

开槽结构化砂轮光固化快速成型制备及其磨削实验研究

李丹阳^①, 辛栖桐^①, 高 申^①, 易 军^{①②}, 张哲豪^{①②}

(^①湖南科技大学未来技术学院, 湖南 湘潭 411201;

^②难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 为实现开槽结构化砂轮的快速制备, 结合光固化快速成型和铺粉 3D 打印的优点, 提出基于磨粒-树脂浆料逐层铺设的常规磨粒粒径砂轮光固化快速制备方法; 研究了磨粒-树脂混合浆料固化厚度随时间的变化规律, 磨料层单次固化厚度对磨料层-基体粘结强度、磨料层层间结合强度的影响; 基于光固化快速成型原理, 搭建了光固化树脂结合剂砂轮制备实验平台, 制备了光固化树脂结合剂开槽结构化砂轮和连续砂轮; 开展磨削实验测试了两种砂轮的磨削性能。结果表明, 混合浆料的极限固化厚度约为 6 mm, 磨料层-基体粘接强度、磨料层层间结合强度都随单次固化厚度的增加而减小, 当单层固化厚度为 0.5 mm 时, 磨料层-基体粘接强度为 7.15 MPa, 磨料层层间结合强度为 10.43 MPa, 满足砂轮使用要求; 在相同磨削条件下, 与连续砂轮相比开槽砂轮在降低磨削力、磨削温度、提高砂轮磨削比方面具有明显优势, 但经其磨削后工件的表面粗糙度较连续砂轮会有所增加。

关键词: 光固化快速成型; 光固化树脂结合剂; 开槽结构化砂轮; 磨削性能

中图分类号: TG74+3

文献标识码: A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.01.001



全文在线

Study on the preparation and grinding experiment of light cured slotted structured grinding wheel

LI Danyang^①, XIN Qitong^①, GAO Shen^①, YI Jun^{①②}, ZHANG Zhehao^{①②}

(^①School of Future Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, CHN;

^②Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-Cut Material, Xiangtan 411201, CHN)

Abstract: To achieve the rapid prototyping preparation of slotted structured grinding wheels, combined with the advantages of UV curing rapid prototyping and powder bed fusion, a conventional particle size grinding wheel UV curing rapid preparation method based on layer by layer laying of abrasive resin slurry was proposed. The variation law of the solidification thickness of abrasive resin mixed slurry with time was studied. The influences of the single solidification thickness of the abrasive layer on the bonding strength between the abrasive layer and the substrate, as well as the bonding strength between the abrasive layers, were investigated. Based on the principle of light cured rapid prototyping, an experimental platform for preparing light cured resin bonded grinding wheels was established, and slotted grinding wheels and continuous grinding wheels were prepared. Grinding experiments were conducted to test the grinding performance of two types of grinding wheels. The results indicate that the ultimate curing thickness of the mixed slurry is about 6 mm. The bonding strength between abrasive layer and substrate, as well as the bonding strength between the abrasive layers, decreases with the increase of single-layer solidification thickness. When the single-layer solidification thickness is 0.5 mm,



the bonding strength between the abrasive layer and the substrate is 7.15 MPa, and the bonding strength between the abrasive layers is 10.43 MPa, which meets the grinding wheel requirements. Under the same grinding conditions, slotted grinding wheels have significant advantages in reducing grinding force, grinding temperature, and improving grinding ratio compared to continuous grinding wheels. However, after grinding, the surface roughness of the workpiece will increase compared to continuous grinding wheels.

Keywords: stereo lithography appearance; light curing resin bond; slotted structured grinding wheels; grinding performance

光固化快速成形技术也称立体光固化技术 (stereo lithography appearance, SLA), 是目前最为成熟且广泛应用的一种 3D 打印技术, 它以液态光固化树脂为原料, 通过控制紫外光束扫描路径来控制零件的截面形状, 再逐层堆积实现零件的快速制备, 具有成形速度快、成形精度高、材料利用率高等优点^[1]。光固化快速成型技术的优势使其在降低结构化砂轮 (特别是具备复杂特征的结构化砂轮) 制备成本、提高结构化砂轮的制备效率等方面具有很好的应用前景。

最早开始将光固化快速成形技术应用于砂轮制备研究的是日本立命馆大学的田中武司等^[2], 通过光固化工艺高效地制备了砂轮样品, 并通过磨削实验证明了光固化砂轮具有良好的磨削性能。浙江工业大学彭伟团队^[3-7], 研究了光固化树脂结合剂固化机理、树脂对磨粒的把持效果、添加微粉对磨具强度的影响等, 成功制备出了多种光固化树脂结合剂砂轮、切割片、丝锯等。

