

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.02.014

碳纤维复合材料钻孔加工的缺陷分析

崔西亮, 田 彪, 王永国*

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 为了解决碳纤维复合材料(CFRP)钻孔加工过程中出现的撕裂、毛刺、分层等问题,以及将碳纤维复合材料更好地应用到机械制造行业中,进行了碳纤维复合材料的钻孔试验。通过实验研究了碳纤维复合材料的钻孔缺陷,分析了碳纤维复合材料钻孔加工的主要缺陷分类,以及钻削力、刀具的锋利性、钻削温度等因素对孔加工质量的影响,建立了钻削速度、进给速度与钻孔质量之间的关系;采用DM2500M金相显微镜以及KEYENCE VHX-1000三维显微系统进行了相关的试验。研究表明,钻孔加工缺陷出现部位呈现一定的区域性,钻孔毛刺、撕裂缺陷主要集中在出口部位,入口处几乎没有毛刺、撕裂等缺陷;随着进给速度的减小和主轴转速的增大,钻孔缺陷能够得到明显的改善;采用PCD钻头加工复合材料时宜在中、高转速下进行,高转速下钻头切削刃更易切断纤维,可以得到质量更高的钻孔。

关键词: 碳纤维复合材料; 钻孔; 缺陷; 切削参数; 加工质量

中图分类号: TH16; TG52 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)02-0182-03

Carbon fiber reinforced plastic drilling defect analysis

CUI Xi-liang, TIAN Biao, WANG Yong-guo

(School of Electrical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Aiming at solving the problems of the tear, burr hole, layer in the process of carbon fiber reinforced plastics(CFRP) drilling and applying carbon fiber reinforced plastics better to the machinery manufacturing industry, drilling experiment of carbon fiber reinforced plastics was made. Through experiment, drilling defects of carbon fiber reinforced plastics were analyzed and classified. The impact of the drilling force, the sharpness of the tool, drilling temperature and other factors on drilling were analyzed. The relationship of drilling speed, feed speed and quality of drilling hole was built. DM2500M metallurgical microscope and KEYENCE VHX-1000 3D microscopy system were used in the experiment. The result indicates that arising of drilling defect is regional. Drilling tear and burr hole mainly concentrate on the exit while there is almost no in the entrance. With decreasing feed speed and increasing spindle speed, drilling defects will be dramatically improved. Therefore, it is proper to drill carbon fiber reinforced plastics using PCD bit at middle and higher speed and easier for bit to cut fiber at high speed to gain high-quality drilling hole.

Key words: carbon fiber reinforced plastic(CFRP); drilling; defect; cutting parameters; machining quality

0 引 言

碳纤维复合材料(CFRP)具备极佳的综合性能,诸如高比强、高比模、耐高温、耐磨、耐疲劳、热膨胀系数小、尺寸稳定性好等优良的综合性能,目前在航空航天、军工、汽车等领域中得到了广泛的应用^[1-2]。预计2015年我国大飞机碳纤维复合材料用量达到25%,对

碳纤维的需求量约2 500 t^[3]。目前,碳纤维复合材料大多采用多向铺层的叠层工艺方式制造成型^[4],在钻孔加工过程中,由于切削力、切削温度及材料本身性能影响,加工后孔表面质量不易保证,经常会出现分层、撕裂、毛刺等加工缺陷,并且使用传统刀具材料时,刀具易磨损,寿命低,而使用PCD刀具钻削加工碳纤维复合材料时,不但能够获得良好的加工质量,而

收稿日期: 2012-11-27

作者简介: 崔西亮(1989-),男,山东泰安人,主要从事先进工艺与刀具技术方面的研究。E-mail: Xiliang19890406@163.com

通信联系人: 王永国,男,博士,副教授,博士后,博士生导师。E-mail: 19800258@qq.com

且刀具寿命长。

本研究提出的钻削试验采用DM2500M金相显微镜、KEYENCE VHX-1000 三维显微系统以及 DECKEL MAHO DMU 50 evo linear 五轴加工中心,加工中心的刀具夹持系统为 HSK-A63,试验材料为碳纤维增强双马树脂基复合材料(T300),外形尺寸长 200 mm×宽 80 mm×厚 3.5 mm 长方型板材。试验主要分析碳纤维复合材料钻孔加工的主要缺陷分类及原因,以及切削参数对加工质量的影响。

