

表面质量控制及检测

ZrO₂ 陶瓷平面磨削温度仿真分析与实验研究

张珂^a, 赵国欢^a, 孙健^a, 韩涛^a, 刘春光^b

(沈阳建筑大学 a.机械工程学院 b.学报编辑部, 沈阳 110168)

摘要: **目的** 研究工程陶瓷磨削参数对磨削温度的影响, 磨削参数包括金刚石砂轮线速度、磨削深度及工件进给速度。**方法** 以金刚石砂轮平面磨削 ZrO₂ 陶瓷为例, 运用 ABAQUS 建立单颗金刚石磨粒磨削 ZrO₂ 陶瓷的有限元模型, 分析磨粒磨削陶瓷过程。同时通过正交实验法设计多组关于金刚石砂轮线速度、磨削深度及工件进给速度的磨削组合参数实验, 利用人工热电偶法对磨削温度进行测量, 将实验结果与仿真结果进行对比分析。**结果** 砂轮线速度由 30 m/s 增加到 50 m/s, 磨削深度由 5 μm 增加到 15 μm, 工件进给速度由 1000 mm/min 增加到 3000 mm/min, 磨削温度和磨削热分配比均增加, 仿真结果与实验结果基本一致。**结论** 磨削过程中磨削深度和工件进给速度对磨削温度的影响较大, 随着金刚石砂轮线速度、磨削深度及工件进给速度的增加, 磨削温度和磨削热分配比均增大。

关键词: ZrO₂ 陶瓷; 磨削温度; 磨削力; 磨削热分配比; ABAQUS

中图分类号: TG580.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)12-0251-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.12.039

Simulated Analysis and Experimental Research on Grinding Temperature of Zirconia Ceramic Plane

ZHANG Ke^a, ZHAO Guo-huan^a, SUN Jian^a, HAN Tao^a, LIU Chun-guang^b

(a. School of Mechanical Engineering, b. Journal Editorial Office, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of engineering ceramic grinding parameters such as diamond wheel linear velocity, grinding depth and workpiece feed speed. Take grinding ZrO₂ ceramic with diamond grinding wheel as an example, a finite element model was established with ABAQUS for grinding ZrO₂ ceramic with single diamond grain to analyze the process of grinding ceramic with grain. Multiple grinding combined parameters experiments in regard to diamond grinding wheel linear velocity, grinding depth and workpiece feed speed were designed in the method of orthogonal experiment. Grinding temperature was measured in the method of artificial thermocouple. The experimental results were compared with simulation results for analysis. As the grinding speed increased from 30 to 50 m/s, the grinding depth increased from 5 to 15 μm and workpiece feed speed increased from 1000 to 5000 mm/min, both grinding temperature and grinding heat distribution ratio increased, and the simulation results were nearly consistent with experimental results. Grinding depth and workpiece feed speed have greater effects on grinding temperature. As the diamond wheel linear velocity, grinding depth and workpiece feed speed increase, both grinding temperature and grinding heat distribution ratio increase.

收稿日期: 2017-06-29; 修订日期: 2017-09-30

Received: 2017-06-29; Revised: 2017-09-30

基金项目: 国家自然科学基金 (51675353); 教育部“创新团队发展计划”(IRT_15R45)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51675353), the Ministry of Education Innovation Team Development Plan (IRT_15R45)

作者简介: 张珂 (1969—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为工程陶瓷精密加工技术、数控机床主轴系统和高空作业机械。

Biography: ZHANG Ke (1969—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision machining engineering ceramics technology, numerical control machine tool spindle system and aerial work machinery.

KEY WORDS: ZrO₂ ceramic; grinding temperature; grinding force; grinding heat distribution ratio; ABAQUS

现代制造业对材料性能提出了更高要求,新型材料的发现、制备与加工成为了探索的重点。高硬度、高强度、高化学稳定性、高耐磨性、高耐热性是对工程陶瓷材料的高度评价,这使其在机械、冶金、化工等领域被广泛应用^[1-3]。然而,工程陶瓷具有的优良化学和物理性能使其加工成为了难题,传统的金属加工方法已难以满足。目前,工程陶瓷材料的加工除特种加工方法外,主要以机械加工方法为主。其中,利用金刚石砂轮进行磨削加工是一种非常有效的方法^[4-6]。

本文采用平面磨削的方法对工程陶瓷进行加工。工程陶瓷的磨削加工中,磨削温度是非常重要的一个因素。磨削过程中的能量几乎完全转化为热能,这使陶瓷工件和金刚石砂轮表面产生高温。金刚石是碳的同素异形体,当温度过高时,金刚石磨粒很容易石墨化,导致金刚石砂轮损耗加剧,加工成本增加。除此之外,高温对陶瓷工件表面加工质量也有严重影响,包括表面残余应力、微裂纹、组织相变、表面损伤等^[7-10]。

