

PCD磨棒磨削参数对C_r/SiC磨削质量影响的试验研究

安书正¹,赵国龙¹,徐亮²,王凯²,王新永²,李军平²,李亮¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016;

2. 航天材料及工艺研究所 先进功能复合材料技术重点实验室,北京 100076)

摘要:以3D C_r/SiC复合材料为研究对象,利用钎焊聚晶金刚石磨棒在不同的磨削加工参数下,开展该材料的磨削加工试验,研究不同加工参数下磨削力、加工表面质量以及表面粗糙度的变化规律。试验研究结果表明:磨削力主要受磨削宽度影响,且随着磨削宽度的增大而增大;表面粗糙度主要受磨削深度和主轴转速影响,且随着磨削深度的增大而增大,随主轴转速的增大而减小。当磨削加工参数为主轴转速2 500 r/min、进给速度100 mm/min、磨削深度1 mm、磨削宽度2 mm时,磨削过程中的磨削力小、材料去除率高以及加工表面质量较优。

关键词:3D C_r/SiC复合材料;磨削;钎焊聚晶金刚石磨棒;磨削加工参数;加工质量

中图分类号:TG580.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)06-0006-6

Experimental Study on Effect of PCD Rod Grinding Parameters on Grinding Quality of C_r/SiC Composites

AN Shuzheng¹, ZHAO Guolong¹, XU Liang², WANG Kai², WANG Xinyong², LI Junping², LI Liang¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Key Laboratory of Advanced Functional Composites Technology, Research Institute of Aerospace Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: With 3D C_r/SiC composite material as the research object, the grinding test of the material is carried out by using polycrystalline diamond grinding rod under different grinding parameters, and the change rules of grinding force, processing surface quality and surface roughness size are studied under different processing parameters. The test results show that the grinding force is mainly affected by the grinding width, and increases along with the increase of grinding width, while the surface roughness is mostly affected by the grinding depth and spindle speed, increases with the increase of grinding depth, and decreases with the increase of spindle speed. When the grinding parameters select spindle speed at 2 500 r/min and feed speed at 100 mm/min with grinding depth as 1 mm and grinding width as 2 mm, grinding force in the grinding process is small, material removal rate is high and processing surface quality becomes better.

Keywords: 3D C_r/SiC composites; grinding; PCD grinding rod; grinding parameters; machining quality

0 引言

碳纤维增强碳化硅陶瓷基(C_r/SiC)复合材料属于连续纤维增强陶瓷基复合材料的一种。由于其综合了碳纤维优良的力学性能和碳化硅陶瓷基体良好的化学和热稳定性,被列为新一代高温热结构件材料的发展重点,尤其作为空天飞行器、导弹和卫星的防热护构件和热端部件材料有极大的潜力,已广泛应用于航空航天、火箭发动机、轻型装甲防护材料、光学系统结构件以及制动系统部件等领域^[1-3]。

由于C_r/SiC复合材料的尺寸精度和表面质量对结构件的力学性能、服役寿命和可靠性等有重要影响,目前大多数C_r/SiC复合材料构件采用净近成型技术制备,然而部分零件的尺寸精度仍然无法满足需求,所以必须进行二

次加工提高结构件精度^[4]。目前C_r/SiC复合材料的机械加工工艺包含常规机械加工、特种加工以及复合加工。国内外学者围绕刀具材料优选、工艺参数优化、材料去除机理和表面评价等开展了理论与试验研究。HU M等^[5]对二维C_r/SiC复合材料进行了铣削加工,研究了表面完整性和加工缺陷的影响因素,分析了复合材料机械加工的主要缺陷和材料去除机理,并对聚晶金刚石刀具切削性能进行评价。ZHANG X W等^[6]对2.5D C_r/SiC陶瓷基复合材料进行了铣削试验,研究了主轴转速、进给速度和切削深度和加工方向对材料可加工性的影响,并进一步探讨切屑的形成机理。湛青坡^[7]对C_r/SiC复合材料工件进行了超声振动辅助铣磨加工和普通铣磨加工,结果表明超声振动辅助铣磨加工的加工表面粗糙度明显小于普通铣磨加工。旋转超声辅助加工具有切削力低、刀具寿命长等优点,研究表明适用于硬脆材料加工^[8]。ISLAM S等^[9]开展了旋