近年来, 随着光固化快速成型技术的不断发展, 在砂轮制备方向的研究也越来越广泛和深入。GUO L 等^[8]将紫外光固化树脂作为结合剂引入到金刚石磨料研磨盘的制备中, 将紫外光固化树脂结合剂金刚石研磨盘用于蓝宝石的加工, 可以实现固着磨粒与游离磨粒相结合的混合磨料加工, 加工后蓝宝石的表面粗糙度达到 $0.22 \mu\text{m}$, 材料去除率可达 6.19 mg/min , 相比于游离磨料研磨加工效率提高了 100%。邱燕飞^[9]对光固化快速成型技术在磨粒有序排布砂轮的制造和添加 Al_2O_3 微粉对光固化树脂结合剂砂轮磨削性能的影响进行了研究, 成功制备出了金刚石磨粒三维可控排布光固化树脂结合剂砂轮, 发现当添加质量分数为 15% 的 Al_2O_3 时, 可以有效提高砂轮的磨削性能。HUANG Q Y 等^[10]研究了紫外光固化时间和金刚石浓度对砂轮磨削性能的影响, 发现当固化时间为 80 s, 金刚石质量分数为 12.5%

的砂轮能获得最低的工件平均表面粗糙度。陈海臻^[11]基于静电喷雾和光固化快速成型原理, 将光固化树脂和金刚石微粉的混合浆料通过静电喷雾沉积在表面带有微结构的模具上, 制备出了一种具有微结构的磨具。刘菊^[12]将金刚石磨粒和光固化树脂结合剂为原料, 采用紫外光固化法制备出了一种团聚磨料高效研磨垫, 磨削实验证明该研磨垫在材料去除量、使用寿命和工件表面质量上均能达到生产要求。AI Q 等^[13]采用光固化 3D 打印技术打印出了磨粒浓度 (质量分数) 为 25% 和 50% 的带有冷却通道的结构化砂轮, 通过磨削实验表明, 含有冷却通道结构化砂轮的磨损率普遍低于无冷却通道的连续砂轮, 当磨粒浓度 (质量分数) 为 50% 时, 砂轮的加工效率和工件表面粗糙度会更好。石兴泰^[14]以光固化树脂结合剂和氧化铝磨粒为原料, 采用光固化 3D 打印机打印出了一种具有随机网格结构的平面研磨盘。

考虑到磨粒在光固化树脂中不可避免产生沉降现象, 目前光固化快速成型技术多用于磨粒粒径较小的研磨和抛光工具的制备^[15], 对于常规磨粒粒径砂轮的光固化制备研究较少。因此, 本文结合光固化快速成型和铺粉 3D 打印的优点, 提出基于磨粒-树脂浆料逐层铺设的常规磨粒粒径砂轮光固化快速制备方法, 研究混合浆料固化厚度随时间的变化规律, 磨料层单次固化厚度对磨料层-基体粘结强度、磨料层层间结合强度的影响规律, 搭建光固化树脂结合剂砂轮制备实验平台, 制备开槽结构化砂轮和连续砂轮并通过磨削实验测试两种砂轮的磨削性能。

1 磨粒-光固化树脂混合浆料固化特性测试

1.1 混合浆料制备

为了提高光固化树脂结合剂的强度, 在树脂中加入质量分数为 3% 的改性纳米 Al_2O_3 作为增强相, 用磁力搅拌机搅拌 2 h 使改性纳米 Al_2O_3 分散均匀,

超声震荡 30 min 消除气泡得到改性纳米 Al_2O_3 复合光固化树脂备用。磨粒与树脂比例参考吕涛等^[16] 在研究润滑剂对酚醛树脂结合剂砂轮的磨削性能中未添加润滑剂时 85 : 15 的比例, 将磨粒与改性纳米 Al_2O_3 复合光固化树脂放入高速分散搅拌机内混合搅拌 30 min, 使磨粒与树脂混合均匀, 得到磨粒-树脂混合浆料树脂浆料备用。

1.2 混合浆料极限固化厚度测试

磨粒-树脂浆料固化厚度的测量方法如图 1 所示, 将配制好的浆料填满 $\phi 30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的树脂盒中, 使浆料与胶盒上表面齐平, 盖上盒盖。调整紫外光源与盒盖的距离为 10 mm, 打开紫外光源, 待光强稳定后, 将容器置于紫外光下, 让紫外光从盒盖上的透光孔射入对浆料进行照射固化, 固化时间为 5~80 s, 达到预设时间后立即关闭光源, 取出已固化的浆料经高压空气吹扫并用无水乙醇清洗, 用千分尺在固化块体上随机取 5 个点测量其厚度, 取平均值作为浆料的固化厚度。

