

文章编号: 1004-0609(2005)06-0888-05

交替变向电磁场对 Al-5%Cu 合金缩孔和缩松的影响^①

何洪亮, 郭二军

(哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150080)

摘 要: 利用自行研制的交替变向电磁场凝固装置, 采用对比实验方法研究了交替变向电磁场对 Al-5%Cu 合金晶粒度、集中缩孔、分散缩孔和缩松以及致密度的影响规律及机理。结果表明: 交变电磁场对 Al-5%Cu 合金晶粒形貌和晶粒尺寸产生明显的影响; 随着磁场强度的增加, 合金晶粒形貌由粗大的柱状晶转变为细小的等轴晶, 晶粒尺寸由 30.2 μm 降低到 0.2 μm ; 在 0.2 T 强场下试样集中缩孔相对深度缩小了 10 倍左右, 分散缩孔和缩松数量明显减少, 铸件的致密度提高了 2.9%。

关键词: Al-5%Cu 合金; 交替电磁场; 集中缩孔; 缩松

中图分类号: TG 113.2

文献标识码: A

Effect of alternating electromagnetic field on shrinkage cavities and porosities in Al-5%Cu alloy

HE Hong-liang, GUO Er-jun

(School of Materials Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Effects of alternating electromagnetic field on the grain size, concentrating shrinkage cavity, dispersing shrinkage porosity and density of Al-5%Cu alloy were investigated by comparative methods using self-made alternating electromagnetic field apparatus. The results show that the alternating electromagnetic field has a significant effect on the grain morphology and grain size of Al-5%Cu. The grain morphology is changed from a very big columnar structure to a fine equiaxed one and the grain size is decreased from 30.2 μm to 0.2 μm with the increase in alternating electromagnetic field intensity. The depth of concentrating shrinkage cavity is decreased about ten times when magnetic intensity is 0.2 T. The volumes of both dispersing shrinkage cavity and shrinkage porosity are reduced, leading to the increase in alloy density about 2.9%.

Key words: Al-5%Cu alloy; electromagnetic field; concentrating shrinkage cavity; shrinkage porosity

铝铜系铸造合金由于良好的室温性能和高温性能而得到广泛应用^[1]。虽然铝铜系合金的力学性能良好, 但目前其进一步应用受到很大的限制, 这是因为该合金具有较宽的结晶温度范围, 铸造性能差, 铸造过程非常容易出现缩孔、缩松、热裂、偏析等缺陷^[2], 所以力学性能不能得到正常发挥。如何改善 Al-Cu 合金的铸造性能, 充分发挥其高强高韧($\sigma_s \geq 400 \text{ MPa}$, $\delta \geq 8\%$)的性能特点, 始终是铸造

工作者研究的热门课题^[3~14]。

目前有关磁场对 Al-Cu 合金影响的研究主要集中在改善 Al-Cu 合金热裂倾向上^[3~12], 人们研究了合金元素对 Al-4.5%Cu 合金热裂倾向的影响, 研究表明^[3~6], 采用添加剂细化晶粒, 可以降低 Al-Cu 合金热裂倾向; 另外一些研究集中在稀土对 Al-Cu 合金的作用上^[7~10], 认为稀土可降低 Al-Cu 合金的热裂倾向, 改善其铸造工艺性能。近年来

① 收稿日期: 2004-11-15; 修订日期: 2005-02-03

作者简介: 何洪亮(1947-), 男, 副教授。

通讯作者: 郭二军, 教授, 博士; 电话: 0451-86392522; E-mail: guoerjun@126.com

某些科研人员开始重视电磁场对 Al 合金晶粒尺寸^[11~13], 热裂^[14, 15], 铸造合金流动性、缩孔缩松等铸造缺陷的影响^[16, 17], 但有关电磁场对 Al-Cu 合金缩孔缩松倾向的影响规律和机理的研究报道还很少。Al-Cu 合金常采用砂型重力浇注, 由于砂型导热性差、冷速低, 凝固时间长, 导致铸件晶粒粗大, 常常出现缩孔、缩松等缺陷。在重力场中消除 Al-Cu 合金的上述缺陷比较困难。

本文作者利用自行研制的交替变向电磁场装置控制 Al-Cu 合金的凝固过程, 研究电磁场对 Al-Cu 合金铸造缺陷如缩孔和缩松的影响规律并分析其机理, 这对于预防铸件缺陷, 增加铸件的致密度, 提高合金性能, 扩大其应用范围具有重大意义。

