

2.5D C_f/SiC 复合材料微尺度磨削试验研究

李远峰, 温泉, 巩亚东, 唐本甲

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为提高2.5D C_f/SiC复合材料在微磨削加工中的表面质量,使用500#金刚石磨粒、直径为0.9 mm的电镀微磨具对其进行3个因素5个水平的微磨削正交试验。通过极差与方差分析微磨削速度 v_s 、磨削深度 a_p 和进给速度 v_w 对磨削性能评价参数(磨削力、表面粗糙度、表面形貌)影响的主次顺序;通过不同水平下的试验结果分析磨削性能评价参数随工艺参数的变化规律。结果表明,磨削深度对磨削性能影响最大,进给速度影响最小;当增大磨削深度与进给速度时,表面粗糙度及磨削力逐渐增大,表面缺陷较多;当增大微磨削速度时,表面粗糙度及磨削力逐渐减小,表面形貌平整均匀,缺陷较少。

关键词: 2.5D C_f/SiC 复合材料;微磨削;磨削力;表面粗糙度;表面形貌

中图分类号: TH 161 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)08-1143-07

Experimental Study on Micro-scale Grinding of 2.5D C_f/SiC Composites

LI Yuan-feng, WEN Quan, GONG Ya-dong, TANG Ben-jia

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: GONG Ya-dong, E-mail: Gongyd@mail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to improve the surface quality of 2.5D C_f/SiC composites in micro-grinding, a three-factor and five-level micro-grinding orthogonal experiment was carried out with 500# diamond abrasive and 0.9 mm diameter electroplated micro-grinder. The influence of micro-grinding speed v_s , grinding depth a_p and feed speed v_w on the grinding performance evaluation parameters (grinding force, surface roughness and surface morphology) was analyzed by range and variance. The variation law of grinding performance evaluation parameters with process parameters was analyzed through the test results at different levels. The results showed that the grinding depth has the greatest influence on grinding performance, and the feed speed has the least influence. When the grinding depth and feed speed increase, the surface roughness and grinding force gradually increase, and there are more surface defects; when the micro-grinding speed is increased, the surface roughness and grinding force gradually decrease, the surface morphology is flat and uniform, and there are fewer defects.

Key words: 2.5D C_f/SiC composite; micro-grinding; grinding force; surface roughness; surface topography

碳纤维增强碳化硅陶瓷基(C_f/SiC)复合材料具有优异的高温力学性能和极端环境下良好的稳定性,在航空航天、热结构、原子能等领域具有广泛应用,如航空发动机燃烧室,发动机喷管锥形中心等^[1-2]。但C_f/SiC复合材料的高硬脆、多相和各向异性等特点使其在加工中表

面容易产生脆性裂纹、界面脱粘、纤维拔出等缺陷。目前,C_f/SiC复合材料加工技术的研究主要集中在机械加工、特种加工以及复合加工3个方面^[3]。但是采用电火花加工、激光加工、超声加工以及复合加工等方法的加工效率低、生产成本低,所以磨削仍然是C_f/SiC复合材料广泛采用的

收稿日期: 2023-03-31

基金项目: 国家自然科学基金联合基金资助项目(U1908230)。

作者简介: 李远峰(1998-),男,辽宁朝阳人,东北大学硕士研究生; 巩亚东(1958-),男,辽宁本溪人,东北大学教授,博士生导师。

精密加工方法^[4].

国内外学者对 C_f/SiC 复合材料的磨削加工进行了很多研究. Qu 等^[5]针对单向 C_f/SiC 复合材料建立了三种失效模型,基于平面磨削试验结果对材料的去除机理进行了详细阐述. Zhang 等^[6]研究了单向 C_f/SiC 复合材料平面磨削力的影响因素,通过平面磨削试验建立了基于多指数函数法的磨削力模型,有效预测了磨削力. Tawakoli 等^[7]设计研制了一种分段砂轮,通过减少静态切削刃从而减少摩擦和耕犁,使比磨削能降低,显著降低了法向和切向磨削力. Liu 等^[8]研究了磨削中纤维的不同取向对 2D C_f/SiC 复合材料加工后表面微观形貌的影响,分析了各个纤维方向的去除机理. Cao 等^[9]通过 2D SiO_2/SiO_2 复合材料磨削试验,分析了材料磨削表面形貌、表面支撑特性和波峰分布,得出各工艺参数对表面微观结构的影响规律. Choudhary 等^[10]对 2.5D C_f/SiC 复合材料进行高速磨削,得出在 200 m/s 的磨削速度下,纤维和基体的去除方式由脆性断裂变为剪切断裂,磨削后的缺陷可以减少 60%. Zhou 等^[11]采用激光诱导烧蚀辅助磨削 C_f/SiC 复合材料,通过激光诱导烧蚀使材料表面发生化学变化,从而使产生的烧结产物更易磨削去除. Ding 等^[12]利用超声振动辅助磨削加工纤维增强陶瓷基材料,对比传统磨削加工后的表面质量的差异.

