

GFRP铣槽加工铣削力及表面粗糙度研究*

郑凯^{1,2}, 陈燕^{1,2}, 晏超仁^{1,2}, 梁宇红^{1,2}

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016)

[摘要] 铣槽是复合材料较常用的机械加工形式之一。为研究玻璃纤维增强复合材料(Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP)铣槽加工中各加工参数对铣削力和表面粗糙度的影响,开展了以主轴转速、进给速度和轴向切深为因素的正交试验,研究铣削力和表面粗糙度的变化规律。并用 Matlab 软件对铣削力和表面粗糙度的试验数据进行回归分析,建立了铣削力和粗糙度的经验公式,最后通过试验验证铣削力和表面粗糙度经验公式的正确性。结果表明:轴向切深对铣削力影响最大,其次是主轴转速,进给速度对铣削力影响最小;主轴转速对粗糙度的影响最大,其次是进给速度,轴向切深对粗糙度的影响最小。试验结果与铣削力、表面粗糙度经验公式算得的数值对比,误差范围都在 20% 以内。

关键词: 铣槽; 铣削力; 加工参数; 回归分析; 粗糙度

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.16.103



郑凯

硕士研究生,研究方向为复合材料铣磨加工。

GFRP是当今广泛应用的复合材料之一,具有比强度高、比模量大、热膨胀系数低和耐腐蚀等优异特性,在航空航天和社会生产生活中的重要性正在不断提高。但是,由于GFRP中树脂基体和玻璃纤维增强体材料性能上的差异,导致其加工过程中容易出现加工质量差、刀具磨损快等问题^[1-2]。

铣削力是加工过程中不可忽略的因素,力的大小不仅可以反映出刀具与工件之间的相互干涉程度,还对加工表面完整性、刀具磨损等都有较大影响。Hu等^[3]对单向纤维增强复合材料的磨削力进行了研究,结果表明磨削力与纤维方向角有关。这一结论也被张秀丽等^[4]认可。邢光等^[5]通过金刚石刀具高速铣削CFRP材料的正交试验,发现在高速切削条件下,减小切削力宜采用小进给量和切

深、增加走刀次数的方式。

另外,表面粗糙度是工件加工表面质量指标中的一个重要评价参数,对零件的装配精度也有直接的影响。Azmi等^[6]对GFRP铣削的正交试验研究表明,表面粗糙度的影响因素主要为进给速度,其次为转速,切深基本可以忽略。Mathivanan等^[7]认为在GFRP层压板铣削时需使用较低的进给速度和较高的转速来获得较好的加工质量。

由于金刚石具有高硬度和高耐磨性,钎焊工艺相比于电镀和烧结可大大提高金刚石与结合剂之间的结合强度,具有更好的加工性能,延长刀具使用寿命,因此钎焊金刚石刀具作为一种新型的刀具制作方法在国内外受到广泛关注^[8]。

为了能够提高GFRP加工质量和刀具耐用度,有必要加深对铣削

* 基金项目: 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfj20160506)。

力及表面粗糙度的研究,并对各个影响因素进行分析。国内外对于钎焊金刚石铣磨刀具加工研究较少,而且对于粗糙度评价多以二维线粗糙度来评定,并不能很好地反映材料表面的微观形貌。因此,本文使用自制的钎焊金刚石铣磨刀具对GFRP材料进行铣槽加工,研究了加工参数对铣削力和表面粗糙度的影响。表面粗糙度以三维面粗糙度来进行评价,能更准确地反映表面特征,并建立了铣削力和表面粗糙度的经验公式,为合理选择GFRP材料加工参数提供依据。

试验条件与方法

试验所用的加工机床为DMG Ultrasonic 20 linear立式数控加工中心,如图1所示。工件装夹如图2所示。试验采用干式切削,并使用吸尘器吸除粉尘,试验中所使用的三因素四水平正交试验参数如表1所示。

试验所用刀具为自制钎焊金刚石铣磨刀具,直径 $d=2.6\text{mm}$,磨粒粒径 $90\sim 100\mu\text{m}$,排数为6,螺旋角为 45° ,如图3所示。

