

碳纤维增强复合材料钻孔加工中刀具磨损试验研究

Wear Experiment of Twist Drill Inhole Machining of CFRP

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 孙忠海 翟南 郭志涛

[摘要] 碳纤维增强复合材料属于典型的难加工材料。钻孔加工过程中,钻头磨损严重,影响CFRP的表面质量,降低加工效率,需要降低钻孔过程中刀具的磨损。通过使用2种不同材质的钻头钻削CFRP,研究钻头材质对刀具磨损值、钻削轴向力的影响,得到:钻头主要磨损形式为磨粒磨损、粘着磨损、崩刃;PCD钻头的加工效率和耐磨性远高于硬质合金钻头。

关键词: 碳纤维增强复合材料 磨损机理 VB值 钻削力

[ABSTRACT] CFRP is a typical difficult material to machine. In the drilling process, the drill gets wear badly, which affects the surface quality of CFRP, decreases the processing efficiency and raises the processing cost. It is necessary to reduce the tool wear during the drilling. This paper introduces the influence among the material of the drill, the wear value of the drill and the thrust force of drilling by drilling the CFRP with two different drills. The experiment demonstrates that the wear forms include the abrasive wear, adhesive wear, tipping; it also proves that PCD tool has more advantage than the cemented carbide "YG6X" while drilling CFRP.

Keywords: CFRP Wear mechanism VB Drilling force

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.19.092

碳纤维增强复合材料(CFRP)的高比强度、高比模量等优点使其可以在航天航空业大幅度减轻机体结构质量、改善气动弹性,提高飞机的综合性能,因此,先进复合材料在航天航空业上的应用不断得到扩大^[1]。碳纤维的高硬度、高强度及导热性差等特点使其成为典型的难加工材料。CFRP钻孔过程中,刀具磨损严重。刀具磨损会造成钻孔质量下降,孔口处出现撕裂、起毛、分层等加工缺陷,孔壁表面粗糙度高;同时,磨损过快将导致刀具报废,影响加工效率、提高经济成本,使批量加工CFRP成为难题。

目前,国内外学者对CFRP的钻孔加工过程中刀具的磨损进行研究,从而得出结论:大连理工大学的高航、刘国兴等^[2]采用电镀金刚石组合刀具钻削CFRP,得出

金刚石磨粒磨损可分为3个阶段,磨损形态与轴向力相关;南京航空航天大学贺虎^[3]使用金刚石套料钻削CFRP,通过对比轴向力和磨损值得出,套料钻更适合钻削CFRP;武汉设计研究院的张毅等^[4]采用超声波振动铣削CFRP研究刀具磨损,得出超声振动条件下,刀具磨损较弱,刀具的使用寿命高,相对于传统切削更适合复合材料的加工;法国的Iliescu和西班牙的D.Gehi、M.E.Gutierrez等^[5]使用金刚石涂层硬质合金钻头和未涂层的硬质合金钻头钻削CFRP,建立了进给速度、切削速度、刀具磨损值和轴向力之间的数学模型。

钻削加工中,切削刃的锋利性随着切削力、高温和滑动磨损的改变而改变,刀具磨损依赖于刀具类型、加工材料、切削条件和润滑剂的选择。随着加工时间的延长,刀具的切削刃越来越钝,工件的加工质量也严重下降。许多学者证实了切削力是反应加工状况的高度敏感的信息载体,所以测量切削力是间接测量刀具磨损的一种有效方法,切削力的变化能精确可靠地评价刀具磨损和失效^[6-9]。目前,国内外普遍使用PCD刀具作为加工CFRP的主流刀具,但是PCD刀具的价格较高,韧性较低,在加工超硬材料时容易产生崩刃。本文通过PCD刀具及硬质合金刀具钻孔CFRP时刀具磨损、加工质量的对比说明刀具性能。

1 钻削试验

1.1 试验材料和试验设备

机床采用某立式加工中心,轴向力测定系统包括压电式传感器YDX-III9702,电荷放大器YE5850、A/D转换器和计算机组成;后刀面磨损的研究设备包括体视显微镜、图像标尺软件Image Measure及JEOLJSM-6380LV型扫描电镜。

试验材料为环氧树脂基碳纤维增强复合材料,以平纹交织形式铺层,碳纤维体积分数为60%,厚度为10mm,其具体性能如表1。

表1 碳纤维增强复合材料性能

拉伸强度 /MPa	4300
拉伸模量 /GPa	145
密度 /(g·cm ⁻³)	1.44

1.2 试验刀具及方法

试验选用 2 种钻头($\phi 12\text{mm}$ 整体硬质合金麻花钻、 $\phi 12\text{mm}$ PCD 麻花钻)进行单因素试验来比较钻削时间、钻削轴向力及后刀面磨损值 VB 的关系。试验参数: 主轴转速 $2000\text{r}/\text{min}$ 、进给速度 $40\text{mm}/\text{min}$ 。每 3 个孔测量一次轴向力及 VB 值。

