文章编号:1674-2974(2024)04-0054-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024170

有序排布砂轮磨削加工BK7玻璃试验研究

卜颖滨 ,万珍平 †,成雨
(华南理工大学 机械与汽车工程学院,广东 广州 510641)

摘 要:考虑磨削过程中任意相邻磨粒之间的相互作用,针对单颗磨粒进行有序排布研究,提出一种能够控制任意两颗磨粒间距的有序排布策略.经过排布后的每颗磨粒作为单独切削刃,在工件表面先后切除材料后形成沟痕.根据排布策略设计3种排布方式,任意相邻磨粒间距分别为-50 μm、0 μm、50 μm,利用电化学阳极溶解在砂轮基体表面制备排布模板,上砂电镀加厚制备相应的有序排布砂轮.采用磨削运动学方法,分析磨削中的磨削力和磨削温度变化情况,通过磨削试验测量实际磨削中磨削力和磨削温度并进行分析.结果表明,磨削力与进给速度呈正相关,磨削温度与进给速度呈负相关.磨削深度和磨粒排布间距综合影响温度和磨削力的变化,当磨粒间距较小时,随磨削深度的增加,磨削温度和磨削力稳步升高;当磨粒间距较大时,随磨削深度增加,两者先稳步升高,后缓慢升高.

关键词:磨削加工;砂轮;磨粒有序排布;磨削性能;BK7玻璃
中图分类号:TG156 **文献标志码**:A

Experimental Study on Grinding of BK7 Glass by Orderly Arrangement Grinding Wheel

BU Yingbin, WAN Zhenping†, CHENG Yu
(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Considering the interaction between any adjacent abrasive grains during the grinding process, the orderly arrangement of a single abrasive grain is studied, and an orderly arrangement strategy that can control the spacing of any two abrasive grains is proposed. After arrangement, each abrasive grain acts as a separate cutting edge on the surface of the workpiece, and the material is cut off successively to form grooves. According to the arrangement strategy, three arrangement methods are designed. The spacing of any adjacent abrasive grains is -50 μm, 0 μm, and 50 μm, respectively, the arrangement template is prepared by electrochemical anode dissolution on the surface of the grinding wheel matrix, and the corresponding orderly arrangement of the grinding wheel is prepared by sanding electroplating, and thickening. At the same time, the grinding force and grinding temperature changes in grinding are calculated by grinding kinematic analysis, and the grinding force and grinding temperature in actual grinding are measured and analyzed by grinding experiment. The results show that under this test condition, the influence of feed speed on both is relatively independent: the grinding force is positively

* **收稿日期**:2023-10-18
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52175402),National Natural Science Foundation of China(52175402)
作者简介:卜颖滨(1998—),男,河南周口人,华南理工大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail:zhpwan@sut.edu.cn

correlated with the feed speed, while the grinding temperature is negatively correlated with the feed speed. The grinding depth and the abrasive grain arrangement spacing comprehensively affect the changes in temperature and grinding force. When the abrasive spacing is small, the grinding temperature and force increase steadily with the increase of grinding depth; When the abrasive grain spacing is large, as the grinding depth increases, the two increase steadily and then slowly.

Key words: grinding processing; grinding wheels; defined grain pattern; grinding performance; BK7 glass

磨削加工凭借较高的加工精度和较好的表面质量在加工制造领域得到广泛应用.但由于传统砂轮磨粒多为无规则随机分布,磨削过程中大量磨粒重复、同时、先后作用于工件表面,使得磨削力和磨削温度等磨削性能表现出强随机性,磨削力不稳定和磨削温度高极易导致磨削工具和工件的报废[1-2].特别是针对陶瓷、玻璃等硬脆性材料的磨削加工,不同的磨粒作用方式对材料去除特性起着至关重要的作用.将磨粒进行规则化排布,从而提高磨削加工过程的可控性是改善磨削性能的一种有效方法.

Burkhard 等[3]采用点胶法制备有序排布的钎焊珩磨工具,并在试验中发现其具有较好的耐磨性和磨削性能. Aurich 等[4]提出了一种斜排列的磨料有序排布电镀砂轮,利用几何学原理,通过运动学仿真对排布参数进行优化,并给出较优的排布准则.将优化后的有序排布砂轮与普通砂轮进行对比试验,结果表明,排布后的砂轮在磨削力和磨削温度等磨削性能上均优于普通砂轮,表明有序排布砂轮的排布参数对磨削过程有重要影响. Wu 等[5]在微织构有序排布砂轮和传统砂轮磨削氮化铝陶瓷的对比试验中,发现有序排布砂轮在磨削力、表面粗糙度及微裂纹等磨削性能方面均有明显改善. Yang 等[6]在分析砂轮表面形貌排列参数的基础上,建立了用于光学玻璃磨削的有序排列砂轮的磨削力模型,并通过仿真和实验验证了磨削中磨粒的有序排布能够有效降低磨削中的磨削力,得到更佳的磨削表面质量.

随着磨削技术的继续发展和加工精度的需求,越来越多的学者致力于排布方式的改进和磨削机理的探究. Yu 等[7-10]基于仿生学的思想,研究自然界中叶片和花瓣的生长规律并应用于磨粒排布中,极大改善了砂轮的磨削性能.不同于以往对磨粒列进行排布分析,袁和平[11]开展了磨粒群可控排布砂轮的制造与磨削性能研究,通过点胶和钎焊的方法制备均匀分布的磨粒群砂轮,通过磨削试验表明其在磨削力、表面粗糙度及使用寿命上均优于传统砂轮. Zhang 等[12]分析有序排布砂轮修整后的未变形切屑厚度分布,从理论上探究改善磨削性能的原因,通过运动学建模计算得到未变形切屑厚度的分布函数,而修整能够减少切削深度较大的磨粒,使得砂轮未变形切屑厚度分布更为均匀,避免由于切深过大导致应力集中和裂纹的产生.