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52075255);中央高校基本科研业务费专项资金项目(NT2021020)

第一作者简介:安书正(1994—),男,内蒙赤峰人,硕士研究生,研究方向为高效精密加工技术。

转超声面铣削 C_r/SiC 复合材料研究,建立了轴向切削力的数学模型并进行了试验验证。LIU Y 等^[10]对 C_r/SiC 复合材料进行了超声振动辅助铣削和常规铣削试验,得知超声振动铣削的金刚石涂层铣刀比传统铣削加工的更耐磨,主要磨损形式是磨料磨损,失效形式为涂层剥落。目前,提高 C_r/SiC 复合材料的加工质量和加工效率已成为国内外专家学者研究的重点。

针对 C_r/SiC 复合材料加工过程中切削力高、切削表面质量低等加工难点,本文以 C_r/SiC 复合材料为研究对象,开展 C_r/SiC 复合材料的磨削基础试验研究。本文通过不同加工参数下的磨削试验,研究 C_r/SiC 复合材料磨削力及加工后表面粗糙度随主轴转速、进给速度、磨削宽度和深度等加工参数的变化规律。结合磨削正交试验结果,以较低的磨削力和较小的表面粗糙度为目标,优选磨削加工参数,为 C_r/SiC 复合材料的绿色、高效、高质量磨削加工工艺方面提供技术支撑。

1 试验设备与方案设计

1.1 试验材料与设备

试验工件材料采用某材料有限公司生产的 C_r/SiC 复合材料(3D C_r/SiC),板材尺寸为 150 mm×25 mm×15 mm。工件实物图和示意图如图 1 和图 2 所示。工件所用的 C_r/SiC 复合材料的性能参数如表 1 所示。工件材料中每根碳纤维直径约为 4~6 μm。大量的连续碳纤维丝结合组成纤维束纱线,纤维束纱线的直径约为 1~2 mm。本试验的工件材料中包含 3 种不同纤维方向的纤维束纱线:经纱、纬纱和 z 向纱。经向纱和纬向纱相交编织成为工件材料中每层纤维层的平织面,z 向纱则垂直贯穿针刺于各层平织面。

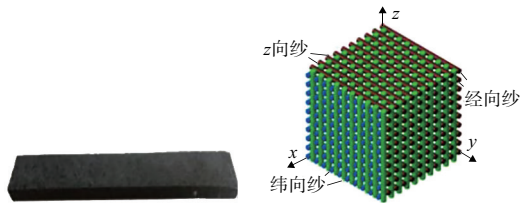


图 1 材料实物图

图 2 材料结构示意图

表 1 材料性能参数

参数	数值
体积密度/(g/cm ³)	1.75~1.85
纤维体积/%	35
表面开气孔率/%	<10
层间剪切强度/MPa	20~30
断裂韧性/(MPa·m ^{1/2})	12~15

C_r/SiC 复合材料的磨削基础试验在德国某公司生产的 DMU60mono BLOCK 五轴立式加工中心中进行,加工所用的机床设备及机床技术参数如图 3 与表 2 所示。试验中工件用精密平口钳装夹,并使用压板垫块固定于测

力仪上,再将测力仪定位安装于立式加工中心的工作台上,装夹方式如图 4 所示,保证了装夹的刚性和加工的稳定。

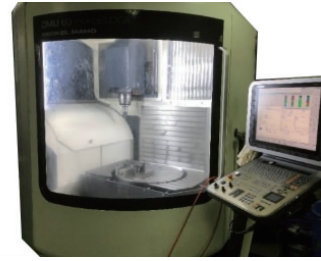


图 3 五轴立式加工中心

表 2 试验所用机床的技术参数

名称	数值
x/y/z 方向最大行程/mm	630/560/560
最大转速/(r/min)	18 000
主功率(40%DC)/kW	15/130
x/y/z 进给速度/(m/min)	30
装夹质量/kg	500



图 4 工件装夹方式

根据现有研究^[11]表明,金刚石磨粒磨棒由于耐磨性较好、硬度较高更适用于切削陶瓷等脆性材料,所以本次磨削试验选取以钎焊聚晶金刚石(PCD)为磨粒材料的磨棒,规格为 φ8×90×20,如图 5 所示,刀具总长为 90 mm,其中刀头部分的长度为 20 mm,刀头直径为 8 mm。