1 碳纤维复合材料孔加工主要缺陷

1.1 孔加工的主要缺陷分类

碳纤维复合材料在钻削过程中会出现各种加工缺陷,其示意图如图1所示。

这些缺陷主要可分为两类缺陷:①孔的尺寸精度、位置精度不合格,圆度超差等几何缺陷,如孔形不圆、孔的尺寸收缩,这些缺陷在金属材料制孔中也会存在;②孔出、入口处的纤维劈裂或撕裂,孔内壁周围材料分层以及孔壁表面的微裂纹等碳纤维复合材料制孔时存在的特有缺陷,这也是碳纤维复合材料制件连接和装配中导致报废的主要原因。

孔口处是这些缺陷出现的主要部位,一般来说钻孔入口的撕裂、毛刺现象较出口处的撕裂毛刺程度小,碳纤维复合材料钻孔出口缺陷主要由撕裂和毛边两部分组成;其中撕裂一般比毛边的尺寸大,而且在构件实际使用中的负面影响也比较大,所以对孔口缺陷的研究以撕裂为主。撕裂的形成过程包括两个作用阶段,即横刃作用阶段和主切削刃作用阶段,其中横刃作用在撕裂形成中占主导成分^[5]。毛边缺陷是指在孔边缘部分存在的未完全切断的表层纤维,通常出现在材料表层纤维被切削的孔边缘部分。

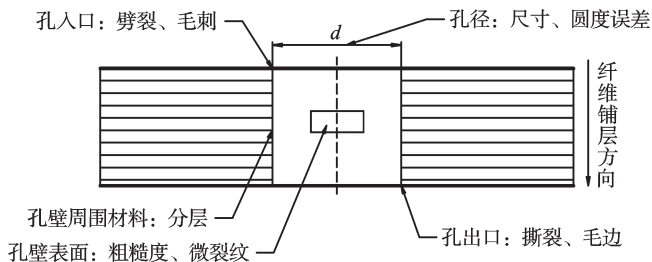


图1 碳纤维复合材料加工孔的缺陷示意图

通过钻削试验的观察可见,毛刺缺陷分布呈现一定的区域性,毛刺、撕裂缺陷照片如图2所示。根据碳纤维复合材料的切削机理可知,这种区域性特征是由于切削时纤维角的不同造成的。从图2得出,毛刺、撕裂出现的区域与纤维的角度有很大关系。碳纤维复合材料钻削过程中,假设“顺剪”时纤维角为锐角,“逆

剪”时纤维角为钝角,则钻头旋转一周,钻头主切削刃处于“顺剪切”→“逆剪切”→“顺剪切”→“逆剪切”的周期性变化。所以“顺剪”切削时,纤维不容易被切断形成毛刺撕裂缺陷,“逆剪”切削时,材料容易被切断,无毛刺或较小毛刺撕裂缺陷产生。

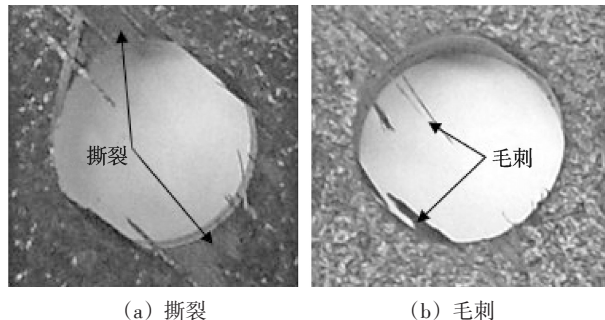


图2 碳纤维复合材料钻孔出口缺陷照片

1.2 钻孔缺陷的原因分析

1.2.1 钻削力

在制孔过程中,当钻头切入复合材料时,主切削刃首先使纤维剥开,然后把它切断,这种剥离对孔的入口端最外层材料的影响最大,当纤维被剥离开时,钻头的切削刃必须同时切断纤维,假如不能全部切断或者所要求的切削力超过基体树脂的强度,就会产生开裂并沿着表面层纤维的取向扩展,这正是孔的入口处出现劈裂的原因^[6]。

