

CFRP 定心内齿槽的加工

苏 飞¹ 袁军堂² 汪振华² 邓朝晖¹

(1 湖南科技大学,机电工程学院难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室,湘潭 411201)

(2 南京理工大学,机械工程学院,南京 210094)

文 摘 以 CFRP 复合构件为研究对象,采用横刃减小的成形刀片对复合构件孔内定心齿槽进行加工试验,分析刀片横刃大小与走刀路径对切削力的影响规律。结果表明:刀片横刃的减小有利于切削力的降低,但横刃减小到 0.5 mm 时,切削力减小的趋势变缓;采用横刃为 0.5 mm 的刀片沿着齿槽轮廓一次进给完成齿槽加工的走刀方式,其单齿加工时间较短、切削力较小、加工质量较好,该种齿槽加工方案较为合理。

关键词 平纹 CFRP,齿槽,PCD 刀片,复合构件,成形刀具

中图分类号:TQ327

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.03.021

Processing of Centring-Slots of CFRP

SU Fei¹ YUAN Juntang² WANG Zhenhua² DENG Zhaohui¹

(1 School of Mechanical and Electrical Engineering Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-Cut Material, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

(2 School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

Abstract The carbon fiber-reinforced plastics composite components were taken as research object, the experiments of the centring-slots in a hole were carried out by the forming cutters with reduced chisel edge. The effects of the chisel edge size and of the moving route of the cutter on the cutting forces were investigated. The results show that when the chisel edge of the cutters reduces, the cutting forces tends to decrease, but the trend of the degression of the cutting forces become slow when the chisel edge is reduced to 0.5 mm. The processing scheme is of short single tooth processing time, low cutting forces, and excellent processing quality, which is one time feeding to finish a slot using the forming cutters with 0.5 mm chisel edge. It is a reasonable processing scheme.

Key words Plain-woven CFRP, Slots, PCD cutter, Residual factor, Composite component, Forming cutters

0 引言

CFRP 具有比强度高、比模量大等优异性能,在航空航天、国防行业具有广泛的应用前景^[1-2]。由于复合材料成型工艺技术的制约,在复合构件制作中难以预留各种孔、槽等。为了满足复合构件的装配要求,往往需要进行二次加工。碳纤维增强复合材料属于典型的难加工材料,加工中易出现难以预料的各种加工问题,如各种加工缺陷、加工环境极具恶劣性等^[3-4]。

国内外学者在碳纤维增强复合材料钻、铣削加工方面的研究较多。YIGIT KARPAT 等^[5]使用两种不

同的刀具对单向 CFRP 材料进行铣削,研究了不同纤维取向下的切削力和加工质量;LIU Jie 等^[6-7]采用立铣刀通过螺旋铣孔的方法进行制孔,深入分析了螺旋铣孔的切削力和加工质量等;鲍永杰等^[8-9]通过 CFRP 的钻削加工,分析了钻孔缺陷产生的过程;苏飞等^[10]提出采用 T 型铣刀进行切削齿槽的试验研究,分析了齿槽最外层表面加工缺陷的形成机制。

然而,在某些 CFRP 零部件加工中,普通的钻削和铣削加工存在一定局限性,如在复合构件的孔内切削大量的细小齿槽,则需要更具针对性的加工工艺方法。目前,关于孔内齿槽加工方面的研究极为少见。

收稿日期:2016-08-01;修回日期:2017-03-06

基金项目:“十二五”国防预研课题(62201060402)

