

# 旋转超声振动端面磨削CFRP 表面质量研究\*

刘树良<sup>1</sup>, 陈涛<sup>1</sup>, 魏宇祥<sup>1</sup>, 吴超群<sup>1,2</sup>

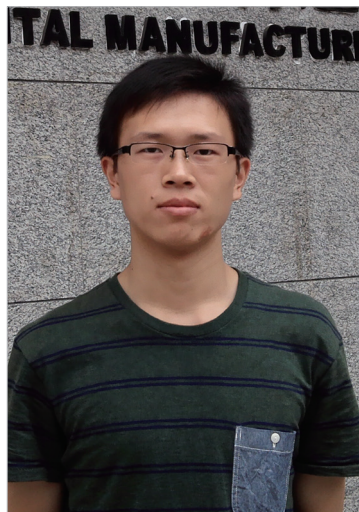
(1. 武汉理工大学机电工程学院, 武汉 430070;

2. 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**[摘要]** 以多向层铺树脂基碳纤维增强复合材料为研究对象, 采用超声振动磨削和普通磨削对其表面加工质量进行了端面磨削试验研究。通过正交试验和单因素试验分析了各工艺参数对工件表面质量的影响规律, 并由表面粗糙度及微观形貌进一步分析了磨削机理。试验结果表明: 在超声磨削过程中提高主轴转速、减小进给速度, 同时采用合适的切削深度和工具粒度, 有助于获得高质量的加工表面; 超声振动磨削和普通磨削后, 工件表面均存在纤维丝断裂、剥离和凹坑等缺陷, 超声振动磨削后的加工缺陷出现的程度和概率均较低, 表面加工质量较好。

**关键词:** 碳纤维增强复合材料; 旋转超声振动端面磨削; 加工表面质量

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2016.15.057



刘树良

博士研究生, 研究方向为数字制造科学。

碳纤维增强复合材料(CFRP)是一种基于碳/石墨纤维的纤维增强聚合物, 它有着极高的强度和较轻

\*基金项目: 湖北省科技计划项目(2015BAA022); 数字制造装备与技术国家重点实验室开放课题(DMETKF2015014)。

的重量。碳纤维复合材料耐热性能好, 具有高强度-质量比、高模量-质量比( $E/\rho$ )、高阻尼能力、较好的尺寸稳定性、出色的损伤容限以及良好的耐腐蚀和抗疲劳性能, 因此广泛应用于航空航天、机器人、建筑业、化工机械、医疗和军工领域<sup>[1]</sup>。CFRP一般以树脂为基体、碳纤维为增强体, 属于典型的难加工材料。与金属材料不同, CFRP在不同层铺方向上呈现各相异性、不均匀性的特点, 而且碳纤维增强体强度较高, 为硬脆材料, 使得在磨削加工过程中工件表面质量难以保证, 易出现纤维断裂、剥离及凹坑等缺陷, 磨削工具易堵塞磨损, 耐用度较低<sup>[2-3]</sup>。

相比于传统磨削加工, 超声振动磨削可以降低磨削力和磨削热, 减少工件表面、亚表面损伤以及延长磨具寿命, 显著提高加工效率, 获得较理想的加工质量。国内外学者对此进行了许多研究, 李志凯<sup>[4]</sup>通过对

CFRP单层板进行切削仿真和加工试验, 研究了不同纤维方向角度对基体破坏、基体损伤和工件亚表面破坏情况的影响, 结果表明:  $0^\circ$  时材料的切削性能最好, 随着纤维方向角度的增大, 加工缺陷、基体损伤和破损情况逐渐加剧。大连理工大学的任宇江<sup>[5]</sup>对碳纤维复合材料平面磨削进行了研究, 在对型号TB300的多向层铺碳纤维板进行旋转超声磨削加工研究中, 通过多因素正交试验, 分别研究了主轴转速、工具粒度、进给速度和切削深度对碳纤维板表面加工质量的影响。Liu等<sup>[6]</sup>自行设计了超声振动磨削装置, 通过“以磨代钻”的方式对CFRP板钻孔, 试验表明: 孔进出口处纤维毛刺和拔出现象明显减少, 孔内表面加工质量较好, 工具堵塞情况明显好转, 取得了较好的加工效果。Wang等<sup>[7]</sup>对单向碳纤维复合材料进行了试验研究, 分析了不同碳纤维取向对表面粗糙度和亚