试验中所用的GFRP材料为编织结构,材料为357改性双马来酰亚胺玻璃布板,其垂直层向弯曲强度为 580MPa ,拉伸强度 420MPa ,树脂含量为38%,尺寸为 $145\text{mm}\times 16\text{mm}\times 6\text{mm}$ 。

试验过程中采用Kistler 9272型测力传感器、5070A电荷放大器以及相应的数据采集与处理系统对铣削力进行采集,并使用非接触式3D光学成像轮廓仪对表面粗糙度进行测量。

试验结果与讨论

表2和表3分别为GFRP正交试验数据表和极差分析表,其中 F_x 为垂直于进给方向的铣削力; F_y 为沿着进给方向的铣削力; F_z 为轴向



图1 DMG Ultrasonic 20 linear立式数控加工中心

Fig.1 DMG Ultrasonic 20 linear vertical CNC machining center

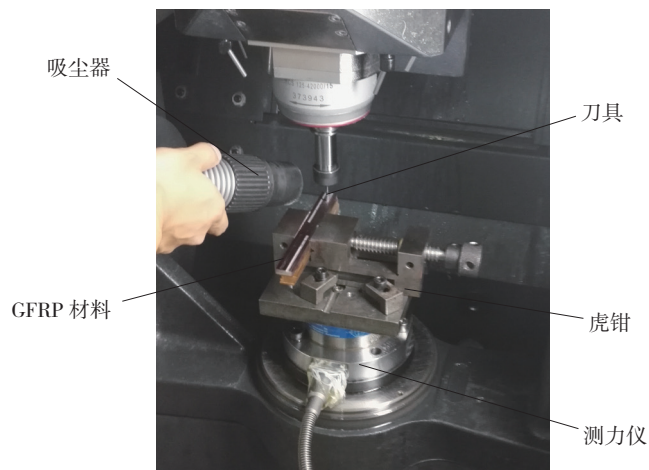


图2 工件装夹示意图

Fig.2 Sketch of workpiece clamping

表1 正交试验参数表

参数	主轴转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	进给速度 $v_f/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	轴向切深 a_p/mm
1	4500	200	0.2
2	6000	250	0.3
3	7500	300	0.4
4	9000	350	0.5



图3 钎焊金刚石刀具

Fig.3 Brazed diamond tool

的铣削力; S_a 为加工底面的粗糙度; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 中最大值与最小值之差。 k_1 表示各因素下的水平 1 的平均值, k_2 、 k_3 、 k_4 以此类推, 如 F_x 中的数值 4.397N 表示进给速度这个因素下的水平 2 (即 250mm/min) 所对应的 4 个 F_x 值的平均值; R 表示极差值, 为

通过对正交试验数据的极差分析, 可确定加工参数对铣削力的影响程度: 极差越大, 说明该加工参数数值的变化对铣削力的影响越大。

如表 2 所示, 主轴转速、进给速度和轴向切深中对铣削力 F_x 的极差分别为 4.522N、3.710N 和 5.730N, 对 F_y 的极差分别为 7.836N、7.267N 和 13.393N, 对 F_z 的极差分别为 6.288N、6.444N 和 8.507N。因此, 对于铣削力 F_x 和 F_y , 影响程度的主次关系依次为轴向切深 > 主轴转速 > 进给速度, 而对于 F_z , 影响程度的主次关系依次为轴向切深 > 进给速度 > 主轴转速。对表面粗糙度的极差分别为 1.890 μm 、0.411 μm 和 0.243 μm , 影响程度的主次关系依次为主轴转速 > 进给速度 > 轴向切深。