第一作者简介:苏飞,1984 年出生,博士,研究方向:先进制造工艺与装备。E-mail:sfeihe@163.com

通信作者:袁军堂,教授,博士生导师,研究方向:先进制造工艺与装备。E-mail:mcl06@mail.njust.edu.cn

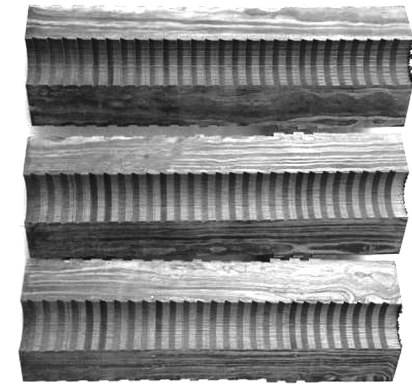
此外,在孔内齿槽加工过程中,采用尖齿刀片沿着齿槽外形轮廓一层层的去除材料,其加工效率低下,而且刀尖部位的强度较难保证。而采用完全成形的刀具通过一次性切入工件完成齿槽加工,其走刀路径简单,但切削振动剧烈,切削力过大,易导致刀片的破损,反而降低加工效率。因此,为了兼顾切削力的降低,以及加工效率和刀尖部位强度的提高,可以将横刃适当减小。

本文以碳纤维增强复合材料复合构件为研究对象,通过改变刀片横刃大小和走刀路径展开复合构件定心内齿槽的加工试验,重点分析横刃大小和走刀路径对切削力的影响规律,进而寻求高效、高质量的CFRP复合构件定心齿槽的加工技术。

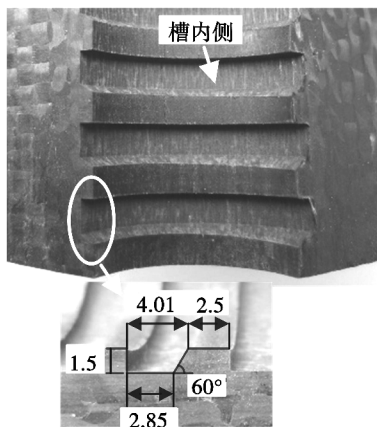
1 试验

1.1 试验条件

试验构件是由3瓣120°扇形瓣状的平纹编织碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)构件组合而成,需要切制的齿槽形状和尺寸如图1所示。



(a) 复合构件半成品



(b) 定心内齿槽的形状、尺寸

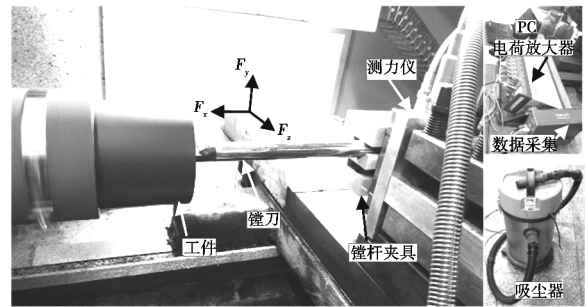
图1 某制件半成品的孔内定心齿槽

Fig.1 Centring-slots of the half-finished composite components

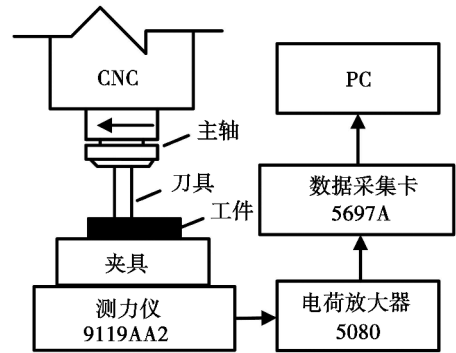
在定心内齿槽的加工前应对3瓣构件的扇形进行修正,并精加工扇形侧面,保证扇形侧面贴合紧密。试验构件尺寸为外径120 mm,内径23 mm,长230 mm。由于复合构件的内孔通常属于深长孔,在孔内

齿槽的加工过程中刀杆悬伸的长径比往往超过10,切削过程中刀具的振动极为严重,导致刀具极易破损。在复合构件的实际加工中,为了保证孔内齿槽的加工精度,常在孔完成后直接进行齿槽加工。考虑到加工方法的实用性、经济性和易操作性,提出采用镗削的加工方法对孔内齿槽进行加工。