表面损伤的影响,研究发现当纤维取向为 $90^\circ$ 时表面质量较好,小于 $90^\circ$ 时材料变形区会出现碎屑、挤压和材料回弹等问题,超过 $90^\circ$ 时纤维发生弯曲,切削机理变得复杂并出现亚表面损伤。国外,So0等<sup>[8]</sup>研究了单向碳纤维复合材料的磨削加工,分析了包括纤维方向在内的各个因素对表面质量和切削力的影响,研究结果表明,碳纤维方向对工件表面质量产生较大影响。

本文将超声振动与传统磨削加工相结合,通过正交试验和单因素试验研究旋转超声振动端面磨削CFRP的表面质量。

## 试验条件与方法

### 1 试验条件

搭建旋转超声振动磨削试验台:在哈斯自动化公司(HAAS)DT-1立式钻铣床上,分别安装旋转超声振动系统和测力系统;机床可实现三轴联动,运动精度和工艺系统精度较高,抗振性较强;采用BT30主轴,主轴转速为 $0\sim 12000\text{r}/\text{min}$ ,连续可调机床定位精度为 $5\mu\text{m}$ ;旋转超声振动系统的共振频率为 $17.40\text{kHz}$ ,振幅 $0\sim 12\mu\text{m}$ 连续可调;磨削工具采用圆柱型电镀金刚石磨头,粒度 $60\sim 200\#$ ,柄径为 $4\text{mm}$ ,磨头直径为 $6\text{mm}$ ,调整合适的伸出长度,使振动效果最明显。试验材料选用T300多向层铺碳纤维板,层铺方式为 $0^\circ/90^\circ$ 交替铺层,单层厚度约为 $125\mu\text{m}$ 。为方便试验加工,将碳纤维

板切成 $20\text{mm}\times 5\text{mm}\times 5\text{mm}$ 的长方体,并通过石蜡固定到测力仪上;将工件切割成合适的尺寸,在平行于层铺方向的平面进行磨削试验。将超声振动装置安装到机床上,并对超声振动系统和机床运行情况进行调试。工件材料属性参数如表1所示,碳纤维复合材料结构如图1所示。图2(其中 $A$ 为超声振幅, $f$ 为频率, $v_w$ 为工件进给速度)和图3分别为旋转超声振动磨削加工示意图和试验加工现场图。

### 2 试验方法

通过单因素试验对比分析普通磨削和超声振动磨削表面加工效果,

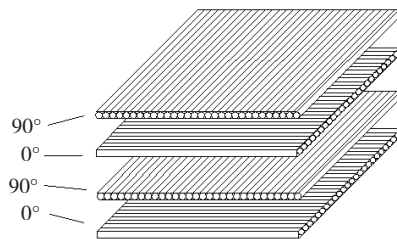


图1 碳纤维复合材料试件结构图  
Fig.1 Structure diagram of CFRP specimen

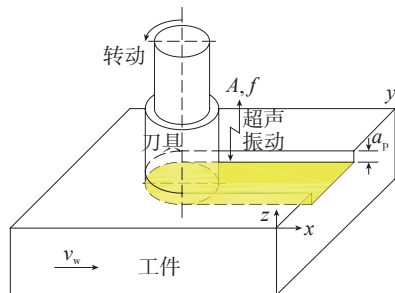


图2 旋转超声振动磨削加工示意图  
Fig.2 Schematic diagram of the rotary ultrasonic grinding process

表1 T300多向层铺碳纤维板材料属性

材料	CFRP	型号	T300
基体	环氧树脂	单丝直径/ $\mu\text{m}$	6~8
增强相	碳纤维	单层厚度/ $\mu\text{m}$	125
纤维方向	$0^\circ/90^\circ$ 层铺	抗拉强度/ $\text{Pa}$	3500
含碳量/%	$\geq 95$	弹性模量/ $\text{GPa}$	235
密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.78	伸长率/%	1.8

在正交试验过程中研究超声振动磨削中主轴转速、进给速度、切削深度和工具粒度对碳纤维复合材料的加工性能和工件表面质量的影响,得出各因素的影响规律及最优加工工艺参数,为CFRP加工工艺参数的选择提供依据。

本文采用三维评定方式评价碳纤维复合材料的表面加工质量(即面粗糙度),该方法考虑了待测表面所有的测量点,能真实地反映工件的表面情况;评价指标采用三维评定参数中的表面算数平均偏差 $S_a$ 和表面均方根偏差 $S_q$ <sup>[9]</sup>;形貌观测和表面粗糙度采用VK-X200K激光共聚焦显微镜测量。

