文章编号: 1004-0609(2013)03-0673-06

二维振动参数对半固态 ZL104 合金微观组织的影响

谭建波1,张海英2,李增民1,李立新1

(1. 河北科技大学 材料科学与工程学院,石家庄 050018;2. 郑州职业技术学院 材料工程系,郑州 450121)

摘 要:利用自制的倾斜板内安置扰流柱,可实现三维振动的倾斜剪切流变装置,研究二维振动方向和振动频率 对半固态 ZL104 合金组织的影响,分析振动方向 XY、YZ、XZ 对半固态 ZL104 合金组织的作用机理。结果表明: 振动方向为 XZ 时,倾斜板上向下流动的合金液中,初生枝晶和液体之间产生的相对运动较大,初生晶粒之间发 生碰撞和摩擦的几率多,晶粒细小,形状圆整;合金液在倾斜板上滞留的时间长,初生固相率高。随振动频率增 大,晶粒尺寸减小,形状因子增大。当振动频率为 50 Hz 时,初生固相率为 56.09%,晶粒尺寸为 6.53 μm,形状 因子为 0.57。

关键词:二维振动;振动方向;振动频率;半固态;ZL104 合金 中图分类号:TG 146.4 文献标志码:A

Effect of parameters of two dimensional vibration on microstructures of semi-solid ZL104 alloy

TAN Jian-bo¹, ZHANG Hai-ying², LI Zeng-min¹, LI Li-xin¹

School of Material Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;
 Department of Material Engineering, Zhengzhou Technical College, Zhengzhou 450121, China)

Abstract: The influence of two dimensional vibration directions and frequency on the structures of ZL104 alloy was studied by the disturbing pillars installed in a self-designed sloping board, which is a rheological experimental facility with sloping, cooling and shearing function and three-dimensional vibration function. The action mechanism of vibration direction *XY*, *YZ* and *XZ* on the microstructure of the alloy was analyzed. The results show that on the vibration direction *XZ*, the relative motion given between primordial dendrite and molten ZL104 alloy is severe in molten ZL104 alloy down flow on the sloping board. Because the probability of collision and friction among the primordial grains is plentiful, the grains are refined, and their shapes are orbicular. The long the residence time of the molten ZL104 alloy on the sloping board, the plentiful the primordial solid phase. With the increase of vibration frequency, the shape factor increases and the grain size decreases. When the vibration frequency is 50 Hz, the proportion of primordial solid phase reaches 56.09%, the grain size is 6.53 µm and the shape factor is 0.57.

Key words: two-dimension vibration; vibration direction; vibration frequency; semi-solid; ZL104 alloy

作为一种新型的半固态合金制备技术——倾斜冷却法首先在日本提出^[1],其原理是将略高于液相线温度的熔融金属倒在倾斜板上,利用倾斜板的激冷、合金熔体的冲击和重力作用,细化晶粒,获得理想半固

态合金^[2-3]。目前,倾斜冷却剪切流变技术已经在半固态合金坯料制备^[4]、合金组织细化^[5]、半固态挤压铸造^[6]、半固态轧制^[7]及半固态连铸^[8-9]等领域得到了广泛应用。

收稿日期: 2012-04-16; 修订日期: 2012-09-10

基金项目:河北省自然科学基金(E2010000880);河北省专家出国培训项目资助(2010194)

通信作者: 谭建波,教授,博士; 电话: 0311-81668716; E-mail: tanjian1998@163.com

近年来在光滑倾斜板的基础上,又出现了一些新的研究方法,如波浪法^[10]、剪切振动法^[11]、斜管法^[12]、 阻尼冷却管法^[13]、蛇形通道法^[14]、正弦波通道法^[15]、 扰流柱法^[16]等。本文作者利用自制的可实现三维振动 的倾斜剪切流变装置,并在倾斜板内放置扰流柱,研 究了二维振动参数对半固态 ZL104 合金组织的影响, 研究结果对倾斜板法快速半固态合金有一定的参考价 值。

1 实验

实验所用材料为 ZL104 合金,名义成分(质量分数)为:9%Si,0.4%Mn,0.25%Mg,余量为 Al。实际测得合金的固相线为 555℃,液相线为 595℃。实验设备为自行设计、振动频率可调,可实现三维振动的半固态合金制备装置,如图 1 所示。



图1 倾斜冷却剪切装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sloping experimental facility with cooling and shearing function

实验条件均为:倾斜板倾斜角度为 45°,倾斜板 预热温度为 125 ℃,浇注长度为 400 mm,浇注温度 为 600 ℃,倾斜板内安放水滴形扰流柱,可以破碎枝 晶,合金液绕行扰流柱时,可以增加晶核数量,扰流 柱为叉排,如图 2 所示,图中 *S*=15 mm, *L*=40 mm。

