

摆动振荡对 A356 铝合金半固态组织的影响

郭洪民¹, 杨湘杰², 罗学泉¹, 程尚栩¹, 王 明²

(1. 南昌大学, 材料科学与工程学院, 南昌 330031;

2. 南昌大学, 机电工程学院, 南昌 330031)

摘 要: 提出一种制备半固态浆料的新方法——摆动振荡法。采用该方法制备了 A356 铝合金的浆料。结果表明: 摆动振荡可有效地防止稳定凝固壳的形成, 可制备出组织优良的半固态浆料, 其初生 $\alpha(\text{Al})$ 的等效直径在 $60\ \mu\text{m}$ 以下, 形状因子可达 0.8 以上, 特别地, 可以大幅度提高浇注温度。

关键词: A356 合金; 半固态成形; 摆动振荡; 凝固; 晶粒细化

中图分类号: TG 292; TG 244

文献标识码: A

Effects of angular oscillation on semi-solid microstructure of A356 aluminum alloy

GUO Hong-min¹, YANG Xiang-jie², LUO Xue-quan¹, CHENG Shang-xu¹, WANG Ming²

(1. School of Materials Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. School of Mechatronic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: A new method of angular oscillation (AO) to produce sound semi-solid slurry for rheoforming was proposed. The semi-solid slurry preparation of A356 aluminum alloy was carried out, applying this method of AO. The results show that the limited angular oscillation can prevent the formation of solid skin effectively; the sound semi-solid slurry can be obtained by properly controlling inclined angle of barrel and oscillation intensity. The primary $\alpha(\text{Al})$ particles have an average diameter smaller than $60\ \mu\text{m}$ and an average shape factor larger than 0.8. Especially, the superheat temperature of melt can be increased to a higher temperature.

Key words: semi-solid processing; angular oscillation; solidification; grain refinement; A356 alloy

流变铸造是一种新型凝固组织控制技术, 关键是获得含有细小均匀分布的球形/近球形晶粒的半固态浆料^[1-2]。为了降低成本, 突破传统机械搅拌和电磁搅拌的限制, 国内外开发了许多低成本工艺^[3-15], 但仅 New rheocasting (NRC)^[7]有工业应用的公开报道, 其它工艺均处于实验室研究阶段。尽管世界范围内对制备半固态浆料的研究方兴未艾, 但还存在以下几个共性问题: 1) 间歇、非连续的制备模式, 难以连续制备高

质量的半固态浆料。该模式虽然可以满足高压铸造和挤压铸造等成形工艺的要求, 但不能满足连铸、连续铸轧、连续铸挤等短流程技术的要求; 2) 过多依赖于低过热度浇注。虽然低过热度浇注有利于细化晶粒, 但要求浇注温度必须控制在液相线附近, 对温度控制的精度和均匀性要求非常高, 在实际操作中有较大困难, 特别是连续制备或大体积浆料微观组织的均匀性方面, 这是上述工艺尚未得到工业推广应用的重要原因。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50804023, 50474007); 江西省教育厅科学技术项目(GJJ08006)

收稿日期: 2009-02-16; 修订日期: 2009-05-13

通信作者: 郭洪民, 副教授, 博士; 电话: 0791-3969611; E-mail: guohongmin@ncu.edu.cn

研究表明^[16-17], 获得优质半固态浆料的首要条件是于凝固初期在合金熔体中获得最大数量的自由晶, 并保证其存活。本文作者以此为基础, 提出摆动振荡式流变铸造工艺(Angular oscillation, AO), 高效率制备优质的合金半固态浆料。该方法将高过热度合金熔体浇入一倾斜的圆筒形振荡室, 振荡室绕其中心轴线做周期性的回转式摆动, 在凝固初期对合金熔体产生局部激冷和搅拌混合作用, 获得含有大量自由晶的低固相率的半固态浆料; 同时控制该浆料的后续冷却过程, 便可获得具有一定固相率的优质半固态浆料。通过开展 A356 铝合金浆料制备实验检验本方法的有效性, 并研究工艺参数对半固态组织的影响。