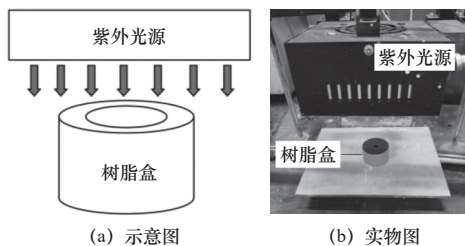


图 1 固化厚度的测量

Fig. 1 Measurement of fixed-line thickness

图 2 所示为浆料固化厚度随时间的变化规律, 从图中可以看出, 随着紫外光照射时间的增加, 浆料的固化厚度表现为先增加, 然后增加程度逐渐减小, 最后趋于稳定的趋势。当固化时间为 5~30 s 时, 浆料的固化厚度增加较为明显; 固化时间增加到 30~60 s 时, 浆料固化厚度增加程度逐渐减小; 当固化时间增加到 60 s 后, 浆料的固化厚度不再有明显增加, 趋于稳定, 此时浆料的固化厚度为 6.447 mm。这是因为当紫外光垂直射入光固化树脂时, 其能量沿照射深度呈负指数衰减, 随着深度的增加, 光固化树脂所吸收到的能量越少, 因此固化深度存在极限。

1.3 磨料层单次固化厚度对磨料层-基体粘结强度、磨料层层间结合强度的影响

光固化快速成形是采用分层堆积进行砂轮的制备, 相比于传统砂轮通过整体压制烧结的工艺, 采用堆积成形的磨料层-基体粘接强度、磨料层层间

结合强度会有所降低^[5], 且磨料层单次固化厚度与磨料层-基体粘结强度、磨料层层间结合强度之间存在关联关系。

依据 GB/T 7124—2008《胶粘剂 拉伸剪切强度的测定》标准检测磨料层-基体粘结强度和料层之间的层间结合强度^[9]。图 3 所示为测试试样示意图, 其中磨料层单次固化厚度 h 的变化范围为 0.5~1.7 mm, 利用万能材料试验机进行拉伸测试, 直至将测试试验拉断为止, 如图 3a 所示, 磨料层与基体之间最先被拉开, 以此时的最大剪切应力作为磨料层-基体粘结强度; 如图 3b 所示, 两层磨料层之间最先被拉开, 以此时的最大剪切应力作为磨料层层间结合强度。

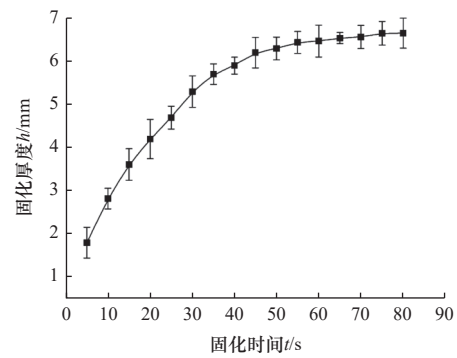


图 2 固化深度随时间的变化

Fig. 2 Change in cure depth over time

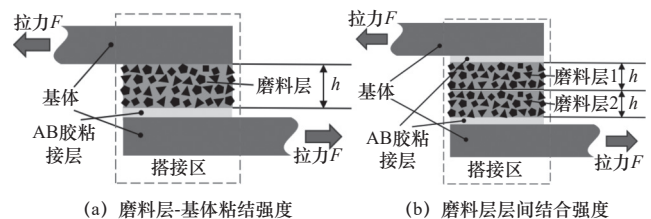


图 3 测试试样示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the test specimen

图 4 所示为磨料层-基体粘结强度、磨料层层间结合强度随磨料层单次固化厚度的变化规律, 可以看出, 磨料层-基体粘结强度和磨料层层间结合强度均随单次固化厚度的增大而减小, 且磨料层层间结合强度大于磨料层-基体粘结强度, 单次固化厚度为 0.5 mm 时, 磨料层层间结合强度为 10.43 MPa, 磨料层-基体粘结强度为 7.15 MPa。在后续砂轮的制备中选择浆料的单次铺设厚度为 0.5 mm。

2 砂轮制备

2.1 实验平台搭建

为制备光固化树脂结合剂砂轮, 基于光固化快

速成形技术逐层固化并堆积成形的原理，设计搭建了一套光固化树脂结合剂砂轮的制备实验平台，如图5所示。该实验台主要分为4个部分：移动平台，用于控制砂轮基体的横向往复移动；升降平台，用于控制砂轮基体的升降，使每层磨粒与树脂浆料固化完成后砂轮基体能精准下降一个层厚的距离，便于砂轮后一层浆料的铺设与固化；刮板，用于将铺设在基体上的浆料刮平整，确保浆料在砂轮基体表面铺设均匀；紫外光源，紫外光波长为405 nm，用于对铺设好的浆料进行照射固化。此外还有两个机械臂，用于刮板和紫外光源位置的调节。

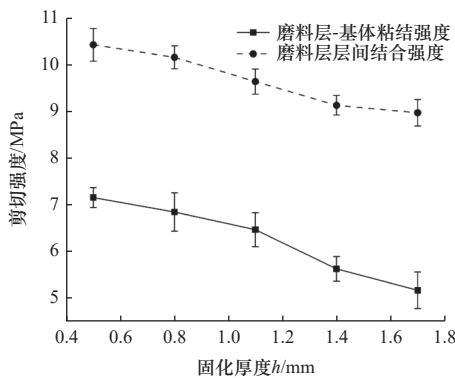


图4 磨料层单次固化厚度对砂轮强度的影响

Fig. 4 Effect of the single curing rate of the coating layer on the strength of the grinding wheel

