

# 不同刀具车削加工高硅氧玻璃纤维/酚醛树脂切削力研究

侯晓莉 李言 杨振朝 袁启龙 石珣

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院,西安 710048)

**文 摘** 为探索高硅氧玻璃纤维/酚醛树脂复合材料的切削加工性能,对该类材料进行大直径薄壁回转类零件的车削加工。采用四种不同刀具进行实验研究,获得了不同切削参数及不同刀具材料对切削力的影响规律。试验结果表明:切削用量三要素中,切削深度对切削力的影响最大,其次是进给量,而切削速度的影响很小。当切削速度为 119.32 mm/min、进给量为 0.1 mm/r、背吃刀量为 0.5 mm 时,为最优切削参数。Ti-Al-Si-N 纳米涂层硬质合金和超硬材料 F2HX 无涂层硬质合金刀具适合于低速加工,而 PCD 刀具则适合于高速加工。

**关键词** 高硅氧玻璃纤维/酚醛树脂复合材料,硬质合金刀具,PCD 刀具,切削力

中图分类号: TG506

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.05.014

## Experimental Study on Cutting Force of High Silica Glass Fiber/Phenolic Resin Composites With Different Cutting Tools

HOU Xiaoli LI Yan YANG Zhenchao YUAN Qilong SHI Xun

(School of Mechanic and Precision Instrument Engineer, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

**Abstract** In order to investigate the machinability of high silica glass fiber/phenolic resin composites, the turning process of the large diameter thin-wall rotary parts is carried out. The experiment was done with four kinds of cutting tools, the effects of different cutting parameters and cutting tool materials on cutting force are obtained. The results demonstrate that in three cutting parameters, cutting depth has the greatest influence on cutting force, followed by cutting feed, and the cutting speed is very small. The optimal cutting parameters can be obtained when  $v = 119.32 \text{ mm/min}$ ,  $f = 0.1 \text{ mm/r}$  and  $a_p = 0.5 \text{ mm}$ . Ti-Al-Si-N nano coated carbide and super-hard material F2HX uncoated carbide tools are suitable for cutting the material at the low cutting speed, the PCD tool is suitable for high speed machining.

**Key words** High silica glass fiber/phenolic resin composite, Carbide tool, PCD tool, Cutting force

### 0 引言

近年来,高硅氧玻璃纤维/酚醛树脂复合材料作为防/隔热一体化材料被广泛地应用于航空航天领域,其成型工艺简单、成本低、耐热性能适中,主要被应用到固体火箭发动机热防护结构中<sup>[1]</sup>。该复合材料基体相是热固性酚醛树脂,其脆性大,损伤容限低,固化时有小分子挥发物生成,强度较高但均匀性较差。酚醛树脂密集处脆性大,切削时容易崩裂;若有

含小分子的区域,分子间结合力较小而纤维密集处则不易切断。增强相为高纯度氧化硅非晶体连续纤维,具有较高的耐热性<sup>[2-5]</sup>。很多学者都对该种材料的制备工艺、烧蚀特性、热力学特性等进行过大量的分析研究,但是对零件切削加工中的工艺问题涉及较少<sup>[6-12]</sup>。该种复合材料零件净成型后精度不够,必须经过再次切削加工,若刀具不锋利而切削进给量过大时,可能导致纤维被成片的撕扯而产生工件表面质量

收稿日期:2017-05-03

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51505377);陕西省科技统筹创新工程计划(2015SZSJ-45);陕西省科技厅(陕西省自然科学基金项目)(2015JQ5182)。

第一作者简介:侯晓莉,1979年出生,工程师,主要从事先进制造技术的研究。E-mail: xiaolihou@xaut.edu.cn

缺陷。另外,由于切削中非金属较差的导热性使得切削温度升高,为了稳定材料组织成分,只能采用无切削液的干式切削,因此切削区域产生的大量切削热不易被切屑带走而使得刀具极易磨损变钝,甚至刀尖破损,进而影响表面质量、尺寸精度并严重影响加工效率。航空飞行器的烧蚀热防护结构大多为回转体薄壁类零件,刚性差易变形,其边缘结构极易出现翻边和崩边现象,所以要求切削加工时,切削力对加工精度和表面质量等的影响十分敏感<sup>[13-15]</sup>。本文通过对该种复合材料的车削试验,采用四种不同材料刀具研究分析切削用量三要素对切削力的影响规律,以便为加工此类材料零件切削过程提供切削用量选择、切削