试验在CK6140数控车床上进行,试验过程中采用大功率吸尘器排屑和促使切削热散发。测力系统包括Kistler公司提供的9119AA2测力仪、5697A数据采集器、5080多通道电荷放大器以及PC等。为了提高镗杆的静刚度,降低切削振动,选用硬质合金材料制作镗杆,刀杆总长260 mm,镗杆直径为16 mm。试验采用钎焊PCD刀片,刀片与刀杆之间通过螺钉连接。试验装置和测力系统如图2所示,图中, F_x 为进给切削力, F_y 为主切削力, F_z 为背向切削力。



(a) 试验装置



(b) 测力系统

图2 试验装置与测力系统

Fig.2 Experimental setup and force measurement system

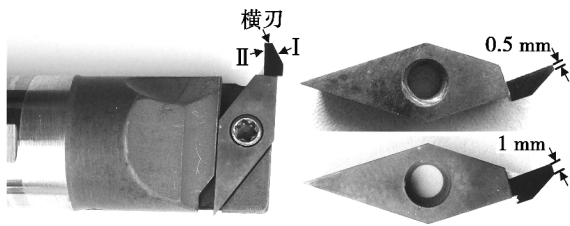
1.2 试验方案

为分析刀片横刃大小和走刀路径对切削力的影响规律,整个过程进行了两组试验,试验中,切削速度 v_c 均为16.7 m/min,进给量 f 均在2~5 $\mu\text{m}/\text{r}$,径向切深均为1.5 mm。

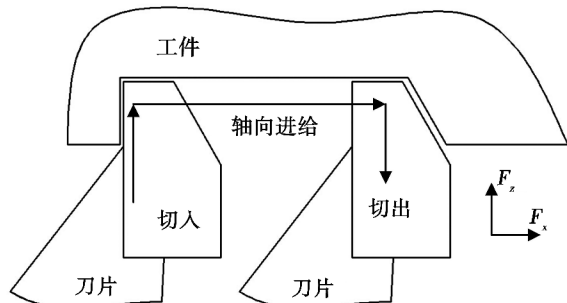
(1) 第一组试验

第一组试验使用两种刀片,所使用的刀片如图3(a)所示。P1刀片的横刃为1 mm,P2刀片的横刃为0.5 mm。采用P1和P2刀片进行加工的走刀路径如图3(b)所示。刀齿走刀路径分切入阶段和轴向进给阶段。在切入阶段,刀片一次性切入工件1.5 mm,

在轴向进给阶段, P1 刀片轴向进给 1.85 mm, P2 刀片轴向进给 2.35 mm。



(a) P1 和 P2 刀片



(b) 一次进给齿槽加工路径

图 3 刀片结构与走刀方法

Fig.3 Blade structures and tool-path

(2) 第二组试验

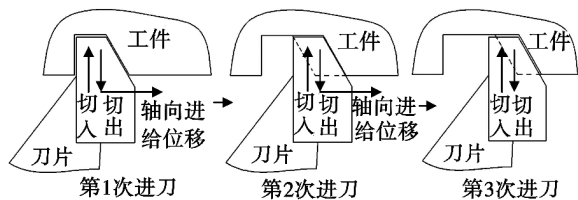
采用横刃减小的刀片进行齿槽加工,其走刀方式较多,不同走刀方式下的加工效率、加工质量和切削力均存在一定差异。分别采用横刃减小的 P1 和 P2 刀片通过多种走刀路径进行齿槽加工试验。

采用 P1 刀片的走刀路径分别有:路径 A—沿着齿槽轮廓进行 3 次插齿,如图 4(a) 所示;路径 B—将齿槽槽深分 4 等份,沿着齿槽轮廓分 4 次进给完成齿槽加工,如图 4(b) 所示;路径 C—将齿槽槽深分 2 等份,沿着齿槽轮廓分 2 次进给完成齿槽加工,如图 4(c) 所示;路径 D—沿着齿槽轮廓 1 次进给完成齿槽加工,如图 3(b) 所示。