振动方向分别为*XY、YZ*和*XZ*方向,相同振动方向下,通过改变振动频率制备半固态ZL104合金浆料,



图 2 扰流柱安置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of disturbing pillars

振动方向示意图如图 3 所示,图中 X 方向与倾斜板中 心线在水平面中的投影平行,Y 方向与水平面中的 X 方向垂直,Z 方向垂直于水平面,振动频率分别为 30、 40 和 50 Hz。在倾斜板下端,用取样器接取少量不同 制备参数下的半固态 ZL104 合金浆料并立即水淬,制 取金相试样,试样用 4%的 NaOH 溶液侵蚀。利用图 像分析技术测定水淬组织中初生固相的平均周长、平 均尺寸,计算初生固相晶粒的尺寸和形状因子^[11]。为 了减小误差,对每个试样的 6~8 个视场进行了测量, 然后取其平均值作为该试样初生固相的组织特征。



图 3 X、Y、Z 方向示意图 Fig. 3 Schematic diagram of X, Y and Z direction

2 结果与讨论

2.1 XY方向振动时 ZL104 的组织

振动方向为 XY 方向时,不同振动频率下 ZL104 水淬组织的微观组织特征如图 4 所示,组织特征参数 见表 1。

由图 4 和表 1 可以看出,振动方向为 XY 方向时,随着振动频率的增加,初生相晶粒尺寸逐渐减小,由 15.23 µm 减小到 6.75 µm;形状因子逐渐增大,由 0.41 增加到 0.58,初生固相率变化不大。振动频率为 30 Hz 时,组织呈鱼骨状,振动频率为 50 Hz 时,晶粒尺寸 细小,形状较圆整,没有枝晶。

合金液沿倾斜板向下流动时同时受到*X*和*Y*方向 振动的干扰,*X*方向振动对合金液的影响可分解为两 个方向,一个方向垂直于倾斜板,另一个方向平行于 倾斜板,如图3所示。合金液受到垂直于倾斜板方向 上的振动时,首先,可使合金液中已生长的枝晶和未 凝固的液体发生较大的相对运动,使晶粒之间发生碰 撞和摩擦,造成枝晶最脆弱的部位(枝晶臂等)被剪切 而折断、破碎,形成了许多细小晶粒,细化枝晶;第 二,由于振动所产生的搅动,使在长大过程中初生枝 晶周围的液体造成了局部的温度起伏,从而有利于枝 晶的熔断,导致新晶核的产生,使晶粒不断细化;第 三,增加了合金熔体与冷却板的热交换,冷却速度加



图 4 XY方向振动时 ZL104 的组织

Fig. 4 Microstructures of ZL104 under *XY* vibration direction: (a) 30 Hz; (b) 40 Hz; (c) 50 Hz

表1 XY方向振动时 ZL104 组织特征

Frequency/Hz	Solid phase rate/%	Grain size/µm	Shape factor
30	35.01	15.23	0.41
40	40.21	10.91	0.46
50	41.61	6.75	0.58

快,可抑制晶粒的长大; 第四,可避免在倾斜板上凝固结壳。平行于倾斜板方向的振动激振力可增加合金液向下流动的速度;由于 Y 方向的振动是垂直于倾斜板的中心线方向,因此,对晶核形成和长大的影响主

要体现在: 合金熔体在向下流动的过程中,初生固相 由于受到平行于倾斜板表面的 Y 方向的振动,加剧了 晶粒之间的摩擦、碰撞的几率,使得枝晶更易破碎。 由于 Y 方向和 X 方向同时振动,因此,晶粒在受到垂 直于倾斜板振动以及向下流动的过程中同时受到 Y 方 向的激振作用,使得枝晶和未凝固的液体之间的相对 运动增大,晶粒之间碰撞和摩擦加剧,晶粒进一步 细化。

随着振动频率的增加,振动强度增大,对组织的 影响表现为:1) 晶粒之间的位移增大,晶粒之间的碰 撞和摩擦加剧,枝晶臂等被剪切而折断、破碎的几率 增加;2) 增强了合金熔体与冷却板的热交换,冷却速 度加快,抑制晶粒的长大,因此,随着振动频率的增 加,晶粒尺寸减小,形状因子增大。