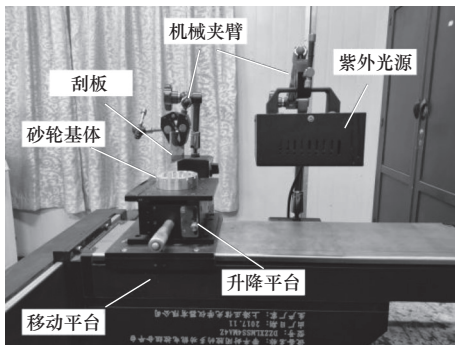


图5 砂轮制备实验平台

Fig. 5 Grinding wheel preparation experimental platform

2.2 砂轮基体设计

基于HM数控机床公司的一种端面开槽砂轮，设计制备了图6所示的两种端面砂轮基体^[17]。图6a所示为没有结构化的连续砂轮基体，基体外径为66 mm，内径为46 mm，基体总厚度为18 mm；图6b所示为带有圆弧槽的开槽结构化砂轮基体，圆弧槽宽度为4 mm，开槽深度为4 mm，开槽数量为12。两种砂轮基体材料均为铝合金，采用铣削方法进行加工。

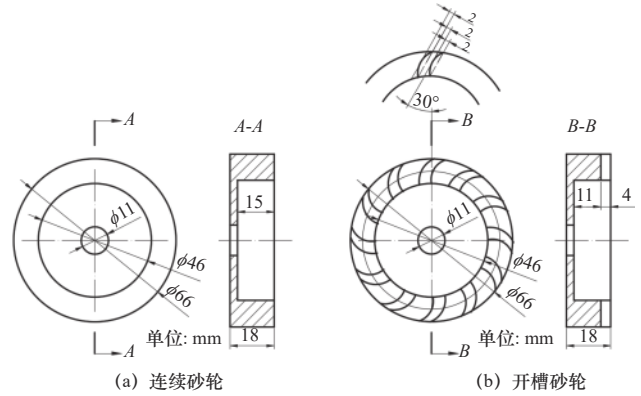
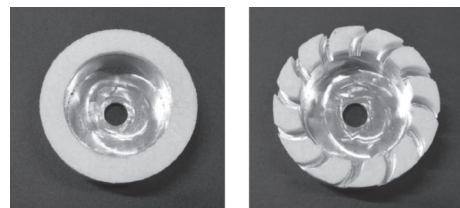


图6 砂轮基体

Fig. 6 Grinding wheel base

2.3 砂轮快速制备

根据砂轮的结构化特征加工出砂轮基体，将砂轮基体安装在精密升降台上，再将磨粒与树脂浆料铺设在砂轮基体上；调节刮板高度，使得刮板与砂轮基体表面齐平，且与砂轮基体表面的距离保持为0.5 mm，移动固化平台，使砂轮基体横向往复运动，利用刮板将铺设在砂轮基体表面的磨料树脂浆料铺平，浆料铺平后清理掉砂轮基体边缘和沟槽中多余的浆料；再通过移动平台将砂轮基体移动至紫外光源下，调节紫外光源与浆料表面距离为10 mm，打开紫外光源对浆料进行照射固化，固化时间为10 s；固化完成后，控制升降平台带动砂轮基体下降0.5 mm高度，并利用移动平台将砂轮基体移回初始位置，重复前述步骤，进行砂轮第二层的制备；以此重复，逐层堆积，直至完成砂轮的制备。实验制备的普通光固化树脂结合剂砂轮如图7a所示，磨削端面带有圆弧槽的光固化树脂结合剂开槽结构化砂轮如图7b所示。



(a) 普通连续端面砂轮 (b) 结构化端面砂轮

图7 光固化树脂结合剂砂轮

Fig. 7 Light-curing resin-bonded grinding wheels

2.4 磨削实验

磨削实验系统如图8所示，在数控加工中心（VMC850LA，常州创胜特尔数控机床设备有限公司）上开展了磨削实验，磨削方式为干磨，工件材料为45号钢，尺寸为50 mm×50 mm×20 mm，磨削参

数见表1。实验前先用单点金刚石修整笔对砂轮进行修整，单次修整深度为50 μm，修整速度为18 m/s。磨削实验过程中采用SPIKE®切削力测量和监控系统测量磨削力，采用热成像仪监测磨削温度，每组磨削参数重复3次并取平均值作为最终测量数据。工件磨削完成后采用表面粗糙度仪测量工件磨削后的表面粗糙度，每次测量5组数据并取平均值作为磨削工件的表面粗糙度。