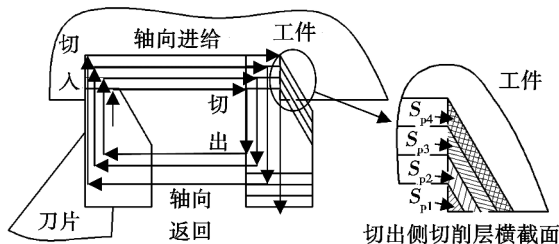
P2 刀片的走刀路径分别有:路径 E—将齿槽槽深分 2 等份,沿着齿槽轮廓分 2 次进给完成齿槽加工,与路径 C 相同;路径 F—沿着齿槽轮廓 1 次进给完成齿槽加工,与路径 D 相同。

采用 P1 和 P2 刀片进行齿槽加工,发现切入阶段和轴向进给阶段的各切削分力存在明显差异,如图 4(d) 中主切削力的测试曲线所示。切入阶段的切削分力明显高于轴向进给阶段的切削分力,由于进给量 f 在 $2 \sim 5 \mu\text{m/r}$, f 取值非常相近,在不同的进给量下,各向切削分力和合力相差较小。因此,为了便于比较,以这两个阶段各向切削力最大值的均值来衡量切削力的大小。此外,路径 A 的走刀方式与其它 5 种走刀方式完全不同,且路径 A 的第 1、2 和 3 次走刀的切削力大小基本相同。为了便于比较,只将路径 A

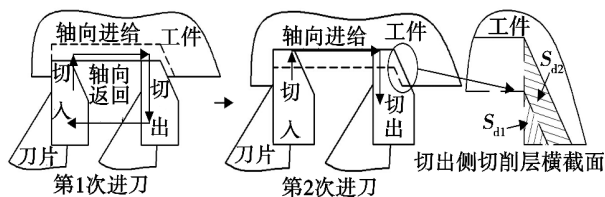
的第 1 次走刀的切削力与其他 5 种路径中单次走刀的切削力进行对比。



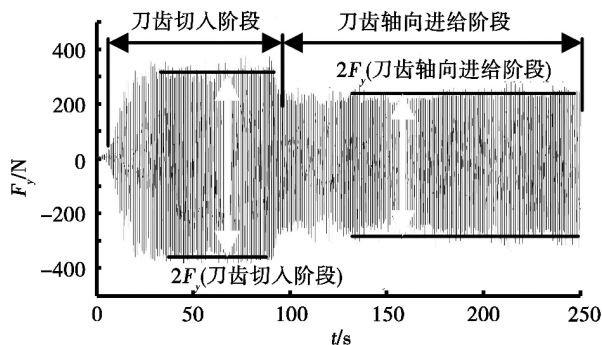
(a) 路径 A



(b) 路径 B



(c) 路径 C



(d) F_y 曲线

图 4 走刀路径和切削力曲线

Fig.4 Tool-paths and cutting forces

图 4 中, S_{p1} 、 S_{p2} 、 S_{p3} 和 S_{p4} 分别为路径 B 第 1、2、3 和 4 次走刀切出侧的切削层横截面; S_{a1} 和 S_{a2} 分别为路径 C 切出侧的切削层横截面。

试验通过三向分力计算了切削力的合力 $F_{\text{合}}$, 通过切削合力的大小可以判断刀具所承受总载荷的大小, 合力的计算公式如式 (1) 所示。

$$F_{\text{合}} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

2 结果与分析

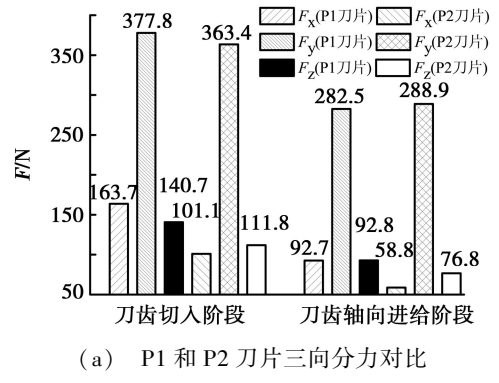
2.1 刀片横刃对切削力的影响规律

分别采用横刃减小的 P1 和 P2 刀片进行齿槽加工试验, 试验结果如图 5 所示。由图 5(a) 和 (b) 可知: (1) 在切入阶段, 横刃和第 I、II 侧刃均参与切削, 而在轴向进给阶段只有横刃和第 I 侧刃参与切