1 实验

1.1 材料

Al-5% Cu 合金结晶温度间隔大, 易产生缩孔和缩松等缺陷, 实验中选用 Al-5% Cu 合金作为研究对象。该合金由高纯铝(99.98%)与 Al-50% Cu 中间合金熔配而成。浇注温度为 760℃, 采用水玻璃砂型, 试样尺寸为 $d\ 40\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 。

1.2 实验方法

本实验用对比方法, 即在铸型、浇注温度等其它工艺参数保持不变的条件下, 分别在重力场和电磁场下浇注试样。产生交替变化电磁场的装置如图 1 所示, 该装置主要由组合线圈, 自耦变压器、

控制线路等组成。其工作原理是将铸型放在组合线圈中, 浇注的金属在电磁力的作用下产生定向运动。通过控制线路定时交替改变电流的方向, 这样金属液就会产生反复的变向运动, 其结果使金属液中产生强烈反复的震荡。金属液在反复震荡作用下冷却、结晶、凝固。本实验中电磁场的电流换向时间设定为 5 s。试样凝固后, 采用排水法测量其密度。采用线切割将试样沿中心剖开, 制备的试样经研磨、抛光后, 用稀硝酸水溶液(1: 9)腐蚀试样, 利用金相分析技术, 观察并分析试样晶粒度、集中缩孔、分散缩孔和缩松的变化情况。

2 结果与讨论

2.1 交替变向电磁场对宏观晶粒度的影响

图 2 所示为磁场强度对 Al-5% Cu 合金晶粒尺寸及宏观组织的影响, 磁场频率固定在 25 Hz, 可见在电磁场的作用下试样的宏观晶粒形貌和晶粒尺寸发生了明显的变化。随着磁场强度的增加, 晶粒形貌由粗大的柱状晶转变为细小的等轴晶, 晶粒尺寸由 30.2 mm 降低到 0.2 mm, 表明交替变向电磁场对 Al-5% Cu 合金具有明显的细化作用。当磁场强度小于 0.2 T 时, Al-5% Cu 合金晶粒尺寸随磁场强度的增加基本呈线性降低, 随后磁场强度进一步增加对晶粒尺寸的影响不大。

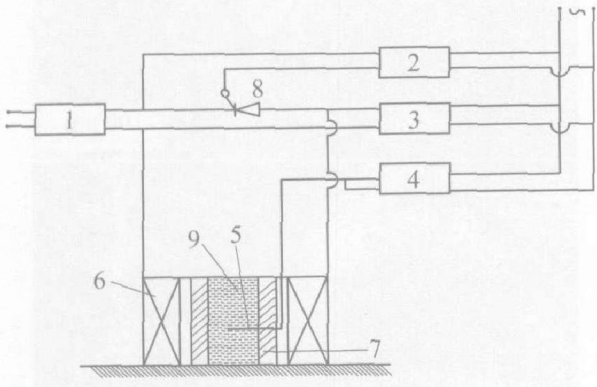


图 1 交替变向电磁场装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

- 1—Transformer; 2—Trigger circuit;
3—Oscillograph; 4—Balance recorder;
5—Thermocouple; 6—Composite coil;
7—Foundry model; 8—Silicon control; 9—Molten metal

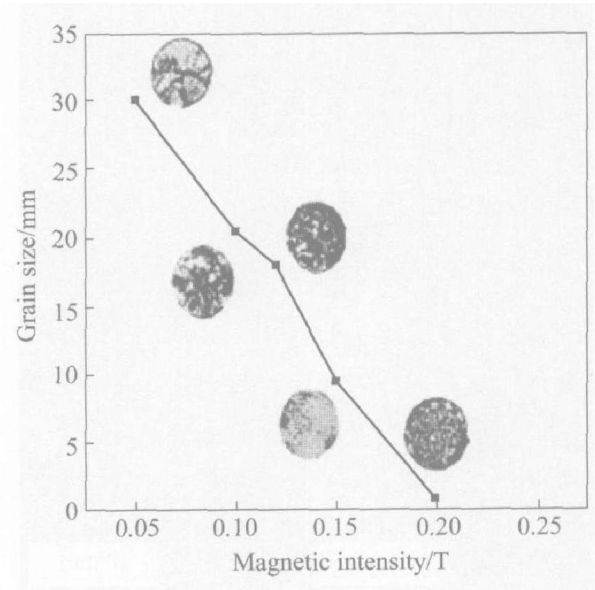


图 2 磁场强度对 Al-5% Cu 合金晶粒尺寸的影响

Fig. 2 Grain sizes of Al-5% Cu as function of magnetic intensity

固定磁场的强度为 0.2 T, 改变磁场的频率, 研究磁场频率对晶粒形貌和晶粒尺寸的影响, 实验

结果见表 1。随着磁场频率的增加,晶粒尺寸呈降低趋势,而晶粒形貌均为等轴晶,表明频率的变化对合金的晶粒度有一定的影响,但与磁场强度对晶粒尺寸的影响相比,频率变化对晶粒尺寸的影响不明显。

