文章编号:1004-0609(2011)02-0318-07

超声作用下半连铸 7050 铝合金的偏析行为及形成机制

黎正华^{1,2},李晓谦^{1,2},张 明^{1,2},许显华^{1,2}

(1. 中南大学 机电工程学院,长沙 410083;

2. 中南大学 现代复杂装备设计与极端制造教育部重点实验室,长沙 410083)

摘 要:采用 SPECTRO-MAXx 立式直读光谱仪和 Leica 金相显微镜,研究超声功率对半连铸过程中 7050 铝合金 微观组织及溶质 Zn 元素径向分布的作用规律。结果表明:在超声外场作用下铸锭组织明显细化,混晶减少,溶 质 Zn 元素的径向逆偏析程度减弱,并随着超声功率的增加,晶粒细化程度及宏观偏析的弱化效果更好,溶质 Zn 元素的偏析比由未加超声时的 1.190 降低为 240 W 功率超声作用时的 1.086;在超声外场调控下,铝合金熔体偏 析弱化的主要原因是由于形核率增加,晶粒细化,两相区液固相相对运动速度减小;液穴变浅,由铸锭收缩导致 的富集液相径向流动减弱,是径向偏析程度减弱的另一原因;在半连续铸造过程中,采用超声外场控制液相的流 动是弱化铸锭径向宏观偏析的有效手段。

关键词:7050 铝合金;半连铸;逆偏析;超声;空化;偏析比 中图分类号:TG249.7,TB559 文献标志码:A

Segregation behavior and formation mechanism of 7050 aluminum alloy produced by semi-continuous casting under ultrasonic field

LI Zheng-hua^{1, 2}, LI Xiao-qian^{1, 2}, ZHANG Ming^{1, 2}, XU Xian-hua^{1, 2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

 Key Laboratory of Modern Complex Equipment Design and Manufacturing, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The macro-distribution of solute elements Zn and microstructure for 7050 aluminum alloy by semi-continuous casting under the ultrasonic field were investigated by SPECTRO-MAXx and Leica optic microscopy. The results show that the microstructure refines, the duplex structure consisting of coarse-cell and fine-cell dendritic grains decreases, the inverse segregation grade of Zn decreases effectively. With the increase of the ultrasonic power, the microstructure becomes finer and more uniform, the distribution of solute elements is more harmonious, the segregation ratio of Zn through 240 W ultrasonic treatment decreases to 1.086 from 1.190 without ultrasonic. After being treated by ultrasonic field, the nucleation ratio of the Al melt increases, the microstructure refines, the relative velocities of the solid and liquid phases in mushy zone decreases, and the shrinkage-induced flow of the enriched solute decreases due to the sump height decreases, which suppresses macro-segregation in a great degree. The liquid phases flow controlled by ultrasonic field is an effective means to weaken the macro-segregation in semi-continuous casting.

Key words: 7075 aluminum alloy; semi-continuous casting; inverse segregation; ultrasonic; cavitation; segregation ratio

7050 铝合金是 Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金,在保持较高强度水平下具有韧性好、疲劳强度高、抗腐蚀

能力强等综合性能,是广泛应用于飞机制造的航空高 强度铝合金。铝合金材料的广泛应用和飞速发展,尤

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB731700) 收稿日期:2010-04-08;修订日期:2010-07-29 通信作者:李晓谦,教授,博士;电话:0731-88877380;E-mail:meel@csu.edu.cn

其是在航空航天领域的应用,对变形铝合金铸锭及深 加工后的性能提出严格的要求。因此,研究铝合金的 凝固过程具有重要的意义。其中,凝固组织的成分偏 析问题是研究凝固过程的核心问题之一。偏析还使铸 锭的组织不均匀,不但增加铸锭产生热裂纹的倾向, 同时对后续热处理工艺和制品的最终性能也有不同程 度的影响。因此,如何抑制宏观偏析一直是众多学者 关注的课题。