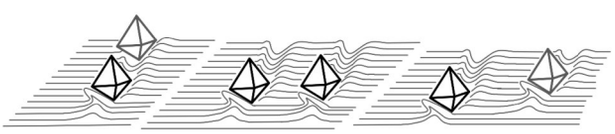
以上排布均未考虑磨削过程中磨粒之间相互作用带来的材料变形行为和变形特性.但对于硬脆性材料,磨粒间相互作用带来的影响更为明显,这是必须考虑的.因此,有必要通过对磨粒相互作用下材料的变形特性进行分析,提出一种能够控制磨粒间的相互作用方式的排布模型,通过运动学分析,探究不同排布方式对磨削性能的影响规律.据此,本文提出一种新的磨粒排布策略,能够有效控制磨削中磨粒与工件的相互作用方式;通过电化学阳极溶解的方法将模板转印至砂轮基体,提高磨粒的包埋深度和把持力;并在后续磨削试验中探究磨粒间相互作用方式对磨削力和磨削温度的影响规律.另外,通过运动学建立磨削温度和磨削热计算模型,对试验进行验证,进一步证实磨粒间相互作用对磨削性能带来的影响.

1　磨粒排布模型及电镀砂轮制备

1.1　磨粒相互作用分析

磨削过程中磨粒与工件之间频繁作用,由于传统砂轮磨粒分布较为随机,在实际工作中磨粒之间的相互影响机制复杂多样.根据磨粒相对位置关系磨粒刻划可以大致分为重复刻划、同时刻划及先后刻划,如图 1 所示. Thonggoom 等[13]通过对光学玻璃进行同一位置的恒深度反复刻划试验发现,工件在

随着刻划次数增加的过程中,会突然发生塑性变形到脆性断裂的转变,这表明磨粒重复作用于表面时,即使每次未变形切屑厚度均在塑性变形限度内,同样会导致材料进入脆性去除阶段. Feng等[14]通过对2种方式下工件内部应力场分布情况分析,发现先后刻划过程中前道划痕留下的压应力会显著抑制后一道划痕产生的拉应力;而同时刻划时两压头侧面产生的应力场叠加会显著增大拉应力场的影响范围,拉应力通常被认为是诱导裂纹萌生和扩展的主要原因. 在利用Fib制备不同间距的压头工具进行放入同时刻划与先后刻划对比试验中发现,相同刻划深度下,先后刻划的模式更容易得到无表面及亚表面裂纹的形貌.



(a) 重复刻划 (b) 同时刻划 (c) 先后刻划

图1 磨削过程中3种典型的磨粒刻划方式

Fig.1 Three typical scratching modes of grains in grinding process

从以上磨粒相互作用情况研究分析,在对磨粒进行排布时应尽量避免磨粒对光学玻璃表面的重复作用和同时作用,并使相邻磨粒均按照先后刻划的模式作用于工件表面. 反观传统排布模型中,均采用轴向间距、周向间距和排布角度3个参数进行描述,如图2所示,该模型一直被沿用至今. 然而在实际进行排布的过程中,考虑到磨粒本身尺寸的影响,无法对相邻磨粒的间距进行有效控制,且此排布中未对相邻磨粒相互作用方式进行区分,均存在磨粒重复作用及同时作用的方式. 另外,受排布模型本身的限制,当排布角度增大时,会导致行间距逐渐减小,磨粒间距逐渐增大,这就限制了排布角度的范围,Aurich等[4]在相关研究中表示,排布角度应设置在45°以内.

据此,基于磨粒先后作用于工件表面的思想,对排布模型进行重新定义和描述,突破磨粒尺寸对相邻排布间距的限制和对排布角度上限的制约,实现相邻磨粒间距的任意可控.

1.2 磨粒间距任意可控排布策略

将砂轮以轴向方向为x轴,以砂轮圆周方向为y轴平面展开成宽度为w,长度为$L=\pi D$(D为砂轮的直径)的平面. 在x方向对砂轮平面进行一次分割,将宽度w分为m份,每份宽度为a,并在该区域内对磨粒进行排布分析,d为磨粒排布间距,如图3所示.

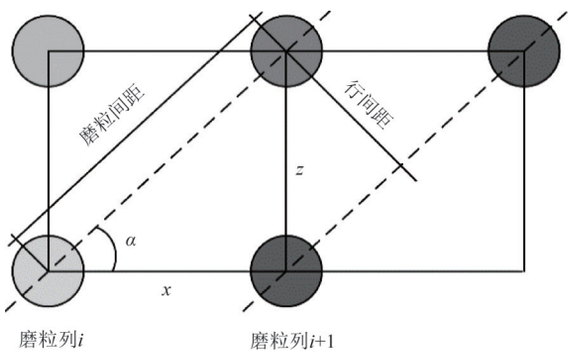


图2 传统磨粒排布方式

Fig.2 Traditional grains arrange model

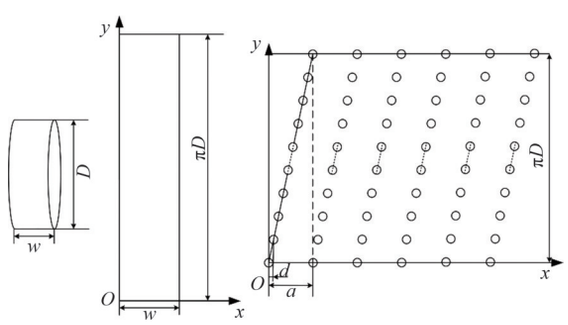


图3 本研究中的磨粒整体排布图

Fig.3 Schematic diagram of grains arrange model in this study

分割后的每个区域作为一个磨粒列,进行排布时须给出磨粒列内的x方向相邻磨粒的间距,由于在对单个磨粒列进行排布时,可以在平面中向y轴方向进行扩展,因此该模型不受磨粒尺寸的限制,可以对磨粒间距进行任意设置,具体的磨粒排布模型如图4所示. d_s为磨粒需要给定的排布参数,d_g为选用磨粒直径. 根据此排布模型,给出磨粒间距d和预设的份数m,即可对排布方式完全定义. 排布角为:

$$\alpha = \arctan\frac{h}{d} = \arctan\frac{\pi D}{n(d_g + d_s)} \tag{1}$$

式中:n为每列磨粒个数;h为相邻磨粒y方向的距离.

$$n = \frac{a}{d} = \frac{w}{md} \tag{2}$$

各磨粒的坐标可通过下式得到:

$$x_{i,j} = (i-1)\times d + \frac{w}{m}\times(j-1) \tag{3}$$

$$y_{i,j} = (i-1)\times\frac{\pi D}{n} \tag{4}$$

式中:$x_{i,j}$为第i行第j列磨粒的横坐标;$y_{i,j}$为第i行 第j列磨粒的纵坐标.

