

# CFRP/Al 夹层板电磁冲孔分层缺陷研究

段丽明, 洪志波, 廖辉, 崔俊佳, 李光耀, 蒋浩

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

**摘要:** **目的** 研究不同放电能量对 CFRP/Al 夹层板电磁冲孔分层缺陷的影响。**方法** 对 2.4 mm 厚的 CFRP/Al 夹层板进行电磁冲孔试验, 通过超声 C 扫描无损检测技术、扫描电子显微镜及有限元数值模拟等手段分别对板料分层损伤、横截面微观形貌及层间分层损伤进行评估, 揭示不同放电能量对 CFRP/Al 夹层板电磁冲孔分层缺陷的影响。**结果** 放电能量对电磁冲孔分层缺陷有显著影响。在 4~6 kJ 能量范围内, 板料的最大分层因子 ( $F_d$ ) 和等效分层因子 ( $F_{ed}$ ) 均随放电能量的增加而减小。当放电能量为 7 kJ 时, 等效分层因子  $F_{ed}$  仍然减小, 但由于高速载荷作用下局部损伤的存在, 使板料的最大分层因子  $F_d$  骤然上升, 并超过了放电能量为 4 kJ 时的最大分层因子。**结论** 在合理的能量范围内 (4~6 kJ), 随着放电能量的增加, 能够明显提升 CFRP/Al 夹层板电磁冲孔的质量, 但当放电能量过高 ( $\geq 7$  kJ) 时, 会产生额外的分层缺陷, 影响冲孔质量。

**关键词:** 碳纤维增强复合材料; 铝合金; 电磁冲孔; 分层缺陷

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.04.010

中图分类号: TQ327.3; TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2021)04-0067-09

## Study on Delamination Defect of Punched Holes in Hybrid CFRP/Al Stacks Produced by Electromagnetic Punching

DUAN Li-ming, HONG Zhi-bo, LIAO Hui, CUI Jun-jia, LI Guang-yao, JIANG Hao

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

**ABSTRACT:** The aim of this paper is to investigate the effect of different discharge energy on the delamination defect of holes produced by electromagnetic punching for hybrid CFRP/Al stacks. For this purpose, the electromagnetic punching experiments were carried out on hybrid CFRP/Al stacks with a thick of 2.4 mm. By means of ultrasonic C-scan technology, scanning electron microscope and numerical simulation, the delamination damage of CFRP/Al stacks, microstructure of cross section and inter-laminar delamination damage were evaluated, revealing the influence of discharge energy on the delamination defect of CFRP/Al stacks. The results showed that the discharge energy had significant effects on the delamination defect of the punched holes. In the range of 4 kJ to 6 kJ, the delamination factors ( $F_d$  and  $F_{ed}$ ) decreased with the increase of discharge energy. When the discharge energy is 7 kJ, the equivalent delamination factor  $F_{ed}$  of CFRP/Al stacks still decreased, while the maximum delamination factor  $F_d$  rose abruptly and exceeded the maximum delamination factor when the discharge energy was 4 kJ. This was due to the presence of local damage under the action of high speed loading. Therefore, it could be concluded that, within a reasonable energy range (4~6 kJ), the electromagnetic punching quality of CFRP/Al stacks was significantly improved with the increase of discharge energy. However, when the discharge energy was too high ( $\geq 7$  kJ), additional delamination defects would occur, affecting the punching quality.