### 单因素对比试验

单因素对比试验可以比较旋转超声振动磨削和普通磨削CFRP材料的表面加工质量,通过控制因素变量,选择合理的工艺因素取值范围,分别研究主轴转速、切削深度、进给速度和工具粒度对加工质量的影响规律,超声振幅取 $8\mu\text{m}$ 。有无超声振动条件下,各项加工参数的选取情况见表2。

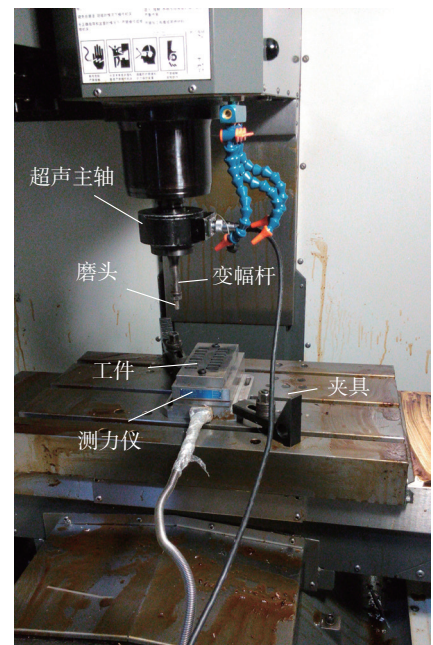


图3 试验加工现场  
Fig.3 Testing and processing site

表2 单因素试验各项参数

试验组	主轴转速 / ( $r \cdot \min^{-1}$ )	切削深度 /mm	进给速度 / ( $\text{mm} \cdot \min^{-1}$ )	刀具粒度 /#	磨头直径 /mm	振动幅值 /mm
1	500, 1000, 1500, 2000, 2500	0.15	180	100	8	0, 0.01
2	1500	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25	180	100	8	0, 0.01
3	1500	0.15	60, 120, 180, 240, 300	100	8	0, 0.01
4	1500	0.15	180	60, 100, 120, 150, 200	8	0, 0.01

### 1 各工艺因素影响规律分析

图4所示为各工艺因素对表面粗糙度影响的变化曲线,可以看出超声振动磨削后的表面粗糙度比普通磨削后明显降低,主要是由于超声振动作用可以改善磨粒对工件材料的去除机理,使得碳纤维增强复合材料更容易形成短细碎屑而被去除,进而形成较好的加工表面。由图4(a)可以得出,随着主轴转速的增大,在相同时间内,磨粒磨削工件表面的次数增加,且在相同进给速度下单颗磨粒去除材料体积减小,使得加工表面质量提高,表面粗糙度降低。具体来说,在较低转速范围内,转速的增大使表面粗糙度降低趋势明显,转速增至较高范围后,表面粗糙度降低趋势较平缓。

由图4(b)可以得出,在选取不同切削深度时,由于工件为层铺复合材料,使其在不同的磨削深度下形成不同的表面形貌。本试验中,碳纤维增强复合材料单层纤维束的平均厚度约为 $125 \mu\text{m}$ ,当磨削表面在相同铺层时,表面粗糙度会相对较低;当磨削平面在两铺层之间时,则表面粗糙度值较大;且如果切削深度的波动范围在相同铺层时,切削深度越小,表面质量就相对较好。总体来讲,磨削深度的变化,使表面粗糙度在一定范围内呈现波动变化。

图4(c)为进给速度对表面粗糙度的影响:随着进给速度增大,表面粗糙度增大,且进给速度超过一定范围后,表面粗糙度显著增加,表面

质量急剧下降。这是由于增大进给速度会使工具端面单位面积的磨粒在单位时间内的材料去除量明显增加,导致工具切削力增大,磨粒运动轨迹形成的包络面偏稀疏,工件表面加工质量变差。通常应在保证工件表面质量的前提下,增加进给速度来获得更高的加工效率。

图4(d)为工具粒度对表面粗糙度的影响,工具粒度的曲线出现波动,存在最优点。对于较小的工具粒度,磨粒尺寸较大、数量少、磨粒周围空隙较大,因此磨削过程中单位面积工件上参与磨削的磨粒较少,单颗磨粒的材料去除量大,切削力较大,加工质量不高;对于较大的工具粒度,磨粒尺寸小、数量多,磨粒周围的空