表 1 磁场频率对晶粒尺寸的影响

Table 1 Grain sizes as function of magnetic frequency

Frequency/ Hz	5	15	20	25	38	50	75
Grain size/ mm	0.32	0.31	0.24	0.20	0.18	0.17	0.17

2.2 交替变向电磁场对集中缩孔的影响

采用交替变向电磁场对集中缩孔进行了研究,磁场强度为 0.2 T,试样尺寸为 $d40\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 。采用缩孔相对深度来评价磁场对集中缩孔的影响。

集中缩孔相对深度定义为集中缩孔的深度与试样高度之比。实验结果如图 3 所示。在交替电磁场的作用下集中缩孔的侵入深度明显减小。在重力场下集中缩孔的相对深度为 0.56,在电磁场下集中缩孔的相对深度只有 0.05。可见在 0.2 T 磁场强度下 $d40\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 试样集中缩孔的相对深度缩小了大约 10 倍。

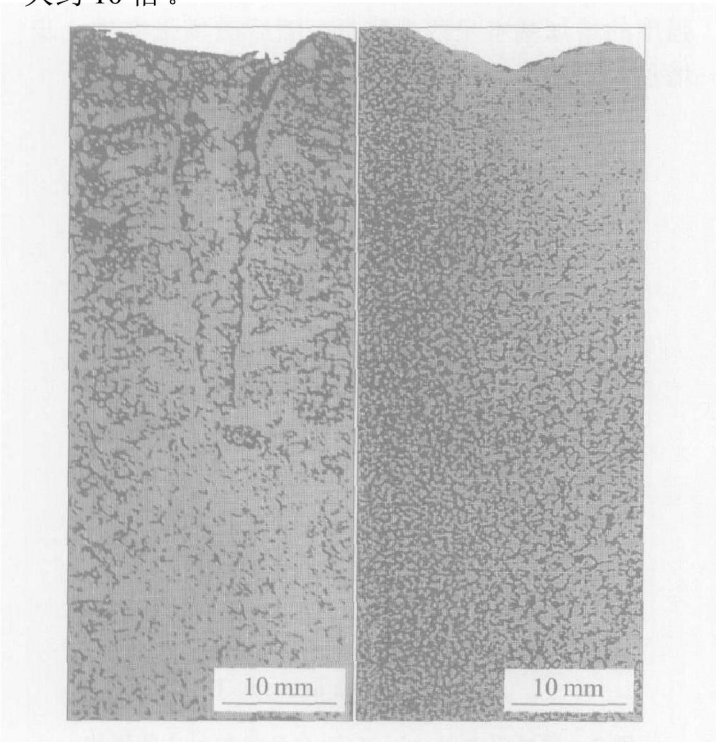


图 3 交替变向电磁场对 Al-5% Cu 合金集中缩孔的影响

Fig. 3 Effect of alternating electromagnetic field on concentration shrinkage cavities in Al-5% Cu alloy

(a) —In gravity; (b) —In electromagnetic field

2.3 交替变向电磁场对分散缩孔和缩松的影响

图 4 和 5 所示分别为 Al-5% Cu 合金试样在重力场和交替变向电磁场(0.2 T)作用下组织中分散缩孔及缩松的光学金相照片,试样沿轴线剖开。重力场浇注的试样截面上分布大量的分散缩孔,局

