

三维编织碳纤维复合材料超声辅助车削可行性分析

马付建¹ 康仁科¹ 郭东明¹ 方胜² 任宇江¹

(1 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室,大连 116024)

(2 航天材料及工艺研究所,先进功能复合材料技术国防科技重点实验室,北京 100076)

文 摘 根据三维编织碳纤维复合材料非均质性和各向异性的特点,将其车削加工表面分为四类典型表面。分别采用三种不同刀具对三维编织碳纤维复合材料进行了超声辅助车削和普通车削加工试验,分析了四类型典型表面的粗糙度的变化规律,建立了三维编织碳纤维复合材料表面质量评价方案,并对超声辅助车削和普通车削加工过程中的切削力和刀具磨损进行了研究。结果表明,超声辅助车削加工三维编织碳纤维复合材料相对于普通车削,可以有效地提高工件表面质量,降低切削力,延长刀具寿命。

关键词 超声辅助车削,三维编织碳纤维复合材料,表面粗糙度,切削力,刀具磨损

Feasibility Study on Ultrasonic Assisted Turning of Three-Dimensional Woven Carbon Fiber Composite

Ma Fujian¹ Kang Renke¹ Guo Dongming¹ Fang Sheng² Ren Yujiang¹

(1 Key Laboratory for Precision & Non-Traditional Machining of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

(2 National Key Laboratory of Advanced Functional Composite Materials Technology, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Based on the inhomogeneous and anisotropic nature of three-dimensional woven carbon fiber composite, the turning surface is classified to four kinds of typical surface. Three-dimensional woven carbon fiber composite was machined by ultrasonic assisted turning and common turning with three different cutters. The evaluation method of surface quality was established by investigating the surface roughness variation law of four kinds of typical surface. Cutting force and tool wear in the ultrasonic assisted turning and common turning were studied. The results show that ultrasonic assisted turning can effectively improve surface quality, decrease cutting force and prolong tool life as contrasted with common turning when machining three-dimensional woven carbon fiber composite.

Key words Ultrasonic assisted turning, Three-dimensional woven carbon composite, Surface roughness, Cutting force, Tool wear

0 引言

碳纤维复合材料由于硬度高、强度大、各向异性、导热性差,并且加工中不能进行液体冷却,属于典型的难加工材料。但越来越多的碳纤维复合材料大型构件需要进行机械加工,且精度要求越来越高,而普通车削存在加工精度低、效率低、刀具磨损严重、成本高等缺点,难以满足其加工需求^[1-2]。

超声辅助车削作为新兴的特种加工技术,引起了国内外学者的广泛兴趣和极大关注。俄罗斯科学院和英国拉伯运大学对超声辅助切削的非线性过程进行了深入研究,讨论了超声辅助切削的优越性及其应用领域^[3]。新加坡南洋理工大学的 Z. W. Zhong 和

G. Lin 利用金刚石刀具对金属基复合材料进行超声辅助车削和普通车削加工质量的对比试验,表面粗糙度降低 25% 左右^[4]。英国拉夫堡大学的 V. I. Babitsky 等对 Ni718 和 C263 等航空材料也进行了对比试验,加工质量提高了 25% ~ 50%^[5]。河南理工大学的 C. S. Liu 和 B. Zhao 对 SiC_p/Al 进行切削力的对比试验,结果表明切削力降低了 1/3 ~ 1/2^[6]。超声辅助车削已在一些其他硬脆和难加工材料的加工中取得了较好的加工效果,但对于三维编织碳纤维复合材料的加工情况尚未见报道。

对于碳纤维复合材料加工后表面质量的评价,早期主要沿用金属表面质量的评价方法,采用线粗糙度

收稿日期:2010-09-20;修回日期:2010-11-04

基金项目:国家 863 计划资助项目(2009AA044306)

