

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20230206

2.5D C_f/SiC 复合材料与 SiC 陶瓷微磨削性能 对比试验研究

巩亚东, 李远峰, 温泉, 任启震

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为探究 2.5D C_f/SiC 复合材料与 SiC 陶瓷的微尺度磨削过程, 对比 2 种材料在同一工艺参数下表面显微形貌、表面粗糙度与磨削力的差异, 并分析工艺参数变化对磨削性能评价参数的影响; 采用直径为 0.9 mm 的 500 # 电镀金刚石微磨具对 2 种材料分别进行单因素微磨削试验. 结果表明, 2.5D C_f/SiC 复合材料去除过程不同于 SiC 陶瓷, 这是因为复合材料增强纤维的存在, 有效抑制了微磨削过程中裂纹的扩展; 在同一工艺参数下, 2.5D C_f/SiC 复合材料表面微观形貌较好、缺陷少、表面粗糙度小, 而无纤维增强的 SiC 陶瓷表面微观形貌较差、缺陷多、表面粗糙度大; SiC 陶瓷的平均磨削力大于 2.5D C_f/SiC, 并且在微磨削过程中, 2.5D C_f/SiC 的实时磨削力信号较平稳, 而 SiC 陶瓷的实时磨削力信号存在尖刺.

关键词: 2.5D C_f/SiC 复合材料; SiC 陶瓷; 微磨削过程; 表面微观形貌; 表面粗糙度; 磨削力

中图分类号: TH 161 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2025)01-0052-09

Comparative Experimental Study on Micro-grinding Performance of 2.5D C_f/SiC Composites and SiC Ceramics

GONG Ya-dong, LI Yuan-feng, WEN Quan, REN Qi-zhen

(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 explore the micro-grinding process of 2.5D C_f/SiC composites and SiC ceramics, the differences of surface morphology, surface roughness and grinding force between the two materials under the same process parameters were compared, and the influence of process parameters on grinding performance evaluation parameters was analyzed. Single-factor micro-grinding experiments were carried out on the two materials by using 500# electroplated diamond micro-grinding tools with the diameter of 0.9 mm. The results showed that the removal process of 2.5D C_f/SiC composites is different from that of SiC ceramics because the composites effectively inhibit the propagation of cracks during micro-grinding. Under the same process parameters, 2.5D C_f/SiC composites have better surface micro-morphology, fewer defects and less surface roughness, while SiC ceramics without fiber reinforcement have worse surface micro-morphology, more defects and greater surface roughness. The average grinding force of SiC ceramics is more than 2.5D C_f/SiC, and the real-time grinding force signal of 2.5D C_f/SiC is relatively stable during micro-grinding, while the real-time grinding force signal of SiC ceramics has spikes.

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

在一些极端的高温、辐射、时刻发生化学反应等恶劣环境中, 金属及合金已经无法满足使用

需求, 具备耐高温及极端环境下的稳定性等优点的陶瓷材料便映入眼帘, SiC 陶瓷应用于高温轴

收稿日期: 2023-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1908230).

作者简介: 巩亚东(1958—), 男, 辽宁本溪人, 东北大学教授, 博士生导师.

承、防弹板、高温耐蚀部件等^[1]。但陶瓷材料由于脆性大、硬度高、可加工性差等缺点,在一些重要应用场景中受到限制。近年来,一些研究人员将增强纤维编织于陶瓷基体中,既保持陶瓷耐高温、稳定性好的优点,又增加了陶瓷的韧性,使得纤维增强陶瓷基复合材料在航空航天、热结构、原子能等领域有了广泛应用,如航空发动机燃烧室、发动机喷管锥形中心体等^[2]。

复合材料在制备成型后通常需要进行大量的机械加工,一些特殊的应用环境对纤维增强陶瓷基复合材料加工后的表面质量提出了较高的要求。然而,陶瓷基复合材料的高硬度、大脆性、多相结构和各向异性等特点,使其加工表面质量较差,容易产生各种缺陷,属于难加工材料。作为一种新型材料,纤维增强陶瓷基复合材料的加工性能得到了广泛关注。与特种加工方法相比,磨削因具有加工效率高、生产成本低等特点,是目前纤维增强陶瓷基复合材料广泛采用的精密加工方法^[3]。

陶瓷基复合材料磨削性能的研究主要围绕磨削力、去除机理、磨削表面质量、砂轮磨损等方面展开。Du 等^[4]利用电镀金刚石磨具磨削碳纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料,分析了加工参数对磨削力、力比、表面粗糙度的影响。Zhou 等^[5]采用两种不同类型磨粒的砂带磨削 C_f/SiC 复合材料,研究了 C_f/SiC 复合材料的去除行为和砂带磨粒磨损的关系。Guo 等^[6]针对 C_f/SiC 复合材料的磨削加工,建立了单磨粒仿真模型,揭示了加工过程中磨削力的变化规律以及界面脱粘、纤维断裂、基体断裂等表面损伤现象,并基于基体、增强体和界面相的本构关系,建立了 C_f/SiC 复合材料的本构模型。Chen 等^[7]研究了碳纤维断裂方式对 C_f/SiC 复合材料加工表面质量的影响,从微观结构的角度出发,通过碳纤维的不同断裂机制探索 C_f/SiC 复合材料在磨削过程中材料的去除机制。屈硕硕等^[8]考察单向碳纤维增强陶瓷基复合材料的磨削表面质量,进行了正交试验研究,深入分析了工艺参数的影响与磨削机理。Liu 等^[9]研究了磨削中纤维的不同取向对 2D C_f/C-SiC 复合材料加工后表面微观结构的影响,分析了各个纤维方向的去除机理。

