

文章编号:1000-582X(2011)05-047-06

## 连铸坯壳厚度的射钉测试及凝固系数的修正

韩志伟<sup>1,2</sup>, 陈登福<sup>1</sup>

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 中冶赛迪工程技术股份有限公司连铸事业部, 重庆 400013)

**摘要:**针对目前采用射钉测量铸坯壳厚度的方法中没有考虑钉子射入铸坯后熔化时间的问题,建立了钉子在铸坯内部的传热数学模型,同时应用有限元软件 MSC. Marc 对钉子熔化过程进行数值模拟,提出了凝固系数的修正方法和计算式,以实际算例说明了凝固系数、凝固终点位置在修正前后分别有 0.5% 和 1.2% 的偏差,采用修正以后的计算式,凝固系数和凝固终点的计算更为准确,对实际生产具有指导意义。

**关键词:**连铸; 坯壳厚度; 射钉; 凝固系数; 修正算法

中图分类号: TF777.1

文献标志码: A

## Nail-shooting measurement of solidified shell thickness and solidification coefficient revision

HAN Zhi-wei<sup>1,2</sup>, CHEN Deng-fu<sup>1</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Department of Continuous Casting, CISDI Engineering Co., Ltd., Chongqing 400013, P. R. China)

**Abstract:** Aiming at the problem that nail's melting time in slab isn't been taken into consideration for measuring method of solidified shell by nail-shooting technique, the mathematical model of heat transfer for nail in slab is built, and the process of nail melting in slab is simulated by the finite element software MSC. Marc. The revising method and formula are proposed. The differences 0.5% and 1.2% for solidification coefficient and solidification ending fore and after revising are analyzed by instance. It shows the calculation of solidification coefficient and solidification ending is more exact due to adapting the revised method.

**Key words:** continuous casting; shell thickness of solidified slab; shooting nail; solidification coefficient; modified algorithm

目前,测量连铸坯壳厚度的方法主要有射钉法、打孔排液法、示踪剂法以及板坯鼓肚测量法等<sup>[1-8]</sup>。其中,射钉法测量铸坯壳厚度因其测量精度较高、测量方便而被普遍采用<sup>[9,15]</sup>。射钉法是向铸坯射入以硫为示踪剂的钉子,根据低倍或硫印检验分析钉子在铸坯内部的熔化情况,测量出铸坯的厚度,并结合凝固定律计算出凝固系数的方法<sup>[1,8]</sup>。目

前,这种方法被国内外连铸工作者普遍采用,在计算各种工艺状况下的综合凝固系数、凝固终点以及提高产量、优化操作工艺上发挥了重要的作用<sup>[16,20]</sup>。

但目前还没有文献报道考虑钉子在铸坯内的熔化时间对凝固系数或者凝固终点的影响,笔者在介绍射钉法测试方法的基础上,主要分析测试中存在的问题(主要是忽略了钉子射入时间和钉子熔化时

收稿日期:2010-12-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50674109)

作者简介:韩志伟(1976-),男,重庆大学博士研究生,主要从事炼钢及连铸技术等的研究。

陈登福(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail) chendfu@cqu.edu.cn。

间),同时提出了铸坯凝固系数的修正计算式。

### 1 射钉法测量铸坯凝固壳厚度的原理

国内普遍采用的射钉系统是由南山紧固器械有限公司生产。射钉系统包括射钉枪、支座和控制器,如图 1 所示。射钉枪内装有子弹和钉子,根据铸坯的厚度不同,选择不同子弹(主要是火药剂量的考虑)及钉子长度。支座的主要作用是把射钉固定在既定位置,起支撑及导向作用。控制器实际上是个电控箱,其作用是控制射钉枪上击发撞针,当控制器上启动射钉命令,控制器控制击发撞针撞击子弹底部,引爆火药,从而使钉子高速射入铸坯。

钉子本体为弹簧钢 60Si2Mn。由于钢的含碳量和合金均比较高,其液相线和固相线均比一般钢种要低,一般的连铸钢种在液相会熔化而达到试验的目的,射钉长度为 110~160 mm,钉子两侧有两道硫槽,硫槽的作用为:

