

# 确定金属型铸造界面传热系数方法的研究

Methodological Research for Defining Interface  
Heat Transfer Coefficient in Metal Mould Casting

陈 玲<sup>1,2</sup>, 宇文珣珣<sup>1,2</sup>, 钟蜀津<sup>1,2</sup>, 解锦婷<sup>1,2</sup>

(1 天津理工大学 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室,  
天津 300384; 2 天津理工大学 机械工程学院, 天津 300384)

CHEN Ling<sup>1,2</sup>, YUWEN Xuan-xuan<sup>1,2</sup>, ZHONG Shu-jin<sup>1,2</sup>, XIE Jin-ting<sup>1,2</sup>

(1 Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems,  
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2 School of Mechanical  
Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**摘要:** 铸造凝固过程数值模拟中通常用界面传热系数表示热阻的影响,在诸多影响模拟精度的因素中,该系数起主导作用。为提高模拟精度,以 ANSYS 软件为平台,在测温试验的基础上,考虑铸件与铸型的不同接触位置以及不同界面传热系数对模拟结果的影响,采用 0.618 黄金分割法选取了该系数;应用最小二乘法建立起界面传热系数与时间关系的数学模型,并对金属型铸造凝固过程的温度场进行了模拟,将模拟结果与试验结果做了对比分析,得到了合理的温度分布。研究的结果为获得精确的界面传热系数提供了一种研究方法。

**关键词:** 温度场;界面传热系数;0.618 法;最小二乘法

**中图分类号:** TG115.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2012)03-0017-05

**Abstract:** In the process of numerical simulation of casting solidification, the interface heat transfer coefficient was traditionally used to reflect the influence of the heat resistance. Among several factors to make the precision more precisely, this coefficient played an important role in affecting the precision. In order to determined a higher precision, the ANSYS software served as a platform. Basing on the experiment of temperature measurement, the 0.618 method was adopted to select the coefficient, considering the different meet places between the cast and the mould, and the effects made by different interface heat transfer coefficient. By using the least-squares method, a mathematic mode of the realization between time and the interface heat transfer coefficient was set up in order to simulate temperature fields of metal mould casting solidification. And then, a conclusion that a reasonable temperature distribution can be made by comparing the simulation result with the testing data. The result provides a method to get the accurate interface heat transfer coefficient.

**Key words:** temperature filed; the interface heat transfer coefficient; 0.618 method; least-squares method

铸造产品在机械类产品中占有的比例很大,却一直存在着铸件质量不稳定,废品率高,生产手段落后等问题。随着计算机辅助工程分析(CAE)介入铸造这一古老而又落后的行业的工艺设计后,借助 CAE 软件对铸造凝固过程进行数值模拟研究,可对铸件液固转变过程中产生的缩孔、缩松等各种质量问题进行预测,达到提高产品质量,消除铸造缺陷的目的<sup>[1]</sup>。然而,能否准确模拟出整个铸造过程并预测其缺陷的部

位,在诸多影响因素中,最关键的就是铸件与铸型间的界面传热系数。由于铸件冷却凝固体积减小,而铸型受热体积膨胀,结果导致铸件/铸型接触面之间产生空隙,使得界面两侧的温度传递间断。这种空隙称之为界面热阻,一般将界面热阻对铸造系统的热传递的影响表示为界面传热系数<sup>[2]</sup>。在模拟中处理该问题时,不论是将界面热阻忽略不计还是视为常数,都会产生远离实际的结果,然而利用试验的方法直接测量该系

数又存在很大的困难。本工作拟采用“反问题”<sup>[3]</sup>的原理,寻找解决这一难题的方法。所谓“反问题”是指通过试验测得铸件内部温度反推界面传热系数的方法。

本工作在金属型铸造测温试验的基础上,借助 ANSYS 软件和最小二乘法,采用 0.618 黄金分割法来获取界面传热系数,建立该系数与时间的数学模型,将所得界面系数用于凝固过程温度场模拟,并将模拟结果与试验结果进行对比分析,得到了合理的温度分布,进一步验证了界面传热系数的表达式,为研究铸造界面系数提供了一种可行的方法。

