

倾斜冷却剪切流变参数对 半固态 AlSi9Mg 合金组织的影响

谭建波¹, 李志勇¹, 王英杰¹, 刘江成², 谷超¹, 张江超¹

(1. 河北科技大学 材料科学与工程学院, 石家庄 050018;

2. 中国南车集团石家庄车辆厂, 石家庄 050000)

摘 要: 利用自制的实验装置研究倾斜式冷却剪切流变技术制备半固态 AlSi9Mg 合金。结果表明: 合金熔体在倾斜冷却板表面非均匀形核并受到重力和振动力的剪切作用, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 逐渐从枝晶网络演化为细小的球状或粒状晶; 控制浇注温度在 600 °C、倾斜板长度在 600 mm、振动频率在 50 Hz 时可以获得组织良好的半固态合金熔体, 合金熔体中初生 $\alpha(\text{Al})$ 的平均晶粒尺寸为 50 μm , 形状因子为 0.71; 机械振动能显著细化 AlSi9Mg 合金组织, 随着振动频率的提高, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 明显细化, 圆整度也随之提高。

关键词: AlSi9Mg 合金; 半固态; 冷却剪切; 组织

中图分类号: TG 146.4

文献标识码: A

Effects of parameters of incline cooling and shearing on microstructures of semi-solid AlSi9Mg alloy

TAN Jian-bo¹, LI Zhi-yong¹, WANG Ying-jie¹, LIU Jiang-cheng², GU Chao¹, ZHANG Jiang-chao¹

(1. School of Material Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology,
Shijiazhuang 050018, China;

2. CSR Shijiazhuang Rolling Stock Works, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: An experimental set-up of inclined cooling and shearing was developed to prepare semi-solid AlSi9Mg alloy. The results show that the molten alloy is nucleated heterogeneously on the inclined-cooling plate surface and under shearing of the gravitation and vibration. Original $\alpha(\text{Al})$ phase converts gradually from the cellular dendrite into tiny spherical or granular crystal. Under pouring temperature of 600 °C, sloping plate length of 600 mm and vibration frequency of 50 Hz, the semisolid alloy melt with good microstructure can be obtained. In the alloy melt the average grain size of the original $\alpha(\text{Al})$ phase is 50 μm , and its shape factor is 0.71. Mechanical vibration can refine obviously the microstructure of AlSi9Mg alloy. With increasing vibration frequency, the original $\alpha(\text{Al})$ phases are refined obviously, and their roundness is improved.

Key words: AlSi9Mg alloy; semisolid; cooling/shearing; microstructure

倾斜冷却剪切流变技术首先在日本提出^[1], 其原理^[2-3]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、合金熔体的冲击和自重作用, 细化晶粒, 获得理想半固态合金的方法。目前, 倾斜冷却剪切流变技术已经在半固态合金坯料制备^[4-5]、合

金组织细化^[6-7]、半固态挤压铸造^[8]、半固态轧制^[9]及半固态连铸^[10-11]等领域得到了广泛应用, 但采用的倾斜冷却剪切装置是在不振动条件下进行的。本文作者在前人研究的基础上, 自行设计振动频率可调的倾斜冷却剪切装置制备半固态合金熔体, 研究倾斜冷却剪

切流变参数对 AlSi9Mg 合金组织的影响。

1 实验

实验所用材料为 AlSi9Mg 合金, 名义成分为 9%Si、0.25%Mg、0.4%Mn(质量分数)、余量 Al。实际测得合金的液相线为 595 °C, 固相线为 555 °C。实验设备为自行设计、振动频率可调的倾斜冷却剪切装置, 如图 1 所示。

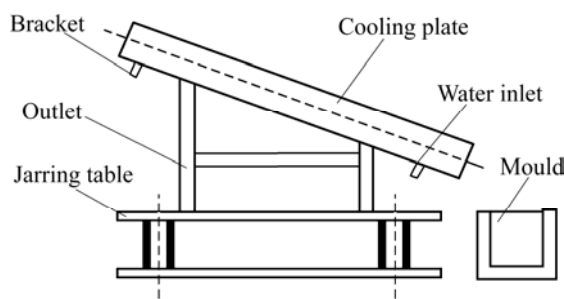


图 1 倾斜冷却剪切装置示意图

Fig 1 Sketch map of device of sloping cooling and shearing

实验采用一维振动台, 用变频器调节振动频率, 振动电机最大激振力为 5 kN, 额定转速为 2 860 r/min, 其振幅可表示为

$$A = \frac{me\omega^2}{\sqrt{(k - M\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \quad (1)$$

