

刀具结构对 CFRP/Al 制孔分层损伤影响的仿真研究

王浩涛,黄树涛,张攀,许立福

沈阳理工大学

摘要: 建立了不同结构刀具钻削 CFRP/Al 叠层板的有限元仿真模型,应用有限元仿真软件 ABAQUS 对 CFRP/Al 叠层板制孔过程中 CFRP 层间分层损伤特征及原因进行了仿真研究,并进一步分析了刀具结构对 CFRP 层间分层损伤的影响。研究表明:CFRP 层间分层损伤形貌为椭圆型,椭圆长轴所在方向和纤维方向一致;套料钻制孔的 CFRP 层间分层损伤在相同层间位置比 PCD 麻花钻小得多。

关键词: CFRP/Al 叠层结构;分层损伤;刀具结构

中图分类号: TG713;TG529;TH162

文献标志码: A

Finite Element Analysis on Influence Which Tool Structure Impose on Delamination Damage of CFRP/Al Stacks

Wang Haotao, Huang Shutao, Zhang Pan, Xu Lifu

Abstract: Building drilling CFRP/Al finite element simulation of different tool structure, which applied the finite element analysis software ABAQUS, had simulated the characteristic and formation mechanism of the delamination damage of carbon fiber reinforced plastic in the process of drilling CFRP/Al, and analyzed the influence which the tool structure had imposed on the delamination damage of CFRP/Al laminated construction. The results show that the delamination damage morphology of CFRP interlayer is elliptic, and the direction of elliptical long axis has the same direction with the fiber of CFRP; CFRP inter-layer delamination damages in hole drilling with a core drill are to a much less extent than those with a PCD twist drill in the same inter-layer position.

Keywords: CFRP/Al stacks; delamination damage; tool structure

1 引言

由于碳纤维增强复合材料(CFRP)的材料特性,CFRP/Al 叠层板在制孔过程中极易出现撕裂、毛刺、孔壁粗糙等缺陷,其中分层损伤是最常见也是最严重的损伤形式。分层的产生和扩展都会显著降低复合材料结构件的强度,也是有关碳纤维复合材料叠层结构制孔损伤的主要研究内容。解析模型和

数值模拟都能够对分层损伤进行预测,解析模型是基于线弹性断裂力学(LEFM)来预测碳纤维复合材料叠层板在制孔过程中分层产生的临界轴向力。Ho Cheng H. 等^[1]建立了第一个用于研究 CFRP 分层产生时的临界轴向力的解析模型,但此类解析模型仅仅通过解析计算,从理论角度分析分层的产生机理,无法得到最终的分层损伤特征。数值模拟则是基于有限元分析软件对分层损伤产生过程进行模拟,模拟结果形象直观,方便对分层损伤影响因素及产生机理进行研究。Feito N. 等^[2]对 CFRP 制孔过程进行了数值模拟,建立了用于分析分层损伤的简

基金项目: 国家自然科学基金(51775356);沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室开放基金(SHSYS2016007)
收稿日期: 2017 年 12 月

- [5] 蔡晓,王帅,辛开开,等. YTi15 硬质合金刀片刃口电化学钝化实验研究[J]. 工具技术,2015,49(5):29-31.
- [6] 刘永宏. 高速钢丝锥刀齿切削刃的电解强化技术的试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [7] 姜良斌. 刀具刃口钝化及刀具管理集成信息系统研究[D]. 济南:山东大学,2008.
- [8] Yamaoka Y, Kakino Y, Sato T. High speed and high productive tapping by intelligent machine tools [J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2002(9):1226-1230.

- [9] GB/T 969-94, 丝锥技术条件[S].
- [10] JB/T 10231.4-2001, 刀具产品检测方法第 4 部分:丝锥[S].
- [11] JB/T 5217-91, 丝锥寿命的试验方法及其验收条件[S].