由于钻削过程中轴向力始终施加在材料表面上,使得复合材料层压板各层沿厚度方向依次受到一种拉力,从而在孔壁周围材料层中产生一定的层间应力,这种层间应力过大,则易出现分层。同时在碳纤维复合材料的钻削过程中,钻削力是周期性变化的,周期性变化的轴向力必然使得孔壁周围材料承受交变应力,进而增加分层的可能性,一般作用在层合板上的轴向力越大,层间法向拉伸正应力就越大,因此出现分层的可能性也就越大。对碳纤维复合材料钻孔在钻出过程中,随着待切削材料层不断减少,钻孔处刚性不断下降。当钻头横刃首先接触到外层纤维时,即相当于给这一层材料施加了一个与其他纤维层分开的推力。由于横刃具有负前角而不锋利,孔出口端最外层纤维不是立即被切断,而是在轴向力作用下向外退让,此时最外层纤维可能与基体撕开,造成出口撕裂^[7]。

1.2.2 刀具的锋利性

毛刺主要是由于钻头的切削刃锋利性差决定的。切削刃锋利性差在造成钻头切削性能下降的同时,也会导致钻削力的增大,所以切削刃的锋利性差也是造成毛刺、撕裂、劈裂缺陷的主要原因之一。

因此刀具切削刃的锋利性成为钻削高质量孔主要影响因素;由于PCD刀具的切削刃可以刃磨的很锋

利,很适合加工复合材料^[8-9]。分析试验加工孔的孔壁质量大都符合复合材料的加工质量要求,主要缺陷出现在孔出口处,特别在较低转速下孔口毛刺撕裂现象较为严重。

1.2.3 钻削温度

钻削碳纤维复合材料时,随着刀具与工件接触部位的温度产生并增高,由于纤维、基体两种组分的热膨胀系数不同,在切削过程中产生热应力,受到热效应的几何边界层将会产生应力集中,产生局部应变,从而引起分层撕裂等缺陷,导致刀具的快速磨损,并可能损伤复合材料的性能^[10-11]。

从以上分析可知,钻削力是影响碳纤维复合材料制孔质量的重要因素,是引起分层缺陷和孔口缺陷的主要原因。在钻削过程中,钻削力越大,分层与撕裂的可能性及破坏的范围越大。

2 切削参数对加工质量的影响

2.1 钻削速度对孔口缺陷的影响

在使用PCD钻头钻削碳纤维复合材料时,主轴转速与孔的出口撕裂、毛刺因子的关系图如图3所示。可以看出,随着主轴转速的提高,加工孔出口的撕裂与毛刺因子呈下降趋势;并可以看出,试验中孔口质量在 $n=10\ 000\ \text{r/min}$ 时出口毛刺、撕裂程度最小;在较低转速下,孔口处的撕裂、毛刺缺陷较大,故用PCD钻头加工复合材料时宜在中、高速转速下进行,高转速下钻头切削刃更易切断纤维,可以得到更高质量的钻孔。