国内外相关研究大多集中在单向 C_f/SiC 复合材料的常规尺度磨削方面,对 2.5D C_f/SiC 复合材料进行微尺度磨削的相关研究较少. 2.5D C_f/SiC 复合材料由于增加了针刺结构,层间力学性能得到增强,在微型零件的加工制造领域具有良好的应用前景.然而,由于存在尺寸效应等因素,微尺度磨削过程中材料的去除方式相比于传统的磨削加工有较大不同.目前,微型零件表面质量要求日益增高,为了满足该应用需求,本文对 2.5D C_f/SiC 复合材料进行微尺度磨削试验,通过测量的数据分析微磨削工艺参数对磨削性能评价参数的影响程度与规律,从而提高材料的表面质量,延长微型零件的使用寿命.

1 2.5D C_f/SiC 复合材料微磨削试验

1.1 试验材料、加工与检测设备

待加工材料为 2.5D C_f/SiC 复合材料,其截面的微观组织形貌如图 1 所示,经向纤维、纬向纤维和针刺结构编织于 SiC 陶瓷中,材料的性能参

数^[5]如表 1 所示;试验加工设备为 JX-1A 微尺度精密磨床,见图 2a,磨削深度最小可达到 1 μm ;刀具采用直径 0.9 mm、500#金刚石磨粒的电镀微磨具,见图 2b;检测设备包括 Kistler 9257B 三向测力仪(分辨率为 10^{-7} N)、Kenyence VHX-1000E 超景深显微镜、Olympus OLS4100 3D 激光共聚焦显微镜.

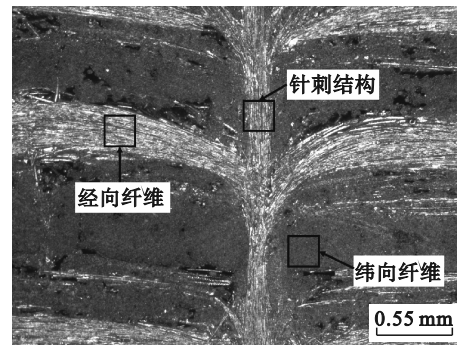


图 1 2.5D C_f/SiC 复合材料截面微观形貌

Fig. 1 Cross-section microstructure of 2.5D C_f/SiC composites

表 1 2.5D C_f/SiC 复合材料性能参数

Table 1 Performance parameters of 2.5D C_f/SiC composites

参数	数值
抗拉强度/MPa	280
抗弯强度/MPa	220
密度/($g \cdot cm^{-3}$)	2.0
纤维直径/ μm	7
碳纤维体积分数/%	37

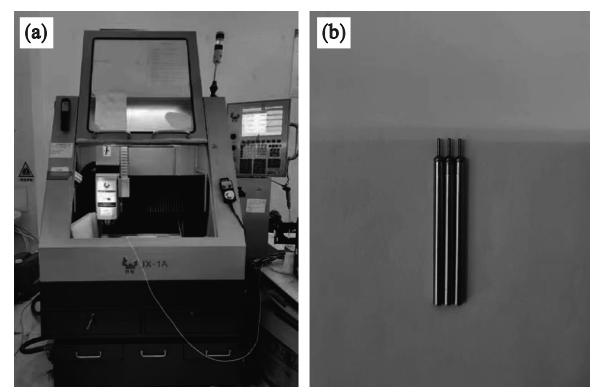


图 2 JX-1A 微尺度精密磨床与微磨具

Fig. 2 JX-1A micro-scale precision grinding machine and micro-grinding tools

(a)—磨床; (b)—微磨具.