表2 GFRP正交试验铣削力数据极差分析表

试验号	因素			切削力 /N			粗糙度 $S_a/\mu\text{m}$
	主轴转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	进给速度 $v_f/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	轴向切深 a_p/mm	F_x	F_y	F_z	
1	4500	200	0.2	2.703	2.640	6.875	3.651
2	4500	250	0.3	5.482	6.735	12.288	3.686
3	4500	300	0.4	8.990	14.530	18.125	4.259
4	4500	350	0.5	14.235	29.150	24.505	5.243
5	6000	200	0.3	3.449	4.881	7.630	4.069
6	6000	250	0.2	2.304	2.521	6.975	3.888
7	6000	300	0.5	8.337	16.480	16.240	3.711
8	6000	350	0.4	7.649	12.640	16.571	3.652
9	7500	200	0.4	3.808	6.242	9.975	2.666
10	7500	250	0.5	5.751	10.270	11.261	2.902
11	7500	300	0.2	2.343	2.653	7.004	3.338
12	7500	350	0.3	4.863	6.522	12.059	2.935
13	9000	200	0.5	4.019	7.863	9.762	2.116
14	9000	250	0.4	4.051	6.727	10.091	2.537
15	9000	300	0.3	3.182	4.743	9.902	2.309
16	9000	350	0.2	2.071	2.379	6.884	2.319

1 铣削力分析

1.1 加工参数对铣削力的影响分析

图 4 (a) 为主轴转速对铣削力的影响, 可以看出铣削力随着主轴转速的增加而减小。这是由于随着主轴转速的增加, 铣磨刀具上磨粒与工件之间的摩擦加剧, 铣削温度随之升高, 树脂基体发生软化现象, 从而使得树脂与玻璃纤维之间的结合力显著减小, 所以导致铣削力减小。还可以看出, 随着主轴转速的增大, 铣削力的减小幅度逐渐变小。

图 4 (b) 为进给速度对铣削力的影响, 可以看出铣削力随着进给速度的增加而增大。这是由于在主轴转速和轴向切深保持不变的情况下, 随着刀具进给速度的增加, 单颗磨粒所去除的材料增多。还可以看出, 随着进给速度的增大, 铣削力的增大幅

表3 GFRP正交试验极差分析表

参数	铣削力 F_x/N			铣削力 F_y/N			铣削力 F_z/N			表面粗糙度 $S_a/\mu\text{m}$		
	$B(n)$	$C(v_f)$	$D(a_p)$	$B(n)$	$C(v_f)$	$D(a_p)$	$B(n)$	$C(v_f)$	$D(a_p)$	$B(n)$	$C(v_f)$	$D(a_p)$
k_1	7.852	3.494	2.355	13.264	5.406	2.548	15.448	8.561	6.935	4.210	3.126	3.299
k_2	5.434	4.397	4.244	9.130	6.563	5.720	11.854	10.154	10.470	3.830	3.253	3.250
k_3	4.191	5.713	6.124	6.422	9.602	10.035	10.075	12.818	13.691	2.960	3.404	3.279
k_4	3.331	7.205	8.085	5.428	12.673	15.941	9.160	15.005	15.442	2.320	3.537	3.493
R	4.522	3.710	5.730	7.836	7.267	13.393	6.288	6.444	8.507	1.890	0.411	0.243

度逐渐变大,这是因为进给速度增大使得切屑的排出越来越困难,同时进给速度大的其对应的材料去除变化量也大,使得铣削力的增大幅度变大。

图4(c)为轴向切深对铣削力的影响,可以看出铣削力随着轴向切深的增加而增大。这是由于随着轴向切深的增加,单位时间内参与铣削的磨粒数增多,去除的材料体积增加,且排屑更加困难;另外由磨削原理^[9],一个磨粒的未变形切屑最大厚度 a_{gmax} 如公式(1)所示,可以发现随着轴向切深的增大,单颗磨粒所切除材料的厚度是不断增加的。

$$a_{gmax} = 2\lambda \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{a_p}{d_s}} \quad (1)$$

式中, λ 为两颗磨粒的周向间距, v_w 为铣磨刀具进给速度, v_s 为铣磨刀具线速度, a_p 为轴向切深, d_s 为铣磨刀具直径。

从图4中还可以看出,铣削力 F_x 和 F_z 的变化趋势明显小于铣削力 F_y , F_x 和 F_z 基本呈线性变化,而 F_y 的变化幅度随着轴向切深的增大而变大,说明轴向切深对 F_y 的影响最大。