力控制和刀具选择的依据。

## 1 试验

### 1.1 设备仪器及材料

试验中采用的整体装置见图1所示。试验设备采用C6140普通车床;切削力测量用Kistler-9257B三向压电晶体式测力仪和Kistler-5070电荷放大器;数据采集使用北京波普多通道数据采集处理系统,并与计算机连接输出瞬时切削力和波形。试件外径190 mm、内径140 mm、长200 mm的圆筒状高硅氧玻璃纤维/酚醛树脂复合材料,其主要的力学性能参数如表1所示。

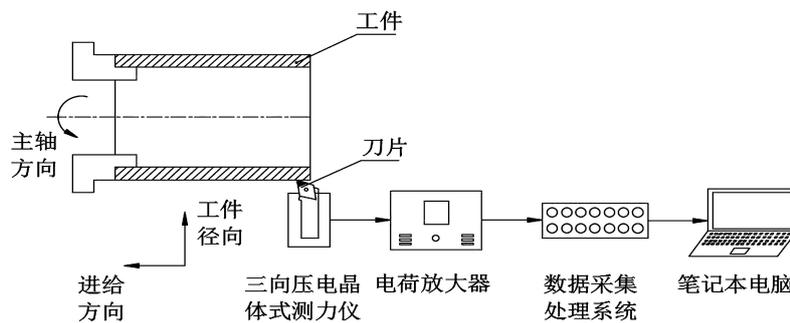


图1 试验装置和数据采集系统图

Fig. 1 Test equipment and data acquisition system drawing

表1 高硅氧玻璃纤维/酚醛树脂复合材料力学性能

Tab. 1 Mechanical Properties of high silica glass fiber/phenolic resin composite

拉伸强度/MPa		拉伸模量/GPa		弯曲强度/MPa		弯曲模量/GPa		压缩强度/MPa		压缩模量/GPa		剪切强度/MPa	剪切模量/GPa	泊松比
经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向			
81.5	109	96.5	14.1	138	226	18.0	-	31.4	156	14.6	-	25.6	3.35	0.1

### 1.2 刀具的选择

本文采用针对难加工材料常用的硬质合金刀具和金刚石刀具对高硅氧玻璃纤维/酚醛树脂复合材料

进行切削对比试验。其中硬质合金刀具选择了带有不同的涂层材质,试验中具体所使用刀具如表2所示。

表2 试验用四种刀具

Tab. 2 Test cutting tools

刀具	型号	涂层	详细
1#	TH1000	Ti-Al-Si-N 纳米涂层	在TiN薄膜基础上加入Al和Si,通过纳米层沉积形成在硬质合金基体上,进一步提高了涂层薄膜的硬度和抗氧化能力,更适合高效和干式切削
2#	CP500	TiN 镀层	使用离子镀设备镀钛,并同时充入氮气在硬质合金基体上形成TiN涂层
3#	F2HX	无涂层	超硬材料
4#	PCD	无涂层	

在车削加工该类复合材料时,切屑大多呈粉末或颗粒状,因此不存在断屑和排屑问题,所以刀具前角可选取小些。为了使材料切削表面不出现“拉扯”现象,刀具刃口尽可能锋利,同时又能保证刀具高强度,不发生卷刃、崩刃现象。根据相关实验的研究总结,本试验刀具采用20 mm×20 mm外圆车刀刀杆,C型

车刀片,四种刀具的几何角度参数见表3。

表3 试验用刀几何角度参数

Tab. 3 Geometric angle parameters of cutter

主偏角 Kr/(°)	副偏角 Kr'/(°)	前角 γ <sub>0</sub> '/(°)	后角 α <sub>0</sub> /(°)	副后角 α <sub>0</sub> '/(°)	刃倾角 λ <sub>s</sub> /(°)	刀尖圆弧 半径R/mm
95	5	3	7	7	0	0.1

### 1.3 试验方案

以切削用量三要素为试验的三个因素,以切削力作为试验指标,根据实际生产中对切削用量三要素的使用需求,各因素以及水平的选取情况如表4所示,四种不同刀具根据各因素水平分别进行车削试验。

表4 试验因素及水平表

Tab.4 Test factors and levels

序号	切削速度 $v/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	进给量 $f/\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$	背吃刀量 $a_p/\text{mm}$
1	59.66	0.2	1
2	95.46	0.2	1
3	119.32	0.1	0.5
4	149.15	0.1	0.5

