

碳纤维陶瓷基复合材料的磨削加工研究进展

陈 冰 王 健 焦浩文 苏 飞

(湖南科技大学机电工程学院, 湘潭 411201)

文 摘 综述了磨削参数、纤维方向、不同加工方式以及其他因素对磨削力和表面质量的影响规律;总结了不同加工方式下的碳纤维陶瓷基复合材料的磨削机理;展望了碳纤维陶瓷基复合材料磨削加工的研究方向。

关键词 碳纤维陶瓷基复合材料,磨削参数,磨削力,纤维方向,超声辅助磨削,磨削机理

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.03.002

Research Progress on Grinding of Carbon Fiber Ceramic Matrix Composites

CHEN Bing WANG Jian JIAO Haowen SU Fei

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract First, the influence of grinding parameters, fiber direction, different processing methods and other factors on grinding force and surface quality in grinding process was reviewed. Then, the grinding mechanism of carbon fiber ceramic matrix composites with different processing methods was summarized. Finally, the further research direction of grinding carbon fiber ceramic matrix composites was prospected.

Key words Carbon fiber ceramic matrix composites, Grinding parameters, Grinding force, Fiber direction, Ultrasonic assisted grinding, Grinding mechanism

0 引言

碳纤维树脂基复合材料具备了碳纤维材料的模量高、质量轻、韧性好等特性,同时也兼具了树脂的质软、减震、消音效果,主要应用于大型飞机的机翼、筒段等关键构件及汽车的车身、底盘等零部件,以达到飞机、汽车等轻量化目的^[1-2]。目前针对碳纤维树脂基复合材料的加工方法相对成熟和有效,主要有车削^[3]、钻削^[4]、铣削^[5]、激光加工^[6]、水射流^[7]、磨料流^[8]等加工方法。而碳纤维陶瓷基复合材料除了具备碳纤维材料的优良性能外,又兼具陶瓷材料的高硬度、高抗疲劳、耐高温等特点^[9],因此被广泛应用于耐磨、抗高温等场合,比如航天飞行器的热防护系统和热防护面板、火箭发动机的叶片和喷管等热结构件^[10-12],汽车制造领域中车身结构某些关键部位以及刹车片^[13],空间的基板以及光学镜的基片等^[14]。目前碳纤维陶瓷基复合材料加工方法主要有传统的机械加工(钻削、磨削、铣削)、超声振动加工、脉冲激光烧蚀、电火花加工和磨料水射流加工等^[15]。

针对碳纤维陶瓷基复合材料的传统机械加工工

艺简单、应用范围广、加工效率高,但是加工过程中会出现分层、毛刺、纤维断裂和纤维拔出等加工缺陷,并且刀具的磨损较严重,难以加工形状复杂的部件^[16]。与传统加工相比,超声振动加工可以降低磨削力和表面粗糙度,提高工件材料的加工精度和效率,同时克服了切削力过大、刀具磨损严重的问题,但是不可避免地出现崩边、毛刺等缺陷^[17]。激光加工的加工效率高,不存在砂轮磨损的问题,同时也能够避免崩边、毛刺等缺陷的产生,但加工过程中的去除量难以控制,烧蚀氧化层难以避免^[18]。电火花加工属于能量加工,会造成复合材料层的损伤,电极磨损严重;此外,局部积聚电流易导致刀具磨损,这些都是使用电火花方法加工材料的限制因素^[15]。高压水射流加工通常用于碳纤维陶瓷基复合材料的型孔加工,同时加工表面因受到高压水流冲击而出现崩边、分层等缺陷^[19]。

精密磨削加工因其在陶瓷^[20]、玻璃^[21]、蓝宝石^[22]等硬脆材料加工中表现出加工成型精度高、表面质量好、损伤小、加工效率高等特点,被国内外学者作

收稿日期:2021-05-18

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52175401)

第一作者简介:陈冰,1986年出生,副教授,主要研究方向为难加工材料的精密加工及其加工过程的在线监测技术研究。E-mail: chenbing@hnust.edu.cn

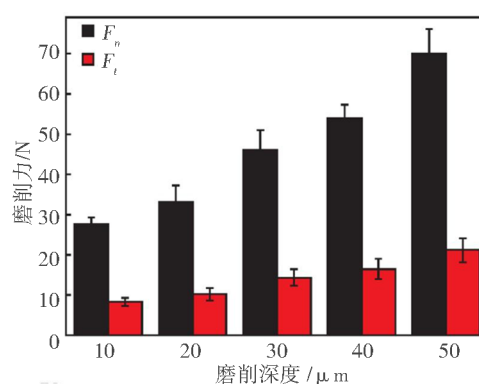
为加工碳纤维陶瓷基复合材料的主要技术手段。然而,碳纤维陶瓷基复合材料作为一种新型的复合材料,特别是新型的2.5维或3维碳纤维陶瓷基复合材料,目前针对碳纤维陶瓷基材料精密磨削理论和工艺的研究尚不明晰。本文首先综述了磨削参数、纤维方向和超声振动辅助以及其他因素分别对磨削力和表面质量的影响规律;然后分别对单颗磨粒、砂轮和超声振动辅助磨削碳纤维陶瓷基复合材料的磨削机理进行了总结与对比;最后展望了关于碳纤维陶瓷基复合材料高效精密加工的未来研究方向。

1 磨削过程中磨削力的研究

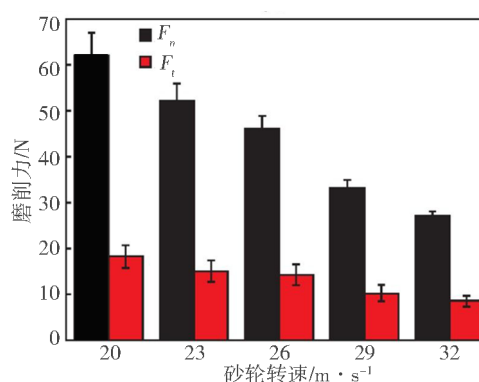
碳纤维陶瓷基复合材料磨削加工过程中磨削力的大小、变化情况可以动态反映出砂轮的磨损程度、磨削性能以及磨削后的表面质量等状况,且鉴于碳纤维陶瓷基复合材料内部独特的结构特性,与匀质材料或其他复合材料相比,在磨削过程中磨削力的大小、影响因素等有其独特的特征^[23]。因此,国内外学者研究了磨削参数、纤维方向、超声辅助磨削以及其他因素对碳纤维陶瓷基复合材料磨削过程中磨削力的影响。

1.1 磨削参数对磨削力的影响

磨削加工是通过砂轮与工件间的接触运动而去除工件材料的一种加工方法,砂轮与工件的接触运动受磨削加工参数影响,因此,磨削参数影响着磨削加工过程中磨削力的大小和变化情况。LI等^[24]通过对C/SiC复合材料进行了单颗磨粒刻划实验,发现切向和法向磨削力均与磨削深度呈正相关,与主轴转速呈负相关。WANG等^[25]磨削了石英纤维增强二氧化硅复合材料,结果表明当磨削深度从40 μm 增加到300 μm ,法向磨削力从16 N增加至56 N,切向磨削力从12 N增加至30 N,其原因是磨削深度的增加导致磨粒切削厚度、未变形切屑厚度、接触弧长和有效磨粒总数增加,从而出现上述规律。屈硕硕等^[26]也在磨削2.5维C/SiC复合材料的过程中发现同样的规律(图1),并表明其原因在磨削深度和进给速度增加时,未变形的切削厚度增大,同时参与磨削的磨粒数也增多,导致磨削力增大;当砂轮转速提高时,磨粒切入工件的深度减小,使磨削力降低。LIN等^[27]采用单颗磨粒和砂轮分别对SiO₂/SiO₂复合材料进行了磨削实验,发现单颗磨粒磨削SiO₂/SiO₂复合材料过程中的磨削力的大小与磨削深度呈正相关,磨粒速度对磨削力的影响规律与磨削深度对其影响规律相反,但在砂轮磨削时,磨削深度和砂轮转速对磨削力的影响呈现出波动变化,这是由于磨粒和砂轮与加工表面之间的相互作用方式不同导致磨削力不呈现出线性相关性。



(a) 磨削深度与磨削力的关系



(b) 砂轮转速与磨削力关系

图1 磨削参数对磨削力的影响^[26]

Fig. 1 Effect of grinding parameters on grinding forces^[26]