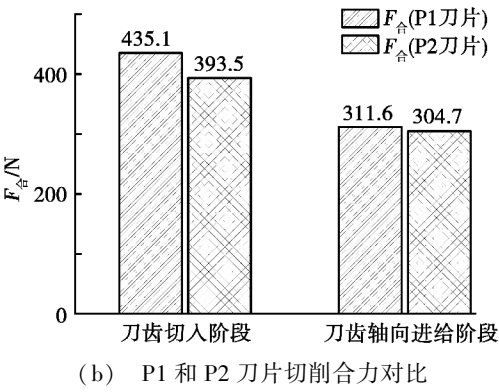
削,刀具与工件的接触面积明显减小,因此,轴向进给阶段的切削力明显低于切入阶段的切削力;(2)除轴向进给阶段 P1 刀片的主切削力比 P2 刀片的主切削力略小 6.4 N 外,切入阶段和轴向进给阶段 P1 刀片的轴向力、背向进给力 and 合力均高于 P2 刀片的。其中,切入阶段 P1 刀片的轴向力、主切削力、背向进给力 and 合力比 P2 刀片的相应切削力分别高出 62.6、14.4、28.9 和 41.6 N。轴向进给阶段 P1 刀片的轴向力、背向进给力 and 合力比 P2 刀片的相应切削力分别高出 33.9、16 和 6.9 N。

综上所述, P1 刀片的横刃是 P2 刀片的 2 倍, P2 刀片各阶段相应分力和合力比 P1 刀片的有所降低,但降低幅度较小。因此,刀片横刃的减小有利于切削力的降低,但当横刃减小到一定时,切削力不会因为横刃的成倍减小而明显降低。

刀痕,如图 6(e)所示,这些刀纹和刀痕严重影响切削表面的粗糙度,因此,从加工质量和切削力来看,采用路径 A 的走刀方式进行齿槽加工不可取;(2)采用 P1 刀片分别通过了 1、2 和 4 次走刀进行齿槽加工(即路径 D、路径 C 和路径 B),随着走刀次数的增多,切削层的横截面面积有所减小,各阶段的切削分力和合力有所降低,从各阶段的切削分力和合力来看,路径 B 和路径 C 的切削力相差不大,而路径 C 与路径 D 的切削力相差较大,可见分多次走刀能降低切削力,但随着走刀次数的增多,切削力的降低趋势会变缓,且单个齿槽加工的时间会增加,对加工效率的提高不利,因此,走刀次数不宜过多;(3)采用 P1 刀片进行齿槽加工,齿槽内侧切削表面出现明显的刀纹,采用 P2 刀片进行齿槽加工,齿槽内侧切削表面没有明显的刀纹,切削表面的粗糙度明显低于前者,如图 6(e)所示。



