

超声振动辅助缓进给磨削温度场仿真与试验分析

李厦, 王锴霖

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 通过对比研究磨削过程中超声振动辅助缓进给磨削工件表面的温度变化, 验证超声振动对磨削热的影响, 为进一步研究磨削机理提供依据。**方法** 基于磨削温度场解析模型, 建立了磨削热源平均强度。运用 ANSYS 软件热分析模块分别对普通缓进给磨削和超声辅助缓进给磨削进行了工件表面温度场仿真, 得到了不同载荷步的温度场分布以及工件表面的温度时间变化曲线, 较准确地反映了磨削工件时工件表面的温度变化。**结果** 试验和模拟表明, 缓进给磨削工件时, 工件表面温度较高, 对工件施加超声振动后, 能够有效降低磨削力, 减少磨削过程中产生的热量, 降低工件表面温度 20% 左右。**结论** 超声振动辅助磨削工件时, 由于工件高频振动导致磨粒与工件间断性接触, 使磨削过程变为有规律的脉冲状断续磨削, 有利于工件散热, 降低了磨削温度, 为避免缓进给磨削时容易出现的磨削烧伤现象提供了技术支持。

关键词: 超声振动; 缓进给磨削; 温度场; 热源模型; 热源强度; 有限元仿真

中图分类号: TG580.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)07-0265-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.07.040

Simulation and Experimental Analysis of Ultrasonic Vibration Assisted Creep Feed Grinding Temperature Field

LI Sha, WANG Kai-lin

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to verify the effects of ultrasonic vibration on grinding heat and provide basis for further studying grinding mechanism by comparatively studying temperature change of grinding workpiece surface due to ultrasonic vibration assisted creep feed in grinding process. Based on analytical model of grinding temperature field, average strength of grinding heat source was established. Surface temperature field of workpiece was simulated for common creep feed grinding and ultrasonic assisted creep feed grinding, respectively by using ANSYS thermal analysis module. Temperature field distribution and temperature-time curve of workpiece surface were obtained in different load step, which accurately reflected temperature change of workpiece surface. The experiments and simulation showed that the workpiece surface temperature of creep feed grinding was higher during creep feed of grinding workpiece. Ultrasonic vibration could effectively reduce grinding force, reduce heat generated during grinding, and reduce the surface temperature of workpiece by about 20%. In case of ultrasonic vibration-assisted grinding workpiece, abrasive grain contacts workpiece discontinuously due to high-frequency vibration of workpiece, hence the grinding process becomes orderly pulsed intermittent grinding, which facilitates workpiece radiation, reduces grinding temperature, and provides technical support for avoiding grinding burn phenomenon which may easily occur during creep feed grinding.

收稿日期: 2018-01-08; 修订日期: 2018-05-21

Received: 2018-01-08; Revised: 2018-05-21

作者简介: 李厦 (1969—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为精密磨削。

Biography: LI Sha (1969—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: precision grinding.

KEY WORDS: ultrasonic vibration; creep feed grinding; temperature field; heat source model; heat source strength; finite element simulation

超声振动辅助磨削是一种超声振动加工辅助普通磨削材料去除的复合加工工艺,其原理是将超声波发生器发射出的电信号通过换能器转变为机械振动并将振幅放大,使磨粒以极高的速度和加速度对工件进行冲击,进而实现材料的去除加工。超声振动能够有效降低磨削过程中的磨削力和磨削区温度,减小加工后的工件表面粗糙度值。近年来,国内外很多学者对超声振动辅助磨削工艺进行了理论和试验研究,取得了比较显著的成绩^[1-4]。

磨削加工过程中会产生大量热,导致工件磨削区的温度显著升高。磨削区的热作用对加工精度、表面质量、加工效率和砂轮磨削性能等都有很大的影响。因此,研究工件磨削区表面温度及其分布具有重要意义。研究磨削温度场分布的关键是要准确地确定磨削加工过程中流入工件的热流密度变化规律,国内外许多学者已经对磨削温度的预测进行了研究,其中大多数研究都以 Jaeger 热源模型为基础,即假定工件半无限大,热源强度为常数的热源在其表面上以工作台速度移动,通过该热源在某一时刻造成的温升积分,获得工件表面温度^[5]。该移动热源理论建立了工件表面最大温升、磨削接触弧长以及进入工件的热流密度之间的关系。早期的磨削温度都采用理论公式计算,过程复杂,计算量大。近年来随着计算机的发展,通过数值仿真技术对磨削温度场进行模拟已成为主要研究方法^[6]。Mahdi 等^[7-8]以二维热模型为基础对磨削温度场进行了仿真,得出了磨削区温度场分布主要跟热源强度分布有关的结论。Jin 等^[9]用三维热模型研究了缓进给磨削时的传热问题。Li^[10]考虑到工件表面对流冷却,分别采用二维和三维热模型对磨削过程中的瞬态传热过程进行了仿真。