- 1) 硫槽中的硫为示踪剂,随射钉进入铸坯,并在铸坯液相区扩散,通过硫印检验可以标记出钉子的熔化位置,从而确定坯壳厚度。
- 2) 确定射钉的位置。在进行低倍试样的锯、刨、磨的过程,确定钉子的位置,防止钉子因加工不当被刨掉后找不到钉子的熔化位置。

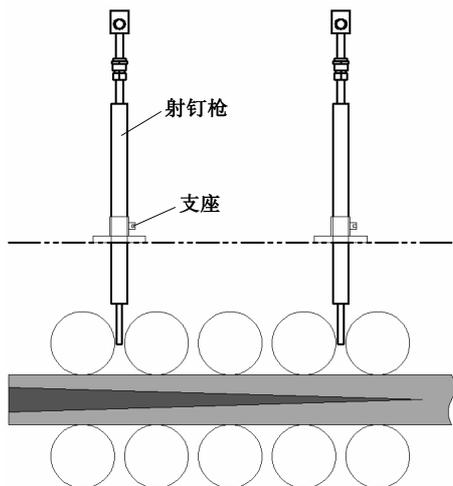


图 1 射钉测试系统示意图

根据钉子在铸坯的熔化情况确定铸坯厚度的具体方法,基本上采用日本钢管公司川和高穗等人介绍的方法<sup>[1]</sup>。在其实验中钉子为高碳钢,其中还含有 1.1% 的铬,图 2 为其研究中得到的典型射钉试样酸浸低倍照片。结合图 3 可知,在试样中固-液界面周围,存在 3 个不同特点的区域:

(a) 区域,此区域中钉尖的外形完好,钉子与铸坯具有不同的组织;

(b) 区域,此区域中钉尖的外形少有破坏,但钉子与铸坯仍具有不同的组织;

(c) 区域,钉子完全溶解,与周围坯壳具有相同的组织。

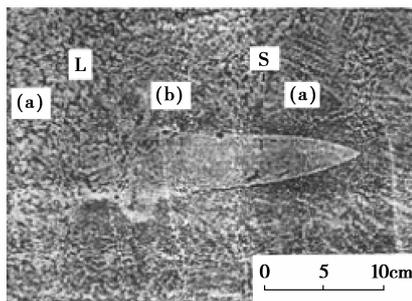


图 2 川和高穗等的试样酸浸照片

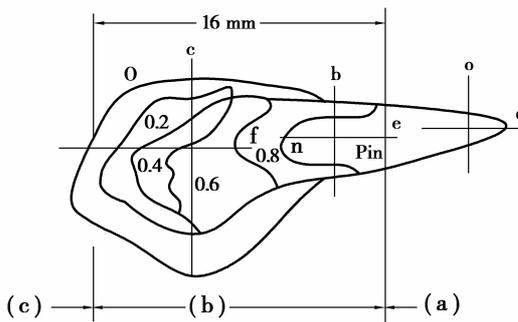


图 3 川和高穗等的 Cr 分布结果

将图 2 中(a)区域与(b)区域的边界与铸坯表面的距离作为坯壳厚度,如图 4 为带有射钉试样的低倍照片。根据式(1)可以得到凝固系数。

$$K = \frac{D}{\sqrt{\tau}}, \tag{1}$$

式中:  $D$  为凝固坯壳厚度, mm;  $\tau = \frac{l}{v}$ , 为凝固时间, min;  $l$  为射钉位置距离结晶器弯月面的距离, m;  $v$  为试验时的拉坯速度, m/min。



图 4 射钉试样的酸浸低倍照片

液相穴长度的确定可以根据凝固定律计算

得出:

$$L = \frac{d^2 v}{4K^2}, \quad (2)$$

式中: $L$ 为液相穴长度,m; $d$ 为铸坯断面厚度,mm; $v$ 为拉速,m/min; $K$ 为综合凝固系数,mm/min<sup>1/2</sup>。

## 2 测试方法的修正

目前射钉法测量铸坯坯壳厚度的方法已能获得较好的测试结果,但在有些方面尚有缺陷,比如:

1)钉子射入铸坯后,高温的铸坯熔化钉子需要一定的时间,这将引起计算凝固系数计算式(1)中凝固时间 $\tau$ 的变化,当然凝固时间 $\tau$ 的变化是由于射钉位置距离结晶器弯月面距离 $l$ 的变化引起的;

2)钉子射入铸坯所需的时间;

