

## 双色红外系统测量脆性材料磨削温度的研究\*

徐西鹏

(华侨大学机电及自动化学院, 福建, 泉州, 362011)

S. Malkin

(MIE Department, University of Massachusetts, USA)

**摘要** 用光纤辅助双色红外探测仪研究了金刚石砂轮磨削花岗岩和陶瓷过程中接触区的温度特征. 研究结果表明, 和单色系统相比, 双色红外系统除了温度之外还可得出磨削条件下所对应的被测物体的发射率. 接近工件表面的温度测量结果由于受测温用盲孔的影响会偏高. 因此, 红外测温系统适用于直接测量工件表面下方一定距离处的温度变化. 而工件表面温度则用拟合方法得到能量传入工件的比例后再通过理论计算得出. 由于可以得到能量的传输比例, 磨削温度测量对理解工具与工件界面的传热机制具有重要意义.

**关键词** 双色红外系统, 温度, 金刚石, 花岗岩, 陶瓷, 磨削.

## MEASUREMENT OF TEMPERATURES IN GRINDING OF BRITTLE MATERIALS USING TWO-COLOR INFRARED SYSTEM\*

XU Xi-Peng

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362011, China)

S. Malkin

(MIE Department, University of Massachusetts, USA)

**Abstract** Coupled with an optical fiber, temperature responses at the contact zone during grinding of granite and ceramics with a diamond grinding were measured using a two-color infrared detector. It was shown that, compared to a single photodiode system, the two-color detector is able to measure not only the temperature, but also the corresponding apparent emissivity of the workpiece under the grinding conditions. Since the measured temperatures near the surface are somewhat higher than analytical results due to the holes for the optical fiber, the infrared system is suitable for measuring the temperatures at some distance below the workpiece surface. The temperatures on and near the workpiece surface can be calculated from the theoretical thermal model based on the ratio of energy conducted to the workpiece, which can be obtained by a temperature matching technique. The measurement of grinding temperatures is important for understanding the heat transfer at the tool-workpiece interface since the energy partition value can be obtained based on the measured temperatures.

**Key words** two-color infrared detector, temperature, diamond, granite, ceramics, grinding.

### 引言

对石材和陶瓷等典型的非金属硬脆材料, 目前普遍使用金刚石工具对其进行切削或者磨削加工. 由于刀具与工件之间的相对运动速度很快, 工件和金刚石的硬度都高, 因此, 会在刀具与工件界面引起大量的摩擦热, 从而导致工件热损伤或者加速刀具

的磨损. 研究金刚石工具与硬脆材料界面的温度特征, 对准确分析加工过程中工件和金刚石磨粒所承受的实际热负荷的大小, 减少金刚石的非正常失效、抑制工件表面热损伤及提高加工效率均有重要的作用. 因此, 加工中的摩擦热问题一直是硬脆材料磨削领域的研究热点<sup>[1,2]</sup>.

在研究金属材料的磨削温度时, 通常采用工件

\* 国家自然科学基金(批准号 59705015)资助项目  
稿件收到日期 2001-01-12, 修改稿收到日期 2001-05-17

- The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 59705015)  
Received 2001-01-12, revised 2001-05-17

底部钻孔并用电火花放电焊接方式放置标准热电偶丝的所谓顶丝法测量磨削表面层的温度<sup>[3,4]</sup>。对于陶瓷等非导材料,由于用放电焊接方式很难使热电偶丝也工件材料保证良好接触,因此无法用顶丝法测量其磨削温度。除此之外,也有人使用两块工件之间夹持一对热电偶薄膜的方法测量磨削弧区的表面温度<sup>[3,5]</sup>。但是,由于陶瓷和石材均属于脆性材料,磨削过程中材料主要以脆性崩碎方式去除<sup>[6,7]</sup>,很难使热电偶薄膜在加工中形成良好接触。

红外测温技术由于灵敏度高、响应速度快,近几年在国外摩擦学研究领域得到广泛使用<sup>[8,9]</sup>。但基本上都采用单色红外测温系统。这种方法需要知道辐射体的辐射系数,而辐射系数又决定于它的表面状态,即预先测定的辐射系数与磨削中的实际状态不一定一致。为此,本文采用一种先进的双色红外测试系统研究用金刚石工具磨削石材和陶瓷材料时工具与工件接触界面的温度特征。