缓进给磨削的特点是大切深、缓进给^[11],由于磨削量较大,工件表面易产生烧伤现象。本文在缓进给磨削工件的基础上对工件施加超声振动,基于有限元数值计算,根据热源模型对磨削工况进行仿真研究,分析了超声振动辅助缓进给磨削模型对接触区磨削温度分布的影响规律,并进行试验验证。

1 磨削温度场解析模型

磨削是大量磨粒进行随机切削的过程,磨削过程中大量随机分布的点热源可看作为一个连续的面热源,且面热源大小为砂轮与工件的接触区域,如图1所示,图中 v_s 为砂轮速度, v_w 为工件速度, a_p 为磨削深度。

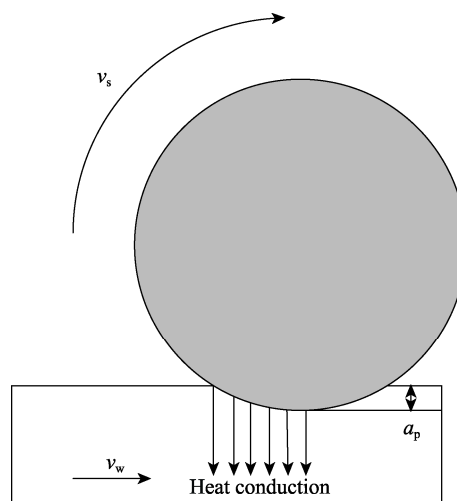


图1 磨削热示意图

Fig.1 Schematic diagram of grinding heat

对于切入磨的磨削区域,总发热功率 q_t 可近似看作切向磨削力和砂轮线速度的乘积:

$$q_t = F_t v_s \quad (1)$$

但发热能并非全部传导入工件,部分能量会通过磨屑、切削液带走,还有一部分传导到砂轮,因此准确计算磨削区的温度磨削能量分配比十分复杂。尤其考虑到磨屑和切削液的散热问题,能量分配很难精确量化。Guo 在不考虑磨屑、切削液以及磨削量对磨削热量分配的影响下,建立了磨削热量分配比模型^[12]:

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + 1.06 A_2 \left[\frac{(k_g \rho_g c_g)_g}{(k_w \rho_w c_w)_w} \right]^{0.5} \left[\frac{r_0 \pi \alpha_g l_c C_a}{2 A_2 v_w} \right]^{0.5}} \quad (2)$$

式中: r_0 为砂轮磨粒有效接触半径; A_2 为砂轮表面磨损面积占总面积比; k_g 为磨粒材料热导率; c_g 为磨粒材料比热容; ρ_g 为磨粒材料密度; $(k_g \rho_g c_g)_g$ 为磨粒材料热接触系数; k_w 为工件材料热导率; c_w 为工件材料比热容; ρ_w 为工件材料密度; $(k_w \rho_w c_w)_w$ 为工件材料热接触系数; α_g 为磨粒热扩散系数; C_a 为单位接触面有效磨粒数。接触弧长近似取几何接触弧长 l_c (式(3)),假设磨削宽度为 b_w ,则磨削区面积(即热源面积 A_s)见式(4),从而计算出均布面热源的热源强度 q_m :

$$l_c = \sqrt{d_s a_p} \quad (3)$$

$$A_s = b_w l_c = b_w \sqrt{d_s a_p} \quad (4)$$

$$q_m = \frac{\varepsilon F_t v_s}{b_w \sqrt{d_s a_p}} \quad (5)$$

假设有一点热源位于坐标原点,初始温度场内温度均为零,在 $t_0^h = 0$ 时刻突然发出热量 Q ,随后停止

发热,则根据热传导可计算得出某一点在 t_1^h 时刻的温升 $T_{in}^{[13]}$:

$$T_{in}(R_1,t_1^h)=\frac{Q}{c_w\rho_w(4\pi\alpha t_1^h)^{3/2}}e^{-\frac{R^2}{4\alpha_w t_1^h}}\tag{6}$$