近年来,在铝熔体凝固过程中施加外场这一方法 受到了极大地关注,已发展成一种新的改善金属凝固 组织的技术。国内外对外场作用半连铸过程的探索始 于 20 世纪初 ,ESKIN 等^[1]在铝合金半连续铸造过程中 施加电磁场发现,在磁场受迫对流的作用下,铸锭中 的宏观偏析得到弱化。ZHAO 等^[2]和张勤等^[3]也获得 相同的实验结果,并对弱化偏析机理进行说明。YANG 等^[4]在 Al-Si-Cu 合金电磁离心铸造实验过程中发现铸 锭中宏观偏析也得到减弱。以上这些工作多集中于电 磁外场对宏观偏析的实验研究及机理探索,李英龙 等^[5]、范金辉和翟启杰^[6]以及蒋日鹏等^[7]为代表的一批 科研工作者对超声外场的研究也多集中于对晶粒尺寸 及形貌的影响,对宏观偏析的研究多处于定性阶段, 而关于超声外场作用下溶质元素在半连续铸造过程中 的分布研究鲜见报道。本文作者通过在半连续铸造过 程中施加不同超声功率进行实验对比,研究超声外场 对 7050 铝合金溶质元素宏观偏析的作用规律,初步探 讨超声外场抑制宏观偏析的作用机理。

1 实验

1.1 实验装置

超声波发生器:输出功率为105、135、170、200、 240W;输出频率为(19±0.5)kHz;

超声振动系统:PZT 压电陶瓷换能器;45[#]钢变幅 杆;钛合金工具杆。

其它辅助设备:2t熔炼炉和半连续铸机及配套的 温度控制记录仪,热电偶,位移控制操作装置, SPECTRO-MAXx 立式直读光谱仪,Leica台式金相显 微镜,其实验装置如图1所示。

1.2 实验材料

实验材料为 7050 铝合金,由质量分数为 99.7%的 工业纯铝铸锭和各种合金母锭混合配置而成,材料的 合金成分由 ICP-AES 方法实测所得如表 1 所列。



图 1 超声半连铸示意图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic semi-continuous casting

表1 实验用 7050 铝合金合金成分

Table 1Chemical composition of 7050 aluminum alloy(mass fraction, %)

Zn	Cu	Mg	Fe	Cr	
6.15	2.15	2.30	0.10	0.04	
Mn	Si	Zr	Ti	Al	
0.10	0.03	0.11	0.03	Bal.	

1.3 实验方案

实验采用的铸造工艺参数为:铝熔体温度 700 , 铸造速度约 0.72 mm/s ,结晶器以及喷淋水水压约 0.10 MPa,在铸造过程中从顶部直接加入超声波并尽可能 保持其它铸造工艺条件不变。采用"插丝法"测定初 始凝固前沿的位置点及其高度,即分别插入铁丝测 h_1 和 h_2 的值(见图 2),其中 h_1 为沿铸锭中心线方向测得 的液穴最深处与液面之间的距离, h_2 为沿结晶器内壁 测得的液穴最浅处与液面的距离,定义液穴深度 $h=h_1-h_2$ 。图 2 中 v_sh_r 为铸锭收缩引起的流速, α 为液 穴切线与水平方向的夹角, v_h 为 v_{shr} 正交分解后的水 平分量, v_v 为 v_{shr} 正交分解后的竖直分量。

采用 SPECTRO-MAXx 立式直读光谱仪对不同工 况下的铸锭横截面进行成分测定,确定试样的径向溶 质元素分布。采用偏析比 q 作为偏析量化的指标:

 $q = w_{\max} / w_{\min} \tag{1}$



图 2 DC 铸造过程中铸锭收缩引起的流动以及液穴测量位 置示意图

Fig.2 Schematic diagram of shrinkage flower and measure location of sump in DC casting

