

高硅氧玻璃纤维/酚醛树脂复合材料 切削力的试验研究

肖继明¹ 侯晓莉¹ 张波² 刘杰¹ 刘荣涛¹

(1 西安理工大学机械与精密仪器工程学院,西安 710048)

(2 西安航天复合材料研究所,西安 710025)

文 摘 通过用 PCD 刀具对高硅氧玻璃纤维/酚醛树脂复合材料的车削试验,采用正交试验和回归分析法,研究了切削用量三要素对切削力的影响规律,建立了切削力的经验模型。结果表明,背吃刀量是影响切削力的主要因素,增大背吃刀量时主切削力和进给力都显著增大;增大进给量也使主切削力增大,但其影响小于背吃刀量;而切削速度对切削力的影响很小。所建切削力经验公式可作为切削加工该复合材料时切削用量选择及切削力控制的依据。

关键词 高硅氧玻璃纤维/酚醛树脂复合材料,车削试验,切削力,经验模型

Cutting Force of High Silica Glass Fiber/Phenolic Resin Composites

Xiao Jiming¹ Hou Xiaoli¹ Zhang Bo² Liu Jie¹ Liu Rongtao¹

(1 School of Machinery and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

(2 Xi'an Aerospace Composite Materials Research Institute, Xi'an 710025)

Abstract By turning tests on high silica glass fiber/phenolic resin composites with a polycrystalline diamond (PCD) tools, the influences of cutting parameters on cutting force were studied and the empirical model of the cutting force was established through orthogonal test and regression analysis. The results show that the effect of the cutting depth on the cutting force is the main factor; the main cutting force and the feeding force increases significantly with increase of the cutting depth; with the increase of the feed rate, the main cutting force also increases, but its effect is less than that of the cutting depth; the cutting speed has little effect on the cutting force. The empirical model can be used as a basis for selecting the cutting parameters and controlling the cutting force when machining the composites.

Key words High silica glass fiber/phenolic resin composites, Turning test, Cutting force, Empirical model

0 引言

高硅氧玻璃纤维/酚醛树脂复合材料^[1~2],由于其具有优异的耐烧蚀性能和隔热性能、高的比强度和比模量、良好的抗疲劳性、吸音、隔音和吸能等性能,被广泛用于航空、航天、建筑等行业^[1~5]。虽然多数情况下复合材料构件都是采用近净成型工艺成型的,但成型后的构件精度往往达不到使用要求,需要进行切削加工^[4~9]。然而,复合材料属难切削加工材料,它的层间剪切强度相对较低,导热性差;切削加工时

易产生分层劈裂、纤维剥离等缺陷,尺寸精度难以控制;切削温度高,刀具磨损快,加工表面质量差^[10~12]。另外,复合材料构件的壁厚一般都很薄^[3, 13],刚性差,易变形,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。为了选择合理的切削用量,有效地控制切削力,本文拟通过对复合材料的车削试验,采用多因素正交试验和回归分析法,研究分析切削用量三要素对切削力的影响规律,建立复合材料的切削力经验模型,以便为切削用量选择和切削力控制

收稿日期:2008-12-18

基金项目:西安理工大学博士启动基金(210804)

作者简介:肖继明,1960年出生,博士,主要从事先进制造技术的研究。E-mail: xjm@xaut.edu.cn

提供依据。

1 试验

1.1 设备、仪器及材料

试验设备为 CA6150 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;数据采集用研华 PCI-1712L 采集卡和自制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;试件为外径 200 mm、内径 180 mm、长 300 mm 的复合材料圆筒,其力学性能如表 1 所示。

表 1 复合材料的力学性能¹⁾
Tab.1 Physical and mechanical properties of composites

抗拉强度/MPa		弯曲强度/MPa		压缩强度/MPa		剪切强度 /MPa	拉伸模量/GPa		弯曲模量/GPa		压缩模量/GPa		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	138	226	31.4	156	25.6	96.5	14.1	18.0	14.6	14.6	3.35	0.1	