### 2 结果与讨论

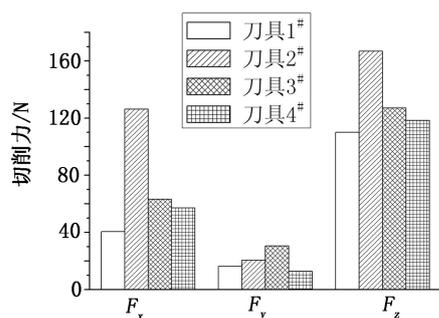
表5为切削力试验结果,分析表中数据可以看出,不论试验中采用哪种材料刀具,与进给量和切削速度两个因素相比,切削深度的变化幅度最大,说明它在切削三要素里面对切削力影响最大。

图2为多刀具切削力对比图。图2(a)反映出在较低切削速度和较大背吃刀深度情况下,试验采用的四种刀具材料切削力均比较大。尤其是2#刀具,具有TiN镀层硬质合金刀具的三向切削分力最为突出。图2(d)反映出在高切削速度,较小切削深度的情况下,1#刀具,具有Ti-Al-Si-N纳米涂层硬质合金刀具的各向切削力明显高于其他三种材质刀具。

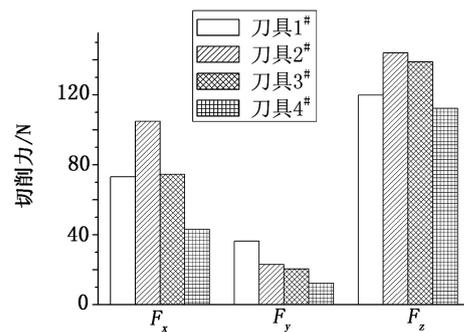
表5 不同刀具材料切削力试验结果

Tab.5 Test results of cutting force using different cutting tools

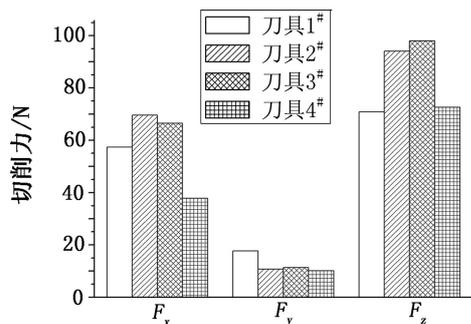
刀具	$v/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	$f/\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$	$a_p/\text{mm}$	切削力 $F/\text{N}$		
				$F_x$	$F_y$	$F_z$
1#	59.66	0.2	1	40.6	16.2	110.2
2#	59.66	0.2	1	126.3	20.4	166.9
3#	59.66	0.2	1	63.2	30.6	127.1
4#	59.66	0.2	1	57.1	12.8	118.4
1#	95.46	0.2	1	73.2	36.3	119.9
2#	95.46	0.2	1	104.9	22.9	144
3#	95.46	0.2	1	74.5	20.4	138.9
4#	95.46	0.2	1	43	12.2	112.3
1#	119.32	0.1	0.5	57.4	17.7	70.8
2#	119.32	0.1	0.5	69.6	10.7	94
3#	119.32	0.1	0.5	66.5	11.3	98
4#	119.32	0.1	0.5	37.8	10.1	72.6
1#	149.15	0.1	0.5	74.5	16.8	126
2#	149.15	0.1	0.5	73.5	10.7	90.9
3#	149.15	0.1	0.5	31.1	9.5	108.6
4#	149.15	0.1	0.5	22.6	13.1	74.8



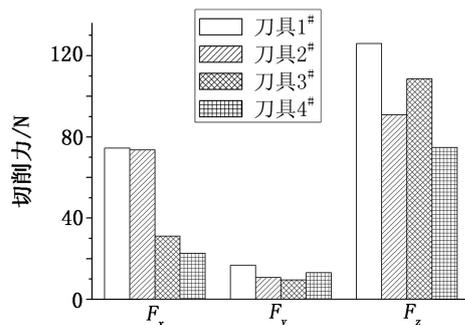
(a)  $v=59.66\text{mm}/\text{min}; f=0.2\text{mm}/\text{r}; a_p=1\text{mm}$