人们对温度的研究一直在继续,在不断探索工程陶瓷磨削加工过程中温度场的测量、温度的传递和热量的分配等难题。ROWE^[11]和 JIN^[12]探究了工程陶瓷材料高效深磨过程中磨削温度的变化。BATAKO^[13]等介绍了各种测量温度的方法。利用有限元软件能够进一步对磨削过程进行更深入的研究^[14],本文通过有限元仿真和实验的方法对比分析,研究磨削参数对磨削温度和磨削热分配的影响。

1 磨削热分配比理论研究

磨削温度的研究中,磨削热分配比是一个不容忽视的参数。文献[15]通过进行多次磨削实验,以实验数据为基础,在一系列的假设条件下,建立砂轮磨粒与工件的传热模型,磨削热分配比为:

$$\phi = \frac{1}{1 + 1.064[(k\rho c)_g / (k\rho c)_w]^{0.5} [r\pi a_g l_c C_a / (2Abv_w)]^{0.5}} \quad (1)$$

通过该公式计算得到陶瓷磨削过程的理论磨削热分配比跟陶瓷实验结果相差较大,不符合陶瓷磨削的实际情况。

在实际的磨削过程中,磨削运动对传热过程具有动态影响。文献[16]中,王西彬等将实验测得的砂轮磨粒端面温度与一维热传导模型结合,建立磨削过程磨削热分配比模型。该模型将磨粒定义为一个半径为 B 的圆柱体,应用傅里叶传热定律,分析计算 t 时间内,砂轮磨粒磨削工件所产生的热量以及传入工件的

热量,热分配比为:

$$\phi = 1 - \frac{2j(\theta_a - \theta_0)\sqrt{\pi}B^2}{F_x v_s \sqrt{t}} \quad (2)$$

根据式(2)可知,磨削热分配比与金刚石砂轮磨粒、陶瓷工件的热特性、陶瓷材料的力学性能及实际磨削参数有关。但是该模型是在干磨条件下建立的,而陶瓷磨削加工通常是在湿磨情况下进行,因此无法准确得到实际磨削过程中的磨削热分配比。

文献[17]的研究得到实际磨削过程中陶瓷工件的最高温度可以表示为:

$$T_{\max} = C \frac{q\phi}{(k\rho c)_w^{0.5}} \left(\frac{l_c}{v_w} \right)^{0.5} \quad (3)$$

$$q = F_x \cdot v_s / (l_c \cdot b) \quad (4)$$

式中: C 取 0.21; l_c 为砂轮与工件的接触弧长,根据砂轮直径与磨削深度计算可得; b 为砂轮与工件的接触宽度,即砂轮宽度。本文利用式(4)计算出总热量热流密度 q ,认为实验测得的磨削温度等于工件的最大温度,由式(3)求出热分配率 ϕ ,从而研究磨削用量对陶瓷磨削热分配比的影响。

2 磨削温度的有限元仿真

2.1 单颗金刚石磨粒磨削 ZrO₂ 陶瓷仿真模型建立

基于 ABAQUS 建立有限元仿真模型,分析单颗金刚石磨粒磨削 ZrO₂ 陶瓷时的磨削温度。利用扫描电镜观察金刚石砂轮表面,估算多个磨粒的尺寸,并取平均值作为单颗磨粒仿真模型的尺寸。单颗金刚石磨粒磨削 ZrO₂ 陶瓷的有限元模型如图 1 所示。磨粒

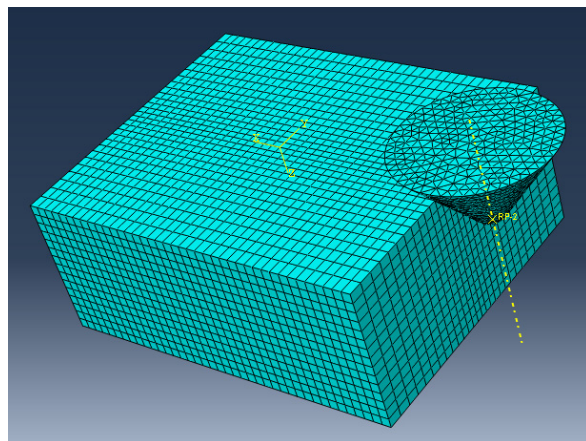


图 1 单颗金刚石磨粒平面磨削模型

Fig.1 Model of plane grinding with single diamond grain

的几何形状是一个高 $60\text{ }\mu\text{m}$ 、尖端圆弧半径 $15\text{ }\mu\text{m}$ 、锥角角度 80° 的锥体。 ZrO_2 陶瓷工件定义为 $200\text{ }\mu\text{m} \times 160\text{ }\mu\text{m} \times 80\text{ }\mu\text{m}$ 的长方体。依据工程陶瓷的组成结构和受力特点,模型采用 Drucker-Prager 屈服准则来模拟陶瓷材料的塑性本构关系。建模时完全依据 ZrO_2 陶瓷和金刚石砂轮的属性来定义材料属性,相互作用包括法相行为、切向行为、热传导与生热,并把单颗金刚石磨粒磨削过程近似等效为三角形移动热源。