2.2 进给速度对加工质量的影响

在转速为 $8\ 000\ \text{r/min}$ 的情况下,进给速度不同

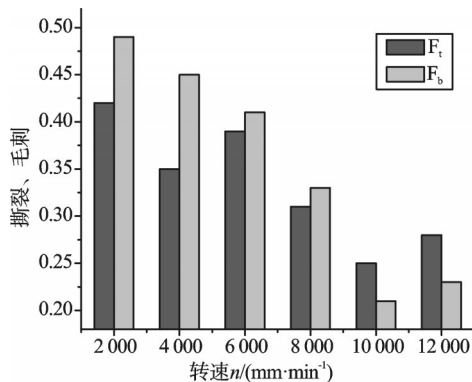


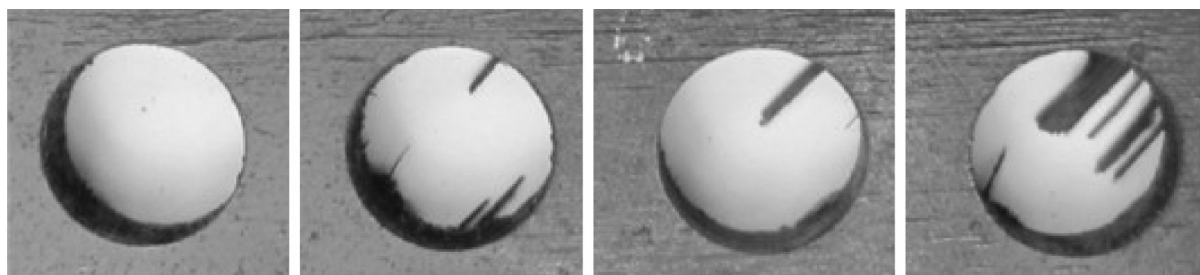
图3 主轴转速与孔出口撕裂、毛刺因子的关系
($v_f = 200\ \text{mm/min}$)

时,研究者使用PCD钻头加工的碳纤维复合材料孔口形貌图片如图4所示。

从图4中可以看出,随着进给速度的增加,孔口的毛刺现象有明显增大的趋势。进给速度是影响钻削轴向力的大小的主要因素,这就说明钻削轴向力对钻孔出口质量有较大的影响。通过进一步观察可以发现,进给速度的变化与加工孔口的毛刺大小变化基本呈正比例关系。并且通过对比钻孔的进口与出口形貌可以发现,钻孔的入口处几乎没有毛刺、撕裂等缺陷,毛刺、撕裂缺陷主要集中在出口部位。

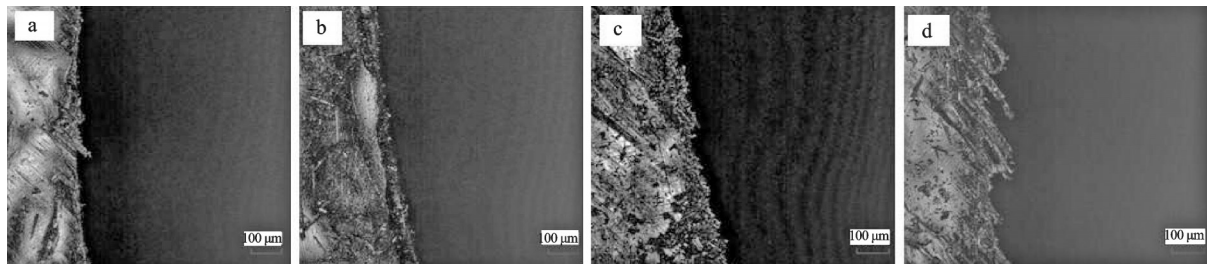
为了进一步分析不同加工参数下孔口的加工质量,本研究利用VHX-1000型超景深显微镜对不同加工参数的制孔出口表面进行观测,其结果如图5所示。

可以看出,随着进给速度增大,孔口处的毛边现象越来越严重,不同的加工参数,加工后的出口表面质量亦不同。孔口的加工质量与切削参数有着密切的关系。



(a) $v_f = 100\ \text{mm/min}$ (b) $v_f = 200\ \text{mm/min}$ (c) $v_f = 300\ \text{mm/min}$ (d) $v_f = 400\ \text{mm/min}$

图4 不同进给速度钻孔孔口形貌照片 ($n=8\ 000\ \text{r/min}$)



(a) $v_f = 100\ \text{mm/min}$ (b) $v_f = 200\ \text{mm/min}$ (c) $v_f = 300\ \text{mm/min}$ (d) $v_f = 400\ \text{mm/min}$

图5 不同进给速度钻孔出口微观形貌 ($n=10\ 000\ \text{r/min}$)

(下转第196页)

技术,推导出基于空间矢量调制的矩阵变换器的开关状态表,同时利用 Matlab 软件 Simulink 中的 S 函数建立了矩阵变换器仿真模型,通过运用数学算法,实现了较快的仿真速度,节约了大量时间。

仿真结果验证了空间矢量调制策略的有效性和正确性,表明矩阵变换器具有优良的输入/输出特性。该仿真模型采用模块化设计,方便搭接,具有开放性和工程实用价值,为将矩阵变换器应用于矢量控制和直接转矩控制异步电动机调速系统奠定了基础。

参考文献(References):