隙小,容屑能力较差;同时,碳纤维复合材料加工过程中为干式切削方式,并产生碎末状切屑。从实际加工效果来看,工具在附加了超声振动后,其端面仍会发生一定程度的堵塞,因而导致工件表面粗糙度变大。因此,工具粒度的变化趋势中存在最优点,通过曲线可以看出最优工具粒度为120#。

### 2 表面加工质量对比分析

选取表2中主轴转速 $1500 r/\text{min}$ ,切削深度 $0.15 \text{mm}$ ,进给速度 $180 \text{mm}/\text{min}$ ,工具粒度为60#的一组工艺参数加工后的工件,在激光共聚焦显微镜下分别观察超声振动磨削和普通磨削后表面的微观形貌,如图5所示。可以看出,超声振动磨削和普通磨削后表面均存在纤维丝断裂、剥离等缺陷,但相比来说,普通磨削后工件表面缺陷分布较多,而且存在明显的沟槽和凹坑,表面质量较差;超声振动磨削后加工表面纤维丝未出现严重破坏,凹坑较小且分布不明显,表面相对较平坦,因此表面粗糙度值较小。

从切削机理上来看,由于磨削工具上附加了超声振动,磨粒在去除

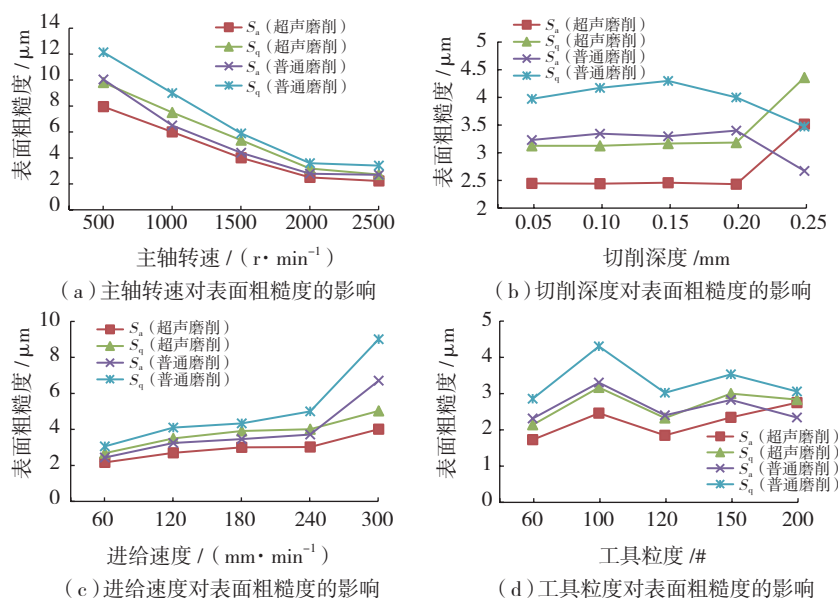


图4 工艺因素对表面粗糙度的影响

Fig.4 Effects of process factors on surface roughness

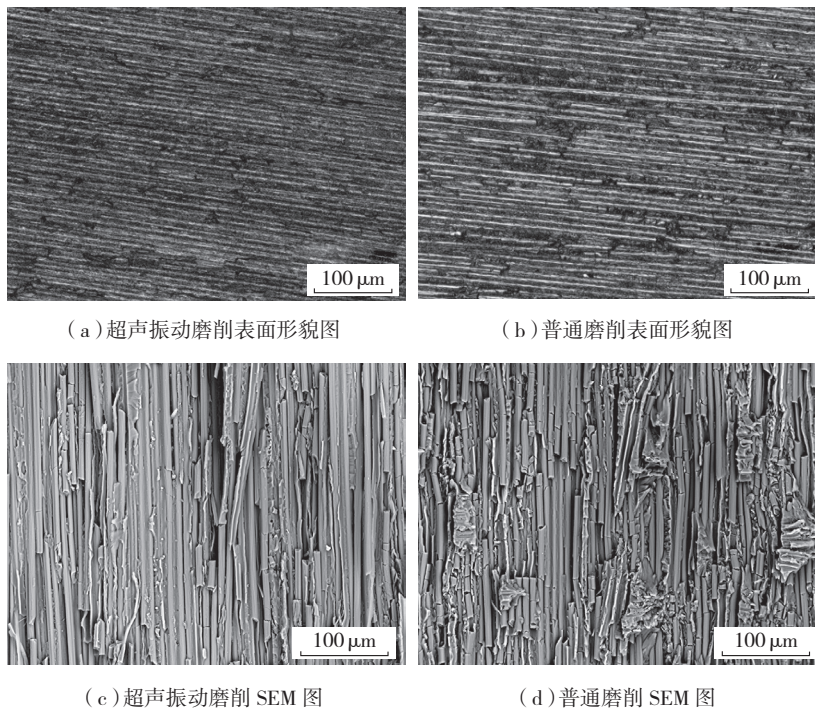


图5 超声振动端面磨削和普通磨削表面质量对比  
Fig.5 Comparison of surface quality between rotary ultrasonic face grinding and ordinary grinding