1 实验

图 1(a)所示为 AO 法流变铸造实验所用装置的示意图。实验装置主要由振荡激励器、底注式中间包、

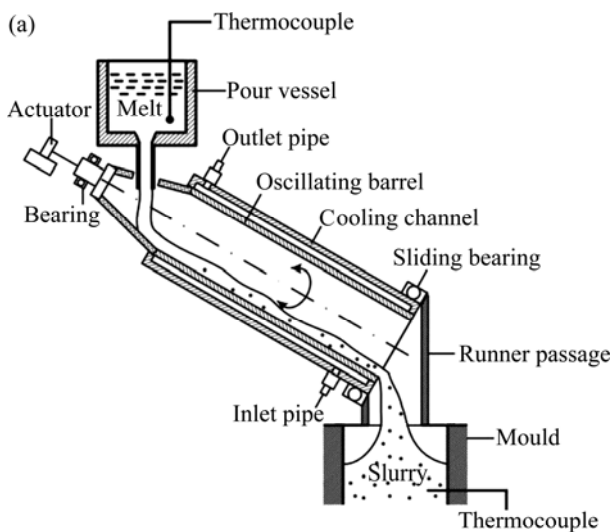


图 1 AO 法实验装置示意图和振荡波形
 Fig.1 Schematic diagram of illustration of apparatus (a) and oscillation cycle (b)

振荡室、浆料收集坩埚和独立的温控系统。温控系统用于控制合金、振荡室和浆料收集坩埚的温度。振荡室的主要特征在于绕其中心轴线按一定的频率和幅度做周期性的回转式摆动(非整周旋转)。浆料收集坩埚用于存储半固态浆料, 并调节该合金浆料的固相率和冷却速度。振荡激励器可以按照需求调整振荡室的振荡幅度和频率, 本研究中所用的振荡波形如图 1(b)所示。

实验合金为工业用铝合金 A356, 其主要元素成分(质量分数)为: 7.1%Si, 0.4%Mg, 0.1%Fe, 余量 Al。DTA 测定该合金液相线温度为 614, 固相线温度为 544。将实验合金在电阻炉内熔化并精炼, 最后调整到 710 待用。精炼后的合金转入底部开口的中间包, 在预定的浇注温度 665 下提升浇注阀进行浇注。中间包的预热温度为 690, 每次实验合金的浇注量为 3 000 g。振荡室材质为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 其温度通过冷却通道保持在 120, 与水平方向的夹角分别控制在 15°、20°、30°、40°, 振荡频率(f , 与旋转速度和振荡幅度紧密相关)分别控制在 0.5、1.0、2.0、2.5 和 4.0 Hz, 振荡幅度(A , 2π 的函数)分别控制在 $\pi/3$ 和 $\pi/9$ 。浆料收集坩埚的材质为粘土-石墨, 预热温度设定为 590。为了便于比较, 浇注比较试样 2 个, 一个试样为合金液在 665 浇注到室温的浆料收集坩埚, 一个试样为合金液在 617 浇注到预热温度为 590 的浆料收集坩埚。具体工艺参数设计见表 1。

半固态浆料在浆料收集坩埚内缓慢冷却, 当温度达到 589 时, 取样并水淬, 获得直径为 10 mm、高为 10 mm 的金相试样。利用配有定量金相分析系统的光学显微系统进行显微组织观察和分析。用晶粒等效圆直径 $D=2(A_c/\pi)^{1/2}$ 表征初生 $\alpha(Al)$ 的大小, 用晶粒形状因子 $F=4\pi A_c/P^2$ 表征初生 $\alpha(Al)$ 的形貌, 其中 A_c 和 P 分别代表初生 $\alpha(Al)$ 晶粒的面积和周长。