图 5 PCD 磨棒

1.2 试验方案设计

对 C_r/SiC 复合材料磨削加工的磨削工艺参数选定范围,其中包括主轴转速 n 、进给速度 v_f 、磨削宽度 a_e 、磨削深度 a_p 。

设置四因素四水平的 L16(4⁴) 正交表,进行 16 组 C_r/SiC 复合材料磨削正交试验。测量磨削过程的磨削力及加工后表面粗糙度,记录每组试验结果。对比分析不同加工参数对磨削力、表面粗糙度的影响。本文以低表面粗糙度、低磨削力为加工目标,从而优化出 C_r/SiC 复合材料

磨削加工较好的磨削加工参数。本文所用正交试验因素水平表如表3所示。

表3 C_r/SiC 复合材料磨削正交试验因素水平表

水平	因素			
	主轴转速 $n/(r/min)$	进给速度 $v_f/(mm/min)$	磨削深度 a_p/mm	磨削宽度 a_e/mm
1	1 000	50	0.50	2
2	1 500	75	0.75	3
3	2 000	100	1.00	4
4	2 500	125	1.25	5

1.3 材料表征

本文使用 KISTLER 9443B 压电式三向动态测力仪测量切削力。图6为 KISTLER 9443B 测力仪的力传感器。此测力仪可以测量 x 、 y 和 z 3 个方向切削力。在本研究试验中测力仪主要用来测量工件所受 x 方向磨削力 F_x (垂直于进给方向的径向力) 和 y 方向磨削力 F_y (进给方向的径向力) 以及 z 方向磨削力 F_z (轴向力)。

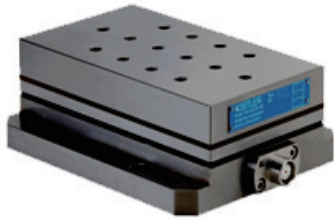


图6 KISTLER 9443B 压电式三向动态测力仪

本试验使用面粗糙度 Sa 来评价表面粗糙度,相比于 Ra 更适合微观领域评判表面粗糙度,采用 Sensofar S neox 3D 激光共聚焦显微镜测量工件加工表面粗糙度, Sensofar S neox 3D 激光共聚焦显微镜如图7所示。



图7 Sensofar S neox 3D 激光共聚焦显微镜

2 试验结果与分析

2.1 正交试验结果分析

采用四因素四水平的 L16(4⁴) 正交表进行 16 组 C_r/SiC 复合材料磨削正交试验,所得试验结果如表4所示,另外对试验结果进行极差计算,所得结果如表5所示。

表4 正交试验结果

编号	$n/(r/min)$	$v_f/(mm/min)$	a_p/mm	a_e/mm	F_x/N	F_y/N	F_z/N	$Sa/\mu m$
1	1 000	125	1.25	5	88	50	97	3.827
2	1 500	100	1.25	2	53	25	50	2.863
3	2 000	75	1.25	4	118	56	75	2.817
4	2 500	50	1.25	3	61	38	53	2.536
5	1 000	100	1.00	4	30	16	25	2.813
6	1 500	125	1.00	3	69	37	72	2.542
7	2 000	50	1.00	5	136	70	96	1.813
8	2 500	75	1.00	2	45	27	48	1.223
9	1 000	75	0.75	3	52	23	55	2.236
10	1 500	50	0.75	4	81	50	65	2.036
11	2 000	125	0.75	2	53	26	56	1.728
12	2 500	100	0.75	5	117	60	109	1.556
13	1 000	50	0.50	2	38	20	38	2.356
14	1 500	75	0.50	5	78	50	72	2.528
15	2 000	100	0.50	3	70	34	77	1.623
16	2 500	125	0.50	4	83	49	84	1.125