材料时为断续切削过程,其产生的超声冲击作用使得磨粒获得较大的瞬时加速度,可以迅速将碳纤维丝切断(纤维以剪切断裂的形式被去除);同时超声振动的断续切削过程使得平均切削力变小,保证切削过程平稳,从而避免了纤维的拔出和剥离。从图5中还可观察发现:由于磨粒在工件平面的法线方向上振动,不可避免地将已加工表面的碳纤维切断,但整体来看表面加工质量仍相对较好;普通磨削中磨粒为连续切削,碳纤维丝在磨粒的连续挤压下发生弯曲断裂,碳纤维为硬脆材料,在这种受力状况下易使长纤维被剥离,从而形成毛刺和微型凹槽等缺陷,表面质量难以保证。

### 正交试验

采用无交互正交试验法,设计 $L_{25}(5^4)$ 无交互正交试验表,分别研究超声振动磨削加工中主轴转速、切削深度、进给量和工具粒度对碳纤维增强复合材料加工质量的影响规律,

并进行极差分析,得出各因素对加工质量的影响程度。各因素工艺参数的取值范围、极差分析结果分别如表3和表4所示。

由单因素试验可以看出, $S_q$ 值与 $S_a$ 值随工艺因素不同水平的变化趋势基本一致,因此本文以 $S_a$ 为指标。由表4可以得到工艺参数对 $S_a$ 值的变化曲线(如图6所示),可以看出 $S_a$ 值随着主轴转速的增加而降低,随着进给速度的增加而升高,随着切削深度和工具粒度的增加出现波动,可以

表3 正交试验各参数取值范围

影响因素	取值范围
主轴转速 / ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	1000~2500
进给速度 / ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	60~300
振动幅值 / $\mu\text{m}$	8
切削深度 / mm	0.05~0.4
工具粒度 / #	60~250
工具头直径 / mm	6

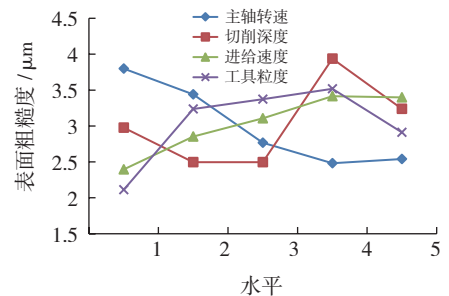


图6 工艺参数对 $S_a$ 的影响  
Fig.6 Effects of process parameters on  $S_a$

找到其最优值,这与上节单因素所得处的结论相同。

由极差分析可知,进给速度对 $S_q$ 值的影响最大,其次是主轴转速和切削深度,工具粒度对 $S_q$ 值影响最小。最优的超声振动磨削加工工艺参数为主轴转速 2500r/min,切削深度 0.1mm,进给速度 60mm/min,工具粒度为 120#。这些规律为碳纤维复合材料的实际加工提供了依据,通常应在保证所要求表面质量的前提下,

表4  $S_a$ 值极差分析结果

因素	主轴转速	切削深度	进给速度	工具粒度
$\bar{S}_{a1}$	3.8	2.976	2.852	2.113
$\bar{S}_{a2}$	2.481	2.497	2.396	3.237
$\bar{S}_{a3}$	3.55	2.495	3.106	3.374
$\bar{S}_{a4}$	2.767	3.937	3.415	3.519
$\bar{S}_{a5}$	2.54	3.238	3.398	2.911
极差值	1.319	1.442	1.019	1.406

尽可能提高加工效率。对于表面质量要求一般、需要高效率加工的工件,可以优先依次增加进给速度、主轴转速和切削深度;对于表面质量要求较高、需要精加工的表面(比如装配面等),可以选择较大的主轴转速、较小的进给速度或切削深度,并选择粒度为 120# 的磨削工具进行加工。