第一作者:闫献国,太原科技大学机械工程学院,030027 太原市

First Author: Yan Xianguo, School of Mechanical and Electrical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China

化模型和完整钻削模型,对比表明,简化模型也能对分层有很好的预测,并通过简化模型分析了轴向力对分层损伤的影响。

本文基于 ABAQUS 有限元分析软件,针对 CFRP/Al 叠层结构制孔过程中 CFRP 的分层缺陷进行有限元仿真研究,分析刀具结构对 CFRP 制孔缺陷的影响。

2 有限元仿真模型

2.1 CFRP/Al 制孔仿真模型

建立的 PCD 麻花钻和套料钻制孔有限元模型如图 1 所示,CFRP/Al 叠层板模型直接在 ABAQUS 中建立,CFRP 由 4 层碳纤维增强复合材料单层板堆叠而成,单层板厚度 0.15mm,铺层角度从上到下为 $[0^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ]$,通过局部坐标系定义各单层板铺层方向,工件长宽均为 15mm,铝合金板厚为 1mm。通过三维建模软件 CREO 2.0 建立 PCD 麻花钻和套料钻模型,直径均为 6mm。单向碳纤维增强复合材料单层板型号为 T300/LTM45 - EL,铝合金牌号为 Al2024 - T3,套料钻采用硬质合金 YG8^[3],麻花钻刀体为硬质合金,主切削刃和横刃为聚晶金刚石(PCD)刀片^[4],如图 1 所示。刀具及工件材料性能参数见表 1、表 2^[5]和表 3^[6]。

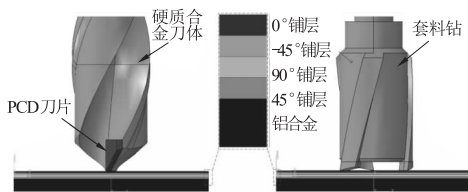


图 1 PCD 钻头和套料钻制孔有限元模型

表 1 制孔刀具材料性能参数

材料参数	密度 (kg/m ³)	弹性模量 (GPa)	泊松比	热传导率 (W/m·K)	比热容 (J/kg·K)
硬质合金 YG8	1.45×10 ⁴	112	0.22	75.4	220
PCD	3.52×10 ³	1147	0.07	2100	525

表 2 单向碳纤维复合材料单层板 T300/LTM - EL 性能参数

性能参数		数值
密度 (kg/m ³)		1600
拉伸模量 (GPa)	E_{11}	127
	E_{22}	9.1
	E_{33}	9.1
剪切模量 (GPa)	G_{12}	5.6
	G_{13}	5.6
	G_{23}	4
泊松比	ν_{12}	0.31
	ν_{13}	0.31
	ν_{23}	0.45

表 3 Al2024 - T3 的机械性能参数

性能参数	密度 (kg/m ³)	弹性模量 (GPa)	泊松比	熔点 (°C)
数值	2780	73.1	0.33	502

2.2 CFRP/Al 叠层结构材料本构

(1) 单向碳纤维复合材料单层板材料本构模型

纤维失效采用 Hashin 失效准则定义,基体失效采用 Puck 失效准则定义,通过用户定义子程序的方法来实现 ABAQUS 中的应用^[5]。

纤维拉伸失效 ($\sigma_{11} \geq 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{s_{11}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{11}}{s_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{11}}{s_{13}}\right)^2 = 1, d_{\beta} = 1 \quad (1)$$

纤维压缩失效 ($\sigma_{11} < 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_{1c}}\right)^2 = 1, d_{fc} = 1 \quad (2)$$

基体失效

$$\left[\left(\frac{\sigma_{11}}{2X_{1t}}\right)^2 + \frac{\sigma_{22}^2}{|X_{2t}X_{2c}|} + \left(\frac{\sigma_{12}}{s_{12}}\right)^2\right] + \sigma_{22}\left(\frac{1}{X_{2t}} + \frac{1}{X_{2c}}\right) = 1 \quad (3)$$

$$\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0, d_{mt} = 1 \quad (4)$$

$$\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0, d_{mc} = 1 \quad (5)$$

式中, σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} 、 σ_{12} 为单元集成点上的应力分量; d_{ft} 、 d_{fc} 、 d_{mt} 、 d_{mc} 是与纤维拉伸、纤维压缩、基体拉伸、基体压缩各自失效模型相关联的损伤变量(损伤因子); X_{1t} 为纵向拉伸强度, X_{2t} 为横向拉伸强度, X_{1c} 为纵向压缩强度, X_{2c} 为横向压缩强度, s_{12} 为剪切强度。