国内外相关研究大多集中在单向或者二维纤维增强陶瓷基复合材料的常规尺度磨削方面,对 2.5D C_f/SiC 复合材料与 SiC 陶瓷进行微尺度磨削相关的研究较少。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不同。微磨削过程不是常规尺度磨削工艺的成比例缩小。因此,为探究 2.5D C_f/SiC 复合材料与 SiC 陶瓷的微磨削性能,本文采用直径为 0.9 mm 的 500 # 电镀金刚石微磨具对 2 种材料分别进行单因素微磨削试验。对比 2 种材料在同一工艺参数下表面微观形貌、表面粗糙度与磨削力的差异,分析工艺参数变化对磨削性能评价参数的影响。探究 2 种材料的微尺度磨削过程,即分析裂纹产生、扩展的材料去除机理及加工后缺陷的产生机理,为理解纤维增强陶瓷基复合材料的微磨削性能、减少加工后的表面缺陷、提高微磨削加工后的表面质量等方面提供理论指导。

1 微磨削对比试验

1.1 试验材料、加工与检测设备

试验材料为 2.5D C_f/SiC 复合材料与 SiC 陶瓷,2 种材料性能参数见表 1^[10],2 种材料截面形貌如图 1 所示,其中,2.5D C_f/SiC 复合材料截面的显微组织形貌如图 1a 所示,经向纤维、纬向纤维和针刺结构编织于 SiC 陶瓷中。试验加工设备为 JX-1A 微尺度精密磨床,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。检测设备包括 Kistler 9257B 三向测力仪、Olympus OLS41003D 激光共聚焦显微镜、Kenyon VHX-1000E 超景深显微镜、Zeiss ULTRAPLUS 场发射扫描电镜。

表 1 2.5D C_f/SiC 复合材料与 SiC 陶瓷性能参数
Table 1 Performance parameters of 2.5D C_f/SiC composites and SiC ceramics

参数	2.5D C _f /SiC	SiC 陶瓷
抗拉强度/MPa	280	441
抗弯强度/MPa	220	500
断裂韧性/(MPa·m ^{1/2})	20.2~31.0	3.0~3.5
密度/(g·cm ⁻³)	2.0	3.1
纤维直径/μm	7	—
纤维体积分数/%	37	—

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,分别对 2.5D C_f/SiC 复合材料与 SiC 陶瓷进行单因素微尺度磨削试验,对比 2 种材料在同一工艺参数下表面显微形貌、表面粗糙度与磨削力的差异,并探究每个因素对磨削性能评价参数影响的规律,试验方案如表 2 所示。为了

保证试验结果的准确性,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 2 所示,包

括微尺度精密磨床、多向测力仪中的电荷放大器、数据采集器与力数据处理系统.另外,微磨具直径较小,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.

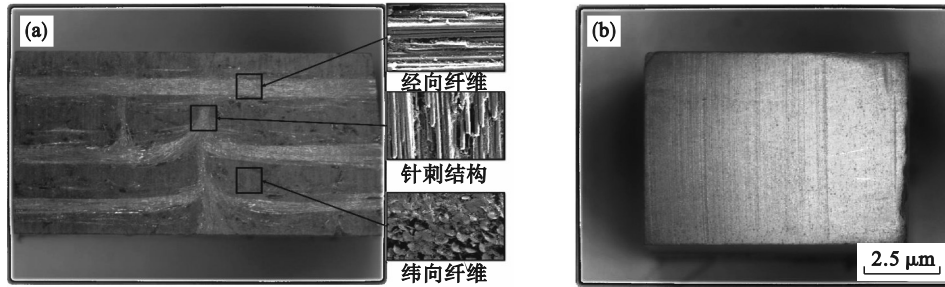


图 1 2.5D C_f/SiC 复合材料与 SiC 陶瓷截面显微形貌

Fig. 1 Cross-sectional micro-structure of 2.5D C_f/SiC composites and SiC ceramics

(a)—2.5D C_f/SiC 复合材料; (b)—SiC 陶瓷.

