

# 石英玻璃微尺度磨削温度仿真与实验研究

温雪龙, 巩亚东, 巴德纯  
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 1100819)

**摘 要:** 建立了微磨削过程的传热模型, 针对石英玻璃材料进行有限元仿真分析, 探讨了微磨削过程中磨削热的分布情况, 分析磨削用量对磨削温度的影响规律. 利用粒度 500<sup>#</sup> 的微磨具对石英玻璃进行单因素磨削温度测量实验. 仿真与实验结果表明: 磨削区表面最高温度随切削深度的增大而升高, 随磨削速度的加快而升高, 实测最高磨削区温度仅为 94.2 ℃, 并没有出现磨削烧伤现象.

**关 键 词:** 微磨削; 石英玻璃; 磨削温度; 有限元仿真

中图分类号: TG 580.6      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2017)02-0249-05

## Simulation and Experimental Research on Grinding Temperature of Micro-grinding Quartz Glass

WEN Xue-long, GONG Ya-dong, BA De-chun  
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: WEN Xue-long, E-mail: wenxl@me.neu.edu.cn)

**Abstract:** To investigate the effect of different grinding conditions on micro-grinding temperature, the heat transfer model in micro-grinding process was established and the finite element simulation analysis was conducted to study the temperature distribution in micro-grinding quartz glass. The single factor experiments with quartz glass were conducted by micro-grinding tools with size 500<sup>#</sup>. The influence of different grinding factors on micro-grinding temperature was analyzed. The simulation and experimental results show that the highest surface temperature of the grinding zone increases with the increase of cutting depth and grinding speed, and the measured highest temperature in the grinding zone is 94.2 ℃ without grinding burning.

**Key words:** micro-grinding; quartz glass; grinding temperature; finite element simulation

在传统磨削加工中, 有不到 10% 的磨削热量是被切屑带走, 而 60% ~ 95% 的磨削热量传入了被加工零件<sup>[1]</sup>. 传入零件或试件的热量直接导致磨削区的温度骤然升高, 进而引起其表面产生热损伤, 甚至会出现磨削裂纹和磨削烧伤<sup>[2-3]</sup>. 磨削热会导致零件的抗疲劳性能下降, 抗磨损性能降低, 会严重影响零件及砂轮的使用寿命. 因此, 研究磨削区的温度分布状况, 探讨被磨零件表面完整性具有重要意义.

专家学者针对传统磨削过程中磨削热方面的研究已经取得很多重要成果. Heinzel 等<sup>[4]</sup> 研究了磨削加工过程中的砂轮与试件接触时间及磨削功

率对磨削淬硬结果的影响规律, 依据接触区最大温升与接触时间的对应关系, 提出了一种预测磨削试件表面热效应的方法. Fritsche 等<sup>[5]</sup> 在磨削钛合金实验中, 利用内部冷却方法可以有效减小磨削热并获得没有磨削裂纹的较好的表面质量, 并且通过瞬时温度有限元仿真研究, 得到不同时刻热电偶测量区域的温度变化分布规律. Drazumeric 等<sup>[6]</sup> 基于 Jager 的移动热源理论, 通过磨削试件产生不同的比磨削能分析在非圆磨削中的几何学和运动学特性, 进而建立了一种适用于非圆曲线磨削过程的传热模型. García 等<sup>[7]</sup> 对 4140 钢材料进行磨削加工, 研究发现, 当切屑厚



于磨粒与试件接触区温度分布是分析重点,故此区域的网格划分要进行细化,并且试件的网格密度大于磨粒的网格密度.