表5 极差计算结果

项目	数值				
F_x	k_1	52.00	79.00	67.25	47.25
	k_2	70.25	73.25	75.75	63.00
	k_3	94.25	67.50	70.00	78.00
	k_4	76.50	73.25	80.00	104.75
	R_x	42.25	11.50	12.75	57.50
F_y	m_1	27.25	44.50	38.25	24.50
	m_2	40.50	39.00	39.75	33.00
	m_3	46.50	33.75	37.50	42.75
	m_4	43.50	40.50	42.25	57.50
	R_y	19.25	10.75	4.75	33.00
F_z	d_1	53.75	63.00	67.75	48.00
	d_2	64.75	62.50	71.25	64.25
	d_3	76.00	65.25	60.25	62.25
	d_4	73.50	77.25	68.75	93.50
	R_z	19.75	14.75	11.00	45.50
Sa	g_1	2.808	2.185	1.908	2.042
	g_2	2.492	2.201	1.889	2.234
	g_3	1.995	2.213	2.097	2.197
	g_4	1.610	2.305	3.010	2.431
	R_s	1.198	0.120	1.121	0.389

2.2 磨削力

对表4中数据进行直观分析处理,获得主轴转速各水平下的磨削力的均值变化如图8所示。在转速介于1 000~2 000 r/min之间,磨削力随着主轴转速的增加不断地增加。因为随着主轴转速的增加,刀具的磨削速度增大,磨棒上单颗磨粒对材料的挤压、刻划作用增强使磨粒受到的反作用力增大,进而导致磨削力增大。但随着主轴转速继续增大,在介于2 000~2 500 r/min之间时,对应的主切削力有所下降。这是因为随着主轴转速的继续提高,磨棒每转进给量降低,导致磨削过程单颗磨粒受到的阻力有所减小,从而磨削力减小。

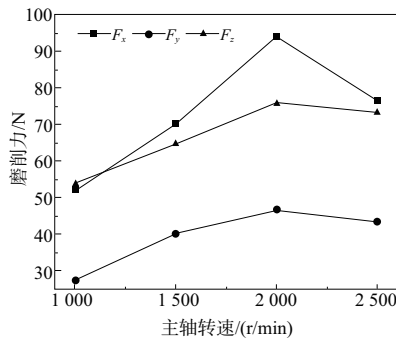


图8 不同主轴转速时的磨削力

对表4数据进行直观分析处理,获得进给速度各水平下磨削力的均值变化如图9所示。当进给速度<100 mm/min时,磨削力呈下降趋势;当进给速度>100 mm/min后,刀具上的单颗磨粒进给量增大,材料去除率增大,工件材料与刀具之间的摩擦力、挤压力都增大,导致磨削力随进给速度增大而增大。

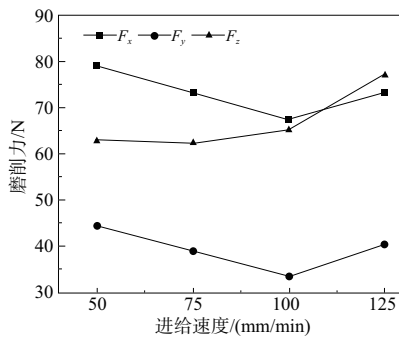


图9 不同进给速度时的磨削力

对表4中数据进行直观分析处理,获得磨削宽度各水平下磨削力的均值变化如图10所示。可以看出磨削力随着磨削宽度的增加而增大。磨削宽度增加导致磨削层面积增加,材料变形去除阻力变大,切削抗力增大,所以磨削力随着磨削宽度增大而增大。

对表4中数据进行直观分析处理,获得磨削深度各水平下磨削力的均值变化如图11所示。随着磨削深度的增加,磨削力不断增大,因为当磨削深度增大时,磨削层面积增加,磨削层的形状发生改变,导致材料变形抗力增大,材料去除率增加,从而磨削力随磨削深度增大而增大。