注:1)经向(环向)为布长方向;纬向(轴向)为布宽方向。

1.2 刀具材料及几何参数

1.2.1 刀具材料

复合材料的切削加工完全不同于金属材料的切削加工,它的导热性比金属材料差得多,散热条件极差,加之只能采用不使用切削液的干式切削,切削区域产生的大量切削热不易被切屑带走,大部分聚集于刀具刀尖及刀刃附近,切削温度和切削力大幅度上升,摩擦力增大,刀具磨损严重;另外,复合材料的内部纤维是互相交错在一起,刀具对材料的撕扯作用,容易使材料受损等。因此,用于切削加工复合材料的刀具材料,不但要具有高的硬度、耐磨性和热化学稳定性、低的摩擦系数等,且刃口能磨得很锋利,尤其是保持刃口锋利和完整性的能力强,以便在切削加工过程中能快速切断纤维,形成稳定的加工过程、高的加工精度和表面质量。

试验表明,切削加工复合材料时,普通硬质合金刀片及其涂层刀片,刀具很容易磨损变钝,出现材料抽丝和拉毛现象,导致加工精度下降,表面质量变差;而聚晶金刚石(PCD)刀具,由于具有高的硬度、低的摩擦系数、好的导热性等^[14],切削性能远优于硬质合金刀片及其涂层刀片,在相同切削条件下,使用时间大大延长;且刀具非常锋利,能快速切断纤维,切削加工过程中很少出现材料抽丝和拉毛现象,加工精度高、表面质量好。虽然 PCD 刀具价格昂贵,但性价比高,单个零件的加工成本比起硬质合金刀片及其涂层刀片的更低,故适于加工复合材料。

1.2.2 刀具几何参数

在车削加工复合材料时,切屑为粉末或颗粒状,不存在断屑、排屑问题,刀具前角可取小些,一般取

5°~10°;为了使刀具刃口尽可能锋利,同时又能保证好的强度,不发生卷刃、崩刃现象,一般刃倾角取 5°~10°,后角取 6°~12°。本试验刀具为钎焊 PCD 刀片车刀,其几何参数如表 2 所示。

表 2 试验用车刀几何参数
Tab.2 Geometry parameters of PCD turning tool

前角 /(°)	后角 /(°)	副后角 /(°)	刃倾角 /(°)	主偏角 /(°)	副偏角 /(°)	刀尖圆弧 半径/mm
5	8	5	5	95	10	≤0.1

2 方法及结果分析

2.1 试验方案

为了减少试验次数,提高各试验点数据的信息量及经验模型的准确性,采用多因素正交试验及回归分析法^[15],以切削用量三要素作为试验的三个因素,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要,使用 L₁₆(4⁵)正交表,安排 16 次试验。表 3 和表 4 分别为因素水平选取情况和正交试验方案及结果。

表 3 正交试验因素水平表
Tab.3 Factor levels of orthogonal test

因素 水平	切削速度 /m·min ⁻¹	进给量 /mm·r ⁻¹	背吃刀量 /mm
1	39.58	0.08	0.50
2	62.83	0.14	1.00
3	100.53	0.20	1.50
4	125.66	0.26	2.00