表 2 单因素微磨削试验方案

Table 2 Process parameters in the single-factor experiment

因素	水平		
	1	2	3
磨削速度 $v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.471, 0.942, 1.414, 1.885, 2.356	1.414	1.414
磨削深度 $a_p / \mu\text{m}$	9	3, 6, 9, 12, 15	9
进给速度 $v_w / (\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	120	120	20, 70, 120, 170, 220

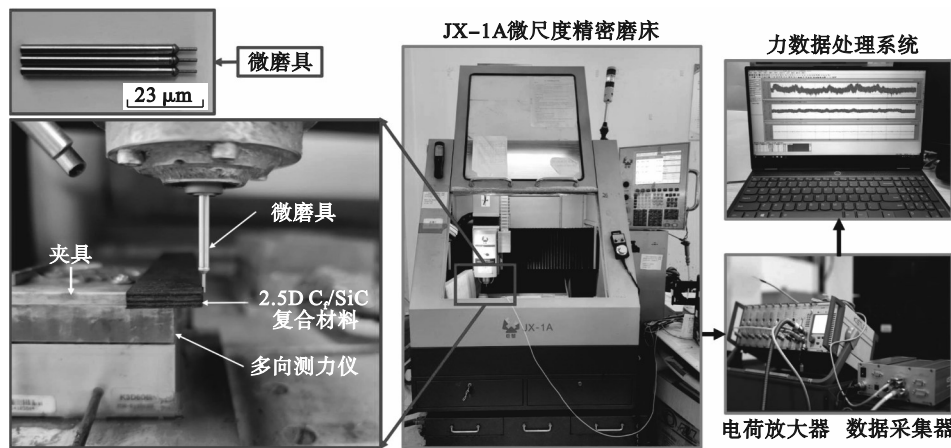


图 2 微磨削试验台

Fig. 2 Micro-grinding test bench

2 试验结果与讨论

2.1 磨削过程与表面形貌分析

使用 Kenyence VHX-1000E 超景深显微镜与 Zeiss ULTRAPLUS 场发射扫描电镜对 2 种材料微磨削后的表面微观形貌进行观测.图 3 为 SiC 陶瓷与 2.5D C_f/SiC 复合材料在磨削速度 v_s 为 1.414 m/s,磨削深度 a_p 为 15 μm,进给速度 v_w 为 120 μm/s 的工艺参数下磨削后的表面微观形貌.

可以看出 SiC 陶瓷微磨削后表面出现较多凹坑,而 2.5D C_f/SiC 复合材料微磨削后表面平整,表面缺陷较少.

SiC 陶瓷微磨削后表面显微形貌与去除过程原理图如图 4 所示,由于 SiC 陶瓷属于典型的脆性材料,脆性材料的去除过程为磨粒作用在材料表面使其产生微裂纹,微裂纹不断扩展而相交时材料被去除.根据脆性材料磨削机理^[11]与 SiC 陶瓷微磨削后的表面微观形貌,分析其去除过程如下:当微磨具上的磨粒刚接触到 SiC 陶瓷时, SiC

陶瓷首先发生一段极小的弹性形变,紧接着便产生塑性变形,此时为延性域加工.随着磨粒进一步深入,当磨粒的切削厚度大于材料的临界切削厚度时,SiC 陶瓷产生微裂纹.微裂纹受磨粒的载荷作用发展为横向裂纹与纵向裂纹.在这一过程中,材料内部产生的能量也随着横向裂纹与纵向裂纹的无规则扩展而得到释放.当横向裂纹与纵

向裂纹扩展在某处相交或者横向裂纹向前延伸并发展到材料表面时,SiC 陶瓷被去除.如图 4 所示,微磨削加工后的 SiC 陶瓷表面有部分的凹坑缺陷,表面显微形貌较差.这是由于脆性材料 SiC 陶瓷本身缺少对裂纹的抑制作用,部分裂纹在扩展过程中会在更深处相交,导致 SiC 陶瓷被去除后,留下较严重的凹坑缺陷.

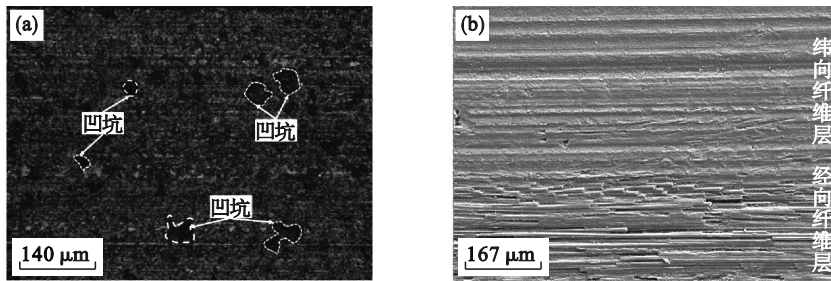


图 3 SiC 陶瓷与 2.5D C_f/SiC 复合材料微磨削后表面微观形貌

Fig. 3 Micro-morphology of 2.5D C_f/SiC composites and SiC ceramics after micro-grinding

(a)—SiC 陶瓷; (b)—2.5D C_f/SiC 复合材料.