## 1 物理模型和有限元模型

液态金属浇入铸型,它在型腔内的冷却凝固过程是一个通过铸型向环境散热的过程。在这个过程中,铸件和铸型内部温度要随时间变化。本工作研究的铸件材料为铝硅合金,铸型材料为 45 钢,初始温度 30℃,呈圆柱状如图 1,单位 mm。A、B、C 三点是热电偶所处的位置,用于测量铸件在不同时刻的温度值。其中 A 点位于界面的竖直方向,B 点位于水平方向,C 点位于铸件中心。考虑铸型和铸件几何结构对称、载荷及边界条件也对称,选择四节点轴对称单元<sup>[4]</sup>,建立圆柱体纵剖面有限元模型,在铸件与铸型之间考虑热阻的影响选择了接触单元如图 2,共有 4505 个轴对称单元,301 个接触单元。由于凝固过程中有相变,铸造过程中就会有潜热的释放。

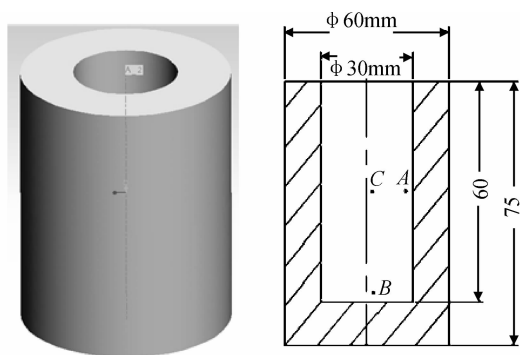


图 1 铸型示意图

Fig. 1 The schematic chart of mould

用 ANSYS 软件模拟时,潜热采用热焓法来处理<sup>[5]</sup>。焓值的变化  $\Delta H$  可描述为密度、比热、温度的函数且随时间变化:

$$\Delta H = \int \rho C(T) dT \quad (1)$$

式中: $\Delta H$  为焓,  $J/m^3$ ;  $\rho$  为铸件金属的密度,  $kg/m^3$ ;  $C$  为比热容,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $T$  为温度,  $^\circ C$ 。

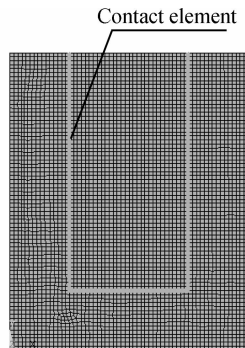


图 2 考虑接触时的有限元模型

Fig. 2 The finite element model of considering contacting

模拟时,在冷却初始阶段假设液体已经充满铸型,竖直方向和水平方向铸件的温度相同。铸型上表面和侧面的散热系数分别设为  $25, 12 W/(m \cdot ^\circ C)$ ;底面由四根 150mm 的立柱支撑(图 1 未示出),散热系数为  $15 W/(m \cdot ^\circ C)$ 。随着冷却凝固时间的推移,铸件体积逐渐减小而铸型受热膨胀,由于重力的影响,铸件下表面与铸型的接触要好于侧面接触,这样铸件/铸型界面两侧由于温度间断而产生的空隙在水平方向要小于竖直方向,也就是说水平方向的热阻是小于竖直方向的。然而不论水平方向还是竖直方向,热阻空隙都会逐渐生成,且随冷却时间变化而变化<sup>[6]</sup>。

## 2 数学模型

铸件凝固过程是一个三维的不稳定热传导过程,数学模型是不稳定导热偏微分方程,数学表达式为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + L \quad (2)$$

本工作采用轴对称结构模型和圆柱坐标系,所以数学表达式为<sup>[7]</sup>:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left( k \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) + \frac{k}{r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + L \quad (3)$$

式中: $\rho$  为铸件金属的密度,  $kg/m^3$ ;  $C_p$  为材料的比热,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $k$  为材料的热传导系数,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ;  $L$  为潜热,  $J/m^3$ ;  $r$  为圆柱的直径;  $m$ ;  $z$  为圆柱的高度,  $m$ 。