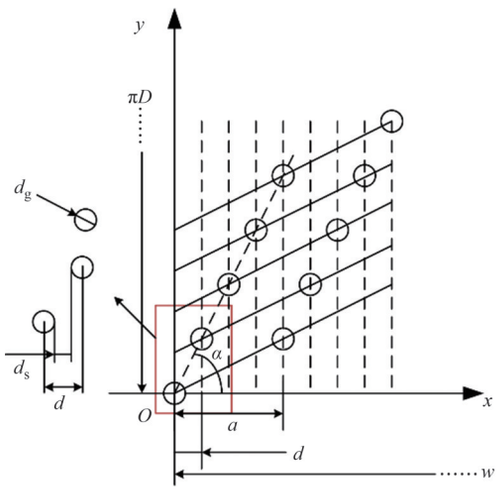
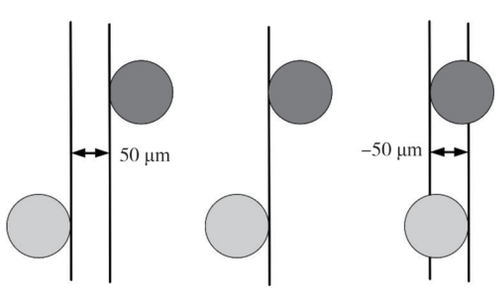


图4　本研究提出的磨粒排布模型

Fig.4　The grains arrange model proposed in this study

按照上述排布方式对磨粒进行排布,通过控制d_s的大小,能够实现对相邻磨粒之间的间距任意可控.当d_s的选取为正时,即可保证磨削过程中相邻磨粒均为先后作用于工件表面.为进一步研究排布间距对磨削性能的影响,在制备砂轮过程中,选择3种排布间距进行研究,分别为−50 μm、0 μm、50 μm,如图5所示.



(a) d_s=50 μm　(b) d_s=0 μm　(c) d_s=−50 μm

图5　试验选用的排布间距

Fig.5　The spacing used in the experiment

1.3　电镀有序排布砂轮的制备

有序排布砂轮可通过钎焊和电镀2种方法制备,钎焊砂轮磨粒把持力度高,但操作复杂,有序排布多通过手动上砂或外加模板固定磨粒来实现.电镀可对砂轮基体进行绝缘修饰,对裸露出的部位将镍和磨粒吸附沉积实现磨粒的排布和固定.不同于以往电镀砂轮中贴附掩模版或者激光修饰基体,本文提出一种直接在砂轮基体上精准制备模板并进行上砂的方法.如图6所示,首先,选用绝缘胶制备相应的排布模板,由于本排布策略针对单颗磨粒进行排布,因此使用激光在绝缘胶上烧蚀出相应的磨粒孔位.对经过充分除油的砂轮基体进行预镀,镀镍厚度约为磨粒直径的50%,将模板贴附在砂轮基体上,并放入电镀槽中,将基体作为阳极溶解.此时,裸露出的基体在电极作用下被溶解出凹坑,控制电流密度和电镀时间使凹坑深度为磨粒直径的30%,去除绝缘胶即可实现模板在基体上的转印.由于电场是均匀的,亦可确保凹坑尺寸和深度的精度.将磨粒均匀地铺洒在砂轮基体并旋转压实,将磨粒固定在相应的孔位中,再进行2次电镀沉积镍层对磨粒进行包埋.

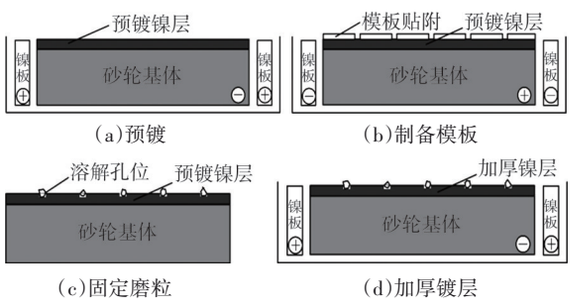
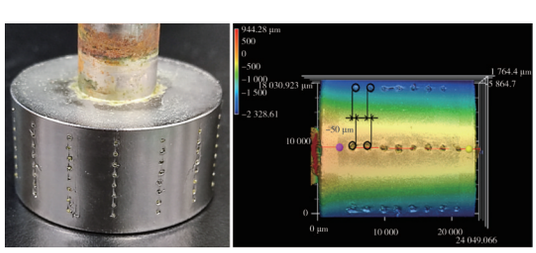


图6　有序排布电镀砂轮制造流程简图

Fig.6　Schematic diagram of the manufacturing process of electroplated grinding wheels

此方法能够将磨粒准确地按照预设排布方式进行排列,且具有较好的一致性.其次,不同于磨粒直接与基体表面接触的方式,凹坑的存在一定程度上加强了磨粒的把持力.本文选用直径为150 μm的金刚石磨粒进行3种排布方式制备有序砂轮.图7为磨粒间距d_s=−50 μm的电镀砂轮.