3)式(1)的凝固坯壳厚度 $D$ 是在冷态时根据钉子熔化情况读取的数据,而式(2)的液相穴长度 $L$ 是指热态时的数据,两者有存在一个热收缩系数的关系;

4)同样式(2)中的铸坯断面厚度也是冷态时的要求数据,与液相穴长度也存在一个热收缩系数的关系。

根据上述4个方面的情况,有必要对测试方法(主要是测试结果)进行修正,方可保证测试的准确性。

对式(1)来说,对式中的凝固时间进行修正,如式(3):

$$\tau_h = \tau + \tau_1 + \tau_2, \quad (3)$$

式中: $\tau_h$ 为修正后的凝固时间,min; $\tau$ 为凝固时间,min, $\tau = \frac{l}{v}$ ;  $l$ 为射钉位置距离结晶器弯月面的距离,m; $v$ 为试验时的拉坯速度,m/min; $\tau_1$ 为钉子熔化时间,min; $\tau_2$ 为钉子射入时间,min。

关于凝固坯壳厚度 $D$ 和铸坯断面厚度 $d$ ,通过观察式(1)和式(2)可知,热态和冷态的热收缩系数相互抵消,因此,应用射钉法测试铸坯坯壳厚度的方法中凝固系数的计算应采用式(4),液相穴长度的计算保持不变:

$$K = \frac{D}{\sqrt{\tau_h}}. \quad (4)$$

关于钉子的熔化时间 $\tau_1$ ,这里采用有限元软件MSC. Marc 模拟钉子在高温铸坯的熔化过程。

由于钉子射入铸坯的液相区域,可忽略钉子在长度方向的传热,把钉子的熔化过程简化为二维横截面非稳态传热模型,在极坐标系 $(r, \phi)$ 下其内部传热控制方程可表示为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \right), \quad (5)$$

式中: $\lambda$ 为导热系数,W/(m·°C); $\rho$ 为密度,kg/m<sup>3</sup>; $c_p$ 为比热容,J/(kg·°C); $T$ 为温度,°C; $r$ 为钉子半径,m; $\phi$ 为弧度。

初始条件:

$$T(r, \phi) |_{\tau=0} = T_s, \quad (6)$$

式中: $T_s$ 为钉子在常温下的温度,°C,这里取30°C。

边界条件:

$$T(r, \phi) |_{r=R} = T_l, \quad (7)$$

式中: $T_l$ 为铸坯液相线温度,°C; $R$ 为钉子半径,m。由于钉子体积相对铸坯来说太小,钉子本体吸收热量对铸坯的温度不产生影响。

钉子材质为弹簧钢60Si2Mn,直径为6mm,60Si2Mn的物性参数为:固相线温度1354°C;液相线温度为1470°C;潜热为235.5kJ/kg;导热系数为28W/(m·°C);比热为750J/(kg·°C)。

以浇铸普碳钢Q235为例,Q235的液相线温度为1510°C,固相线温度为1440°C。把钉子本体(60Si2Mn)温度高于其液相线温度1470°C的区域认为是(c)区域;温度介于其液相线温度1470°C和Q235的固相线温度1440°C的区域认为是(b)区域,温度小于Q235固相线温度1440°C的区域认为是(a)区域。表1为钉子射入铸坯内部不同温度区间经历一定的时间后钉子本体的温度。图5为钉子射入普碳钢Q235铸坯不同温度区间经历3.9、9.9s后钉子本体的温度云图。

表1 钉子射入铸坯内部不同温度区间经历一定的时间后钉子本体温度

铸坯(Q235) 温度/°C	经历时间 /s	钉子(60Si2Mn) 温度/°C	备注
1 510	3.9	1 470	熔化,(c)区域
1 440	9.9	1 440	(b)区域
1 354	3.6	1 354	(a)区域