**KEY WORDS:** CFRP; aluminum alloy; electromagnetic punching; delamination defect

收稿日期: 2021-04-09

基金项目: 国家自然科学基金 (52005173); 博士后创新人才支持计划 (BX20200123); 长沙市自然科学基金 (kq2014047)

作者简介: 段丽明 (1993—), 男, 博士生, 主要研究方向为磁脉冲成形与连接技术。

通讯作者: 蒋浩 (1992—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为汽车轻量化、异种材料高效连接技术。

近年来,为了同时实现结构轻量化、高性能和节能减排的目标,多材料混合结构越来越多地应用于汽车、船舶、航空航天等领域<sup>[1-4]</sup>。在此背景下,先进高强度钢(Advanced high strength steel, AHSS)、轻质合金(如铝、镁、钛等)以及碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced plastic, CFRP)等轻量化材料在工程结构中得到了广泛应用<sup>[5-7]</sup>。作为最有前途的轻量化材料,碳纤维增强复合材料由于具有密度低、比强度高、比刚度高、抗疲劳性能好等优点,被广泛应用于各种工程实践中<sup>[8-13]</sup>。此外,轻质合金材料由于其承载强度高、耐冲击、各向同性及结构易修复等特点,在工程结构中也越来越受欢迎<sup>[14]</sup>。为了结合碳纤维增强复合材料和轻质合金材料的优点,以CFRP/Al、CFRP/Ti 三明治夹层板为代表的多材料混合结构被大量使用,例如奔驰 SLR 迈凯轮、空客 A380 及波音 787<sup>[15-17]</sup>。同时,在实际工程应用中,为了满足几何或功能需求,CFRP/轻质合金夹层板的使用往往伴随着再加工,尤其是孔加工<sup>[18]</sup>,然而,由于碳纤维复合材料的高硬度、非均质性和各向异性,传统的加工方法很难快速获得令人满意的孔加工表面<sup>[19]</sup>。

传统的孔加工方法主要有钻孔、激光打孔、火焰切割和等离子切割,国内外学者对其进行了详尽的研究。例如,Tsao 和 Hocheng<sup>[20]</sup>基于田口方法和方差分析对CFRP层合板在不同钻削条件下的分层损伤进行了评估,并通过多变量线性回归建立了进给速度、主轴转速、钻孔直径与CFRP层压板分层损伤之间的相关性。Voisey 等<sup>[21]</sup>研究了碳纤维复合材料激光打孔过程中纤维的膨胀,发现激光打孔附近的热影响区产生了大量的纤维膨胀。Thiebaud 等<sup>[22]</sup>测量了厚钢板在火焰切割时的温度,并建立了火焰切割过程的三维热模型。Chamarthi 等<sup>[23]</sup>分析了等离子切割参数(如电压、等离子气体、切割速度等)对 Hardox-400 板切割表面的影响。

上述文献主要研究了传统孔加工方法(钻孔、激光打孔、火焰切割和等离子切割)的工程应用。传统孔加工方法容易对碳纤维复合材料造成一定的损伤,例如分层、毛刺等。具体来说,在可加工性方面,火焰切割和等离子切割并不适合CFRP复合材料的穿孔,因为火焰切割和等离子切割会导致材料表面燃烧和表面硬化的问题<sup>[24]</sup>。至于激光打孔,其尺寸精度会受到孔附近热影响区纤维径向膨胀的影响<sup>[21]</sup>。因此,上述3种方法均不适合碳纤维/轻质合金夹层板的穿孔。钻孔虽然能够较好地完成碳纤维/轻质合金夹层板的穿孔,但同时也存在效率低、刀具磨损快、成本高等问题。由于钻孔是依靠钻头的旋转来完成穿孔过程,因此穿不规则形状的孔对钻孔来说并不容易。更重要的是,钻孔出口区域碳纤维的损伤较大。不同于钻孔,冲孔具有较高的工作效率和较低的加工成本,

且冲头不易磨损,还可以穿非圆孔。特别地,电磁冲孔(Electromagnetic punching, EMP)作为一种新型冲孔工艺,与传统冲孔相比,具有更快的冲裁速度和更大的冲击力,可以减少传统冲孔对碳纤维材料造成的损伤。目前国内外对于电磁冲孔工艺的研究还很少,特别是对CFRP/Al复合材料电磁冲孔分层缺陷的研究。