在仿真中,单元删除法则是基于上述各式中损伤变量的计算结果,当单元所有节点达到失效条件时,单元将会被删除。损伤参数 $d (d \in \max \{d_{ft}, d_{fc}, d_{mt}, d_{mc}\})$ 是基于上述各式的计算,当 $d = 1$ 时,单元从网格删除,没有后续的应力变形^[5]。

碳纤维复合材料失效参数见表 4。本文采用基于面的粘性接触来定义 CFRP 层间的胶粘行为,根据制孔过程中粘性接触的失效来模拟 CFRP 层间的分层现象^[8]。基于面的粘性接触在 ABAQUS 里对应的输出变量为 CSDMG,当 CSDMG 值达到 1,层间的粘性接触行为失效,分层裂纹产生。

表 4 单向碳纤维复合材料单层板 T300/LTM - EL 失效参数 (MPa)

纵向拉伸强度	横向拉伸强度	纵向压缩强度	横向压缩强度	剪切强度
2720	111	1690	214	115

(2) 铝合金本构模型

采用 JC 塑性模型^[9]来定义铝合金的塑性变形阶段,表达式为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right] \quad (6)$$

式中, σ 为等效流动应力; ε 为塑性应变, $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 是参考塑性应变率; T 是工作温度, T_r 是室温, T_m 是材料熔化温度; A 为材料屈服强度; B 为硬化模量; C 为应变率敏感性系数; n 为应变硬化指数; m 为热软化指数。

铝合金 Al2024 - T3 的 JC 本构参数见表 5^[6]。铝合金的失效采用 JC 失效模型^[9]定义, 有

$$\bar{\varepsilon}_0^{pl} = \left[d_1 + d_2 \exp\left(d_3 \frac{\rho}{q}\right) \right] \times \left[1 + d_4 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \times \left[1 + d_5 \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right) \right] \quad (7)$$

$$\omega = \Sigma \left(\frac{\Delta \varepsilon^{pl}}{\bar{\varepsilon}_0^{pl}} \right) \quad (8)$$

式中, $\bar{\varepsilon}_0^{pl}$ 为损伤起始时的等效塑性应变, 当损伤参数 ω 增加到 1 时, 损伤初始达到, 铝合金失效, 单元删除。

铝合金 Al2024 - T3 的 JC 本构及失效参数见表 5。

表 5 铝合金 Al2024-T3 的 JC 本构及失效参数

A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
265	426	0.018	0.34	1	0.13	0.13	-1.5	0.011	0

2.3 边界条件及网格设置

CFRP/Al 叠层板四个侧面固定 ($U_x = U_y = U_z = UR_x = UR_y = UR_z = 0$), 对两种刀具均施加 3000r/min 的转速和 10mm/s 的进给速度。碳纤维复合材料单层板和铝合金 Al2024 - T3 的单元类型均采用减缩积分下的八节点线性六面体单元 (C3D8R)。单元尺寸方面, 在保证计算精度的同时, 只对制孔及其临近区域进行网格细化, 网格尺寸设置为 0.06 - 0.12mm 渐变, 厚度方向尺寸为 0.075mm, 其他区域采用尺寸较大的网格, 尺寸为 1.2mm。另外, 由于刀具并不是本文研究对象, 为了提高效率, 在不影响计算结果的情况下将其设置为刚体, 其单元类型也采用对几何形状要求不高的四节点线性四面体单元 (C3D4), 网格尺寸为 0.4mm。

3 仿真结果分析

3.1 CFRP 分层损伤特征及机理

根据有限元仿真结果, 以 PCD 麻花钻为例, 对 CFRP/Al 叠层结构制孔过程中 CFRP 层间分层特征及机理进行分析。图 2 为不同纤维方向时的分层情况形貌图, 输出变量 CSDMG 达到 1 的区域代表层间胶粘行为已失效, 该区域即为分层损伤区域, 由于在 ABAQUS 的后处理中, 该区域默认的表达方式不方便观察分层损伤区域边界, 因而在对有限元分析结果后处理时, 将输出变量 CSDMG 达到 1 的区域