式中: w_{max}和 w_{min}分别表示凝固组织中溶质质量分数的最大值和最小值。

实验对比工况:未施加超声场对铝合金熔体施加 功率超声,超声波发生器输出功率分别为135、170、 240 W,工作频率为(19±0.5) kHz。

2 结果与分析

图 3 所示为半连续铸造过程中不同超声功率作用 下铸锭中心和边部的微观组织。由图 3 可看出,无超 声作用时,铸锭边部和中心均存在混晶,即粗大晶粒 与细小晶粒混杂在一起,晶粒尺寸差异特别明显(见图 3(a)和(e)),观察超声外场作用下铸锭微观组织发现, 混晶尺寸差异逐渐减小,边部和中心组织均得到不同 程度的细化,且组织分布更为均匀,呈球形,微观组 织的形貌也由发达的柱状晶转变为等轴晶。这说明在 超声外场作用下,超声波对铝合金铸锭整个截面内的 凝固组织均具有很好的细化效果。对比功率超声作用 后的凝固组织表明,超声功率对铸锭的凝固组织细化 效果不同,240 W 功率超声作用对铸锭具有最佳的细 化效果。

其原因可能是超声波的空化效应和声流效应对形 核和形核长大过程的作用,一方面超声空化泡在崩溃 的瞬间聚集的能量迅速释放出来,产生瞬时高温高 压^[8-10],使得空化泡周围的熔体产生瞬时过冷,显著 提高形核率;另一方面空化泡崩溃时产生的冲击波和 激射流使得近程有序的液体分子转变为远程有序,开 始自发形核,二次提高形核率。同时,强烈的冲击波 可以打断或熔断正在生长的晶核,从而抑制枝晶的生 长;晶核随着液相运动,扩散到铸锭各个部位,从而 促进整个铸锭的形核,使形成的组织更为均匀。超声 波的空化效应和声流效应随着超声功率的增加而增 强,因此,超声功率越大,微观组织的均匀化细晶效 果越好。

表 2 所列为实验测得的凝固前沿 h、h₁和 h₂值。 由表 2 可看出,液穴深度 h 随着超声功率的增加逐渐 变小,当超声功率值为 240 W 时,液穴深度 h 值相对 于无超声外场作用时减少 13 mm。

表 2 实验所测的凝固前沿形态随超声功率变化规律

Table 2 Evolution of solidifying front shape with ultrasonicpower by experimental measurement

Ultrasonic power/W	<i>h</i> /mm	h_1/mm	h_2/mm
0	210	240	30
135	206	235	29
170	201	231	30
240	197	227	30

产生上述现象的原因在于功率超声作用时,超声 外场产生的空化效应和声流效应加速液穴内熔体的传 质和传热过程^[11-12],整个液穴内温度场趋于均匀,同 时增大了熔体的过冷度,显著提高熔体中的形核数 目^[13-15],表现为液穴内大量晶核在相似的环境中进行 同向生长,形成细小的等轴晶(见图 3)。由于中心的温 度梯度小于边部的温度梯度,因此,超声对温度场的 作用效果对铸锭中心的影响要比边部作用效果强,使 得液穴深度降低,并随着超声功率增大,空化作用增 强,传质传热过程更为显著,因此液穴的深度也变浅。

图 4 所示为溶质 Zn 元素在铸锭横截面内的径向 分布。横坐标值为沿半径方向结晶器壁与测量点之间 的距离,纵坐标值为 Zn 浓度,Y坐标轴相当于结晶器 壁,右端为铸锭的中心。由图 4 可知,溶质 Zn 元素 在铸锭中存在逆偏析,中心部位含量低于铸锭边部。 通过未加超声和施加功率超声对比,Zn 溶质分布变化 曲线在超声作用下趋于平坦,分布变得均匀。在实验 仪器所提供的 240 W 超声功率内,超声功率越大,耦 合的偏析曲线越平坦,溶质元素径向分布情况越均匀。



图 3 在不同超声功率下 7050 铝合金铸锭的显微组织

Fig.3 Microstructures of 7050 aluminum alloy ingots under different ultrasonic powers: (a) P=0, center part; (b) P=135 W, center part; (c) P=170 W, center part; (d) P=240 W, center part; (e) P=0, edge part; (f) P=135 W, edge part; (g) P=170 W, edge part; (h) P=240 W, edge part