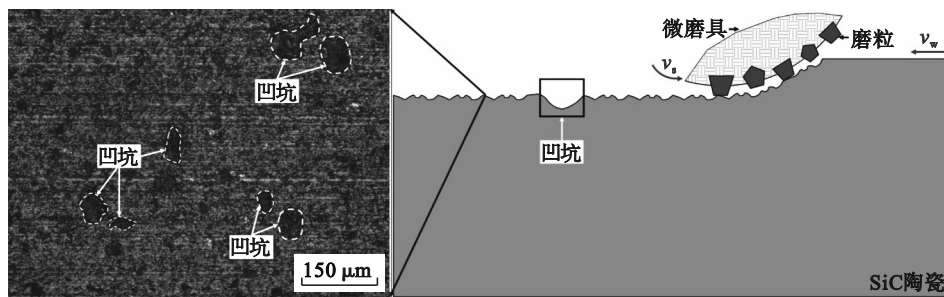


图 4 SiC 陶瓷微磨削后表面显微形貌与去除过程原理图

Fig. 4 Surface morphology of SiC ceramics and schematic diagram of the removal process

对于 2.5D C_f/SiC 复合材料,在微磨削过程中,微磨具同时磨削经向与纬向 2 种不同的纤维层,这 2 种纤维层的去除机理与微磨削后表面微观形貌特征并不相同,故分别讨论.

2.5D C_f/SiC 复合材料纬向纤维层微磨削后表面显微形貌与去除过程原理图如图 5 所示.微磨具上的磨粒接触 SiC 基体并产生微裂纹的过程与 SiC 陶瓷的微裂纹的产生过程相似,微裂纹受磨粒的载荷作用发展为横向裂纹与纵向裂纹.随着磨粒的切削作用,横向裂纹与纵向裂纹在扩展过程中,由于增强纤维的抑制作用,当横向裂纹与纵向裂纹扩展至基体与纤维间的界面层时,裂纹便会中断或偏转,无需等横向裂纹与纵向裂纹在更远处相交,SiC 基体便被去除.随着磨粒的进一步进给,磨粒施加给纤维径向载荷,纤维在载荷作用下,同样产生微裂纹,随着横向裂纹的扩展到达纤维边界,纤维被去除;少部分横向裂纹

斜向下或向上偏转到达界面层后,导致纤维被去除后会留下纤维拔出与纤维露头缺陷,而少部分纵向裂纹扩展到界面层后,会造成界面脱粘的缺陷.从图 5 可以看出,大部分 SiC 基体表面与纤维断口表面平整,但也会出现一些纤维拔出、纤维露头与界面脱粘等缺陷.

2.5D C_f/SiC 复合材料经向纤维层微磨削后表面显微形貌与去除过程原理图如图 6 所示.SiC 基体的去除过程与上述过程相似,而磨粒在磨削经向纤维层时,纤维产生微裂纹,裂纹扩展到纤维边界的界面层,纤维被去除;少部分纵向裂纹斜向下偏转到达界面层,纤维被去除后会造纤维整体剥离与纤维裂纹等缺陷,而少部分横向裂纹扩展到界面层后,会造成界面脱粘等缺陷^[12].从图 6 可以看出,大部分 SiC 基体表面与纤维表面较平整,但也会出现一些纤维断裂、界面脱粘、纤维被整体剥离等缺陷.

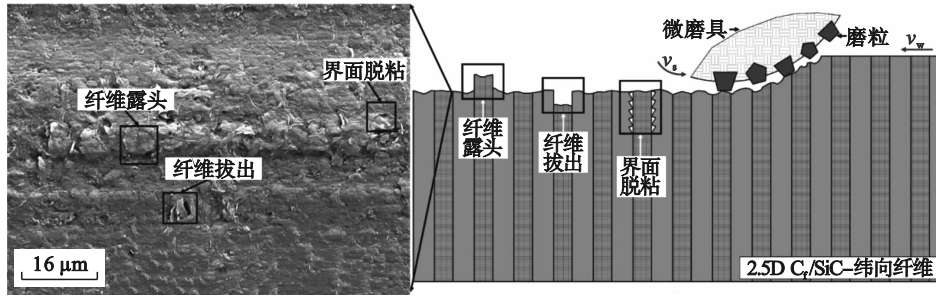


图5 2.5D C_f/SiC 复合材料纬向纤维层微磨削后表面显微形貌与去除过程原理图

Fig. 5 Surface morphology of weft fiber layer of 2.5D C_f/SiC composites and schematic diagram of the removal process

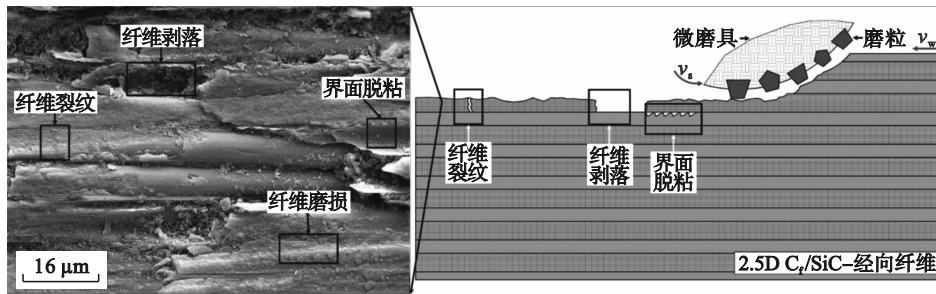


图6 2.5D C_f/SiC 复合材料经向纤维层微磨削后表面显微形貌与去除过程原理图

Fig. 6 Surface morphology of warp fiber layer of 2.5D C_f/SiC composites and schematic diagram of the removal process

2.2 表面粗糙度分析

对于2.5D C_f/SiC复合材料与SiC陶瓷微磨削后的表面,使用Olympus OLS41003D激光共聚焦

显微镜测量2种材料微磨削后的表面粗糙度R_a, 测量结果见表3. 为将结果清晰直观表达,绘制为曲线图如图7所示.