作者简介:马付建,1982 年出生,博士研究生,主要从事超声及其辅助加工技术、复合材料精密加工技术研究。E-mail:mafujianyx@163.com

参数评价,如日本大阪大学的 H. Shinaku 采用 R_y 来评价碳纤维复合材料的表面质量^[7],但由于其严重不均质性和各向异性,线粗糙度不能全面评价其表面质量,大连理工大学的赵福令等采用面粗糙度参数来评价其表面质量,取得了很好的效果^[8]。但对于三维编织碳纤维复合材料的表面质量尚未给出具体的测量方法和评价方案。

本文将根据三维编织碳纤维复合材料的特点,建立针对三维编织碳纤维复合材料表面质量具体的测量方法和评价方案,并通过对比超声辅助车削与普通车削加工三维编织碳纤维复合材料的表面粗糙度、切削力和刀具磨损情况等研究超声辅助车削加工三维编织碳纤维复合材料的可行性。

1 实验

1.1 试验设备和条件

试验在 CKA6780 型数控卧式车床上进行,见图 1。

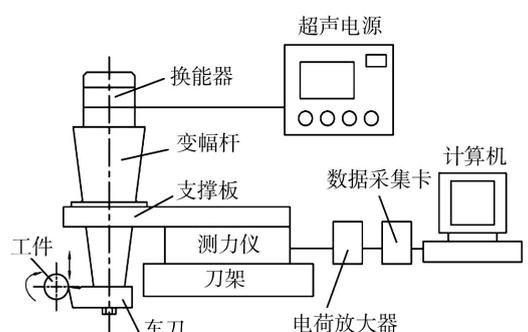


图 1 试验设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment setup

超声发生器的主要作用是将 50 Hz 的工频电源变成 20 kHz 的高频电源,通过超声换能器将 20 kHz 的高频电信号转换成相应频率的机械振动,通过超声变幅杆将机械振动的幅度增大,并传递给刀具,使其产生超声振动,从而实现超声辅助切削。试验中使用 CBN 刀具、KW10 硬质合金刀具和 PCD 刀具对三维编织碳纤维复合材料进行加工,参数见表 1。

表 1 刀具参数

Tab. 1 Turning tool parameters

前角/(°)	后角/(°)	主偏角/(°)	副偏角/(°)	刀尖半径/mm
7	7	107.5	37.5	0.4

CBN、KW10 和 PCD 刀具均采用表 2 中的参数加工三维编织碳纤维复合材料。

表 2 表面粗糙度试验加工参数¹⁾

Tab. 2 Experiment parameters of surface roughness

参数	切削速度	进给量	切削深度	振幅
	/m·min ⁻¹	/mm·r ⁻¹	/μm	/μm
参数一	25	30	0.3	15
	25	30	0.3	-
参数二	30	50	0.3	20
	30	50	0.3	-

注:1)“-”即为普通车削加工。

三维编织碳纤维复合材料的结构见图 2,采用的碳纤维为 TB300,纤维直径为 7~8 μm,xy 向纤维相互交错编织,每束纤维由 1 000 条纤维组成,z 向纤维穿插其中,每束纤维由 3 000 条纤维组成,基体为沥青碳。工件尺寸为 Φ40 mm×40 mm。