宏观偏析的出现与合金的凝固过程紧密相关,凝固时的液相流动对液穴中溶质的扩散起决定性作用^[16],本文作者针对7050铝合金半连续铸造中溶质Zn元素的逆偏析现象,采用超声外场控制液相流动的方法来控制铸锭径向宏观偏析的主要原因如下。

图 5 所示为超声功率与偏析比之间的变化规律。 由图 5 可看出,随着超声功率的增加,Zn 元素的偏析 比由未加超声时的 1.190 降为施加 240 W 超声时的 1.086,偏析程度显著降低。



图 4 不同超声功率下溶质元素的径向分布

Fig.4 Solute concentration profile under different ultrasonic powers





Fig.5 Evolution of segregation ratio of Zn with ultrasonic power

2.1 超声外场对两相区流场的影响

对比浇注口引起的外流场和超声流场,超声流场 对细晶区域的贡献很小,即相对浇铸速度而言,导入 超声时超声声流的流速对整个液穴的宏观流场影响不 大^[17]。由于导致合金元素宏观偏析的主要原因为两相 区液固相的相对运动,因此,研究纯液相流场对溶质 分布的影响没有多大意义。

对于两相区,根据不同的固相分数,可将其分为 浆状区和糊状区,在这两个区域的流场情况是截然不 同的。浆状区固相率为 0~0.3,固相悬浮在液相中, 影响溶质分布流场的因素主要是溶质对流和外场强迫 对流^[18]。在凝固过程中,固相的溶质平衡浓度要低于 液相的溶质平衡浓度,因此,液相中先结晶悬浮晶粒 的相对运动和长大过程是造成偏析的一个重要的原 因。悬浮晶粒中溶质浓度相对较低,在运动的过程中 长大,由于重力和浮力的相互作用,最终沉积下来。 由于固相和液相密度不一样,固相在伴随液相运动的 过程中速度存在差异,固液相的相对速度越小,液穴 内溶质分布越均匀,由 Ni 和 Incropera 提出的液固相 相对速度的表达式^[1]:

$$v_{\rm s} - v_{\rm l} = \frac{1 - g_{\rm s}}{18\mu_{\rm m}} (\rho_{\rm s} - \rho_{\rm l}) d_{\rm s}^2 g$$
⁽²⁾

式中: v_s 为固相速度; v_1 为液相的速度; g_s 为固相分数; ρ_s 为固相密度; ρ_1 为液相密度; d_s 为液相中漂浮的晶粒尺寸;g为重力加速度; μ_m 为固液相混合熔体的相对粘度。

液相中漂浮的晶粒尺寸*d*。是介于临界晶核半径和 铸锭中晶粒尺寸之间的值。在一定固相分数下,临界 晶核半径减小,形核率增加,结果表现为铸锭截面上 晶粒尺寸的减小,并且在 0~240 W 有效功率范围内, 超声功率越大,细化效果越明显,如图 3 所示,因此 超声外场作用时液相中漂浮的晶粒尺寸 *d*。也是减小 的。分析式(2)可知:当固相分数一定时,由于超声外 场使得液相中漂浮的晶粒尺寸减小,导致液固相相对 运动速度减小,即超声外场的引入有效地控制了浆状 区的液固相相对运动,弱化了偏析的程度。

2.2 铸锭收缩导致的流动

在浆状区下面的糊状区,液相进一步凝固,固相率为 0.3~1.0,固相晶粒之间相互搭接形成了一个刚性骨架,对于铝合金而言体积收缩率约为 6%~8%,铸锭收缩的同时导致液相沿体积收缩方向流动,由于补偿的液相流体溶质成分含量要高于铸锭的平均成分,因此,凝固前沿富集溶质的液相收缩流动是导致铸锭宏观偏析产生的原因之一。DC 铸造过程铸锭收缩引起的流动情况如图 2 所示,铸锭收缩速度分量可正交分解为竖直分量 v_v和水平分量 v_h,其中:

$$v_{\rm h} = v_{\rm shr} \sin \alpha = 0.5 v_{\rm cast} g_1 \beta \sin(2\alpha) \tag{3}$$