针对上述情况,文中进行了2.4 mm厚CFRP/Al夹层板的电磁冲孔试验。通过超声C扫描无损检测技术、扫描电子显微镜及有限元数值模拟等手段分别对板料分层损伤、横截面微观形貌及层间分层损伤进行评估,揭示不同放电能量对CFRP/Al夹层板电磁冲孔分层缺陷的影响,为电磁冲孔技术在多材料混合结构领域的应用提供一定的参考依据。

## 1 试验

### 1.1 材料

试验材料为厚度为2.4 mm的CFRP/Al夹层板,是由东丽 T300 碳纤维和 AA5182 铝合金板复合构成。其中,铝合金板为夹心层,碳纤维层分布在铝合金板的上下两侧,两侧均以0°/90°/90°/0°的铺层顺序分布4层,如图1所示。T300碳纤维的纤维密度为1.76 g/cm<sup>3</sup>,纤维模量为230 GPa,纤维强度为3530 MPa,单层厚度为0.15 mm,树脂含量为40%;AA5182铝合金板的密度为2.56 g/cm<sup>3</sup>,弹性模量为70 GPa,屈服强度为150 MPa,拉伸强度为225 MPa,泊松比为0.33,厚度为1.2 mm。

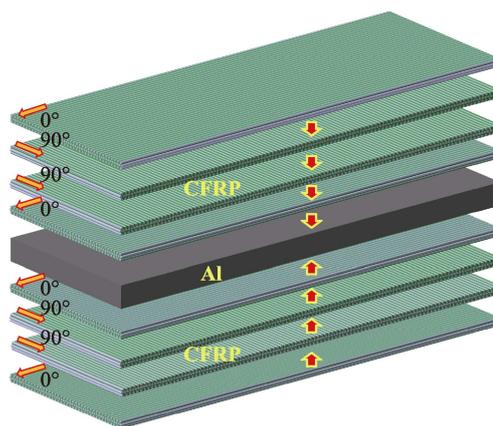


图1 CFRP/Al夹层板堆叠顺序

Fig.1 The stacking sequence of CFRP/Al stacks

### 1.2 电磁冲孔原理及试验方法

电磁冲孔试验装置如图1所示,主要由放电装置和试验工装两部分组成。其中,放电装置为德国PST公司生产的PS 48-16型磁脉冲发生器,主要作用为提供冲孔所需的能量。试验工装主要由电磁线圈、驱

动片、放大器、驱动冲头和冲孔模具组成。电磁冲孔的整体过程主要分为 3 个阶段：第 1 阶段为储能阶段，即对放电设备内部的电容器组进行充电；第 2 阶段为放电阶段，即闭合放电开关将储存的能量释放，通过电磁线圈将电能转化为电磁力，并通过驱动片、放大器将电磁力传递至驱动冲头；第 3 阶段为穿孔阶段，即在驱动冲头和冲孔模具的作用下，完成穿孔过程。为了研究不同放电能量对 CFRP/AI 夹层板电磁冲孔分层缺陷的影响，选用了 4 组放电能量（4, 5, 6, 7 kJ）进行试验。冲头直径为 8 mm，冲裁间隙为 0.10 mm（4%的板厚）。