## 3 界面传热系数计算流程

试验统计表明,对于一个因素问题,用“0.618 法”做 16 次实验,就可以取得“对分法”做 2500 次试验所达的效果,0.618 法是最经典的一维直接搜索方法<sup>[8]</sup>。文中参数  $H$  的选择就是采用 0.618 法,表达式为:

$$H = (H_{\max} - H_{\min}) \times 0.618 + H_{\min} \quad (4)$$

为寻找界面系数的变化规律,图3给出了计算流程。该图描述了整个凝固过程的温度场的模拟和界面传热系数的计算过程。模型中通过热电偶测量的温度作为已知条件,程序中设置了试验值与模拟值的比较,如果满足所设条件即可停止参数选择循环并输出结果:

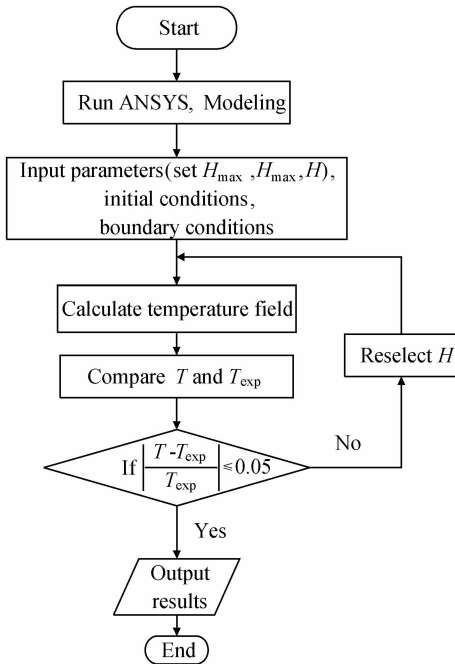


图3 计算程序流程简图

Fig. 3 Simplified flow chart for calculation

在数值模拟计算时,首先设定初始的  $H_{\max}$ ,  $H_{\min}$  值,之后判断:

1) 当  $\left| \frac{T - T_{\exp}}{T_{\exp}} \right| \leq 5\%$ , 说明这个时刻(或界面温度)的界面传热系数  $H$  正确,保存  $H$  值并将  $H$  作为下个时刻的界面传热系数的最大值;

2) 当  $\frac{T - T_{\exp}}{T_{\exp}} > 5\%$ , 说明此时  $H$  小于实际的界面传热系数,将  $H$  作为  $H_{\min}$ ,再用公式(4)求解  $H$ ,作为新参数输入,重新进行模拟,直至模拟值  $T$  和试验值  $T_{\exp}$  的误差绝对值在允许误差范围内;

3) 当  $\frac{T - T_{\exp}}{T_{\exp}} < -5\%$ , 说明此时  $H$  大于实际的界面传热系数,将  $H$  作为  $H_{\max}$ ,利用公式(4)求解出  $H$ ,作为参数输入重新进行模拟,直至模拟值  $T$  和试验值  $T_{\exp}$  的误差绝对值在允许误差范围内,才可以进行下一时刻的界面传热系数的搜索。

通过上述计算后得出界面传热系数在水平方向和竖直方向随时间的变化如图4所示。接着将试验测得的各时刻  $t_i$  的界面传热系数计为  $H_i$ ,采用最小二乘法

对竖直和水平方向的传热系数建立该系数与时间关系的数学模型如公式(5):

$$H = at^b \quad (5)$$

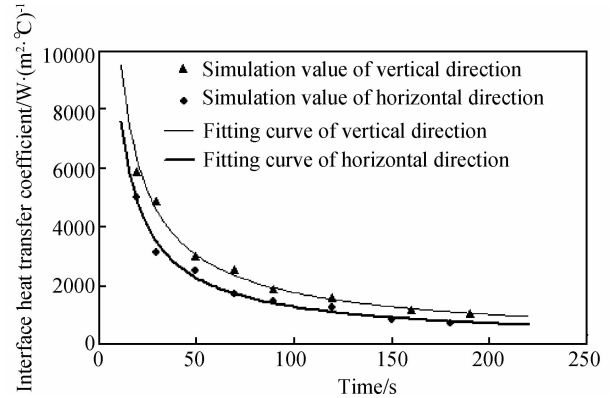


图4 界面传热系数随时间的变化图

Fig. 4 Variation of the interface heat transfer coefficient with time

式中:  $H$  为界面传热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $t$  为时间,  $s$ ;  $a, b$  为常数,可用最小二乘法解出。要使拟合曲线最接近试验值,根据最小二乘法理论<sup>[9,10]</sup>,应使每个数据点的残差平方和最小<sup>[11]</sup>:

$$S = \sum_{i=1}^Z [H_{t_i} - H_i]^2 \quad (6)$$

只有当点  $(a, b)$  为函数  $S$  的极小值点时,残差的平方和才是最小的,即:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0 \quad \frac{\partial S}{\partial b} = 0 \quad (7)$$