(a) P1 和 P2 刀片三向分力对比



(b) P1 和 P2 刀片切削合力对比

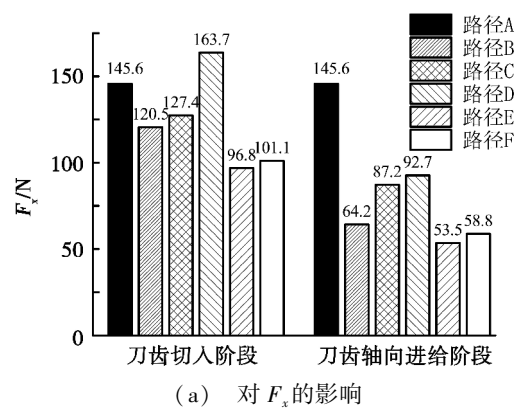
图 5 P1 和 P2 刀片切削分力和合力

Fig.5 Component and combined forces of P1 and P2

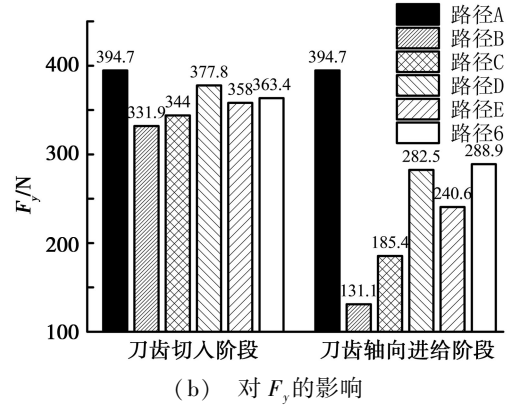
2.2 走刀路径对切削力的影响规律

采用横刃减小的 P1 和 P2 刀片按一定走刀路径进行齿槽加工,在避免切削力过大的前提下,适当的提高了加工效率,是齿槽加工切实可行的方法。试验结果见图 6(a)~(d)。

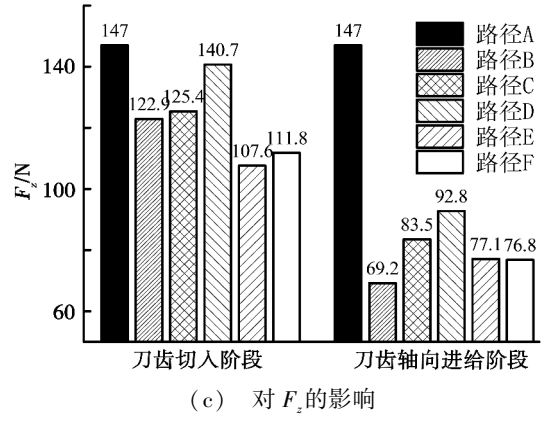
由图 6(a)~(d)可知:(1)各阶段中,路径 A 的切削分力和合力均较大,刀具所承受的总载荷高达 446 N,可见,这种走刀路径对刀具的受力状态并没有明显改善,而且齿槽内侧切削表面上出现明显刀纹和宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2017 年 第 3 期



(a) 对 F_x 的影响



(b) 对 F_y 的影响



(c) 对 F_z 的影响

好,由此可见,路径 F 在加工效率、切削力和切削表面质量上都具有一定优势。

综上可见,基于对加工效率、切削力和切削表面加工质量的综合考虑,采用横刃为 1 mm 的 P1 刀片通过路径 C 走刀进行齿槽加工,以及采用横刃为 0.5 mm 的 P2 刀片通过路径 E 或路径 F 走刀进行齿槽加工均具有可行性,其中,采用横刃为 0.5 mm 的 P2 刀片通过路径 F 走刀进行齿槽加工较为合理,走刀路径也较为简单。

3 结论

(1) 齿槽刀片横刃的减小有利于切削力的降低,当横刃减小到 0.5 mm 时,切削力不会因为横刃的成倍减小而呈明显降低;

(2) 采用横刃为 0.5 mm 的齿槽刀片沿着齿槽轮廓 1 次进给完成齿槽加工的走刀方式,其单齿加工时间较短、切削力较小、加工质量较好,该种齿槽加工方案较为合理,其走刀路径也较为简单。

参考文献

[1] WOLFGANG Hintze, MARCEL Cordes, GREGOR Koer- kel. Influence of weave structure on delamination when milling CFRP[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 199-205.

[2] 周井文,陈燕,傅玉灿,等.进给速度对不同纤维方向 CFRP 铣削表面形貌的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 370-377.

[3] WANG Haijin, SUN Jie, LI Jianfeng, et al. Investigation on delamination morphology during drilling composite laminates [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(1): 257-266.

[4] XU Jinyang, AN Qinglong, CAI Xiaojiang, et al. Drilling machinability evaluation on new developed high-strength T800S/ 250F CFRP laminates[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(10): 1687-1696.

[5] Yiğit Karpat, ONUR Bahtiyar, BURAK Değet al. Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 56: 79-93.

