

碳纤维复合材料孔加工质量试验研究

王 震 刘汉良 李 亮 戚宝运

(北京卫星制造厂,北京 100094)

文 摘 碳纤维复合材料零件上存在大量的装配工艺孔,采用传统孔加工方式过程中容易导致分层、纤维撕裂等缺陷.本文通过钻削和螺旋铣削方式加工碳纤维复合材料(CFRP),对比两种孔加工方法的加工质量,分析了缺陷存在的原因,发现在碳纤维复合材料上采用螺旋铣削制孔方式是可行的,对碳纤维复合材料孔加工工艺具有一定的参考价值。

关键词 碳纤维复合材料,钻孔,螺旋铣削

Experimental Research on The Quality of The Hole-Making in Carbon Fiber Reinforced Plastic

Wang Zhen Liu Hanliang Li Liang Qi Baoyun

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

Abstract There are many holes used for assembly in carbon fiber reinforced plastic (CFRP) parts, traditional hole-making method is subject to various damages such as delamination and fiber pullout. In this paper, drilling and helical milling CFRP are carried out, according to comparison of the machining quality of two hole-making method, the reason of the machining defect is analyzed. It was found that helical milling is a feasible method in hole-making, which has a broad applied value in the CFRP hole-making technology.

Key words CFRP, Drilling, Helical milling

0 引言

碳纤维复合材料(CFRP)具有比强度和比模量高、抗疲劳性能好、耐热性能优良等优点,目前在航空、航天、汽车、体育娱乐等领域得到了广泛的应用^[1-3]。而CFRP的零件与其他零部件装配连接时,不可避免地要进行机械加工,特别是以孔加工为主。但是CFRP属于难切削加工材料,加工过程中刀具磨损快、刀具耐用度低,另外CFRP各向异性,层间强度低,切削时在切削力作用下容易产生分层、撕裂等加工缺陷,钻孔时尤为严重,加工质量难以保证^[4-5]。因此,研究CFRP的高质量孔加工技术具有非常重要的意义。

本文在一定试验条件下,开展CFRP的孔加工试验,对比钻孔和螺旋孔加工质量,分析孔加工缺陷存在的原因,对孔加工质量进行评价,分析孔加工方式的可行性。

1 试验

1.1 试验设备

(1)机床:瑞士Mikron UCP 710五坐标高速加工中心。

(2)刀具: $\Phi 6$ mm的PCD涂层钻头;外径为 $\Phi 6$ mm的PCD铣刀。

(3)显微镜:KH-7700三维视频显微镜。

(4)测力仪:Kistler 9265B动态测力仪。

1.2 试验条件

分别采用传统钻削和螺旋铣削两种孔加工方式对CFRP进行孔加工。在保持进给量 0.1 mm/r 不变的前提下,分别在 75 、 100 、 125 、 150 m/min 速率下进行钻孔试验,铣孔试验在速率 200 m/min 、进给量 0.1 mm/r 下进行。

2 孔加工质量的对比分析

切削过程中由于CFRP纤维的硬度高,刀具磨损

很快。当粘合在较软而且黏性大的树脂中时,就可能出现纤维剥离、弹性错配以及层间破裂的趋势。这样很容易损坏孔入口、出口和孔壁,使其不符合质量要求。

CFRP 孔加工的缺陷主要有分层、毛刺和撕裂。分层是钻孔成形中的主要缺陷之一,影响材料的力学性能,降低材料的可靠性,分层的严重与否直接关系到零件是否合格,直接影响孔加工方式的可行性。毛刺是由于碳纤维没有沿圆周方向被切断而形成的,主要发生在孔的最外层表面。撕裂是由于材料未进入切削区而先行被破坏造成的,一般沿着碳纤维方向发生,部分撕裂处残留大量的毛边,严重影响孔的质量。

螺旋铣孔工艺的显著特点是切削运动由两种进给运动复合而成,分别是刀具主轴的向下进给运动和刀具周向进给运动,这两种运动存在着一定的几何关系。刀具中心与孔径中心并不重合,而是沿一定的轨迹运动。

2.1 孔入口质量对比分析

图 1 为钻削加工得到孔入口表面形貌(钻削速率:125 m/min)。该试验条件下钻得的孔入口表面不同程度的存有毛刺,并且断口不整齐,圆周处材料缺损现象比较普遍,局部有碳纤维撕裂现象,撕裂严重的地方可以看到明显的分层现象,孔壁表面质量较差。