2 试验数据及分析

硬质合金钻头 YG6X 试验结果如表 2 所示。由于 PCD 钻头的耐磨性远高于 YG6X, 在钻削开始阶段, VB 值过小不宜测量, 故从第 17 个孔开始测量其后刀面磨损值 VB 和轴向力, 并适当放宽测量孔数间隔, 试验结果如表 3 所示。

表2 YG6X钻头的磨损值及轴向力

孔数 / 个	轴向力 / N	VB/mm
3	137.18	0.063
6	157.17	0.086
9	171.26	0.105
12	177.89	0.127
15	185.59	0.141
18	190.53	0.159
21	191.01	0.166

表3 PCD钻头的磨损值 VB 与轴向力

孔数 / 个	轴向力 / N	VB/mm
17	108.05	0.036
23	114.81	0.053
29	125.2	0.064
38	127.8	0.068
50	128.1	0.072

从表 2~3 可以看出, 后刀面的磨损值 VB 与轴向力均随钻孔数量的增加而增大。随即给出硬质合金 YG6X 与 PCD 钻头加工孔数、后刀面磨损值 VB 及轴向力之间的关系对比图如图 1~3 所示。

从图 1、2 中可以看出, 随着加工孔数的增加, 后刀面的磨损值 VB 与轴向力均持续上升。图 3 说明轴向力随着 VB 值的增大而增加。工业中, 刀具的磨钝标准为 $0.6^{[10]}$ 。但从图 2、3 中可以发现, 加工第 9 个到第 12 个孔之间, 轴向力的变化趋势趋于平缓, 达到了正常磨损阶段, 切削的接触面积增大, 单位面积上受到的压力逐渐减小, 后刀面的表面已经磨平, 因此磨损速度相对变慢, 切削过程比较稳定, 是刀具的有效工作阶段; 而加

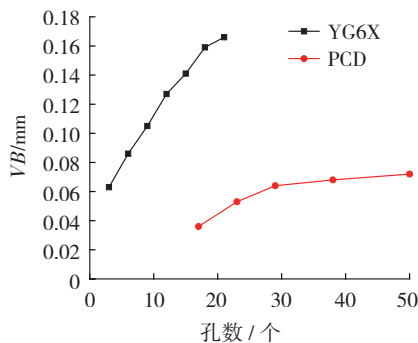


图1 加工孔数对 VB 值的影响

Fig.1 Influence of hole number on VB value

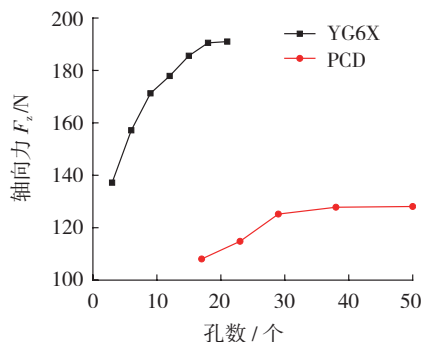


图2 加工孔数对轴向力的影响

Fig.2 Influence of hole number on F_z

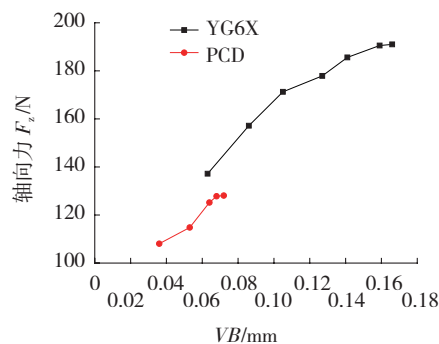


图3 VB 值对轴向力的影响

Fig.3 Influence of VB value on F_z

工第 12 个孔时, 即当后刀面的磨损值 VB 达到 0.12 时, 达到刀具的急剧磨损阶段, 轴向力的斜率变大, 使轴向力的增大趋势更加明显, 轴向力达到 177N, 因此工业中加工 CFRP 材料时, 对刀具的耐磨性要求更高。轴向力斜率突变是由于在切削加工过程中, 持续产生的切削热和切削摩擦力使刀具持续磨损。随着刀具的不断磨损, 切削热和切削摩擦力也随着增大, 产生恶性循环。当磨损值达到一定数值时, 即切削热和切削摩擦力也达到一定临界点, 轴向力突然增大。

使用体式显微镜和扫描电镜拍摄钻头表面磨损形式我们可以发现, 在切削刃的后刀面发生了严重的磨粒磨损, CFRP 中的碳纤维硬度很高, 在切削过程中硬质

点不停磨损刀具后刀面,对刀具后刀面的研磨作用,在后刀面沿切削速度方向划出沟痕,形成磨粒磨损。磨粒磨损最严重处为后刀面主切削刃的外缘处。相同时间内,切削刃外缘的切削行程最长,所受到的冲击力、摩擦力及摩擦热也最为严重,切削条件最为恶劣。CFRP中的碳纤维作为硬质点并不是均匀分布在材料之中,切削过程相当于断续切削,刀刃处承受持续的交变载荷,由于硬质合金本身的抗弯强度和韧性较差,所以在承受交变应力的过程中,容易产生崩刃。