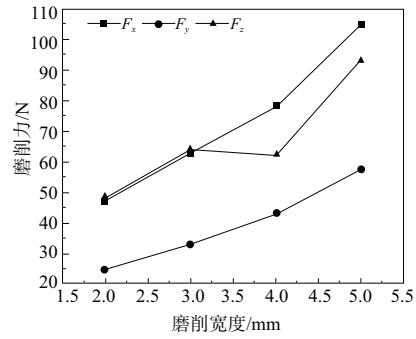


图10 不同磨削宽度时的磨削力

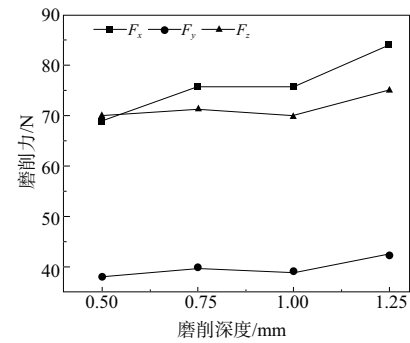


图11 不同磨削深度时的磨削力

如图12所示,得到磨削宽度对应的磨削力极差值最大,其次是主轴转速,从而可以得到主轴转速、进给速度、磨削宽度、磨削深度对C_r/SiC复合材料加工磨削力的影响为 $a_c > n > v_f > a_p$,磨削宽度和主轴转速是影响磨削力的主要因素。若仅以低磨削力为优化指标可得到最优方案为:主轴转速1 000 r/min,进给速度100 mm/min,磨削宽度2 mm,磨削深度1 mm。

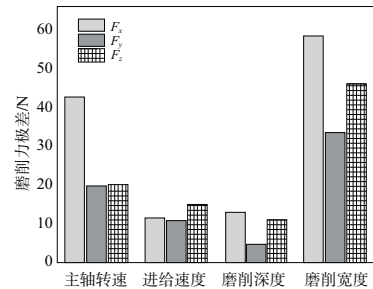


图12 磨削力极差对比

2.3 表面粗糙度

由于C_r/SiC复合材料具有各向异性,所以加工后的表面呈现不同的特点,这样导致二维评定方法不能更好地体现加工后表面轮廓特征,因此选用三维评价方法对加工后表面进行评价,表面算术平均偏差Sa作为评价参数。

图13为表面粗糙度与主轴转速的关系图。由图可知,随着主轴转速的不断增大,加工表面的粗糙度值Sa均逐渐减小。这是因为随着主轴转速增大,切削速度也随之增大,切削速度的增大会大幅提升动态有效磨粒数,降低单颗磨粒与材料的接触弧长,使磨削加工质量显著提高,

因此表面粗糙度有所降低。图14为表面粗糙度与进给速度的关系图。由图可知,表面粗糙度随着进给速度增加而增加。这是因为进给速度增大,导致单颗磨粒最大切厚变大,从而使得切削力增大,因此加工表面粗糙度提高。

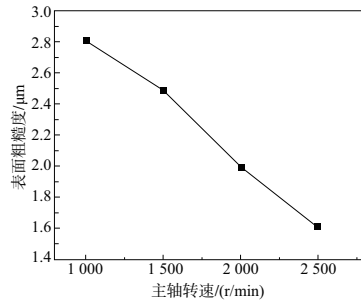


图13 不同主轴转速时的表面粗糙度

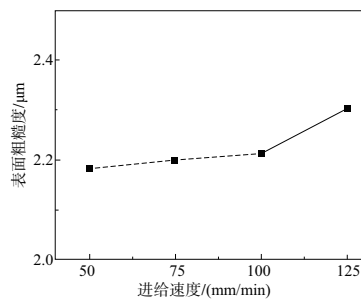


图14 不同进给速度时的表面粗糙度

图15为表面粗糙度与磨削宽度的关系图。由图可知,随着磨削宽度的增加,导致磨削层面积变大,材料变形去除阻力变大,稳定性降低,所以表面粗糙度随着宽度的增大而增大。图16为表面粗糙度与磨削深度的关系图。由图可知,随着磨削深度从0.5 mm增加到1.25 mm,表面粗糙度均一直呈增大的趋势。这是由于随着磨削深度的增加,一方面,较大的磨削深度会增大磨削过程中的磨削力,过大的磨削力会导致磨棒在加工过程中产生颤振,使加工过程稳定性降低,从而表面粗糙度增加;另一方面,磨削深度增加导致磨削温度升高,加剧了刀具的磨损,使刀具更难剪断材料中的碳纤维,增加拉断或者扭断的机会,因此表面纤维拔出、破断等缺陷增多,从而导致表面粗糙度增加。从图中还能看出随着磨削深度的增加,加工表面粗糙度的增幅均明显增加。这说明当磨削深度增大到一定程度时,对表面粗糙度影响较大,C_f/SiC复合材料不适合在磨削深度较大的条件下进行加工。

