

摩擦衬垫动态热物性能及其对瞬态温度场的影响

彭玉兴, 朱真才, 陈国安, 瞿超

(中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州, 221116)

摘要: 为了获得 GM-3 和 K25 这 2 种广泛应用摩擦衬垫的动态热物性能及其因与钢丝绳滑动摩擦而形成的温度场, 采用闪光导热仪对其进行热分析实验。研究结果表明: K25 热物性能参数比 GM-3 的低; 随着温度升高, 衬垫比热容迅速增大, 热扩散系数呈指数规律降低, 导热系数先缓慢上升后稳定不变。针对摩擦提升超载滑动过程, 基于热传导理论, 采用积分变换法求解, 得到衬垫瞬态温度场模型; 当考虑动态热物性能参数时, 衬垫温升缓慢且达到热分解温度时临界速度较高; 用静态热物性能参数计算温度所存在的误差随相对滑速的增大而增大, 随圆心角的增大而减小, 且沿径向逐渐降低, 因此, 由于温度的变化, 采用静态热物性能参数求得的摩擦温度是不可靠的, 只有基于动态热物性能参数所获得的衬垫瞬态温度场才是客观、有效的。

关键词: 衬垫; 动态热物性能; 瞬态温度场; 摩擦

中图分类号: TD534.3; TK121

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2009)02-0436-05

Dynamic thermophysical properties of friction lining and their effect on transient temperature field

PENG Yu-xing, ZHU Zhen-cai, CHEN Guo-an, QU Chao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to obtain thermophysical properties of widely used friction linings (GM-3 and K25) and their temperature field formed sliding friction with wire rope, thermo-analysis experiments were conducted on a light-flash heat conductivity apparatus. The results show that K25 has lower values of thermophysical properties than GM-3; the specific heat capacity increases rapidly with temperature, the thermal diffusivity decreases exponentially with temperature, and the thermal conductivity increases gradually at first and then keeps stable. Aiming at the sliding condition because of overloading, the transient temperature field is deduced by adopting integral-transform method and based on heat conduction theory. With the consideration of dynamic thermophysical properties, the temperature rises slowly and the critical speed corresponding to the thermal decomposition temperature is higher, and the error of temperature calculated with static thermophysical properties increases with the sliding speed, and decreases with the central angle and the radius. Therefore, due to the change of temperature, friction temperature data obtained by adopting static thermophysical properties is unreliable, and the transient temperature field obtained only by utilizing dynamic thermophysical properties is objective and effective.

Key words: lining; dynamic thermophysical properties; transient temperature field; friction

摩擦提升机依靠钢丝绳与衬垫间的摩擦力提升重物, 当因超载等工况发生滑动时, 由于摩擦引起的衬

垫温升将严重威胁矿井提升安全。为了保障矿井提升安全可靠运行, 刘道平等^[1-3]基于静态热物性能对摩擦

收稿日期: 2008-03-20; 修回日期: 2008-06-18

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060290505); 江苏省 2008 年度普通高校研究生科研创新计划资助项目(CX08B_042Z)

通信作者: 彭玉兴(1983-), 男, 江苏江阴人, 博士研究生, 从事衬垫热-应力耦合行为方面的研究; 电话: 13805209649; E-mail:

pengyuxingcumt@126.com

衬垫温度场进行了研究。由于摩擦衬垫属于聚合物材料, 其比热容、热扩散系数、导热系数等热物性能参数都是随温度变化的^[4-8], 基于静态热物性能参数所得到的温度场与客观情况存在明显误差, 因此, 掌握衬垫动态热物性能是研究其摩擦温升的重要条件。目前, 许多研究者只是对动态热物性能^[9-12]或温度场(基于静态热物性能^[13-15])进行了研究, 而未将动态热物性能引入材料温度场进行计算。为此, 本文作者针对 2 种广泛应用的摩擦衬垫, 开展动态热物性能实验研究, 通过积分变化法求得其瞬态温度场, 并获得基于动态热物性能参数的摩擦衬垫瞬态温度场, 以便为摩擦提升防滑设计提供理论依据, 同时, 为其他工程领域温度场精确计算提供借鉴。