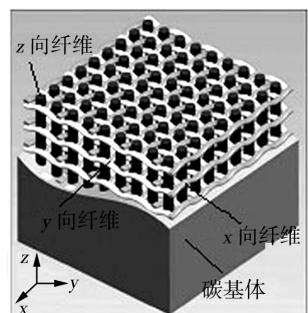


图 2 三维编织碳纤维复合材料

Fig. 2 Three-dimensional woven carbon fiber composite

1.2 检测条件及方法

表面粗糙度采用 Talysurf 2000 白光共聚焦表面粗糙度测量仪进行测量。加工的表面形貌采用 Apollo 300 扫描电子显微镜进行观察。

由于三维编织碳纤维复合材料具有很强的方向性,车削加工后工件表面在不同角度和不同直径上的组成部分有很大的区别,因此根据加工后表面的不同组成部分和角度,将工件表面分成四类典型表面,具体如图 3 所示。车削加工时工件绕 z 向旋转,加工过程中 z 向纤维有被车削到和未被车削到两种情况,xy 平面的编织纤维与车刀的夹角为 0°~180°。以 xy 平面上与车刀成 0°或 90°以及 45°或 135°夹角的纤维区域为代表,工件加工过程中可能出现四类典型表面,分别为:xy 平面上的编织纤维与车刀成 0°或 90°夹角且 z 向纤维露出,称为典型面 1;xy 平面上的编织纤维与车刀成 45°或 135°夹角且 z 向纤维露出,称为典型面 2;xy 平面上的编织纤维与车刀成 0°或 90°夹角且 z 向纤维未露出,称为典型面 3;xy 平面上的编织纤维与车刀成 45°或 135°夹角且 z 向纤维未露出,称为典型面 4。因此需要研究四类典型面粗糙度的规律,建立表面质量的评价标准。

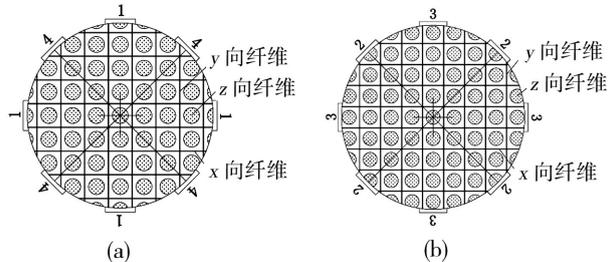


图 3 工件表面分类

Fig. 3 Classification of workpiece surface

在测量之前,工件表面需用气枪将表面粘附的切屑吹去,由于碳纤维复合材料的表面粗糙度离散性相对较大,因此每个表面的粗糙度均测量 7 次,去掉一

个最大值和一个最小值,取剩余 5 次测量的平均值。

试验中,超声辅助车削和普通车削的主切削力、进给力 and 背向力采用 KISTLER 9257B 压电式三向测力仪进行测量。测力仪产生的电信号通过信号放大器将信号放大,数据采集卡将模拟电信号转换成数字信号,并输入到计算机中。

刀具磨损采用 Olympus MX40 金相显微镜放大 50 倍时进行观察和测量。

2 结果及讨论

2.1 表面粗糙度

四个典型表面的表面粗糙度如图 4 ~ 图 6 所示。

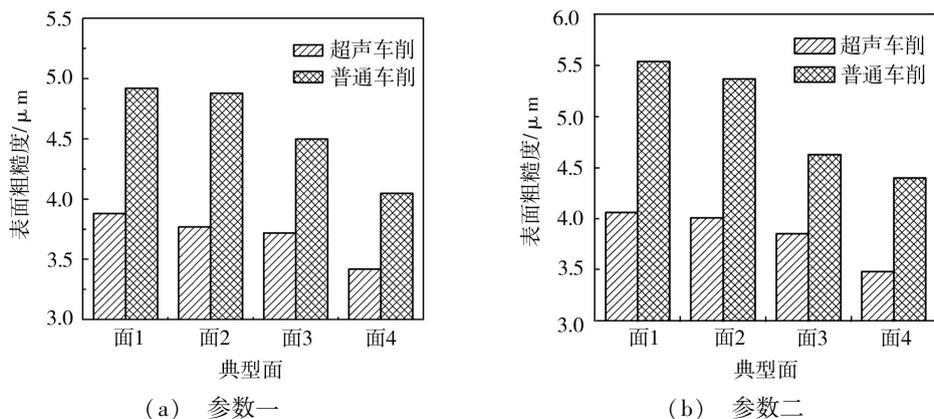


图 4 四个典型面的表面粗糙度(CBN 刀具)

Fig. 4 Surface roughness of four typical surfaces (CBN tool)