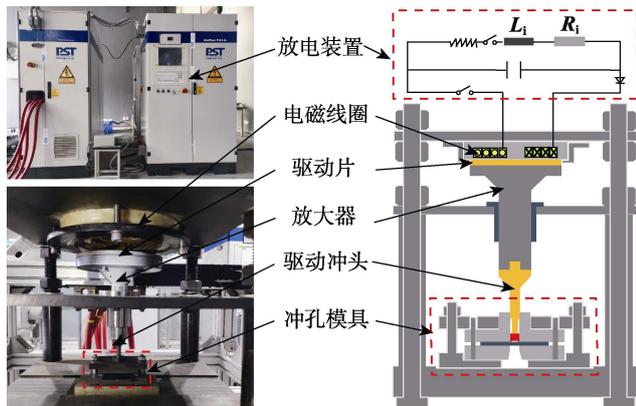


图 2 电磁冲孔试验装置

Fig.2 Experimental setup for electromagnetic punching

### 1.3 冲孔的分层缺陷评估

为了评估冲孔的分层缺陷，采用了一套由美国安赛斯公司生产的 UPK-T36 型全自动超声 C 扫描无损检测系统，其 3 个方向上的最大扫描范围分别为 900 mm (x 轴)，600 mm (y 轴)，450 mm (z 轴)，最大扫描速度为 300 mm/s。文中采用频率为 5 MHz 的浸入式探头发射超声波，扫描速度设置为 20 mm/s，并以 C 扫描模式检测分层缺陷。此外，为了分析 CFRP/AI 夹层板分层缺陷产生的位置及原因，采用捷克 FEI 公司生产的 QUANTA 200 型扫描电子显微镜 (Scanning electron microscope, SEM) 来观测电磁冲孔的横截面微观形貌。试验所用超声 C 扫描设备如图 3 所示。

通过超声 C 扫描设备虽然能够检测板料整体的分层损伤情况，但是针对层间分层损伤方面的评价仍有所欠缺，因此采用基于有限元数值模拟的方式进行层间分层损伤的评估。所用有限元软件为 ABAQUS 2017，由于圆孔为轴对称图形，为节约计算资源，采用三维 1/4 简化模型，如图 4 所示。其中，冲头、压板和凹模采用 C3D8R 六面体网格单元，并设置为刚体。CFRP/AI 夹层板中，碳纤维和铝合金部分也采用 C3D8R 六面体网格单元，为了模拟出板料层间分层损伤，需在碳纤维层与层之间及碳纤维与

铝合金层之间插入粘结层单元 (Cohesive 单元)，插入的单元类型为 COH3D8 单元。

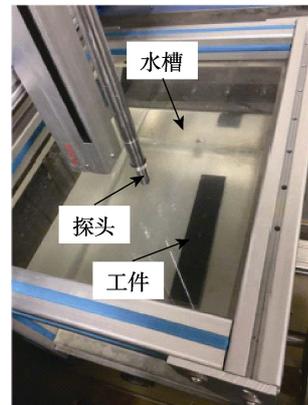


图 3 试验所用超声 C 扫描设备

Fig.3 Ultrasonic C-scan equipment used in the experiment

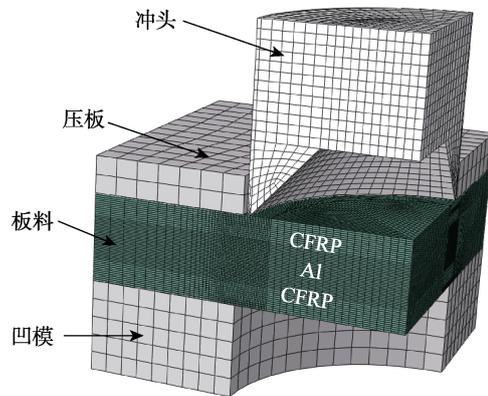


图 4 有限元数值模型

Fig.4 The finite element numerical model

## 2 结果与分析

### 2.1 板料分层损伤

分层损伤是纤维增强复合材料在加工过程中最主要也是最常见的缺陷<sup>[25]</sup>。文中采用超声 C 扫描技术来测量 CFRP/AI 夹层板的分层缺陷，并通过计算分层因子，来量化评估不同放电能量下板料的分层损伤。由 Duan<sup>[24]</sup>和 TSAO<sup>[26]</sup>的研究可知，最大分层因子  $F_d$  和等效分层因子  $F_{ed}$  是最常见的复合材料分层缺陷的评价指标，其计算方法如式 (1—2) 所示。