综上,与匀质材料相比,碳纤维陶瓷基复合材料在单颗磨粒磨削时,磨削参数对磨削力的影响规律与匀质材料相似,磨削力与磨削深度和进给速度均呈正相关性,与砂轮转速呈负相关性;与单颗磨粒磨削不同的是,在砂轮磨削时,在一定范围内磨削力随着砂轮转速和磨削深度的增加而波动,没有呈现出线性相关性。

1.2 纤维方向对磨削力的影响

碳纤维作为碳纤维陶瓷基复合材料的增韧材料,在材料制备过程中有多种铺设方法,而碳纤维的铺设方向使得制备后的碳纤维陶瓷基复合材料在不同的方向上具备不同的物理力学性能,呈现强烈的各向异性,使其在不同的方向上磨削性能出现一定的差异,磨削过程中磨削力的特征也呈现一定的差异。CAO等^[28]研究了纤维方向对SiO₂/SiO₂复合材料磨削过程中的磨削力的影响规律,结果发现与沿0°纤维方向相比,沿90°纤维方向磨削SiO₂/SiO₂复合材料时所测的磨削力大。DU等^[29]通过对2D C/SiC复合材料进行磨削实验,发现沿纵向方向磨削获得的磨削力的波动性比沿横向方向获得的磨削力的波动性要大,主要是由于沿纵向加工时纤维不连续分布造成的。王涛等^[30]利用Matlab软件求解出C/SiC复

合材料沿典型方向磨削的磨削力经验公式,结果发现沿法向磨削的经验系数大于沿纵向、横向磨削的经验系数,即沿法向磨削时磨削力最大,与上述结论一致。而采用砂轮周向磨削碳纤维陶瓷基复合材料分析纤维方向对磨削力的影响,也得到相似的结论,张立峰等^[31]对单向 C/SiC 复合材料进行了不同纤维方向的磨削,如图 2 所示,研究表明沿不同方向磨削时所测的磨削力不同,无论是法向磨削力还是切向磨削力,沿法向纤维方向磨削时所测的力大于沿纵向纤维方向所测的力,沿横向纤维方向磨削时所获的力最小,同时沿三个方向磨削时所测的切向磨削力均明显大于法向磨削力,这是由于碳纤维具有各向异性,纤维沿各个方向的强度和摩擦性不同,导致所受的阻力不同,进而使得磨削力呈现上述规律。

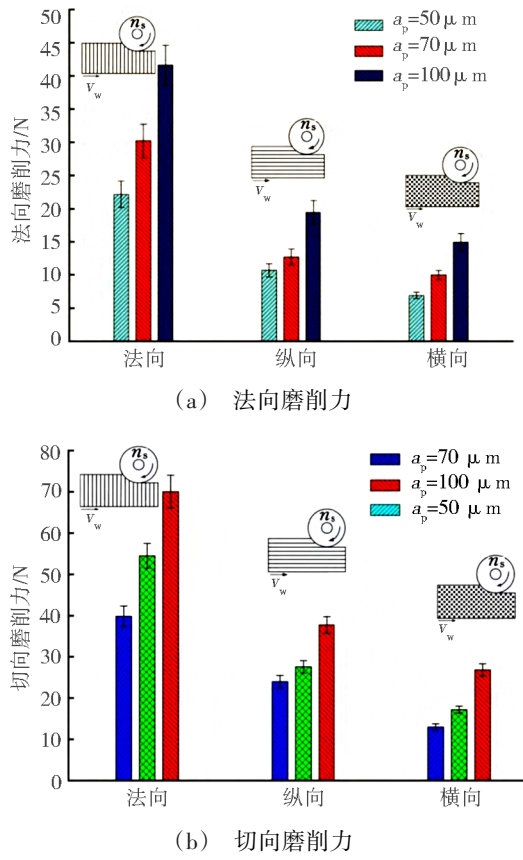


图 2 纤维方向对磨削力的影响^[31]

Fig. 2 Effect of fiber direction on grinding force^[31]

综上,在相同磨削参数条件下,沿不同纤维方向磨削碳纤维陶瓷基复合材料过程中所测的磨削力不同,无论是法向磨削力还是切向磨削力,沿法向、纵向和横向纤维方向磨削时所测的力在数值上呈递减规律,同时沿 3 个纤维方向磨削时所测的切向磨削力均明显大于法向磨削力,这是碳纤维陶瓷基复合材料在磨削加工中特有的属性。

1.3 超声振动辅助磨削对磨削力的影响

超声振动辅助磨削因其在光学玻璃、刚玉等硬脆材料加工中表现出磨削力小、表面质量好、损伤小、加工效率高等优势^[32-33],因此,超声振动辅助磨削技术同样也被国内外学者用来加工碳纤维陶瓷基复合材料,研究其对碳纤维陶瓷基复合材料磨削性能的影响。项超等^[34]对 2.5 维 C/SiC 复合材料进行了超声振动辅助和普通磨削两组对比实验,结果发现与普通磨削相比,超声振动辅助磨削可降低 35%~40% 的磨削力。DING 等^[35]对比分析了超声辅助磨削和普通磨削两种工艺条件下磨削 C/SiC 复合材料过程中的磨削力,发现超声加工方式可降低 7%~21% 的法向磨削力和 9.7%~19.4% 的切向磨削力,同时发现在超声振动的条件下磨削速度对磨削力的影响程度大于其他磨削参数。黄博^[36]等同样在用砂轮磨削加工 SiC/SiC 陶瓷基复合材料过程中,发现超声振动辅助磨削相比于普通磨削的磨削力降低了 10%~20%,并表明其原因是在超声振动的条件下,刀具断续磨削待加工表面,同时超声振动具有自润效应,在接触面产生一种类似油膜的物质,使摩擦力降低。湛青波等^[37]研究了超声振动方向和工艺参数对磨削 3 维针刺 C/SiC 复合材料过程中磨削力的影响,研究发现无论是施加横向超声振动还是纵向超声振动,所测的三向磨削力均小于普通铣磨加工后的三向磨削力。当施加横向超声振动后,在冲击的作用下,切入材料的速度增加,磨粒与工件的摩擦力减小,同时刀具冲击待加工表面,导致材料表面出现裂纹,降低了磨削力;而在施加纵向振动后,材料在边撞击边磨削加工的条件下去除,磨屑易于排出,减少磨屑与加工面之间的摩擦,使磨削力降低;此外,发现振幅大小从左趋近于 8 μm 时有利于降低磨削力,当振幅逐渐增加至 8 μm 时,由于刀具的锤击作用增强,导致材料表面裂纹和破碎现象增加,使磨削力降低,当振幅过大时,刀具的稳定性降低,导致磨削力增大。

综上,在磨削碳纤维陶瓷基复合材料时,可以得出超声振动辅助磨削可以降低磨削力,与磨削光学玻璃、刚玉等硬脆材料的影响规律相似。

1.4 其他因素对磨削力的影响

除了磨削参数、纤维方向、超声振动加工方式对磨削加工碳纤维陶瓷基复合材料的磨削力有影响之外,砂轮表面的形貌和碳纤维陶瓷基复合材料的组织也会影响磨削过程中的磨削力。LI 等^[38]综述了 T 型变形砂轮(TGWs)对磨削力的影响,发现开槽、开槽的几何形状、分段会影响砂轮磨粒与工件的接触面积和接触时间,进而降低平均磨削力和切削区温度,提高被加工工件的表面质量。TAWAKOLI 等^[39]通过分割砂轮来减少静态切削刃的方法开发了一种

分段砂轮(T形刀具轮廓),发现使用分段砂轮磨削陶瓷基复合材料过程中的磨削力约为普通砂轮磨削过程中的磨削力的50%。丁凯等^[40]分别磨削了C/SiC复合材料和SiC陶瓷,发现在相同磨削参数下,磨削SiC陶瓷材料的磨削力要大于磨削C/SiC复合材料的磨削力,这是由于它们组织不同造成的, SiC陶瓷材料致密性强于C/SiC复合材料,抗弯强度和基体相维氏硬度显著高于C/SiC复合材料,这就导致了磨粒切入SiC的难度大,故导致磨削SiC的磨削力远大于磨削C/SiC复合材料的磨削力。

综上,碳纤维陶瓷基复合材料在单颗磨粒磨削时,磨削力与磨削深度和进给速度均呈正相关性,与砂轮转速呈负相关性,而在砂轮磨削时,磨削力与砂轮转速和磨削深度均没有线性相关性;与沿90°方向磨削相比,沿0°纤维方向磨削时所测的磨削力要小,沿纤维法向、纵向和横向磨削材料时所测的磨削力在数值上呈递减规律;超声振动辅助磨削碳纤维陶瓷基复合材料可以降低磨削力,存在一个合适的超声振幅使获得的磨削力最小;此外,砂轮的表面轮廓和材料的组成成分也影响着磨削过程中所测的磨削力。