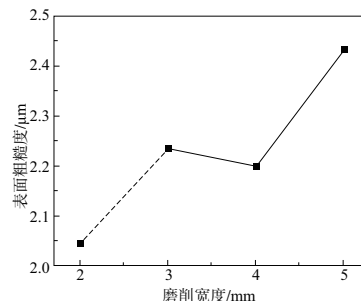


图15 不同磨削宽度时的表面粗糙度

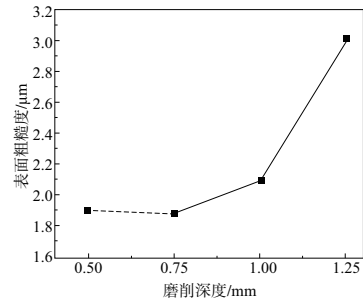


图16 不同磨削深度时的表面粗糙度

如图17所示,得到磨削深度和主轴转速对应的表面粗糙度极差值最大,其次是磨削宽度,从而得到主轴转速、进给速度、磨削宽度、磨削深度对C_f/SiC复合材料加工后表面质量影响为 $n > a_p > a_e > v_f$,磨削深度和主轴转速是影响表面粗糙度的主要影响因素。若仅以低表面粗糙度为优化指标可得到最优方案为:主轴转速2500 r/min,进给速度50 mm/min,磨削宽度2 mm,磨削深度1 mm。

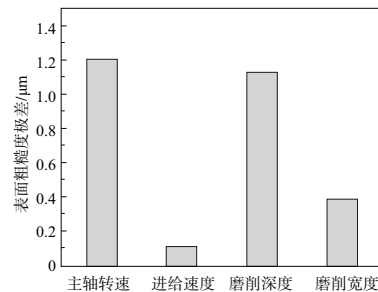


图17 表面粗糙度极差对比

2.4 参数优化组合

本次试验是双指标正交试验,试验评价指标为表面粗糙度、磨削力,以低表面粗糙度、低磨削力为优化指标。以上两指标单独分析所得到优化条件不一致,必须根据因素主次综合考虑,以确定最佳工艺。首先,对于主轴转速,主轴转速越大,表面粗糙度越小,当主轴转速达到2500 r/min时,表面粗糙度为最小,表面粗糙度较1000 r/min时降低74%,同时磨削力也相对较小,因为表面粗糙度作为主要评价指标,所以主轴转速选取2500 r/min。其次针对进给速度,进给速度为100 mm/min时,表面粗糙度和磨削力较50 mm/min变化较小,但材料去除率会提升1倍,所以进给速度选取100 mm/min。因此最优组合方案为主轴转速2500 r/min,进给速度100 mm/min,磨削深度1 mm,磨削宽度2 mm。

采用最优组合方案磨削C_f/SiC复合材料时,磨削加工表面三维形貌如图18(a)所示;采用主轴转速2500 r/min,进给速度50 mm/min,磨削宽度2 mm,磨削深度1 mm时,磨削加工表面三维形貌如图18(b)所示;采用主轴转速1000 r/min,进给速度50 mm/min,磨削宽度2 mm,磨削深度1 mm时,磨削加工表面三维形貌如图18(c)所示。通过图18(a)和图18(b)的对比可以看出,当进给速度由50 mm/min增大到100 mm/min时,加工表面变化较小,表面粗糙度分别为1.855 μm和1.893 μm,表面粗糙度变化

较小。通过图 18(b)和图 18(c)的对比可以看出,当主轴转速由 1 000 r/min 增加到 2 500 r/min 时,表面粗糙度由 2.436 μm 减小到 1.855 μm,加工表面纤维拔出、露头及界面脱粘等缺陷明显减少,转速的增加使加工质量得以改善。