解这个方程可以得到  $a, b$  的值,从而得到界面传热系数近似公式为:

$$\text{竖直方向界面系数: } H_v = 65860.1 \times t^{(-0.86)} \quad (8)$$

$$\text{水平方向界面系数: } H_h = 76771 \times t^{(-0.83)} \quad (9)$$

#### 4 数值模拟结果

将以上界面传热系数公式(8),(9)引入模拟计算中,得出图5的界面传热系数随铸件表面温度变化图。可知,凝固初始,竖直方向界面系数为  $4500 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ,水平方向为  $4600 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$  其值相差很小;当铸件表面温度降到  $230^\circ C$  时,竖直方向界面传热系数降到  $3800 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ,而水平方向变化不大;铸件表面温度继续下降到  $120^\circ C$  左右时,竖直方向与水平方向的界面传热系数相差大约  $1500 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。可见,开始凝固时两个方向界面传热系数基本相同,随着温度的降低,竖直方向的界面传热系数变化大于水平方向,也就是说竖直方向的热阻大于水平方向热阻。

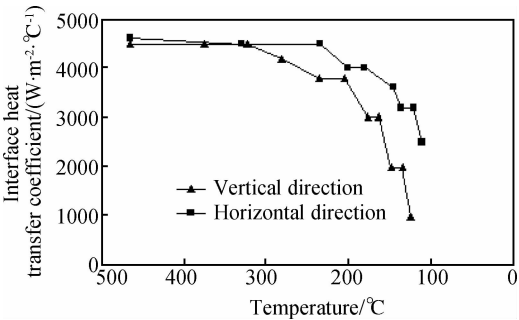


图 5 界面传热系数随铸件表面温度变化图

Fig. 5 Variation of the interface heat transfer coefficient with temperature

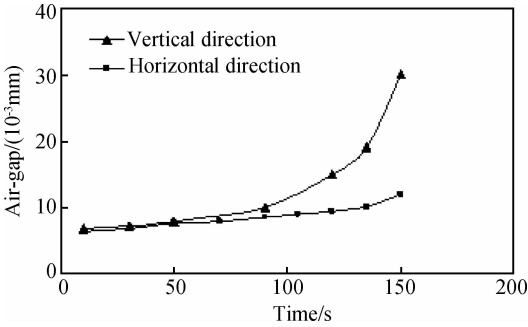


图 6 空隙随时间变化图

Fig. 6 Variation of air-gap width with time

铸件/铸型界面产生空隙后,主要通过热阻(空隙)来进行热传导,则空隙的宽度可用公式(10)表达:

$$W_{\text{idth}} = K/H \tag{10}$$

式中:  $W_{\text{idth}}$ —空隙的宽度,  $m$ ;  $K$ —空隙中气体的热传导率,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ;  $H$ —界面传热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

图 6 为空隙(热阻)随时间变化图,高温时可以理解为完全接触(即理想状态),竖直和水平方向均没有产生空隙。随着铸件向铸型传热过程的进行,空隙产生,造成铸件/铸型界面温度间断。随着时间变化,空隙也逐渐变大;到 150℃左右,水平方向的空隙明显小于竖直方向,这与重力的影响有直接关系。

5 界面系数的验证

公式(8),(9)是在图 1 的试验条件下得到的,这两

个公式是否适用于相同铸造材料,不同的铸件形状,本文对此进行了验证:铸型由圆柱形改为 45 号钢方形,铸件材料仍为铝硅合金,图 7 为试验简图,(关于测温试验请见另篇《铸件和铸型间界面传热系数的试验研究》)。由以上研究可知,竖直方向接触空隙要大于水平方向,因此对图 7 温度场的模拟中,只验算了竖直方向的界面系数。在模拟中,仍采用前述的 0.618 黄金分割法进行搜索,建立界面传热系数关于时间的数学模型,得到竖直方向界面传热系数的关系式,与前述公式(8)形式相同,系数略有差别。将界面传热系数  $H$  作为已知边界条件,利用 ANSYS 软件对试验模型进行温度场模拟计算,图 8 显示了 24#, 25#, 26# 三个测点的模拟温度与试验温度的比较。可以看出,计算结果与实测结果是很接近的,这也验证了上述黄金分割法的准确性。