式中： R_1 为导热体内该点距离坐标原点的距离；
 α_w 为工件扩散率， $\alpha_w=\frac{k_w}{c_w\rho_w}$ 。

在点热源温度场计算的基础上，通过对热源模型的积分，可以求出在任意时刻磨削工件上某一位置的温度。由于热源刚进入工件时磨削区温度分布不能达到稳态，为了方便计算，假设热源移动到 O 点时磨削区温度达到稳定状态，热源形状为均布热源，热源长度为接触弧长 l_c ，如图 2 所示。

$$T(x,z)=\frac{q_m}{\pi k_w}\int_0^l\exp\left[-\frac{(x-x_i)v_w}{2\alpha}\right]K_0\left[\frac{v_w}{2\alpha}\sqrt{(x-x_i)^2+z^2}\right]s(x_i)dx\tag{7}$$

式中： α 为工件材料的热扩散系数； k_w 为工件材料的导热系数； $K_0(u)$ 为零阶二类修正贝塞尔函数，其值由式（8）计算。

$$K_0(u)=\frac{1}{2}\int_0^\infty\frac{1}{\omega}\cdot e^{-\omega-\frac{u^2}{4\omega}}\cdot d\omega\tag{8}$$

对式（7）进行数值计算，得出均匀分布热源模型磨削接触区温度场计算公式：

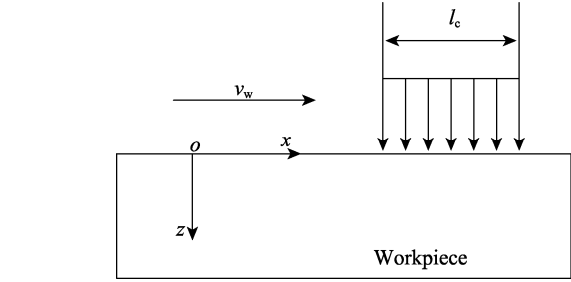


图 2 均布移动热源示意图
Fig.2 Schematic diagram of uniformly distributed moving heat source

假设工件以 O 为坐标原点，任取面热源中一条带状热源，宽度为 dx_i ，工件在 XOZ 平面上任意一点 M 的坐标为 $(x,0,z)$ ，则整个面热源引起 M 点的温度变化计算公式为：

$$T(x,z)=\frac{2q_m\alpha}{\pi k_w v_w}\int_{X-L}^{X+L}\left(\frac{X+L-u}{L}\right)e^{-u}K_0(z^2+u^2)^{1/2}du\tag{9}$$

$$\text{其中 } X、Z \text{ 和 } L \text{ 的表达式为： } X=\frac{v_w\cdot x}{2\alpha}, Z=\frac{v_w\cdot z}{2\alpha},$$
$$L=\frac{v_w\cdot l}{2\alpha}。$$

根据磨削区温度场计算公式得到磨削温度的理论计算值见表 1。

表 1 理论计算结果
Tab.1 Theoretical calculation results

砂轮速度 $v_s/(m\cdot s^{-1})$	工件速度 $v_w/(mm\cdot min^{-1})$	磨削深度 $a_p/\mu m$	超声磨削温度/ $^{\circ}C$	普通磨削温度/ $^{\circ}C$	两者差值/%
25	300	1000	134.58	160.63	19.35
	400	800	140.25	166.04	18.39
	500	600	149.65	175.28	17.12

2 磨削温度场有限元仿真

本文采用 ANSYS 有限元分析软件对磨削工况进行仿真，通过参数化设计语言（APDL）实现热源的移动及加载，得到超声辅助缓进给磨削条件下和普通缓进给磨削条件下工件表面温度场的分布状况。

2.1 建立有限元模型

构建有限元模型时，通常有实体建模和导入模型两种方法^[14]。本次仿真采取直接在 ANSYS 中建立实体模型。实体单元选用二次六面体八节点单元。考虑到磨削接触区砂轮与工件的瞬间接触会导致表层温度梯度较大，故划分网格时将工件表面网格细化，工件底部采用较稀疏的网格。划分网格后的有限元模型如图 3 所示，该模型单元总数为 32 000。