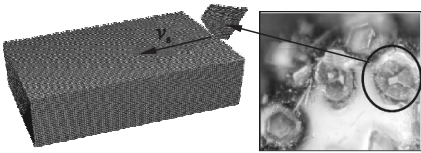


图 2 单磨粒有限元模型  
Fig. 2 Finite element model of single grain

表 1 材料性质  
Table 1 Material properties

材料性质	玻璃	金刚石
密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2 200	3 511
比热/( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	670	450
热膨胀系数/( $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	$5.5\times 10^{-7}$	$2.8\times 10^{-6}$
热传导系数/( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	1.4	136.16
泊松比	0.17	0.22
弹性模量/ GPa	72	1 050
熔化温度/ $^{\circ}\text{C}$	1 680	3 550
室温/ $^{\circ}\text{C}$	20	20

2.2 仿真结果与分析

在微磨具切削线速度为 0.94 m/s,选取不同的切削深度 5 ~ 20  $\mu\text{m}$ ,将磨粒与试件的初始温度设置为 20  $^{\circ}\text{C}$ ,其他条件保持不变.不同磨削深度下被加工试件表面温度的分布情况如图 3 所示.

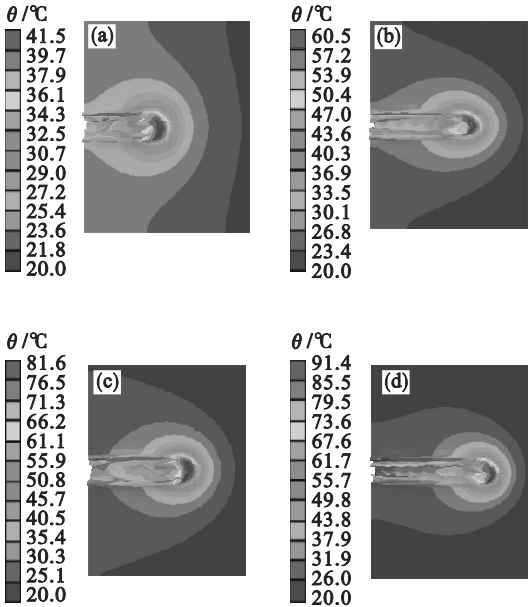


图 3 不同磨削深度下试件温度分布图  
Fig. 3 Temperature profile of the workpiece with different cutting depths  
(a)— $a_p=5\ \mu\text{m}$ ; (b)— $a_p=10\ \mu\text{m}$ ;  
(c)— $a_p=15\ \mu\text{m}$ ; (d)— $a_p=20\ \mu\text{m}$ .

由图 3 中温度的分布情况可以看出,最大温度出现在磨粒与试件间挤压面的接触区域,并且该区域向周围扩散的温度梯度呈递减趋势.此外,磨粒划过的区域所形成沟槽内的温度较高.由图中温度的数值可知,保持其他条件不变的情况下,磨削深度由 5  $\mu\text{m}$  逐渐增加到 20  $\mu\text{m}$  过程中,磨削区的最高温度逐渐变化.当磨削深度是 20  $\mu\text{m}$  时,磨削区的最高温度达到 91.4  $^{\circ}\text{C}$ ,而在磨削深度为 5  $\mu\text{m}$  时,磨削区最高温度只有 41.5  $^{\circ}\text{C}$ .可见,磨削区最高温度随磨削深度的增加而升高.

图 4 所示为不同磨削速度下被加工试件表面温度的分布情况.