2 结果与讨论

图 2(a)所示为合金液在 665 浇注到室温的浆料收集坩埚时获得的微观组织。由图 2(a)可见, 此时的微观组织为典型的粗大树枝晶。图 2(b)所示为合金液在 617 浇注于 590 的浆料收集坩埚时获得的微观组织。由图 2(b)可见, 虽然采用液相线铸造, 但由于收集坩埚的冷却能力弱, 获得的微观组织更为粗大, 因此该坩埚对晶粒细化几乎没有贡献。

表 1 所列的实验数据表明, 振荡室倾角、振荡频率和幅度共同影响着振荡室对合金熔体的冷却效果。随

表1 实验参数、出口温度、结皮情况统计

Table 1 Summary of experiment conditions, exit temperature and formation of solid skin

Test No.	Oscillation frequency/Hz	Oscillation amplitude/rad	Inclined angle/(°)	Solid skin	Exit temperature/
F1	0.5	$\pi/3$	30	No	622
F2	1.0	$\pi/3$	30	No	617
F3	2.0	$\pi/3$	30	No	611
F4	2.5	$\pi/3$	30	No	610
FA1	2.0	$\pi/9$	30	No	618
FA2	4.0	$\pi/9$	30	No	610
S1	2.0	$\pi/3$	15	Yes	-
S2	2.0	$\pi/3$	20	No	611
S3	2.0	$\pi/3$	40	No	625

Pouring temperature: 665

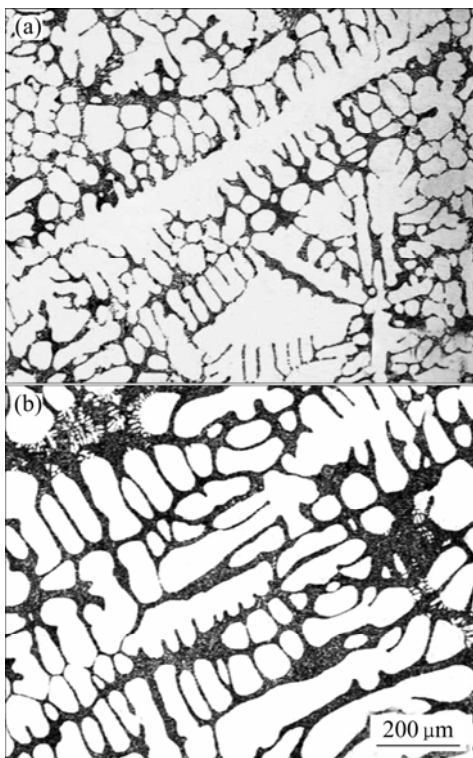


图2 比较试样微观组织

Fig.2 Microstructures of comparison samples: (a) Conventional casting alloy melt at 665 °C, crucible at room temperature; (b) Liquidus casting, alloy melt at 617 °C, crucible at 590 °C

随着振荡频率的增加，振荡室的冷却能力变强，流出振荡室合金液的温度(出口温度)低于合金液相线。倾角过小时，振荡室内壁有凝固壳产生，而倾角过大时，出口温度高于合金液相线温度。总体而言，摆动振荡可有效地防止稳定凝固壳的形成，这对该技术的工业应用具有重要意义。

2.1 振荡强度对微观组织的影响

图3所示为不同振荡强度下的A356合金微观组织。AO工艺的显著特征是振荡室作周期性的摆动，由图2和3可知，这种有限角度的摆动振荡能够有效地细化晶粒，改善晶粒形态。在浇注温度为665 °C，振荡幅度为 $\pi/3$ 的条件下，随着振荡频率的增加，初生 $\alpha(\text{Al})$ 由粗大的树枝晶转为蔷薇晶；当频率达到2.0 Hz后，晶粒尺寸可细化到60 μm 以下，形状因子可达到0.85。本研究中摆动振荡相当于低频率高振幅的振动，因此，可以用 $f^2 \cdot A$ (角加速度)来表征AO工艺的振荡强度^[18]。 $f^2 \cdot A$ 数值越大，振荡强度越高，其对晶粒尺寸和形状因子的影响如图4所示。随着振荡强度的增加，晶粒逐渐被细化，形态越来越接近于球形，但当振荡强度增加到一定程度时，曲线走向变缓。