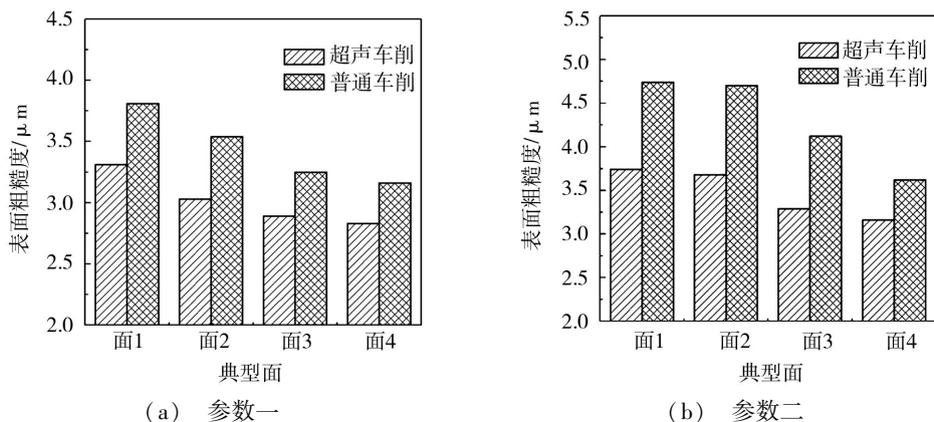


图 5 四个典型面的表面粗糙度(KW10 刀具)

Fig. 5 Surface roughness of four typical surfaces (KW10 tool)

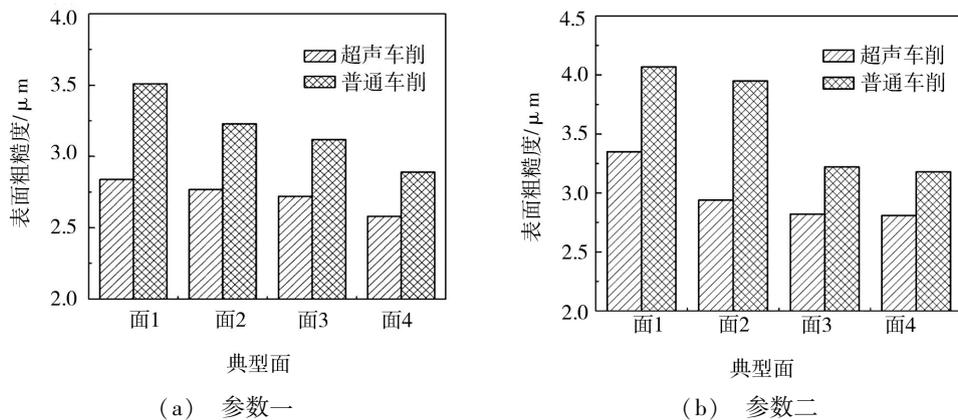


图 6 四个典型面的表面粗糙度(PCD 刀具)

Fig. 6 Surface roughness of four typical surfaces (PCD tool)

可以看出,采用三种刀具在两种加工参数条件下 超声辅助车削比普通车削的表面粗糙度均有明显的

降低,降低率最小为11%,最大为26%。此外还可以发现,面1至面4的表面粗糙度值均呈逐渐减小的趋势。

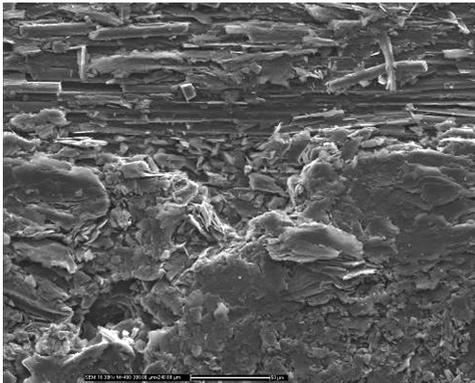
通过对图4~图6中相同参数、相同典型面时不同刀具加工的表面粗糙度对比可以看出,四类典型面的表面粗糙度均是按照CBN、KW10、PCD刀具依次降低,由此可得PCD刀具在超声辅助车削和普通车削加工三维编织碳纤维复合材料时均为优选。

通过用扫描电镜对普通车削和超声辅助车削后工件的表面形貌进行观察发现,普通车削后工件表面纤维和基体结合部位表面形貌有部分的凹坑如图7(a)所示,而超声辅助车削后的表面形貌为图7(b)所示。在普通车削中产生图7(a)所示的加工缺陷的原因有可能是由于碳纤维和碳基体硬度和强度相差较大,在车刀由基体到碳纤维或由碳纤维到基体过渡