用此仿真模型探索平面磨削中金刚石砂轮线速度和磨削深度对磨削温度的影响。将磨粒定义为刚体,网格划分采用 C3D4T: 四结点热耦合四面体单元,线性位移,线性温度,单元尺寸 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。陶瓷工件网格划分采用 C3D8RT: 八结点热耦合六面体单元,三向线性位移,三向线性温度,减缩积分,沙漏控制。实际磨削加工是在室温下进行的,因此仿真模型中设定工件的初始温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。由于 ZrO_2 陶瓷导热系数较低,所以不考虑陶瓷工件与外界环境的热量交换,即仿真模型中对流换热系数设为零。

2.2 仿真结果分析

图 2 是单颗金刚石磨粒磨削 ZrO_2 陶瓷平面的磨削温度仿真过程。由图可知,磨削过程中大部分热量传入金刚石磨粒,只有很少一部分热量传入陶瓷工件。这是因为陶瓷材料的导热系数与金刚石砂轮的导热系数相比较小,所以金刚石磨粒的温度较高。可以发现,工件只有与磨粒接触的部分有温度,其他位置均保持室温,这也是由于 ZrO_2 陶瓷的导热系数较小,磨削过程中产生的能量很难向工件深层传递,导致陶瓷

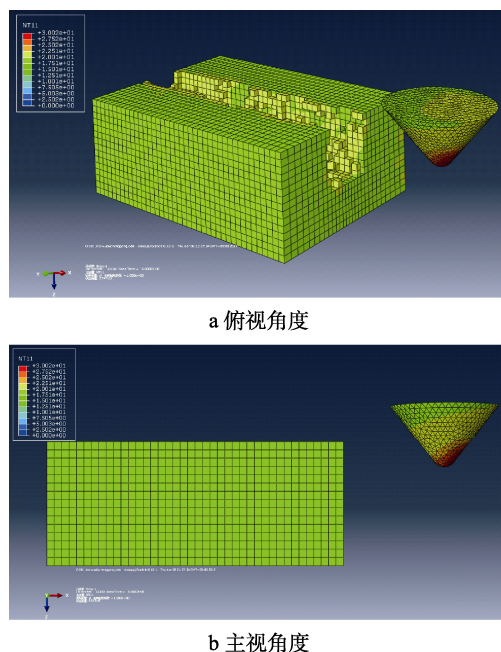


图 2 单颗金刚石磨粒磨削过程温度仿真图

Fig.2 Simulation diagram for grinding process temperature of single diamond grain: a) top view angle, b) front view angle

工件表面产生局部高温,表面层产生很大的温度梯度,造成磨削过程中工件表面易烧伤。磨粒温度分布图显示磨粒前端温度较高,后端温度相对较低。因为在磨削加工过程中,磨粒前端始终起到磨削作用,导致温度升高。

利用 ABAQUS 对磨削温度的历程输出与分析功能模块,可以输出单元和节点的温度,本文中选取节点的温度作为陶瓷工件磨削后的参考温度。选取多个节点,输出温度随时间变化趋势如图 3 所示。选取温度图像中最高点的温度作为磨削温度。按照实验中磨削参数来设定仿真时的磨削参数,将仿真数据进行分析处理,绘制图 4、5 的温度趋势变化图。由图像可知,在仿真模型中,随着磨粒线速度的增加,磨削温度逐渐升高,且增长趋势逐渐变缓;随着磨削深度的增加,磨削温度也逐渐增大,但增长趋势较明显。

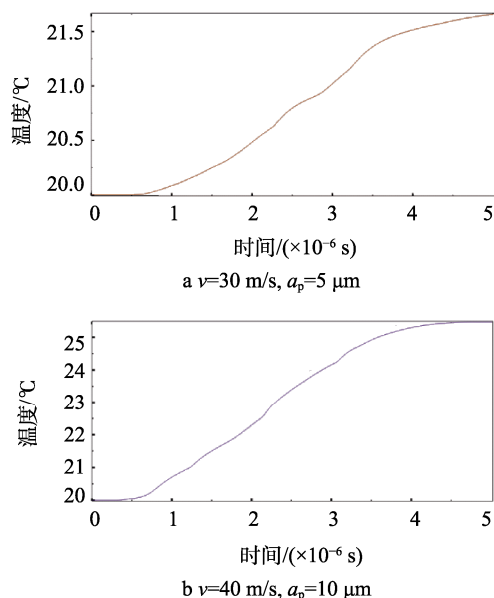


图 3 仿真模型磨削温度随时间的变化趋势

Fig.3 Variation trend chart of simulation model grinding temperature as a function of time