在近液相线铸造^[3-6]、NRC^[7]、CRP^[8]、SSR^[10]等著名工艺中，浇注温度均接近于合金的液相线。但AO工艺可以将浇注温度提高到665 °C，摆脱了对低过热度浇注的依赖，有利于实际生产中的浇注操作和温度控制。与冷却斜坡^[11]及近期开发的波浪型倾斜板振动技术^[12]相比，AO工艺可以进一步改善微观组织，更适合于为流变成形在线提供半固态浆料。与GUO和YANG^[15]近期提出的剪切低温浇注相比，由于AO的振荡室作周期性摆动而非整周旋转，因此可以精确地控制系统温度，提高了该工艺的稳定性，易于实现工业化，为半固态浆料的连续制备提供了先决条件，目前本课题组正在进行该方面的研究。

2.2 倾角对微观组织的影响

图5所示为不同振荡室倾角下的A356合金半固态微观组织。如图3(c)和图5(a)所示，当输送管倾角

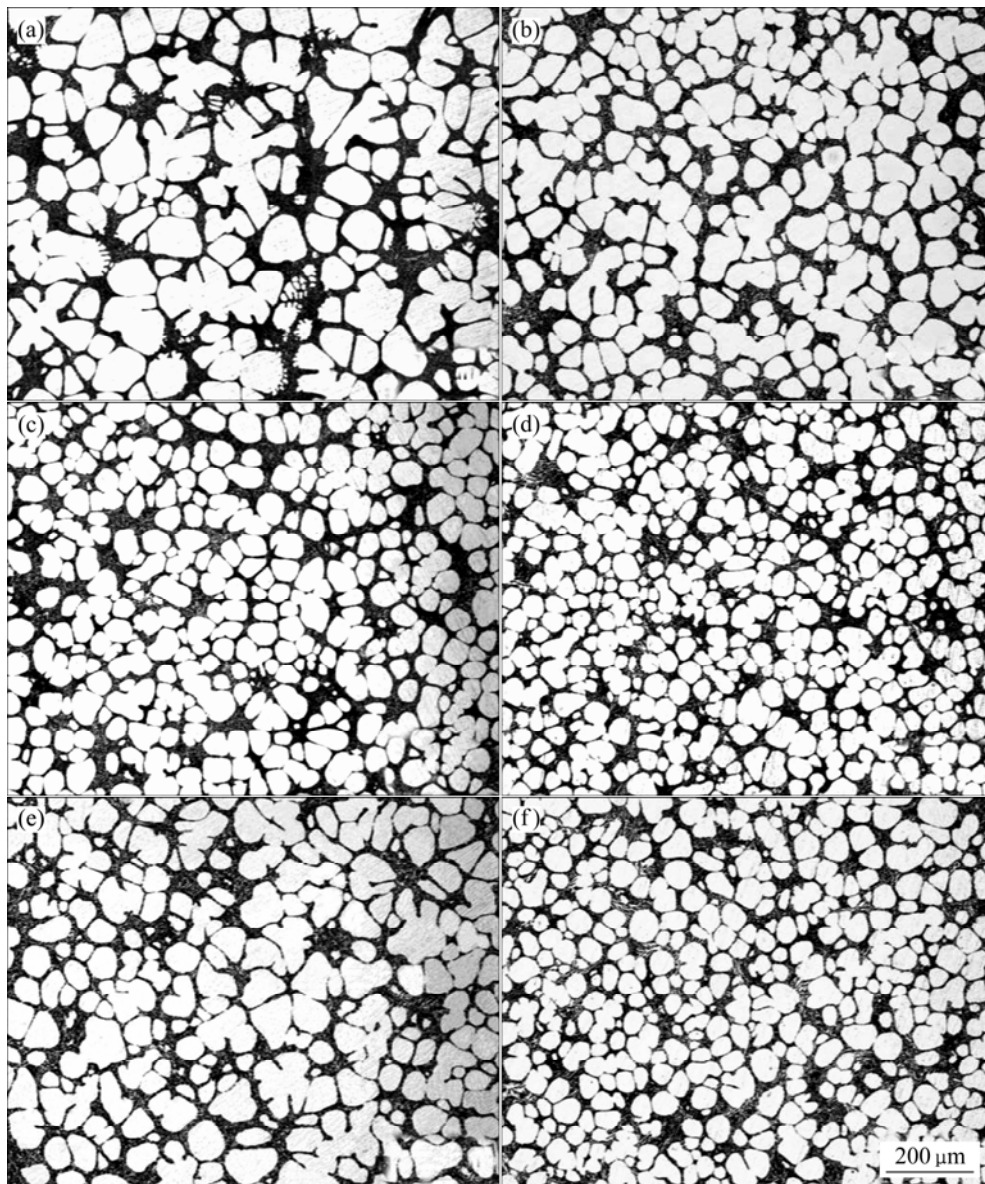


图 3 不同振荡强度下的 A356 合金微观组织

Fig.3 Semi-solid microstructures of A356 alloy under different oscillation intensities: (a) Test F1; (b) Test F2; (c) Test F3; (d) Test F4; (e) Test FA1; (f) Test FA2

低于 15° 时, A356 合金熔体在振荡室内凝固严重, 形成凝固壳, 无法获得半固态浆料。当输送管倾角在 $20^\circ\sim 30^\circ$ 范围内时, 浆料收集坩埚中的初生 $\alpha(\text{Al})$ 具有流变成形所需的组织特征, 平均等效圆直径为 $63\ \mu\text{m}$, 平均形状因子为 0.83。