1.2 建立铣削力经验公式

为了定量地研究加工参数对铣削力的影响,需要建立铣削力经验公式。根据切削原理,影响铣削力 F 的因素为主轴转速 n 、进给速度 v_f 和

轴向切深 a_p 。 F 与 n 、 v_f 、 a_p 的关系式为:

$$F = C_F n^{x_1} v_f^{x_2} a_p^{x_3} \quad (2)$$

式中, F 为铣削力, C_F 为铣削相关系数, x_1 、 x_2 、 x_3 分别为指数。在公式(2)两边分别取对数,可得:

$$\lg F = \lg C_F + x_1 \lg n + x_2 \lg v_f + x_3 \lg a_p \quad (3)$$

利用 Matlab 软件,建立铣削力与铣削参数之间的关系,最终得到铣削力经验公式:

$$F_x = 824.52n^{-1.0143} v_f^{0.9033} a_p^{0.9962} \quad (4)$$

$$F_y = 589.93n^{-0.9183} v_f^{1.006} a_p^{1.8592} \quad (5)$$

$$F_z = 45.74n^{-0.6099} v_f^{0.8628} a_p^{0.8263} \quad (6)$$

以铣削力为衡量指标,经筛选,最佳加工参数为 B4C1D1,即 $n=9000r/min, v_f=200mm/min, a_p=0.2mm$,在该加工参数下,测得的铣削力稳定阶段的平均值与经验值对比如表4所示,铣削力的测量如图5所示。结果表明,铣削力的误差范围均在20%以内,因此该经验公式对铣削力有良好的预测能力。

2 表面粗糙度分析

Wang等^[10]通过对CFRP加工表面粗糙度的分析发现,由于复合

表4 铣削力测量值与经验值对比表

铣削力	测量值 /N	经验值 /N	误差 /%
F_x	1.744	1.939	10.06
F_y	1.623	1.429	13.58
F_z	5.400	4.533	19.13

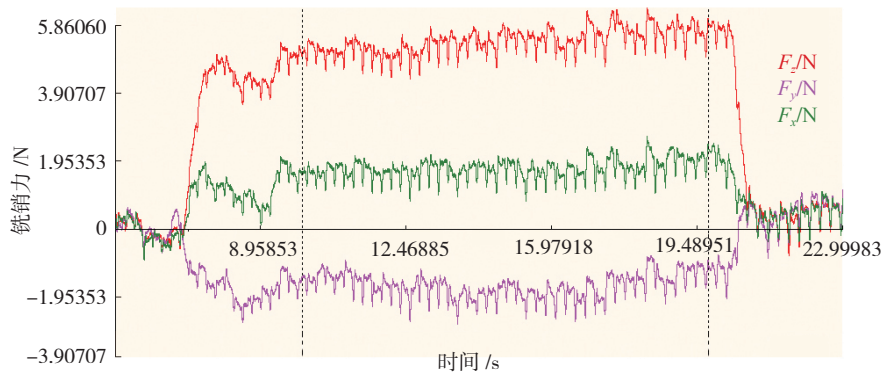
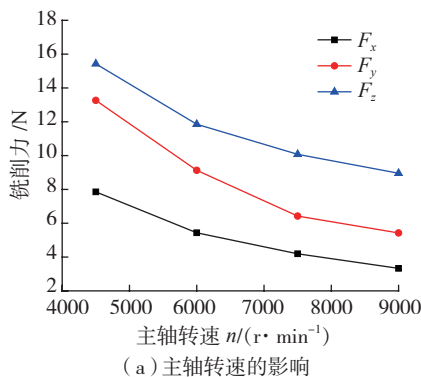
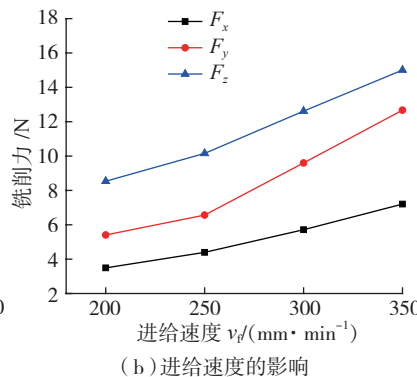


