

纤维方向对 CFRP 钻削温度场分布和孔壁质量的影响

陈文成¹ 王宏晓² 段玉岗² 孔维森¹ 刘 晓¹

(1 上海航天设备制造总厂有限公司,上海 200245)

(2 西安交通大学机械工程学院,西安 710049)

文 摘 为研究 CFRP 不同纤维方向对其钻孔温度场分布和孔壁质量的影响,对不同纤维方向角处切削形式进行理论分析和 ABAQUS 仿真分析,并结合 CFRP 单向板、正交板和准各向同性板的钻削温度分布测试试验与钻削温度场仿真分析。结果表明,碳纤维方向对钻削温度场的分布规律影响很大;通过电子显微镜和共聚焦显微镜对不同纤维方向角处孔壁质量观测对比,发现纤维方向角在 $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 处孔壁质量较好,在 $\theta=135^\circ$ 处孔壁质量较差。

关键词 CFRP, ABAQUS, 碳纤维方向, 钻削温度场, 孔壁质量

中图分类号: TH145.9

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2019.06.012

Effect of Fiber Orientation on Distribution of Drilling Temperature Field and Hole-Wall Quality of CFRP

CHEN Wencheng¹ WANG Hongxiao² DUAN Yugang² KONG Weisen¹ LIU Xiao¹

(1 Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer Co.Ltd., Shanghai 200245)

(2 School of Mechanical Engineering Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract In order to study the influence of fiber orientation on temperature field distribution and hole-wall quality of CFRP, theoretical analysis and ABAQUS simulation analysis of cutting forms at different fiber orientation angles are studied. Through the drilling temperature distribution test and simulation analysis of drilling temperature field for CFRP unidirectional plate, orthogonal plate and quasi-isotropic plate, it was found that, the direction of carbon fiber has a great influence on the distribution of drilling temperature field. By comparing the quality of the pore wall at different fiber orientation angles observed by electron microscopy and confocal microscopy, it was found that the quality of the pore wall at 0 degree, 45 degree and 90 degree was better than the quality of the pore wall at 135 degree.

Key words CFRP, ABAQUS, Carbon fiber direction, Drilling temperature field, Hole-wall quality

0 引言

碳纤维复合材料(CFRP)呈现各向异性^[1],这对加工产生很大的影响,需要对纤维方向和钻孔质量之间的关系作细致研究。

KOPELV^[2]等人基于快速落刀的方法进行实验研究,认为碳纤维复合材料的切屑形成过程是由于材料的断裂,并且最先得出切削表面质量与纤维的铺设方向有关这一观点。D.H.WANG^[3]等人利用直角自由切削的方法对不同铺层方向复合材料的切削机理

进行了试验研究,研究了不同纤维方向角对加工表面粗糙度的影响,同时得出纤维方向角为一定范围时,复合材料切削加工过程中所受剪切力的经验公式。LLIESCU^[4]建立 CFRP 正交切削离散元分析模型,并分析不同纤维角度对切削力大小的影响。马付建^[5]等人针对碳纤维复合材料正交切削加工建立有限元分析模型,研究纤维角度对碳纤维复合材料切削加工表面形貌、切屑形貌和进给切削力的影响规律。大连理工大学的贾振元等人通过建立的单纤维切削模型

收稿日期:2019-06-24

基金项目:国家科技重大专项"高档数控机床与基础制造装备专项"(2018ZX04011001)

第一作者简介:陈文成,1991 年出生,工程师,主要从事复合材料二次加工研究工作。E-mail:sdaucwc@163.com

对碳纤维增强树脂基复合材料切削机理进行研究,发现纤维方向角与纤维变形深度的关系^[6]。温泉等人对 CFRP 制孔毛刺与撕裂缺陷形成机制研究发现,当划切方向与纤维方向垂直时,划切力最大,制孔加工时,纤维方向与刀具旋转方向成钝角的区域容易产生毛刺缺陷^[7]。

本文针对 CFRP,研究不同纤维方向对其钻孔温度场分布和孔壁质量的影响,对不同纤维方向角处切削形式进行理论分析和 ABAQUS 仿真分析,进行钻削温度分布测试试验与钻削温度场仿真分析,通过电子显微镜和共聚焦显微镜对不同纤维方向角处孔壁质量观测对比。

1 纤维方向与钻削温度场分布

在材料加工过程中,切削温度反映出了在加工过程中刀具与材料的相互作用。钻削过程中,刀具刃口对碳纤维的作用力会随着不同的切削角度而不同。影响复合材料切削区域温度的因素有切削热源和切削热传导^[8]。

1.1 理论分析

1.1.1 纤维方向与切削热源

在钻削过程中,纤维方向角在孔的不同位置呈现 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的范围不断变化,且具有周期性。同时,不同铺层方向的层合板,孔周边每个位置还有不同的纤维方向角组合模式,而不同的纤维方向角处可以形成刀具与碳纤维截然不同的切削加工形式^[9],如图 1 所示:

图 1(a) $\theta = 0^\circ$ 或 $\theta = 180^\circ$,切削速度方向与碳纤维方向一致,呈平行切削形式;

图 1(b) $0^\circ < \theta < 90^\circ$,切削速度方向与碳纤维方向夹角锐角,呈顺纤维切削形式;

图 1(c) $\theta = 90^\circ$,切削速度方向与碳纤维方向垂直,呈垂直切削形式;