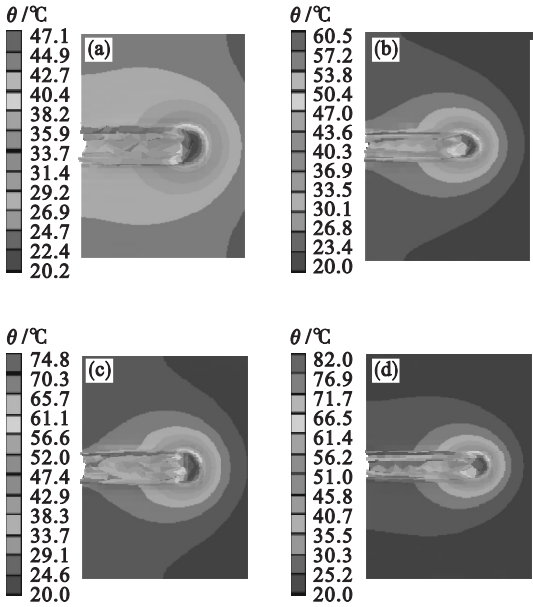


图 4 不同磨削速度下试件温度分布图  
Fig. 4 Temperature profile of the workpiece with different grinding speeds  
(a)— $v_s=0.47\ \text{m/s}$ ; (b)— $v_s=0.94\ \text{m/s}$ ;  
(c)— $v_s=1.88\ \text{m/s}$ ; (d)— $v_s=2.83\ \text{m/s}$ .

可以看出,图 4 中试件磨削区的温度分布云图与梯度的变化规律与图 3 极为类似,最高磨削温度区均出现在磨粒与试件接触区,并沿四周温度递减,这也可以说明不同磨削速度和磨削深度在试件表面产生的温度值有所不同,但温度场分布情况基本相同.由图 4 可知,当磨削速度为 0.47 m/s 时,试件表面磨削区平均最高温度为 47.1  $^{\circ}\text{C}$ ;而当磨削速度增加到 2.83 m/s 时,试件表面磨削区平均最高温度增加为 82.0  $^{\circ}\text{C}$ .可见,磨削区最高温度随磨削速度的增加而升高.

3 石英玻璃微磨削温度实验研究

本实验是在东北大学先进制造研究所的微机

械加工机床上进行逆磨干磨削,实验系统如图 5 所示.

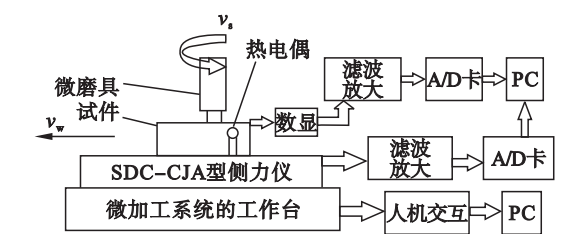


图 5 实验系统图  
Fig. 5 Diagram of testing system

实验用三维微加工机床,其最大主轴转速可以达到  $12 \times 10^4$  r/min. 温度信号采集用阿尔泰 2831 数据采集卡,其采样频率可以达到 250 kHz. 采用热电偶夹式测温法对微磨削温度进行采集,并多次测量取平均值作为测量结果. 采用丝径均为 0.1 mm 的康铜-镍铬组成的热电偶测温. 选用与仿真各参数相同的微磨具和石英玻璃进行测温实验. 考虑硬脆材料磨削的去除机理,本文选取较低的试件移动速度,具体实验参数与结果如表 2 所示.

表 2 测温实验参数与数据结果				
Table 2	Experimental parameters and measured results			
实验序号	$a_p/\mu\text{m}$	$v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_w/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$\theta_{\text{玻璃}}/^\circ\text{C}$
1	5	0.94	0.1	38.3
2	8	0.94	0.1	42.5
3	10	0.94	0.1	54.3
4	15	0.94	0.1	77.6
5	20	0.94	0.1	94.2
6	10	0.47	0.2	52.6
7	10	0.94	0.2	58.3
8	10	1.88	0.2	68.2
9	10	2.83	0.2	77.4
10	10	3.77	0.2	84.5

3.1 磨削深度对试件表面磨削温度的影响

在室温 20 ℃,磨削速度为 0.94 m/s,试件移动速度 0.1 mm/s 的磨削条件下,不同磨削深度下采集的磨削区最高温度如图 6 所示.

图 6 为试件表面磨削区最高温度的仿真与实验数据曲线. 当磨削深度为 20  $\mu\text{m}$  时,测量表面最高温度值最大为 94.2 ℃,仿真值为 91.4 ℃. 随着磨削深度的增加,仿真温度值与测量值都呈现出明显增大的趋势,并且增幅较均匀,近似于线性增长. 这是由于磨削深度逐渐增大,微磨削中的微磨具与试件之间的摩擦力以及切削变形力都随之

增大,这就导致微磨具承受的负荷增大,同时,增加了去除单位体积材料所需的能耗,从而更多的磨削热量在磨削区产生,造成试件表面的磨削区温度升高.