图5 铣削力测量图

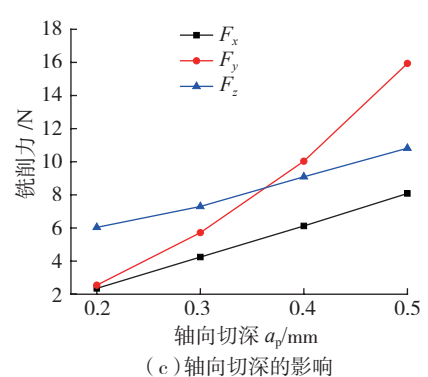
Fig.5 Diagram of milling force measurement



(a) 主轴转速的影响



(b) 进给速度的影响



(c) 轴向切深的影响

图4 加工参数对铣削力的影响

Fig.4 Effect of machining parameters on milling force

材料的各向异性和不均匀性,接触式测量测得的线粗糙度值有较大的随机性,并不能很好地表征加工表面粗糙度。Azmi 等^[6]通过对 GFRP 的试验研究支持此结论。因此,本文使用基于高度特征的三维面粗糙度评定参数 S_a 作为粗糙度的评定参数。

2.1 加工参数对表面粗糙度的影响分析

图 6 (a) 为主轴转速对表面粗糙度的影响,可以看出粗糙度随主轴转速的增大而减小。当主轴转速从 4500r/min 增加到 9000r/min 时,粗糙度由 4.21 μm 降低到了 2.32 μm ,降幅达 44.89%,说明在铣削参数范围内,主轴转速的降低能显著减小加工底面的粗糙度。分析原因,主要在于随着主轴转速的增大,刀具与工件接触区的温度升高,树脂基体发生软化,覆盖在纤维表面,使得一些小凹坑的表面更加平整,导致表面粗糙度降低。

图 6 (b) 为进给速度对表面粗糙度的影响。可以看出:粗糙度随进给速度的增大而增大,当进给速度从 200mm/min 增大到 350mm/min 时,粗糙度由 3.126 μm 增大到 3.404 μm ,增幅为 8.89%。这是因为当进给速度较低时,刀具与工件的接触时间较长,对于同一表面,单位时间内参与加工的磨粒数较多,有

利于形成良好的表面,使得粗糙度降低。随着进给速度的逐渐增加,刀具与工件接触的时间越来越短,可能造成纤维未完全切断;同时由于进给速度的增大,使得切屑的排出变得困难,更多的切屑堆积在加工底面,清理切屑时不可能完全清除,这也在一定程度上造成表面粗糙度的增大。

图 6 (c) 为轴向切深对表面粗糙度的影响。可以看出:随着轴向切深的增大,粗糙度先略有降低再升高,当轴向切深为 0.3mm 时粗糙度最低,此时的粗糙度值 $S_a=3.253 \mu\text{m}$ 。当轴向切深从 0.3mm 增大到 0.5mm 时,粗糙度从 3.253 μm 增大到了 3.537 μm ,增幅为 8.73%,增幅并不大,说明轴向切深对粗糙度的影响较小,这主要是由于所测粗糙度为加工底面的粗糙度,而非侧面的,在主轴转速和进给速度不变的情况下,粗糙度的大小主要与刀具端面磨粒有关,与轴向切深的大小关系不大。