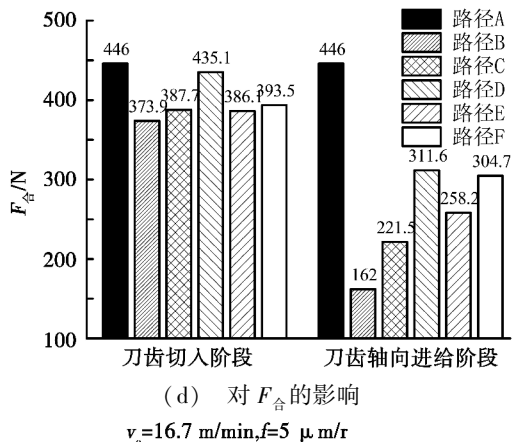
[6] LIU Jie, CHEN Guang, JI Chunhui, et al. An investigation of workpiece temperature variation of helical milling for carbon fiber reinforced plastics (CFRP) [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 86: 89-103.

[7] CHEN Xuemei, CHEN Qingliang, HE Fengtao, et al. Experimental study on orbital drilling force and machining quality of CFRP [J]. Advanced Materials Research, 2015, 1061-1062: 542-549.

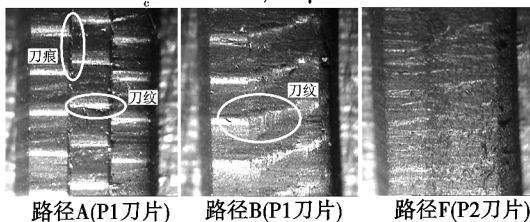
[8] 鲍永杰. C/E 复合材料制孔缺陷成因与高效制孔技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.

[9] 鲍永杰, 高航, 马海龙, 等. 单向 C/E 复合材料磨削制孔温度场模型的研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(1): 169-176.

[10] 苏飞, 袁军堂, 程寓. 碳纤维增强复合材料 T 型齿槽加工缺陷的形成机制[J]. 复合材料学报, 2014, 31(5): 1127-1133.



$v_c=16.7\text{ m/min}, f=5\text{ }\mu\text{m/r}$



(e) P1 和 P2 的切削效果

图 6 走刀路径对切削力的影响

Fig.6 Effect of the tool path on the cutting forces

各走刀路径下,单个齿槽的走刀时间直接影响各走刀方式的加工效率,因此,对各走刀路径下单个齿槽的走刀时间进行计算。假设在相同进给量 f 和切削速度 v_c 下,各走刀方式下单个齿槽的加工时间为:

$$T = t \times N = \frac{L_1}{v_f} \times N \quad (2)$$

式中, T 为单个齿槽的加工时间, t 为单次走刀时间, N 为走刀次数, L_1 为单次走刀行程, v_f 为进给速度。计算过程中,由于快速走刀时间较短,因此忽略快速走刀时间。

在切削速度 $v_c = 16.7\text{ m/min}$ 下,刀片向孔内侧的切深约 1.5 mm,按最大的进给量 f (即 $f = 5\text{ }\mu\text{m/r}$) 进行计算,路径 A、B、C、D、E 和 F 的单个齿槽走刀时间分别为:3.9、7.7、4.5、2.9、5.4 和 3.3 min。

由此可见:(1)走刀路径 A 单个齿槽的走刀时间并没有减少,因此,再一次验证了路径 A 走刀方式的不可行性;(2)路径 B 单个齿槽的走刀时间明显较高,加工效率低下,因此,路径 B 的走刀方式也不可取;(3)路径 C 和路径 E 单个齿槽的走刀时间接近,且切削力相对较小,齿槽内侧切削表面粗糙度较低,特别是路径 E,因此,路径 C 和路径 E 具有一定的可行性;(4)路径 D 单个齿槽的走刀时间最小,加工效率有一定优势,但切削力较大,且切削表面存在较明显的刀纹,因此,综合考虑加工效率、切削力和切削表面质量,路径 D 并不理想;(5)路径 F 单个齿槽的走刀时间较小,加工效率具有一定优势,切削力较低,齿槽内侧切削表面较为光洁,切削表面的加工质量较