## 1 实验

### 1.1 双色红外系统及其标定

实验所用双色红外测温系统的核心装置为美国 EG&G 公司的 J15InSbM204S02M 型红外探测仪。该探测系统由 MgCdTe(MCT) 和 InSb 两个单元组成,是一种三明治结构的探测仪。可监测的波长范围为 1~12 $\mu\text{m}$ ,其中 1.0~5.5 $\mu\text{m}$  的信号由 InSb 监测,大于 6.0 $\mu\text{m}$  的由 MCT 监测。通过添加液氮使探测仪的使用温度保持在 77K。MCT 和 InSb 分别需要两个前置放大器。本实验中选用 EG&G 公司的 PA-300 型(用于 MCT)和 PA-7-50 型(用于 InSb)。其中 PA-300 为电压模式的前置放大器,其频带宽度为 0~1MHz。而 PA-7-50 将 InSb 的电流输出转化为电压输出,其频带宽度为 0~150kHz。

测量时由光导纤维将辐射的热信号传导给红外测温系统。实验中所用光纤由美国 Amorphous Materials 公司生产,光纤长为 2m,内孔直径为 0.5mm。光纤双色测温系统的标定比较复杂,首先在一长为 110mm,直径为 90mm 的纯铜圆棒上钻一 20mm 直径、90mm 深度的盲孔,在盲孔壁部攻丝后涂上灯黑,以保证其辐射条件尽可能接近真正黑体的状况<sup>[2]</sup>。标定前将纯铜棒在平板上加热到 450 $^{\circ}\text{C}$  以上,然后在空气中冷却,在冷却过程中进行标定。为了获得变化的温度信号,在光纤端部与热源之间放置一旋转的叶片进行调制。来自红外探测仪的模拟信号分别经过两个前置放大器 PA-300 和 PA-7-50,经过

放大的信号送入 A/D 板和计算机采样记录。具体标定系统如图 1 所示。标定结果见图 2。

根据斯蒂芬—波尔兹曼定律,一个加热黑体的热辐射与其表面温度的关系为

$$E = \sigma T^4, \quad (1)$$

式(1)中  $E$  为单位面积热辐射的能量,  $\sigma$  为一常数 ( $= 5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ ),  $T$  为辐射物体表面的绝对温度。而对于灰体表面,上述公式可修正为

$$E = \epsilon \sigma T^4, \quad (2)$$

式(2)中  $\epsilon$  为辐射体表面的发射率,是一个小于 1 的无量纲数。对于单色红外测温系统,必须先知道被测工件表面的发射率。但是,由于发射率与被测物体的表面状态、光导纤维的端部状态及物体表面的角度等诸多因素相关,因此,事先标定得到的发射率并不是实际的发射率<sup>[2]</sup>。而对于双色红外系统,两个单元的输出信号 ( $s_1, s_2$ ) 的比值可表示为

$$r = \frac{s_1}{s_2} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_{a1} K_1 F(\lambda) Q_\lambda(T) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \epsilon_{a2} K_2 F(\lambda) Q_\lambda(T) d\lambda} \quad (3)$$

式(3)中  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  分别为 MCT 和 InSb 的传输波长范围。  $F(\lambda)$  为光纤的光谱传导函数,  $Q_\lambda$  为黑体的光谱发射能量,  $K_1$  和  $K_2$  分别为两个单元的敏感系数,  $\epsilon_{a1}$  和  $\epsilon_{a2}$  分别为波长为  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  和  $\lambda_3 \sim \lambda_4$  范围时对应的辐射体的发射率。由于对陶瓷等材料,已经有文献证明其符合灰体的条件<sup>[2]</sup>,而本实验中所用花岗岩经测定也符合灰体条件,因此,  $\epsilon_{a1}$  和  $\epsilon_{a2}$  相等,式(3)中的比率  $r$  与被测物体的发射率无关。图 3 给出了黑体和灰体输出信号与温度的关系<sup>[2]</sup>。由式(1)和式(2)可知,在相同的温度下,对于黑体,每一个红外探测单元的输出大于灰体的输出。因此,在任意温度  $\theta_r$  下,  $s_4$  大于  $s_2, s_3$  大于  $s_1$ 。但是,  $s_4/s_2 (\epsilon_{a1})$  等于  $s_3/s_1 (\epsilon_{a2})$ 。使用双色红外测温仪测温时,由于实际所测为信号输出  $s_2$  和  $s_1$ ,根据二者的比值即可知道所测温度,再根据该温度,从图 2 中的标定曲线就