式中: v_{shr} 为铸锭收缩引起的流速; β 为收缩率; g_1 为液相分数; v_{cast} 为铸造速度。

竖直分量与铸造速度方向相同,水平分量沿铸锭 的半径方向指向铸锭的表面,会使溶质由铸锭的中心 向表面运动,尽管这一物理过程发生得很慢,运动的 距离很短,但是,当所有的溶质都存在这种运动趋势 时,在铸锭的表面将形成正偏析,而没有更加富含溶 质的熔体补偿铸锭的中心部位,因此在铸锭的中心形 成负偏析。超声场的加入使得液穴变浅,且超声功率 越大,液穴深度越浅,又由于α <45°,因此,由铸锭 收缩引起的液相水平速度分量随超声功率的增加而减 少,进而使得逆偏析程度降低。另外,施加功率超声 能有效抑制枝晶的生长,促进等轴晶的形成,使得液 相在枝晶间传输的阻力增加,从而弱化偏析的程度。 再者,施加超声外场能有效降低铝熔体中的氢气浓度, 这些均有利于抑制枝晶间的溶质流动^[10,18]。

为了更好地反映铸锭收缩对径向宏观偏析的影响,引入凝固过程水平方向溶质传递距离(*L*_h)公式^[1]:

$$L_{\rm h} = Ac_0 L_{\rm m} \beta \sin(2\alpha)/2 \tag{4}$$

式中: α 为液穴切线与水平方向的夹角;A为常数, 与合金的成分有关; L_m 为糊状区高度; β 为收缩率; c_0 为合金元素的液相成分。

(dL_h/dR)/c₀ 的值为铸锭径向相对偏析比值,其值 能有效地反映铸锭径向的相对偏析程度。分析式(4)可 知:铸锭径向相对偏析比值随液穴切线与水平方向的 夹角 α 的减小而减小,而在实验功率下,随着超声功 率的增加,液穴深度 h 逐渐变小,相对偏析比降低, 因此,铸锭的径向宏观偏析程度随着超声功率的增加 呈减弱的趋势。

3 结论

 1) 超声处理能促进晶核的形成,有效地细化铸锭 微观组织,并呈球状。

2) 半连续铸造过程中,超声外场作用使得液穴变
 浅,由铸锭收缩导致的富集液相径向流动减弱,相对
 偏析比降低,逆偏析程度减弱。

3) 晶粒的细化阻碍富集液相在枝晶间的流动,同时使得两相区液固相相对速度减小,从而降低溶质元素的逆偏析程度。

REFERENCES

aluminum alloys[J]. Progress in Materials Science, 2008, 53: 421-480.

- [2] ZHAO Zhi-hao, CUI Jia-zhong. Effect of low-frequency magnetic field on microstructures and macrosegregation of horizontal direct chill casting 7075 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182: 185–190.
- [3] 张 勤,崔建忠,路贵民,班春燕. 电磁振荡法半连铸 7050 合金的微观组织及溶质元素分布[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(5): 1184-1190.
 ZHANG Qin, CUI Jian-zhong, LU Gui-min, BAN Chun-yan. Microstructure and solute distribution of 7075 alloy produced by semi-continuous casting under electromagnetic vibration[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(5): 1184-1190.
- [4] YANG Yuan-sheng, ZHANG Qing-sheng, HE You-liang, HU Zhuang-qi. The segregation of copper and silicon in Al-Si-Cu alloy during electromagnetic centrifugal solidification[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2001, 2: 271–275.
- [5] 李英龙,李宝绵,刘永涛. 功率超声对 Al-Si 合金组织的影响
 [J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(4): 719-722.
 LI Ying-long, LI Bao-mian, LIU Yong-tao. Effects of power ultrasonic on structure of Al-Si alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(4): 719-722.
- [6] 范金辉, 翟启杰. 物理场对金属凝固组织的影响[J]. 中国有 色金属学报, 2002, 12(1): 11-15.
 FAN Jin-hui, ZHAI Qi-jie. Effect of physical field on metal solidification structure[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(1): 11-15.
- [7] 蒋日鹏,李晓谦,张立华,张 雪,吴 钰. 超声施振方式对 纯铝凝固组织细化规律的研究[J]. 材料工程,2009,2:6-7. JIANG Ri-peng, LI Xiao-qian, ZHANG Li-hua, ZHANG Xue, WU Yu. Research on the solidification structure refining laws of pure aluminum under different methods of ultrasonic vibration[J]. Journal of Materials Engineering, 2009, 2: 6-7.
- [8] JIANG X, XU H. Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy[J]. Material Letters, 2005, 59(3): 190–193.
- [9] 李新涛,高学鹏,李廷举,李喜孟,金俊泽,殷国茂. 连铸过
 程中超声细晶技术的研究[J]. 稀有金属材料与工程,2007, 36(3):377-380.