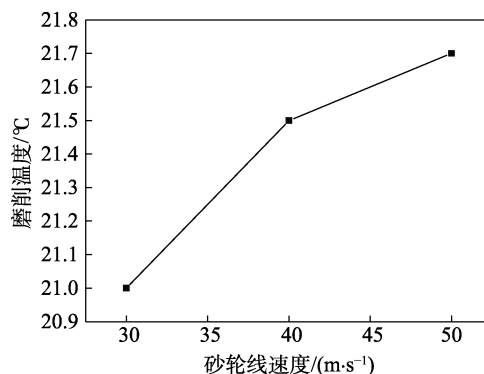


图 4 仿真模型磨削温度随磨粒线速度的变化

Fig.4 Variation of simulation model grinding temperature as a function of grinding grain linear velocity

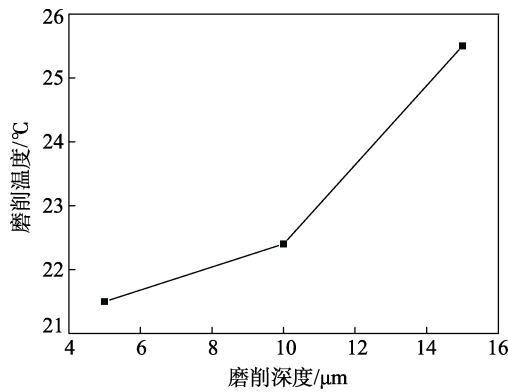


图 5 仿真模型磨削温度随磨削深度的变化
Fig.5 Variation of simulation model grinding temperature as a function of grinding depth

3 实验方案

3.1 实验磨具与工件

本实验采用的工件是 ZrO_2 陶瓷毛坯块，尺寸为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 。所使用的砂轮是树脂结合剂的金刚石砂轮，浓度 100%，砂轮粒度 D91，砂轮外径 300 mm，磨削面宽度 20 mm。 ZrO_2 陶瓷和金刚石砂轮的基本性能对比如表 1 所示。

3.2 实验设备

实验采用 BLOHM Orbit 36 精密平面磨床，如图 6a 所示，详细参数见表 2，磨削力测量采用 Kistler 9257B 三向平面测力仪，如图 6b 所示。

表 1 材料的基本属性

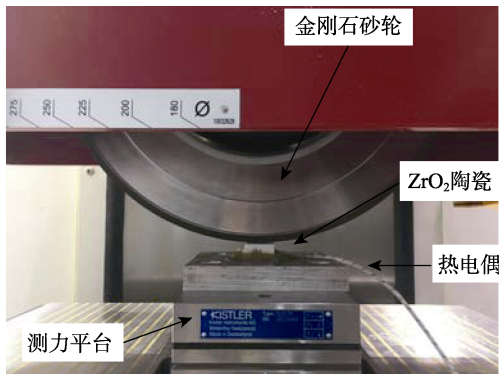
Tab.1 Basic properties of material

材料	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	热膨胀系数/($10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$)	断裂韧性/($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	硬度/($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-2}$)	热传导率/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
ZrO_2	6	210	0.3	10.5	11	1400	2
金刚石	3.515	105	0.2	1.1	—	—	—

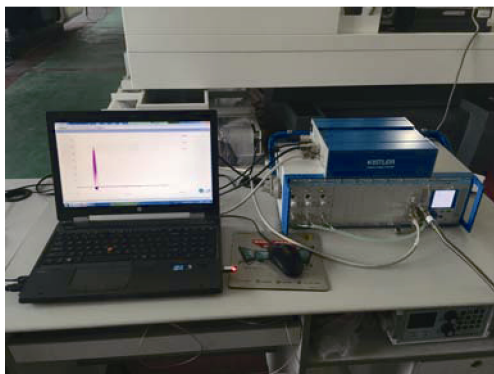
表 2 ORBIT36CNC 平面磨床性能指标

Tab.2 Performance indicators of ORBIT36CNC surface grinding machine

主轴功率/kW	主轴最高转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	最大线速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	工作区域长 \times 宽/mm	最小分辨率/mm
8.5	5000	50	600 \times 300	0.001



a 平面磨床



b 测力系统

图 6 实验设备

Fig.6 Experimental facilities: a) surface grinding machine, b) force measuring system