1 热分析实验

1.1 实验方法

选用的衬垫材料为 GM-3(中信重机公司工程塑料厂生产)和 K25(洛阳百克特摩擦材料有限公司生产), 其密度分别为 1.36 t/m³ 和 1.4 t/m³, 目前, 矿井摩擦提升机广泛使用这 2 种摩擦衬垫材料。采用闪光导热仪 LFA 447 同步测量衬垫的热扩散系数 α 、比热容 C_p 等热物性能参数^[16]。若已知衬垫密度 ρ , 则可得衬垫的导热系数为:

$$\lambda(T) = \rho \times C_p(T) \times \alpha(T) \quad (1)$$

实验测温范围为 30~240, 每隔 10 测量 1 次, 气氛为氮气, 循环水冷却。测试时, 将样品制成直径为 12.5~12.7 mm、厚度为 1.5~2.0 mm 的圆形薄片, 保证试件上下表面光滑、平整。为了保证实验结果的准确性, 在每个测量温度点测量 3 次, 取平均值作为实验结果, 用于分析。

1.2 实验结果与分析

图 1 所示为衬垫 K25 和 GM-3 的比热容 C_p 、热扩散系数 α 、导热系数 λ 随温度的变化规律。图 1(a) 表明, 衬垫比热容随温度的升高而增大, 且 GM-3 的比热容比 K25 的高。从图 1(b) 可以看出, 衬垫热扩散系数随温度的升高而呈非线性降低; GM-3 热扩散系数明显比 K25 的高, 且其在测试温度范围内变化更剧烈。由图 1(c) 可知, 衬垫导热系数在 90 以内缓慢上升, 此后, 导热系数基本不随温度变化: GM-3 导热系数在 90~240 时稳定在 0.451 W·m⁻¹·K⁻¹, 而 K25 仅为 0.300 W·m⁻¹·K⁻¹。

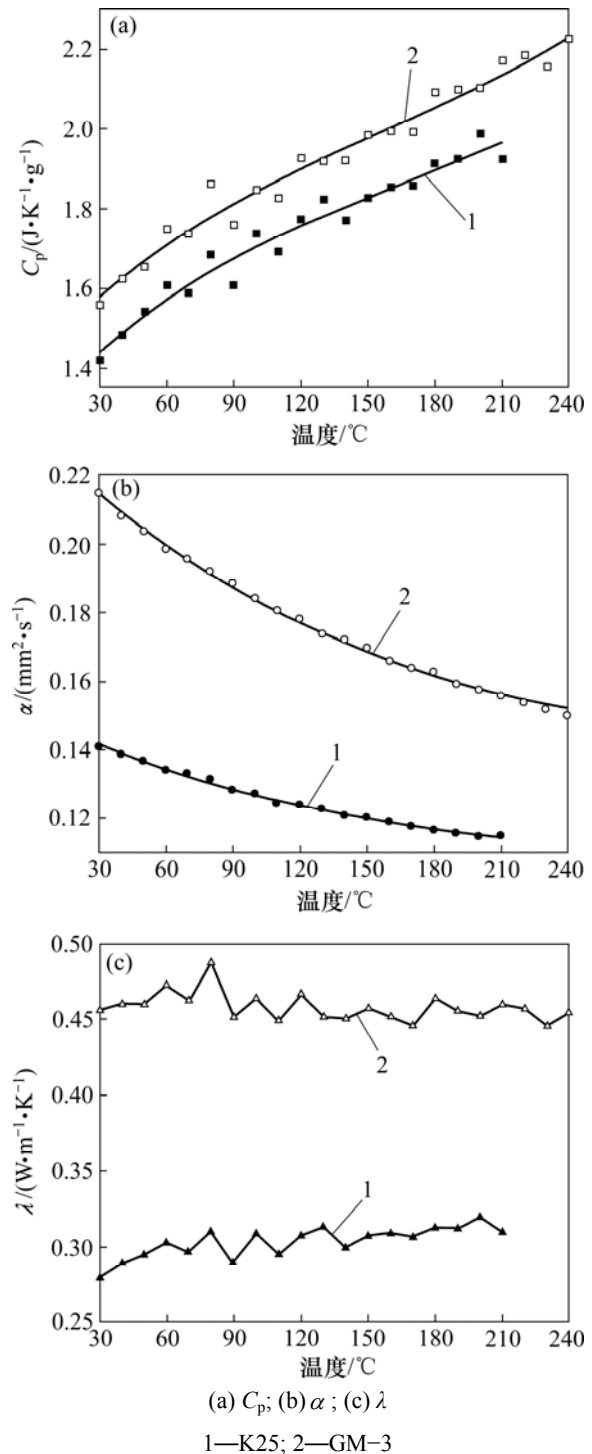


图 1 摩擦衬垫动态热物性能参数

Fig.1 Dynamic thermophysical parameters of friction linings

根据图 1 中比热容和热扩散系数随温度的变化规律, 分别对其进行多项式拟合和指数方程拟合。

对于 GM-3, 其拟合方程如下:

$$C_p(T) = 1.344 + 8.48 \times 10^{-3} T - 4 \times 10^{-5} T^2 + 1.026 \times 10^{-7} T^3, r^2 = 0.972; \quad (2a)$$

$$\alpha(T) = 0.132 + 0.0832 \times \exp\left(-\frac{T - 30.1}{148.749}\right), r^2 = 0.998 \quad (2b)$$