1.2 试验方案

本文选择微磨削速度 v_s 、磨削深度 a_p 和进给速度 v_w 3 个因素 5 个水平对 2.5D C_f/SiC 复合材料

进行微尺度磨削正交试验,探究各个因素对磨削性能评价参数影响的相关性与规律,试验方案如表 2 所示.为了准确保证微磨削试验中的实际磨削深度,在正式试验开始前,先采用直径 3 mm 的磨具将 2.5D C_f/SiC 复合材料进行预磨平.然后,将千分表电磁吸附在机床主轴上,分别使千分表顶针与复合材料待加工表面的上、中、下 3 个位置接触,移动机床工作台做进给运动.在 3 个位置的移动过程中,千分表指针的摆动量均小于 1 μm,说明机床进给运动方向与待加工表面之间的平行度误差小于 1 μm.最后,再用直径 0.9 mm 的电镀微磨具,按照试验方案中的参数进行微磨削.为了减小随机误差,在试验过程中,每组试验参数进行 5 次平行试验,对磨削力与表面粗糙度的测量结果取平均值,并拍摄加工后的表面微观形貌.试验搭建的微磨削试验台如图 3 所示.另外,考虑到磨具磨损会对试验结果有影响,每组参数的试验结束后便更换微磨具.第 5 次试验前后(工艺参数为: $v_s=0.471$ m/s, $a_p=15$ μm, $v_w=220$ μm/s)微磨具的表面形貌如图 4 所示,可以看出单次试

验后的磨具表面有少量划痕,整体磨损情况并不明显,故可以排除磨具磨损对试验结果的影响.

表 2 正交试验方案
Table 2 Orthogonal experiment scheme

因素	水平				
	1	2	3	4	5
$v_s/(m \cdot s^{-1})$	0.471	0.942	1.414	1.885	2.356
$a_p/\mu m$	3	6	9	12	15
$v_w/(\mu m \cdot s^{-1})$	20	70	120	170	220

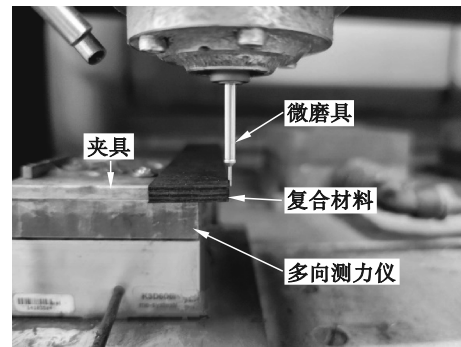


图 3 微磨削试验台

Fig. 3 Micro-grinding experimental platform

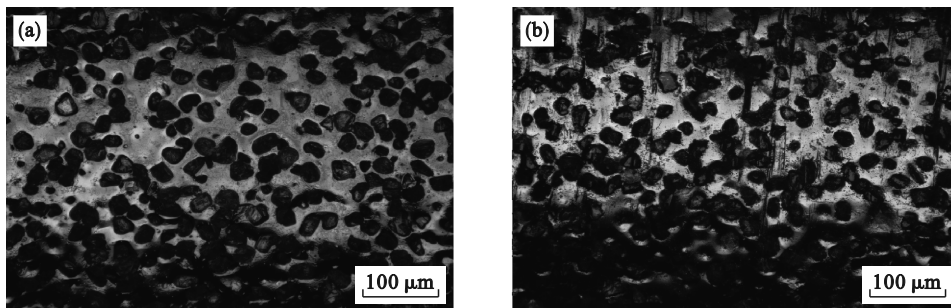


图 4 试验前后微磨具表面形貌对比

Fig. 4 Comparison of surface morphology of micro-grinding tools

(a) — 未磨削的磨具表面; (b) — 单次试验后的磨具表面.

2 试验结果与讨论

2.1 磨削参数对磨削力的影响

2.5D C_f/SiC 复合材料微磨削过程中的法向磨削力 F_n 与切向磨削力 F_t , 采用 Kistler 9257B 三向测力仪进行测量, 测量结果如表 3 所示. 为研究磨削工艺参数对 2.5D C_f/SiC 复合材料微磨削力的影响, 计算表 3 中 F_n 与 F_t 的极差与方差, 如表 4 所示. 其中 K_{ij} 为 i 因素在同一水平 j 下的磨削力之和; X_{ij} 为 i 因素在同一水平 j 下的磨削力的平均值; R 为 X_{1j} 到 X_{5j} 范围内数据的极差; e_{var} 为 X_{1j} 到 X_{5j} 范围内数据的方差^[5].

由表 4 可得, 无论是切向还是法向磨削力, 磨

削深度对应的极差与方差都是最大, 即磨削深度对于切向与法向磨削力的影响最大, 微磨削速度影响次之, 进给速度的影响最小. 此外, 为分析磨削参数对 2.5D C_f/SiC 复合材料微磨削过程中磨削力的影响规律, 由表 4 中的显著性结果, 绘制磨削力随各工艺参数的变化曲线如图 5 所示.