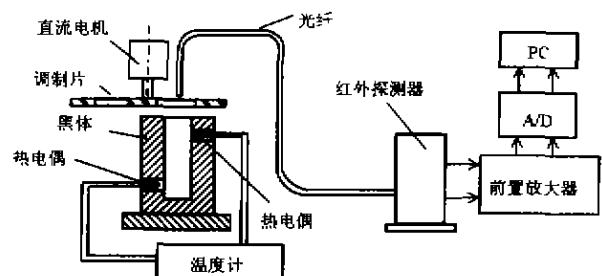


图 1 标定系统框图

Fig. 1 Setup for system calibration

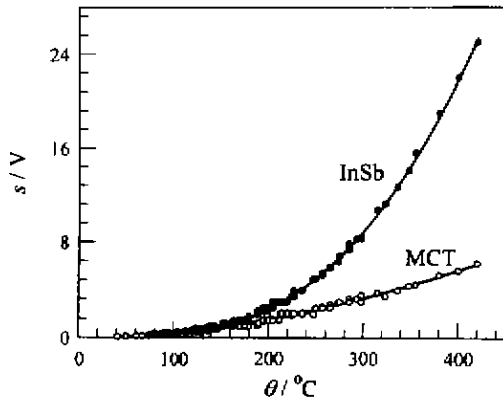


图2 标定曲线图  
Fig.2 Calibration curves

可以得出对应的  $s_4$  和  $s_3$ 。这样,依据式(1)和式(2)的含义就可方便地得到该温度下所对应的被测表面的发射率  $s_1/s_3$  (等于  $s_2/s_4$ )。因此,使用双色红外系统,不但可以直接测量温度,而且可以得出不同温度下及实际操作条件下所对应的物体的发射率。

### 1.2 磨削测温实验方案

磨削实验在美国麻省大学磨削实验室的 Brown & Sharpe1236 型 CNC 磨床上以顺切方式完成。磨削用砂轮为树脂结合剂金刚石砂轮。砂轮直径  $d_s = 305\text{mm}$ , 宽度  $b = 12.7\text{mm}$ 。磨削实验用材料为灰色中硬天然花岗石和氮化硅陶瓷。实验时砂轮线速度  $v_s = 43\text{m/s}$ 。磨削花岗石时所采用的工件进给速度  $v_w$  和磨削深度  $a_p$  分别为  $18\text{mm/s}$  和  $0.07\text{mm}$ 。磨削陶瓷时所采用的  $v_w$  和  $a_p$  分别为  $100\text{mm/s}$  和  $0.04\text{mm}$ 。加工时不加切削液以获得较强的温度信号。磨削实验前,在工件底部钻一个  $1\text{mm}$  直径的平底盲孔,并将光纤伸入盲孔内,使其端部对准盲孔底部,但不和底部相接触。磨削实验前盲孔底部距工件表面距离约  $2.0\text{mm}$ 。只要准确记录每次的磨削深度和总的磨削次数即可反推出每一个磨削过程中测量

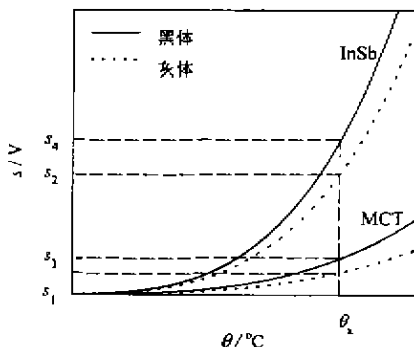


图3 黑体和灰体输出信号与温度关系  
Fig.3 Signals from two bodies versus temperature

点的位置。温度的测量与采集和标定实验相同。所测信号经放大后送入计算机。磨削过程中,用 WT3 型霍尔传感器测量主轴功率,传感器输出经过  $100\text{Hz}$  低通滤波器后送入计算机采样记录。整个实验测试系统如图 4 所示。