对于 K25, 其拟合方程为:

$$C_p(T) = 1.272 + 6.31 \times 10^{-3} T - 2 \times 10^{-5} T^2 + 4.861 \times 10^{-8} T^3, r^2 = 0.961; \quad (2c)$$

$$\alpha(T) = 0.104 + 0.0379 \times \exp\left(-\frac{T - 29.6}{141.032}\right), r^2 = 0.996 \quad (2d)$$

式中, r^2 为相关系数的平方, 其值都接近 1, 说明拟合曲线能较好地反映实验结果。结合式(1), 可得衬垫导热系数随温度变化的拟合方程。

2 瞬态温度场理论模型

矿井摩擦提升示意图如图 2 所示。当摩擦提升机由于超载等发生打滑时, 钢丝绳与衬垫将之间将发生滑动摩擦而使衬垫温度升高, 两者的接触模型如图 3 所示。

为分析滑动时摩擦衬垫瞬态温度场, 采用坐标 (r, θ, φ) 对其进行几何描述。其中 r 为衬垫上的点到绳槽中心的距离, θ 为圆心角, φ 为围包角。对于图 2 和 3 中所示的几何结构和参数, 取 $a < r < b; 0 < \theta < \theta_0$ ($\theta_0 = \pi/2$); $0 < \varphi < \varphi_0$ (φ_0 为最大围包角)。根据热传导理论, 其三维瞬态热传导微分方程为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{(R - 2r \cos \theta)}{r(R - r \cos \theta)} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\sin \theta}{r(R - r \cos \theta)} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{1}{(R - r \cos \theta)^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

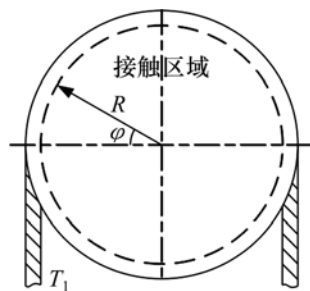


图 2 摩擦提升示意图

Fig.2 Schematic of friction hoist

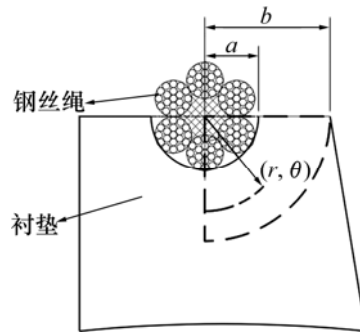


图 3 衬垫摩擦副几何模型

Fig.3 Geometrical model of friction pair

当钢丝绳与衬垫发生相对滑动时, 衬垫摩擦表面热流密度 q 及其热量分配系数 k 分别为:

$$q = \frac{k \cdot \mu T_1 e^{\mu \varphi} \cdot v_e(t)}{n \pi R a} \quad (4)$$

$$k = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_w C_{pw} \lambda_w}{\rho C_p \lambda}}} \quad (5)$$

式中: $v_e(t)$ 为相对滑速; T_1 为钢丝绳轻载侧张力; n 为钢丝绳数量; ρ_w, C_{pw} 和 λ_w 分别表示钢丝绳密度、比热容和导热系数; $v_e(t) = a_1 t$, a_1 为钢丝绳在衬垫上的滑动加速度。

对于任意给定的 φ 截面, 采用积分变换法求解式(3), 对空间变量 r 和 θ 进行积分变换, 将原热传导方程简化为时间变量 t 的常微分方程后求解。将求得的温度函数对空间变量进行逆变换, 即得到衬垫 φ 截面处的瞬态温度场:

$$T(r, \theta, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi(v_n, \theta)}{N(v_n)} \cdot \frac{R_v(\beta_m, r)}{N(\beta_m)} \exp(-\alpha \beta_m^2 t) \cdot \left[\tilde{T}_0 + \int_0^t \exp(-\alpha \beta_m^2 t') A(v_n, \beta_m, t') dt' \right] \quad (6)$$