式中 A 为振幅; m 为偏心块质量; e 为偏心距; k 为刚度; M 为系统总质量, 包括倾斜冷却板和支架; ω 为角速度; c 为阻尼系数。

被振物体的加速度为

$$G_s = (2f)^2 \cdot A \quad (2)$$

式中 G_s 为加速度; f 为振动频率。

系统的振动强度表示为

$$N_g = (2f)^2 A/g \quad (3)$$

式中 N_g 为振动强度, 用 g 的倍数表示; $g=9.806$ 。

采用正交实验法制备半固态 AlSi9Mg 合金, 实验条件均为: 倾斜板的倾斜角度为 30°, 倾斜板的预热温度为 120 °C, 通过改变浇注温度、倾斜板长度和振动频率制备半固态 AlSi9Mg 合金熔体。浇注温度的选择范围为 585~620 °C, 倾斜板长度范围为 400~900 mm, 振动的频率范围为 30~50 Hz。正交实验因素水平见表 1。在倾斜冷却剪切装置下端, 用取样器接取少量不同制备参数下的半固态 AlSi9Mg 合金并立即

水淬, 制取金相试样, 试样用 4%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。

形状因子 F_c 的定义如下^[12]:

$$F_c = 4\pi A_g / P_g^2 \quad (4)$$

式中 P_g 为初生固相平均周长; A_g 为初生固相平均面积; $F_c=1$ 时, 所有初生固相为完整球状。

为了减小误差, 对每个试样的 8~10 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。

表 1 正交法制备半固态 AlSi9Mg 合金的因素水平表

Table 1 Factor levels of orthogonal test for preparing semi-solid AlSi9Mg alloy

Factor level	Pouring temperature /°C	Sloping plate length/mm	Vibration frequency /Hz
1	620	900	30
2	600	600	40
3	585	400	50

2 结果与分析

正交实验结果表明, 浇注温度为 600 °C, 倾斜板长度 600 mm, 振动频率 50 Hz 时制备的半固态合金熔体比较理想, 如图 2 所示。

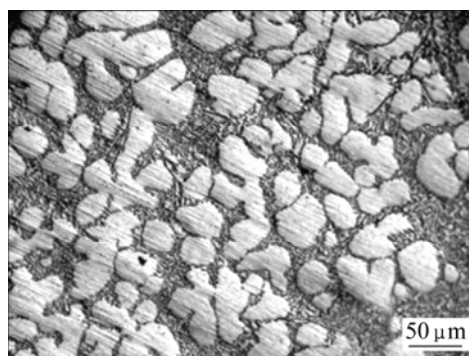


图 2 半固态 AlSi9Mg 合金微观组织

Fig.2 Microstructure of semi-solid AlSi9Mg alloy

为了进一步研究倾斜冷却剪切流变参数对 AlSi9Mg 合金组织的影响, 又做了一些补充实验, 探讨了浇注温度、倾斜板长度、振动频率对 AlSi9Mg 合金组织的影响规律。

2.1 浇注温度对合金微观组织的影响

在倾斜板长度为 600 mm, 振动频率为 50 Hz, 浇

注温度分别为 620、610、600、590 和 585 °C 的实验条件下制备了半固态 AlSi9Mg 合金, 试样金相组织如图 3 所示。

浇注温度对半固态 AlSi9Mg 合金的细化和球化有重要影响。由图 3 可以看出, 当浇注温度为 620 °C 时, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 相呈枝晶状, 组织中只有少量的球状或粒状初生 $\alpha(\text{Al})$ 相, 如图 3(a) 所示。随着温度的降低, 再加上振动的作用, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 相逐渐向蔷薇状转化, 枝晶的一次主干和二次臂明显变小或变短, 组织中球状或粒状 $\alpha(\text{Al})$ 相增多。当浇注温度为 600 °C 时, 蔷薇状组织基本都转化为球状或粒状组织, 分布也很均匀, 平均晶粒尺寸为 49.9 μm , 形状因子达到 0.71, 如图 3(c) 所示。但当浇注温度继续下降时, 合金中的初生 $\alpha(\text{Al})$ 形态并未得到进一步改善, 组织中反而出现了一些粗大的初生 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒, 形状也不规则, 如图 3(d) 和 (e) 所示。由此可见, 如果浇注温度过低, 浇注前就会析出少量的初生 $\alpha(\text{Al})$, 这些先析出的初生 $\alpha(\text{Al})$ 在剪切