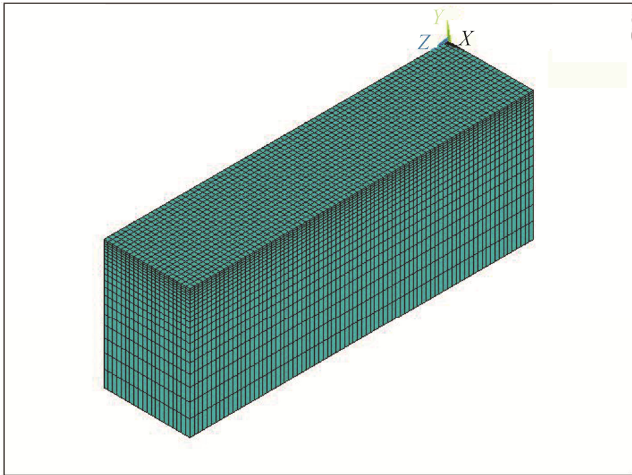


图 3 划分网格后的实体模型
Fig.3 Entity model after grid partition

2.2 载荷及边界条件设置

把工件作为半无限大导热体, 热源平均强度见式(5), 其中砂轮直径为 $\phi 220$ mm, 砂轮转速 $v_s=25$ m/s, 工件速度 $v_w=5$ mm/s, 磨削深度 $a_p=1000$ μm , 采用切入式磨削。超声波振动磨削中, 由于超声振动的存在, 接触区砂轮与工件的相对运动关系发生改变, 导致单颗磨粒切入时的运动轨迹加长, 切入角也产生较大的改变, 相同磨削参数下的平均磨削力大大减少^[15]。在实验中测得普通缓进给平均磨削力为 142 N, 超声振动缓进给平均磨削力为 113 N, 相对于普通磨削, 超声磨削力降低了 20.4%, 与预测结果相符。联立式(3)、(4)、(5)可得普通磨削热源强度 $q_{m_1} = \varepsilon q_{t_1} / A_s = 6\,776\,803$ J/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$), 超声磨削热源强度 $q_{m_2} = \varepsilon q_{t_2} / A_s = 5\,714\,767$ J/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$), 其中 ε 为传入工件的热量百分比。普通磨削中, 大部分热量传入工件, 只有一小部分热量被切屑带走。而缓进给磨削中, 被切屑带走的热量能够达到 80%, 由于被切屑带走的热量较多, 而且热流向工件深层扩展, 因而使工件表面的实际温度以较大的斜率下降。因此本文 ε 取 30%, 边界条件见表 2。本文为常温下的瞬态热分析, 即设定初始温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。采用均布热源模型, 经过 40 次迭代和逐步加载, 得到磨削区温度的分布图。

表 2 边界条件
Tab.2 Boundary condition

Boundary condition	Common grinding	Ultrasonic grinding
Grinding force/N	142	113
Total heating power/($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$)	3550	2825
Contact arc length/mm	14.83	14.83
Heat source strength/($\times 10^{-6} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	6.7768	5.7147

3 仿真结果与分析

采用 ANSYS 参数化语言对有限元模型加载移动热源, 通过 ANSYS 的通用后处理程序, 可以得到磨削过程中的温度场分布。砂轮与工件接触区的温度最高, 随着热源的移动, 工件表面温度逐渐向深层扩展。

图 4 与图 5 分别是普通缓进给磨削与超声缓进给磨削第 20 载荷步的温度分布情况和最高温度, 可以看出, 越靠近热源, 磨削温度越高。其中普通缓进给磨削的最高温度为 150.66 $^{\circ}\text{C}$, 而超声缓进给磨削的最高温度为 127.04 $^{\circ}\text{C}$ 。超声振动辅助缓进给磨削能够有效降低工件表面温度。

图 6 为缓进给磨削与超声磨削工件时工件表面中心点温度随时间的变化。当砂轮磨削工件表面时, 工件表面温度急剧上升, 随着热流向工件深层扩展, 工件表面的温度又以较大的斜率下降。