由图 5a 可知, 2.5D C_f/SiC 复合材料微磨削过程中的磨削力随微磨削速度 v_s 的增大而减小. 当 v_s 从 0.471 m/s 增加到 2.356 m/s 时, F_n 从 0.810 N 降低到 0.667 N, F_t 从 0.564 N 降低到 0.474 N. 由图 5b 可知, 微磨削过程中的磨削力随磨削深度 a_p 的增大而增大. 当 a_p 由 3 μm 增加到 15 μm 时, F_n 从 0.461 N 增加到 1.006 N, F_t 从 0.337 N 增加到 0.699 N. 由图 5c 可知, 微磨削过程中的磨削力随

表 3 2.5D C_r/SiC 复合材料微尺度磨削试验结果
Table 3 Micro-scale grinding experiment results of 2.5D C_r/SiC composites

试验序号	v_s m·s ⁻¹	a_p /μm	v_w μm·s ⁻¹	F_n /N	F_t /N	R_a /μm
1	0.471	3	20	0.420	0.327	1.014
2	0.471	6	70	0.598	0.425	1.316
3	0.471	9	120	0.818	0.561	1.729
4	0.471	12	170	0.985	0.675	2.091
5	0.471	15	220	1.231	0.830	2.613
6	0.942	3	70	0.458	0.341	1.056
7	0.942	6	120	0.604	0.433	1.323
8	0.942	9	170	0.796	0.582	1.810
9	0.942	12	220	0.889	0.632	1.962
10	0.942	15	20	1.026	0.703	2.183
11	1.414	3	120	0.503	0.355	1.125
12	1.414	6	170	0.618	0.441	1.367
13	1.414	9	220	0.788	0.560	1.742
14	1.414	12	20	0.806	0.568	1.761
15	1.414	15	70	0.931	0.654	2.024
16	1.885	3	170	0.486	0.348	1.079
17	1.885	6	220	0.524	0.377	1.165
18	1.885	9	20	0.716	0.511	1.585
19	1.885	12	70	0.801	0.559	1.736
20	1.885	15	120	0.928	0.663	2.051
21	2.356	3	220	0.438	0.315	0.971
22	2.356	6	20	0.481	0.334	1.034
23	2.356	9	70	0.695	0.498	1.542
24	2.356	12	120	0.808	0.575	1.784
25	2.356	15	170	0.912	0.647	2.005

注: R_a 为复合材料加工后的表面粗糙度。

表 4 磨削力显著性分析
Table 4 Significance analysis of grinding force

参数	F_n /N			F_t /N		
	v_s	a_p	v_w	v_s	a_p	v_w
K_{1j}	4.052	2.305	3.449	2.818	1.686	2.443
K_{2j}	3.773	2.852	3.483	2.691	2.010	2.477
K_{3j}	3.646	3.813	3.661	2.578	2.712	2.587
K_{4j}	3.455	4.289	3.797	2.458	3.009	2.693
K_{5j}	3.334	5.028	3.870	2.369	3.497	2.714
X_{1j}	0.810	0.461	0.690	0.564	0.337	0.489
X_{2j}	0.755	0.565	0.697	0.538	0.402	0.495
X_{3j}	0.729	0.763	0.732	0.516	0.542	0.517
X_{4j}	0.691	0.858	0.759	0.492	0.602	0.539
X_{5j}	0.667	1.006	0.774	0.474	0.699	0.543
R	0.143	0.545	0.084	0.090	0.362	0.054
e_{var}	0.025	0.386	0.011	0.010	0.173	0.005

进给速度 v_w 的增大而增大。当 v_w 从 20 μm/s 增加到 220 μm/s, F_n 从 0.690 N 增加到 0.774 N, F_t 从 0.489 N 增加到 0.543 N。通过分析磨削力随磨削参数变化规律得出: 当微磨削速度增大时, 单位时间内更多磨粒对材料进行磨削加工, 每个磨粒的最大未变形切屑厚度 h_m 变小, 总的切向与法向磨削力减小^[13]。当磨削深度与进给速度增大时, 微磨具上单个磨粒的切削深度增加, 与复合材料接触时碰撞速度增大, 导致单磨粒的作用力增大, 所以总的切向与法向磨削力随之增大。