红外测温技术和热电偶测温技术是现在最常用的测温方法。红外测温法可以实现非接触式的温度测量，

操作起来方便快捷。但仪器设备昂贵，该方法无法测量磨削区域的温度，只能测量磨削表面以下尽可能靠近磨削表面的温度，而且测量磨削温度时，磨削液和磨屑都会对测量结果造成影响。

本文采用人工热电偶的方式对磨削区域温度进行测量，如图 6 所示。在 ZrO_2 陶瓷试件上打一直径 1 mm 的通孔，装上直径略小于 1 mm 的瓷导管，从瓷导管两个细孔中插入镍铬-镍铝热电偶丝，将热结点固定在瓷导管端面中间位置，距试件表面约为 0.5 mm。然后在热结点上涂上银浆，加热烧制成具有银块的测温传感器。应用热电偶进行温度测量时，需要进行温度标定。方法为在加热炉中加热氧化铝陶瓷块，出炉后将陶瓷块压在测温传感器和标准热电偶丝上，同时记录热电偶和传感器的热电势上升曲线，用平衡后的热电势值查出此时加热块的温度，作为传感器的测量温度。

3.3 磨削参数

金刚石砂轮线速度、磨削深度和工件进给速度是磨削过程中主要的磨削参数，因此探索了其对磨削温度和热分配比的影响。磨削参数的选择要考虑工件和

刀具材料、机床-机床夹具-工件-刀具系统刚度等因素。本实验中主要有三个因素,即砂轮线速度、磨削深度和工件进给速度,设计采用三因素三水平的正交试验,如表 3 所示。

表 3 正交实验因数水平
Tab.3 Orthogonal experiment factor level

水平	因素		
	砂轮线速度/(m·s ⁻¹)	磨削深度/μm	工件进给速度/(mm·min ⁻¹)
1	30	5	1000
2	40	10	3000
3	50	15	5000

表 4 正交实验方案与测量结果

Tab.4 Orthogonal experiment scheme and measurement results

实验次数	砂轮线速度/(m·s ⁻¹)	磨削深度/μm	工件进给速度/(mm·min ⁻¹)	切向磨削力/N	磨削温度/℃	热分配比/%
1	30	5	1000	31	207	2.1
2	30	10	3000	34	290	2.8
3	30	15	5000	58	456	4.6
4	40	5	3000	30	257	2.6
5	40	10	5000	33	415	4.2
6	40	15	1000	36	432	4.3
7	50	5	5000	20	359	3.6
8	50	10	1000	23	251	2.5
9	50	15	3000	31	501	5.0

表 5 磨削温度响应值表
Tab.5 Response value of grinding temperature
℃

水平	砂轮线速度	磨削深度	工件进给速度
1	317	274	297
2	368	319	349
3	370	463	410
极差	53	189	113

表 6 磨削热分配比响应值表
Tab.6 Response value of grinding heat distribution ratio
%

水平	砂轮线速度	磨削深度	工件进给速度
1	3.3	2.7	3.0
2	3.6	3.1	3.4
3	3.7	3.9	4.2
极差	0.4	1.2	1.2

4.2 金刚石砂轮线速度对磨削温度和热分配比的影响

根据响应值表建立金刚石砂轮线速度引起磨削温度和热分配比变化的图像,如图 7 和 8 所示。由图可知,随着金刚石砂轮线速度的提高,磨削温度和热分配比均增大,但增长趋势不明显。这是因为金刚石砂轮线速度提高,导致单颗金刚石磨粒磨削深度降

4 实验结果及分析

4.1 实验结果

利用平面测力仪测量不同参数下磨削力的大小,测力仪只能输出磨削力随时间变化的趋势图像,通过图像很难直接得到磨削力平均值的大小,所以利用 MATLAB 进行数据处理得出磨削力平均值。利用人工热电偶对磨削温度进行多次测量,正交实验表和测量结果如表 4 所示。

实验要研究各个磨削参数对磨削温度和热分配比的影响程度,依据正交实验的对称性原理,计算磨削温度和磨削热分配比响应值,结果如表 5、6 所示。

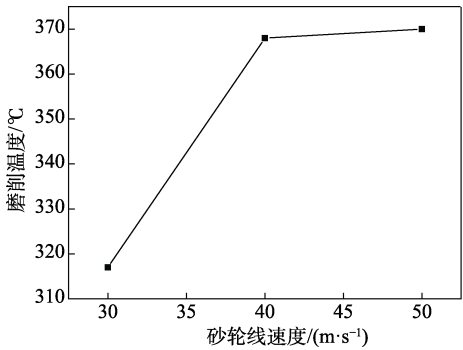


图 7 砂轮线速度对磨削温度的影响
Fig.7 Effects of grinding wheel linear velocity on grinding temperature