表3 单因素微磨削实验结果
Table 3 Experimental results of single-factor micro-grinding

试验序号	工艺参数			2.5D C _f /SiC			SiC陶瓷		
	v _s /(m·s ⁻¹)	a _p /μm	v _w /(μm·s ⁻¹)	F _n /N	F _t /N	R _a /μm	F _n /N	F _t /N	R _a /μm
1	0.471	9	120	1.223	0.980	1.004	1.407	1.146	1.235
2	0.942	9	120	0.958	0.778	0.921	1.219	0.967	1.074
3	1.414	9	120	0.627	0.511	0.805	0.984	0.839	0.927
4	1.885	9	120	0.496	0.366	0.663	0.767	0.657	0.846
5	2.356	9	120	0.385	0.294	0.587	0.619	0.526	0.690
6	1.414	3	120	0.293	0.222	0.501	0.525	0.411	0.638
7	1.414	6	120	0.394	0.303	0.622	0.748	0.634	0.792
8	1.414	9	120	0.627	0.511	0.805	0.984	0.839	0.927
9	1.414	12	120	0.873	0.657	0.916	1.289	1.046	1.106
10	1.414	15	120	1.122	0.888	1.102	1.513	1.206	1.356
11	1.414	9	20	0.337	0.269	0.632	0.594	0.475	0.747
12	1.414	9	70	0.428	0.382	0.729	0.767	0.642	0.852
13	1.414	9	120	0.627	0.511	0.805	0.984	0.839	0.927
14	1.414	9	170	0.756	0.597	0.922	1.094	0.956	0.989
15	1.414	9	220	0.852	0.685	0.985	1.209	1.035	1.020

注:F_n为法向磨削力;F_t为切向磨削力.

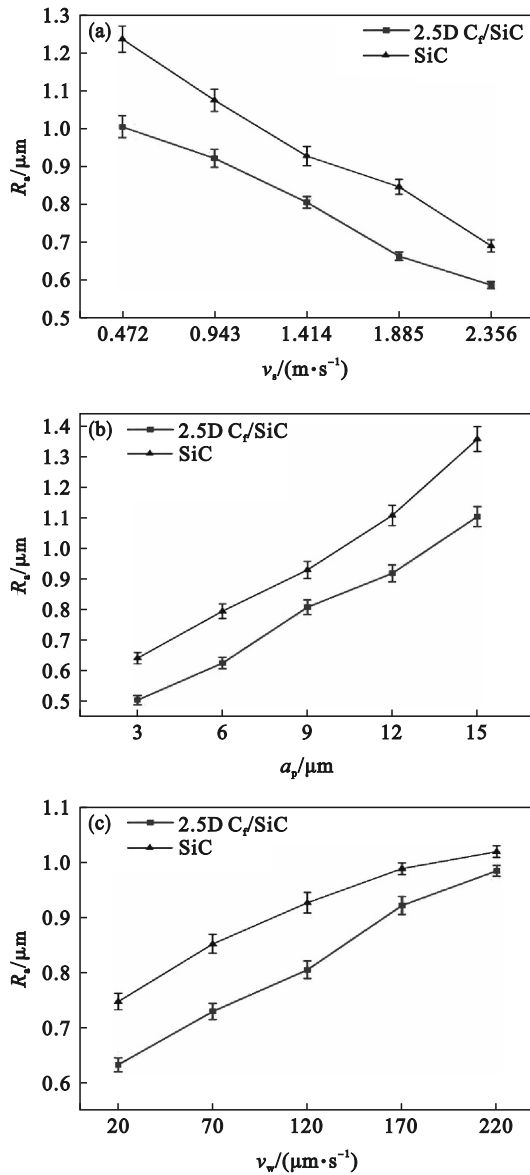


图7 磨削参数对表面粗糙度的影响趋势

Fig. 7 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 .