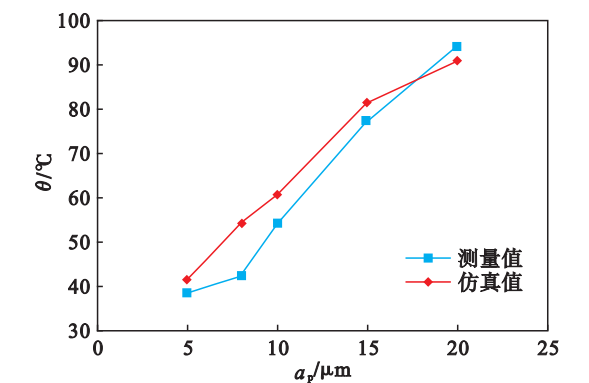


图 6 磨削温度随磨削深度变化曲线  
Fig. 6 Curves of temperature with grinding depth

3.2 磨削速度对试件表面磨削温度的影响

在室温 20 ℃,试件移动速度为 0.2 mm/s,磨削深度为 10  $\mu\text{m}$  的磨削条件下,不同磨削速度情况下采集的磨削区最高温度的分布曲线如图 7 所示.

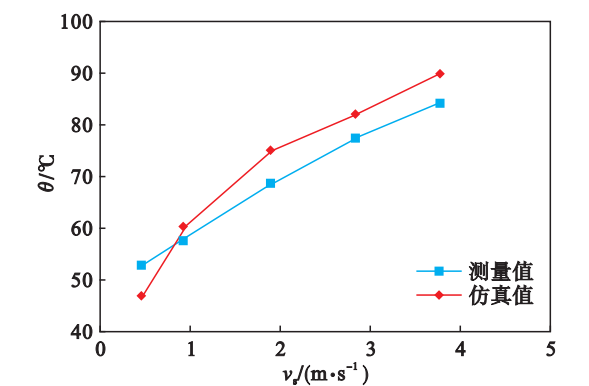


图 7 磨削温度随磨削速度变化曲线  
Fig. 7 Curves of temperature with grinding speed

由图 7 可以看出,磨削区最高温度的测量值与仿真值均是随着磨削速度的增加而增大,当磨削速度为 3.77 m/s 时,测量表面最高温度值最大为 84.5 ℃,仿真值为 90.0 ℃. 微磨削实验中,磨削速度增加,试件表面磨削区的最高温度随之增大. 这是因为磨削速度逐渐增大时,在单位时间内参与磨削加工的有效磨粒数逐渐增多,产生的磨屑被分割得更细,与此同时,造成耕犁及滑擦作用的有效磨粒数增加,这就导致磨粒与试件表面的摩擦加剧,并产生大量的磨削热,从而使磨削区的温度升高.

实验过程中并没有发现明显的磨削烧伤现象,这与微磨削力较小、磨削温度较低有直接关



系,也为进一步研究其磨削烧伤边界条件提供了重要的研究基础.

### 3.3 仿真与实验结果对比

图 8 为在磨削速度 0.94 m/s,工件移动速度 0.1 mm/s 条件下,试件表面磨削区最高温度的理论计算值、实际测量值及仿真值的对比图.可以看出其变化趋势是一致的,均随磨削深度的增大而增加,这也说明了有限元仿真的准确性.