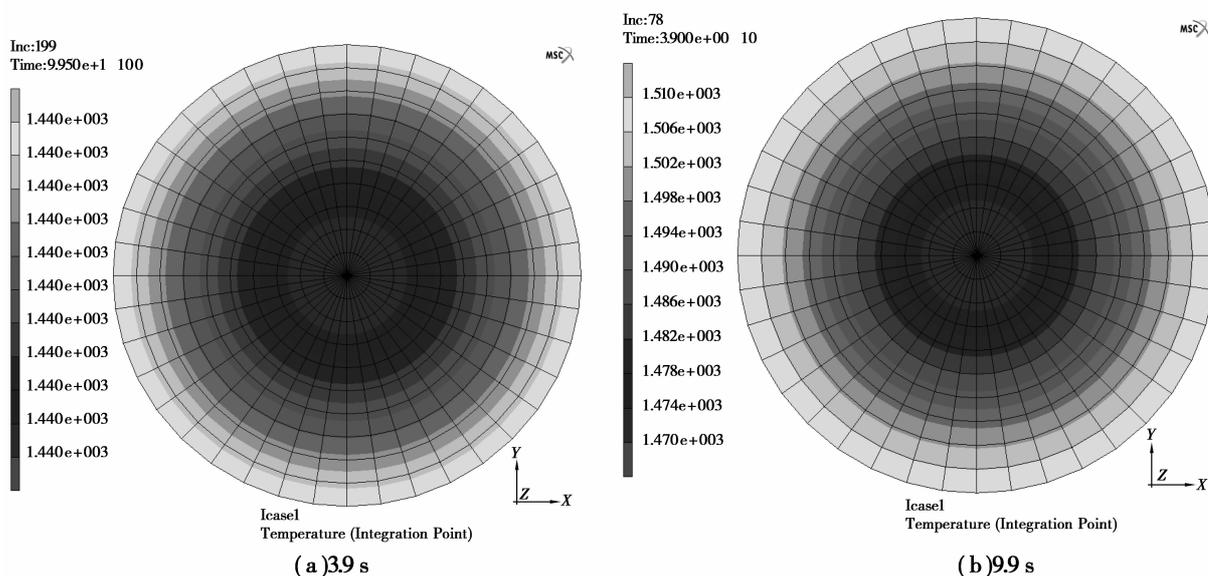


图 5 钉子射入高温铸坯后的温度云图

如果钉子射入铸坯内部温度高于  $1\ 510\ ^\circ\text{C}$  的部分,钉子最迟在  $3.9\ \text{s}$  内就熔化为液态;如果钉子射入铸坯内部温度介于  $1\ 510\sim 1\ 440\ ^\circ\text{C}$  的部分,钉子需要  $9.9\ \text{s}$  的时间才能完全达到铸坯的固相线温度;当温度低于  $1\ 440\ ^\circ\text{C}$  时,虽然钉子温度可能超过其固相线温度,但由于此时铸坯已经是固态。也就是,抛开射钉低倍试验读数的误差,要准确区分(a)区域和(b)区域的分界,需要在钉子射入  $9.9\ \text{s}$  后,也即  $\tau_1 = 0.165\ \text{min}$ 。

射钉枪距铸坯的距离不超过  $400\ \text{mm}$ ,子弹飞行速度按  $100\ \text{m/s}$ (保守估计),那么钉子射入铸坯的时间  $\tau_2$  最长为  $6.67 \times 10^{-5}\ \text{min}$ ,可以忽略不计。

因此,凝固时间的计算式(3)可以进一步简化为下式:

$$\tau_h = \tau + \tau_1. \quad (5)$$

### 3 实例

以在某钢厂连铸机上进行的射钉试验为例来说明不采用修正和采用修正之后的差异。图 6 为编号为  $10^\#$  和  $20^\#$  试样的低倍照片,根据前面所述方法,可以知道  $10^\#$  试样的坯壳厚度为  $97\ \text{mm}$ ,  $20^\#$  试样的坯壳厚度为  $101\ \text{mm}$ 。表 2 为计算结果对比。

表 2 修正前后的凝固系数和凝固终点对比

试样 编号	射钉位置	拉速 ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	坯壳 厚度 /mm	修正前		修正后	
				凝固系数 /( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-\frac{1}{2}}$ )	凝固终点 /m	凝固系数 /( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-\frac{1}{2}}$ )	凝固终点 /m
10	Seg. 6~Seg. 7	1.1	97	24.89	27.74	24.75	28.06
20	Seg. 6~Seg. 7	0.94	101	23.96	25.58	23.85	25.82