### 1.3 实验结果

图 5 为实测得到的两个输出单元 (MCT 和 InSb) 的典型输出信号曲线。由于使用 MCT 和 InSb 的比值直接求解温度时,少许的误差就会导致测温结果发生很大变化。因此,本文使用每一个磨削行程中信号输出最大点的 MCT 和 InSb 的比值求解发射率,然后根据该发射率,将实际所测 MCT 和 InSb 的输出曲线在计算机上用 Matlab 软件进行适当的滤波处理后,再将各自对应的电压输出曲线转化为温度曲线,并将二者的结果进行平均,以减少随机测量误差。图 6 为磨削两种材料时所测典型温度信号随时间  $t$  的变化。图 6 中,磨削花岗石时所消耗的磨削功率  $P$  为  $90\text{W}$ 。磨削陶瓷时所消耗的磨削功率  $P$  为  $2000\text{W}$ 。单条温度曲线随时间的变化规律反映了测点在同一次磨削行程中在磨削弧区所处的不同位置。而不同的曲线则对应着不同的磨削行程,也就是光纤测点所处的距离工件表面的不同位置。从图 6 中的温度曲线可以看出,随着磨削次数的增加,测量点越靠近工件表面,所感应的温度值就越高。

## 2 实验结果分析与讨论

### 2.1 廓形拟合

为了将实测温度曲线与理论解析结果进行比较,用三角形分布的似稳态移动热源模型求解理论温度分布。该模型假设在  $x-z$  平面内沿磨削弧区长度  $l$  分布着一个三角形热源。基于这一移动热源模型,工件内任意点  $(x, z)$  的温升可表示为<sup>[4,10]</sup>

$$\theta(x, z) = \frac{2Rqa}{\pi k v_w} \int_{x-L}^{x+L} \epsilon^{-\eta K_0} (z^2 + u^2)^{-1/2} du, \quad (4)$$