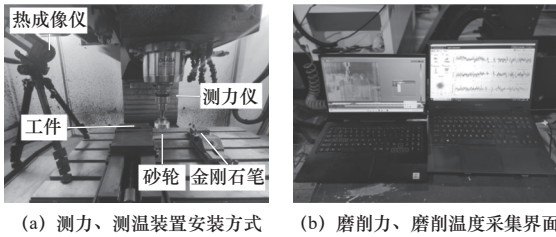


图8 磨削实验系统

Fig. 8 Grinding experimental system

表1 磨削试验条件

Tab. 1 Grinding test conditions

试验内容	参数	条件
砂轮	种类	普通固化树脂结合剂砂轮
		光固化树脂结合剂开槽结构化砂轮
	砂轮尺寸/(mm×mm×mm)	66×46×10
磨削参数	砂轮线速度 v_s /(m/s)	20
	进给速度 v_w /(mm/min)	300、600、900
	磨削深度 a_p /μm	30、60、90

3 磨削结果讨论

3.1 磨削力

图9所示为砂轮线速度 $v_s=20$ m/s，磨削深度 $a_p=30$ μm，进给速度 $v_w=600$ mm/min时开槽结构化砂

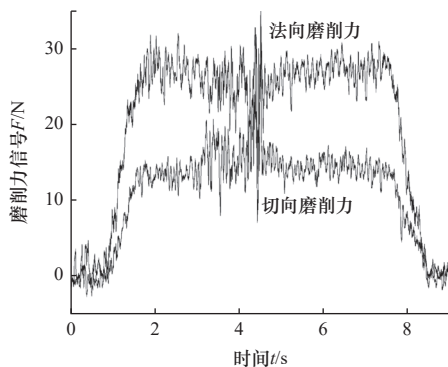


图9 磨削力信号

Fig. 9 Grinding force signal

轮磨削过程中的磨削力信号。图10所示为砂轮线速度 $v_s=20$ m/s，工件进给速度 $v_w=600$ mm/min条件下，光固化树脂结合剂连续砂轮和开槽结构化砂轮在不同磨削深度下的法向磨削力 F_n 和切向磨削力 F_t 对比。图11所示为砂轮线速度 $v_s=20$ m/s，磨削深度 $a_p=60$ μm条件下，两种砂轮在不同工件进给速度下的法向磨削力 F_n 和切向磨削力 F_t 对比。从图9中可以看出，磨削力随磨削深度的增大而增大，随着工件进给速度的增加而增大，且开槽结构化砂轮磨削力明显小于连续砂轮。这是因为随着磨削深度的增加，最大未变形切屑厚度增大，接触弧长变长，导致单颗磨粒受到的磨削力增大，参与磨削的有效磨粒数量增多，所以磨削力增大^[18]；随着工件进给速度的增加，单位时间内砂轮去除材料的体积增大，进而单颗磨粒的磨削厚度增大，从而导致了砂轮磨削力的增大^[17]；开槽结构化砂轮由于磨料层带有圆弧槽结构，拥有更大的容屑空间，参与磨削的有效磨粒数量也更少，并且由于沟槽边缘磨粒凸起较高提高了磨削时砂轮的自锐性，因而相同的磨削参数条件下，其磨削力更小^[19]。

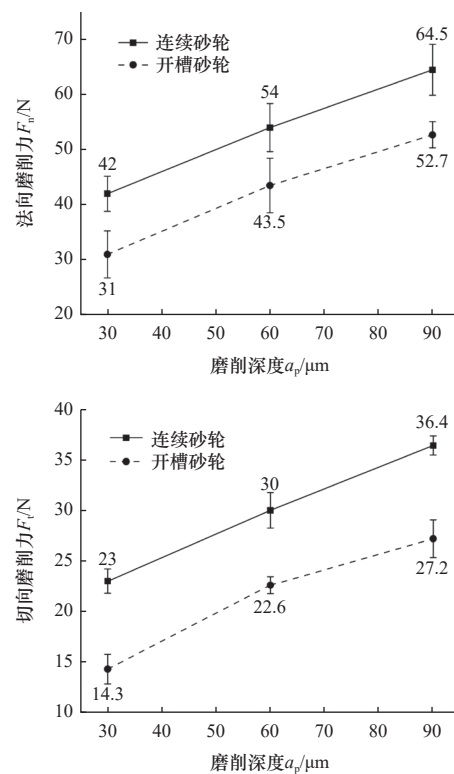


图10 磨削深度对磨削力的影响

Fig. 10 Effect of grinding depth on grinding force

3.2 磨削温度

图12所示为砂轮线速度 $v_s=20$ m/s，工件进给

速度 $v_w=600$ mm/min 条件下, 光固化树脂结合剂连续砂轮和开槽结构化砂轮在不同磨削深度下的磨削温度对比。图 13 所示为砂轮线速度 $v_s=20$ m/s, 磨削深度 $a_p=60$ μm 条件下, 两种砂轮在不同工件进给速度下的磨削温度对比。从图 13 中可以看出, 砂轮磨削温度随磨削深度的增加而升高, 随工件进给速度的增加而升高, 且开槽结构化砂轮磨削温度比连续砂轮磨削温度低 30%~40%。