(a)电镀砂轮实物图　(b)磨粒间距测量

图7　磨粒间距d_s=−50 μm的电镀砂轮

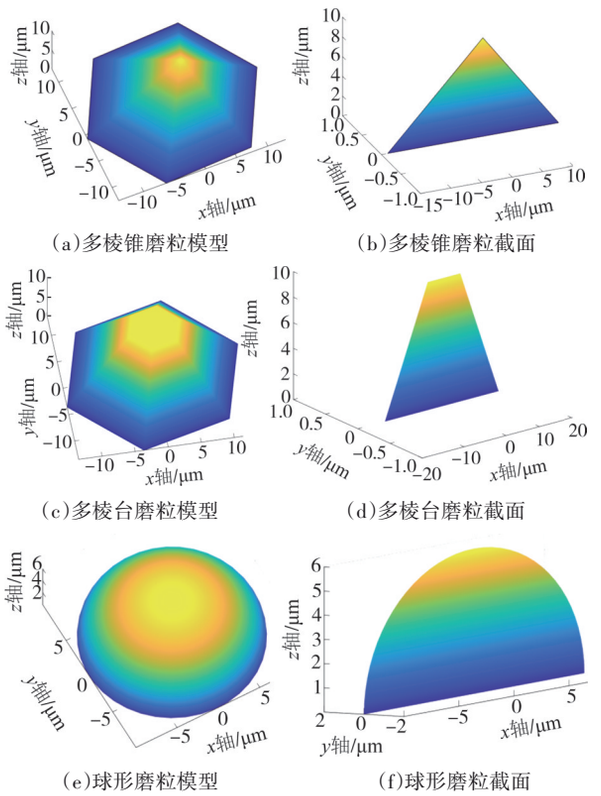
Fig.7　Electroplated grinding wheels with the grains spacing d_s=−50 μm

2　磨削温度及磨削力建模

2.1　砂轮表面形貌建模

为了对该排布模型下的磨削结果进行预测,本文进行运动学建模,对不同参数下的磨削温度和磨

削力进行探究.首先需要对磨粒三维形状和砂轮形貌进行参数化建模.选用直径为150 μm的金刚石磨粒破碎料,形状较为随机,一般可将磨粒形状简化为球形、多棱锥及多棱台.对于多棱锥建模,首先通过外接圆内部取点确定底面顶点坐标,并在磨粒高度平面内随机取点确定顶点坐标,通过三维插值生成磨粒轮廓.针对多棱台建模,分别在底面和顶面外接圆内随机取点后进行三维插值生成磨粒轮廓.具体如图8所示.每次进行的磨粒建模均为随机过程,将磨粒形貌及二维轮廓保留,在后续模拟中计算单颗磨粒的切削厚度.



(a)多棱锥磨粒模型 (b)多棱锥磨粒截面

(c)多棱台磨粒模型 (d)多棱台磨粒截面

(e)球形磨粒模型 (f)球形磨粒截面

图8 3种典型形状的磨粒建模

Fig.8 Modeling of three typical shapes of grains

对磨粒建模后,根据式(3)和式(4)中磨粒坐标位置进行砂轮整体建模,在进行排布中,计算得到的位置坐标在磨粒直径的10%内进行随机偏移,以更符合实际中电镀砂轮的磨粒位置.图9为排布模型得到的磨粒分布.

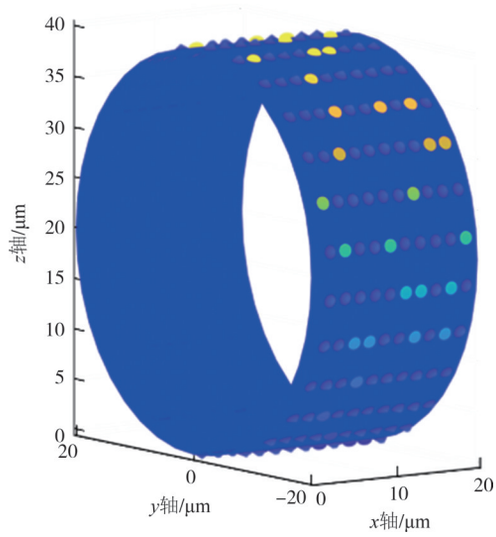


图9 排布模型得到的磨粒分布

Fig.9 The grains distribution obtained by the arrange model

2.2 温度场及磨削力计算

在磨削过程中,产生的热量和磨削力通常是磨粒与工件发生干涉而产生的,需要判断每个时刻磨粒的坐标位置并判断是否与工件发生干涉,如有干涉,则该磨粒被定义为激活磨粒并计算其发热量与磨削力.Malkin等[15]提出磨削过程中砂轮每颗磨粒的运动轨迹可用摆线方程近似描述.

$$y = \frac{x^2}{D(1 + v_w/v_s)^2} \tag{5}$$

依据式(5)计算每颗磨粒在任意时刻位于工件坐标系中的坐标位置.其中,y为砂轮周向坐标,x为轴向坐标,v_w和v_s分别为进给速度和砂轮转速.当判断某一磨粒处于激活状态时,通过调用该磨粒的形貌信息计算其发热量.

$$Q_d = \varepsilon u V \tag{6}$$

式中:ε为磨削接触表面磨粒和工件的磨削热分配比例;u为比磨削能;V表示工件与单颗磨粒接触后产生切屑的体积.由傅里叶导热微分方程求解可得某点P在任意时刻τ所产生的温升.

$$\theta = \frac{Q_d}{c\rho(4\pi\alpha t)^{3/2}} e^{-R^2/4\omega t} \tag{7}$$

式中:R为热源点与目标点P之间的距离;Q_d为瞬时热源点发热量;c为导热介质的比热;ρ为导热介质的密度;ω为导热介质的导温系数;t为在热源瞬时发热后的任一时刻.新模型下磨粒热源分布图如图10所示,根据磨粒坐标位置和与工件接触情况判断磨粒是否被激活,计算每颗激活磨粒的发热量和对目标点P造成的影响,将所有磨粒对点P造成的温升进行叠加即得到该点磨削温度.

磨削力的计算,采用Zhu等[16]提出的通过未变形切屑厚度和磨粒界面形状计算每一时刻激活磨粒与表面作用时的力并进行叠加.通常,磨粒作用于工

件表面时分为摩擦、犁耕和切削3个阶段.摩擦阶段磨粒与表面接触处于弹性变形阶段,采用赫兹接触理论中圆柱面接触模型进行计算.