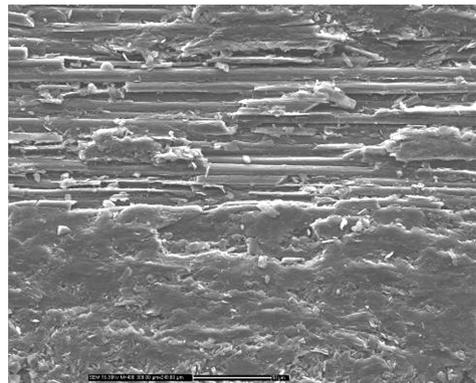
时切削力发生突变,从而在过渡区产生明显的加工缺陷,而超声辅助车削能有效减小这种加工缺陷的发生。

由于碳纤维的硬度和强度远大于碳基体,碳纤维束属于非均质材料,具有各向异性,而碳基体属于均质材料,各向同性,因此碳纤维束区域的粗糙度要大于碳基体区域。

在四类典型面中,由于面1和面2有 z 向纤维的出现,故而比面3和面4的表面粗糙度值大,且由于面1比面2中 z 向纤维数量多,故而面1比面2的表面粗糙度值大。所以,工件表面质量的好坏主要是由典型面1[图3(a)]或典型面2[图3(b)]的表面质量决定,因此在三维编织碳纤维复合材料车削加工中应以这两类典型面为主要研究对象。



(a) 普通车削



(b) 超声辅助车削

图7 纤维和基体结合部位的表面形貌

Fig. 7 Surface topography of joint region between fiber and matrix

2.2 切削力

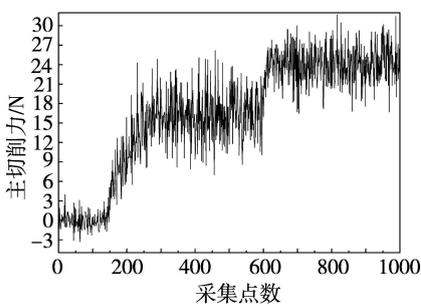
在如表3所示的加工参数下,对三维编织碳纤维复合材料进行超声辅助车削和普通车削的主切削力、进给力 and 背向力进行测量,测量结果见图8。切削力测量曲线由三段组成,第一段为超声振动开启,但未进行切削;第二段为超声开启,且进行切削的超声辅助加工段;第三段为进行切削,但超声振动未开启的

普通加工段。

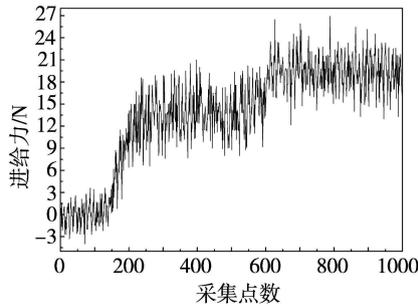
表3 切削力试验加工参数

Tab. 3 Experiment parameters of turning force

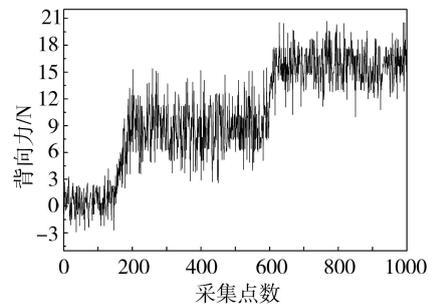
切削速率 $/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	进给量 $/\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$	切削深度 $/\text{mm}$	振幅 $/\mu\text{m}$
35	0.3	0.5	20