2 磨削加工后材料表面质量研究

表面质量作为评价磨削加工后工件质量的重要指标,会影响工件后续使用过程中的装配精度、疲劳强度、接触刚度以及使用寿命等,同样因为碳纤维陶瓷基复合材料独特的组织结构,使得其对磨削后的表面质量有独特的影响,因此,国内外学者研究了磨削参数、纤维方向、超声辅助磨削以及其他因素对碳纤维陶瓷基材料磨削后表面质量的影响。

2.1 磨削参数对表面质量的影响

如1.1节所述,磨削参数影响着磨削加工过程中砂轮与工件之间的接触、摩擦和去除行为,进而影响着磨削力的大小和变化情况,并在一定范围内决定着碳纤维陶瓷基复合材料磨削后的表面质量。LIU等^[41]采用树脂基金刚石砂轮对C/SiC复合材料进行平面磨削实验,发现表面粗糙度随着磨削深度和进给速度的增加而增加,随砂轮转速的增加而减小。李金锭等^[42]通过利用Abaqus软件对单颗磨粒平面磨削C/SiC复合材料进行了仿真分析,结果发现表面粗糙度与磨削深度呈正相关性。DU等^[29]对2D编织C/SiC复合材料进行了磨削加工,发现表面粗糙度随进给速度的增加而减小,与前面的结论不同,这是由于使用的C/SiC复合材料的编织结构不同导致的。

针对磨削参数对表面形貌的影响,刘琼等^[43]磨削了C/SiC复合材料,发现当磨削深度为20 μm时,相邻断裂的两纤维层的距离较大;当磨削深度为50

μm时,纤维断裂程度剧烈,相邻断裂的两纤维层的距离减小。屈硕硕等^[44]进行了C_f/SiC复合材料磨削实验(图3),结果发现当磨削深度为10 μm时,表面裂纹较短,纤维拔出和纤维露头比较均匀,表面质量较好;当磨削深度为50 μm时,表面裂纹长且宽,纤维露头长度增加,表面质量变差。GONG^[45]等通过磨削2.5维C_f/SiC复合材料来研究磨削参数对表面形貌的影响(图4),结果发现当磨削深度增加时,纤维大量断裂,这是因为磨削深度较小时,基体先开始断裂,纤维受到剪切作用,但剪切力不足以使纤维断裂,当磨削深度进一步增大时,基体完全断裂,纤维露出,纤维受到剪切作用以及砂轮的滑擦,纤维大量断裂;当进给速度增加时,表面形貌变差;当砂轮速度增加时,裂纹深度减小,纤维磨损严重,这是由于单位时间内参与磨削的有效磨粒数增加的缘故。

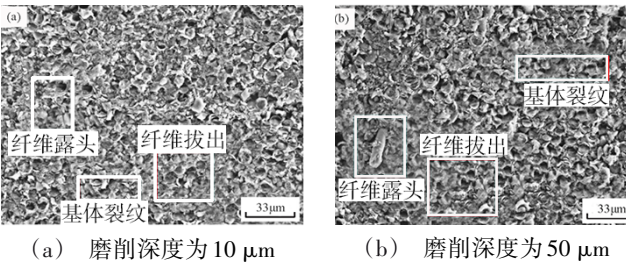


图3 不同磨削深度下的针刺纤维扫描电镜图^[44]
Fig. 3 SEM photos of needled punched fiber with different grinding depth of cut^[44]

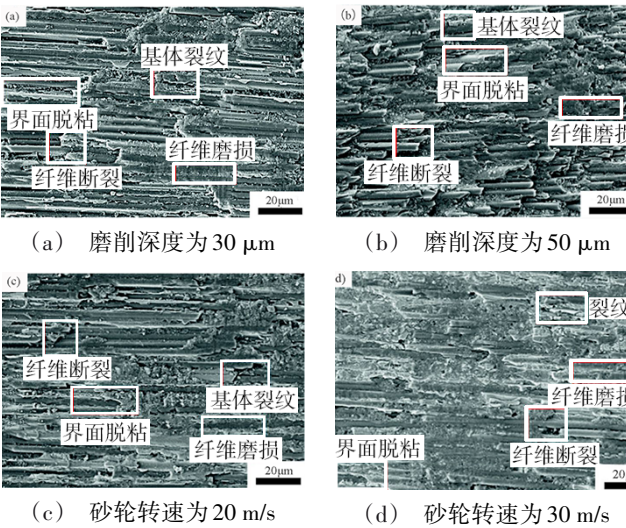


图4 不同磨削参数下平行纤维束扫描电镜图^[45]
Fig. 4 SEM photos of parallel fiber with different grinding parameters^[45]

综上,与磨削硬脆材料相比,碳纤维陶瓷基复合材料磨削加工后的表面质量与磨削参数关系的相同之处是,随着砂轮转速的增加,表面粗糙度减小,表面形貌得到改善;随着磨削深度和进给速度增大,表面粗糙度增大,纤维断裂现象明显,裂纹增加,加工

形貌差。不同之处是,由于2D C/SiC复合材料特殊的纤维编织方式,导致表面粗糙度随着进给速度的增加反而减小。

2.2 纤维方向对表面质量的影响

碳纤维陶瓷基复合材料作为一种新型复合材料,其在制备过程中纤维铺设方向多种多样,不同的纤维铺设方向导致其性能也不同,为了探究纤维方向对磨削后表面质量的影响,LIU等^[46]比较分析了在不同纤维方向(0°和90°)的条件下磨削2D C/SiC复合材料后对表面粗糙度的影响,如图5所示,发现在砂轮转速一定的条件下,沿0°纤维方向磨削的表面粗糙度大于沿90°纤维方向磨削的表面粗糙度。为了研究沿典型方向(法向、纵向和横向)磨削后对表面粗糙度的影响,刘谦等^[47]使用砂轮端面磨削了C/SiC复合材料,结果表明沿纵向、横向、法向磨削C/SiC复合材料后表面粗糙度的值呈现出依次递减的规律,这是由于碳纤维沿SiC基体铺设的方向多种多样,使材料的摩擦系数不同,当沿不同方向磨削时,对表面粗糙度的影响也不同。然而对于单向碳纤维陶瓷基复合材料来说,由于结构不同,沿典型方向磨削对表面粗糙度的影响也不同,对此,ZHANG等^[48]沿3个方向磨削了单向C/SiC复合材料,结果发现纤维方向对表面粗糙的影响与上述规律不同,沿纤维横向方向磨削后的表面粗糙度最小,而不是沿法向磨削最小,这是由于单向C/SiC复合材料在制备过程中纤维被解耦,避免了磨削时纤维之间的相互作用。

沿不同纤维方向磨削碳纤维陶瓷基复合材料所测的磨削力和表面粗糙度有差异,因此,不同纤维方

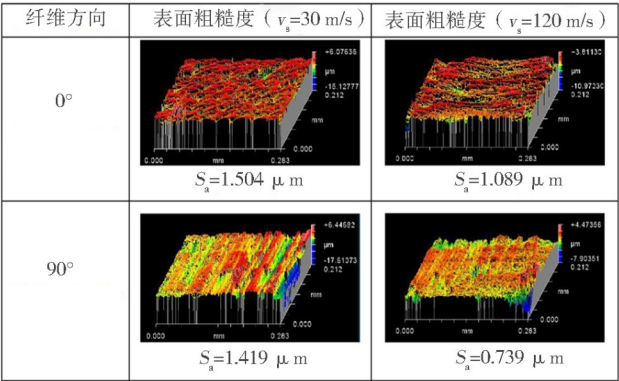


图5 不同转速下沿0°和90°纤维方向磨削后的表面粗糙度及三维微观形貌^[46]

Fig. 5 Surface roughness and 3D micromorphology of surfaces ground along 0° and 90° fiber direction with different grinding depth of cut^[46]

向也影响着碳纤维陶瓷基复合材料磨削后的表面形貌。WANG等^[25]进行了2D C/SiC复合材料的磨削实验,结果表明沿不同纤维方向加工所得到的表面形貌不同,这是由于沿不同纤维方向加工时纤维断裂机理不同造成的。为了研究沿典型方向磨削后对表面形貌的影响,张立峰等^[49]分别沿纤维法向、纵向和横向磨削了C/SiC复合材料,如图6所示,结果发现当沿纤维法向磨削时,纤维被拔出的位置留下凹坑,凹坑的断口参差不齐,这是由于陶瓷基体的强度和碳纤维的强度不同导致的;当沿纤维纵向磨削时,部分纤维从基体中分离出来,使加工表面出现类似于圆柱体的凹槽;当沿纤维横向磨削时,由于碳纤维抗剪切能力比SiC基体弱,在磨削C/SiC复合材料时,碳纤维被切断去除,加工表面出现沟槽。