从以上计算的结果可以看出,采用修正后的凝固系数小于修正前的,最大相差  $0.14\ \text{mm}/\text{min}^{1/2}$ ,相对偏差  $0.5\%$ ,在相同拉速条件下,偏差大小随射钉位置距弯月面的距离增加而减小;在射钉位置一定的条件下,偏差随拉速的减小而增大。修正前后的凝固终点最大相差  $0.32\ \text{m}$ ,相对偏差  $1.2\%$ ,对没有采用轻压下的连铸机来说,在

通常的拉速情况下,凝固终点的判断有  $0.32\ \text{m}$  的偏差,对生产影响不大,但是在拉速提高时采用传统的没有经过修正的凝固系数来计算凝固终点,存在着巨大的隐患。对具有轻压下的连铸机来说,有时就可能影响到轻压下的压下位置了,进而影响轻压下的效果。

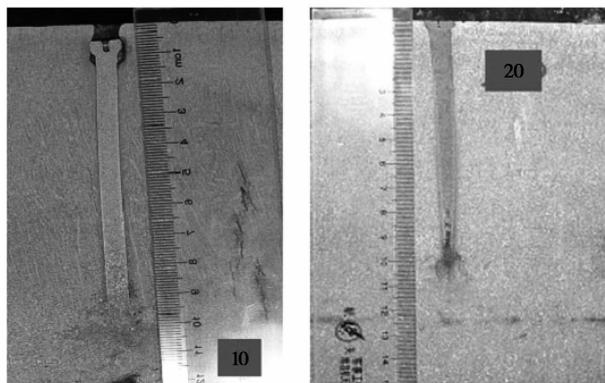


图6 10#和20#样的低倍照片

## 4 结论

1) 针对射钉测试铸坯壳厚度的方法,提出了凝固系数的修正计算式。

2) 以实际的算例说明修正前后的数据偏差,凝固系数相差0.5%,凝固终点相差1.2%。

3) 采用修正以后的计算式,凝固系数和凝固终点的计算更为准确,对实际生产具有指导意义。

### 参考文献:

[1] KAWAWA T, SATO H, MIYAHARA S, et al. Determination of solidifying shell thickness of continuously cast slab by rivet pin shooting [J]. *Tetsu-to-Hagane*, 1974, 60(2):206-216.

[2] MUOJEKWU C A, SAMARASEKERA I V, BRIMACOMBE J K. Heat transfer and microstructure during the early stages of metal solidification [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1995, 26(2):361-382.

[3] ARDELEAN E, ARDELEAN M, SOCALICI A, et al. Simulation of continuous cast steel product solidification [J]. *Revista de Metalurgia*, 2007, 43(3):181-187.

[4] HANAO M, KAWAMOTO M, YAMANAKA A. Growth of solidified shell just below the meniscus in continuous casting mold [J]. *ISIJ International*, 2009, 49(3):365-374.

[5] THOMAS B G, SAMARASEKERA I V, BRIMACOMBE J K. Mathematical model of the thermal processing of steel ingots: part I. heat flow model [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1987, 18(1):119-130.

[6] 陈嫚丽,陈登福,张立峰,等.连铸板坯凝固形貌测试及模拟 [J]. *过程工程学报*, 2009, 9(z1):390-394.

CHEN MAN-LI, CHEN DENG-FU, WANG LI-FENG, et al. Testing and simulating study on the solid shell shape of slab continuous casting [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2009, 9(z1):390-394.

[7] 陈登福,王青峡,高文星,等.板坯连铸过程中铸坯凝固壳厚度的测定 [C]//2008年全国冶金物理化学学术会议专辑:下册.贵阳:国家自然科学基金委员会与材料学部,2008:523-526.

[8] LAIT J E, BRIMACOMBE J K, WEINBERG F. Mathematical modelling of heat flow in the continuous casting of steel [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 1974, 1(2):90-97.

[9] CHEREPANOV A N, POPOV V N, KOMSHUKOV V P. Flow structure in solidifying continuous-cast steel ingot [J]. *Steel in Translation*, 2007, 37(10):842-846.

[10] TODOROKI H, PHINICHKA H. Heat transfer behavior of molten iron and nickel during the first 0.2 seconds of solidification [J]. *ISIJ International*, 2009, 49(9):1347-1355.

[11] AVDONIN Y V, BULANOV L V, GELFENBEIN E V, et al. Secondary cooling of continuous-cast billet at OOO Uralmash-Engineering [J]. *Steel in Translation*, 2008, 38(5):383-387.