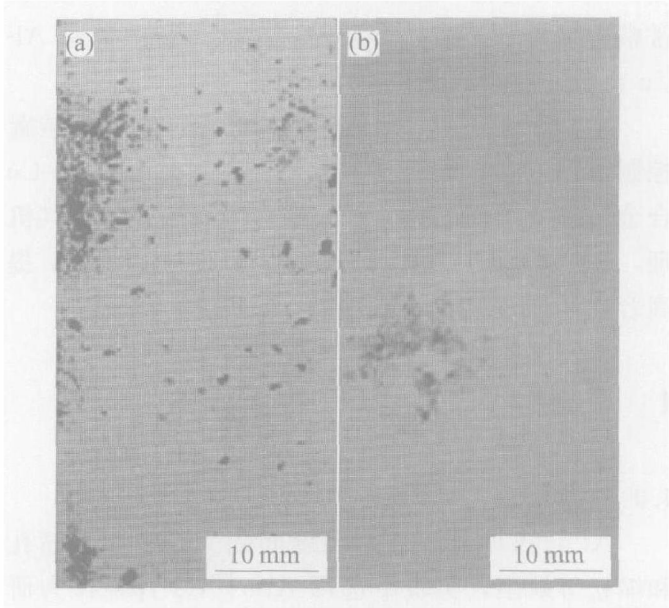


图 4 交替变向电磁场对 Al-5% Cu 合金分散缩孔的影响

Fig. 4 Effects of alternating electromagnetic field on dispersing shrinkage cavities in Al-5% Cu alloy

(a) —In gravity; (b) —In electromagnetic field

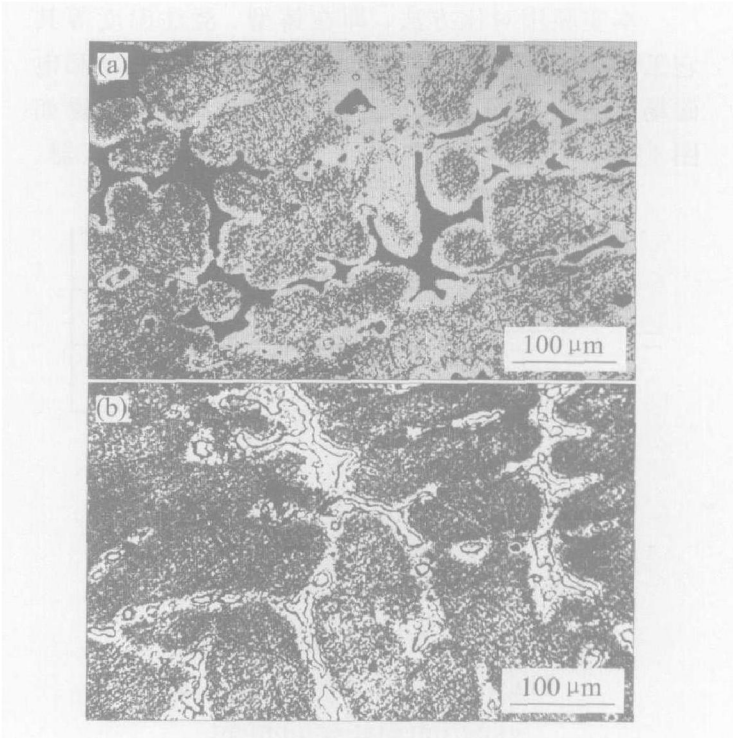


图 5 交替变向电磁场对 Al-5% Cu 合金缩松的影响

Fig. 5 Effects of alternating electromagnetic field on porosities in Al-5% Cu alloy

(a) —In gravity; (b) —In electromagnetic field

部有较明显的缩松; 交替变相电磁场下浇注的试样没有分散缩孔出现, 可见在电磁场的作用下分散缩孔及缩松数量明显减少。

2.4 交替变向电磁场对致密度的影响

采用排水法分别测量在重力场和电磁场下制备的 Al-5% Cu 合金试样的密度, 其表达式为

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2}(\rho_w - \rho_{\text{air}}) + \rho_{\text{air}}$$

式中 ρ 为被测试样在温度为 t 时的密度; m_1 为试样在空气中的质量; m_2 为试样在蒸馏水中的质量; ρ_w 为温度为 t 时蒸馏水的密度, $\rho_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$; ρ_{air} 为空气密度, $\rho_{\text{air}} = 0.0012 \text{ g/cm}^3$ 。

每个试样密度测量 3 次, 取平均值, 结果如表 2 所示。可见在交替变向电磁场作用下合金的密度增大, 本实验条件下密度增大了 2.9%。

表 2 交替变向电磁场对 Al-5% Cu 合金密度的影响

Table 2 Effect of alternating electromagnetic field on density of Al-5% Cu alloy

Density in gravity/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Density in electromagnetic field/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Increase rate/ %
2.566	2.640	2.9