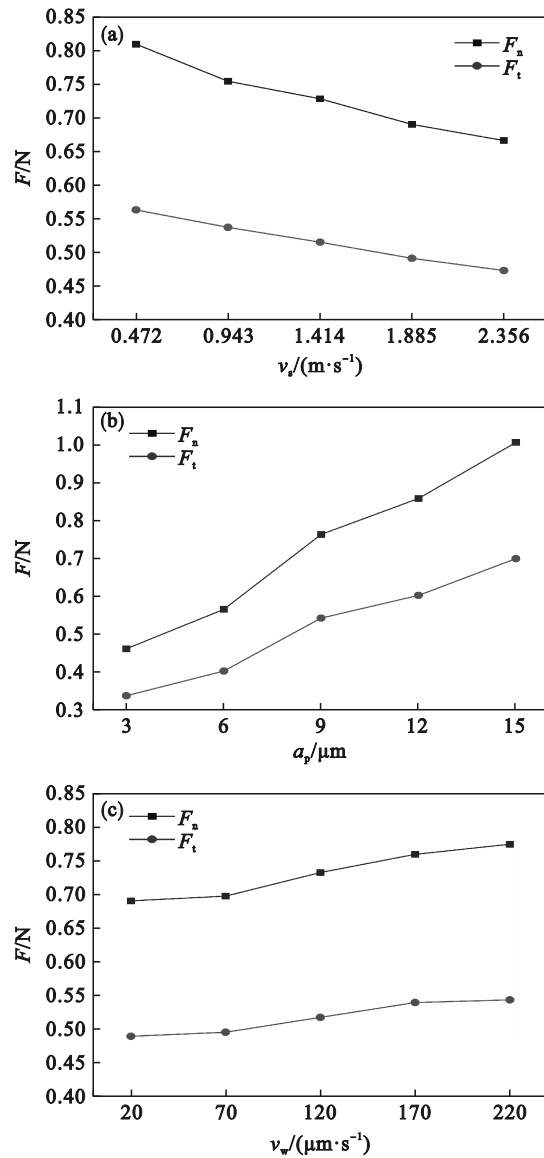


图 5 磨削参数对磨削力的影响

Fig. 5 Effect of grinding parameters on grinding force (a)—磨削速度 v_s ; (b)—磨削深度 a_p ; (c)—进给速度 v_w 。

2.2 磨削参数对表面形貌的影响

对于 2.5D C_r/SiC 复合材料微磨削后的表面, 采用 Kenyence VHX-1000E 超景深显微镜对表面形貌进行观测。当磨削深度为 3 μm、磨削速度

为 0.942 m/s、进给速度为 70 μm/s 时,表面形貌如图 6a 所示,磨粒切削形成的沟槽较浅,隆起较低,划痕均匀,表面缺陷较少;当磨削速度与进给速度不变,磨削深度增加到 15 μm 时,表面形貌如图 6b 所示,磨粒切削形成的沟槽较深,隆起较大,划痕变得不均匀,表面沟壑、凹坑等缺陷区域增多.这是因为随着磨削深度的增大,单颗磨粒对材料表面的划切深度增加,增大了加工表面的高度差;磨削深度增大后,材料发生脆性去除时,复合材料表面产生更多的微裂纹,微裂纹无规则扩展产生大量横向裂纹与纵向裂纹,这些裂纹延伸至复合材料的亚表面更深处相交,使得材料被去除,导致产生较多的表面缺陷,如凹坑、沟壑等,表面质量变差;而且磨削深度增大,微磨具排屑困难,磨屑堆积导致磨粒不能进行有效磨削,使得微磨削后的表面质量变差.当磨削深度和进

给速度相同时,不同磨削速度下获得的材料表面形貌如图 7 所示.可见,随着微磨削速度增大,材料表面微观形貌平整,划痕均匀,沟槽较浅.微磨削速度增大意味着单位时间内磨粒对工件表面的磨削次数增加,使得加工后工件表面平整.当磨削速度和磨削深度不变,不同进给速度下获得的材料表面形貌如图 8 所示.进给速度增大,使得微磨削过程中磨粒与碳纤维、碳化硅基体接触时的碰撞速度较大,即施加给复合材料的能量较大,这部分能量在复合材料脆性去除的过程中,会使材料表面产生更多的微裂纹并不断扩展,能量被消耗,更多微裂纹扩展相交后,材料被去除,导致加工后的表面留下沟壑等缺陷,表面质量变差.但由于进给速度相对于磨具线速度来说较小,故表面形貌差异不明显,表面形貌特征接近.

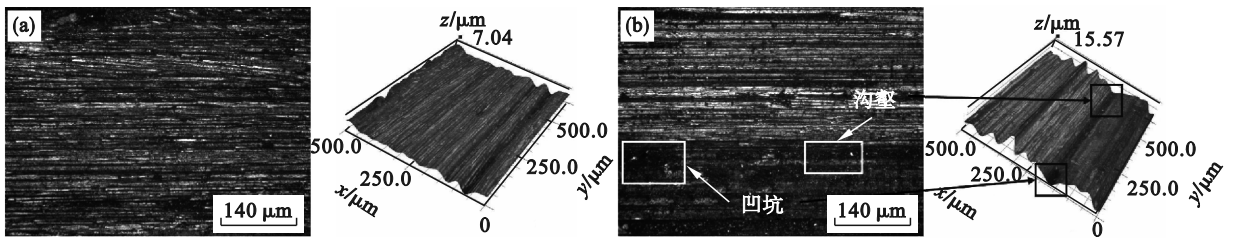


图 6 磨削深度对表面形貌的影响
Fig. 6 Effect of grinding depth on surface morphology
(a)—3 μm; (b)—15 μm.