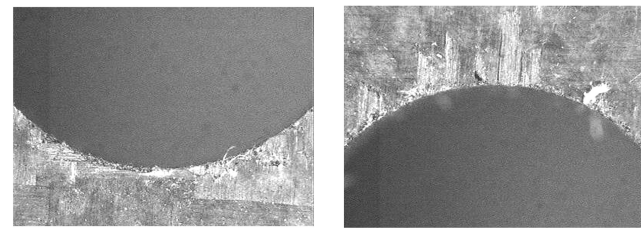


图 1 钻孔入口 50×

Fig. 1 Drilling entrance

图 2 为螺旋铣削加工得到的孔入口表面形貌。对比钻削得到的孔,经过铣削得到的孔入口处毛刺较少,并且不明显,缺陷主要表现为局部有材料缺损和轻微的纤维撕裂现象。材料缺损现象无规律分布在入口圆周上,部分位置严重,部分位置基本没有缺损,非常平整。在材料缺损严重的位置多伴有撕裂的现象,撕裂较严重的部位可以观察到轻微的分层缺陷。

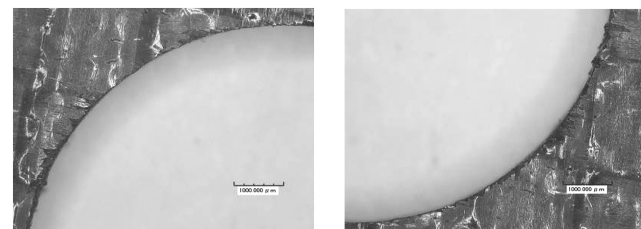


图 2 铣孔入口 50×

Fig. 2 Milling entrance

2.2 孔出口质量对比分析

图 3 为钻削加工得到孔出口表面形貌,与入口处不同,出口处缺陷主要为分层。孔出口表面由于材料分层导致材料层间结合力降低,因此在结合力薄弱的地方,材料大面积被撕裂。入口表面毛刺细小,撕裂现象只在局部发生,而出口表面多为撕裂后残留的毛边,不仅影响孔的粗糙度,而且严重影响孔的尺寸精度。

分析认为,影响钻孔出口处质量的主要原因是:常规钻头钻尖突出在刀体外,钻头在钻出材料的过程中,待切削材料层未进入切削区而被先行破坏。由于 CFRP 力学性质具有各向异性,这种破坏必然表现为沿强度联系最弱的纤维间粘结层破坏,即产生分层、撕裂现象,撕裂之后在孔圆周处残留大量的毛边。

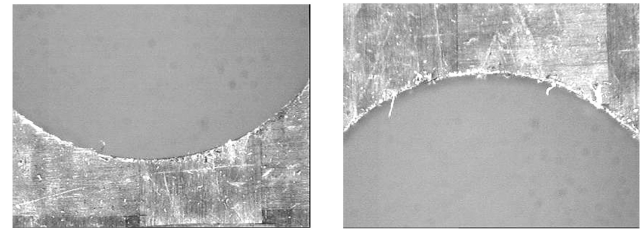


图 3 钻孔出口 50×

Fig. 3 Drilling export

图 4 为螺旋铣削加工得到的孔出口表面形貌。铣孔的出口表面加工质量得到很大的改善,铣削所得到的孔出口处缺陷主要表现为毛刺与材料缺损,毛刺比入口处较多,但未出现钻孔出口的较大的毛边,材料的缺损现象比入口处轻微一些,没有明显的撕裂现象发生。并且材料缺损区域的分布有一定的区域性,在某些角度范围内比较集中,其他角度范围内出口边缘则比较整齐,没有材料缺损与撕裂现象,更没有分层,加工效果较为理想。

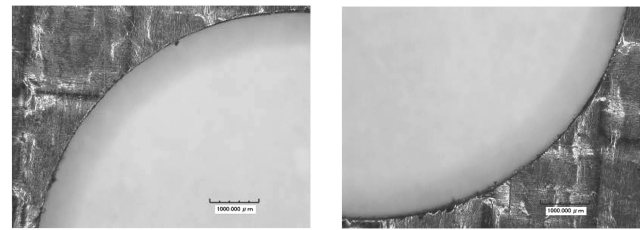


图 4 铣孔出口 50×

Fig. 4 Milling export

2.3 铣孔内壁表面微观形态

图 5 为采用螺旋铣削得到的孔壁表面,其由碳纤维断口和树脂涂附表面两部分组成。可以观察到内壁表面比较亮,可以判断出在加工过程中,树脂的涂附现象比较严重。铣削得到的孔内壁裸露的断裂纤维比较少,缺陷主要体现为微裂纹。分析认为微裂纹产生的原因是:复合材料内部本身就存在一定原始裂纹,加工后裂纹正好露在孔壁表面,或者加工过程中

轴向力使微裂纹扩大;在轴向力的作用下,粘结碳纤维的树脂基体开裂,形成局部分层,在孔壁表面表现为微裂纹。微裂纹的分布也有一定的区域性,在圆周方向上的某些角度范围内,可以观察到微裂纹在孔深度方向平行分布。其他角度范围内则比较光滑,没有明显缺陷。总体来说,铣削加工得到的孔内壁粗糙度较好,缺陷分布较少,加工质量比较好。