而当输送管倾角达到 40° 时, 浆料收集坩埚中的半固态组织发生恶化, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒数目减少、尺寸变大、形态变差, 为粗大的树枝晶, 如图 5(b) 所示。因此, 最佳输送管倾角为 $20^\circ\sim 30^\circ$ 。

2.3 合金凝固特征分析

由图 2 和 3 可知, 振荡室是晶粒细化的重要场所, 而这与合金熔体在 AO 工艺中的流动特征密切相关。在 AO 中, 合金熔体是在离心力、摩擦力和重力共同作用下在振荡室内发生凝固的。根据振荡室的半径和旋转速度, 合金熔体受到的离心力仅为重力的 $50\%\sim 90\%$ 。在 3 种力的作用下, 合金熔体流经振荡室的过程中具有如下流动特征: 1) 合金熔体在离心力和摩擦力作用下会随振荡室作旋转运动, 但刚进入振荡室的合金熔体没有圆周方向的运动。在重力作用下, 合金熔体的旋转角度比振荡室的旋转角度小, 使合金

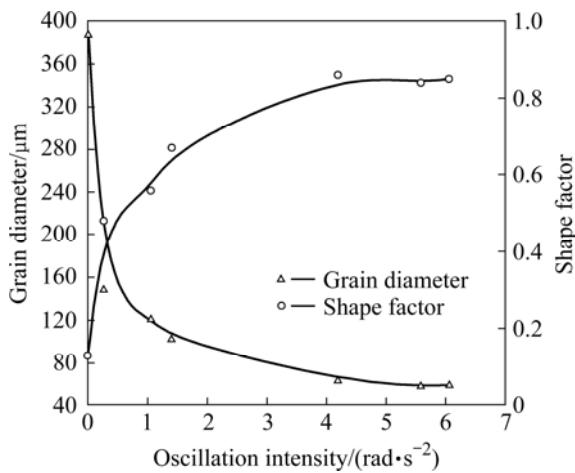


图4 振荡强度对晶粒尺寸和形态的影响

Fig.4 Effects of oscillation intensity on grain diameter and shape factor



图5 不同振荡室倾角下的对 A356 合金半固态微观组织

Fig.5 Semi-solid microstructures of A356 alloy at different inclined angles: (a) S2; (b) S3