(b)  $v=95.46\text{mm}/\text{min}; f=0.2\text{mm}/\text{r}; a_p=1\text{mm}$



(c)  $v=119.32\text{mm/min}; f=0.1\text{mm/r}; a_p=0.5\text{mm}$



(d)  $v=149.15\text{mm/min}; f=0.1\text{mm/r}; a_p=0.5\text{mm}$

图2 多刀具切削力对比图

Fig. 2 Comparison of cutting force

对比图2中四幅柱状图,反映出PCD刀具在切削该种复合材料时优于其他三种刀具,但在低速时优势不明显,高速切削时较为突出。高速切削时由于切削温度的快速上升,该复合材料局部散热的不利,使得各种硬质合金刀具加速磨损,出现切削力较大的现象。

图2(c)反映出最优的切削参数为  $v=119.32\text{mm/min}; f=0.1\text{mm/r}; a_p=0.5\text{mm}$ 。

在切削试验过程中,直观观测四种不同刀具加工的表面质量,PCD刀具优于Ti-Al-Si-N纳米涂层硬质合金刀具,PCD刀具优于TiN镀层硬质合金,超硬材料F2HX无涂层硬质合金刀具。

### 3 结论

(1) 切削用量三要素中,切削深度对切削力的影响最大,其次是进给量,而切削速度的影响最小。

(2) Ti-Al-Si-N纳米涂层硬质合金和超硬材料F2HX无涂层硬质合金刀具适合于低速下切削,PCD刀具适合于高速加工,而TiN镀层硬质合金刀具由于在相同切削参数下切削力大,工件表面质量不高的情况下不适合加工该复合材料。

(3) 考虑到减小切削力,并获得较好的表面质量,PCD刀具最适合加工该种复合材料。但是因为PCD刀片是烧结在硬质合金上,所以刀片的切削刃比较短,因此,在使用PCD刀片加工该复合材料时切削深度 $a_p$ 又不宜太大;为提高加工效率,宜采用较高的切削速度、较大的进给量。

### 参考文献

[1] 李志永,郑日恒,李立翰,等. 冲压发动机高硅氧/酚醛燃烧室热防护层实验研究[J]. 推进技术,2013,34(1):76-80.  
 [2] 陈海龙,方国东,李林杰,等. 高硅氧/酚醛复合材料热-力-化学多物理场耦合计算[J]. 复合材料学报,2014,31(3):533-540.  
 [3] 李林杰,方国东,易法军,等. 高硅氧/酚醛复合材料

热变形实验测试及表面烧蚀形貌分析[J]. 固体火箭技术,2015,38(3):445-450.

[4] 陈军红,徐伟芳,谢若泽,等. 两种不同微结构的高硅氧/酚醛树脂基复合材料动态压缩性能研究[J]. 中国测试,2016,42(10):113-118.

[5] 林平,高守臻,迟淑梅,等. 金属杂质对高硅氧纤维/酚醛复合材料烧蚀性能质量影响[J]. 化工新型材料,2013,41(9):191-194.

[6] 孟祥艳,刘运传,王康,等. 酚醛树脂基复合材料的等离子烧蚀性能[J]. 材料科学与工程学报,2016,34(3):400-403.

[7] 高守臻,张泉,王晓立,等. 高温处理对酚醛树脂基复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用,2016,44(8):60-64.

[8] 张麟,李瑞珍,杨学军,等. HGB改性酚醛/高硅氧布复合材料的制备及性能[J]. 工程塑料应用,2013,41(9):33-37.

[9] KOYANAGI J, FUKUDA Y, YONEYAMA S. Local out-of-plane deformation of CFRP ablator subjected to rapid heating[J]. Advanced Composite Materials, 2017, 26(1):23-34.

[10] LIN C T, LEE H T, CHEN J K. Synthesis and characterization of molybdenum/phenolic resin composites binding with aluminum nitride particles for diamond cutters[J]. Applied Surface Science, 2013, 284:297-307.

[11] KUMAR S, CHAUHAN S R, RAKESH P K, et al. Drilling of glass fiber/vinyl ester composites with fillers[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2012, 27(3):314-319.

[12] WANG H, CHANG L, WILLIAMS J G, et al. On the machinability and surface finish of cutting nanoparticle and elastomer modified epoxy[J]. Materials and Design, 2016, 109:580-589.

[13] 瞿铭. 超硬材料在硬质合金工具中的应用[J]. 超硬材料工程,2010,22(1):28-30.

[14] 石明,王勇. 典型复合材料零件加工技术探讨[J]. 机械工程师,2014(6):52-53.

[15] 肖继明,侯晓莉,张波,等. 高硅氧玻璃纤维-酚醛树脂复合材料切削力的试验研究[J]. 宇航材料工艺,2009,39(3):64-73.