%，与常规铸锭的力学性能相比，抗拉强度、屈服强度和伸长率分别提高了 5.95%、11.53%和 31.25%。

3 讨论

实验结果表明，超声波辅助半连续铸造 Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu 合金的显微组织明显改善，固溶度和力学性能也得到了显著提高，且随着超声波功率的提高，改善效果加强。晶粒细化和均匀性的提高得益于超声波产生的空化效应和声流效应[8,9]。在超声场作用下，熔体内会产生很多空化泡，空化泡持

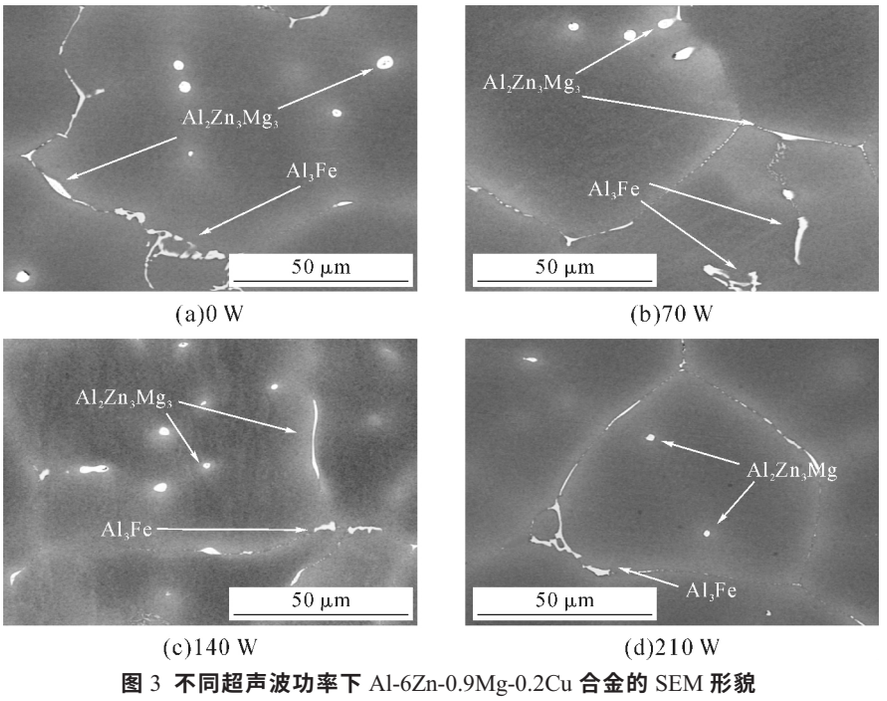


图 3 不同超声波功率下 Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu 合金的 SEM 形貌

Fig.3 SEM images of Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu alloys with different ultrasonic powers

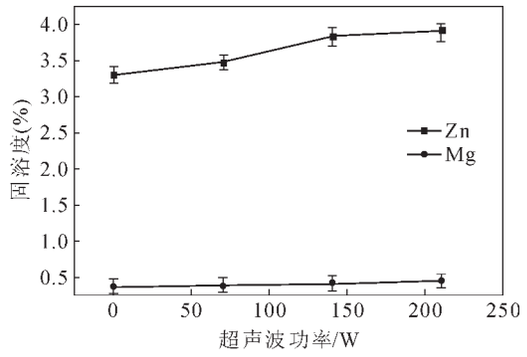


图 4　合金元素 Zn、Mg 固溶度随超声波功率变化的曲线

Fig.4　Changing curves of solid solubility of alloy elements Zn and Mg in different ultrasonic powers

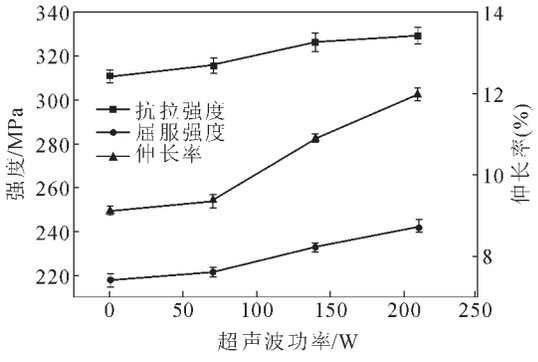


图 5　合金拉伸力学性能随超声波功率的变化曲线

Fig.5　Changing curves of tensile mechanical properties of alloy ingots with ultrasonic powers

续不断地吸收来自超声波的能量会使空化泡不断长大，当空化泡的压力超过某一阈值[10]时，空化泡就会破碎，空化泡破碎会产生局部高温高压且会吸收熔体的一部分热量[11]，而这两种效应均使熔体的过冷度提高，增加熔体中的形核核心。但是有空化效应仅仅能够细化晶粒，并不一定会产生晶粒尺寸均匀性提高的效果[12]。声流效应使得熔体中产生了区域性的压力梯度，这在熔体中可以形成对流现象，这种对流现象不仅对已形成的枝晶形成冲击，使之破碎形成新的核心，而且会使新的核心以及前面空化形成的核心在对流作用下运动，这种运动就会使得整个界面的形核核心处于均匀状态，那么也就产生了晶粒细化和均匀性提高的综合效应了。