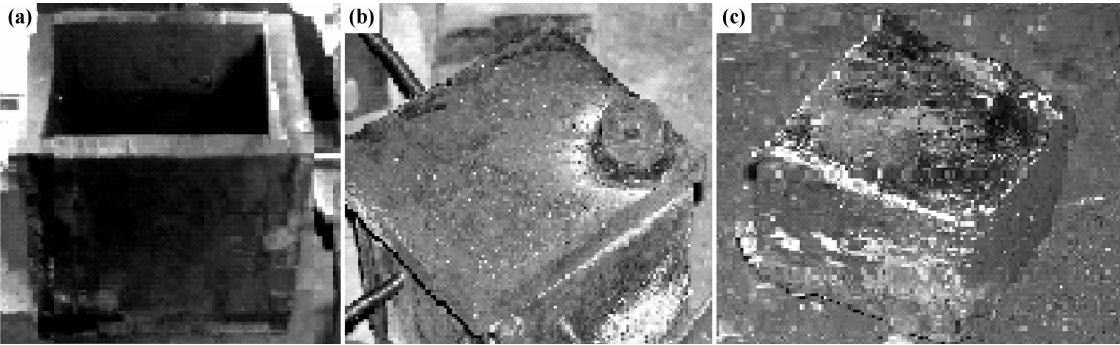


图 7 铸造结构简图

(a)铸型;(b)浇口;(c)铸件

Fig. 7 The schematic chart of casting

(a)mold;(b)casting gate;(c)casting

6 结论

(1)采用 0.618 黄金分割法和最小二乘法得到了铸件/铸型接触界面间的传热系数的变化规律和数学

表达式。

(2)由于重力和铸型表面散热情况等因素的影响,界面传热系数随水平方向和垂直方向接触位置而变化。

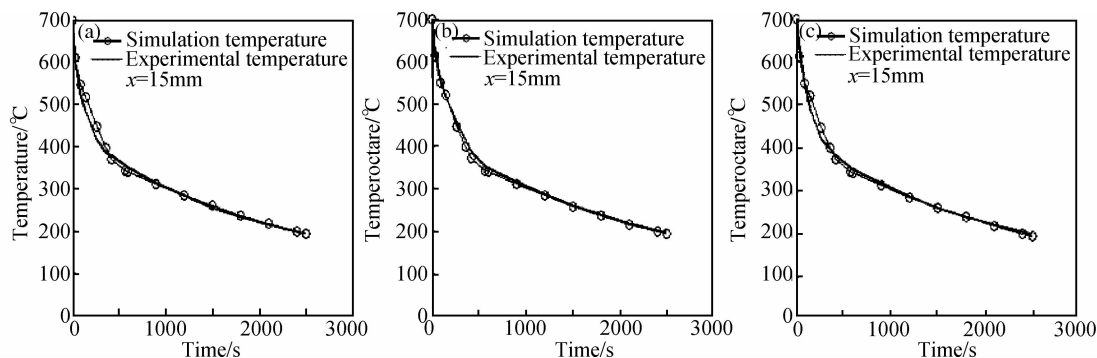


图8 模拟温度与试验温度的比较

(a)24# 通道;(b)25# 通道;(c)26# 通道

Fig. 8 Comparison between simulated and tested results

(a)24# channel;(b)25# channel;(c)26# channel

(3)通过采用相同材料和不同铸型形状模拟计算后,界面间的传热系数均有相同的数学表达式,只是系数略有不同。

#### 参考文献

- [1] 林国荣. 铸件形成过程计算机数值模拟的发展及应用[J]. 现代铸铁, 2001, (2): 8—12.
- [2] 陈进, 丁忠军, 付秀玲, 等. 基于 MATLAB 的氮化铝和铜界面热阻仿真[J]. 低温与特气, 2005, 23(4): 13—15.
- [3] 黄光远, 刘小军. 数学物理反问题[M]. 山东: 山东科技出版社, 1980.
- [4] 解锦婷, 陈玲. 金属铸造界面传热系数的试验研究及其确定[J]. 机械设计, 2007, 24(10): 38—40.
- [5] CHEN L, WANG P L, SONG P N, et al. Finite element numerical simulation of temperature field in metal pattern casting system and “reverse method” of defining thermal physical coefficient[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 20(3): 217—224.
- [6] ABEL-WAHED M A. On the interfacial heat transfer coefficient for cylindrical ingot casting in a metal mould [J]. Journal of Materials Sciences Letters, 1992, (11): 601—606.
- [7] 许肇钧. 传热学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980. 38—40.
- [8] 林雪慧. 基于实验的杂交反演方法及其在复合材料性能研究中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [9] TALER J. Determination of local heat transfer coefficient from the Solution of the inverse heat conduction problem[J]. Forsch Ingenieurwes, 2007, 71: 69—78.
- [10] SANTOS C A, QUARESMA J M V, GARCIA A. Determination of transient interfacial heat transfer coefficients in chill mold castings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2001, 319: 174—186.
- [11] 卢义, 巫英伟, 索晓娜, 等. 板坯连铸二冷表面传热系数预测与仿真软件[J]. 工业传热, 2005, 34(6): 4—7.