流变过程中会进一步长大, 使组织出现了一些粗大的初生 $\alpha(\text{Al})$, 另外, 浇注温度过低时, 合金会在冷却板表面快速冷却并形成凝固壳, 影响制备过程。本实验条件下比较理想的浇注温度为 600 °C。

2.2 倾斜板长度对 AlSi9Mg 合金组织的影响

设定浇注温度为 600 °C, 振动频率为 50 Hz, 倾斜板长度分别为 400、500、600、700、800 和 900 mm 时, 制备的试样金相组织如图 4 所示。

倾斜板长度直接影响到合金所受剪切冷却时间作用的长短, 对合金组织也有重要影响。由图 4 中可以看出, 当倾斜板长度为 400 mm 时, 由于倾斜板对合金熔体的剪切作用时间较短, 晶粒为明显的枝晶, 如图 4(a) 所示。由于在浇注过程中, 半固态合金熔体一边凝固, 一边不断受到激烈剪切作用或处于激烈的紊流之中, 随着倾斜板长度的增加, 组织由枝晶转化为蔷薇状, 当倾斜板长度为 600 mm 时, 初生固相呈球

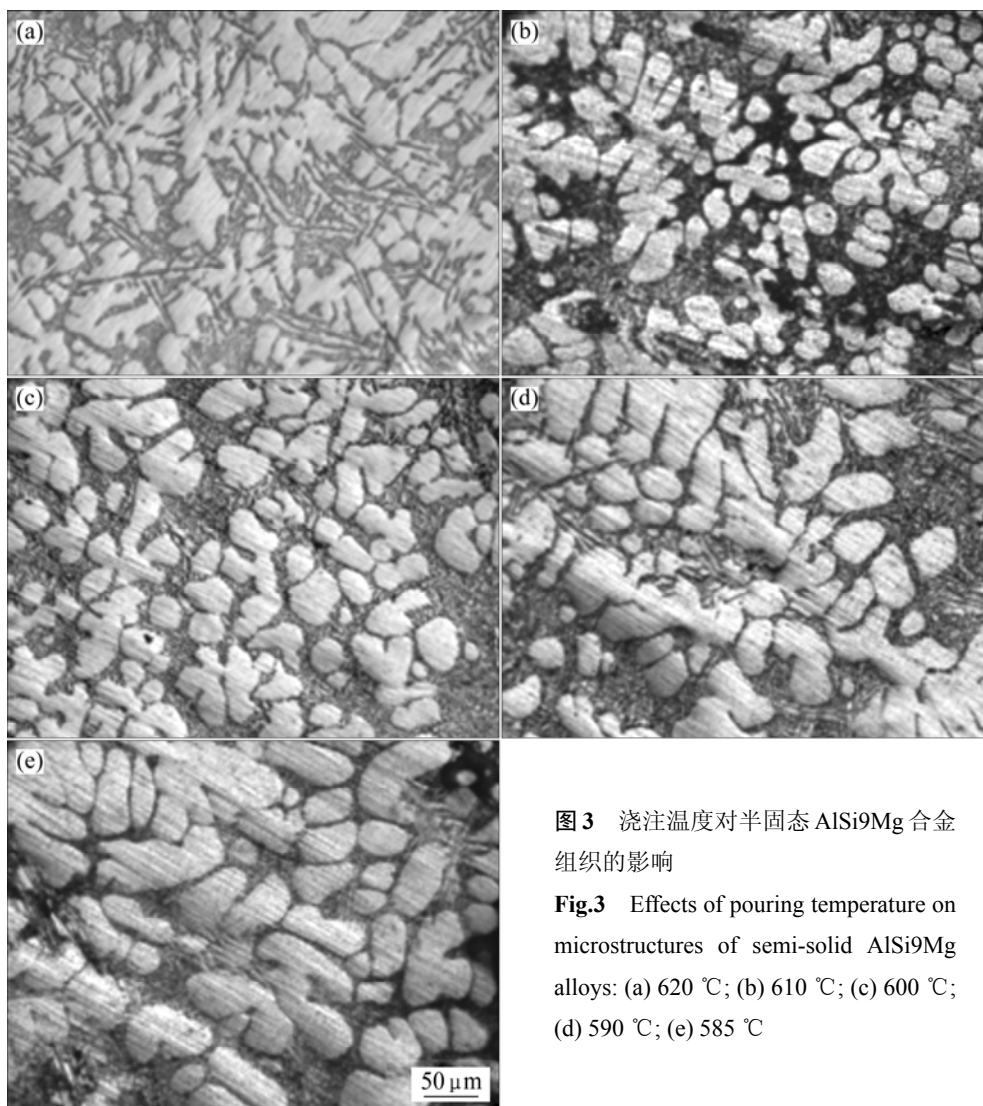


图3 浇注温度对半固态 AlSi9Mg 合金组织的影响

Fig.3 Effects of pouring temperature on microstructures of semi-solid AlSi9Mg alloys: (a) 620 °C; (b) 610 °C; (c) 600 °C; (d) 590 °C; (e) 585 °C

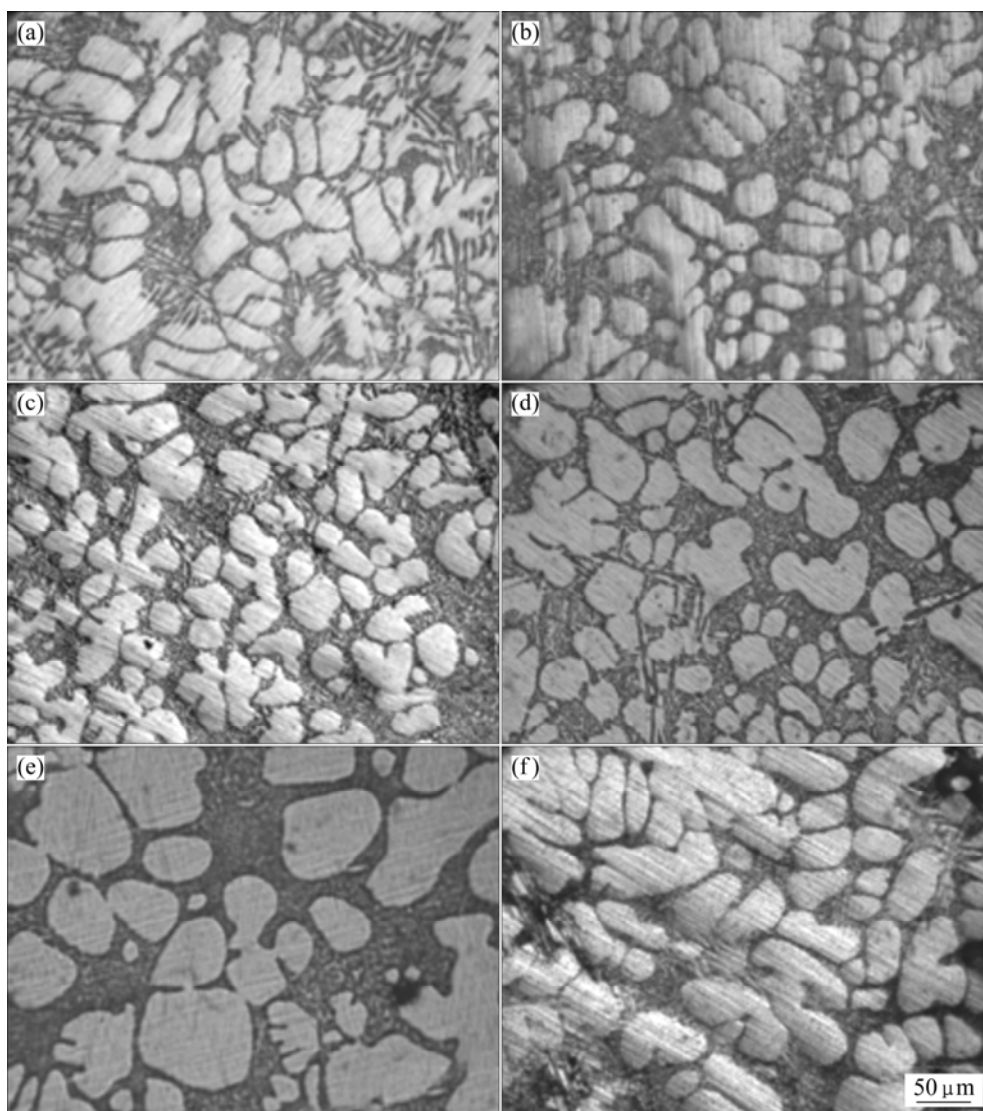


图 4 倾斜板长度对半固态 AlSi9Mg 合金组织的影响

Fig.4 Effects of sloping plate length on microstructures of semi-solid AlSi9Mg alloys: (a) 400 mm; (b) 500 mm; (c) 600 mm; (d) 700 mm; (e) 800 mm; (f) 900 mm