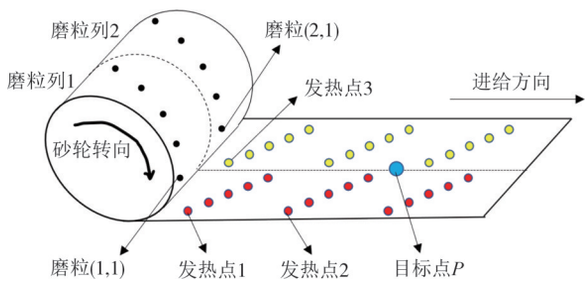


图 10　新模型下磨粒热源分布图

Fig.10　Heat source distrubution of grains under new model

$$F_{ni}=\frac{k_s d_g d_i E}{1-v^2} \tag{8}$$

式中:k_s为修正系数;d_g为磨粒直径;E为材料的弹性模量;d_i为磨粒与工件干涉深度;v为材料的泊松比.摩擦阶段通常发生在磨粒刚与工件表面发生接触时,随着磨削过程的进行,当底部压强超过工件40%的硬度时,材料变形从弹性阶段进入塑性阶段.塑性阶段磨削力通过式(9)计算.

$$F_{nj}=u_a\frac{k_s d_g d_i E}{1-v^2}+u_p\frac{d_g(1+k_s)d_i H}{2} \tag{9}$$

式中:u_a和u_p分别为摩擦和犁耕阶段的摩擦因数;H为材料的硬度.当磨粒的切深超过一定值时,材料变形将从犁耕阶段进入切削阶段,而该深度值被称为临界转变深度d_{ct},如果激活磨粒深度超过了该转变深度,则磨削力可由式(10)计算得到,转变深度值可由式(11)计算得到.

$$F_{nk}=\frac{\tau d_g(1+k_s)}{2}\frac{d_i\sin(\beta_a-\gamma)}{\sin\theta_a\cos(\beta_a-\gamma+\theta_a)}+\frac{k_s d_g d_i E}{1-v^2} \tag{10}$$

$$d_{ct}=\eta\left[1-\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\beta_a}{2}\right)\right] \tag{11}$$

式中:β_a为剪切角;γ为刀具前角;θ_a为摩擦角;η为磨粒钝圆半径.它们均可由磨粒建模过程中几何形状获取.根据磨粒位置及磨削深度判断磨粒是否与工件发生干涉,根据3种去除阶段转变准则,判断磨粒此时处于哪一种去除阶段,相应地计算其磨削力.对同一时刻处于磨削状态的磨粒计算出的磨削力进行叠加后,即可得到总的磨削力.

3　光学玻璃磨削试验及结果分析

3.1　磨削试验装置

本文选用的砂轮直径为40 mm,宽度为20 mm,按照第1节中排布方式制备磨粒间距分别为−50 μm、0 μm、50 μm 3种有序排布砂轮,进行不同参数下的磨削试验,主要分析磨削深度、进给速度对磨削温度、磨削力的影响.磨削试验相关参数如表1所示.磨削方式采用逆磨,磨削长度为20 mm,无轴向进给.

表1　磨削试验相关参数

Tab.1　Relevant parameters in grinding experiments

参数	数值
砂轮转速v_s/(r·min^{-1})	4 000
进给速度v_w/(mm·min^{-1})	1、5、10
磨削深度a_p/μm	10、20、30、40、50

磨削过程中,通过Kistler测力仪记录法向力,采样频率为3 000 Hz,经过滤波处理后取平均值,记录磨削力数据.磨削温度通过热电偶方式进行测量,将片状热电偶夹持在工件之间,在磨削表面0.1 mm深度处布置热电偶,测量磨削温度.图11为磨削试验平台.

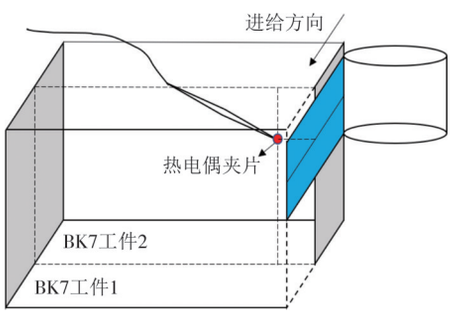
3.2　进给速度对磨削性能的影响

3.2.1　进给速度对磨削温度的影响

试验中发现,进给速度对磨削温度和磨削力的影响较为单一,不同的磨削深度及排布间距下变化趋势一致,因此,本节仅在其他参数一致时对进给速度进行分析.图12为d=0 μm,a_p=30 μm时不同进给速度下磨削温度变化曲线.图12(a)中,磨粒排布间距为0 μm,磨削深度为30 μm.由于磨削中测温点位置固定,进给速度对磨削温度最直观的影响便是测温点升温与降温的速度差别.随着进给速度的不断加大,砂轮更快到达测温点,测温点到达最高温度的时间也在逐渐提前.由式(5)可知,在同一磨削深度下,进给速度加快,导致磨粒走过的路径更长,表现在去除切屑体积增大;由式(6)可知,单颗磨粒发热量与切屑体积成正比,因此磨削温度升高.另外,进给速度增大,砂轮转动相同的圈数时,热源作用在工件表面的时间相应减少,同时切屑带走更多热量,使



(a)试验现场



(b)磨削温度测量示意图

图 11 磨削试验平台

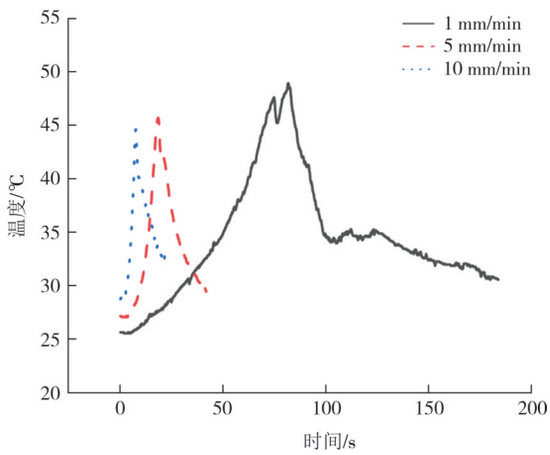
Fig.11 Grinding experimental platform

得工件表面温度降低. 图 12(b)中,为缩短计算时间,将测温点设定在磨削起点前 0.01 mm 位置处,因此,在 3 种进给速度下,磨削温升均很快,进给速度的影响主要表现在经过测温点后的降温过程,进给速度越慢,温度降低越缓慢,这与砂轮在测温点附近停靠时间有关. 计算得到的最高温度与实测温度一致,同样表现出进给速度越快,最高温度越低的趋势.