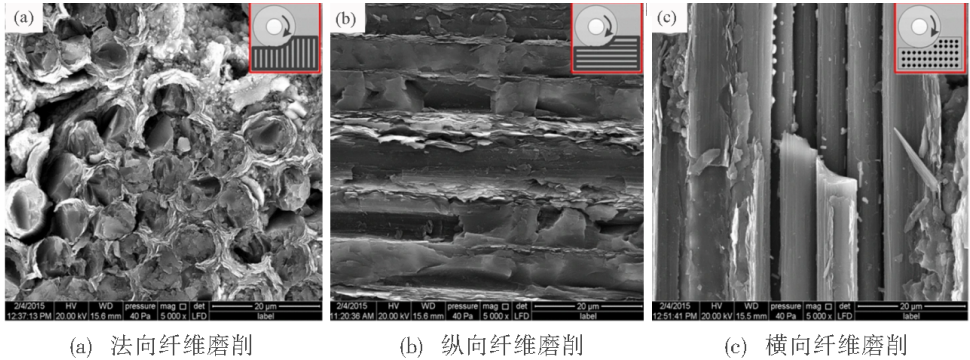


图6 沿典型方向磨削加工的微观形貌图^[49]

Fig. 6 Micromorphology of ground surfaces in typical direction^[49]

综上,沿不同方向磨削碳纤维陶瓷基复合材料时,其方向对表面质量的影响有显著的不同,沿90°纤维方向磨削后的表面粗糙度要小于沿0°纤维磨削后的表面粗糙度;沿纤维法向、横向和纵向磨削碳纤维陶瓷基复合材料后的表面粗糙度在数值上呈现出递增的规律;沿法向纤维方向磨削时,可以获得质量好的表面形貌;沿横向纤维磨削时,加工表面纤维剥

离,剥离处出现沟痕;沿纵向纤维方向磨削时,纤维出现大面积缺失。但对于磨削单向C/SiC复合材料时,却得到不同的结论,不是沿纤维法向方向磨削后获得表面粗糙度最小,而是沿纤维横向方向磨削后获得的表面粗糙度最小。

2.3 超声振动辅助磨削对表面质量的影响

为了获得更高的表面质量和加工效率,一些学

者将超声振动引入碳纤维陶瓷基复合材料的磨削加工中,并探讨了超声振动对表面质量的影响情况。AZARHOUSHANG 等^[50]进行了有限元建模和实验分析,发现超声振动辅助磨削 C/SiC 复合材料可以有效降低表面粗糙度。DING 等^[51]对 C/SiC 复合材料分别进行了超声振动辅助磨削和普通磨削,结果发现经过超声振动辅助和普通磨削后的表面粗糙度分别在 2.67~3.84、2.82~4.15 μm 范围内,磨削参数对表面粗糙度影响的幅度不大。赵凡等^[52]进行了 SiC_f/SiC

复合材料的超声辅助和普通磨削对比实验,见图 7,发现表面粗糙度随超声振幅的增加而减小,当振幅增加至某个值后,磨削后的表面粗糙度随着振幅的继续增大而增大,这是由于刀具在大振幅磨削时,冲击作用大,使材料表面破损,从而降低表面质量;在超声振动辅助磨削下,进给速度和磨削速度对表面粗糙度的影响程度要大于磨削深度,磨削深度对表面粗糙度影响不明显的原因在于 SiC_f/SiC 复合材料的结构致密性差,纤维和基体的结合强度弱等。

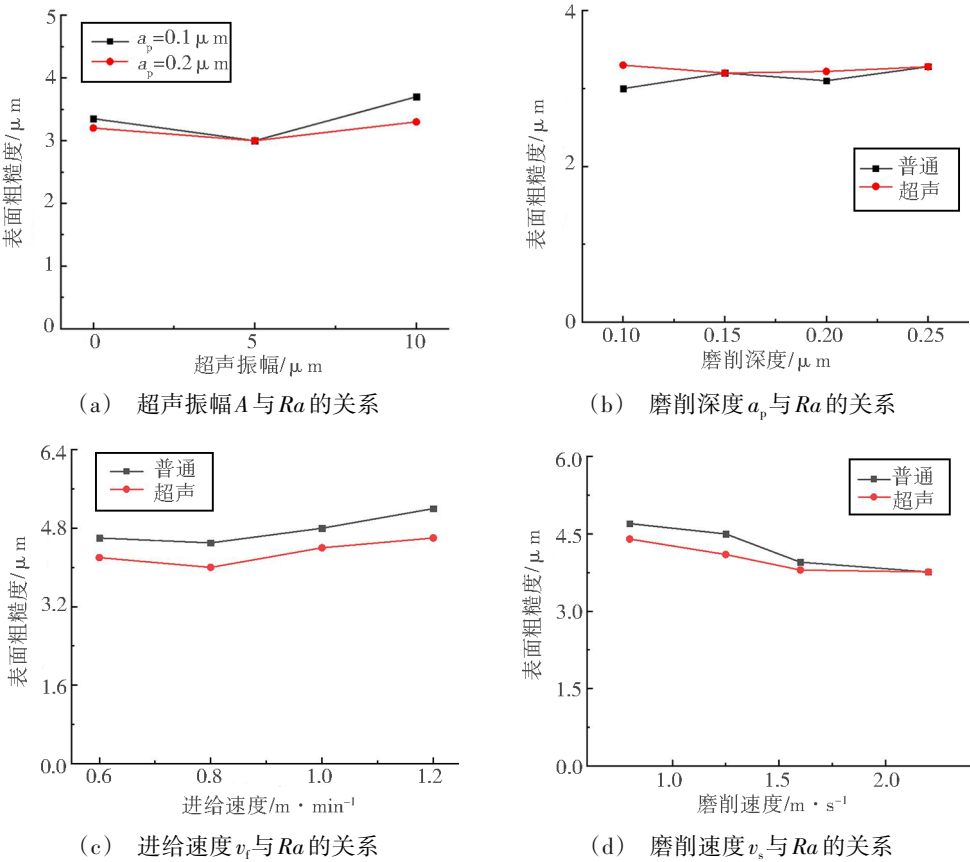


图 7 不同加工方式下磨削参数对表面粗糙度的影响^[52]

Fig. 7 Effect of grinding parameters on surface roughness in different processing methods^[52]

WANG 等^[53]对 2D C/SiC 复合材料进行旋转超声振动辅助磨削,发现当砂轮转速相对较低时,超声振幅的增加有助于表面质量提高;当砂轮转速相对较高时,随着超声振幅增加表面质量的改善并不显著。FU 等^[54]分别进行了 C/SiC 复合材料的超声辅助磨削和普通磨削实验(图 8),发现了超声辅助磨削和普通磨削加工后纤维的断裂尺寸近似相等,但由于超声振动往复锤击加工表面,使碳纤维出现大面积断裂;此外,还发现在超声振动辅助磨削的条件下,磨削速度和进给速度对表面粗糙度的影响并不呈现出稳定的规律,而 R_a 随着磨削深度的增大而增大。

湛青坡等^[37]采用超声振动辅助和普通磨削的方法加工了 C/SiC 复合材料,如图 9 所示,发现施加进给或纵向方向的超声振动,均可以降低表面粗糙度和

改善表面形貌,两种加工方式下的磨削参数对表面粗糙度的影响趋势同,加工过程中存在一个合适的超声振幅可以使表面粗糙度最小,与赵凡所得的结论相同。当普通铣磨加工时,碳纤维被拔出现象严重,纤维拔出处出现孔洞,这是因为纤维在剪切力和拉伸力的作用下,纤维开始出现裂纹并且扩展,当裂纹扩展到碳纤维和碳化硅基体的接触处时,由于二者界面结合强度较弱,纤维会在砂轮磨粒的作用下被拔出,表面形貌变差,表面粗糙度增加;当沿进给方向施加超声振动铣磨时,纤维被拔出的数量变少,一方面是由于砂轮的磨粒切入工件速度会加快,使纤维易于断裂和切除,另一方面,超声振动使砂轮沿进给方向冲击材料时,裂纹将会沿着材料内部断裂,部分纤维将会随着砂轮往复运动而被拔出,表面