2.2 建立粗糙度经验公式

与上文铣削力经验公式类似,粗糙度 S_a 与 n 、 v_f 、 a_p 的关系式为:

$$S_a = C_F n^{x_1} v_f^{x_2} a_p^{x_3} \quad (7)$$

在式两边取对数得:

$$\lg S_a = \lg C_F + x_1 \lg n + x_2 \lg v_f + x_3 \lg a_p \quad (8)$$

利用 Matlab 软件,建立表面粗糙度与加工参数之间的关系,最终得

到表面粗糙度经验公式:

$$S_a = 1913.7n^{-0.8518} v_f^{0.1999} a_p^{0.0181} \quad (9)$$

以表面粗糙度为衡量指标,经筛选,最佳加工参数为 B4C1D2,即 $n=9000\text{r/min}$, $v_f=200\text{mm/min}$, $a_p=0.3\text{mm}$,但是由上文的分析可知,轴向切深对表面粗糙度的影响较小,切深 0.2mm 与切深 0.3mm 时的粗糙度只相差 0.049 μm ,因此选择在加工参数分别为 $n=9000\text{r/min}$, $v_f=200\text{mm/min}$, $a_p=0.2\text{mm}$ 下验证经验公式的正确性,测得的粗糙度值为 2.6541 μm ,而经验值为 2.2960 μm ,两者的误差为 15.60%。表面粗糙度的测量图如图 7 所示,测量区域面积为 0.88mm \times 1.25mm,测得表面粗糙度 S_a 为 2.6541 μm 。结果表明,表面粗糙度 S_a 的误差在 20% 以内,因此该经验公式对表面粗糙度有较好的预测能力。

结论

(1) 加工参数中对铣削力和表面粗糙度影响最大的分别是轴向切深和主轴转速,进给速度对两者的影响都相对较小。对于本试验的 GFRP 材料,综合考虑铣削力和表面粗糙度,适宜采用的加工参数分别为 $n=9000\text{r/min}$, $v_f=200\text{mm/min}$, $a_p=0.2\text{mm}$ 。

(2) 在正交试验数据基础上,利用统计回归的方法,建立了铣削力、

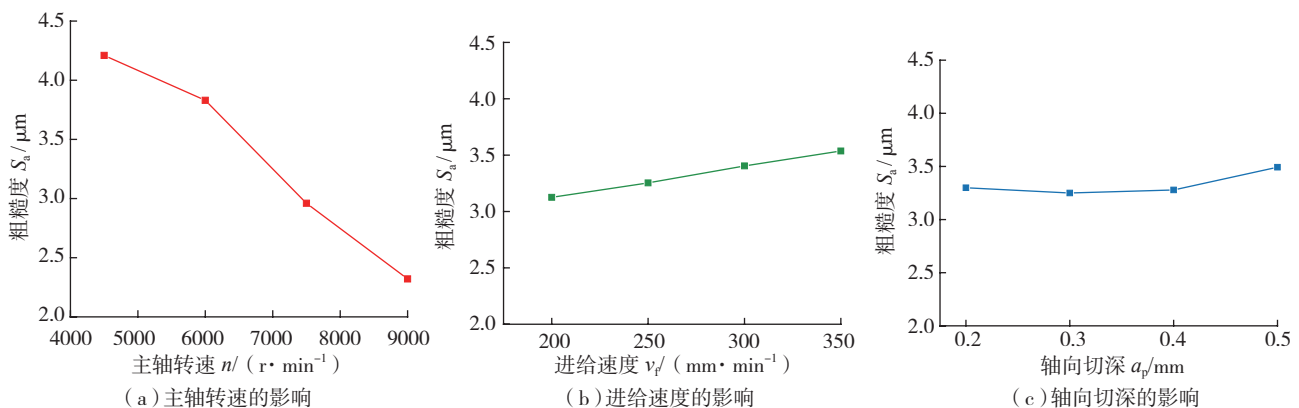


图6 加工参数对表面粗糙度的影响
Fig.6 Effect of machining parameters on surface roughness

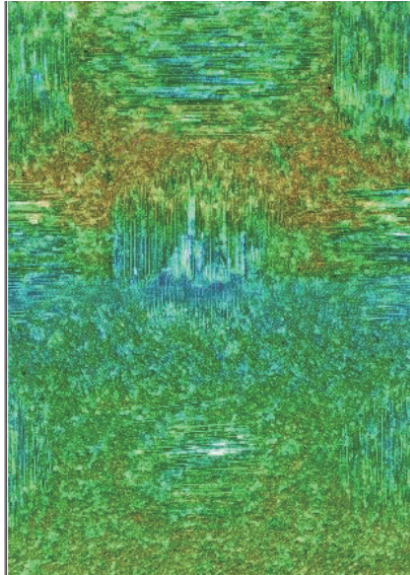


图7 表面粗糙度测量图
Fig.7 Diagram of surface roughness measurement

表面粗糙度与加工参数间的经验公式,通过试验验证表明,经验公式对铣削力和表面粗糙度有较好的预测能力。

参考文献

[1] 高印寒,于向军,王连武,等. 超声波振动精密切削 GFRP 的实验研究 [J]. 光学精密工程, 2003, 11(6):591-595.