熔体和振荡室之间因惯性作用产生横断面上的相对运动；该相对运动会因周期性地改变旋转速度，特别是旋转方向而进一步加强。2) 浇注动能和重力会推动和加速合金熔体沿着振荡室内壁向下运动，使合金熔体和振荡室之间产生纵断面上的相对运动。

这些相对运动将在合金熔体内形成紊流，产生自搅拌混合特征，加强合金熔体对振荡室内壁的冲刷效果。一般来说，半固态浆料中初生固相的晶粒数量由形核数量、晶粒游离及自由晶的存活率共同决定；自由晶的存活取决于其周围液相的温度，如果液相温度低于其液相线温度则自由晶能够保存，如果周围液相存在过热，则自由晶变小甚至重新熔化。对于具体的工艺参数而言，振荡幅度、振荡频率、振荡室倾角是主要影响因素。振荡室型壁局部激冷与合金熔体自搅拌混合的综合作用使合金熔体整体或局部在液相线附近波动，从而产生类似于反复进行熔化和凝固的效果，有利于结晶团簇的形成，增强了合金凝固时的能量起伏、结构起伏和浓度起伏，从而降低了临界形核功^[19]。在振荡与重力作用下，合金熔体不断与新的管壁接触，作为形核衬底的型壁在振荡作用下可无限延伸，显著增加了新生晶核可利用的形核衬底面。在离心力作用下，金属液与型壁的接触更充分，能更有效地发挥型壁的激冷效果，产生了更多的晶核。上述相对运动促使液面与型壁接触处形成的晶粒脱落和游离。在熔体中，由于振荡引起的温度起伏和对流也增强了对已生成晶粒的破碎、熔断作用，从而细化晶粒^[1, 19-20]。振荡强度影响着局部激冷效果、横断面相对运动强度和新生晶核可利用的形核衬底面积。提高振荡强度有利于增强局部激冷和紊流，使出口温度低于合金液相线温度，提高游离晶粒的存活率，进而增强晶粒细化程度。当振荡强度增加到一定程度时，上述效果已经得到很充分的发挥，继续加强振荡，对晶核数量的增加及晶粒的脱落和游离不再有进一步的作用。振荡室倾角决定着纵断面相对运动强度和金属液在振荡室内停留时间。当倾角过大时，虽然加强了纵断面相对运动，有利于晶粒游离，但熔体受型壁冷却时间过短，出口温度高于液相线，在管壁上难以形成稳定的晶核，或已形成的游离晶粒重新熔化。当倾角过小时，熔体在输送管内停留的时间长，型壁的相对冷却能力变强，总体相对运动强度变弱，产生凝固壳，无法获得半固态浆料。因此输送管倾角有一个合理的选择范围。

3 结论

- 1) 利用摆动振荡法可以制备出合格的半固态浆料，并可以大幅度提高浇注温度；浆料中初生 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒的平均直径在 $60 \mu\text{m}$ 以下，平均形状因子在 0.8 以上。
- 2) AO 流变铸造将机械搅拌和冷却斜坡技术融为

一体,利用摆动振荡和重力浇注形成了特殊的浇注过程,对凝固初期游离晶形成有重要影响,其影响程度取决于振荡强度和振荡室的倾斜角度。当流经振荡室的合金液处于过冷状态时,晶粒细化效果明显,可获得质量优异的半固态浆料。振荡强度增加到一定程度,组织变化不再明显。