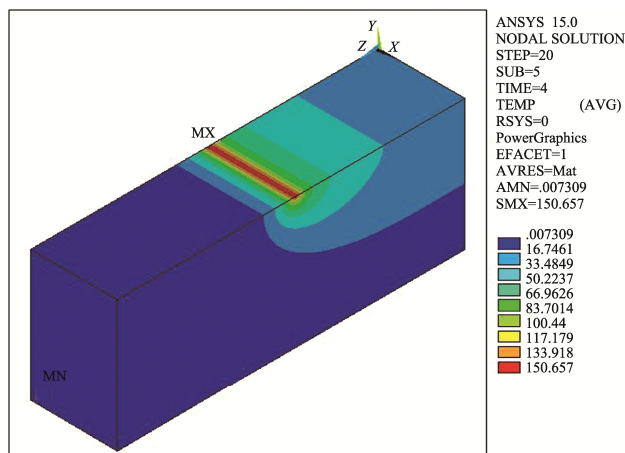


图 4 普通磨削第 20 载荷步温度分布图

Fig.4 Temperature distribution diagram of regular grinding in 20th load step

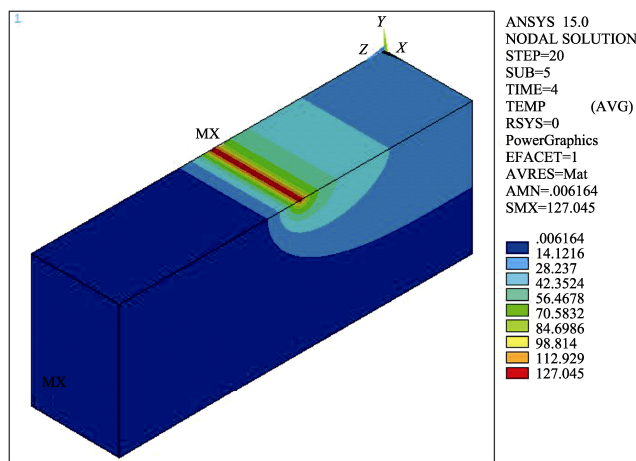


图 5 超声磨削第 20 载荷步温度分布图

Fig.5 Temperature distribution diagram of ultrasonic grinding in 20th load step

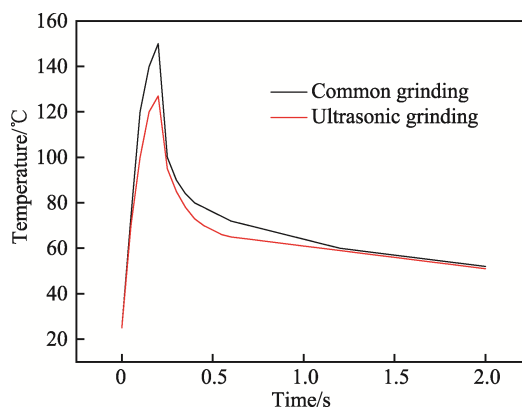


图 6 工件表面中心点温度时间曲线

Fig.6 Temperature-time curve of center point of workpiece surface

4 磨削试验

本次磨削以 45#钢为研究对象, 工件规格为 40 mm \times 10 mm \times 15 mm。选用 WA46H10V 型号砂轮, 砂轮外径为 $\phi 220$ mm, 宽度为 50 mm。磨床采用斯来福临

K-P48T 平面磨床, 超声振动工作台的激振频率为 19.80 kHz, 振幅极值为 15 μm 。磨削力测量采用 Kistler-9257B 型三向测力仪。磨削温度采用热电偶测温法测量, 采用 0.1 mm 的康铜线作为热电偶, 厚度为 0.02 mm 的云母片作为高温绝热层将工件与康铜线隔离, 根据

工件和康铜线遇热产生的电势差, 获得工件表面的磨削温度值。磨削加工参数和测量结果见表 3。通过将仿真结果与表 1 理论值和表 3 测量值进行对比可见, 仿真结果与理论值和测量值都比较接近, 表明本次温度仿真较真实地反映了磨削表面温度变化。

表 3 磨削加工参数与测量结果
Tab.3 Grinding parameters and measurement results

砂轮速度 $v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	工件速度 $v_w/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	磨削深度 $a_p/\mu\text{m}$	超声磨削温度/ $^{\circ}\text{C}$	普通磨削温度/ $^{\circ}\text{C}$	两者差值/%
25	300	1000	132.25	156.34	18.18
25	400	800	141.63	163.05	15.11
25	500	600	149.33	177.25	18.79