式中: \tilde{T}_0 表示初始温度 T_0 对 r 和 θ 的积分变换; $\Phi(v_n, \theta) = v_n \cdot \cos(v_n \theta) + H_1 \cdot \sin(v_n \theta)$, 其为特征函数; v_n 为特征值, 它满足 $\tan(v_n \theta_0) = \frac{v_n (H_1 + H_2)}{v_n^2 - H_1 H_2}$;

$H_i = \frac{h_i}{\lambda}$; h_i 为边界对流换热系数; $N(v_n)$ 为范数,

$$\frac{1}{N(v_n)} = 2 \left[(v_n^2 + H_1^2) \cdot \left(\theta_0 + \frac{H_2}{v_n^2 + H_2^2} \right) + H_1 \right]^{-1};$$

$R_v(\beta_m, r) = S_v \cdot J_v(\beta_m \cdot r) - V_v \cdot Y_v(\beta_m \cdot r)$, 其为特征函数; $J_v(\beta_m \cdot r)$ 和 $Y_v(\beta_m \cdot r)$ 分别为第 1 类和第 2 类 v 阶贝塞尔函数, 其中:

$$S_v = \beta_m \cdot Y_v'(\beta_m \cdot b) + H_2 \cdot Y_v(\beta_m \cdot b) ;$$

$$U_v = \beta_m \cdot J_v'(\beta_m \cdot a) - H_1 \cdot J_v(\beta_m \cdot a) ;$$

$$V_v = \beta_m \cdot J_v'(\beta_m \cdot b) + H_2 \cdot J_v(\beta_m \cdot b) ;$$

$$W_v = \beta_m \cdot Y_v'(\beta_m \cdot a) - H_1 \cdot Y_v(\beta_m \cdot a) 。$$

β_m 为特征值, 它满足超越方程: $U_v \cdot S_v - W_v \cdot V_v = 0$;

$$N(\beta_m) \text{ 为范数; } \frac{1}{N(\beta_m)} = \frac{\pi^2}{2} \cdot \frac{\beta_m^2 U_v^2}{B_4 \cdot U_v^2 - B_3 \cdot V_v^2} ,$$

其中:

$$B_3 = H_3^2 + \beta_m^2 \{1 - [v / \beta_m a]^2\} ;$$

$$B_4 = H_4^2 + \beta_m^2 \{1 - [v / (\beta_m b)]^2\} ;$$

$$A(v_n, \beta_m, t) = \alpha \cdot \left[\frac{\Phi(v_n, \theta)}{\lambda} \Big|_{\theta=0} \cdot \tilde{f}_1^*(\beta_m, t) + \frac{\Phi(v_n, \theta)}{\lambda} \Big|_{\theta=\theta_0} \cdot \tilde{f}_2^*(\beta_m, t) + \frac{b \cdot R_v(\beta_m, b)}{\lambda} \cdot \tilde{f}_4 + \frac{a \cdot R_v(\beta_m, a)}{\lambda} \cdot \tilde{f}_3 \right] ;$$

$$f_j^* = r \cdot f_j ; j=1, 2。$$

3 动态热物性能对瞬态温度场的影响

衬垫、钢丝绳和滚筒尺寸参数为: $a=0.014 \text{ m}$, $b=0.04 \text{ m}$, $R=1.4 \text{ m}$; $T_1=223.569 \text{ kN}$, 钢丝绳数量 $n=6$, 钢丝绳与衬垫间的摩擦因数 $\mu=0.2$; $a_1=0.527 \text{ m/s}^2$; $T_0=20$; GM-3 和 K25 的热分解温度为 320 和 345 。衬垫与钢丝绳在常温状态下的静态热物性能参数如表 1 所示。

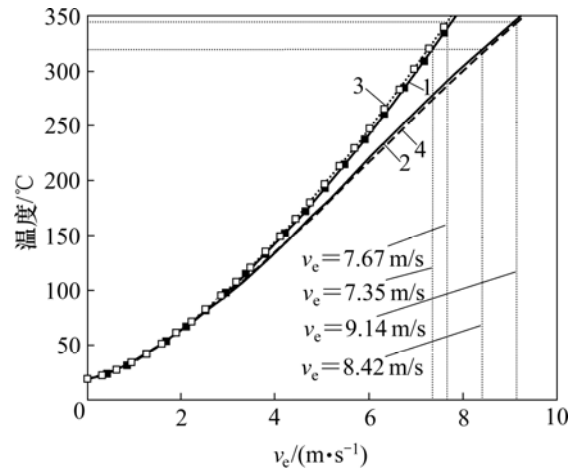
表 1 摩擦副静态热物性能参数

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
GM-3	1 360	1 559	0.456
K25	1 400	1 421	0.280
钢丝绳	7 866	473	53.200