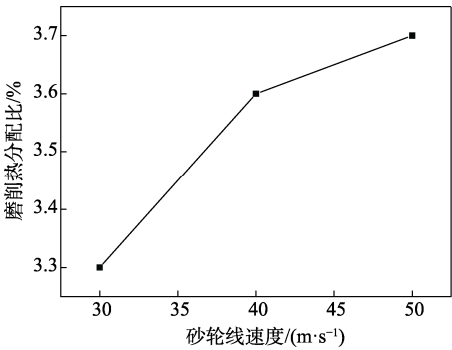


图 8 砂轮线速度对热分配比的影响
Fig.8 Effects of grinding wheel linear velocity on grinding heat distribution ratio

低,磨削力减小,然而磨削能基本不变,因此磨削区域温度变化不大。所以,在磨削 ZrO_2 陶瓷时,可以适当增大砂轮线速度,避免引起加工表面烧伤,也可以提高磨削效率。

4.3 磨削深度对磨削温度和热分配比的影响

磨削深度对磨削温度和热分配比的影响趋势如图 9、10 所示。磨削温度回应值表中磨削深度对应的极差为 189°C ,热分配比回应表中磨削深度对应的极差为 1.2%,两个值均为最大,所以对磨削温度和热分配比影响最大的参数为磨削深度。由图可知,随着磨削深度增大,磨削温度和热分配比均增大。磨削深度增大时,法向磨削力和切向磨削力均增大,磨削能增大。另外,金刚石砂轮与工件接触弧长变大,接触面积增大,磨削液的冷却能力下降,导致磨削温度升高。

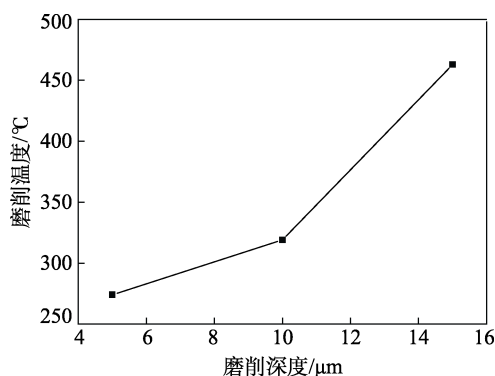


图 9 磨削深度对磨削温度的影响

Fig.9 Effects of grinding depth on grinding temperature

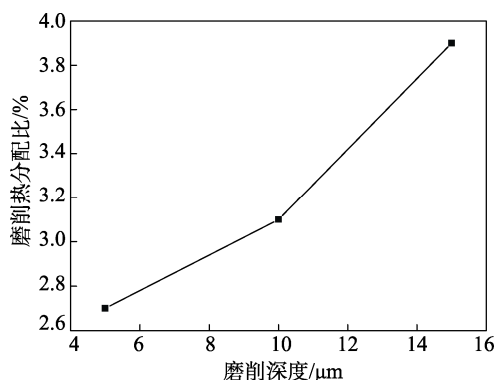


图 10 磨削深度对热分配比的影响

Fig.10 Effects of grinding depth on grinding heat distribution ratio

4.4 工件进给速度对磨削温度和热分配比的影响

如图 11 和 12 所示,工件进给速度对磨削温度的影响也较大。随着工件进给速度的增大,磨削温度和热分配比均明显增大。工件进给速度增大相当于单颗金刚石磨粒的磨削厚度增大。砂轮与陶瓷工件的相互作用增大,使磨削过程中的磨削能明显增大,导致磨削温度升高。