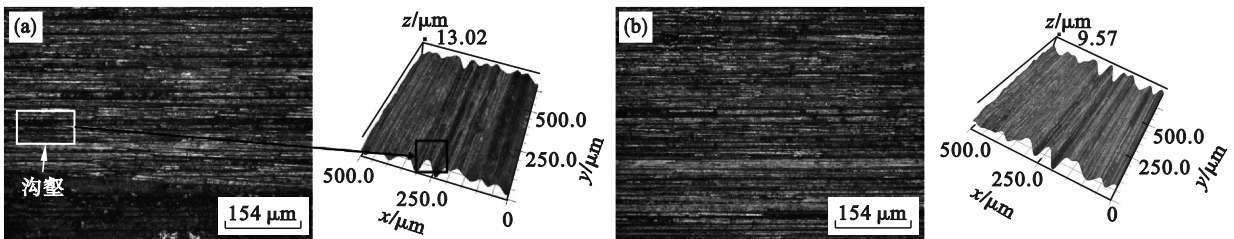


图 7 磨削速度对表面形貌的影响
Fig. 7 Effect of grinding speed on surface morphology
(a)—0.471 m/s; (b)—2.356 m/s.

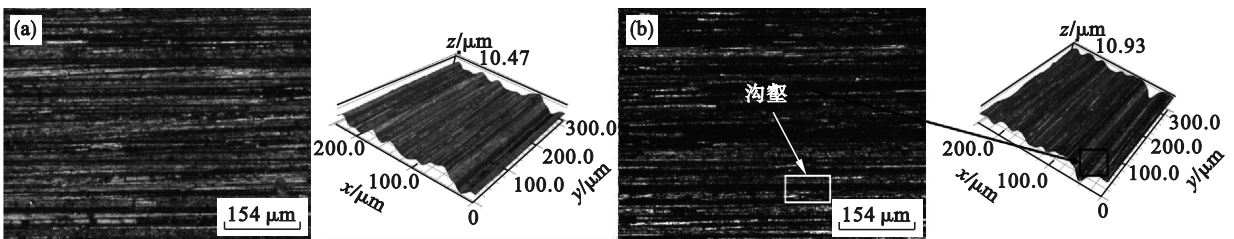


图 8 进给速度对表面形貌的影响
Fig. 8 Effect of feed speed on surface morphology
(a)—20 μm/s; (b)—220 μm/s.

2.3 磨削参数对表面粗糙度的影响

采用 Olympus OLS4100 3D 激光共聚焦显微镜测量 2.5D C_f/SiC 复合材料微磨削后的表面粗糙度,测量结果见表 3.由表 3 可以看出,在本次试验参数范围内,表面粗糙度 R_a 的最小值为 0.971 μm ,意味着此时表面质量最好,对应的磨削参数为:微磨削速度 $v_s=2.356 \text{ m/s}$,磨削深度 $a_p=3 \mu\text{m}$,进给速度 $v_w=220 \mu\text{m/s}$.

采用与 2.1 节中磨削力的数据处理相类似的方式,将表面粗糙度的数值进行分组,计算同一因素不同水平下的表面粗糙度 R_a 之和及其极差 R 与方差 e_{var} ,结果如表 5 所示.

表 5 表面粗糙度显著性分析
Table 5 Significance analysis of surface roughness

参数	$R_a/\mu\text{m}$		
	v_s	a_p	v_w
K_{1j}	8.763	5.245	7.577
K_{2j}	8.334	6.205	7.674
K_{3j}	8.019	8.408	8.012
K_{4j}	7.616	9.334	8.352
K_{5j}	7.336	10.876	8.453
X_{1j}	1.753	1.049	1.515
X_{2j}	1.667	1.241	1.535
X_{3j}	1.604	1.682	1.602
X_{4j}	1.523	1.867	1.670
X_{5j}	1.467	2.175	1.691
R	0.286	1.126	0.176
e_{var}	0.010 3	0.168 2	0.004 9

由表 5 可得,磨削深度对应的极差与方差最大,微磨削速度次之,进给速度最小.因此,磨削深度对表面粗糙度的影响最大,进给速度的影响最小,所以在进行 2.5D C_f/SiC 复合材料微尺度磨削加工时,选择合理的磨削深度能够显著地控制加工后复合材料的表面粗糙度;同时,为了提高加工效率,可适当地提高进给速度.