5 结论

- 1) 根据磨削热源解析模型得到了普通缓进给磨削与超声缓进给磨削的平均热源强度。
- 2) 运用 ANSYS 有限元对普通缓进给磨削温度场和超声缓进给磨削温度场进行了仿真, 经过对仿真结果进行分析, 超声振动辅助磨削能够减小磨削力, 降低磨削功率, 进而有效降低工件表面温度。
- 3) 通过与试验结果对比分析, 仿真值与试验测量值比较接近, 较准确地反映了磨削工件时工件表面的温度变化, 有助于研究磨削机理, 为以后对磨削过程进行优化提供了技术支持。

参考文献:

[1] 梁志强, 王西彬, 吴勇波, 等. 超声振动辅助磨削技术的现状与新进展[J]. 兵工学报, 2010, 31(11): 1530-1535. LIANG Zhi-qiang, WANG Xi-bin, WU Yong-bo, et al. Status and Progress of Ultrasonic Assisted Grinding Technique[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(11): 1530-1535.

[2] CAO J, WU Y, LU D, et al. Material Removal Behavior in Ultrasonic-assisted Scratching of SiC Ceramics with a Single Diamond Tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 79: 49-61.

[3] PENG Y, LIANG Z, WU Y, et al. Characteristics of Chip Generation by Vertical Elliptic Ultrasonic Vibration-assisted Grinding of Brittle Materials[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(5-8): 563- 568.

[4] NASSAR A, NASSAR E. An Experimental Study of Ultrasonic Vibration-assisted Grinding[J]. Computational Tools for Engineering Applications, 2013, 413(1): 289-291.

[5] JAEGER J C. Moving Sources of Heat and the Temperature of Sliding Contacts[J]. J & Proc. Roy Soc New South Wales, 1942, 76: 203-224.

[6] 毛聪, 周志雄, 周德旺, 等. 平面磨削温度场三维数值仿真的研究[J]. 中国机械工程, 2009(5): 589-595. MAO Cong, ZHOU Zhi-xiong, ZHOU De-wang, et al.

Research on Three Dimensional Finite Element Simulation of the Temperature Field in Surface Grinding[J]. China Mechanical Engineering, 2009(5): 589-595.

[7] MAHDI M, ZHANG L C. The Finite Elementm Thermal Analysis of Grinding Processes by ADINA[J]. Computer & Structures, 1995, 56: 313-320.

[8] LEFEBRVER A, VIEVILLE P, LIPINSKI P, et al. Numerical Analysis of Grinding Temperature Measurement by the Foil/Workpiece Thermocouple Method[J]. Interbational Journal of Machine Tools &Manufacture, 2006, 46: 1716-1726.

[9] JIN T, STEPHENSON D J. Three Dimensional Finite Element Simulation of Transient Heat Transfer in High Efficiency Deep Grinding[J]. Annals of the CIRP, 2004, 53: 259-263.

[10] LI J. Temperature Distribution in Workpiece during Scratching and Grinding[J]. Material Science and Engineering, 2005, 409: 108-119.

[11] 任敬心, 华定安. 磨削原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 277-283. REN Jing-xin, HUA Ding-an. Grinding Principle[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 277-283.

[12] GUO C, MALKIN S. Heat Transfer in Grinding[J]. Journal of Materials Processing and Manufacturing Science, 1992, 1(1):16-27.

[13] 谢桂芝, 黄含, 徐西鹏, 等. 氮化硅陶瓷高效深磨温度的研究[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 109-114. XIE Gui-zhi, HUANG Han, XU Xi-peng, et al. Study on the Temperature in the High Efficiency Deep Grinding of Silicon Nitride[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 109-114.

[14] 王霖. 磨削温度场的有限元分析及计算机仿真[D]. 济南: 山东大学, 2000. WANG Lin. Finite Element Analysis and Computer Simulation of Grinding Temperature Field[D]. Jinan: Shandong University, 2000.

[15] 李伯民, 赵波. 现代磨削技术[J]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 29-33. LI Bo-min, ZHAO Bo. Modern Grinding Technology[J]. Beijing: China Machine Press, 2002: 29-33.