LI Xin-tao, GAO Xue-peng, LI Ting-ju, LI Xi-meng, JIN Jun-ze, YIN Guo-mao. An experimental study of grain refinement by ultrasonic treatment during continuous casting[J]. Rare Materials and Engineering, 2007, 36(3): 377–380.

[10] 李军文,由向群,付 莹,桃野正,田汤善章. 超声波共振度 对铸锭内气孔生成的影响[J]. 铸造技术, 2008, 29(6): 790-792. LI Jun-wen, YOU Xiang-qun, FU Ying, MOMONO T, TAYU Y. Effect of ultrasonic resonance degree on the formation of porosity in aluminum ingot[J]. Foundry Technology, 2008, 29(6): 790-792. [11] 李 林. 超声场下空化气泡运动的数值模拟和超声强化传质研究[D]. 成都:四川大学,2006:39-58.
 LI Lin. Numerical simulation on the motion equation of aquitation hubble and the aphaneament of mass transfer due to

cavitation bubble and the enhancement of mass transfer due to ultrasonic[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006: 39–58.

- [12] 周定伟,刘登瀛. 声空化场强化单相对流传热的实验研究[J].
 自然科学进展, 2002, 12(5): 553-556.
 ZHOU Ding-wei, LIU Deng-ying. An experimental study of the enhancement of single-phase convection due to cavitation[J].
 Progress in Natural Science, 2002, 12(5): 553-556.
- [13] ESKIN G I, MAKAROV G S. Effect of cavitation melt treatment on the structure refinement and property improvement in cast and deformed hypereutectic Al-Si alloys[J]. Materials Science Forum, 1997, 242: 65–70.
- [14] 刘荣光. 超声波在铝熔体中的声场和空化效应及其对凝固过 程影响[D]. 长沙: 中南大学, 2007, 12: 22-24.
 LIU Rong-guang.The acoustic field and cavitation of the

ultrasound in aluminum melts and the effect of ultrasonic

vibration on solidification[D]. Changsha: Central South University, 2007, 12: 22-24.

- [15] FLEMINGS M C. Our understanding of macrosegregation: Past and present[J]. Iron and Steel Institute of Japan, 2000, 9: 833-841.
- [16] LIU Xin-bao, YOSHIAKI O. Microstructure and mechanical properties of AZ91 alloy produced with ultrasonic vibration[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 487: 120–123.
- [17] 谢恩华. 铝合金超声凝固溶池流场数值模拟及实验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009: 20-23.
 XIE En-hua. Numerical simulation of flow field during solidification and experimental research on aluminum alloy in melt pool[D]. Changsha: Central South University, 2009: 20-23.
- [18] 周尧和,胡壮麟,介万奇. 凝固技术[M]. 北京:机械工业出 版社,1998:112-121.

ZHOU Yao-he, HU Zhuang-lin, JIE Wan-qi. Solidification technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1998: 112-121. (编辑 李艳红)