为进一步分析微磨削工艺参数对磨削后 2.5D C_f/SiC 复合材料表面粗糙度的影响规律,表面粗糙度随磨削参数的变化曲线如图 9 所示.由图 9a 可看出, v_s 从 0.471 m/s 增加到 2.356 m/s,加工后的表面粗糙度由 1.753 μm 减小到 1.467 μm ,减小了 16.3%,表面质量上升.这是由于随着磨削速度的增大,意味着单位时间内更多磨粒参与微磨削中,磨粒重复磨削复合材料表面,使表面变得平整,表面粗糙度值降低;另一方面,磨削速度增加,单颗磨粒最大未变形切屑厚

度 h_m 减小,复合材料被切除的厚度减小^[14],表面留下的凹槽较浅,使表面粗糙度降低.

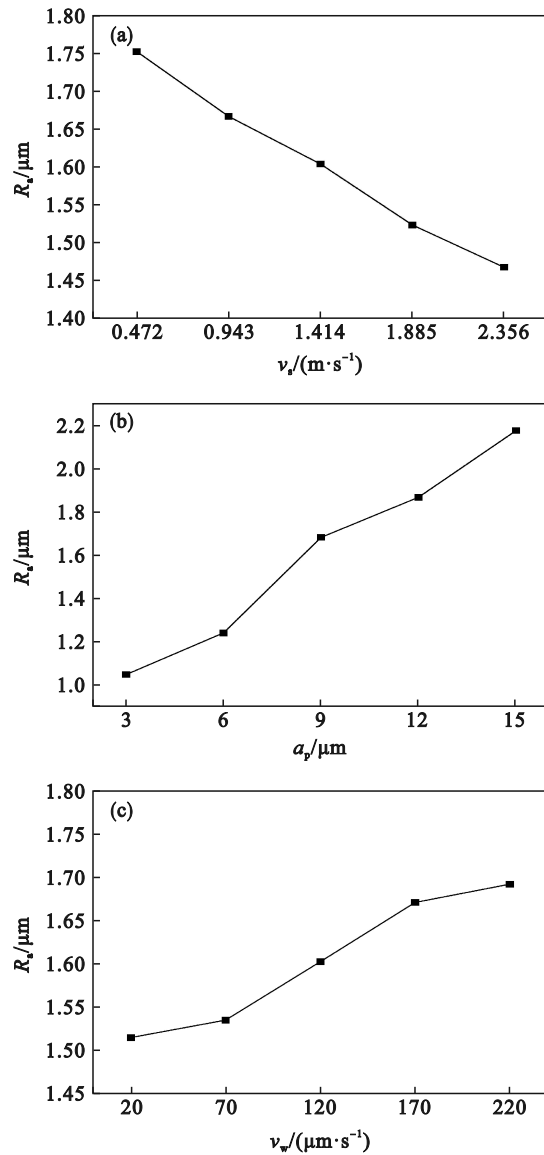


图 9 磨削参数对表面粗糙度的影响

Fig. 9 Effect trend of grinding parameters on surface roughness

(a)—微磨削速度 v_s ; (b)—磨削深度 a_p ; (c)—进给速度 v_w .

由图 9b 可看出, a_p 从 3 μm 增加到 15 μm ,加工后的表面粗糙度由 1.049 μm 增加到 2.175 μm ,增加了 107.3%,表面质量下降.这是由于随着磨削深度的增大,意味着微磨具上参与磨削的单颗磨粒的最大未变形切屑厚度 h_m 增大,复合材料被切除的深度增加,表面留下的凹槽更深,导致表面粗糙度上升;另一方面,磨削深度增大,脆性的陶瓷基体更易产生微裂纹,随着微裂纹向材料内部的扩展和延伸,不同方向的微裂纹相交使材料被去除,在材料表面生成不规则的凹坑,表面粗糙度值增大.

由图9c可看出, v_w 从 20 $\mu\text{m/s}$ 增加到 220 $\mu\text{m/s}$, 加工后的表面粗糙度由 1.515 μm 增加到 1.691 μm , 增加了 11.6%, 表面质量下降. 这是由于随着进给速度的增大, 意味着单位时间内磨粒去除更多体积的复合材料, 单颗磨粒最大未变形切屑厚度 h_m 增大, 陶瓷基复合材料被切除的厚度增加, 表面留下的凹槽更深, 导致表面粗糙度增大^[15]; 并且进给速度增大也导致磨粒对复合材料冲击加大, 复合材料裂纹不规则扩展更加严重, 进而表面出现凹坑、沟壑等缺陷, 使表面粗糙度增大. 由于微磨削试验中的进给速度远小于磨削速度, 所以进给速度对表面粗糙度的影响最小.