图 1(d) $90^\circ < \theta < 180^\circ$,切削速度方向与碳纤维方向夹角钝角,呈逆纤维切削形式。

CFRP 单向板呈现各向异性,在钻孔过程中,纤维方向角不断变化(图 2)。纤维方向角 $\theta = 0^\circ$ 的 a 处,切削过程主要依靠刀具切削刃在纤维和树脂间界面所形成的挤压作用,所需的切削力比较小。纤维方向角 $\theta = 135^\circ$ 的 b 处,切削过程主要依靠刀具对前端材料的推挤作用。纤维方向角 $\theta = 90^\circ$ 的 c 处,切削过程主要依靠刀具对纤维和树脂的垂直剪切应力,所需切削力大。纤维方向角 $\theta = 45^\circ$ 的 d 处,切削过程主要依靠刀具对纤维和树脂剪切应力的分力^[10]。

在切削加工过程中,可以认为所消耗的机械能即切削力所做的功可以全部转换为切削热能^[11],所以综合 CFRP 不同纤维方向角处的切削形式,单位时间

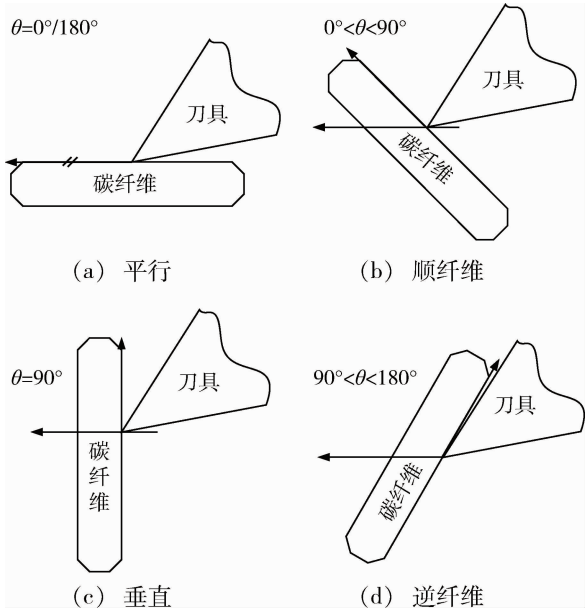


图 1 不同纤维方向角处的切削形式

Fig.1 Cutting form at different fiber orientation angles

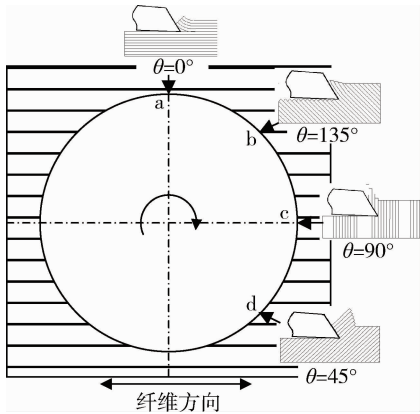


图 2 不同钻削位置处的切削形式

Fig.2 Cutting form at different drilling position

内由切削力产生的切削热可以认为是^[12]:

$$P_c = F_c \cdot v_c \tag{1}$$

由公式(1)得出,在切削速度 v_c 相同的条件下,产生的切削热 P_c 与切削力 F_c 正相关,即不同纤维方向角度的不同切削形式导致产生不同的切削力,进而影响切削热量。理论分析可得到纤维方向角 $\theta = 90^\circ$ 处的切削热最多, $\theta = 0^\circ$ 处切削热最少。

1.1.2 纤维方向与切削热传导

碳纤维复合材料的导热途径主要包括:固相导热和气相导热^[13]。固相导热主要是热量通过碳纤维增强材料和树脂基体进行传递,碳纤维的热导率在 10^1 数量级上,而树脂的热导率只为 10^{-1} 数量级左右。因此,碳纤维相比于树脂对钻削热的传导影响更大。由于 CFRP 层合板制作过程中的气孔比较少且比较小,所以气相导热可以忽略不计。

由于 CFRP 的导热性能与碳纤维有很大的关联,那么纤维方向角的不同也一定会影响复合材料的导热性能。对于单向板,其任意方向的面内导热率有以下规律^[14]:

$$K_{c,\gamma} = K_{c,t} \sin^2 \gamma + K_{c,p} \cos^2 \gamma \tag{2}$$

式中, γ 为热流方向与纤维方向的夹角; $K_{c,p}$ 和 $K_{c,t}$ 分别为 CFRP 平行纤维方向和垂直纤维方向的热导率, $K_{c,p} > K_{c,t}$ 。

通过公式(2)带入不同的角度,可以得到不同位置处的热导率:

- 当 $\gamma = 0^\circ$ 时,即 c 处, $K_{c,\gamma} > K_{c,p}$, 热导率最大;
- 当 $\gamma = 90^\circ$ 时,即 a 处, $K_{c,\gamma} < K_{c,t}$, 热导率最小;
- 当 $\gamma = 45^\circ$ 时,即 b、d 处, $K_{c,\gamma} = (K_{c,t} + K_{c,p})/2$, 热导率处中间值。