状或类球状, 晶粒明显粒化, 平均晶粒尺寸为 $50\ \mu\text{m}$, 形状因子为 0.78, 如图 4(c)所示。但随着倾斜板长度的进一步增加, 由于合金在倾斜板底部凝固形成金属壳, 阻碍金属的流动, 降低冷却效率, 晶粒有了足够长大时间, 所得初生 $\alpha(\text{Al})$ 相对粗大, 如图 4(e)和(f)所示。因此, 本实验理想的倾斜板长度为 600 mm。

2.3 振动频率对 AlSi9Mg 合金组织的影响

对倾斜冷却剪切流变装置施加振动, 是利用电机的振动扰动合金在倾斜板上的凝固过程, 细化晶粒, 获得球状初晶的合金熔体。在浇注温度为 $600\ ^\circ\text{C}$, 倾斜板长度为 600 mm, 振动频率分别为 30、40 和 50 Hz 的条件下制备了半固态合金熔体, 为了研究振动参数

对合金组织的影响, 还做了对比实验, 即在其它制备参数都相同的条件下, 对冷却板施加振动和不施加振动进行了对比, 制备的试样金相组织如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 在不振动条件下枝晶破碎程度不大, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 呈发达的枝晶形态, 枝晶臂较粗大, 组织中只有很少量的球状或粒状初生 $\alpha(\text{Al})$, 如图 5(a)所示。当振动频率为 30 Hz 时, 枝晶明显碎化, 但仍有近乎枝晶可见, 晶粒不均匀, 说明振动频率偏低。随着振动频率的增大, 晶粒间的碰撞、摩擦增强, 晶粒破碎, 圆整度也随着提高, 当振动频率增大到 50 Hz 时, 晶粒细小均匀, 得到类球形或球状组织, 平均晶粒尺寸为 $50\ \mu\text{m}$, 如图 5(d)所示。

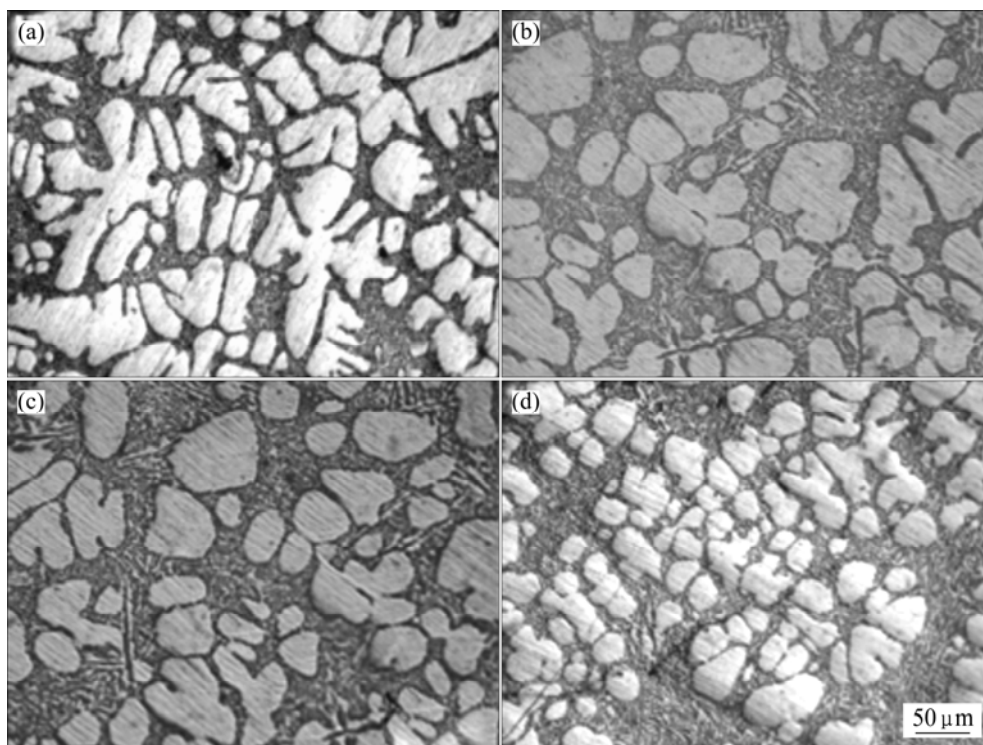


图 5 振动频率对半固态 AlSi9Mg 合金组织的影响

Fig.5 Effects of vibration frequency on microstructures of semi-solid AlSi9Mg alloys: (a) Without vibration; (b) 30 Hz; (c) 40 Hz; (d) 50 Hz