外场作用使第二相的形貌发生了很大的变化。这是因为外场的加入改变了原有的凝固方式，改善了凝固组织的均匀性，增加了异质形核作用，于是第二相呈现出在逐渐优化的趋势，由原始状态的粗大汉字状变成 210 W 时的细小块状或点状第二相，在晶界内部固溶的第二相明显减少，且形状趋于减小。这是源于在连铸过程中超声波的加入使合金熔体中的元素分布更加均匀，减小了结晶梯度，使整个截面更趋近于整体凝固，进而形成了第二相的细化以及固溶度的提高。

在加入超声波后，超声波产生的空化和声流作用均改变了原有的结晶方式，使熔体中具备了更多的形核核心，形核核心在声流和空化泡破碎的冲击波作用下，均匀分散于熔体中，于是均匀分散的核心在空化泡产生的更大过冷度作用下均匀形核，于是晶粒由常规的树枝晶或混合组织[13]向等轴晶转变，于是整个截面晶粒更加细小、呈圆球状，且晶粒更加均匀。根据 Hall-Petch 关系式，晶粒越细小均匀，其抗拉强度、屈服强度就越大，且由于变形均匀性较好，所以还拥有较大的变形量。

4　结论

（1）在超声波辅助半连续铸造过程中，随着超声波功率的提高，Al-6Zn-0.9Mg-0.2Cu 合金的组织变得更加细小均匀，第二相也会得到细化，但不会产生新相。

（2）随着超声波功率的提高，Al-6Zn-0.9Mg- 0.2Cu 合金中 Zn、Mg 元素固溶度得到提高，当功率达到 210 W 时，固溶度分别为 3.91%和 0.46%。

（3）与未施加超声波的原始铸锭相比，合金在力学性能得到了显著提高，当超声场功率达到 210 W 时，其抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到了 329.44 MPa、242.34 MPa 和 11.97%，分别提升了 5.95%、11.53%和 31.25%。

参考文献：

[1]　何新宇. 手机机身用铝合金 [J]. 轻合金加工技术，2017，45(6): 1-6.

[2]　孙德勤.提高铝合金铸锭质量的关键技术[J]. 铸造技术，2010，31(5): 660-663.

[3]　余传典，张效迅，张文丰，等. 7050 铝合金冷挤压中心开裂的数值模拟及实验[J]. 塑性工程学报，2015(1): 29-33.

[4]　Das A, Kotadia H R. Effect of high-intensity ultrasonic irradiation on the modification of solidification microstructure in a Si-rich hypoeutectic Al-Si alloy [J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 125: 853-859.

[5]　曹飞，蒋日鹏，李晓谦，等. 超声预处理对 ZL205A 铝合金铸件凝固组织的影响 [J]. 中南大学学报（自然科学版），2018，49(1): 31-38.

[6]　李瑞卿，李晓谦，陈平虎，等. 超声空化对大规格高强铝合金热顶铸造凝固组织的影响及作用机理[J]. 中南大学学报（自然科学版），2016，47(10): 3354-3360.

[7]　黎正华，李晓谦，张明，等. 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.

[8]　Zou H, Pan Q, Shi Y, et al. Effect of ultrasonic field on microstructure and mechanical properties of as-cast 7085 aluminum alloy[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(6):1285-1294.

[9]　钟贞涛，李瑞卿，李晓谦，等. 超声处理对 2219 大规格铝锭微观组织与宏观偏析的影响 [J]. 工程科学学报，2017，39(9):

1347-1354.

[10] Eskin G I, Eskin D G. Production of natural and synthesized aluminum-based composite materials with the aid of ultrasonic (cavitation) treatment of the melt [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2003, 10(4, 5): 297-301.

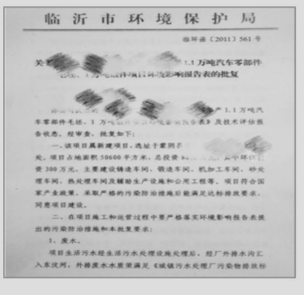
[11] 罗执,张杨,赵愈亮, 等. 复合场作用下 Al-5.0Cu-1.0Fe 合金的显微组织和力学性能 [J]. 中国有色金属学报,2016,26(4): 707-714.

[12] Zhu H, Qin F M, Chen H Q. Effect of ultrasonic temperature and output power on microstructure and mechanical properties of as-cast 6063 aluminum alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 777: 1025-1029.

[13] 贾征,乐启炽,张志强, 等. C_2Cl_6 除气剂–超声场联合处理对铝合金氢含量及力学性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014,43(6): 1427-1431.

转让出售信息

抢

本公司位于山东省蒙阴县境内，厂区占地65亩，钢结构厂房。铸造车间5 400 m²，机加工车间2 300m²，制壳车间1 800m²，打磨车间1 800 m²，4台1t中频电炉。40 t粘土砂砂处理线一条，钢丸覆膜砂浇注线一条。

铸造环评手续、土地证件齐全，另有2个闲置厂房，本公司现对外转让出售，欢迎洽谈，联系电话:15854853968。