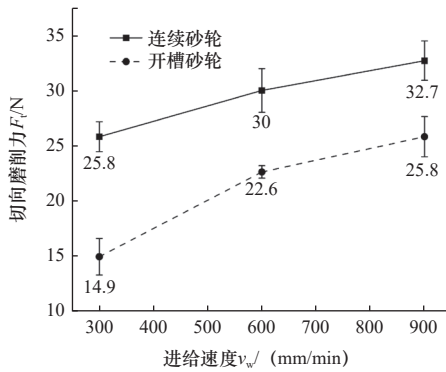
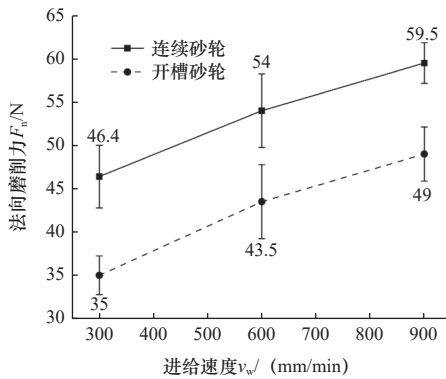


图 11 工件进给速度对磨削力的影响

Fig. 11 Effect of workpiece feed on grinding force

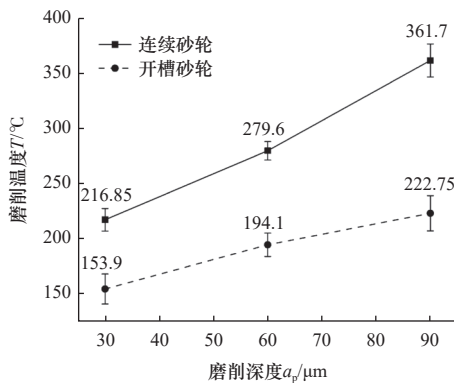


图 12 磨削深度对磨削温度的影响

Fig. 12 Effect of the grinding depth on the grinding temperature

3.3 磨削工件表面粗糙度

磨削实验完成后采用电子显微镜观察工件的表

面形貌, 图 14 所示为砂轮线速度 $v_s=20$ m/s、磨削深度 $a_p=60$ μm 、工件进给速度为 $v_w=600$ mm/min 的条件下, 经光固化树脂结合剂连续砂轮和开槽结构化砂轮磨削后工件的表面形貌。可以看出, 工件磨削后表面存在光滑区域、隆起、沟壑等特征, 与连续砂轮相比, 开槽结构化砂轮表面的有效切削刃数量减少, 单颗磨粒所承受的平均载荷增大, 经其磨削后工件表面隆起、沟壑特征较多^[20]。

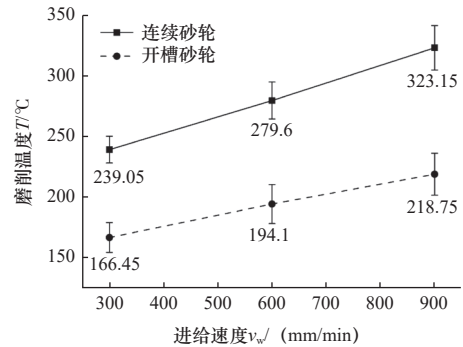


图 13 工件进给速度对磨削温度的影响

Fig. 13 Effect of workpiece feed rate on grinding temperature

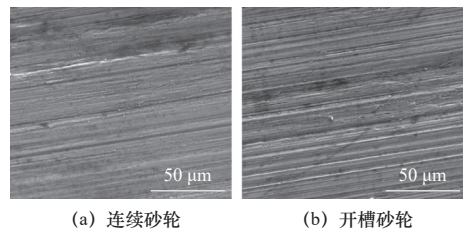


图 14 两种砂轮磨削后的工件表面形貌

Fig. 14 Surface topography of the workpiece after grinding with two grinding wheels

图 15 所示为砂轮线速度 $v_s=20$ m/s、工件进给速度 $v_w=600$ mm/min 条件下, 光固化树脂结合剂连续砂轮和开槽结构化砂轮在不同磨削深度下磨削后

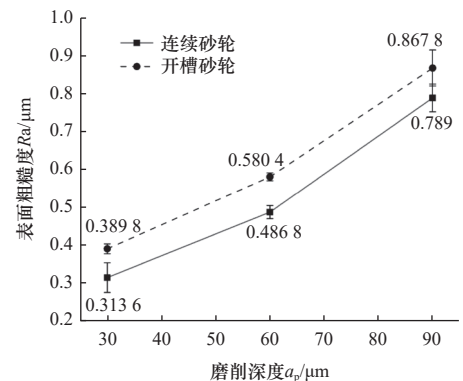


图 15 磨削深度对工件表面粗糙度的影响

Fig. 15 Effect of grinding depth on surface roughness

工件表面粗糙度的对比结果。图 16 所示为砂轮线速度 $v_s=20$ m/s、磨削深度 $a_p=60$ μm 条件下，两种砂轮在不同工件进给速度下磨削后工件表面粗糙度 R_a 的对比结果。结果表明，工件表面粗糙度随着磨削深度和进给速度的增加而增大，且开槽结构化砂轮磨削后工件表面粗糙度较连续砂轮有所增大。由于开槽结构化砂轮表面的有效切削刃数量少，有效磨粒平均切削次数低于连续砂轮，单颗磨粒的切削厚度更大且材料去除量没有连续砂轮稳定，因此开槽结构化砂轮磨削后工件表面粗糙度数值整体均高于连续砂轮^[21]。