为了准确获得钢丝绳在打滑过程中的摩擦衬垫温度场, 分别将 2 种材料的动态和静态热物性能参数代入瞬态温度场模型, 并进行数值模拟, 图 4 和图 5 所示为部分仿真结果。

由图 4 可知, 当考虑衬垫动态热物性能参数时, 衬垫升温缓慢, 分别由静态和动态热物性能参数求得温度差随相对滑速的增大而增大, 衬垫达到热分解温度时的临界速度较高, GM-3 临界速度由 7.35 m/s

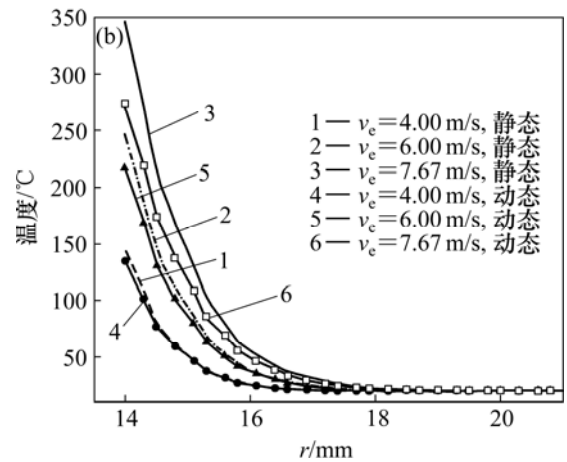
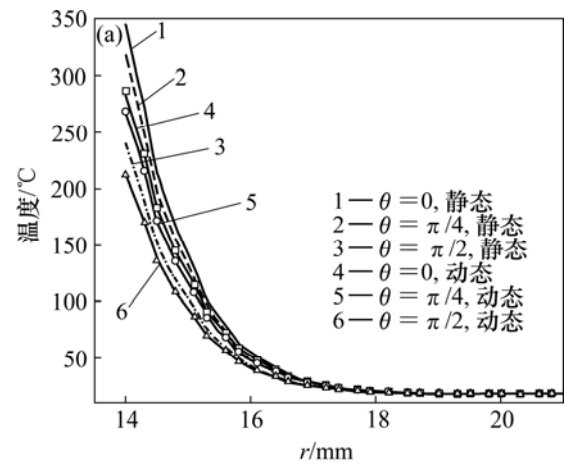
增加到 8.42 m/s。虽然 K25 的导热系数、热扩散系数和比热容较小, 导热性能较差, 由式(5)可知, 其热量



1—GM-3 静态; 2—GM-3 动态;
3—K25 静态; 4—K25 动态

图 4 动态热物性能参数对衬垫温升的影响

Fig.4 Effect of dynamic thermophysical properties on temperature rise of lining



(a) K25, $\varphi=\pi/2$, $v_e=7.67 \text{ m/s}$; (b) K25, $\varphi=\pi/2$, $\theta=0$

图 5 圆心角和相对滑速不同时温度沿径向的变化规律

Fig.5 Temperature change in radial direction with different central angles and sliding speeds

分配系数也较小,故 K25 的温度变化趋势与 GM-3 的基本一致。

为了研究衬垫动态热物性能对温升的影响,分析了衬垫 K25 径向温度随圆心角和相对滑速的变化规律,如图 5 所示。从图 5 可以看出:衬垫温度沿径向迅速减小,且随 θ 的增大而减小。当考虑动态热物性能参数时,计算得到的衬垫温升比考虑静态参数时所得的衬垫温升高;两者的差值随相对滑速的增大和 θ 的减小而增大,且沿径向逐渐降低。这是因为当 θ 较小或滑速较高时,温度很高且变化剧烈,并且 K25 的导热性能随温度升高而增强,故动态热物性能对其影响较大;而衬垫温度沿径向迅速降低且变化趋于平缓,故动态热物性能参数对其影响变小。