工艺参数变化对2.5D C_f/SiC复合材料与SiC陶瓷表面粗糙度的影响如下:随着微磨削速度 v_s 从0.471 m/s增加到2.356 m/s,2.5D C_f/SiC复合材料加工后的表面粗糙度 R_a 由1.004 μm 减小到0.587 μm ,减小了41.5%;SiC陶瓷加工后的表面粗糙度 R_a 由1.235 μm 减小到0.690 μm ,减小了44.1%;这是由于 v_s 增大,单位时间内参与磨削的磨粒增多,更多磨粒的反复加工,使 R_a 呈减小趋势.随着磨削深度 a_p 从3 μm 增加到15 μm ,2.5D C_f/SiC复合材料加工后的表面粗糙度 R_a 由0.501 μm 增加到1.102 μm ,增加了119.9%;SiC陶瓷加工后的表面粗糙度 R_a 由0.638 μm 增加到1.356 μm ,增加

了112.5%;这是由于 a_p 增大,单颗磨粒对材料的切削深度增大,磨粒与材料的作用面增大,在作用面会产生更多的微裂纹,使得部分微裂纹扩展相交后,在加工后的表面留下缺陷,导致粗糙度增大.随着进给速度 v_w 从20 $\mu\text{m}/\text{s}$ 增加到220 $\mu\text{m}/\text{s}$,2.5D C_f/SiC复合材料加工后的表面粗糙度 R_a 由0.632 μm 增加到0.985 μm ,增加了55.8%;SiC陶瓷加工后的表面粗糙度 R_a 由0.747 μm 增加到1.020 μm ,增加了36.5%;这是由于 v_w 增大,单颗磨粒与被加工材料发生相对运动时产生的作用力更强,在磨粒的冲击下产生更多微裂纹,因而会在加工表面留下更多缺陷,粗糙度增大.

在同一工艺参数下,2.5D C_f/SiC复合材料微磨削后表面粗糙度值低于SiC陶瓷.基于上述对2种材料的去除过程与表面微观形貌的分析,由于复合材料中增强纤维的存在,裂纹的随机扩展会被纤维所抑制.横向裂纹与纵向裂纹或者在较近处相交使材料被去除,或者横向裂纹与纵向裂纹扩展到界面层便停止或偏转使材料被去除,或者横向裂纹到达材料表面使材料被去除,故加工后的复合材料表面平整,表面粗糙度值低.但在SiC陶瓷的去除过程中,裂纹的随机扩展不会受到限制,导致部分横向裂纹与纵向裂纹在更远更深处相交,这部分材料被去除后,SiC陶瓷表面会留下严重的凹坑.由于凹坑缺陷的存在,相较于2.5D C_f/SiC复合材料,SiC陶瓷磨削后的表面会更加凹凸不平,所以表面粗糙度值较大.

2.3 磨削力分析

对于2.5D C_f/SiC复合材料与SiC陶瓷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和图8~图10所示.

工艺参数变化对微磨削力的影响如下:由图8可知,2种材料微磨削过程中的磨削力随微磨削速度的增大而减小.当微磨削速度 v_s 从0.471 m/s增加到2.356 m/s时,2.5D C_f/SiC复合材料的 F_n 从1.223 N降低到0.385 N,降低了68.5%, F_t 从0.980 N降低到0.294 N,降低了70.0%;SiC陶瓷的 F_n 从1.407 N降低到0.619 N,降低了56.0%, F_t 从1.146 N降低到0.526 N,降低了54.1%.由图9可知,微磨削过程中的磨削力随磨削深度的增大而增大.当磨削深度 a_p 由3 μm 增加到15 μm 时,2.5D C_f/SiC复合材料的 F_n 从0.293 N增加到1.122 N,增加了282.9%, F_t 从0.222 N增加到0.888 N,增加了300%;SiC陶瓷的

F_n 从 0.525 N 增加到 1.513 N, 增加了 188.2%, F_t 从 0.411 N 增加到 1.206 N, 增加了 193.4%。由图 10 可知, 微磨削过程中的磨削力随进给速度的增大而增大。当进给速度 v_w 从 20 $\mu\text{m/s}$ 增加到 220 $\mu\text{m/s}$, 2.5D C_f/SiC 复合材料的 F_n 从 0.337 N 增加到

0.852 N, 增加了 152.8%, F_t 从 0.269 N 增加到 0.685 N, 增加了 154.6%; SiC 陶瓷的 F_n 从 0.594 N 增加到 1.209 N, 增加了 103.5%, F_t 从 0.475 N 增加到 1.035 N, 增加了 117.9%。