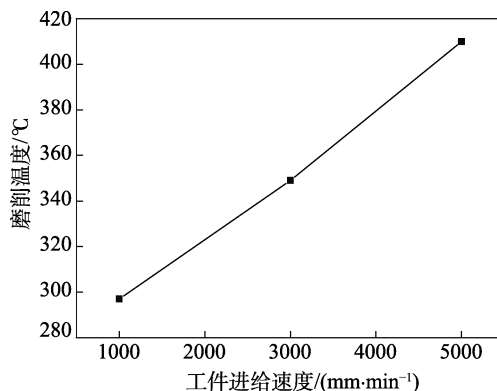


图 11 工件进给速度对磨削温度的影响

Fig.11 Effects of workpiece feed rate on grinding temperature

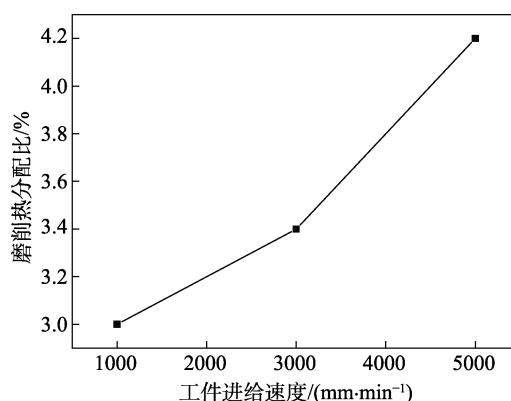


图 12 工件进给速度对热分配比的影响

Fig.12 Effects of workpiece feed rate on grinding heat distribution ratio

4.5 磨削温度对表面质量的影响

应用 SEM 扫描电镜对加工后的表面进行观察,如图 13 所示。从扫描电镜图片中未发现明显的烧伤区域,可知在该磨削参数范围内陶瓷材料不会发生烧伤。而且随着温度的升高,表面脆性断裂逐渐减少,塑性变形逐渐增多。利用 Taylor Hobson 平面粗糙度仪对表面粗糙度进行测量,发现随着温度的升高,表面粗糙度也逐渐减小。因此,磨削温度对陶瓷去除机理影响较大,磨削温度适当增大有助于陶瓷材料的去除,能够提高加工表面质量。

4.6 实验和仿真结果对比分析

通过单颗磨粒磨削 ZrO_2 陶瓷仿真模型,由式(4)得出磨削区热流密度 q ,再依据式(3)得到仿真模型磨削区温度,将实验测量温度与仿真模型计算温度对比分析,结果如图 14 所示。由图可知,磨削区域实验测量温度和仿真模型得到的温度变化趋势十分接近,温度值的大小也相差不大。因此,该仿真模型可以用来预测陶瓷材料实际磨削加工中的磨削温度,对实际的生产加工具有参考价值。

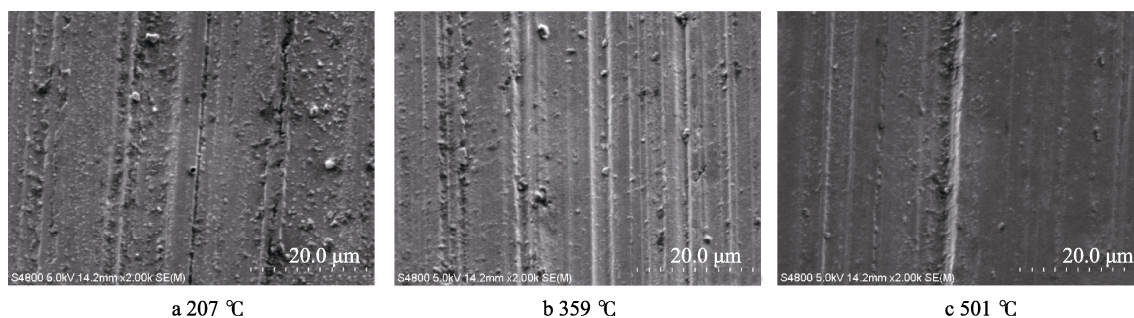


图 13 ZrO_2 陶瓷表面 SEM 图像
Fig.13 Surface SEM images of zirconia ceramic

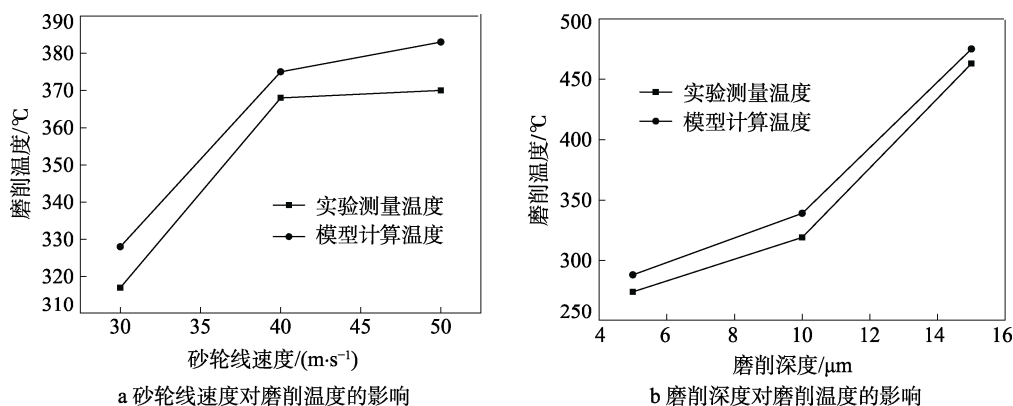


图 14 实验/仿真磨削温度对比图

Fig.14 Comparison diagram of experimental/simulated grinding temperature: a) effects of grinding wheel linear velocity on grinding temperature, b) effects of grinding depth on grinding temperature