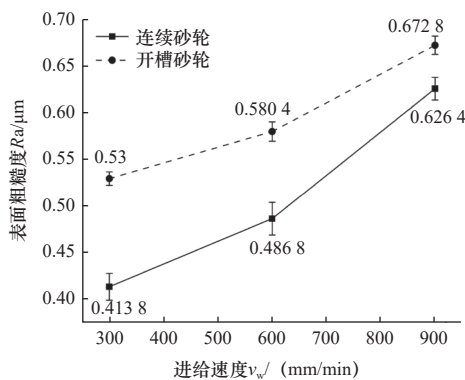


图 16 工件进给速度对工件表面粗糙度的影响

Fig. 16 Effect of workpiece feed rate on surface roughness

3.4 磨削比

采用往复干磨测试光固化树脂结合剂连续砂轮和开槽结构化砂轮的磨削比，实验条件：砂轮线速度 $v_s=20$ m/s，磨削深度 $a_p=90$ μm ，工件进给速度 $v_w=900$ mm/min，磨削时间为 30、60、90、120、150 s。实验前将所有砂轮和工件采用分析天平（XB620M，普利赛斯）称重，砂轮和工件质量分别记为 m_1 和 M_1 ；磨削完成后砂轮和工件经超声清洗 10 min 去除磨屑，烘干后砂轮和工件称重分别记为 m_2 和 M_2 。通过式（1）计算砂轮的磨削比 G ，每组实验重复 3 次取平均值作为实验结果。

$$G = \frac{M_1 - M_2}{m_1 - m_2} \quad (1)$$

图 17 所示为两种砂轮磨削比随磨削时间的变化。随着磨削时间的增加，砂轮表面磨损和堵塞情况加剧，对工件材料的去除能力下降，导致砂轮的磨削比随磨削时间的增加逐渐降低。与连续砂轮相比，开槽结构化砂轮由于其特殊的圆弧槽结构，使得砂轮表面有更大的容屑空间，减缓了砂轮的堵塞，因此其磨削比也更高。

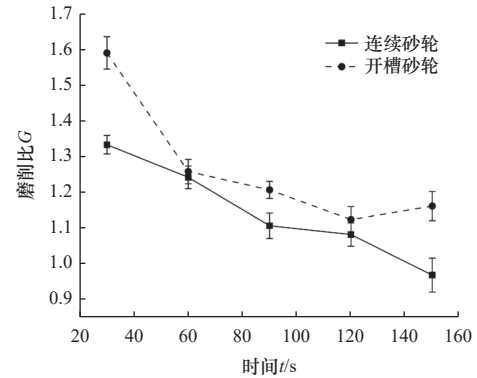


图 17 砂轮磨削比随时间的变化

Fig. 17 Change in grinding wheel grinding ratio over time

4 结语

(1) 制备了磨粒与改性纳米 Al_2O_3 复合光固化树脂比例为 85 : 15 的混合浆料，测试了浆料的极限固化厚度约为 6 mm；研究了单层固化厚度对磨料层-基体粘结强度、磨料层层间结合强度的影响，两者都随单层固化厚度的增加而减小，当单层固化厚度为 0.5 mm 时，磨料层-基体粘结强度为 7.15 MPa，磨料层层间结合强度为 10.43 MPa。

(2) 制备了磨粒粒径为 150 μm 的光固化树脂结合剂开槽结构化砂轮和连续砂轮，测试了两者砂轮的磨削性能，与连续砂轮相比开槽砂轮在降低磨削力、磨削温度，提高砂轮磨削比方面具有明显优势，但经其磨削后工件的表面粗糙度较连续砂轮会有所增大，实验验证了光固化快速成形制备开槽结构化砂轮的可行性。

后续将继续开展不同磨粒粒径、不同尺寸及结构开槽砂轮的光固化快速成形制备，光固化树脂结合剂开槽结构化砂轮与烧结开槽结构化砂轮的磨削性能对比研究，进一步验证本文所提出的砂轮制备方法的可行性。

参 考 文 献

- [1] 杨建明, 肖志文, 王永宽, 等. DLP 光固化 3D 打印精密铸造陶瓷型壳的研究 [J]. 制造技术与机床, 2021(9): 49-53, 57.
- [2] TAKESHI T, KENICHI O. Development of grinding wheels by stereolithography and investigation of their characteristics [J]. Key Engineering Materials, 2003, 460(238/239): 277-282.
- [3] 姚春燕, 彭伟, 高涛. SiO_2 微粉形分布对超薄切割砂轮片拉伸性能的影响 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2003(6): 16-18.
- [4] PENG W, GAO T, YAO C Y, et al. Research of photosensitive resin blade with metal-coated abrasive [J]. Key Engineering Materials, 2006, 536(304/305): 71-75.
- [5] 贾耀平, 姚春燕, 彭伟. 光固化树脂砂轮层间结合强度研究 [J]. 现代制造工程, 2008(9): 8-11.