(a) 主切削力



(b) 进给力



(c) 背向力

图8 超声辅助车削和普通车削的切削力

Fig. 8 Cutting force of ultrasonic assisted turning and common turning

由图8可知,超声辅助车削相对于普通车削,主

切削力约减小33%,进给力约减小32%,背向力约减

小40%,因此整体的切削力约减少34%。

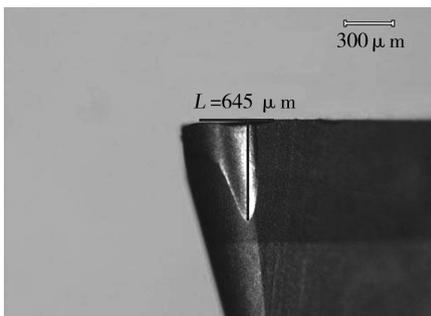
2.3 刀具磨损

在如表4所示的参数下分别对三维编织碳纤维复合材料进行超声辅助车削(振幅 $A=20\ \mu\text{m}$)和普通车削,加工后刀具的磨损情况如图9所示,可知普通车削后刀面磨损量约为 $645\ \mu\text{m}$,而超声辅助车削后刀面的磨损量为 $470\ \mu\text{m}$,超声辅助车削磨损量约减

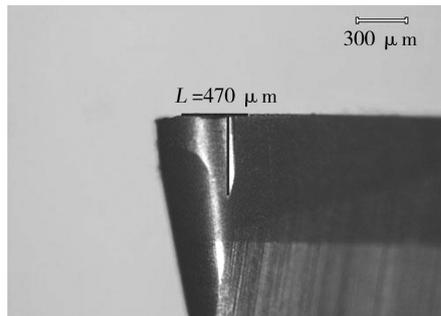
少27%。

表4 刀具磨损试验加工参数

Tab.4 Experiment parameters of tool wear			
切削速率 $/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	进给量 $/\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$	切削深度 $/\text{mm}$	加工长度 $/\text{m}$
40	0.1	0.5	1500



(a) 普通车削



(b) 超声辅助车削

图9 刀具磨损

Fig.9 Tool wear

3 结论

(1)运用三种不同刀具对三维编织碳纤维复合材料进行加工,在不同参数下超声辅助车削相比普通车削在四类典型面上的粗糙度值均有所降低,约11%~26%。

(2)根据三维编织碳纤维复合材料非均质性和各向异性的特点,将其车削加工表面分为四类典型表面,其中典型面1和典型面2的表面质量决定了整个表面的质量,因此在表面质量评价时应以这类典型面为对象。

(3)超声辅助车削相对普通车削加工的主切削力、进给力 and 背向力均有所降低,整体约减少34%。

(4)超声辅助车削相对于普通车削后刀面磨损量约减少27%。

(5)PCD刀具在超声辅助车削和普通车削加工三维编织碳纤维复合材料时均为优选。

综上所述,超声辅助车削三维编织碳纤维复合材料相对于普通车削加工,可以有效地提高表面质量,降低切削力,延长刀具寿命。

参考文献

[1] Abratea S, Walton D A. Machining of composite materi-

als. Part I: Traditional methods [J]. Composites Manufacturing, 1992, 3(2): 75-83

[2] 胡宝刚,杨志翔,杨哲. 复合材料后加工技术的研究现状及发展趋势[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(5): 24-27

[3] Astashev V K, et al. Ultrasonic cutting as a nonlinear (vibro-impact) process [J]. Ultrasonic, 1998, 36: 89-96

[4] Zhong Z W, Lin G. Diamondturning of a metal matrix composite with ultrasonic vibrations [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2005, 20: 727-735

[5] Babitsky V I, Kalashnikov A N, Meadows A, et al. Ultrasonically assisted turning of aviation materials [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 132: 157-167

[6] Liu C S, Zhao B, Gao G F, et al. Research on the characteristics of the cutting force in the vibration cutting of a particle-reinforced metal matrix composite SiC_p/Al [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129: 196-199

[7] Shinaku H, Junsuke F, Tetsuya T. Grinding mechanism of CFRP [C]//6th International Conference on Progress of Machining Technology, Sep. , Xi'an, 2002: 317-322

[8] 赵福令,艾传智,杨东军,等. 碳/碳复合材料切削表面粗糙度的评定方法及评定参数研究[J]. 计量学报, 2006, 27(3): 206-211

(编辑 李洪泉)