REFERENCES

- [1] FLEMINGS M C. Behavior of metal alloys in the semi-solid state[J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 22 (4): 957-981.
- [2] 罗守靖, 田文彤, 谢水生, 毛卫民. 半固态加工技术及应用[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(6): 765-769.
LUO Shou-jing, TIAN Wen-tong, XIE Shui-sheng, MAO Wei-min. Technology and applications of semi-solid forming[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(6): 765-769.
- [3] XIA K, TAUSIG G. Liquidus casting of a wrought aluminum alloy 2618 for thixoforming[J]. Mater Sci Eng A, 1998, 246(1/2): 1-10.
- [4] DONG J, CUI J Z, LE Q C, LU G M. Liquidus semi-continuous casting, reheating and thixoforming of a wrought aluminum alloy 7075[J]. Mater Sci Eng A, 2003, 345(1/2): 234-242.
- [5] LIU Zheng, MAO Wei-min, ZHAO Zhen-duo. Effect of pouring temperature on semi-solid slurry of A356 Al alloy prepared by weak electromagnetic stirring[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(1): 71-76.
- [6] ZHANG Xiao-li, LI Ting-ji, XIE Shui-sheng, JIN Jun-ze. Semisolid processing AZ91 magnesium alloy by electromagnetic stirring after near-liquidus isothermal heat treatment[J]. Mater Sci Eng A, 2008, 475(1/2): 194-201.
- [7] KAUFMAN H, WABUSSEG H. Metallurgical and processing aspects of the NRC semi-solid casting technology[J]. Aluminum, 2000, 76(1/2): 70-75.
- [8] APELIAN D, PAN Q Y, FINDO M. Low cost and energy efficient methods for the manufacture of semi-solid (SSM) feedstock[J]. Die Casting Engineer, 2004, 48(1): 22-28.
- [9] LEE JIN-KYU, KIM SHAE K. Modeling of in-ladle direct thermal control rheocasting process[J]. Mater Sci Eng A, 2007, 449/451: 680-683.
- [10] MARTINEZ R A, FLEMINGS M C. Evolution of particle morphology in semisolid processing[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36(8): 2205-2210.
- [11] CARDOSO LEGORETTA E, ATKINSON H V, JONES H. Cooling slope casting to obtain thixotropic feed stock II: Observations with A356 alloy[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43(16): 5456-5469.
- [12] 管仁国, 李江委, 李喜坤, 石路, 陈礼清. AZ91D 镁合金波浪型倾斜板振动技术触变成形[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(11): 1798-1802.
GUAN Ren-guo, LI Jiang-wei, LI Xi-kun, SHI Lu, CHEN Li-qing. Thixoforming of AZ91D magnesium alloy by vibrating wavelike sloping plate process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(11): 1798-1802.
- [13] 曾怡丹, 石力开, 张志峰, 梁博, 徐骏. 熔体分散混合法制备半固态浆料[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(4): 630-636.
ZENG Yi-dan, SHI Li-kai, ZHANG Zhi-feng, LIANG Bo, XU Jun. Preparation of semi-solid slurry by melt spreading and mixing technique [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(4): 630-636.
- [14] YANG X R, MAO W M, PEI S. Preparation of semisolid A356 alloy feedstock cast through vertical pipe[J]. Materials Science and Technology, 2007, 23(9): 1049-1053.
- [15] GUO H M, YANG X J. Efficient refinement of spherical grains by LSPSF rheocasting process[J]. Materials Science and Technology, 2008, 24(1): 55-63.
- [16] FLEMINGS M C, MARTINEZ R A. Principles of microstructure formation in semi-solid metal processing[J]. Solid State Phenomena, 2006, 116/117: 1-8.
- [17] 郭洪民, 杨湘杰. 过冷熔体中球晶组织的形成规律[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(4): 651-659.
GUO Hong-min, YANG Xiang-jie. Formation mechanism of spherical particles in undercooled melt[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(4): 651-659.
- [18] CAMPBELL J. Effect of vibration during solidification[J]. International Metals Reviews, 1981, 26(2): 71-108.
- [19] 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
HU Han-qi. Metal solidification theory[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [20] OHNO A. Solidification-the separation theory and its practical applications[M]. Berlin: Springer-Verlag Press, 1987.

(编辑 何学锋)