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}} \quad (1)$$

$$F_{ed} = \frac{D_e}{D_{nom}} \quad (2)$$

式中： $D_{max}$  为分层区域的最大直径； $D_{nom}$  为加工孔的公称直径； $D_e$  为损伤区域等效直径，其计算方法如式 (3) 所示。

$$D_e = 2\sqrt{\frac{A_d + A_{nom}}{\pi}} \quad (3)$$

式中： $A_d$ 为损伤区域面积； $A_{nom}$ 为加工孔的公称面积。

图5为超声C扫描检测结果，每一幅分层图像都由一组与CFRP/Al夹层板密度相对应的彩色标尺（0~100、百分制、从蓝色到红色）表示。理论上，蓝色区域（在理想条件下为圆形）的直径代表冲孔的公称直径。由于未及时切断纤维的存在和超声检测的边界效应，蓝色区域的形状实际上是不规则的<sup>[24]</sup>，因此，文中蓝色区域的最大直径被认为是冲孔的公称直径。相应地，红色区域代表的是母材的超声C扫描图像，而蓝色和红色之间的过渡区域则代表冲孔损伤区域。

两种分层因子模型（ $F_d$ 模型和 $F_{ed}$ 模型）在损伤区域轮廓近似为圆环时可以得出相似的结论。当损伤区域形状不规则时，两种损伤模型对CFRP/Al夹层板损伤的评估则存在一定的差异。 $F_d$ 模型往往高估了损伤程度，同时 $F_d$ 模型也很容易受到局部损伤的影响，因此无法代表实际冲孔造成的分层损伤。与 $F_d$ 模型相反， $F_{ed}$ 模型倾向于低估损伤程度，尽管其基于超声自动成像检测系统测量了真实损伤面积，但是其弱化了局部损伤对板料整体性能的影响，因此，采用两种分层模型是合适且互补的。

图6为不同放电能量下CFRP/Al夹层板的分层因子。可以看出，就 $F_{ed}$ 模型而言，随着放电能量的增加，板料的分层因子逐渐减小，说明提高放电能量能够一定程度上抑制分层缺陷的产生。整体而言， $F_d$ 模型计算的分层因子均大于 $F_{ed}$ 模型，该结果与上文的分析一致。具体到不同放电能量，从4 kJ到6 kJ， $F_d$ 模型计算的结果与 $F_{ed}$ 模型一致，即板料的分层因子随放电能量的增加而减小。当能量提升至7 kJ时，板料的最大分层因子 $F_d$ 却骤然上升，甚至超过了放电能量为4 kJ时的最大分层因子，造成这一结果可能是因为当放电能量为7 kJ时，高速载荷作用下，对板料局部区域造成损伤，上述分析在图5中能够得到体现。

由上文可知，基于 $F_d$ 模型和 $F_{ed}$ 模型计算的分层因子之间存在一定的差距。通过观察图5和图6可以发现，分层损伤区域沿圆周的分布越不均匀， $F_d$ 和 $F_{ed}$ 分层因子之间的差距越大。因此，单纯计算 $F_d$ 和 $F_{ed}$ 分层因子有时可能无法得出一个令人信服的评估结果（甚至有时可能得出完全相反的结论）。为了弥补 $F_d$ 模型和 $F_{ed}$ 模型的缺陷，Duan等<sup>[24]</sup>计算了 $F_{ed}$ 与 $F_d$ 的比值（ $F_{ed}/F_d$ ）来评估分层损伤的均匀性，作为冲孔分层缺陷的一个辅助评价指标。很明显， $F_{ed}/F_d$ 是一个小于等于1的正数（因为 $D_e < D_{max}$ ）， $F_{ed}/F_d$ 越接近于1，表明损伤区域的分布越均匀。由图6可

知，从4 kJ到6 kJ， $F_{ed}/F_d$ 随放电能量的增加而增加，说明在该放电能量范围内，提升放电能量能够得到较为均匀的分层区域分布。当放电能量为7 kJ时， $F_{ed}/F_d$ 的值最小。综合考虑 $F_d$ 和 $F_{ed}$ 分层因子及损伤区域的均匀性可以得出，在6 kJ放电能量下，CFRP/Al夹层板的分层损伤最小且分布较为均匀，能够得到较为优良的冲孔质量。