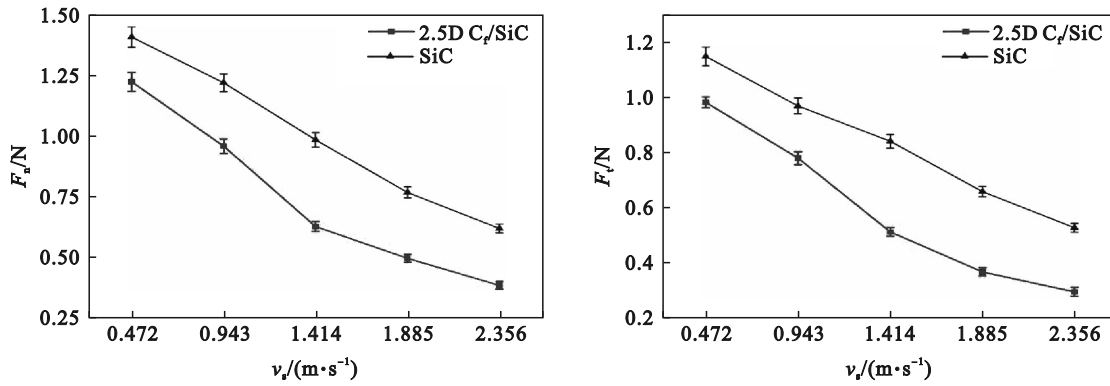


图 8 磨削速度 v_s 对磨削力的影响趋势

Fig. 8 Effect of grinding speed v_s on grinding force

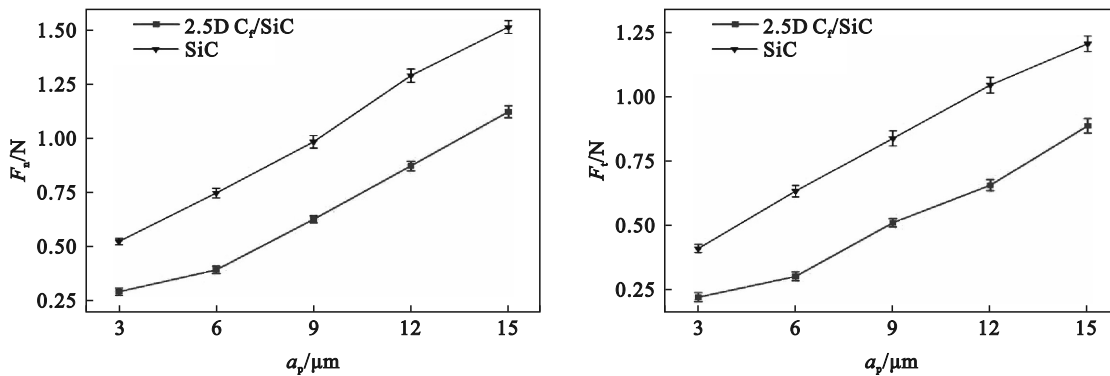


图 9 磨削深度 a_p 对磨削力的影响趋势

Fig. 9 Effect of grinding depth a_p on grinding force

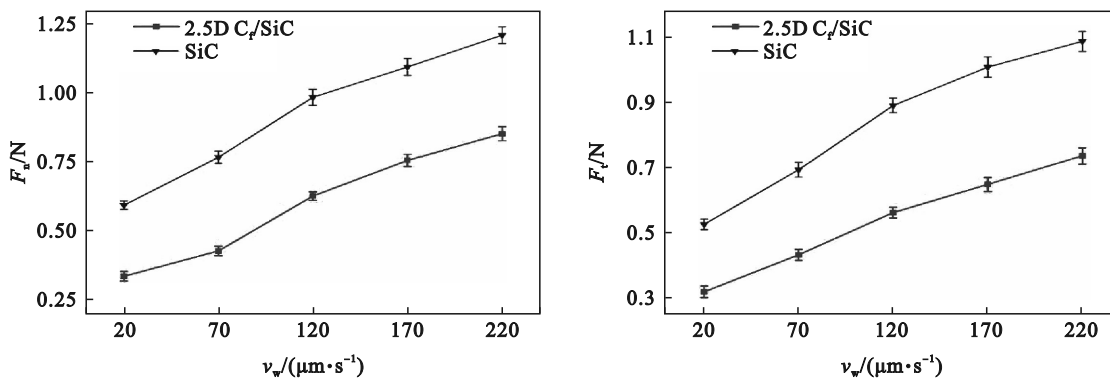


图 10 进给速度 v_w 对磨削力的影响趋势

Fig. 10 Effect of feed speed v_w on grinding force

同一工艺参数下 2 种材料的微磨削力对比如下: 2.5D C_f/SiC 复合材料微磨削力小于 SiC 陶瓷。基于材料属性进行分析, 磨削力与材料属性和加工参数有关, 对于这 2 种材料, 在同一工艺参数下, 根据脆性材料磨削力相关公式^[13], 磨削力大

小只与材料断裂韧性 K_{IC} 和材料硬度的幂函数的比值有关, 两者比值越大, 其磨削力越大。由于 2.5D C_f/SiC 复合材料基体材料为 SiC 陶瓷, 但其中含有体积分数为 37% 的增强碳纤维, 碳纤维的断裂韧性与硬度的幂函数的比值小于 SiC 陶瓷,

所以在同一工艺参数下,2.5D C_f/SiC 复合材料的平均磨削力小于 SiC 陶瓷. 并且 2.5D C_f/SiC 复合材料由于增强碳纤维与基体之间存在一层界面相,而界面相的物理性能较弱,是材料发生断裂时的‘泄洪渠’,即在磨削过程中,由于磨具的磨削作用使材料去除时,材料内部产生巨大的能量,由于界面相的存在,使裂纹在扩展传递能量到达界面相时,能量得到释放与缓冲,故 2.5D C_f/SiC 复合材料磨削力较为平稳,并且小于 SiC

陶瓷. 而 SiC 陶瓷在磨削过程中,大量横向裂纹与纵向裂纹扩展相交使材料被去除,在这个过程中磨削力实时信号较为平稳. 但由于部分裂纹在较深与较远处扩展相交,大块材料被去除,并在材料表面留下凹坑,这个过程中产生巨大能量,所以会产生尖刺状的实时的磨削力信号. 在同一工艺参数(磨削速度 $v_s=1.885$ m/s,磨削深度 $a_p=9$ μm ,进给速度 $v_w=120$ $\mu\text{m/s}$)下,2 种材料微磨削过程的实时法向磨削力信号对比见图 11.