质量得到改善;当沿纵向施加超声振动铣磨时,纤维被拔出现象明显降低,这是因为刀具垂直振动使碳纤维反复受到拉力和压力,促使纤维断裂,同时刀

具往复振动,使磨屑易于排出,磨粒不易变钝,碳纤维被剪切去除,被拔出的纤维变少,表面质量得到明显地改善,表面粗糙度降低。

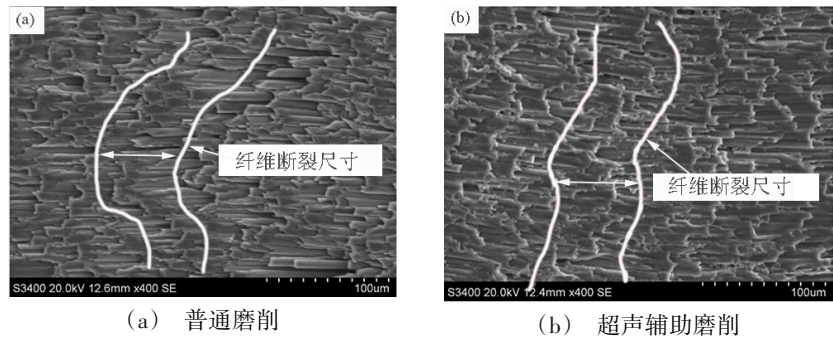


图8 不同加工方式对纤维断裂尺寸的影响^[54]

Fig. 8 Effect of fiber fracture scale in different processing methods^[54]

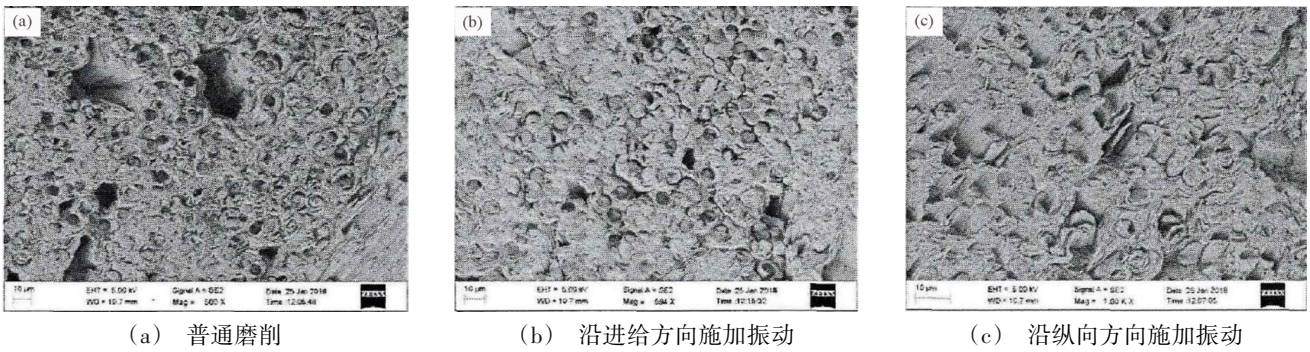


图9 不同加工方式下C/SiC复合材料的表面微观形貌^[37]

Fig. 9 Micromorphology of C/SiC composite surfaces ground with different processing methods^[37]

综上,从实验的角度探究了超声振动辅助方式对磨削碳纤维陶瓷基复合材料后表面质量的影响规律,与普通磨削相比,超声振动辅助磨削可以降低表面粗糙度,改善表面形貌,施加纵向超声振动辅助磨削后的表面质量要优于施加横向超声振动辅助磨削;存在一个最优超声振幅可使表面粗糙度最小;进给速度和砂轮速度对表面粗糙度影响程度大于磨削深度。

2.4 其他因素对表面质量的影响

除了磨削参数、纤维方向、不同加工方式对碳纤维陶瓷基复合材料磨削后的表面粗糙度有影响之外,砂轮的钝化和磨粒的粒度、陶瓷基的组织以及加工工艺也影响着表面质量。WANG等^[25]研究了砂轮磨钝后对加工质量的影响,发现砂轮钝化磨削后,基体表面有凹坑和裂纹,纤维损坏严重,大量纤维被拉出,表面粗糙度变大,这是由于砂轮钝化,磨粒不再锋利,磨粒难以切入工件表面造成的。LIN等^[27]对比分析了使用240#和100#两种型号的砂轮磨削SiO₂/SiO₂复合材料后的表面粗糙度,结果发现使用240#砂轮磨削后的表面粗糙度Ra在8.0~10.1 μm之间,100#砂轮磨削后的Ra在10.2~16.2 μm之间。也有学者研究了砂轮的磨削方式(连续或间歇方式)对表面质量的影响,如TAWAKOLI等^[39]以两种不同的工

艺对C/SiC复合材料进行磨削,结果发现与间歇磨削(IG)后获得的表面粗糙度相比,常规磨削后获得的表面粗糙度在数值上降低了约2~4倍,表面形貌得到改善。丁凯等^[40]磨削了C/SiC复合材料和SiC陶瓷材料,发现磨削C/SiC复合材料后测得Ra在0.8~1.0 μm之间,磨削SiC陶瓷材料后Ra在0.2~0.3 μm之间,这是由于C/SiC复合材料的结构致密性差,磨削后空隙露出,致使表面粗糙度增大。

综上所述,碳纤维陶瓷基复合材料磨削加工后表面质量与磨削参数、纤维方向、加工方式等因素有关,通常表面质量变化的趋势与磨削深度和进给速度变化的趋势相同,与砂轮转速变化的趋势相反,但对于磨削2D编织C/SiC复合材料,表面粗糙度的变化趋势与进给速度变化趋势相反;沿纤维法向磨削时,纤维被拔出,加工表面出现孔洞;沿纤维纵向磨削时,部分纤维从材料中剥离,使加工表面出现圆柱体凹槽;沿纤维横向磨削时,一部分加工表面出现断续沟槽;沿纤维法向、横向和纵向磨削碳纤维陶瓷基复合材料后测的表面粗糙度在数值上呈现出递增的规律,然而磨削单向C/SiC复合材料时,沿纤维横向方向磨削后测的表面粗糙度要比沿其他两个方向磨削小;与传统磨削碳纤维陶瓷基复合材料相比,超声

振动辅助磨削可以提高加工表面的精度和改善表面形貌;此外,砂轮的钝化和磨粒的粒度、陶瓷基的组织以及磨削的方式也影响着碳纤维陶瓷基复合材料的加工质量。

3 碳纤维陶瓷基复合材料磨削机理研究

碳纤维陶瓷基复合材料由于其独特的制备方式、纤维排布方式、材料分布等特点,使其磨削去除机理有别于匀质材料和其他复合材料,目前,国内外关于碳纤维陶瓷基复合材料磨削机理研究,主要集中于单颗粒磨削、砂轮磨削和超声辅助磨削机理等方面。

3.1 单颗粒磨粒磨削碳纤维陶瓷基复合材料去除机理

砂轮的磨削加工是依靠砂轮表面上的磨粒磨削而使材料去除的过程,因此,为了研究砂轮磨削碳纤维陶瓷基复合材料的去除机理,首先需要从单颗粒磨粒磨削碳纤维陶瓷基复合材料的去除机理入手。LIU等^[41]使用单颗粒磨粒划擦了2D C_f/SiC复合材料,发现C_f/SiC复合材料的去除形式主要为脆性断裂。LI

等^[24]通过对C/SiC复合材料分别进行了单颗磨粒横向和纵向划痕实验,结果表明C/SiC复合材料的去除方式是脆性断裂,这是由于C/SiC复合材料在磨削的过程中会发生SiC基体开裂、纤维断裂和纤维剥离等现象;此外,在C/SiC复合材料刻划沟槽的入口和出口处由于碳纤维的宏观脆性断裂,没有形成延性去除模式,其根本原因是陶瓷基体不连续分布。张立峰等^[49]对C/SiC复合材料进行了沿纤维法向、纵向和横向的单颗磨粒刻划实验,研究其界面的失效形式和材料的去除方式,如图10和图11所示,发现当磨粒沿横向刻划时,由于界面处的纤维易于剥离,在磨粒的作用下,纤维以大规模剥落的形式去除,并且少量SiC基体崩碎,此过程定义为界面的剥离;当磨粒沿纵向刻划时,纤维和基体受到剪切力的作用,由于纤维抗剪切性能较弱,纤维被切断,此过程称为界面的剪切;当沿法向刻划时,基体和纤维均崩碎断裂,界面发生第三种失效模式,即综合失效模式。