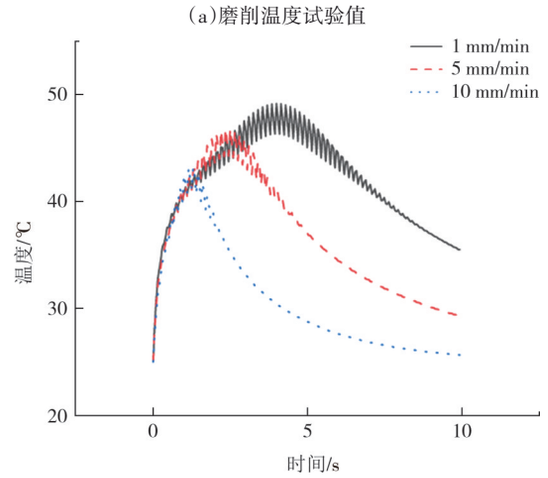
3.2.2 进给速度对磨削力的影响

当 d=0 μm,a_p=30 μm时不同进给速度下磨削力变化曲线如图 13 所示. 从图 13(a)中可以看出,随着进给速度的增加,法向磨削力会不断增加. 根据 Malkin 等[15]提出的未变形切屑厚度式(12)可知,未变形切屑厚度 h_{max} 与进给速度 v_w 呈现正相关. 当进给速度较小时,磨粒与工件之间多以弹性摩擦和挤压作用,法向力较小; 随着进给速度增大,未变形切屑厚度增大,磨粒逐渐由摩擦挤压转变为犁耕和切削状态,法向力开始增长.

$$h_{max} = 2L_n \frac{v_w}{v_s}\left(\frac{a_p}{d_e}\right)^{1/2} \tag{12}$$



(a)磨削温度试验值

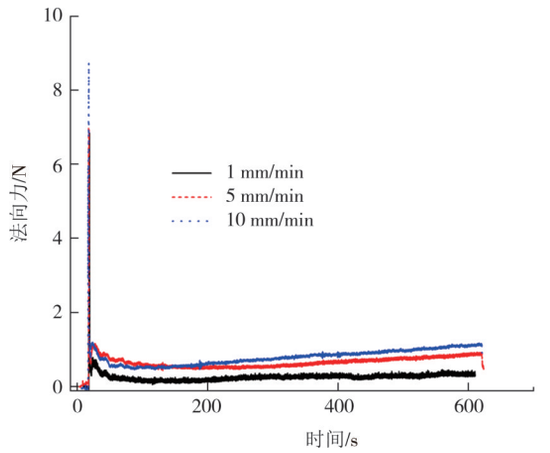


(b)磨削温度仿真值

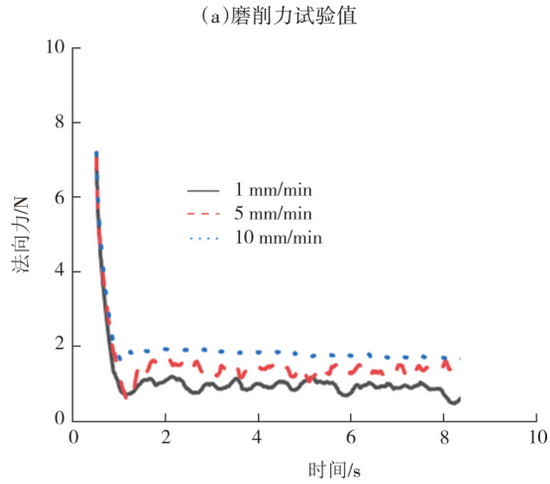
图 12 当 d=0 μm,a_p=30 μm 时不同进给速度下磨削温度变化曲线

Fig.12 Grinding temperature changing curves at different feed rates when d=0 μm and a_p =30 μm

式中:L_n 为两个连续切削刃的间隔;d_e 为砂轮的当量直径. 分析磨削过程中磨削力的变化趋势,发现存在降低或停滞增长的现象,这是由于磨削过程中材料去除进入脆性去除阶段. 一方面脆性去除需要更大的磨削力;另一方面,脆性去除导致材料多以崩碎的形式成块去除,导致后续磨粒再进行磨削时可能与工件之间不发生接触,从而磨削力减小. 砂轮与工件刚开始接触时,由于没有前序磨削过程的累积,工件表面完整,磨粒与工件间为弹性或塑性变形并完全接触. 随着磨削力突增,磨削的继续进行,材料进入脆性去除阶段,表面形貌变得不规则,磨粒与工件不完全接触,因此磨削力明显降低. 继续随着磨削的进行,材料进入稳定的脆性去除阶段,磨削力基本保持降低后的水平不变. 在仿真过程中同样能够看到这一变化趋势[图 13(b)].



(a)磨削力试验值



(b)磨削力仿真值

图 13　当 d=0 μm,a_p=30 μm时不同进给速度下磨削力变化曲线

Fig.13　Grinding forces changing curves at different feed speeds when d=0 μm and a_p =30 μm

3.3　排布间距和磨削深度对磨削性能的综合影响

3.3.1　排布间距和磨削深度对磨削温度的影响

通过对试验结果的分析发现,本文磨粒排布策略下,磨削深度与排布间距对磨削过程的影响更为复杂,不同排布方式和磨削深度下温度和磨削力出现不同的变化规律.本节保持进给速度为 10 mm/min 不变,进行不同磨粒排布间距和磨削深度对磨削过程的综合影响分析.