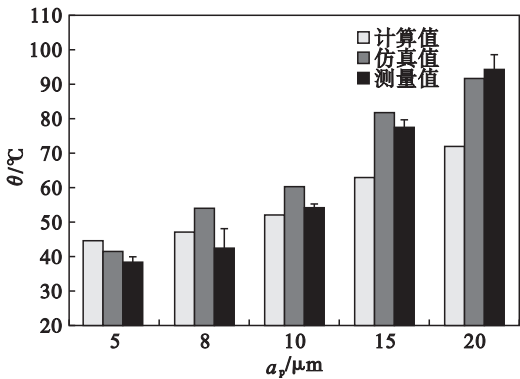


图 8 实验与仿真结果对比

Fig. 8 Comparison of the experimental and simulation results

然而仿真值与实验结果之间还存在差异,这是因为仿真过程中对部分情况进行了理想假设,建立的模型也作了相应简化.另外,环境温度的变化、机床的振动、刀具的磨损,以及微磨削耕犁过程消耗部分能量等因素都会对实验结果造成影响.

## 4 结 论

- 1) 基于移动热源模型与传热学理论,建立了微尺度磨削的传热理论模型.
- 2) 通过微磨削石英玻璃实验与仿真研究得到结论:磨削深度增大,磨削速度增大,试件加工表面磨削区的最高温度均随之升高.
- 3) 石英玻璃材料在微磨削过程中的磨削力较小,试件加工表面磨削区的温度不高,并没有出现磨削烧伤现象,有利于得到高质量的加工表面.
- 4) 实验结果较好地验证了仿真与理论模型的准确性,为进一步探讨微尺度磨削烧伤的边界条件提供了重要基础.

### 参考文献:

[1] 王霖,秦勇,刘镇昌,等.磨削温度场的研究现状与发展趋势[J].工具技术,2002,36(6):7-10.  
(Wang Lin, Qin Yong, Liu Zhen-chang, et al. Current state and developing trend of research on grinding temperature field[J]. *Tool Engineering*, 2002, 36 (6): 7-10. )

[2] Zhu B, Guo C, Sunderland J E, et al. Energy partition to the workpiece for grinding of ceramics [J]. *Annals of CIRP*, 1995, 44(1): 267-270.

[3] 任敬心,康仁科,王西彬.难加工材料磨削技术[M].北京:电子工业出版社,2011.  
(Ren Jing-xin, Kang Ren-ke, Wang Xi-bin. Grinding technology for difficult-to-machine materials [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. )

[4] Heinzel C, Sölter J, Jermolajev S, et al. A versatile method to determine thermal limits in grinding [J]. *Procedia CIRP*, 2014, 13: 131-136.

[5] Fritsche A, Bleicher F. Analysis of the thermal impact on gamma titanium aluminide by grinding with internal coolant supply based on experimental investigation and transient thermal simulation [J]. *Procedia CIRP*, 2015, 31: 154-159.

[6] Drazumeric R, Badger J, Krajnik P. Geometric, kinematical and thermal analyses of non-round cylindrical grinding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(4): 818-827.

[7] García E, Méresse D, Pombo I, et al. Identification of heat partition in grinding related to process parameters using the inverse heat flux conduction model [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 66(1/2): 122-130.

[8] Park H W, Liang S Y. Force modeling of microscale grinding process incorporating thermal effects [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 44(5): 476-486.

[9] 温雪龙, 巩亚东, 程军, 等. 铝合金 Al 6061 微尺度磨削力热特性试验分析 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(23): 165-174.  
(Wen Xue-long, Gong Ya-dong, Cheng Jun, et al. Experimental research on force and temperature characteristics in micro-grinding Al 6061 [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(23): 165-174. )

[10] Jaeger J C. Moving sources of heat and the temperature at sliding contracts [J]. *Journal and Proceedings of the Royal Society of New South Wales*, 1942, 76: 204-224.

[11] Perveen A, Jahan M P, Rahman M, et al. A study on micro-grinding of brittle and difficult-to-cut glasses using on-machine fabricated poly crystalline diamond (PCD) tool [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(3): 580-593.

[12] Hahn R S. On the nature of the grinding process [C]// Proceeding of the 3rd International MTDR Conference. Oxford: Pergamon, 1962: 129-154.

[13] Malkin S, Cook N H. The wear of grinding wheels fracture wear [J]. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1971, 11: 1129-1133.