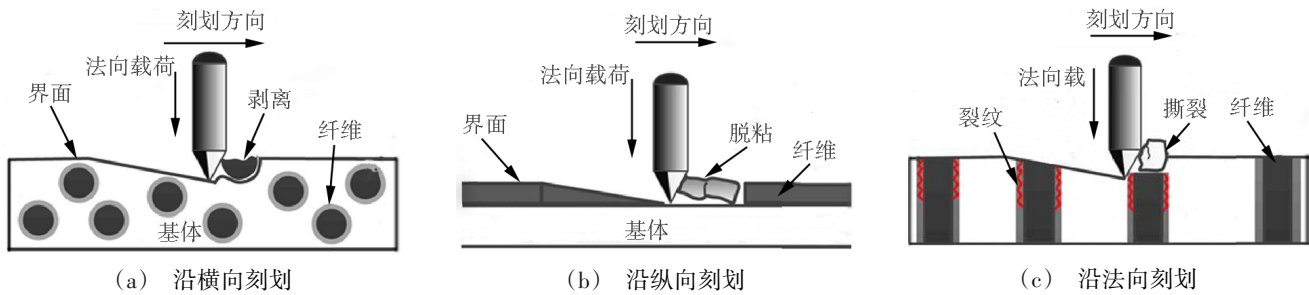


图10 刻划过程中的界面失效机制原理图^[49]

Fig. 10 Failure mechanism of the interface in the process of nanoscratch^[49]

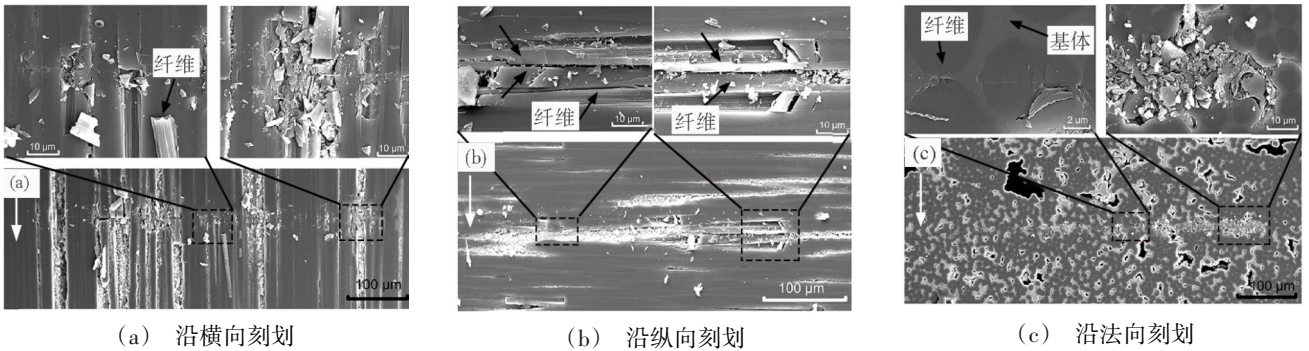


图11 沿不同方向刻划形貌图^[49]

Fig. 11 Micromorphology test result of scratching in the different direction^[49]

综上,碳纤维陶瓷基复合材料在单颗磨粒磨削时,其去除方式以脆性断裂为主,界面失效模式分别是剥离、剪切和综合失效,界面的损伤形式包括纤维断裂与分层、SiC基体微裂纹、界面层失粘等。

3.2 砂轮磨削碳纤维陶瓷基复合材料去除机理

同时,一些学者在单颗磨粒刻划实验的基础上,研究了砂轮磨削碳纤维陶瓷基复合材料的去除机理。GONG等^[45]分别进行了SiC和2.5维C_f/SiC复合

材料的磨削实验,结果发现SiC的去除方式是裂纹扩展,而C_f/SiC复合材料的去除方式是基体开裂、纤维断裂和界面脱粘。刘杰等^[55]研究发现2D C/SiC的磨削加工机理既不同于塑性金属材料,也不同于普通脆性材料,指出碳纤维陶瓷基复合材料在磨削过程中,陶瓷基体材料首先被逐渐去除,使得纤维材料裸露出来,然后纤维除了受到剪切作用,还受到砂轮上磨粒的滑擦作用,磨粒切削刃压入SiC基体与碳纤维

内,陶瓷基体的连续性被破坏,纤维也发生了局部的挤压作用,这些复合作用使纤维发生了断裂。QU等^[56]利用砂轮周向磨削了C_f/SiC复合材料,发现单向C_f/SiC的基本损伤形式包括纤维断裂、界面脱粘、纤维磨损、基体裂纹、纤维拔出和纤维露头。为研究沿不同方向磨削的界面失效模式,ZHANG等^[48]沿3个方向磨削了C/SiC复合材料(图12),结果发现砂轮磨削C/SiC复合材料的界面失效模式与单颗磨粒磨削

的界面失效模式相同,即包括界面剥离、剪切和综合失效模式;此外,与金属基和树脂基复合材料不同的是,由于纤维和陶瓷界面结合性能相对较弱,碳纤维陶瓷基复合材料磨削过程中,裂纹先在界面处出现并传播;在沿纤维纵向磨削过程中,磨粒冲击载荷作用下,纤维和陶瓷基体处的界面出现剪切失效现象,由于纤维和基体断裂韧性及断裂延伸率的不同,部分纤维首先被拉断,导致复合材料出现层状剥落。

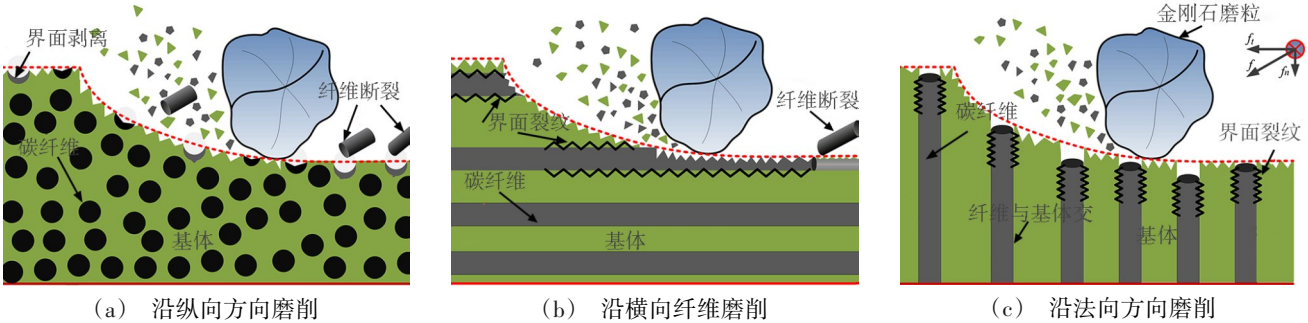


图12 典型纤维方向磨削损伤示意图^[48]

Fig. 12 Diagram of grinding damage in typical direction^[48]

综上,在砂轮磨削碳纤维陶瓷基复合材料过程中材料的去除形式包括基体破碎和纤维断裂,其界面失效模式与单颗磨粒磨削的界面失效模式相同,但由于砂轮磨削碳纤维陶瓷基复合材料是多磨粒共同磨削作用的结果,界面的损伤形式往往是界面脱粘、纤维磨损、基体裂纹、纤维拔出和纤维露头等多种形式共存。

3.3 超声振动辅助磨削碳纤维陶瓷基复合材料的去除机理

鉴于超声振动辅助磨削碳纤维陶瓷基复合材料时的优越性,国内外学者探究了超声振动辅助磨削碳纤维陶瓷基复合材料的去除机理。DING等^[50]在研究C/SiC复合材料超声辅助磨削表面/亚表面破损研究过程中发现不同角度的纤维具有不同的断裂类型,0°纤维为层状脆性断裂,90°纤维为由于纤维断裂和拔出而形成的凹坑;此外,由于陶瓷基体的脆性大于碳纤维,超声振动磨削过程中陶瓷基体上首先出现裂纹,并沿垂直于碳纤维与陶瓷基体界面的方向传播,当裂纹到达界面时,在陶瓷基体材料剪切应力作用下,碳纤维与陶瓷基体发生非同步收缩,裂纹的扩展被阻止同时裂纹扩展的方向发生改变,向复合材料中薄弱部位延伸,在裂纹进一步扩展过程中,部分纤维开始脆性断裂,因此,纤维方向不同使得断裂形式和程度也不同。王研等^[57]对C/SiC复合材料进行了超声辅助磨削实验,发现超声振动会使磨粒轨迹叠加,能减少纤维断裂和基体脱落现象。为了探究超声振动辅助磨削和普通磨削对碳纤维陶瓷基复合材料去除机理的区别,康仁科等^[58]进行了超声振