5 结论

在 ZrO_2 陶瓷磨削加工中, 陶瓷表面会形成局部高温。研究发现, 在磨削温度及磨削热分配比的变化中, 磨削参数对其具有较大影响。其中, 工件进给速度和磨削深度的影响最大, 而金刚石砂轮线速度的影响较小。所以, 在实际磨削加工中可以适当提高金刚石砂轮线速度。

由氧化锆陶瓷平面磨削实验研究得出, 磨削温度和磨削热分配比的变化趋势十分相似。随着磨削深度和工件进给速度的增加, 磨削温度和磨削热分配比均增大; 随着金刚石砂轮线速度的增加, 磨削温度和磨削热分配比也均逐渐增大, 且增长趋势逐渐变缓。

基于 ABAQUS 的单颗金刚石磨粒磨削 ZrO_2 陶瓷仿真模型, 可以得出磨削参数对磨削温度的影响。仿真模型得出的结果与实验得出的结果相差不大, 可以用来预测磨削加工中磨削区域温度的大小, 为实际加工提供理论参考。

参考文献:

[1] 吴玉厚, 李颂华. 数控机床高速主轴系统[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

WU Y H, LI S H. Nc Machine High Speed Spindle System[M]. Beijing: Science Press, 2011.

[2] 田欣利, 徐西鹏, 袁巨龙. 工程陶瓷先进加工与质量控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 1-6.

TIAN X L, XU X P, YUAN J L. Advanced Machining and Quality Control Technology for Engineering Ceramics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 1-6.

[3] LENG J C, XU M Q, ZHOU G Q, et al. Effect of Initial Remanent States on the Variation of Magnetic Memory Signals[J]. NDT & E International, 2012, 52: 23-27.

[4] 任敬心, 华定安. 磨削原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 1-6.

REN J X, HUA A D. Principle of Grinding[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011: 1-6.

[5] 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: 279-281.

REN J X, KANG R K, WANG X B. Grinding Technology for Hard to Machine Materials[M]. Beijing: Electronic industry Press, 2011: 279-281.

[6] 邓朝晖, 万林林, 张荣辉. 难加工材料高效精密磨削技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2008, 19(24): 3018-3023.

DENG C H, WAN L L, ZHANG R H. Research Progresses of High Efficiency and Precision Grinding for Hard to Machine Materials[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2008, 19(24): 3018-3023.

[7] 巩亚东, 仇健, 李晓飞, 等. 超高速点磨削相关机理研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(17): 172-178.

- GONG Y D, QIU J, LI X F, et al. Study on the Correlative Mechanism of Super High-speed Point Grinding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(17): 172-178
- [8] 谢桂芝, 黄红武, 黄含, 等. 工程陶瓷材料高效深磨的试验研究[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 176-184.
- XIE G Z, HUANG H W, HUANG H, et al. Experimental Investigations of Advanced Ceramics in High Efficiency Deep Grinding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1): 176-184.
- [9] 郭力, 李波, 盛晓敏, 等. 工程陶瓷磨削温度研究的进展[J]. 中国机械工程, 2007, 18(19): 2388-2393.
- GUO L, LI B, SHENG X M, et al. Review of Grinding Temperature Research for Engineering Ceramics[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2007, 18(19): 2388-2393.
- [10] 程军, 巩亚东, 武治政, 等. 硬脆材料微磨削表面形成机理实验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(21): 190-198.
- CHENG J, GONG Y D, WU Z Z, et al. Experimental Study on Mechanism of Surface Formation for Micro-grinding of Hard Brittle Material[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(21): 190-198.
- [11] ROWE W B. Thermal Analysis of High Efficiency Deep Grinding[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41: 1-19.
- [12] JIN T, ROWE W B, MCCORMACK D. Temperatures in Deep Grinding of Finite Workpieces[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42: 53-59.
- [13] BATAKO A D, ROWE W B, MORGAN M N. Temperature Measurement in High Efficiency Deep Grinding[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45: 1231-1245.
- [14] 李荣斌, 崔璨. 平面磨削温度场有限元仿真及实验[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(6): 81-85.
- LI R B, CUI C. FEM Simulations and Experimental Study on the Temperature Field in Surface Grinding[J]. Machine Design & Research, 2014, 30(6): 81-85.
- [15] 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.
- [16] 王西彬, 任敬心. 结构陶瓷的磨削温度[J]. 华中理工大学学报, 1995, 24(4): 14-18.
- WANG X B, REN J X. The Grinding Temperature of Structural Ceramics[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1995, 24(4): 14-18.
- [17] ROWE W B. Thermal Analysis of High Efficiency Deep Grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41: 1-19.