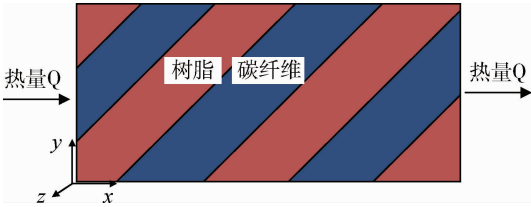


图 3 热流方向与纤维方向

Fig.3 Heat flow direction and fiber direction

综上所述,沿碳纤维方向的切削热传导量最大,

对于单层 CFRP 来说,在纤维方向 $\theta=90^\circ$ 处导热率最高, $\theta=0^\circ$ 处导热率最低, $\theta=45^\circ$ 和 $\theta=135^\circ$ 处导热率介于两者之间。

1.2 仿真分析

本文通过建立 CFRP 层合板钻削传热的二维 shell 有限元仿真分析模型,分析了钻削温度场分布与热传导过程;利用 Composite Layups 模块创建复合材料层结构,每层根据要求设置不同的纤维方向,分别铺设单向板、正交板和准各向同性板。层与层之间建立零厚度的 cohesive 单元。层合板基本仿真参数如表 1 所示。

表 1 复合材料层合板基本仿真参数

Tab.1 Basic simulation parameters of composite laminates

层数	每层厚度/mm	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	热导率/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$			网格单元类型
			x 方向	y 方向	z 方向	
32	0.125	1760	6.072	0.821	0.821	DS4

CFRP 单向板、正交板和准各向同性板的钻削温度场分布及热传导仿真结果如图 4 所示。对于单向板, $\theta=90^\circ$ 处,钻削热量多,导热效果好; $\theta=0^\circ$ 处,钻削热少,导热效果差;正交板切削热集中在纤维方向角 $\theta=45^\circ$ 和 $\theta=135^\circ$ 处,此处的导热效果也较好。准各向同性板在任意位置的钻削热量与热传递效果均一致。

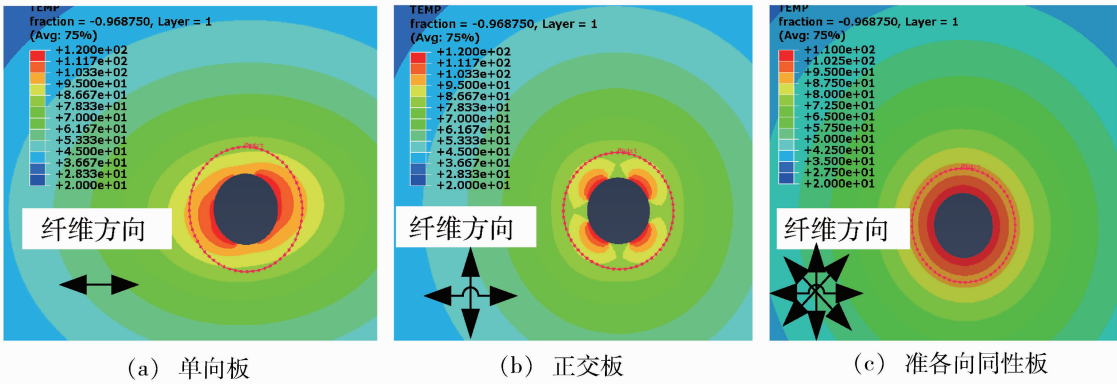


图 4 不同铺层方向层合板温度场分布与热传导仿真结果

Fig.4 Temperature field distribution and heat conduction simulation of laminates with different layer directions

1.3 试验验证

1.3.1 试验方案

本文在机床主轴转速为 2 000 r/min,进给速度为 30 mm/min 的情况下,进行了不同纤维方向角处钻削测温试验。材料为 CFRP 单向板、正交板以及准各向同性板,型号为 T800/AG-80,具体参数见表 2。如图 5 所示,机床采用 DMC635V,刀具采用直径 8 mm 的硬质合金麻花钻头,温度测试设备选用美国 8 通道 OMEGA 热电偶温度测试系统。如图 6 所示,1、宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2019 年 第 6 期

3、5 和 7 四根热电偶预埋在孔壁附近 1 mm 处,2、4、6、8 热电偶预埋在距孔壁 3 mm 处。

表 2 CFRP 层合板参数

Tab.2 Parameters of CFRP laminates

CFRP 层合板	铺层	纤维体积分数/%	厚度/mm
单向板	$[0^\circ]_{16s}$	67	4
正交板	$[0^\circ/90^\circ]_8s$	67	4
准各向同性板	$[0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ]_{4s}$	67	4



图 5 加工平台与温度测量系统

Fig.5 Machining platform and temperature measurement system

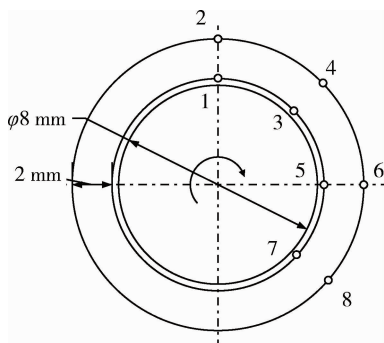


图 6 预埋热电偶位置

Fig.6 Position of pre-embedded thermocouples

1.3.2 结论与讨论

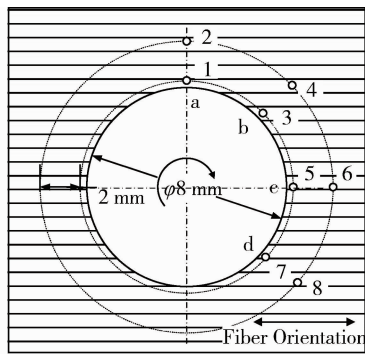
1.3.2.1 单向板

本文中 CFRP 单向板试验的温度曲线如图 7 所示。5 通道测得纤维方向角 $\theta=90^\circ$ 的 c 处温度最高，7 通道测得纤维方向角 $\theta=45^\circ$ 的 d 处温度次之，其次是 3 通道测得纤维方向角 $\theta=135^\circ$ 的 b 处，1 通道测得纤维方向角 $\theta=0^\circ$ 的 a 处，钻削温度最低。