## 结论

(1) 通过对超声振动磨削和普通磨削进行试验对比,并观察分析两者的微观形貌,可以发现与普通磨削相比,超声振动加工可以显著降低表面粗糙度,提高加工表面质量,减少工件表面纤维断裂、拔出、凹槽等缺陷的产生,粗糙度值  $S_a$  降低幅度在 1.2~2.1  $\mu\text{m}$  之间。

(2) 通过对超声振动磨削加工的工艺研究,分别进行单因素试验和正交试验,结果表明粗糙度  $S_a$  值随着主轴转速的增加而降低,随着进给速度的增加而升高,随着切削深度和工具粒度的增加出现波动,可以找到其最优值;同时主轴转速对  $S_q$  值的影响最大,其次是进给速度和切削深度,工具粒度对  $S_q$  值影响最

小。最优的超声振动磨削加工工艺参数为主轴转速 2500r/min,切削深度 0.1mm,进给速度 60mm/min,工具粒度为 120#。

## 参考文献

- [1] 陈燕,葛恩德,傅玉灿,等.碳纤维增强树脂基复合材料制孔技术研究现状与展望[J].复合材料学报,2015,32(2):301-316.  
CHEN Yan, GE Ende, FU Yucan, et al. Review and prospect of drilling technologies for carbon fiber reinforced polymer[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 301-316.
- [2] CONG W L, PEI Z J, SUN X, et al. Rotary ultrasonic machining of CFRP: a mechanistic predictive model for cutting force[J]. Ultrasonics, 2014, 54(2):663-675.
- [3] 刘树良,陈涛,魏宇祥,等.碳纤维增强复合材料加工技术研究进展[J].航空制造技术,2015(14):81-86.  
LIU Shuliang, CHEN Tao, WEI Yuxiang, et al. Review on machining technology of carbon fiber reinforced plastic[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(14):81-86.
- [4] 李志凯.碳纤维增强复合材料切削实验与仿真研究[D].南昌:南昌航空大学,2014.  
LI Zhikai. Study of cutting experiment and simulation of carbon fiber reinforced composites [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2014.
- [5] 任宇江.碳纤维复合材料的超声辅助磨削加工技术研究[D].大连:大连理工大学,2010.  
REN Yujiang. Study on the ultrasonic assisted grinding technology of carbon fiber reinforced plastics [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [6] LIU J, ZHANG D Y, QIN L G, et al. Feasibility study of the rotary ultrasonic elliptical machining of carbon fiber reinforced plastics (CFRPs)[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, 53(1): 141-150.
- [7] WANG X M, ZHANG L C. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fiber reinforced plastics[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(10): 1015-1022.
- [8] SOO S L, SHYHA I S, BARNETT T, et al. Grinding performance and workpiece integrity when superabrasive edge routing carbon fibre reinforced plastic (CFRP) composites[J]. CIRP Annals- Manufacturing Technology, 2012, 61(1): 295-298.
- [9] 马付建,张生芳,刘宇,等.多向层压碳纤维复合材料表面粗糙度评定研究[J].工艺与检测,2015(5):65-69.  
MA Fujian, ZHANG Shengfang, LIU Yu, et al. Research on the evaluation of the surface roughness of multidirectional carbon fiber composites [J]. Technology and Test, 2015(5): 65-69.

# Study on Surface Quality of CFRP After Rotary Ultrasonic Face Grinding

LIU Shuliang<sup>1</sup>, CHEN Tao<sup>1</sup>, WEI Yuxiang<sup>1</sup>, WU Chaoqun<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. State Key Lab of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**[ABSTRACT]** In this paper the surface machining quality of multi-ply CFRP is studied by conducting rotary ultrasonic face grinding and ordinary grinding. The influence of various parameters on the workpiece surface quality is analyzed through orthogonal experiment and single factor experiment, and further analysis has been done on grinding mechanism by studying the surface roughness and morphology. The experiment results show that increasing spindle speed, reducing feed rate, adopting appropriate cutting depth and particle size of diamond tools can get better quality machined surface in the process of ultrasonic face grinding. Compared with ordinary grinding manufacturing defects, such as fiber breakage, delamination, splintering, burr are substantially reduced in rotary ultrasonic face grinding. In addition, the surface quality is improved during rotary ultrasonic face grinding.

**Keywords:** Carbon fiber-reinforced composite; Rotary ultrasonic face grinding; Machined surface quality

(责编 谷雨)