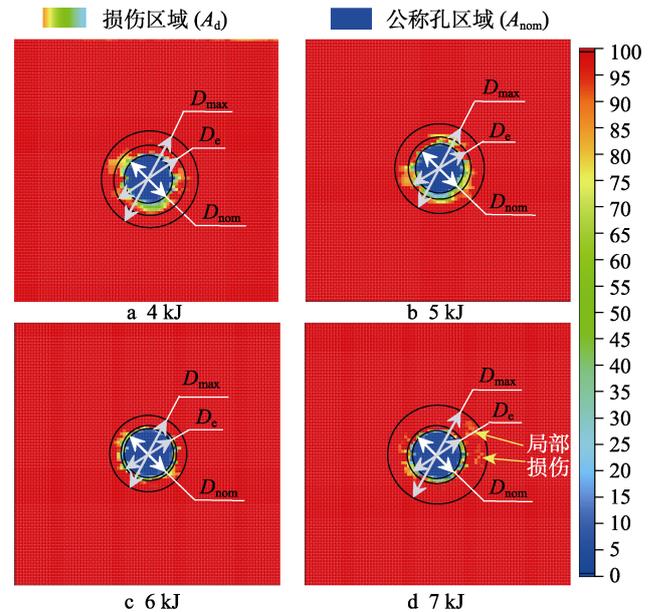


图5 超声C扫描检测结果

Fig.5 The results of ultrasonic C-scan detection

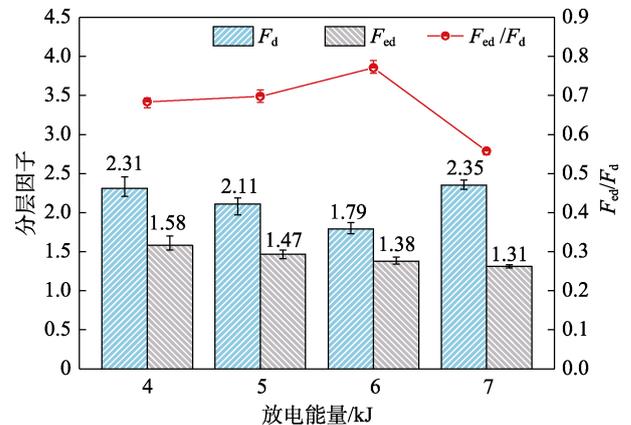


图6 不同放电能量下的分层因子

Fig.6 The delamination factor under different discharge energies

## 2.2 横截面微观形貌

为了进一步探索不同放电能量对CFRP/Al夹层板分层缺陷的影响，采用切割机将试样沿其中心平面对半切开，然后借助扫描电子显微镜观测横截断面的微观形貌。图7展示了不同放电能量下的横截面微观形貌。可以看出，CFRP/Al夹层板冲孔件的横截断面有很明显的区域划分，根据冲孔表面的平整度，大致可以分为平滑区和粗糙区两部分。此外，可以很明

显地看出，在电磁冲裁载荷下，铝合金夹心层有着和常规冲孔类似的断面轮廓，即圆角带、光亮带、断裂带和毛刺。反观碳纤维层，可以看出顶部碳纤维层和底部碳纤维层有明显的差异。顶部 4 层碳纤维在以剪切载荷为主（也伴随着拉伸和弯曲载荷）的载荷作用下，形成了与板料垂直的光滑表面；而底部碳纤维层轮廓形成于冲孔末期，材料在冲头和凹模刃口附近形成两处微小裂纹，并沿最大剪应变速度方向向板料内部延伸，当两条裂纹相遇时，产生了一个较为粗糙的撕裂面。因此，平滑区又由 3 个部分组成，即顶部碳纤维层、铝合金夹心层圆角带、铝合金夹心层光亮带。粗糙区也由 3 部分组成，分别是铝合金夹心层断裂带、铝合金夹心层毛刺及底部碳纤维层。值得注意的是，在顶部碳纤维层与铝合金夹心层之间会产生较为明显的分层损伤。