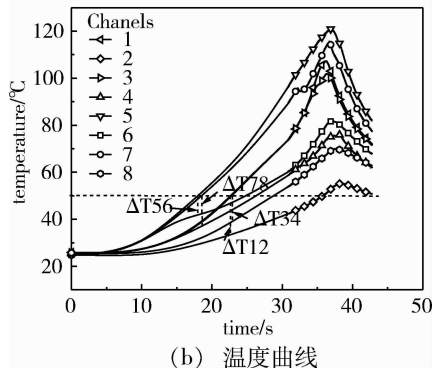
为分析不同纤维方向角处的热传导特性，分别对 1、3、5 和 7 四个通道处钻削温度达到同一温度值 (50°C) 时，2、4、6 和 8 通道的温度进行研究。如图 7 (b) 所示，分别记 1 和 2 通道、3 和 4 通道、5 和 6 通道、7 和 8 通道的温差为 ΔT_{12} 、 ΔT_{34} 、 ΔT_{56} 和 ΔT_{78} 。研究发现： $\Delta T_{12} > \Delta T_{34} = \Delta T_{78} > \Delta T_{56}$ ，即纤维方向角 $\theta=0^\circ$ 处导热性能最弱，纤维方向角 $\theta=90^\circ$ 处导热性能最强，纤维方向角在 $\theta=45^\circ$ 和 $\theta=135^\circ$ 处导热性能介于两者之间。

1.3.2.2 正交板

CFRP 正交板试验，温度曲线如图 8 所示，纤维方向角 $\theta=135^\circ$ 和 45° 的 b、d 处钻削温度高于纤维方向角 $\theta=0^\circ$ 和 90° 的 a、c 处钻削温度。



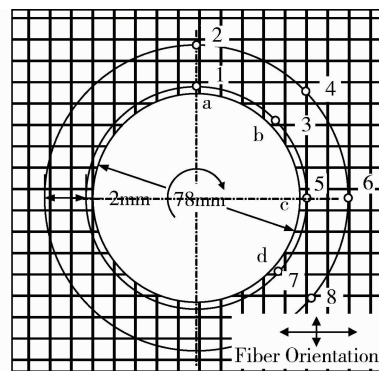
(a) 预埋热电偶的位置



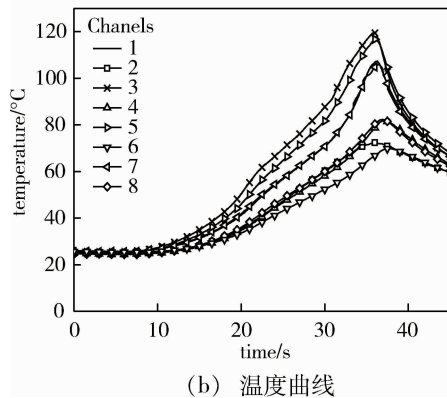
(b) 温度曲线

图 7 CFRP 单向板试验结果

Fig.7 Test results of CFRP unidirectional plate



(a) 预埋热电偶的位置



(b) 温度曲线

图 8 CFRP 正交板试验结果

Fig.8 Test results of CFRP orthogonal plate

1.3.2.3 准各向同性板

CFRP 准各向同性板试验，温度曲线见图 9，得到 a、b、c、d 四处位置的钻削温度基本相同，各方向的热航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2019 年 第 6 期

传导性能一致。

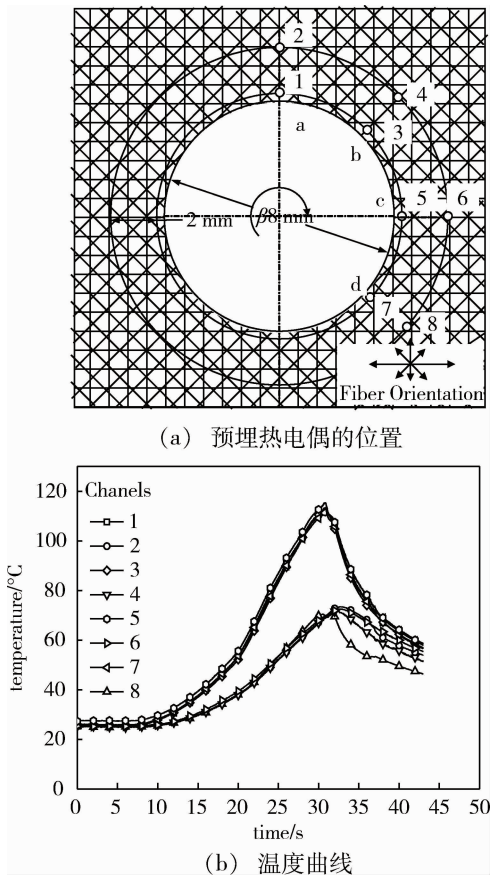


图9 CFRP 准各向同性板试验结果

Fig.9 Test results of CFRP quasi-isotropic plate

2 纤维方向与孔壁质量

2.1 CFRP 切削有限元仿真

2.1.1 切削模型的建立

利用 ABAQUS 有限元仿真软件,基于 Hashin 失效准则,建立 CFRP 单层板二维切削有限元仿真分析模型,分别设置 0°、45°、90°和 135°纤维方向,模拟分析不同纤维方向角处的切削应力场分布与损伤扩展。图 10 为 CFRP 层合板二维切削模型,图 11 为 0°纤维方向宏/微观示意图。设置刀具前角 γ 为 15°,后角 α 为 10°,刀具进给量为 4 mm。