2.5 结果讨论

2.5.1 集中缩孔侵入深度

Al-5% Cu 合金在重力场下凝固一般是逐层凝固方式, 先形成一个凝固壳, 然后逐层凝固, 在铸锭中心的最后凝固部位形成很深的集中缩孔, 如图 6(a) 所示。当液态金属在交替变向电磁场下凝固时, 由于液体金属的震荡作用, 使型壁处先结晶的晶体脱落下来, 所以不会先形成凝固壳。这些晶粒会游离到液体金属的内部, 而且在电磁场产生的震荡作用下, 也不会形成通常情况下的柱状树枝晶区, 形成的树枝晶会在液体金属的震荡作用下“折断”或“熔断”, 游离到内部。在游离过程中产生破碎“增殖”现象。而且在强烈的对流作用下金属液的温度会趋于均匀, 这样就会在整个金属液中分散了细小的等轴晶。这些细小等轴晶由于密度大于液体金属而产生下沉作用, 形成由下而上的逐层凝固方式, 使液态收缩阶段延长, 整个铸锭的高度减少, 而使集中缩孔的侵入深度减小, 如图 6(b) 所示。

2.5.2 分散缩孔及缩松

通常形成缩孔和缩松的条件是合金的结晶温度范围较宽, 倾向于体积凝固方式, 铸件断面的温度梯度小, 冷速慢, 先结晶的固相形成发达的树枝

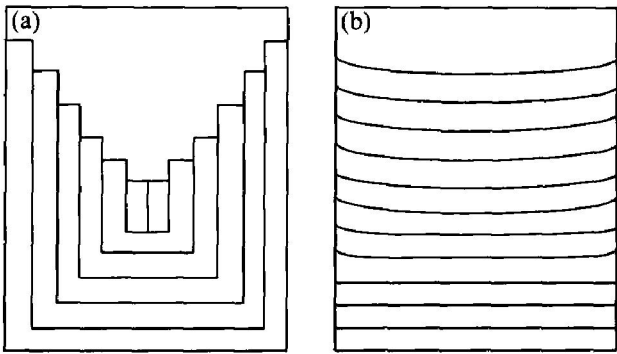


图 6 交替电磁场对集中缩孔的作用机理示意图

Fig. 6 Schematic of effect mechanics of alternating electromagnetic field on concentrating shrinkage voids

(a) —In gravity; (b) —In electromagnetic field

晶, 内生生长时形成粗大的等轴晶。这样发达的树枝晶连成骨架而过早地将液体金属分割成孤立的互不相通的“小溶池”。同样粗大的等轴晶长大后相互接触, 也会把液体金属分割成孤立的“小溶池”。小溶池中液体金属凝固收缩时得不到液体的补充, 从而导致缩松和缩孔的形成。由于结晶温度间隔大, Al-5% Cu 合金在砂型重力场中凝固时, 极易产生缩孔和缩松缺陷。在交替变向电磁场中, 液体金属产生强烈的对流和震荡作用, 使其平均流速($\bar{v}$)比在重力场中大大增加。根据枝晶间液体金属流动的达西定律 $\bar{v} = \frac{k}{\eta f_1} \nabla(p + \rho f_L)$ 可知, 平均流速 $\bar{v}$ 愈大, 其压力梯度 ∇p 也愈大。在高压和震荡作用下树枝晶产生破碎^[15]。在反复震荡作用下树枝晶也会发生重熔, 形成非常细小的等轴晶。树枝晶的破坏, 液体金属的反复震荡流动冲击, 晶粒的细化, 都会使铸件中的缩孔及缩松大大减少, 从而使其密度增加。

3 结论

在金属液凝固过程中施加一个交替变向的电磁场, 金属液中会产生反复的震荡作用, 这种作用可产生如下结果。

- 1) 明显细化合金的晶粒, 在本实验条件下随着磁场强度的增加, 细化效果越显著, 而磁场频率对晶粒尺寸的影响不明显。
- 2) 减小了集中缩孔的深度, 在磁场强度为 0.2 T 下, $d40 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 试样集中缩孔的相对深度减小了大约 10 倍。