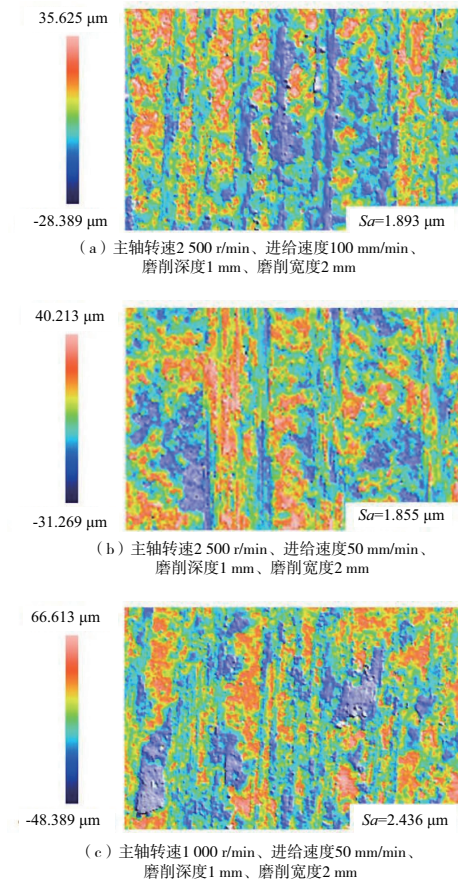


图 18 磨削加工表面三维形貌图

3 结语

1) 磨削 C_f/SiC 复合材料时, x 方向的磨削力和 z 方向磨削力均远高于 y 方向磨削力; 主轴转速、进给速度、磨削宽度、磨削深度等加工参数变化对 F_x 和 F_z 的影响最大, 而 F_y 变化不明显。磨削 C_f/SiC 复合材料时, 磨削力随着主轴转速的增大, 先增大后减小; 随着进给速度的增大, 先减小后增大; 随着磨削深度和磨削宽度的增大而增大。

2) 磨削 C_f/SiC 复合材料时, 随着主轴转速的增大, 表面粗糙度减小。随着进给速度、磨削深度、磨削宽度的增

大, 表面粗糙度增大。4 个加工参数中磨削宽度对磨削力影响最大, 磨削深度和主轴转速对表面粗糙度影响最大。选取较大主轴转速、较小磨削宽度, 较小磨削深度可以降低磨削力, 提高表面质量。

3) 磨削加工参数选取主轴转速 2 500 r/min、进给速度 100 mm/min、磨削深度 1 mm、磨削宽度 2 mm 时, 切削过程中的切削力较低, 去除率、切削表面质量较高, 可作为切削用量优化工艺方案的优选。

参考文献:

- [1] 李专, 肖鹏, 熊翔. 连续纤维增强陶瓷基复合材料的研究进展[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2007, 12(1): 13-19.
- [2] 张立峰, 王盛, 乔伟林, 等. 单向复合材料 C/SiC 平面磨削力实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(4): 1155-1159, 1165.
- [3] GAVALDA DIAZ O, GARCIA LUNA G, LIAO Z R, et al. The new challenges of machining ceramic matrix composites (CMCs): review of surface integrity[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 139: 24-36.
- [4] WANG H J, SUN J, LI J F, et al. Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(9/10/11/12): 1517-1525.
- [5] HU M, MING W W, AN Q L, et al. Experimental study on milling performance of 2D C/SiC composites using polycrystalline diamond tools[J]. Ceramics International, 2019, 45(8): 10581-10588.
- [6] ZHANG X W, YU T B, LI M, et al. Effect of machining parameters on the milling process of 2.5D C/SiC ceramic matrix composites [J]. Machining Science and Technology, 2020, 24(2): 227-244.
- [7] 湛青坡. 超声振动辅助铣磨三维针刺 C/SiC 复合材料加工工艺研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [8] O'TOOLE L, KANG C W, FANG F Z. Advances in rotary ultrasonic-assisted machining [J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2020, 3(1): 1-25.
- [9] ISLAM S, YUAN S M, LI Z. A cutting force prediction model, experimental studies, and optimization of cutting parameters for rotary ultrasonic face milling of C/SiC composites[J]. Applied Composite Materials, 2020, 27(4): 407-431.
- [10] LIU Y, LIU Z B, WANG X B, et al. Experimental study on tool wear in ultrasonic vibration-assisted milling of C/SiC composites [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(1/2): 425-436.
- [11] 毕铭智. C/SiC 复合材料钻、铣加工技术的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

收稿日期: 2021-07-30