另外,由于在倾斜板内安放了扰流柱,*XY*方向振动时,扰流柱的运动轨迹如图5所示,增强了对金属液的搅拌、散热和破碎枝晶作用。



图 5 XY 振动时, 扰流柱的运动轨迹

Fig. 5 Movement track of disturbing pillars under *XY* vibration direction

2.2 YZ 方向振动时 ZL104 的组织

振动方向为 YZ 方向时,不同振动频率下水淬组 织的微观组织特征如图 6 所示,组织特征参数见表 2。

由图 6 和表 2 可以看出,振动方向为 YZ 时,随着振动频率的增加,初生相晶粒尺寸逐渐减小,由 12.32 μm 减小到 7.13 μm;形状因子逐渐增大,由 0.46 增加到 0.54,振动频率为 50 Hz 时晶粒尺寸细小,形 状较圆整。

YZ方向振动时,合金液沿倾斜板向下流动时,同时受到 Y和 Z方向振动的干扰,Z方向振动对合金液的影响可分解为两个方向,一个方向垂直于倾斜板方向,另一个方向平行于倾斜板方向向上。垂直于倾斜



图 6 YZ 方向振动时 ZL104 的组织

Fig. 6 Microstructures of ZL104 under *YZ* vibration direction: (a) 30 Hz; (b) 40 Hz; (c) 50 Hz

表 2 YZ 方向振动时 ZL104 组织特征

Table 2Microstructure features of ZL104 under YZ vibrationdirection

Frequency/Hz	Solid phase rate/%	Grain size/µm	Shape factor
30	48.68	12.32	0.46
40	40.39	8.99	0.52
50	45.79	7.13	0.54

板方向上的振动对合金液的影响和*X*方向垂直分力的 影响相同,在此不再赘述。*YZ*方向振动和*XY*方向振 动对组织的影响主要体现在*Z*方向和*X*方向沿倾斜板 内表面分力方向的不同,一个向上,一个向下。YZ方向振动时,合金液由于受到一个向上的分力的影响,合金液在倾斜板上滞留的时间相对要长,初生固相率较高。

振动频率的影响主要体现在晶粒受到振动次数和 强度的影响,随着振动频率的增加,振动次数和强度 增大,晶粒细化。

2.3 XZ 方向振动时 ZL104 的组织

振动方向为 XZ 方向时,不同振动频率下水淬组 织的微观组织特征如图 7 所示,组织特征参数见表 3。

由图 7 和表 3 可以看出,振动方向为 XZ 时,随 着振动频率的增加,初生相晶粒尺寸逐渐减小,由 11.19 μm 减小到 6.53 μm;形状因子逐渐增大,由 0.42 增加到 0.57,振动频率为 50 Hz 时晶粒尺寸细小,形



图 7 XZ 方向振动时 ZL104 的组织

Fig. 7 Microstructures of ZL104 under *XZ* vibration direction: (a) 30 Hz; (b) 40 Hz; (c) 50 Hz

表3 XZ方向振动时 ZL104 组织特征

Table 3	Microstructure	features	of ZL104	under XZ	vibration
direction					

Frequency/Hz	Solid phase rate/%	Grain size/µm	Shape factor
30	47.34	11.19	0.42
40	52.56	8.81	0.52
50	56.09	6.53	0.57

状较圆整。

XZ方向振动时,合金液沿倾斜板向下流动时,同 时受到X和Z方向振动的干扰,X方向振动对合金液 的影响可分解为两个方向,一个方向垂直于倾斜板方 向,另一个方向平行于倾斜板方向向下,Z方向振动 对合金液的影响可分解为两个方向,一个方向垂直于 倾斜板方向,另一个方向平行于倾斜板方向向上,因 此,合金液受到的垂直于倾斜板方向上的振动是两个 分力的叠加,合金液中已生长的枝晶和未凝固的液体 之间产生的相对运动最大,晶粒之间发生碰撞和摩擦 的机会最多,枝晶更容易被剪切而折断、破碎,因此, 晶粒更细化。另外,由于叠加振动所造成的初生枝晶 长大过程中周围液体局部的温度起伏更大,更有利于 枝晶的熔断,导致新晶核的产生。

由于 *X* 方向和 *Z* 方向在沿倾斜板方向的分力抵 消,因此,合金液在倾斜板上滞留的时间最长,初生 固相率也最高。

3 结论

 二维振动方向对倾斜板法制备半固态合金的 微观组织特征有较大影响,随着振动频率的增加,初 生相晶粒尺寸逐渐减小,形状因子逐渐增大。

 振动方向为 XY 方向,振动频率为 30 Hz 时, 组织呈鱼骨状,随着振动频率的增加,初生相晶粒尺 寸由 15.23 μm 减小到 6.75 μm,形状因子由 0.41 增加 到 0.58。