3) 减少了分散缩孔及缩松的数量。

4) 增加了合金的致密度, 在本实验条件下, 试样密度提高了 2.9%。

REFERENCES

- [1] 师昌绪. 材料大词典[M]. 北京: 化学工业出版社, 1994. 179-180.
SHI Chang-xu. Material Dictionary [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1994. 179-180.
- [2] 曹禄华, 丁浩, 傅恒志. 热裂纹的电子显微分析[J]. 铸造技术, 1997(1): 47-48.
CHAO Lu-hua, DING Je, FU Heng-zhi. Electronic probe analysis of hot cracking[J]. Foundry Technology, 1997(1): 47-48.
- [3] 董晟全, 周敬恩, 严文, 等. Al-4.5Cu 合金热裂倾向的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(1): 44-47.
DONG Sheng-quan, ZHOU Jing-en, YAN Wen, et al. The study of hot cracking tendency of Al-4.5% Cu alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2003, 26(1): 44-47.
- [4] 李元元, 郭国文, 张卫文, 等. 合金元素对 Al-Cu 合金的热裂倾向的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 791-795.
LI Yuan-yuan, GUO Guo-wen, ZHANG Wei-wen, et al. Effects of alloy elements on hot cracking tendency of Al-Cu alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 791-795.
- [5] 李德成, 刘玉贤, 丁建国, 等. 高强铸造铝合金 A-U5GT 及应用[J]. 铸造, 1998(11): 34-36.
LI De-cheng, LIU Yu-xian, DING Jian-guo, et al. High strength cast Al alloy A-U5GT and its application[J]. Foundry, 1998(11): 34-36.
- [6] 王业双, 王渠东, 丁文江, 等. 合金的热裂机理及其研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2000(2): 48-50.
WANG Ye-shuang, WANG Qu-dong, DING Wen-jiang, et al. Hot crack mechanisms of alloys and their studies[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2000(2): 48-50.
- [7] 魏晓伟, 曾明. 稀土对铸造铝铜合金流动性和热裂倾向性的影响[J]. 铸造技术, 1997(3): 46-48.
WEI Xiao-wei, ZENG Ming. Effects of rare-earth on fluidity and hot cracking of cast Al-Cu alloys[J]. Foundry Technology, 1997(3): 46-48.
- [8] LI Q C, CHEN K Y, LIU C, et al. Rheological behavior in solid-liquid coexistence zone and simulation of stress-strain and not cracking of Al-Cu alloy during solidification[J]. AFS Trans, 1991, 99: 245-253.
- [9] 崔天真, 王德福, 宁志良. 混合稀土对改善铝铜合金铸造性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 1995, 5(4): 124-127.
CUI Tian-zhen, WANG De-fu, NING Zhi-liang. Effects of mixed rare-earth on improving cast properties of Al-Cu alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1995, 5(4): 124-127.
- [10] 魏晓伟. 稀土对铸造铝铜合金准固态和准液态区的影响[J]. 有色金属与稀土应用, 1996(2): 34-37.
WEI Xiao-wei. Effects of rare-earth on the zone between quasi-solid and quasi-liquid of Al-Cu alloys[J]. Nonferrous Metals and Rare Applications, 1996(2): 34-37.
- [11] 张勤, 崔建忠, 路贵民, 等. 电磁振荡半连铸 7075 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, et al. 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.
- [12] 訾炳涛, 巴启先, 崔建忠. 强脉冲电磁场对金属凝固组织影响的研究[J]. 物理学报, 2000, 49(5): 1011-1013.
ZI Bing-tao, BA Qi-xian, CUI Jian-zhong. Effects of strong pulsating electromagnetic field on solidified microstructure of metals[J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(5): 1011-1013.
- [13] 许光明, 包卫平, 崔建忠, 等. 静磁场对 ZK60 镁合金组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2003(6): 22-23.
XU Guang-ming, BAO Wei-ping, CUI Jian-zhong, et al. Effect of static magnetic field on microstructure of ZK60 alloy[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2003(6): 22-23.
- [14] 宁志良, 徐志辉, 梁维中, 等. 脉动磁场对 Al-Cu 合金热裂的影响[J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(1): 129-133.
NING Zhi-liang, XU Zhi-hui, LIANG Wei-zhong, et al. Effect of pulsating electromagnetic field on hot cracking of Al-Cu alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1997, 7(1): 129-133.
- [15] 高明, 何冠虎, 杨菲, 等. 脉冲电流对铸造 ZA27 合金中缩孔和缩松的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 824-826.
GAO Ming, HE Guan-hu, YANG Fei, et al. Effect of pulsating current on shrinkage cavity and porosity of cast ZA27 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 824-826.
- [16] Barnak J P, Sprecher A F, Conrad H. Colony (grain) size reduction in eutectic Pb-Sn castings by electroplusing[J]. Scr Mater, 1995, 32(6): 879-884.

(编辑 龙怀中)