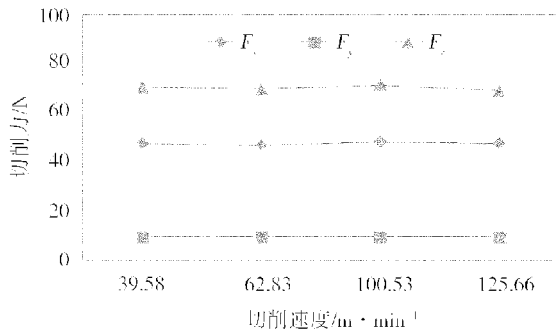
表4 试验方案及结果

Tab.4 Test scheme and results

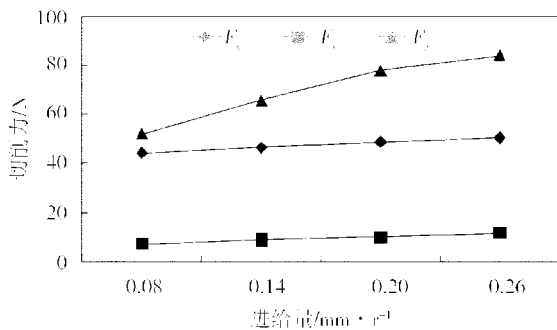
试验序号	切削速度 /m·min ⁻¹	进给量 /mm·r ⁻¹	背吃刀量 /mm	切削力 /N		
				进给力 F_x	背向力 F_y	主切削力 F_z
1	39.58	0.08	0.50	11.82	4.42	24.41
2	62.83	0.14	0.50	13.67	5.37	29.05
3	100.53	0.20	0.50	14.16	6.11	33.69
4	125.66	0.26	0.50	15.61	7.32	37.11
5	39.58	0.20	1.00	34.18	8.79	62.01
6	62.83	0.26	1.00	34.67	10.25	69.34
7	100.53	0.08	1.00	32.23	6.06	45.29
8	125.66	0.14	1.00	33.21	7.81	57.13
9	39.58	0.26	1.50	61.04	14.06	98.14
10	62.83	0.20	1.50	60.06	11.74	95.70
11	100.53	0.14	1.50	57.01	10.74	79.54
12	125.66	0.08	1.50	53.96	8.52	62.01
13	39.58	0.14	2.00	82.03	12.21	95.70
14	62.83	0.08	2.00	78.12	9.77	80.80
15	100.53	0.26	2.00	89.12	15.14	128.37
16	125.66	0.20	2.00	85.94	13.31	119.88

2.2 切削力的直观分析

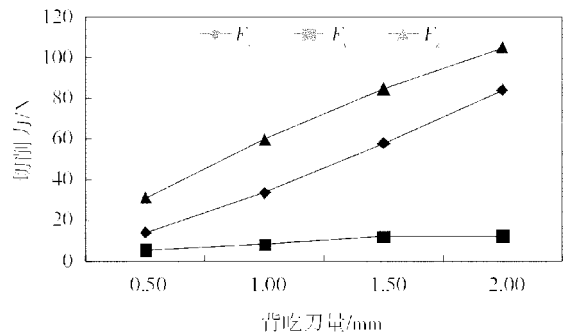
图1是根据表4试验结果获得的切削力直观分析图。由此可看出切削用量三要素对切削力的影响程度及变化趋势。



(a) 切削速度



(b) 进给量



(c) 背吃刀量

图1 切削用量三要素对切削力影响的直观分析

Fig.1 Effect of visual analysis of cutting parameters on turning force

(1)由图1(a)可知,随着切削速度的提高,三向切削力基本保持不变,说明切削速度对切削力的影响不显著。这主要是由于 v_c 在40~130 m/min,用PCD刀具切削复合材料时,不产生积屑瘤,虽然切削速度的提高增加了刀刃的切割作用,但变化幅度不大,影响很小。但如前所述,复合材料构件的壁厚很薄,刚性严重不足,切削速度过高时易使工艺系统产生振动;同时PCD脆性很大,对振动十分敏感,振动会使其产生微崩刃,从而导致加工精度下降和表面质量变差,因此应适当控制切削速度。

(2)由图1(b)可知,随着进给量的增大,切削力

增大,尤其是主切削力的增大趋势明显。这是由于进给量增大时,切削层公称横截面积 A_D 增大,切削功增大,切削力相应增大,但进给量的增大会使切削层公称厚度 h_D ($h_D = f \cdot \sin \kappa_r$) 成正比增大,变形系数减小,摩擦系数降低,而使切削力减小,故切削力的增大与进给量的增大不成正比^[14]。

(3)由图 1(c)可知,随着背吃刀量的增大,切削力增大,尤其是主切削力和进给力增大趋势明显。这是由于背吃刀量增大时,切削层公称横截面积 A_D ($A_D = a_p \cdot f$) 增大,切屑与前刀面的挤压更为严重,从而使变形力和摩擦力增大,切削力随之增大。