- [6] 毛炜, 彭伟, 姚春燕, 等. 紫外光固化非金属芯线金刚石线锯研究 [J]. 新技术新工艺, 2008(7): 88-90.
- [7] 彭伟, 高涛, 姚春燕. 光固化树脂结合剂锯片结合机理及其应用研究 [J]. 中国机械工程, 2006, 17(20): 2148-2150, 2154.
- [8] GUO L, ZHANG X R, LEE C H, et al. An experimental study on the abrasive machining process of electronic substrate material with a novel ultraviolet-curable resin bond diamond lapping plate [J]. IEEE Access, 2019, 7: 64375-64385.
- [9] 邱燕飞. 金刚石磨粒三维可控排布树脂磨具的构造与制备 [D]. 泉州: 华侨大学, 2019.
- [10] HUANG Q Y, GUO L, MARINESCU I D. Research on the properties of resin bond wheel cured by ultraviolet light [J]. Procedia Manufacturing, 2016, 5: 259-269.
- [11] 陈海臻. 基于静电喷雾的磨粒均匀微结构磨具制备研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [12] 刘菊. 团聚磨料高效研磨垫的制备与性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [13] AI Q, KHOSRAVI J, AZARHOUSHANG B, et al. Digital light processing-based additive manufacturing of resin bonded SiC grinding wheels and their grinding performance [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(5/6): 1641-1657.
- [14] 石兴泰. 基于随机网格的平面磨具设计与性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [15] 王宗伟, 易军, 陈扬建, 等. 改性纳米 Al_2O_3 对光固化树脂强度及其磨粒把持力的实验研究 [J/OL]. 机械科学与技术, 2024, 1-9. [2024-12-04]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20240095>
- [16] 吕涛, 黄水泉, 易芳, 等. 液体润滑剂/ β -环糊精包合物为填料的酚醛树脂砂轮自润滑性能研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(17): 160-171.
- [17] 张根生. 双端面磨削接触区冷却液流场的效能分析 [D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [18] 黄保腾, 张彦彬, 王晓铭, 等. SG 砂轮磨削镍基合金 GH4169 砂轮磨损机理与磨削性能的实验评价 [J]. 表面技术, 2021, 50(12): 62-70.
- [19] 李德, 彭福远, 康忠雄. 激光宏观结构化金刚石砂轮磨削氧化铝工艺 [J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(2): 69-74.
- [20] 滕世国, 张松辉, 张晓红, 等. 不同结构化金刚石砂轮磨削碳化硅陶瓷的试验研究 [J]. 工具技术, 2021, 55(8): 38-43.
- [21] 邵立鹏, 邵恒昆, 孙江, 等. 磨削参数对合金材料加工过程中磨削力及表面粗糙度的影响 [J]. 工具技术, 2023, 57(11): 19-25.

第一作者: 李丹阳, 男, 2005 年生, 本科, 主要研究方向为智能制造。E-mail: 3093618923@qq.com

通信作者: 易军, 男, 1987 年生, 博士, 副教授, 系主任, 主要研究方向为绿色高效精密加工与智能制造, 发表论文 20 余篇, 授权专利 10 余项。E-mail: yj_hnust@163.com

(编辑 高扬)

(收修改稿日期: 2024-07-14)

论文推荐

田春苗, 季泽平, 阿勇嘎, 等. 基于GA-ACO-BP网络的机床主轴热误差预测[J]. 制造技术与机床, 2022(9): 153-161.



扫码获取全文

基于GA-ACO-BP网络的机床主轴热误差预测

田春苗 季泽平 阿勇嘎 张学炜 唐术锋 郭世杰

内蒙古工业大学机械工程学院

摘要 为解决反向传播 (BP) 神经网络建立的主轴热误差预测模型精度低、收敛速度慢和易陷入局部最优解的缺点, 利用K-means++算法和相关性分析对温度测点进行优化并提取热敏感点, 并利用遗传算法 (GA) 对蚁群进行交叉变异处理, 构建GA-ACO网络来确定最优的隐含层节点数、权值、阈值, 实现对BP神经网络拓扑结构的优化。分别建立基于BP和GA-ACO-BP网络的主轴热误差预测模型, 以双转台五轴加工中心为研究对象, 采用五点法对主轴热误差进行测量。热误差实验结果表明: K-means++算法与Person、Sperman和Kendall相关分析相结合可有效降低温度变量间的多重共线性; GA-ACO-BP模型可实现对主轴热误差的预测具有更高的预测精度。

关键词 数控机床; 主轴热误差; K-means++算法; 热误差预测; GA-ACO-BP神经网络