不同磨粒间距和磨削深度下磨削温度试验及仿真结果如图 14 所示,由图 14 可知,无论是试验结果,还是仿真结果,磨削温度均随磨削深度增大而升高.这并不难理解,随着磨削深度的增加,磨削弧长增加,单颗磨粒去除切屑体积随之增加,导致单颗磨粒发热量增大;磨粒与工件接触时长随磨削弧长的增加而增加,导致散热减慢,温度累积增加,从而磨削时工件表面温度增加.另外,磨粒间距较小时的磨削温度总是要高于磨粒间距较大时的磨削温度,这是由于在此种排布策略下,磨粒间距越小,砂轮磨粒更加密集,在磨削过程中产生的热源更加密集,相同磨削参数下导致的温升也就越高.由于仿真过程建立在理想条件下,磨粒形状规则,而实际磨削过程中受磨粒、砂轮、工件及散热条件等多方面影响,无法达到理想状态.而且试验中采用连续进给,测得温度为长时间磨削后的累加结果.仿真计算中由于测温点在磨削起点前0.01 mm位置处,忽略了磨削热累积过程,因此,计算得到的磨削温度要比试验值偏低.但随磨削深度变化的整体趋势吻合,且误差均在10%以内.

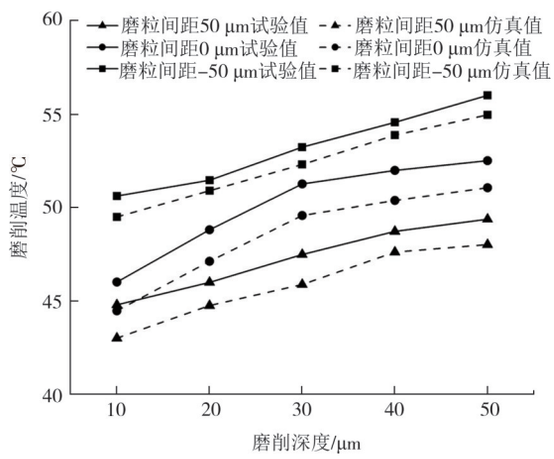


图 14　不同磨粒间距和磨削深度下磨削温度试验及仿真结果

Fig.14　Experimental and simulation results of grinding temperature under different grains spacing and grinding depth

本文模型中,由于存在磨粒间距,磨粒作用于工件表面时,存在明显的先后顺序.新模型下磨粒与工件作用顺序如图 15 所示.受排布间距影响,磨粒对材料的去除方式可分为 2 种:磨粒间距较大时,磨粒轨迹不发生干涉,工件表面留下划痕不出现交叉;磨粒间距较小时,磨粒轨迹发生干涉,前道磨痕造成大量材料以崩碎模式去除,后续磨粒与工件接触变少.图 16 为磨粒间距和磨削深度造成的 2 种材料去除形式.图 17 为不同磨削深度下磨削表面形貌.以磨粒间距为 50 μm 为例,当磨削深度较浅时[图 17(a)],单个磨粒作用于材料表面后留下的沟槽和划痕较为明显且独立,此时磨粒间相互作用较弱.随磨削深度的增加[图 17(b)],磨粒之间相互作用程度增强,导致相邻磨粒间的材料也发生断裂去除,沟槽和划痕明显减少.干涉时整体材料去除体积相对降低,而单颗磨粒计算中材料去除体积与磨削温度呈正相关,因此处于这种去除方式会导致磨削温度的降低.另外,磨削深度的增加主导材料去除体积的增加,会导致磨

削温度的升高,而交叉去除材料体积造成的温度降低是有限的,因此,磨削温度整体仍表现为持续升高,但在两者的共同作用下变化过程呈现出不同的趋势.

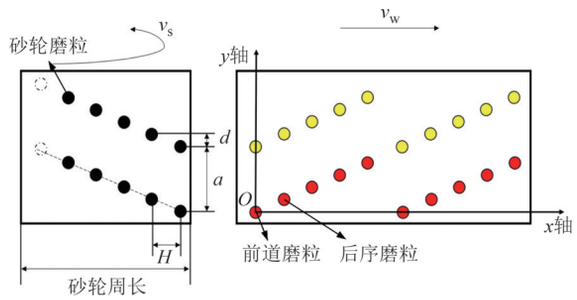


图 15 新模型下磨粒与工件作用顺序

Fig.15 The sequence of interaction between grains and workpiece under the new model

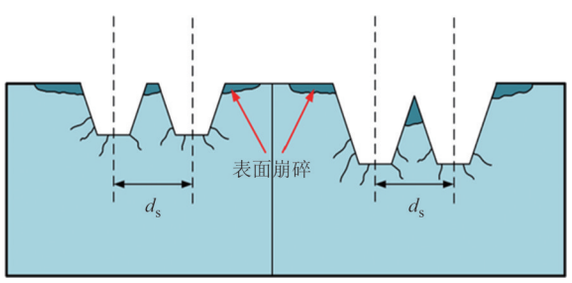
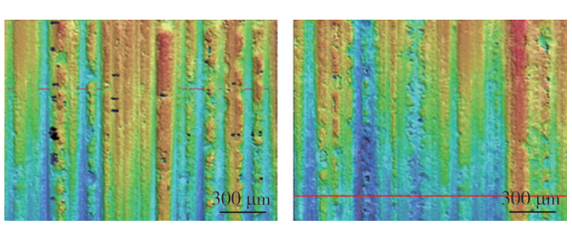


图 16 磨粒间距和磨削深度造成的2种材料去除形式

Fig.16 Two forms of material removal due to grains spacing and grinding depth



(a)d_s=50 μm, a_p=20 μm (b)d_s=50 μm, a_p=50 μm

图 17 不同磨削深度下磨削表面形貌

Fig.17 Topography of the grinding surface at different grains depth

当磨粒间距为-50 μm时,磨粒始终处于第2种材料被交叉去除的状态,随着磨削深度的增加,两者造成的温度变化共同存在,磨削温度呈现稳步递增的趋势.当磨粒间距为0 μm时,由于磨粒具有一定角度的尖角,因此当磨削深度较浅时,仍以第1种材料去除为主,降低了交叉去除所带来的材料去除体积对温度降低的影响,此阶段磨削温度上升较快.但随着磨削深度的继续增加,第2种材料去除状态逐渐表现得更为明显,导致磨削温度上升速度有所下降.当磨粒间距为50 μm时,温度变化情况与磨粒间距为0 μm时一致,但由于间距更大使得在更大的磨削深度下才会出现第2种材料去除方式,导致磨削温升的速度变缓出现得较晚一些.