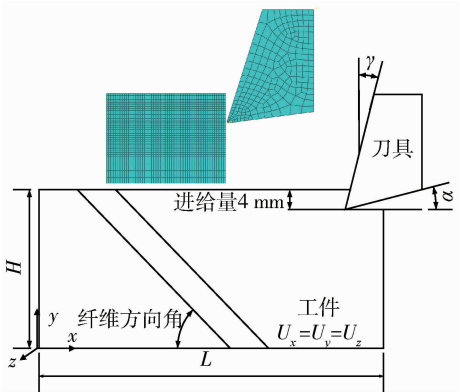


图10 二维切削模型

Fig.10 Two-dimensional cutting model

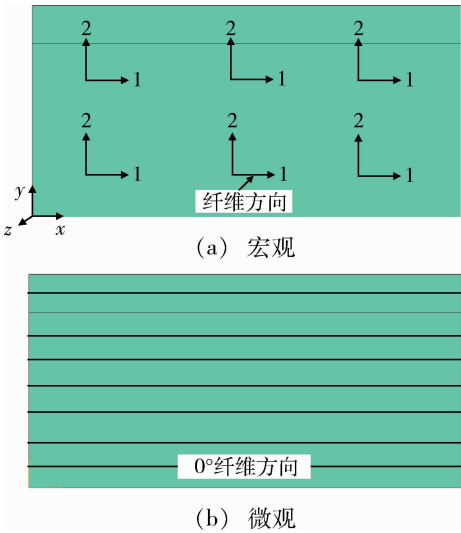


图11 0°纤维方向模型宏/微观示意图

Fig.11 Macro/micro schematic diagram of 0° fiber orientation model

2.1.2 切削仿真结果

图 12~图 15 分别是纤维方向角在 0°、45°、90°和 135°处的切削示意图与孔壁形貌照片、切削应力场分布与损伤扩展仿真结果。

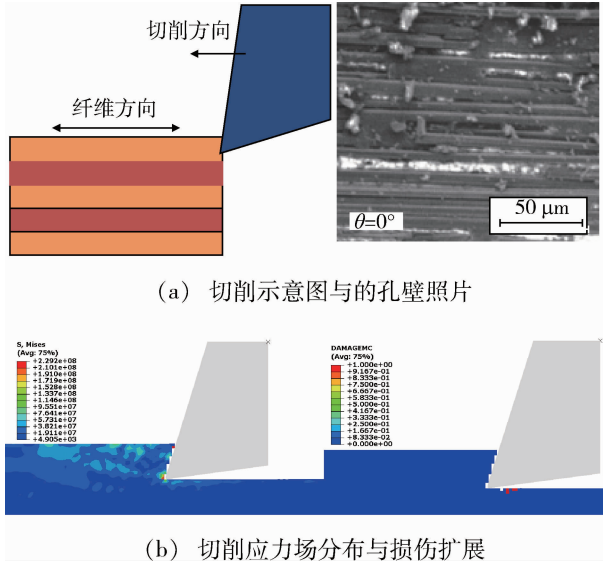
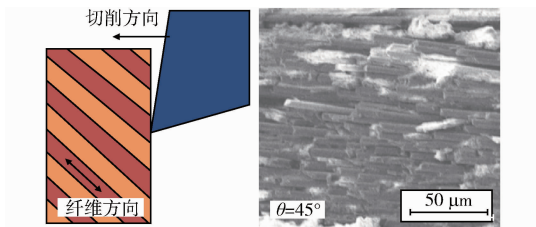


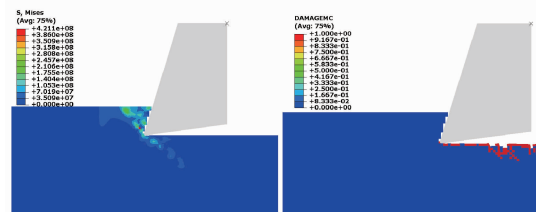
图12 0°纤维方向

Fig.12 0° fiber direction angle

CFRP 二维切削仿真结果与之前理论分析的四种切削形式非常吻合,刀具对 CFRP 的切削力主要沿纤维方向分布,除 0°纤维方向角外,其他纤维方向角处的切削损伤都会沿着纤维向未加工区域扩展。根据仿真结果可知,输出刀具受到 x 方向的支反力,得到不同纤维方向角处的切削力,如图 16 所示,90°纤维方向角处切削力最大,0°纤维方向角处切削力最小,仿真结果与理论分析结果一致。