GAO Yinhan, YU Xiangjun, WANG Lianwu. Finish cutting of GFRP by ultrasonic vibration[J]. Optics & Precision Engineering, 2003, 11(6): 591-595.

[2] 肖泽宁, 赵建设. 复合材料加工研究现状及分析 [C]// 郭玉明. 第十四届全国复合材料学术会议集. 北京: 中国宇航出版社, 2006.

XIAO Zening, ZHAO Jianshe. Present situation and analysis of study on machining process of composite material[C]// GUO Yuming. The 14th National Symposium on Composites. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2006.

[3] HU N S, ZHANG L C. Some observations in grinding unidirectional carbon fibre-reinforced plastics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 152(3):333-338.

[4] 张秀丽, 严亮, 贺红梅. 玻璃纤维增强树脂复合材料的直角切削技术研究 [J]. 材料导报, 2011, 25(10):59-61.

ZHANG Xiuli, YAN Liang, HE Hongmei. Study on the orthogonal cutting technologies of GFRP[J]. Materials Review, 2011, 25(10):59-61.

[5] 邢光, 罗学科, 刘东. 高速铣削碳纤维复合材料铣削力实验分析 [J]. 中小企业管理与科技, 2009(33):291-292.

XING Guang, LUO Xueke, LIU Dong. Experimental study on milling force in high speed milling of carbon fiber composites[J]. Management & Technology of SME, 2009(33):291-292.

[6] AZMI A I, LIN R J T, BHATTACHARYYA D. Machinability study of glass fibre-reinforced polymer composites during end milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(1):247-261.

[7] MATHIVANAN N R, MAHESH B S, SHETTY H A. An experimental investigation on the process parameters influencing machining forces during milling of carbon and glass fiber laminates[J]. Measurement, 2016, 91:39-45.

[8] 周玉梅, 张凤林. 钎焊单层金刚石工具研究现状 [J]. 焊接技术, 2010, 39(6):1-5.

ZHOU Yumei, ZHANG Fenglin. Research status of brazed monolayer diamond tools[J]. Welding Technology, 2010, 39(6):1-5.

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

REN Jingxin, HUA Ding'an. Grinding principle[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011.

[10] WANG D H, RAMULU M, AROLA D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II: multi-directional laminate[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1995, 35(12):1639-1648.

通讯作者: 陈燕, 教授、博士生导师, 研究方向为复合材料高效精密加工技术, E-mail: ninaych@nuaa.edu.cn.

Research on Milling Force and Surface Roughness of GFRP in Slot Milling

ZHENG Kai^{1,2}, CHEN Yan^{1,2}, YAN Chaoren^{1,2}, LIANG Yuhong^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Slot milling is one of the most common mechanical operations for machining composite materials. Experiments were carried out in order to investigate the milling force and surface roughness during GFRP milling. An orthogonal exam was designed to explore the influence of machining parameters (spindle speed, feed rate and depth of cut) on milling force. Matlab is used to analyze the experimental data of milling force and surface roughness. After regression analysis, the milling force and surface roughness regression equations are established. Finally, the correctness of the milling force and surface roughness regression equations is verified by experiments. The results show that depth of cutting has a greatest influence on milling force, while the influence of feed rate is small; spindle speed has a greatest influence on surface roughness, while the influence of depth of cutting is small. And the error range of the milling force and surface roughness is within 20%.

Keywords: Slot milling; Milling force; Machining parameter; Regression analysis; Surface roughness

(责编 逸飞)