3 结 论

1) 微尺度磨削工艺参数对 2.5D C_f/SiC 复合材料磨削性能评价参数(磨削力、表面粗糙度、表面形貌)的影响顺序为: 磨削深度的影响最大, 微磨削速度的影响次之, 进给速度的影响最小.

2) 在本文正交试验的参数范围内, 最优的参数组合, 即能够获得最好的表面质量的磨削参数组合为: 微磨削速度 $v_s=2.356\text{ m/s}$, 磨削深度 $a_p=3\ \mu\text{m}$, 进给速度 $v_w=220\ \mu\text{m/s}$.

3) 增大磨削深度和进给速度, 磨削力及表面粗糙度随之增大, 表面微观形貌中的缺陷增多; 增大微磨削速度, 磨削力及表面粗糙度随之减小, 表面微观形貌中的缺陷减少. 因此, 为了提高 2.5D C_f/SiC 复合材料微磨削后的表面质量, 加工中应选取较大的磨削速度、较小的磨削深度和进给速度. 如果在保证微磨削质量的同时提高加工效率, 可适当地提高进给速度.

参考文献:

- [1] 杜昆, 陈麒好, 孟宪龙, 等. 陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析研究进展[J]. 推进技术, 2022, 43(2): 113-131.
(Du Kun, Chen Qi-hao, Meng Xian-long, et al. Advancement in application and thermal analysis of ceramic matrix composites in aeroengine hot components [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(2): 113-131.)
- [2] Li W, Long C J, Ma W Q, et al. Key technologies for laser-assisted precision grinding of 3D C/C-SiC composites [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, 43(10): 4322-4335.
- [3] 王晓博, 李璐璐, 赵波, 等. 陶瓷基复合材料加工技术及其表面亚表面损伤机制研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 17-34.
(Wang Xiao-bo, Li Lu-lu, Zhao Bo, et al. Research progress on processing technology and surface and subsurface damage mechanism of ceramic matrix composites [J]. *Surface Technology*, 2021, 50(12): 17-34.)
- [4] 屈硕硕, 巩亚东, 杨玉莹, 等. 单向碳纤维增强陶瓷基复合材料磨削表面质量研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(9): 1310-1315.
(Qu Shuo-shuo, Gong Ya-dong, Yang Yu-ying, et al. Study on grinding surface quality of unidirectional carbon fiber-reinforced ceramic matrix composites [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(9): 1310-1315.)
- [5] Qu S S, Gong Y D, Yang Y Y, et al. Grinding characteristics and removal mechanism of 2.5D-needled C_f/SiC composites [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(17): 21608-21617.
- [6] Zhang L F, Wang S, Li Z, et al. Influence factors on grinding force in surface grinding of unidirectional C/SiC composites [J]. *Applied Composite Materials*, 2019, 26(3): 1073-1085.
- [7] Tawakoli T, Azarhoushang B. Intermittent grinding of ceramic matrix composites (CMCs) utilizing a developed segmented wheel [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51(2): 112-119.
- [8] Liu Q, Huang G Q, Xu X P, et al. Influence of grinding fiber angles on grinding of the 2D - C_f/C - SiC composites [J]. *Ceramics International*, 2018, 44(11): 12774-12782.
- [9] Cao X Y, Lin B, Zhang X F. Investigations on grinding process of woven ceramic matrix composite based on reinforced fiber orientations [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 71: 184-192.
- [10] Choudhary A, Das Chakladar N, Paul S. Identification and estimation of defects in high-speed ground C/SiC ceramic matrix composites [J]. *Composite Structures*, 2021, 261: 113274.
- [11] Zhou K, Xu J Y, Xiao G J, et al. A novel low-damage and low-abrasive wear processing method of C_f/SiC ceramic matrix composites: laser-induced ablation-assisted grinding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 302: 117503.
- [12] Ding K, Fu Y C, Su H H, et al. Wear of diamond grinding wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding of silicon carbide [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71(9): 1929-1938.
- [13] Cheng J, Yin G Q, Wen Q, et al. Study on grinding force modelling and ductile regime propelling technology in micro drill-grinding of hard-brittle materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 223: 150-163.
- [14] Cao C, Song Q H, Fu H, et al. Fiber orientation effects on grinding characteristics and removal mechanism of 2.5D C_f/SiC composites [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(12): 425-441.
- [15] Duan Z Y, Chen T, Li H B, et al. Longitudinal ultrasonic vibration effects on grinding mechanism in side and end grinding of 2.5D C_f/SiC composites [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 129(9): 4185-4199.