进行修改 (见图中白色部分), 以利于观察最终的分层特征。

从图 2 可以发现, CFRP 层间的分层损伤呈现出明显的方向性, 说明在制孔过程中, 分层的产生和扩展并不是沿制孔边缘均匀向外扩展, 在各个方向的扩展程度并不相同。由图可知, 沿纤维方向扩展程度最大, 垂直纤维方向扩展程度最小, 整个分层区域近似为椭圆形, 且椭圆长轴所在的方向和纤维方向相同。这是由于在钻削碳纤维增强复合材料过程中, 环氧树脂基体强度较低, 在麻花钻轴向力和扭矩的共同作用下, 率先开裂失效, 主要由碳纤维丝承担载荷。

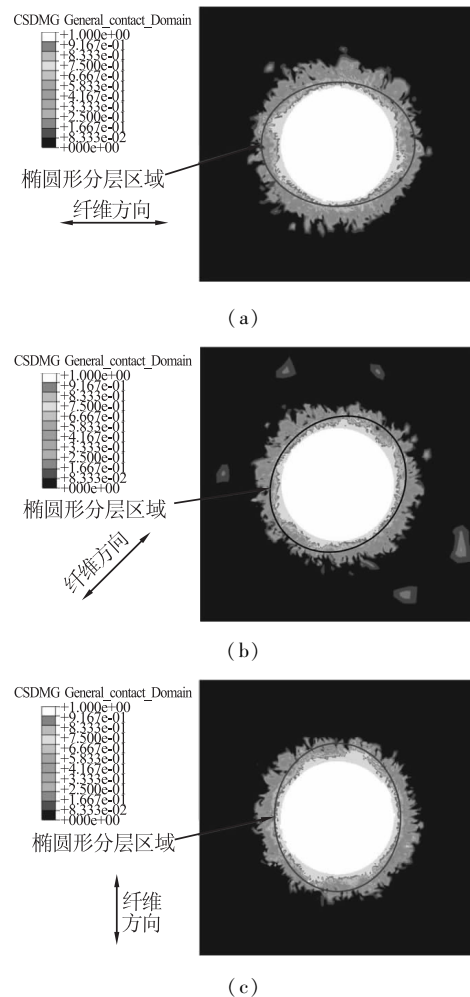


图 2 不同纤维方向时分层形貌

在 CFRP 钻孔出口处, 碳纤维在断裂之前, 载荷主要沿纤维方向传递, 当载荷超过 CFRP 层间结合强度, 则在纤维方向上最先出现层间裂纹。这里将出现两种情形: 一是在纤维断裂之前, 层间裂纹已在沿纤维方向扩展的制孔区域之外, 产生分层缺陷, 这种情形下产生的分层缺陷将在纤维断裂后演变为大面积的出口劈裂; 二是在纤维断裂时层间裂纹并未

超出制孔区域,在后续加工过程中,在麻花钻主切削刃作用下,随着材料去除,层间缺陷进一步扩展,最终超出制孔区域产生分层缺陷。不论出口处的分层缺陷以哪种情形产生,其层间裂纹都主要沿纤维方向扩展,因而在最终形成的分层缺陷形貌图上显示,纤维方向上的裂纹长度大于垂直纤维方向上的裂纹长度,并出现图 2 所示的椭圆形分层缺陷区域。

在 CFRP 钻孔入口处,由于刀具作用的是最上层碳纤维,在碳纤维断裂前不会出现层间裂纹。纤维断裂后,入口处的纤维在麻花钻扭转摩擦作用下与下层碳纤维分离,出现剥离性裂纹,该裂纹同样主要沿纤维方向扩展,裂纹在钻削过程中扩展,超出制孔区域,产生分层缺陷;同样,由于裂纹在纤维方向的扩展程度大于垂直纤维方向,最终形成近似椭圆的分层缺陷形貌。

3.2 刀具几何结构对 CFRP 各层间分层损伤的影响

采用直径分层因子 F_d 对 CFRP 层间分层损伤进行评价,其大小为最大分层直径 D_{max} 与预制孔直径 D_{nom} 的比值,其测量见图 3。根据不同刀具的仿真结果,对比分析 CFRP 各层间分层损伤情况,并分析各层间分层缺陷的变化规律。图 4 为 PCD 麻花钻制孔后 CFRP 不同位置层间分层缺陷形貌。图 5 为套料钻制孔后各层间分层缺陷形貌。图 6 为刀具几何结构对 CFRP 各层间分层损伤因子的影响。