[12] KUSHNAREV A V, PETRENKO Y P, ALEKSANDROVA N M, et al. Growth kinetics of the ingot shell in the mold with pulsed-continuous cooling [J]. *Steel in Translation*, 2007, 37(11):974-978.

[13] MA J C, XIE Z, JIA G L. Applying of real-time heat transfer and solidification model on the dynamic control system of billet continuous casting [J]. *ISIJ International*, 2008, 48(12):1722-1727.

[14] KIM H S, CHO I S, SHIN J S, et al. Solidification parameters dependent on interfacial heat transfer coefficient between aluminum casting and copper mold [J]. *ISIJ International*, 2005, 45(2):192-198.

[15] SENGUPTA J, OJEDA C, THOMAS B G. Thermal-mechanical behaviour during initial solidification in continuous casting: steel grade effects [J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2009, 22(1/4):8-14.

[16] 温良英,张健,陈登福,等.低合金高强度钢连铸二冷制度优化及试验 [J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(9):1008-1011,1017.

WEN LIANG-YING, ZHANG JIAN, CHEN DENG-FU, et al. Optimization of secondary cooling water distribution system for high-strength, low-alloy steel in continuous casting [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(9):1008-1011,1017.

- [17] 张旭升,关勇,贾洪明,等. 应用射钉法测量板坯凝固坯壳的厚度[J]. 鞍钢技术,2005(6): 36-42.  
ZHANG XU-SHENG, GUAN YONG, JIA HONG-MING, et al. Application of nail-shooting technique in measuring solidified slab shell thickness [J]. Angang Technology,2005(6): 36-42.
- [18] 陈登福,李宏亮,牛宏波,等. 方坯连铸二次冷却配水新模型[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2007,30(6): 61-64,68.  
CHEN DENG-FU, LI HONG-LIANG, NIU HONG-BO, et al. New model for spraying water of nozzles in secondary cooling of billet continuous casting [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007,30(6): 61-64,68.
- [19] 曹运涛,李殿明,董光军. 射钉法测量坯壳厚度在济钢大板坯连铸机上的应用[J]. 山东冶金,2006,28(5): 36-37.  
CAO YUN-TAO, LI DIAN-MING, DONG GUANG-JUN. Application of measuring solidified shell thickness by nail-shooting technology in Jigang slab caster[J]. Shandong Metallurgy,2006,28(5): 36-37.
- [20] 陈光友,倪红卫,张华,等. 武钢板坯连铸凝固规律的研究[J]. 武汉科技大学学报:自然科学版,2008,31(6): 605-608.  
CHEN GUANG-YOU, NI HONG-WEI, ZHANG HUA, et al. Solidification regularity of slab continuous casting in Wuhan Iron and Steel Corporation [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 31(6): 605-608.

(编辑 王维朗)

(上接第 35 页)

- [15] CHEN SHANG-DA, KE FE-JIU, ZHOU MIN, et al. Atomistic investigation of the effects of temperature and surface roughness on diffusion bonding between Cu and Al [J]. Acta Materialia, 2007,55(9):3169-3175.
- [16] HANG C J, WANG C Q, MAYER M, et al. Growth behavior of Cu/Al intermetallic compounds and cracks in copper ball bonds during isothermal aging [J]. Microelectronics Reliability, 2008,48(3): 416-424.
- [17] 高洪吉,许斌,牛玉超,等. 对 Al-Cu 合金中  $\alpha$ -Al 及  $Al_2Cu$  生长行为的探讨[J]. 铸造技术. 2005,26(8):703-705.  
GAO HONG-JI, XU BIN, NIU YU-CHAO, et al. Research on the  $\alpha$ -Al and  $Al_2Cu$ 's growth action in Al-Cu alloys [J]. Foundry Technology, 2005, 26(8): 703-705.
- [18] 俞伟元,王冠,路文江,等. 铜在纯铝基体中的扩散行为[J]. 有色金属,2006,58(1):31-34.  
YU WEI-YUAN, WANG GUANG, LU WEN-JIANG, et al. Diffusion Behavior of Cu in Pure Al Substrate [J]. Nonferrous Metals, 2006, 58(1): 31-34.

(编辑 张 苹)