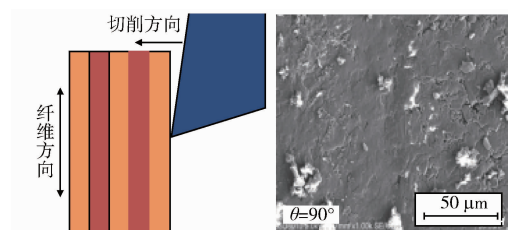
(a) 切削示意图与的孔壁照片



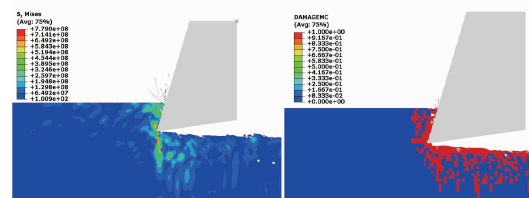
(b) 切削应力场分布与损伤扩展

图 13 45°纤维方向

Fig.13 45° fiber direction angle



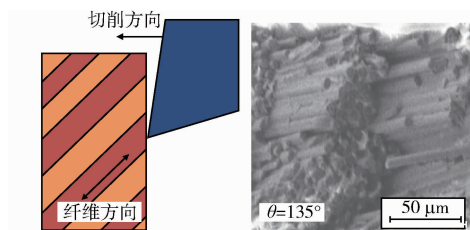
(a) 切削示意图与的孔壁照片



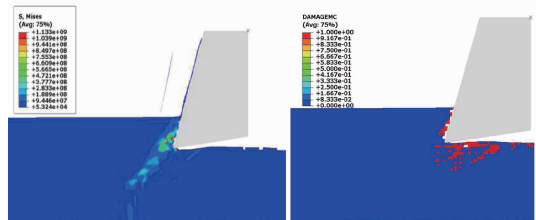
(b) 切削应力场分布与损伤扩展

图 14 90°纤维方向

Fig.14 90° fiber direction angle



(a) 切削示意图与的孔壁照片



(b) 切削应力场分布与损伤扩展

图 15 135°纤维方向

Fig.15 135° fiber direction angle

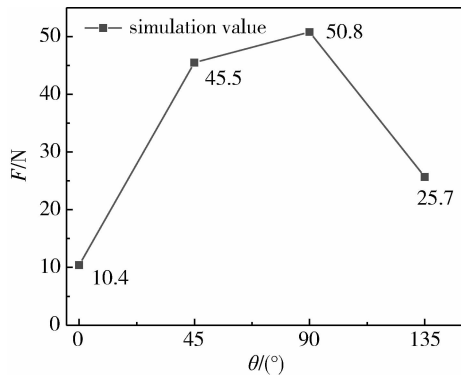


图 16 不同纤维方向角处的切削力仿真结果

Fig.16 Cutting force simulation results at different fiber orientation angles

2.2 孔壁表观质量

图 17 为利用电子显微镜观察单向板孔壁形貌照片,图 18 为共聚焦显微镜测量孔壁表面粗糙度值。从图 17 与图 18 可以看出,135°纤维方向角处的孔壁形貌呈锯齿状,粗糙度值较大,表面质量差;0°、45°和 90°纤维方向角处的孔壁粗糙度值偏小,孔壁质量较好。

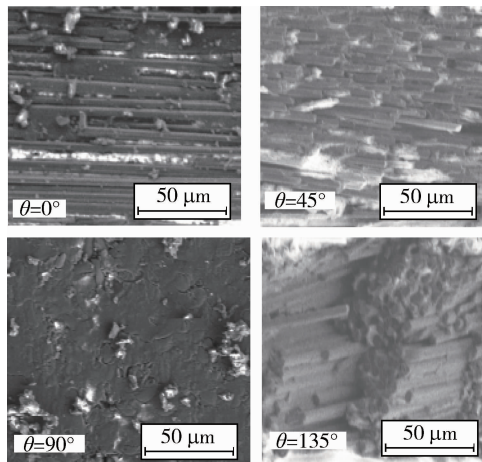


图 17 单向板不同纤维方向角处的孔壁质量照片

Fig.17 Pictures of hole-wall quality at different fiber orientation angles of unidirectional plate

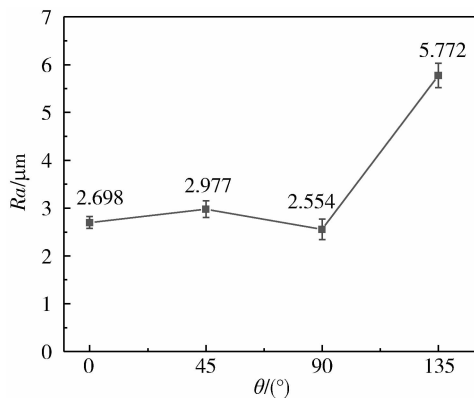


图 18 单向板不同纤维方向角处孔壁粗糙度值

Fig.18 Roughness of hole-wall at different fiber direction angles of unidirectional plate