3) 振动方向为 YZ 时,随着振动频率的增加,初 生相晶粒尺寸由 12.32 μm 减小到 7.13 μm,形状因子 由 0.46 增加到 0.54。

4) 振动方向为 XZ 时,随着振动频率的增加,初 生相晶粒尺寸由 11.19 μm 减小到 6.53 μm,形状因子 由 0.42 增加到 0.57,振动频率为 50 Hz 时,形状圆整, 晶粒尺寸最为细小。

REFERENCES

- QIU P Q, NOMURA H Y, TAKITA M. Improvement of microstructure and tensile properties of cast iron by semi-solid casting[J]. Foundry Engineering, 1999, 71(10): 685–690.
- [2] PIAO Long-yun, TETSUICHI M. Influence of BN film of inclined cooling plate on solid fraction in semi-solid slurry[J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 2004, 68(4): 228–231.
- [3] FUMI T, TETSUICHI M. Grain refining of semi-solid Cu-Sn alloys castings using an inclined cooling plate[J]. Copper and Copper Alloy, 2004, 43(1): 177–182.
- [4] MOTEGI T. Continuous casting of semi-solid Mg-9%AI-1%Zn alloy[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites. Tsukuba, Japan: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2002: 831–836.
- [5] 管仁国,康立文. 倾斜式冷却剪切技术制备 Al-3%Mg 半固态 合金坯料[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(5): 811-816.
 GUAN Ren-guo, KANG Li-wen. Preparing semi-solid billet of Al-3%Mg alloy by sloping cooling/shearing process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(5): 811-816.
- [6] MUUMBO A, NOMURA H. Casting of semi-solid cast iron slurry using combination of cooling slope and pressurization[J]. International Journal Cast Metals Research, 2004(1): 39–46.
- [7] TOSHIO H. Semi-solid strip casting using a twin roll casting equipped with a cooling slope[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130(11): 558–561.
- [8] TANABE F. Continuous casting of semi-solid AC4CH aluminum alloy produced using an inclined cooling plate[J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 2003, 67(6): 291–294.
- [9] 戴安国, 邢书明. 倾斜冷却半固态连铸 A356 铝合金过程稳定 性研究[J]. 铸造, 2006(3): 239-241.
 DAI An-guo, XING Shu-ming. Research on stability of continuous casting of semi-solid A356 aluminum alloy by inclined cooling[J]. Foundry, 2006(3): 239-241.
- [10] 谢丰广,管仁国,王付兴.新型倾斜板技术制备 A2017 半固态合金[J].特种铸造及有色合金,2008,28(10):766-768.
 XIE Feng-guang, GUAN Ren-guo, WANG Fu-xing. Preparation of A2017 semi-solid alloy by a new wave like sloping plate process[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2008, 28(10): 766-768.
- [11] 谭建波,李志勇,王英杰. 倾斜冷却剪切流变参数对 AlSi9Mg 组织的影响[J]. 中国有色金属学报,2009,19(4):607-612.
 TAN Jian-bo, LI Zhi-yong, WANG Ying-jie. Effect of rheocasting by incline cooling and shearing on microstructures of semi-solid AlSi9Mg[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(4): 607-612.
- [12] 王小康,王 明,杨湘杰.旋转浇注法制备 AZ91D 半固态浆
 料[J].特种铸造及有色合金,2008,28(11):846-848.

WANG Xiao-kang, WANG Ming, YANG Xiang-jie. Preparation of semi-solid AZ91D alloy slurry by rotary pouring method[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2008, 28(11): 846–848.

- [13] 黄晓锋,田载友,曹喜娟.非枝晶半固态浆料制备技术的研究进展[J].中国铸造装备与技术,2009(5):5-9.
 HUANG Xiao-feng, TIAN Zai-you, CAO Xi-juan. Research progress in nondendritic semi-solid slurry preparation technologies[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2008(5): 5-9.
- [14] 杨小容,毛卫民,高冲.采用蛇形管通道浇注法制备半固态浆料[J].中国有色金属学报,2009,19(5):869-873.
 YANG Xiao-rong, MAO Wei-min, GAO Chong. Preparation of semi-solid feedstock by serpentine pipe pouring[J]. The Chinese

Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(5): 869-873.

- [15] 张颂阳, 郭晓琴. Sin 函数冷却法制备半固态铝合金[J]. 特种 铸造及有色合金, 2009, 29(5): 423-425.
 ZHANG Song-yang, GUO Xiao-qin. Preparation of semi-solid aluminum alloy by sine function method[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2009, 29(5): 423-425.
- [16] 谭建波,李增民,李立新. 扰流柱参数对半固态 AISi9Mg 组织的影响[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(10): 1243-1247. TAN Jian-bo, LI Zeng-min, LI Li-xin. Influence of the parameters of pin fins on the microstructures of semi-solid AISi9Mg alloy[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(10): 1243-1247.

(编辑 何学锋)