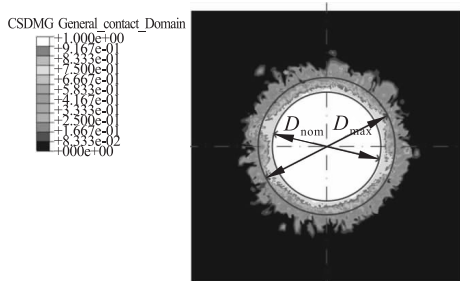
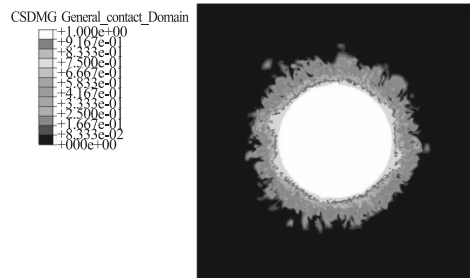


图 3 分层因子计算示意图

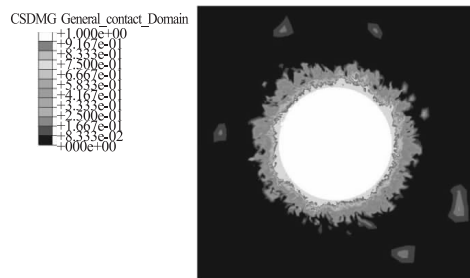
从图 4 和图 5 可以看出,两种刀具制孔后,CFRP 不同铺层孔径几乎没有变化,一致性很好,而且不同刀具相同铺层位置的孔径也基本一致,说明两种刀具对 CFRP 孔径尺寸的影响程度一致。但从图 4、图 5 和图 6 综合分析发现,套料钻对 CFRP 分层的影响要比 PCD 麻花钻小得多,图 5 几乎看不出分层损伤。

由图 6 可以发现,PCD 麻花钻对 CFRP 的入口和出口分层损伤的影响稍大于中间的铺层,且出口

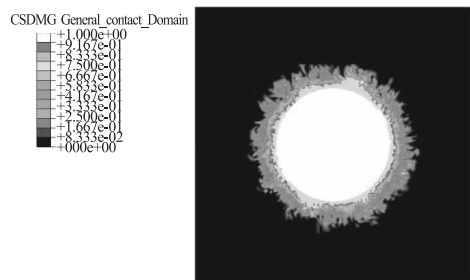
处分层损伤最大。在 CFRP 出口处,分层以顶出型分层为主,相比其上层的碳纤维单层板,缺少足够的支撑,因而分层损伤区域最大。