为了探明分层损伤形成的原因，获取了顶部碳纤维层与铝合金夹心层交界区域的微观形貌局部放大图，如图 8 所示。可以看出，顶部第 4 层碳纤维（0°纤维）和铝合金层顶部（圆角带）均发生了明显的弯曲变形，且由于变形程度的差异，产生了分层损伤。造成上述差异的原因，主要有以下两点：一方面，碳纤维和铝合金材料在物理特性上存在一定差异，导致

在电磁冲裁载荷作用下，二者的变形并不同步；另一方面，顶部第 4 层碳纤维（0°纤维）在发生弯曲变形后，当载荷消失以后，在残余应力的作用下会出现回弹现象，尽管铝合金材料也存在类似的回弹现象，但是较不明显，因此产生了分层损伤。同时，通过图 8 不难发现，分层损伤的程度与铝合金圆角带的高度存在一定联系。为了调查分层损伤与圆角带高度之间的联系，测量了不同放电能量下铝合金断面圆角带的高度，相应结果如图 9 所示。可以看出，随着放电能量的增加，铝合金断面的圆角带高度逐渐降低。产生这一结果的原因在于，在高速电磁载荷的作用下，材料的应变量和应变速率均较高，发生剧烈的塑性变形，导致位错的密度增加，位错运动的阻力增大，引起变形抗力增加，为材料继续塑性变形造成困难，从而提高了金属的强度，即发生了应变硬化（也称形变强化、加工硬化），且随着应变量和应变速率的升高，应变强化效应也越来越明显<sup>[27-29]</sup>。因此，当放电能量较高时，冲裁速度更快，材料的应变量和应变速率较高，铝合金由于硬化效应而更难发生弯曲变形，所以圆角带的高度较短。结合 2.1 节的相关结论不难发现，铝合金圆角带高度越短，顶部碳纤维层与铝合金夹心层之间的分层损伤就越小。