动辅助磨削SiC_f/SiC复合材料的实验,如图13所示,结果发现普通磨削加工后,材料表面存在纤维阶梯状断裂、凹槽及折断的纤维;而超声辅助磨削中,脱离陶瓷基体的纤维被完全去除,纤维剥落减少,陶瓷基体中不存在剥落凹槽,其表面质量提高,同时,在超声辅助磨削中,振幅增大时,超声冲击作用变大,纤维束的阶梯状脆性断裂边界曲线变得更加明显。

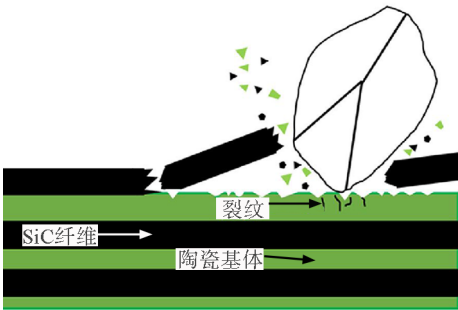


图13 SiC_f/SiC复合材料磨削的去除过程^[58]

Fig. 13 The grinding removal process of SiC_f/SiC composites^[58]

综上所述,单颗磨粒磨削、砂轮磨削和超声辅助磨削碳纤维陶瓷基复合材料的去除方式主要是基体和碳纤维的断裂破碎,但经过超声振动辅助磨削后的去除方式是以短纤维破碎的形式去除;单颗磨粒磨削碳纤维陶瓷基复合材料的界面损伤形式包括纤维断裂和分层、SiC基体微裂纹以及界面层失粘等,但碳纤维陶瓷基复合材料经过砂轮磨削后界面的损伤形式通常是界面脱粘、纤维磨损、基体裂纹、纤维拔出和纤维露头 etc 共存。

4 结语

目前,关于碳纤维陶瓷基复合材料的磨削加工

主要集中在磨削力、表面质量以及磨削机理方面,主要得到以下结论:

(1)与磨削匀质材料相比,磨削加工参数对碳纤维陶瓷基复合材料磨削加工的磨削力、表面质量的影响大致相似;

(2)磨削方向与纤维方向的夹角是碳纤维陶瓷基复合材料磨削加工的磨削力、表面质量等变化的重要因素,磨削加工时需重点考虑磨削方向对磨削效果的影响;

(3)超声振动辅助磨削是碳纤维陶瓷基复合材料磨削加工的一种重要手段,它可以有效降低磨削力、表面粗糙度和纤维破碎等情况;

(4)碳纤维陶瓷基复合材料磨削时去除方式主要是基体和碳纤维的断裂破碎;超声振动辅助磨削以短纤维破碎去除为主;碳纤维陶瓷基复合材料的界面损伤形式包括纤维断裂和分层、SiC基体微裂纹、界面层失粘、纤维磨损、纤维拔出和纤维露头。

虽然,碳纤维陶瓷基复合材料的磨削加工已经开展了一定阶段的研究进展,但是还存在以下需要进一步深入研究的方面:

(1)针对碳纤维陶瓷基复合材料独特的特性,研究具有针对性的专用砂轮、磨削液等来提高磨削后的表面质量;

(2)目前,碳纤维陶瓷基复合材料磨削加工后的表面多以破碎、分层和纤维拔出等不稳定的去除特征为主,碳纤维陶瓷基复合材料精密磨削甚至塑性域磨削的研究有待开展;

(3)热量在碳纤维复合材料中主要沿着纤维方向传递,并影响其加工性能和服役性能,而关于碳纤维陶瓷基复合材料磨削过程中的磨削热对工件性能和表面质量的影响机理等研究有待开展;

(4)碳纤维陶瓷基复合材料的磨削加工多针对平面磨削的磨削力、表面质量和磨削机理研究,而关于其型孔、自由曲面、沟槽等特征表面的研究较少;

(5)碳纤维陶瓷基复合材料的辅助磨削加工主要采用超声振动辅助磨削,可探究其他复合加工方法,如激光辅助磨削、电火花辅助磨削等,以实现碳纤维陶瓷基复合材料的高效、精密加工。

参考文献

[1] 周井文. 单向铺层CFRP铣磨加工缺陷分析与控制[D]. 江苏:南京航空航天大学,2015.

ZHOU J W. Analysis and control of machining defects during abrasive cutting of unidirectional CFRP laminates [D]. Jiangsu: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[2] 杨桂英,赵睿,肖冰,等. 碳纤维复合材料在汽车轻量化中的应用[J]. 当代石油石化,2020,28(10):24-28.

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第3期

YANG G Y, ZHAO R, XIAO B, et al. Application of CFRP in automobile light weighting [J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2020, 28(10): 24-28.

[3] Sauer K, Hertel M, Fickert S, et al. Cutting parameter study of CFRP machining by turning and turn-milling [J]. Procedia Cirp, 2020, 88: 457-461.

[4] Ramirez C, Poulachon G, Rossi F, et al. Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling [J]. Procedia CIRP, 2014, 13: 163-168.

[5] Pecat O, Rentsch R, Brinksmeier E. Influence of milling process parameters on the surface integrity of CFRP [J]. Procedia Cirp, 2012, 1: 466-470.

[6] XU H, HU J. Modeling of the material removal and heat affected zone formation in CFRP short pulsed laser processing [J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 46: 354-364.

[7] SUN D, HAN F, YING W. The experimental investigation of water jet - guided laser cutting of CFRP [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(1): 719-729.

[8] 靳成学. 碳纤维复合材料磨料水射流加工工艺参数优化设计[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2005.

JIN C X. Optimal design of technical parameters for abrasive water jet processing of carbon fiber composite materials [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2005.

[9] 苏纯兰,周长灵,徐鸿照等. 碳纤维增韧陶瓷基复合材料的研究进展[J]. 佛山陶瓷,2020,30(02):10-21.

SU C L, ZHOU C L, XU H Z, et al. Progress in carbon fiber reinforced ceramic matrix composites [J]. FoShan Ceramics, 2020, 30(02): 10-21.

[10] LU Z L, CAO J W, SONG Z Q, et al. Research progress of ceramic matrix composite parts based on additive manufacturing technology [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2019, 14(4): 333-348.

[11] Garshin A P, Kulik V I, Matveev S A, et al. Contemporary technology for preparing fiber reinforced composite materials with a ceramic refractory matrix [J]. Refractories and Industrial Ceramics, 2017, 58(2): 148-161.

[12] YANG Y, XU F, GAO X, et al. Impact resistance of 2D plain woven C/SiC composites at high temperature [J]. Materials & Design, 2016, 90: 635-641.

[13] 陆有军,王燕民,吴澜尔. 碳/碳化硅陶瓷基复合材料的研究及应用进展[J]. 材料导报,2010,24(21):14-19.

LU Y J, WANG Y M, WU L E. Development and application of carbon/silicon carbide ceramic matrix composite [J]. Material Guide, 2010, 24(21): 14-19.

[14] ZHOU H, ZHANG C R, CAO Y B, et al. Lightweight C/SiC mirrors for space application [C] //2nd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Large Mirrors and Telescopes. International Society for Optics and Photonics, 2006, 6148: 61480L.

[15] DIAZ, ORIOL GAVALDA, LUNA, et al. The new

challenges of machining ceramic matrix composites (CMCs): Review of surface integrity [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture: Design, research and application, 2019, 13924–36.

[16] 焦浩文,陈冰,左彬. C/SiC 复合材料的制备及加工技术研究进展[J]. 航空材料学报, 2021, 41(1): 19–34.

JIAO H W, CHEN B, ZUO B. Research progress in preparation and processing technology of C/SiC composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(01): 19–34.

[17] YANG Z C, ZHU Z D, ZHANG G X, et al. Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020: 103594.

[18] HU W Q, SHIN Y C, KING G B. Micromachining of metals, alloys, and ceramics by picosecond laser ablation [J]. Journal of manufacturing science and engineering, 2010, 132(1): 165–174.

[19] RAMULU M, Jenkins M G, Guo Z. Abrasive water jet machining mechanisms in continuous-fiber ceramic composites [J]. Journal of Composites, Technology and Research, 2001, 23(2): 82–91.

[20] FENG G, GUO J, ZHANG G. Material removal characteristics of ultra-precision grinding silicon carbide ceramics [J]. Advances in Applied Ceramics, 2020, 119(4): 175–182.