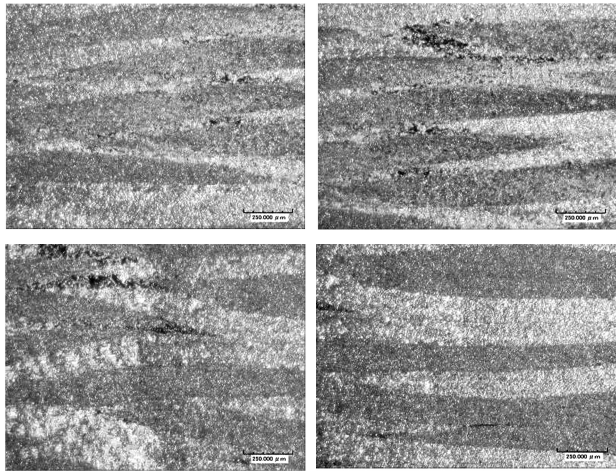


图5 铣削孔内壁表面 200×

Fig. 5 The inner surface of the hole made by milling

3 碳纤维分层缺陷存在的原因分析

引起 CFRP 孔加工分层的主要原因有两个:一个是轴向力,另一个是切削过程中产生的热。CFRP 孔加工分层往往是这两种原因综合作用造成的,其中轴向力的作用是主要的。当轴向力作用在 CFRP 板表面时,纤维层之间产生的内应力若达到或超过纤维层之间树脂的结合强度,则纤维层将由于树脂的断裂而产生分层。

从孔加工过程中碳纤维受力情况分析,钻削加工时刀具中心的轨迹为一条直线,切削速率为 0,对材料只是轴向的挤压作用力,这就容易引起碳纤维材料的分层。而在 CFRP 螺旋铣削加工过程中,刀具中心的轨迹为一条螺旋线。刀具中心不再与工件中心重合,而是沿着螺旋线不断变化,那么工件中心处材料就会被刀具切断而不是在挤压作用下破裂,从而大大降低轴向力的作用^[6-7]。

由试验可知,钻削加工时分层现象最严重的部位在出口处,铣削加工时出口处没有分层现象,而在入口处有轻微的分层现象。出口处分层主要是由轴向力引起的,而入口处的分层主要是由剪切应力造成的。图 6 为试验中测得的最大轴向力,可以看出铣削加工时的轴向力要比钻削加工时的小得多。因此,在铣削加工孔时,可以避免材料未进入切削区而先行被破坏,从而能有效的避免材料分层、撕裂等缺陷的出现。

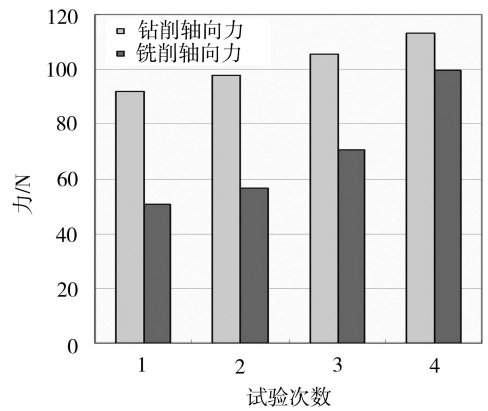


图6 钻削与铣削轴向力大小比较图

Fig. 6 Chart of the axial force about the comparison between drilling and milling

4 结论

(1) 钻孔入口缺陷主要为毛刺,出口缺陷主要为分层;螺旋铣孔入口缺陷主要为分层,出口缺陷主要为毛刺。

(2) 螺旋铣削加工与钻削加工相比,孔表面毛刺少,撕裂现象较少,而且由于轴向力比较小,分层现象表现为轻微裂纹,因此孔加工质量比较高。

(3) 钻头只能加工孔径与刀具外径相同的孔,而铣刀则能铣削出不同孔径的孔。从而减少刀具库存量和种类,降低加工成本。

可见,采用螺旋铣削方式对 CFRP 孔加工是可行的,而且要比常规钻孔质量要高。

参考文献

- [1] 张厚江. 碳纤维复合材料(CFRP)钻削加工技术的研究[D]. 北京:北京航空航天大学,1998
- [2] 鲍永杰. 碳纤维增强复合材料钻削的若干研究[D]. 大连:大连理工大学,2006
- [3] 李凤全. 碳纤维复合材料制孔缺陷及对策的试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2008
- [4] 郭丽. 高性能轻质装甲材料加工技术的研究[D]. 南京:南京理工大学,2006
- [5] 张万军. 碳纤维复合材料的孔加工[J]. 纤维复合材料,2005,22(3):49-52
- [6] Denkena B, Boehnke D, Dege J H. Helical milling of CFRP-titanium layer compounds[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology,2008(1):64-69
- [7] Karnik S R, Gaitonde V N, Campos Rubio J, et al. Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model[J]. Materials and Design,2008,29:1768-1776

(编辑 李洪泉)