- [12] 冯玉杰, 孙丽欣, 孙晓君, 等. 烷基硫代磷酸稀土盐的制备及摩擦学特性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(3): 324—328.
- [13] CHEN W G, GAO Y Z, ZHANG H C, et al. Influence of heat-treated serpentine powder on wear properties of metal surface [J]. Journal of the chinese ceramic society, 2008, 36 (1) : 31—34.
- [14] 李屹, 周元康, 杨绿, 等. 0 维纳米坡缕石负载 Ag 复合材料的制备及其表征[J]. 非金属矿, 2010, 33(1): 70—72.
- [15] 乔玉林. 纳米微粒的润滑和自修复技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金项目(2006BA09); 天津市应用基础与前沿技术研究计划(09JCZDJC23500)

收稿日期: 2011-05-12; 修订日期: 2011-12-05

作者简介: 陈玲(1964—)女, 教授, 主要从事铸造过程中数值模拟技术的应用, 联系地址: 天津市西青区宾水西道 391 号天津理工大学主校区机械工程学院(300384), E-mail: chensarah@126.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50965004); 贵大引进人才项目(贵大人基合字 2008038)

收稿日期: 2011-03-07; 修订日期: 2011-11-30

作者简介: 杨绿(1980—), 男, 讲师, 博士研究生, 目前主要从事摩擦磨损方面的研究, 联系地址: 贵州省贵阳市花溪区贵州大学机械工程学院(550025), E-mail: green\_yang@126.com

通讯作者: 周元康(1948—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为: 机械摩擦副减摩、自修复原理及其技术、能束表面处理技术、高分子树脂改性及其摩擦材料的制备和抗热衰性能研究, 联系地址: 贵州省贵阳市花溪区贵州大学机械工程学院(550025), E-mail: zyk48@163.com

\*\*\*\*\*  
(上接第 16 页)

- [9] JIN Y S, YANG H, LI S H. Mechanochemical additive-assisted reconditioning effects and mechanism on worn ferrous surfaces [J]. Journal of ASTM International, 2007, 4(10): total pages 13.
- [10] 杨绿, 周元康, 李屹, 等. 纳米坡缕石润滑油添加剂对灰铸铁 HT200 摩擦磨损性能的影响[J]. 材料工程, 2010, (4): 94—98.
- [11] 郭廷宝, 徐滨士, 马士宁, 等. 羟基硅酸盐润滑油添加剂对 45# 钢/球磨铸铁摩擦副摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2004, 24 (6) : 512—515.
- [12] 冯玉杰, 孙丽欣, 孙晓君, 等. 烷基硫代磷酸稀土盐的制备及摩擦学特性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(3): 324—328.
- [13] CHEN W G, GAO Y Z, ZHANG H C, et al. Influence of heat-treated serpentine powder on wear properties of metal surface [J]. Journal of the chinese ceramic society, 2008, 36 (1) : 31—34.