3 切削力经验模型建立及显著性检验

根据金属切削原理^[14],切削力与切削用量三要素之间存在复杂的指数关系

$$F_i = C_F v_c^{b_1} f^{b_2} a_p^{b_3}$$

式中, F_i 为广义切削力; C_F 为取决于加工材料、切削条件的系数; b_1 、 b_2 、 b_3 为指数; v_c 为切削速度; f 为进给量; a_p 为背吃刀量。

利用 Excel 电子表中的回归分析工具,建立切削力对数值与切削用量三要素对数值之间的多元回归模型。首先将各切削力值和切削用量三要素值转化为对数值,以 99% 为置信度,利用回归分析工具进行检验,分别建立各切削力对数值与切削用量三要素对数值的多元线性回归模型,得出常数项值和切削用量三要素的指数值。

3.1 回归方程的检验

由于切削力指数方程是根据金属切削原理作的一种假设,而复合材料的切削加工完全不同于金属材料的切削加工,因此,必须进行显著性检验来判定其拟合程度的好坏。用 R 检验与 F 检验从整体上检验

三向切削力与切削用量三要素的相关程度及回归效果,结果如表 5 所示。由此可知,三向切削力的相关系数 R 和判定系数 R^2 都接近于 1,表明两者相关关系密切,模型假设正确;三向切削力的 F 值均大于 $F_{0.01}$,说明三向切削力与切削用量三要素之间存在高度显著的回归关系。

表 5 R 检验与 F 检验

参数	切削力/N		
	F_x	F_y	F_z
R	0.9994	0.9925	0.9986
R^2	0.9987	0.9851	0.9971
R^2 调整值	0.9984	0.9813	0.9964
F	3134.3495	263.7462	1389.8933
F_α	$F_{0.01}(3, 12) = 5.9525$		

3.2 经验模型的建立

用 t 检验对回归模型的各个系数进行检验,结果如表 6 所示。由此可知,在三向切削力回归方程式中,切削速度项回归系数的 t 值都小于临界值 $t_{0.01/2}$,表明影响不显著,故可从回归方程中剔除;而常数项、进给量项和背吃刀量项回归系数的 t 值都大于临界值 $t_{0.01/2}$,说明影响显著,不可忽略。另外,进给量和背吃刀量的指数值全为正,表明它们与切削力之间的关系为正相关,即它们的增大使切削力增大;并且背吃刀量的指数值相对较大,因此它的增大使切削力增大的幅度也相应较大。这些均与直观分析结果一致。

表 6 t 检验

Tab. 6 Significance test results of regression coefficients

参数	F_x			F_y			F_z		
	系数	σ	t	系数	σ	t	系数	σ	t
常数	3.5997	0.0749	48.0800	2.9611	0.1332	22.2362	4.6703	0.0809	57.7234
v_c	0.0374	0.0158	2.3608	-0.0157	0.0282	-0.5566	0.0203	0.0171	1.1873
f	0.1283	0.0160	8.0401	0.4104	0.0284	14.4615	0.3826	0.0172	22.1919
a_p	1.3076	0.0135	96.6066	0.5807	0.0241	24.1204	0.8868	0.0146	60.6283
t_α	$t_{0.01/2}(12) = 3.0545$								

根据 t 检验结果,忽略切削速度的影响后,重新回归可得用 PCD 刀具车削复合材料时的切削力经验模型:

$$F_x = 42.99f^{0.13}a_p^{1.31}$$

$$F_y = 18.06f^{0.41}a_p^{0.58}$$

$$F_z = 116.51f^{0.38}a_p^{0.89}$$

用经验模型对三向切削力实测值的校验结果表明,平均误差小于 1%。因此,可以认为所建切削力经验模型是可靠的,可以作为切削加工该复合材料时合理选择切削用量及有效控制切削力的依据。

(下转第 73 页)