切削刃后刀面的粘附磨损,类似于切削金属时的积屑瘤。在切削 CFRP 的过程中,刀具和 CFRP 的导热性差,热量无法及时散出,加工温度持续升高,使 CFRP 中的树脂软化,切削过程中的持续接触应力,使刀具和材料产生分子级别间的接触,在接触点形成强力的粘着,且粘着物不会随着持续切削脱落,严重影响后刀面的切削能力。

通过对试验数据的分析,可以得出,PCD 钻头钻削 CFRP 材料时,仍然符合随着钻孔数量即加工时间的增加,后刀面的磨损值及轴向力随之增大的规律。同时也可以看出,随着加工孔数的增多,轴向力和 VB 值的变化并不明显,可以推断,PCD 刀具加工 CFRP 的效果远好于硬质合金。

使用体式显微镜和扫描电镜拍摄钻头表面磨损形式观察 PCD 刀具的照片发现,PCD 钻头主要的磨损形式为磨粒磨损和切屑粘附。PCD 刀片在切削过程中持续承受交变载荷和热作用,致使 PCD 刀片产生机械疲劳和热疲劳,导致 PCD 表层材料的粘结晶粒之间产生微裂纹,进而使金刚石颗粒之间的连接状态恶化,晶界强度降低,刀具抗磨能力下降。随着切削时间的增加,金刚石颗粒周围的粘结剂被刮除,使 PCD 颗粒脱落,造成磨粒磨损。PCD 钻头是将 PCD 刀片钎焊在高速钢基体上,而 PCD 刀片的导热性强于高速钢基体,因此 PCD 刀片附近的高速钢基体的热量比较集中,软化的树脂粘附在高速钢基体上。

3 结论

(1)从数据上分析,随着钻头钻孔数量的增加,硬质合金钻头 YG6X 和 PCD 钻头,钻孔轴向力及刀具后刀面磨损值 VB 均增大。PCD 钻头的上升趋势较 YG6X 缓慢,由此说明 PCD 钻头更适于加工 CFRP。

(2)YG6X 在钻削过程中会产生磨粒磨损、粘着磨损及崩刃,这主要是刀具导热性差,较脆且强度不够造成的;PCD 刀具出现磨粒磨损和粘着磨损的形式,但是磨粒磨损程度较慢,且粘着物主要集中在高速钢基体上,对切削性能影响不大,故 PCD 钻头更适合加工

CFRP。

(3)试验中的数据和图片显示,PCD 钻头在钻削 CFRP 材料时表现出良好的切削性能,刀具磨损缓慢,磨损形式简单。

参考文献

- [1] 上官倩英,蔡柳华. 碳纤维及其复合材料的发展及应用. 上海师范大学学报,2008,37(3):275-278.
- [2] 高航,刘国兴,张选龙,等. 电镀金刚石刀具钻削碳纤维复合材料磨粒磨损特征研究. 大连理工大学学报,2011,51(5):675-680.
- [3] 贺虎,碳纤维复合材料钻削力与质量研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
- [4] 张毅. 超声振动铣削碳纤维复合材料刀具磨损研究. 精密制造与自动化,2010(2):13-15.
- [5] Ilescu D, Gehin D, Gutierrez M E, et al. Modeling and tool wear in drilling of CFR. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010,50:204-213.
- [6] Kim H Y, Ahn J H, Kim S H, et al. Real-time drill wear estimation based on spindle motor power. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 124(3):267-73.
- [7] Oh Y T, Kwon W T, Chu C N. Drilling torque control using spindle motor current and its effect on tool wear. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 24(5-6):327-34.
- [8] Ertunc H M, Oysu C. Drill wear monitoring using cutting force signals. Mechatronics, 2004, 14(5):533-48.
- [9] Abu-Mahfouz I. Drill flank wear estimation using supervised vector quantization neural networks. Neural Computing and Applications, 2005, 14(3):167-75.
- [10] 王瑞新. PCD 刀具钻削碳纤维复合材料研究. 工具技术, 2012, 46(5):72-74.

(责编 玲犀)

(上接第 91 页)

序,将与产品有关的所有信息予以固化和批准,并将供应商列入供应商名录。在资格认定之后,产品任何的变更都要告知主 OEM,并由其评估是否需要重新审查,以及重新审查的内容,并根据审查的结果决定是否将新产品继续保留在可选的名录之中。

参考文献

- [1] 赵渠森. 先进复合材料手册. 北京:机械工业出版社,2003.
- [2] Harris A F, Beevers A. The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion. Int J Adhes Adhes, 1999, 19(6): 445-452.
- [3] Kanerva M, Saarela O. The peel ply surface treatment for adhesive bonding of composites: a review. Int J Adhes Adhes, 2013, 43:60-69.
- [4] Flinn B, Phariss M. The Effect of Peel-Ply Surface Preparation Variables on Bond Quality. US. FAA, 2006.
- [5] Benard Q, Foris M, Grisel M. Peel Ply surface treatment for composite assemblies: chemistry and morphology effects. Composites, Part A, 2005, 11(36): 1562-1568.

(责编 玲犀)