- [1] VENTURINI M. A New High Switching Rate Direct Frequency Converter: Italian, 2077a79[P]. 1979-03-06.
- [2] 文辉清,吕征宇. 基于空间矢量调制的三相矩阵式变换器[J]. 电力电子技术, 2005(1): 4-6.
- [3] WHEELER P W, CLARE J C. A Vector controlled MCT Matrix Converter Induction Motor Drive with Minimized Commutation Times and Enhanced Waveform Quality[C]//IEEE IAS'2002 Conf. Rec. Pittsburgh: [s.n.], 2002: 466-472.
- [4] WEI L. A Novel Matrix Converter Topology with Simple Commutation[C]. IEEE PESC'2001, 2001: 1749-1754.
- [5] 王毅,陈希有,徐殿国,等. 空间矢量调制矩阵变换器闭环控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 164-169.
- [6] HUBER L, BOROJEVIC D. Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction[J]. IEEE Transactions on IA, 1995, 31(6): 1234-1246.
- [7] CHEN D F, LIU Tian-hua. Optimal controller design for a matrix converter based surface mounted PMSM drive system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(4): 1034-1046.
- [8] NELSEN P. Space Vector Modulated Matrix Converter with Minimized Number of Switching and a Feed Forward Compensation of Input Voltage Unbalance[C]//Proceeding of PEDES. Delhi: [s.n.], 1996: 2833-839.
- [9] GE Hong-juan, MU Xin-hua, ZHOU Bo, et al. A Novel Discrete Control Technique of Matrix Converter for the Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor[C]//IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005: 1351-1357.
- [10] 粟梅,杨文,张泰山. 矩阵变换器驱动异步电动机仿真研究[J]. 电气传动, 2005, 35(8): 13-16.
- [11] 韩坚,蒋心怡,王亚楠,等. 矩阵变换器的空间矢量调制策略仿真[J]. 船电技术, 2007, 27(6): 374-377.
- [12] 李志勇,朱建林,易灵芝,等. 空间矢量调制的矩阵式变换器仿真模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 80-84.

[编辑:张翔]

(上接第184页)

3 结束语

本研究通过试验主要分析了碳纤维复合材料孔加工的主要缺陷分类与原因,以及切削参数对加工质量的影响,研究表明,孔口处是碳纤维复合材料钻孔加工缺陷出现的主要部位,并呈现一定的区域性;钻孔毛刺、撕裂缺陷主要集中在出口部位,入口处几乎没有毛刺、撕裂等缺陷;钻孔孔口处的毛刺、撕裂缺陷受进给速度 V_f 和主轴转速 n 影响, V_f 越大,撕裂、毛刺程度增大;在较低主轴转速下,钻孔出口质量较差,故用PCD钻头加工复合材料宜在中、高转速下进行,高转速下钻头切削刃更易切断纤维,可以得到质量更好的钻孔;高速下毛刺、撕裂现象明显减少。

参考文献(References):

- [1] 刘雄亚. 复合材料新进展[M]. 北京:化学工业出版社, 2007.
- [2] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007(2): 1-3.
- [3] 余黎明. 我国碳纤维行业现状和发展趋势分析[J]. 新材料产业, 2011(6): 13-21.
- [4] LEWIS S J. The use of carbon fiber composites on military aircraft[J]. Composites Manufacturing, 1994, 5(2): 95-103.
- [5] 张厚江,陈五一,陈鼎昌. 碳纤维复合材料(CFRP)钻孔出口缺陷的研究[J]. 机械工程学报, 2004(7): 150-155.
- [6] KOPLEV A, LYSTRUP A, VORM T. The cutting process chips and cutting forces in machining CFRP[J]. Composites, 1983, 14(4): 371-376.
- [7] 古托夫斯基. 先进复合材料制造技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- [8] 赵建芳. PCD/PCBN刀具的应用及制造工艺[J]. 工业金刚石, 2003(3): 15-17.
- [9] 刘红,梁华,蒋兰芳. 车灯支架的模态分析[J]. 轻工机械, 2013, 30(4): 37-39.
- [10] ILIESCU D, GEHIN D, GUTIERREZ M E. Modeling and tool wear in drilling of CFRP[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(2): 204-213.
- [11] FERREIRA J R, COPPINI N L, MIRANDA G W A. Machining optimization in carbon fiber reinforced composite materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999(92): 135-140.

[编辑:张翔]