(a) [0°/-45°]层间

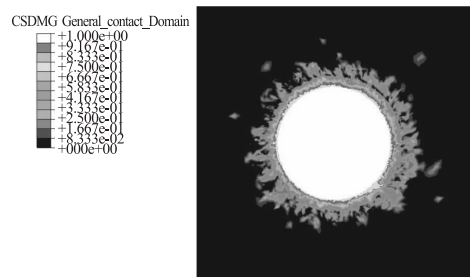


(b) [-45°/90°]层间

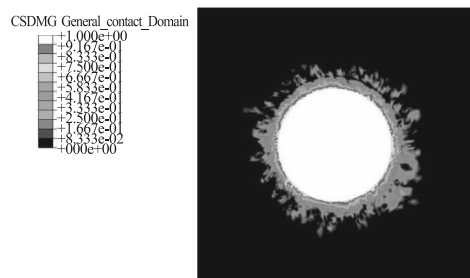


(c) [90°/45°]层间

图 4 PCD 麻花钻制孔后 CFRP 不同位置层间分层形貌



(a) [0°/-45°]层间



(b) [-45°/90°]层间

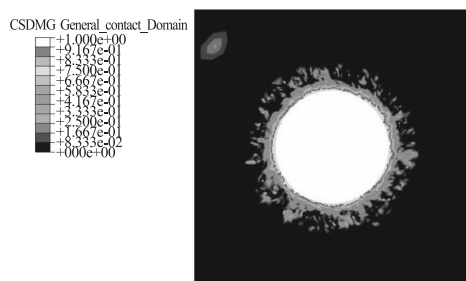
(c) $[90^\circ/45^\circ]$ 层间

图5 套料钻制孔后 CFRP 不同位置层间分层形貌

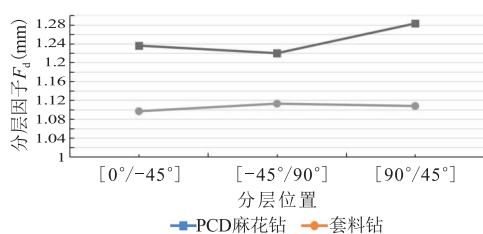


图6 刀具几何结构对 CFRP 不同位置分层损伤的影响

套料钻制孔后, CFRP 各层间分层损伤变化不大,且各层分层损伤比 PCD 刀具制孔后相同位置的分层损伤小得多。这主要是因为两种刀具的切削机理不同,套料钻是纯切削作用,没有麻花钻横刃对碳纤维的扭转挤压撑拉作用,而且其作用区域为仅靠制孔区域边缘的环形区域,刀具穿过一层碳纤维时对该层碳纤维几乎没有后续的切削作用,因而其分层缺陷要比 PCD 麻花钻制孔的分层缺陷小。另外,由图 6 可知,套料钻制孔后,CFRP 中间位置的分层缺陷比出口和入口稍大。

4 结语

(1) CFRP 层间分层裂纹沿纤维方向扩展最快,垂直纤维方向扩展最慢,造成 CFRP 层间分层损伤形貌为椭圆形,椭圆长轴所在方向和纤维方向一致。

(2) PCD 麻花钻对 CFRP 的入口和出口分层损伤的影响稍大于中间的铺层,且出口处分层损伤最大。

(3) 套料钻制孔的 CFRP 层间分层损伤在相同层间位置比 PCD 麻花钻制孔小得多。

参考文献

[1] Ho-Cheng H, Dharan C K H. Delamination during drilling in composite laminates[J]. Journal of Engineering for Industry, 1990, 112(3): 236 - 239.

[2] Feito N, López Puente J, Santiuste C, et al. Numerical prediction of delamination in CFRP drilling [J]. Composite Structures, 2014, 108(1): 677 - 683.

[3] 金晓波, 康万军, 曹军, 等. 碳纤维复合材料/钛合金叠层板钻孔有限元仿真研究[J]. 工具技术, 2015, 49(1): 24 - 28.

[4] 黄树涛, 王泽亮, 焦可如, 等. 高速正交切削 SiC_p/Al 复合材料的切屑形成及边界损伤仿真研究[J]. 人工晶体学报, 2014, 43(10): 2717 - 2725.

[5] Phadnis V A, Makhadmeh F, Roy A, et al. Drilling in carbon/epoxy composites: experimental investigations and finite element implementation [J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2013, 47(1): 41 - 51.

[6] Giasin K, Hodzic A, Phadnis V, et al. Assessment of cutting forces and hole quality in drilling Al2024 aluminium alloy: experimental and finite element study [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(5 - 8): 1 - 21.

[7] Isbilir O, Ghassemieh E. Finite element analysis of drilling of carbon fibre reinforced composites [J]. Applied Composite Materials, 2012, 19(3 - 4): 637 - 656.

[8] Isbilir O, Ghassemieh E. Numerical investigation of the effects of drill geometry on drilling induced delamination of carbon fiber reinforced composites [J]. Composite Structures, 2013, 105(8): 126 - 133.

[9] Nan X, Xie L, Zhao W. On the application of 3D finite element modeling for small - diameter hole drilling of AISI 1045 steel [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(9 - 12): 1927 - 1939.

第一作者: 王浩涛, 硕士研究生, 沈阳理工大学汽车与交通学院, 110159 沈阳市

First Author: Wang Haotao, Postgraduate, School of Automobile and Traffic, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China

通信作者: 黄树涛, 博士, 教授, 沈阳理工大学汽车与交通学院, 110159 沈阳市

Corresponding Author: Huang Shutao, Doctor, Professor, School of Automobile and Traffic, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China