[21] LI P, JIN T, XIAO H, et al. Effects of wheel speed on surface/subsurface damage characteristics in grinding of glass-ceramics [J]. Ceramics International, 2020, 46(11): 17717–17728.

[22] LU Y J, LUO W, WU X Y, et al. Efficient and precise grinding of sapphire glass based on dry electrical discharge dressed coarse diamond grinding wheel [J]. Micromachines, 2019, 10(9): 625.

[23] 任敬心. 磨削原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.

REN J X. Grinding theory [M]. Beijing: Electronic Technology Press, 2011.

[24] LI C Y, GE X, WANG H, et al. Study of material removal mechanisms in grinding of C/SiC composites via single-abrasive scratch tests [J]. Ceramics International, 2019, 45(4): 4729–4738.

[25] WANG Y G, LIN B. Research of the grinding force and surface morphology of fiber reinforced ceramic matrix composite [C]// Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd, 2012, 569: 132–135.

[26] 屈硕硕, 巩亚东, 杨玉莹, 等. 2.5D C_f/SiC 复合材料磨削工艺试验研究 [J]. 东北大学学报, 2020, 41(2): 252–257.

QU S S, GONG Y D, YANG Y Y, et al. Research on grinding process performance of 2.5D C_f/SiC [J]. Journal of Northeastern University, 2020, 41(2): 252–257.

[27] LIN B, WANG H J, WEI J H, et al. Diamond wheel

grinding characteristics of 3D orthogonal quartz fiber reinforced silica ceramic matrix composite [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(5): 404–414.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 王涛, 王盛, 乔伟林, 等. 单向 C/SiC 复合材料平面磨削的磨削力模型研究 [J]. 中国机械工程, 2019, 30(17): 2017–2021.

WANG T, WANG S, QIAO W L, et al. Research on grinding force model of plane grinding for unidirectional C/SiC composite [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(17): 2017–2021.

[31] 张立峰, 王盛, 李战, 等. 纤维方向对单向 C/SiC 复合材料磨削加工性能的影响 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(3): 373–377.

ZHANG L F, WANG S, LI Z, et al. Effect of fiber direction on grinding performances for unidirectional C/SiC composites [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(03): 373–377.

[32] JIANG C, WANG C, LI H. Experimental investigation of brittle material removal fraction on an optical glass surface during ultrasound-assisted grinding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(1): 419–426.

[33] ZHANG C L, FENG P F, ZHANG J F. Ultrasonic vibration-assisted scratch-induced characteristics of C-plane sapphire with a spherical indenter [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 64: 38–48.

[34] 项超, 陈涛, 李红博, 等. 超声振动磨削 C/SiC 复合材料的试验研究 [J/OL]. 航空制造技术: 1–6.

XIANG C, CHEN T, LI H B, et al. Experimental study on ultrasonic vibration grinding of C/SiC composites [J/OL]. Aviation Manufacturing Technology: 1–6.

[35] DING K, FU Y C, SU H H, et al. Experimental study on ultrasonic assisted grinding of C/SiC composites [C]// Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2014, 620: 128–133.

[36] 黄博, 汪文虎, 蒋睿嵩, 等. SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料超声振动辅助切削试验研究 [J]. 电加工与模具, 2021(1): 55–59.

HUANG B, WANG W H, JIANG R S, et al. Study on ultrasonic vibration-assisted cutting for SiC_f/SiC ceramic matrix composites [J]. Electrical Machining and Mold, 2021(01): 55–59.

[37] 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]. 山东: 山东大学, 2018.

ZHAN Q B. Research on ultrasonic vibration assisted mill-grinding technology of three-dimensional [D]. Shandong: Shandong University, 2018.

[38] LI H N, Axinte D. Textured grinding wheels: a review [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 109: 8–35.

[39] 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.

[40] 丁凯,傅玉灿,苏宏华,等. C/SiC复合材料组织对磨削力与加工表面质量的影响[J]. 中国机械工程, 2013, 24(14):1886–1890.

DING K, FU Y C, SU H H, et al. Effect of C/SiC Composites Material Structure on Grinding Forces and Machined Surface Quality [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(14): 1886–1890.

[41] LIU Q, HUANG G, XU X, et al. A study on the surface grinding of 2D C/SiC composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(5): 1595–1603.

[42] 李巾铤,任成祖,吕哲,等. 单颗粒金刚石平面磨削C/SiC复合材料的有限元仿真[J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32(5):686–689,715.

LI J D, REN C Z, LV Z, et al. Finite element simulation of single diamond abrasive surface grinding C/SiC [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2014, 32 (05) : 686–689,715.

[43] 刘琼,黄国钦,徐西鹏. 2D-C/SiC复合材料磨削加工表面形成机制[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(2):228–233.

LIU Q, HUANG G Q, XU X P. Surface forming mechanism of grinding 2D-C/SiC composites [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2018, 46(2) : 228–233.

[44] 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(09):1310–1315.

QU S S, GONG Y D, YANG Y Y, et al. Study on grinding surface quality of unidirection carbon fiber reinforced ceramic matrix composites [J]. Journal of Dongbei University (Natural Science Edition), 2019, 40(09): 1310–1315.

[45] GONG Y D, QU S S, YANG Y Y, et al. Some observations in grinding SiC and silicon carbide ceramic matrix composite material [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(5): 3175–3186.

[46] LIU Q, HUANG G Q, FANG C F, et al. Experimental investigations on grinding characteristics and removal mechanisms of 2D-C_f/C-SiC composites based on reinforced fiber orientations[J]. Ceramics International, 2017, 43(17): 15266–15274.

[47] 刘谦,孟凡卓,田欣利,等. 基于纤维方向的C/SiC复合材料端面磨削实验研究[J]. 装甲兵工程学院学报,

2018, 32(3):94–98,105.

LIU Q, MENG F Z, TIAN X L, et al. Experimental study on surface grinding of C/SiC composites based on fiber orientation [J]. Journal of Academy of Force Engineering, 2018, 32(03): 94–98.

[48] ZHANG L F, REN C Z, JI C H, et al. Effect of fiber orientations on surface grinding process of unidirectional C/SiC composites[J]. Applied Surface Science, 2016, 366: 424–431.

[49] 张立峰. 陶瓷基复合材料界面强度与磨削过程材料去除机理研究[D]. 天津:天津大学, 2015.

ZHANG L F. Research on the inter-facial strength and grinding mechanism of material removal for ceramic matrix composites[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.

[50] AZARHOUSHANG B, Tawakoli T. Development of a novel ultrasonic unit for grinding of ceramic matrix composites [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(9): 945–955.

[51] DING K, FU Y C, SU H H, et al. Study on surface/subsurface breakage in ultrasonic assisted grinding of C/SiC composites [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(9): 3095–3105.

[52] 赵凡. 超声辅助磨削碳化硅纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料试验研究[D]. 辽宁:大连理工大学, 2019.

ZHANG F. Experimental study on ultrasonic assisted grinding of SiC/SiC composites[D]. Liaoning, Dalian University of Technology, 2019.

[53] WANG J J, ZHANG J F, FENG P F. Effects of tool vibration on fiber fracture in rotary ultrasonic machining of C/SiC ceramic matrix composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 129: 233–242.

[54] FU Y C, SU H H, HE T, et al. Experimental study on ultrasonic assisted grinding of C/SiC composites [C]. 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, 2015.

[55] 刘杰,李海滨,张小彦,等. 2D-C/SiC高速深磨磨削特性及去除机制[J]. 复合材料学报, 2012, 29(4):113–118.

LIU J, LI H B, ZHANG X Y, et al. Investigation of grinding characteristics and removal mechanisms of 2D-C/SiC in high speed deep grinding[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(4): 113–118.

[56] QU S S, GONG Y D, YANG Y Y, et al. Grinding characteristics and removal mechanisms of unidirectional carbon fibre reinforced silicon carbide ceramic matrix composites [J]. Ceramics International, 2019, 45(3): 3059–3071.

[57] 王岩. 轴向超声振动辅助磨削加工机理与试验研究[D]. 天津:天津大学, 2015.

WANG Y. The mechanism and experimental study of axial ultrasonic vibration assisted grinding [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.

[58] 康仁科,赵凡,鲍岩,等. 超声辅助磨削SiC/SiC陶瓷基复合材料[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019, 39(4):85–91.

KANG R K, ZHAO F, BAO Y, et al. Ultrasonic assisted grinding of SiC/SiC composites [J]. Diamond&Abrasives Engineering, 2019, 39(4): 85–91.