对于正交板,不同纤维方向角处的孔壁形貌和粗糙度如图 19, 0°和 90°纤维方向角处表面质量较好, 45°和 135°纤维方向角处表面质量较差。

CFRP 准各向同性板孔壁形貌和粗糙度值见图

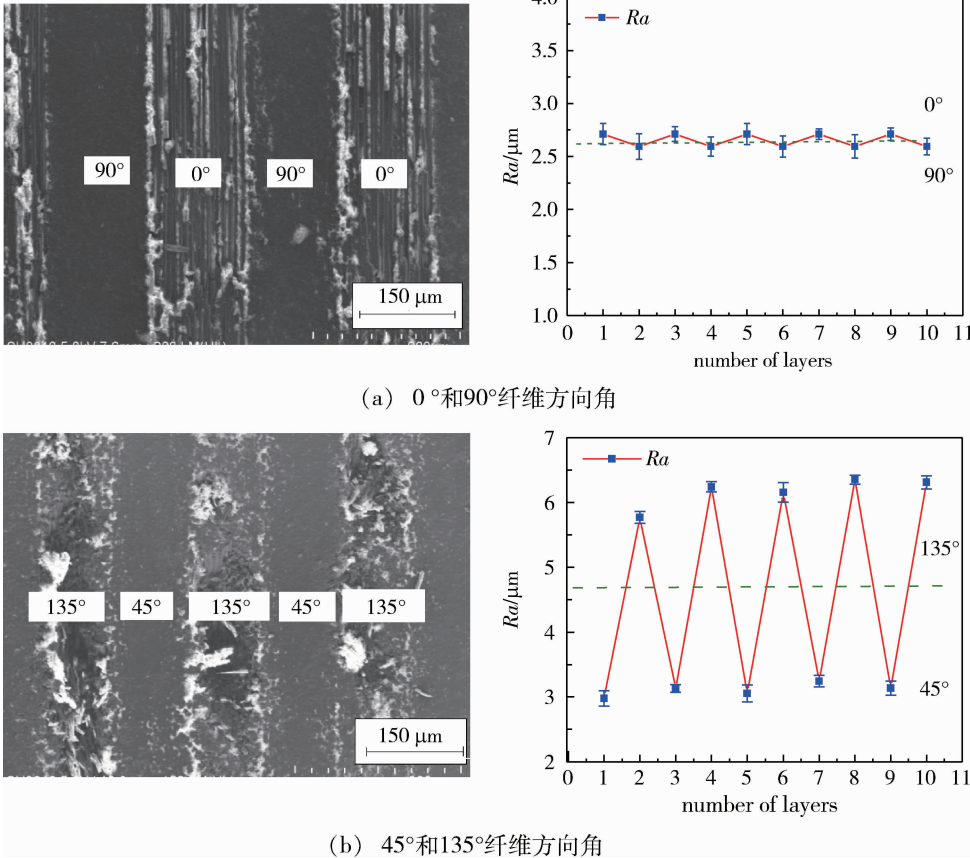


图 19 正交板不同纤维方向角处的孔壁形貌和粗糙度

Fig.19 Roughness of hole-wall at different fiber direction angles of orthogonal plate

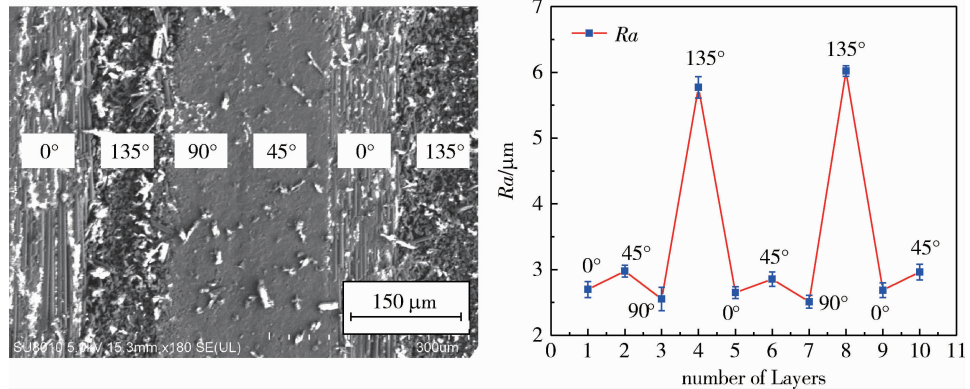


图 20 准各向同性板不同纤维方向角的孔壁照片与粗糙度值

Fig.20 Photographs and roughness values of hole-wall of quasi-isotropic plate with different fiber direction angles

3 结论

(1)通过对 CFRP 不同纤维方向角处切削形式的理论与仿真分析,结合钻削温度分布测试试验与钻削温度场仿真分析,发现纤维方向对钻削温度场的分布规律影响很大,一是由于不同纤维方向角处的切削形式不同,导致钻削热产生量不同,即不同纤维方向

20,发现 0°、45°、90°和 135°纤维方向角处形貌交替变化,但 135°纤维方向角处粗糙度仍较大,综合分析可见,准各向同性板孔壁质量优于正交板。

角处切削温度规律为: $T_{\theta=90^\circ} > T_{\theta=45^\circ} > T_{\theta=135^\circ} > T_{\theta=0^\circ}$ 。二是由于单层复合材料热量主要沿纤维方向传导,导致不同纤维方向角处导热性能的差异,即不同纤维方向角处热导率规律为: $K_{\theta=90^\circ} > K_{\theta=45^\circ} = K_{\theta=135^\circ} > K_{\theta=0^\circ}$ 。

(2)通过对不同纤维方向角处孔壁质量观测对

比发现,纤维方向角在 $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 处孔壁表面 Ra 在 $2.554\sim 2.977\ \mu\text{m}$,孔壁质量较好,在 $\theta=135^\circ$ 处孔壁表面 Ra 为 $5.772\ \mu\text{m}$,孔壁质量较差。

(3)对于 CFRP 钻削加工,要明确材料的铺层方向,可根据碳纤维的不同排布方向,选取合适的刀具和加工参数,以达到控制切削区域温度的目的,必要时可采用风冷或者酒精冷却。其中,单向板钻孔易形成椭圆孔,引起孔径超差,需采取措施降低钻削温度。对于 CFRP 外形铣加工,可根据碳纤维方向,合理规划刀具路径轨迹,提高加工区域质量,减少毛刺撕裂缺陷。

参考文献

[1] 贺福,王茂章.碳纤维及其复合材料[M].北京:科学出版社,1995.