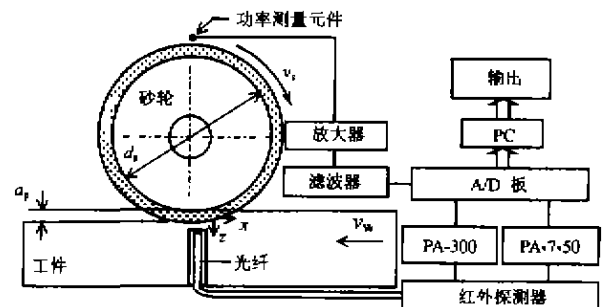


图4 磨削温度实验测试系统框图

Fig.4 Illustration of the experimental set-up

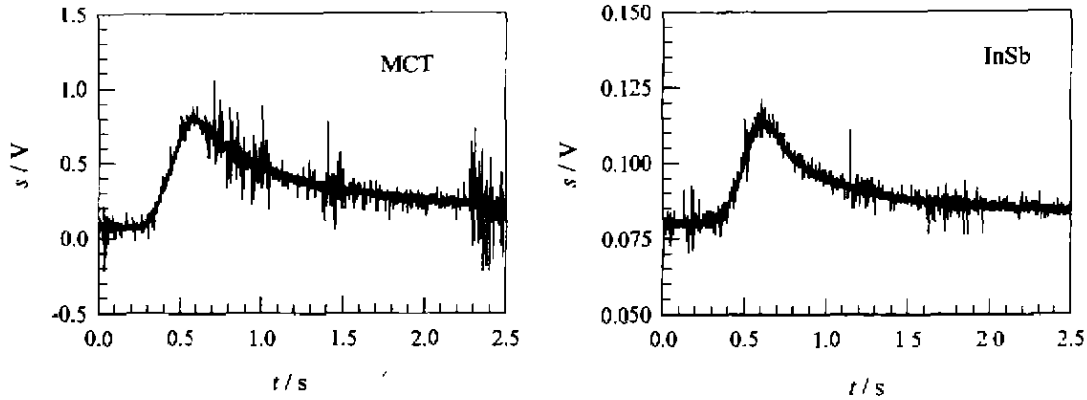


图5 实验输出信号曲线

Fig. 5 Output signals from two photocells

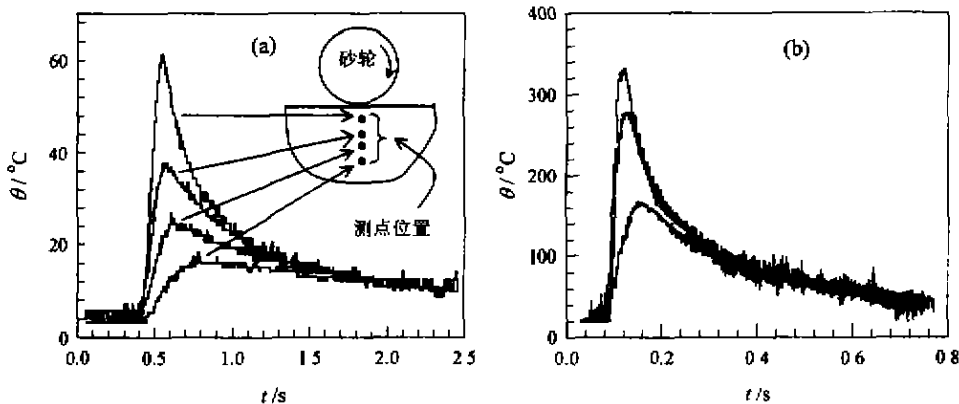


图6 转化后的花岗石和陶瓷磨削温度曲线

(a) 磨削花岗石 (b) 磨削陶瓷

Fig. 6 Converted temperature curves for granite and ceramics

(a) grinding of granite (b) grinding of ceramics

式(4)中  $q$  代表工具—工件接触区所产生的总的平均热流密度,可根据测量所得功率消耗  $P$  得到

$$q = \frac{P}{bl_c}, \quad (5)$$

式(4)中  $R$  为能量传入工件的比例; $k$  和  $a$  分别为工件的热导率和热扩散系数; $v_w$  为工件速度; $b$  为砂轮宽度; $l_c$  为接触区长度; $K_0$  为第二类修正贝塞尔函数; $L$  为无量纲 Peclet 数; $X$  为距热源中心的无量纲距离; $Z$  为距工件表面的无量纲距离.其定义如下

$$X = \frac{v_w t}{2a}, \quad Z = \frac{v_w z}{2a}, \quad L = \frac{v_w l_c}{4a}, \quad (6)$$

根据式(4)~式(6)就可以得到不同  $R$  下距工件表面不同位置处的弧区温度变化的理论计算曲线.为了比较实验与理论计算的结果,将实测温度曲线的时间轴  $t$  变换为无量纲距离  $x/l_c (=2v_w t/l_c)$ ,它表明了该点在弧区中的位置,其中  $2l = l_c = (d\alpha_p)^{0.5}$ .图7给出了温度廓形的拟合结果.图7

(a)、(b)分别为能量传入工件的比例  $R$  为 31%(对花岗石)和 55%(对陶瓷)时的拟和曲线,可以看出,实测温度曲线与理论曲线吻合良好.从而证明了实验所测温度曲线的正确性.

## 2.2 峰值拟合

为了充分利用每一次磨削过程的数据,用理论计算结果对实验测量的离表面不同位置处的温度最高值进行了拟合.图8中只给出了磨削花岗石的结果.拟合时所用  $R$  和图7(a)中完全相同.由图8可见,除了离表面较近几点处的测量数据由于受所钻盲孔的影响偏高外,温度的实测结果与理论结果吻合均较好.对陶瓷的拟合结果也完全类似.因此,如果要获得工件表面温度,根据拟合得到的  $R$  值,再通过理论计算即可得到.