3.3.2 排布间距和磨削深度对磨削力的影响

类似地,磨削力的变化存在与磨削温度变化相同的规律.试验测得不同磨粒间距和深度下磨削力如图18所示,在相同磨削深度下,磨粒间距较小时,材料与磨粒的接触多为第2种方式,材料崩碎的同时大大降低了后续磨粒与工件的接触面积,导致磨削力相较于较大磨粒间距时更小,并随着磨削深度的增加而稳步增加.随着磨粒间距的增大,在较小的磨削深度下材料与磨粒接触多为第1种方式,前道磨痕对后续磨粒去除材料影响较小,会随着磨削深度的增大而增大;当超过一定的磨削深度时,第2种接触模式逐渐显现,一定程度上减少了材料的去除体积,但磨削深度增加造成的材料去除体积增加仍占据主导地位,磨削力的增加变得缓慢.当磨粒间距更大时,磨削力增加缓慢转折点的出现稍有延后.

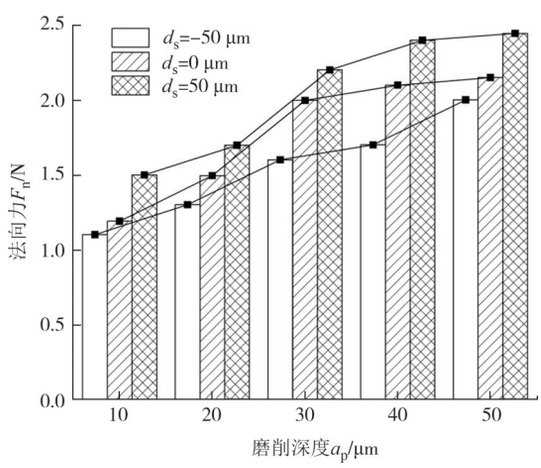


图 18 试验测得不同磨粒间距和深度下磨削力

Fig.18 Experimentally measured grinding forces at different grains spacing and depth

4 结 论

1)本文通过分析磨削过程中磨粒间的相互作用,提出一种能任意控制相邻磨粒横向间距的排布策略,实现磨粒总是先后与材料表面接触.

2)通过运动学分析建立了有序排布砂轮的温度场和磨削力模型,并计算了3种排布间距下,不同磨削参数下的磨削温度和磨削力.与试验值对比,误差不超过10%.

3)用制备的有序排布砂轮进行BK7玻璃的磨削试验并对试验结果分析表明,进给速度对磨削温度和磨削力的影响较为单一,而磨削深度和磨粒排布间距则综合影响两者的变化规律.磨削力与进给速度呈正相关,而磨削温度与进给速度呈负相关.磨粒间距较小时,随磨削深度的增加,磨削温度和磨削力稳步升高;当磨粒间距较大时,随磨削深度增加,两者先稳步升高,后缓慢升高.磨粒作用于材料表面时材料不同的去除方式是造成这一现象的主要原因.合理设置排布间距和磨削参数能够有效降低磨削热和磨削力.

参考文献

[1] PINTO F W, VARGAS G E, WEGENER K. Simulation for optimizing grain pattern on Engineered Grinding Tools[J]. CIRP Annals,2008,57(1):353-356.

[2] 任敬心,华定安. 磨削原理[M]. 北京:电子工业出版社,2011: 3-10.
REN J X,HUA D A. Grinding principle[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2011: 3-10.(in Chinese)

[3] BURKHARD G, REHSTEINER F, SCHUMACHER B. High efficiency abrasive tool for honing[J]. CIRP Annals, 2002, 51(1):271-274.

[4] AURICH J C,BRAUN O,WARNECKE G,et al. Development of a superabrasive grinding wheel with defined grain structure using kinematic simulation[J]. CIRP Annals,2003,52(1):275-280.

[5] WU S X,ZHANG F L,NI Y Q,et al. Grinding of alumina ceramic with microtextured brazed diamond end grinding wheels [J]. Ceramics International,2020,46(12):19767-19784.

[6] YANG Z B,HE D Y,SUN W,et al. Determination of the grinding force on optical glass based on a diamond wheel with an ordered arrangement of abrasive grains[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2021,115(4):1237-1248.

[7] YU H Y, ZHANG W L, LYU Y S, et al. Research on grinding forces of a bionic engineered grinding wheel[J]. Journal of Manufacturing Processes,2019,48:185-190.

[8] YU H Y, WANG J, LU Y S. Modeling and analysis of dynamic cutting points density of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2016,86(5):1933-1943.

[9] YU H Y, LYU Y S, WANG J, et al. A biomimetic engineered grinding wheel inspired by phyllotaxis theory[J]. Journal of Materials Processing Technology,2018,251:267-281.

[10] YU H Y,LU Y S,WANG J. Study on wear of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern[J]. Wear, 2016, 358/359: 89-96.

[11] 袁和平. 磨料群可控排布技术及其砂轮的研制[D]. 大连:大连理工大学,2007.
YUAN H P. The technology of abrasive cluster with controlled distribution and development of its grinding wheel[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2007.(in Chinese)

[12] ZHANG Y Z, FANG C F, HUANG G Q, et al. Modeling and simulation of the distribution of undeformed chip thicknesses in surface grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 127: 14-27.

[13] THONGGOOM R, FUNKENBUSCH P D. Transition in material removal behavior during repeated scratching of optical glasses[J]. Journal of Materials Science, 2005, 40(16): 4279-4286.

[14] FENG J Y,WAN Z P,WANG W,et al. Scratch with double-tip tool: crack behavior during simultaneous double scratch on BK7 glass[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(12):4202-4216.

[15] MALKIN S, GUO C S. Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives[M]. 2nd ed. New York: Industrial Press,2008: 36-40.

[16] ZHU W L,YANG Y,LI H N,et al. Theoretical and experimental investigation of material removal mechanism in compliant shape adaptive grinding process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2019,142:76-97.