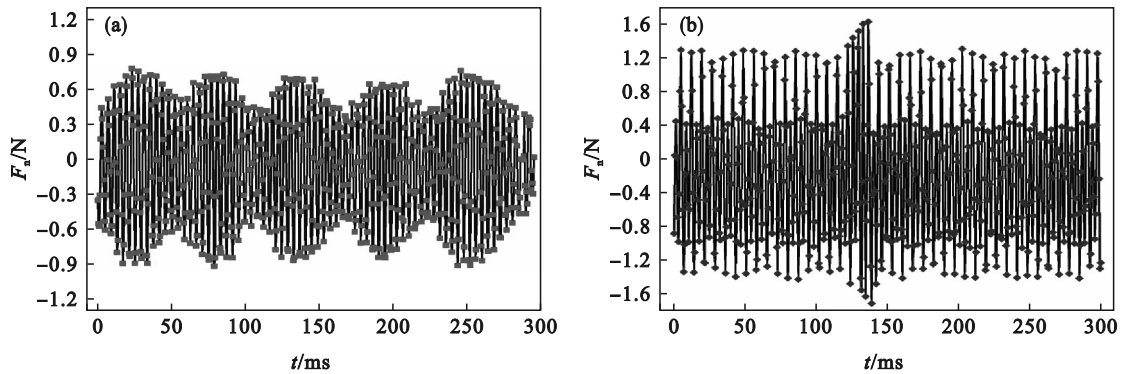


图 11 2 种材料微磨削力信号

Fig. 11 Micro-grinding force signals of two materials

(a)—2.5D C_f/SiC 复合材料; (b)—SiC 陶瓷.

3 结 论

1) 在微磨削过程中,2.5D C_f/SiC 复合材料由于增强碳纤维的存在,有效抑制了微磨削过程中裂纹的扩展. 其微磨削后的表面微观形貌较好,存在少量的纤维拔出、纤维露头、纤维断裂与界面脱粘等缺陷. 而 SiC 陶瓷在去除过程中裂纹的随机扩展严重,微磨削后材料表面微观形貌较差,存在较严重的凹坑缺陷.

2) 在同一工艺参数下,2.5D C_f/SiC 表面粗糙度均小于无纤维增强的 SiC 陶瓷. 在本次试验参数范围内,2.5D C_f/SiC 复合材料加工后的表面粗糙度 R_a 范围在 0.501~1.004 μm ; SiC 陶瓷加工后的表面粗糙度 R_a 范围在 0.638~1.235 μm .

3) 在同一工艺参数下, SiC 陶瓷的平均磨削力均大于 2.5D C_f/SiC 复合材料. 在本次试验参数范围内,2.5D C_f/SiC 复合材料的平均法向磨削力 F_n 范围在 0.293~1.223 N,平均切向磨削力 F_t 范围在 0.222~0.980 N; SiC 陶瓷 F_n 范围在 0.525~1.407 N, F_t 范围在 0.411~1.146 N. 在微磨削过程中,2.5D C_f/SiC 实时磨削力信号较平稳,而 SiC 实时磨削力信号存在尖刺,尖刺力信号在 1.2~1.6 N

之间.

参考文献:

- [1] Fu H, Jiang L P, Song Q H, et al. Grinding surface roughness prediction for silicon nitride ceramics: a dynamic grinding force and frequency domain approach [J]. *Ceramics International*, 2023, 49(22): 35239–35253.
- [2] Zhang X H, Wang X, Jiao W L, et al. Evolution from microfibers to nanofibers toward next-generation ceramic matrix composites: a review [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, 43(4): 1255–1269.
- [3] An Q L, Chen J, Ming W W, et al. Machining of SiC ceramic matrix composites: a review [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(4): 540–567.
- [4] Du J G, Ming W Y, Ma J, et al. New observations of the fiber orientations effect on machinability in grinding of C/SiC ceramic matrix composite [J]. *Ceramics International*, 2018, 44(12): 13916–13928.
- [5] Zhou K, Xiao G J, Xu J Y, et al. Material removal behavior of C_f/SiC ceramic matrix composites as a function of abrasive wear during diamond abrasive belt grinding [J]. *Wear*, 2021, 486: 43–59.
- [6] Guo M X, Tao J B, Wu C J, et al. High-speed grinding fracture mechanism of C_f/SiC composite considering interfacial strength and anisotropy [J]. *Ceramics International*, 2023, 49(2): 2600–2612.
- [7] Chen J, Ming W W, Chen M, et al. Investigation on machined surface quality in ultrasonic-assisted grinding of C_f/SiC composites based on fracture mechanism of carbon fibers [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 109(5): 1583–1599.
- [8] 屈硕硕, 巩亚东, 杨玉莹, 等. 单向碳纤维增强陶瓷基复合