## 3 结论

(1) 双色红外系统,可以直接得出实际操作条件

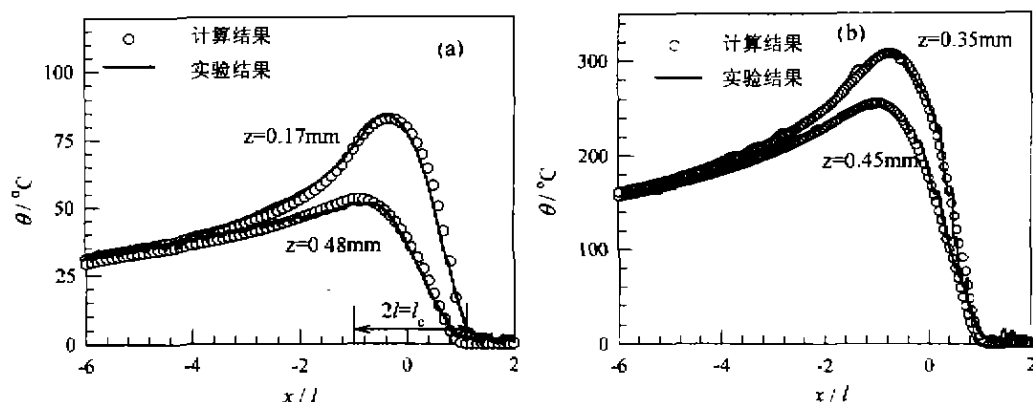


图7 温度廓形拟合结果  
(a) 磨削花岗石 (b) 磨削陶瓷

Fig. 7 Comparison of experimental results with analytical results  
(a) grinding of granite (b) grinding of ceramics

下所对应的被测物体的发射率. 本文使用每一个磨削行程中信号输出最大点的 MCT 和 InSb 的比值求解发射率, 然后根据该发射率, 将 MCT 和 InSb 的输出曲线转化为温度曲线, 并将二者的结果进行平均, 以减少随机测量误差.

(2) 理论与实验曲线的拟合结果表明, 三角形热源模型与实验曲线吻合较好. 同时也证明了实验结果的正确性.

(3) 离表面较近几点处的温度数据由于受所钻盲孔的影响偏高, 如果要获得工件表面温度, 应该根据拟合得到  $R$  值, 再通过理论计算求解.

(4) 实验所得到的两种不同材料磨削条件下的  $R$  值对分析花岗石与陶瓷材料磨削过程中的工具与工件界面传热机制具有重要作用.

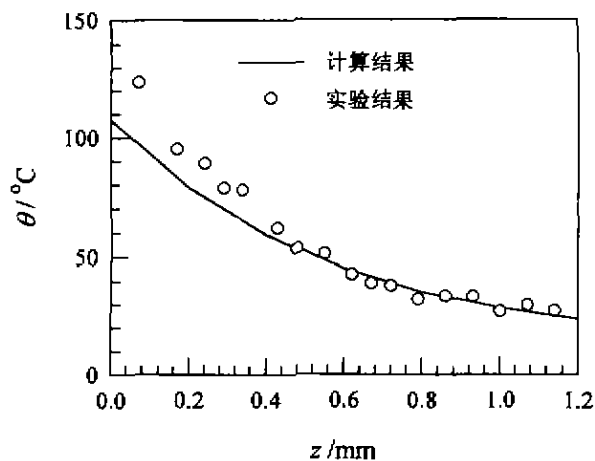


图8 磨削花岗石时沿工件层深峰值温度变化  
Fig. 8 Maximum temperatures versus depth below surface in grinding of granite

## REFERENCES

- [1] Chandrasekar S, Farris T N, Bhushan B. Grinding temperatures for magnetic ceramics and steel. *ASME Journal of Tribology*, 1990, **112**(3): 535—540
- [2] Zhu B, Guo C, Sunderland J E, *et al.* Energy partition to the workpiece for grinding of ceramics. *Annals of CIRP*, 1995, **44**(1): 267—270
- [3] Xu X P, Malkin S. Comparison of methods to measure grinding temperatures. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2001, **123**(2): 191—195
- [4] Kohli S, Guo C, Malkin S. Energy partition to the workpiece for grinding with aluminum and CBN abrasive wheels. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1995, **117**(2): 160—168
- [5] Nee A Y C, Tay A O. On the measurement of surface grinding temperature. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1981, **21**: 279—291
- [6] Hwang T W, Malkin S. Grinding mechanisms and energy balance for ceramics. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1999, **121**(4): 623—631
- [7] Xu X P. Prevailing mechanism in circular sawing of granite with diamond segmented blade. *Materials and Manufacturing Process*, 2000, **15**(1): 123—138
- [8] Hebbbar R, Chandrasekar S, Farris T N. Ceramic grinding temperatures. *Journal of the American Ceramic Society*, 1992, **75**: 2742—2748
- [9] Ueda T, Yamada K, Sugita T. Measurement of grinding temperature of ceramics using infrared radiation pyrometer with optical fiber. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1992, **114**: 317—322
- [10] Jaeger J C. Moving sources of heat and temperature at sliding contacts. *Proc. Roy. Soc., New South Wales*, 1942, **76**: 203—224