2.4 振动对 AlSi9Mg 合金枝晶形核及生长的影响

合金熔体在沿倾斜板向下流动的过程中, 由于对其施加了机械振动, 振动激振力和重力的双重作用使合金熔体中的枝晶和未凝固的液体发生了较大的相对运动, 又由于液体存在粘性, 枝晶在液体各部分之间, 运动速度存在差异, 正是由于这种相对运动和运动速度的不同, 使得晶粒之间发生碰撞和磨损, 以及未凝固的液体对枝晶进行反复的冲刷, 即所谓的“粘性剪切”作用, 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^[13]。另外, 在凝固过程中施加振动, 可使液相和固相发生相对运动, 促使“晶雨”的形成^[14]。晶雨随金属液体的运动快速扩散至待凝固部位, 生长成尺寸较小的新晶粒^[15]。此外, 由于振动所产生的搅动, 使在长大过程中 α 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。振动还增加了合金熔体与冷却板的热交换, 冷却速度加快, 亦可抑制晶粒的长大。

3 结论

1) 浇注温度在 600 °C、倾斜板长度在 600 mm、

振动频率在 50 Hz 时可以获得良好组织的半固态合金熔体, 合金熔体中初生 $\alpha(\text{Al})$ 的平均晶粒尺寸为 50 μm , 形状因子为 0.71。

2) 机械振动能显著地细化 AlSi9Mg 合金组织, 在 30~50 Hz 内, 随着振动频率的提高, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 明显细化, 圆整度也随之提高。

REFERENCES

- [1] QIU P Q, NOMURA H, TAKITA M. Improvement of microstructure and tensile properties of cast iron by semi-solid casting[J]. Foundry Engineering, 1999, 71(10): 685–690. (in Japanese)
- [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. (in Japanese)
- [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. (in Japanese)
- [4] TOSHIO H, KAPRANOS P. Thixo-forming process using in got cast by a cooling slope and low super heat casting[C]// TSUTSUI Y, KIUCHI M, ICHIKAWA K. Proc 7th Int Conf

- Semi-solid Processing of Alloys and Composites. Tsukuba, 2002: 795–800.
- [5] MOTEGI T. Continuous casting of semisolid Mg-9%Al-1%Zn alloy[C]// TSUTSUI Y, KIUCHI M, ICHIKAWA K. Proc 7th Int Conf Semi-solid Processing of Alloys and Composites. Tsukuba, 2002: 831–836.
- [6] 管仁国. 倾斜式剪切冷却制备 1Cr18Ni9Ti 不锈钢半固态材料[J]. 东北大学学报, 2005, 26(9): 867–870.
- GUAN Ren-guo. Preparing semi-solid stainless steel 1Cr18Ni9Ti by sloping shearing and cooling[J]. Journal of Northeastern University, 2005, 26(9): 867–870.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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 semisolid A356 aluminum alloy by inclined cooling[J]. Foundry, 2006(3): 239–241.
- [12] KOPP R, SHIMAHARA H. State of R&D and future trends in semi-solid manufacturing[C]// TSUTSUI Y, KIUCHI M, ICHIKAWA K. Proc 7th Int Conf Semi-solid Processing of Alloys and Composites. Tsukuba, 2002: 57–66.
- [13] 王元庆, 樊自田, 李继强. 消失模铸造 AZ91D 振动凝固及半固态热处理组织的演变[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(8): 506–509.
- WANG Yuan-qing, FAN Zi-tian, LI Ji-qiang. Evolution of microstructure of AZ91D magnesium alloy in lost foam casting under vibration and semi solid heat treatment condition[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2006, 26(8): 506–509.
- [14] 周尧和, 胡壮麒, 介万奇. 凝固技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 105–106.
- ZHOU Yao-he, HU Zhuang-qi, JIE Wan-qi. Solidification technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1998: 105–106.
- [15] WANG J, HE S X, SUN B D. Grain refinement of Al-Si alloy (A356) by melt thermal treatment[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003(141): 29–34.

(编辑 何学锋)