[2] KOPLEV, ALYSTRUP A, VORM T. The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP[J]. Composites, 1983, 14 (4): 371-376.

[3] WANG DH, RAMULU M, ARALO D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995, 35 (12): 1623-1638.

[4] ILIESGU D, GEHIN D, IORDANOFF I, et al. A discrete element method for the simulation of CFRP cutting [J]. Composites Science&Technology, 2010, 70(1): 73-78.



(上接第 42 页)

参考文献

[1] AKTAS L, DHARMAVARAM S, HAMIDI Y K, et al. Filtration and breakdown of clay clusters during resin transfer molding of nanoclay/glass/epoxy composites[J]. Journal of Composite Materials, 2008, 42(21): 2209-2229.

[2] OHNISHI A, OHORI S, FUNAMI F, et al. Improvement of resin impregnation into glass cloth by silane treatment in resin transfer molding[J]. Composite Interfaces, 2005, 12(7): 683-689.

[3] 孙赛,刘木金,王海,等.RTM 成型工艺及其派生工艺[J].宇航材料工艺,2010,40(6): 21-23.

[4] 段跃新,张宗科,梁志勇,等.BMI 树脂化学流变模型及 RTM 工艺窗口预报研究[J].复合材料学报,2001,18(3): 30-33.

[5] 马青松,陈朝辉,郑文伟,等.树脂传递模塑-复合材料成型新工艺[J].材料科学与工程,2000,18(4): 92-97.

[6] 陈平,刘胜平,王德中.环氧树脂及其应用[M].北京:化学工业出版社,2006:278-313.

[7] 曹伟伟,朱波,朱文滔,等.基于非等温法的耐高温环氧树脂体系固化反应动力学研究[J].材料工程,2014(8):

[5] 马付建,姜禹臣,张生,等.芳纤维角度对碳纤维复合材料切削性能的影响分析[J].大连交通大学学报,2016, (37): 37-42.

[6] 贾振元,毕广健,王福吉,等.碳纤维增强树脂基复合材料切削机理研究[J].机械工程学,2018, 54(23): 199-208.

[7] 温泉,郭东明,高航,等.基于划痕试验的碳纤维/环氧树脂复合材料制孔毛刺与撕裂缺陷形成机制[J].复合材料学报,2014,31(01): 9-17.

[8] 汪海晋.树脂基复合材料钻削缺陷产生机理与控制策略研究[D].济南:山东大学,2016.

[9] 蔡晓江.基于复合材料各向异性的切削力热变化规律和表面质量评价试验研究[D]:上海交通大学,2014.

[10] 姜美林.高速断续加工过程工件及刀具瞬态切削温度的研究[D].济南:山东大学,2015.

[11] 文亮,姜丽萍,张烘州,等.碳纤维增强复合材料单向层合板直角自由切削热特性试验[J].复合材料学报,2015, 32(5): 1469-1479.

[12] 贺苏,苏宏华,陈燕,等.碳纤维复合材料钻削加工对比试验[J].航空制造技术,2011(14): 52-54.

[13] 张建可.树脂基碳纤维复合材料的热物理性能之一——导热系数[J].中国空间科学技术,1987(03): 55-60.

[14] PILLING MW, YATES B, BLACK MA, et al. The thermal conductivity of carbon fibre-reinforced composites [J]. Journal of Materials Science, 1979, 14 (6): 1326-1338.

67-71.

[8] 石东,石凤,段跃新,等.RTM 工艺用酚醛树脂体系化学流变行为研究[J].宇航材料工艺,2005,35(2): 52-56.

[9] 赵卫生,孙超明,王文晶,等.RTM 用乙烯基酯树脂化学流变性能研究[J].玻璃钢/复合材料.2014(3): 97-100.

[10] 崔郁,李晔,唐邦铭.5284 树脂流变特性研究[J].南京大学学报(自然科学),2009,45(2): 292-296.

[11] 张明,许亚洪,邢军,等.RTM 用 3266 环氧树脂体系化学流变特性的研究[J].材料工程,2005(6): 50-58.

[12] 梁志勇,段跃新,林云,等.EPON862 环氧树脂体系化学流变特性研究[J].复合材料学报,2001,18(1): 16-19.

[13] 王芳芳,张彦飞,杜瑞奎,等.耐高温双马来酰亚胺树脂体系的流变性能[J].高分子材料科学与工程,2013, 29(9): 53-57.

[14] 尹昌平,肖加余,曾竟成,等.E-44 环氧树脂体系化学流变性能研究[J].宇航材料工艺,2005,35(5): 67-70.

[15] 李小刚,李宏运,胡宏军,等.RTM 用双马来酰亚胺树脂流变特性研究[J].材料工程,2003(6): 11-14.