4 结 论

a. K25 的热物性能参数比 GM-3 的低;随着测试温度的升高,衬垫比热容迅速增大,热扩散系数呈指数规律降低,导热系数先缓慢上升后稳定不变。

b. 当考虑衬垫动态热物性能参数时,衬垫温升缓慢,衬垫达到热分解温度时的临界速度较高;由静态和动态热物性能参数计算得到的温度差随相对滑速的增大和 θ 的减小而增大,且沿径向逐渐降低。

c. 在高速滑动引起的温度剧烈变化的情况下,采用静态热物性能参数不能反映衬垫温升时热物性能的变化,由此得到的温升误差较大;结合衬垫动态热物性能参数计算得到的衬垫瞬态温度场,能更精确地反映摩擦提升滑动过程中衬垫温度变化规律,为摩擦提升防滑设计提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 刘道平, 梅苏华. 摩擦提升机衬垫摩擦温度的近似计算[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(1): 70-72.
LIU Dao-ping, MEI Su-hua. Approximate method of calculating friction temperature in friction winder lining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997, 26(1): 70-72.
- [2] 夏荣海, 葛世荣. 摩擦提升机衬垫摩擦温升的计算[J]. 煤炭学报, 1990, 15(2): 1-9.
XIA Rong-hai, GE Shi-rong. Calculation of temperature rise of lining of friction winder[J]. Journal of China Coal Society, 1990, 15(2): 1-9.
- [3] 杨兆建. 多绳摩擦提升机衬垫温度场的理论计算[J]. 山西矿业学院学报, 1990, 8(4): 304-314.
YANG Zhao-jian. Theoretical calculation of the lining's temperature field of multi-rope friction winder[J]. Journal of Shanxi Mining Institute, 1990, 8(4): 304-314.
- [4] Singh K, Singh A K, Saxena N S. Temperature dependence of effective thermal conductivity and effective thermal diffusivity of $\text{Se}_{90}\text{In}_{10}$ bulk chalcogenide glass[J]. Current Applied Physics, 2008, 8(2): 159-162.
- [5] Isoda H, Kawashima R. Temperature dependence of thermal property for lead nitrate crystal[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2007, 68(4): 561-563.
- [6] 何伟, 廖功雄, 刘程, 等. PPEsk/PTFE 共混物的热性能和动态机械性能[J]. 材料研究学报, 2005, 19(5): 464-470.
HE Wei, LIAO Gong-xiong, LIU Cheng, et al. Thermal and dynamic mechanical properties of PPEsk/PTFE blends[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2005, 19(5): 464-470.
- [7] Hegeman J B, Van L J, Van K M, et al. Mechanical and thermal properties of SiC_x/SiC composites irradiated with neutrons at high temperatures[J]. Fusion Engineering and Design, 2005, 75/79: 789-793.
- [8] Mazzone A M. Thermal properties of clustered systems of mixed composition: the temperature response of Si-Al clusters studied quantum mechanically[J]. Computational Materials Science, 2005, 34(1): 64-69.
- [9] Zueco J, Alhama F. Simultaneous inverse determination of temperature-dependent thermophysical properties in fluids using the network simulation method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(15/16): 3234-3243.
- [10] 陈国华, 刘心宇. AlN/MAS 微晶玻璃复合材料的热物理性能[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(6): 1078-1082.
CHEN Guo-hua, LIU Xin-yu. Thermophysical properties of AlN/MAS glass-ceramic composites[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(6): 1078-1082.
- [11] Liu C S. An efficient simultaneous estimation of temperature-dependent thermophysical properties[J]. Computer Modeling in Engineering and Sciences, 2006, 14(2): 77-90.
- [12] Idicula M, Boudenne A, Umadevi L, et al. Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(15): 2719-2725.
- [13] Zhao S, Hilmas G E, Dharani L R. Behavior of a composite multidisk clutch subjected to mechanical and frictionally excited thermal load[J]. Wear, 2008, 264(11/12): 1059-1068.
- [14] QI H S, DAY A J. Investigation of disc/pad interface temperatures in friction braking[J]. Wear, 2007, 262(5/6): 505-513.
- [15] 陈焕新, 刘蔚巍, 刘凤珍. 钢-混凝土结合梁试件降温与升温过程的数值计算[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(2): 335-339.
CHEN Huan-xin, LIU Wei-wei, LIU Feng-zhen. Numerical calculation of steel-concrete composite beam specimen in its temperature dropping and rising process[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005, 36(2): 335-339.
- [16] Iguchi C Y, Dos S W, Gregorio J R. Determination of thermal properties of pyroelectric polymers, copolymers and blends by the laser flash technique[J]. Polymer Testing, 2007, 26(6): 788-792.