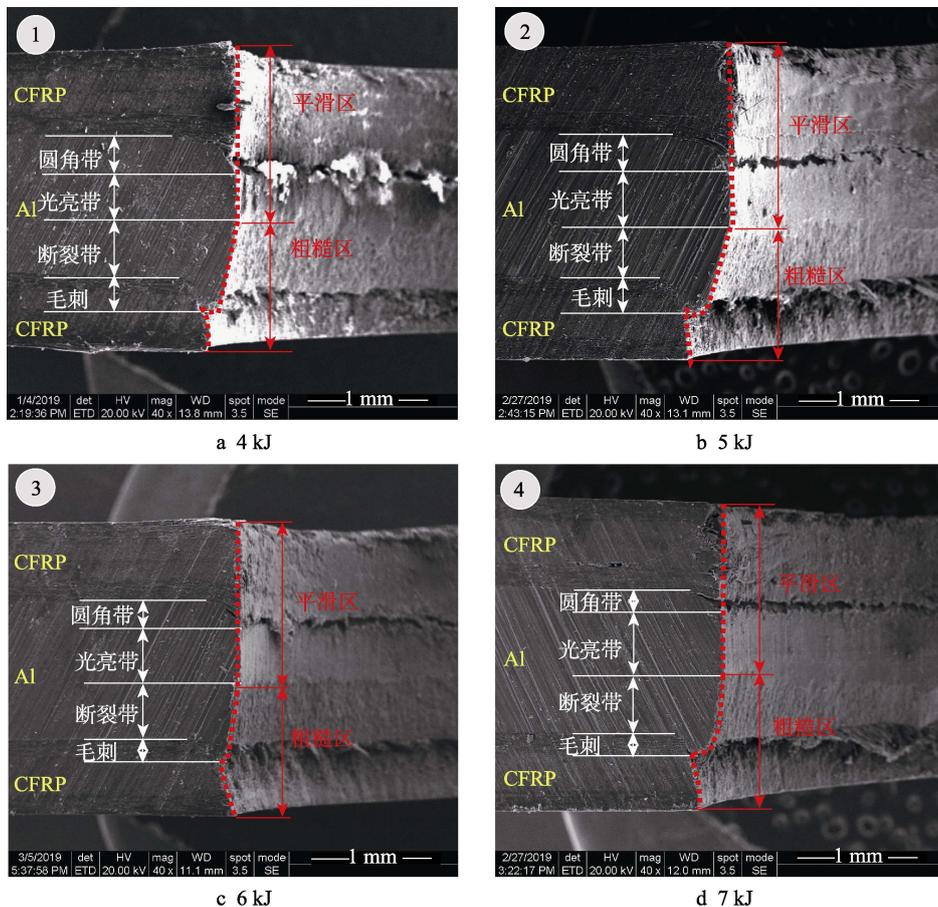


图 7 不同放电能量下的横截面微观形貌

Fig.7 Microstructure of cross section under different discharge energies

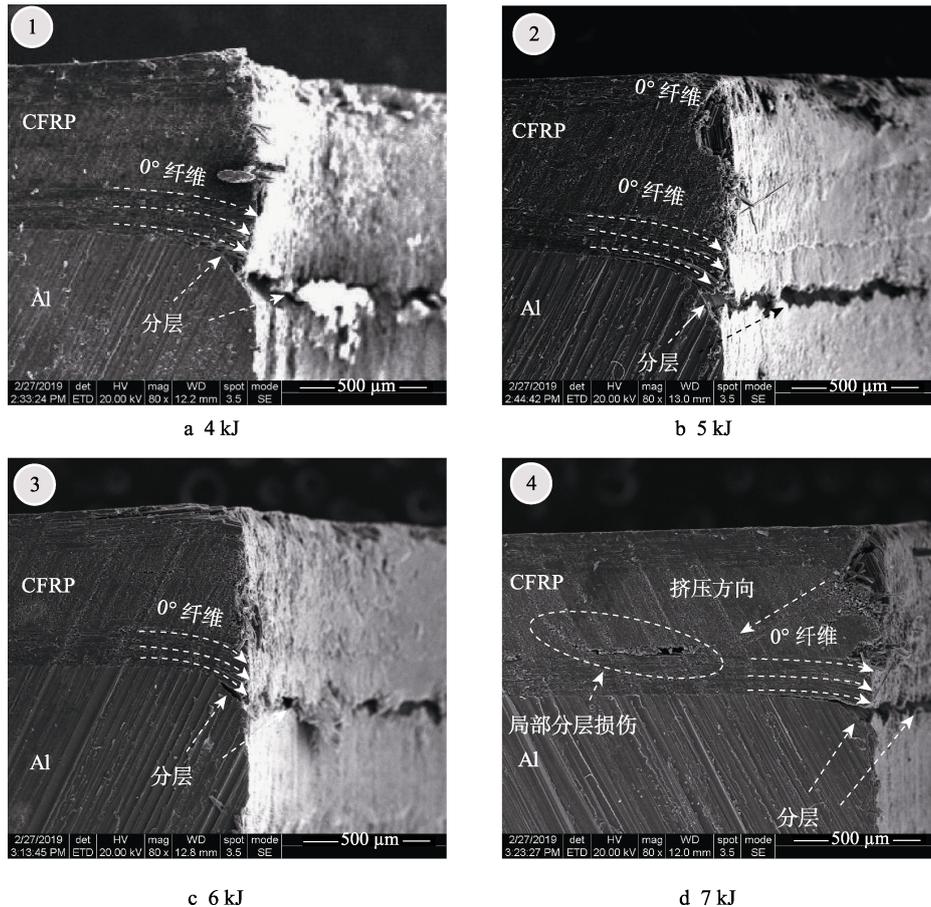


图 8 微观形貌局部放大  
Fig.8 The detailed view of microstructure

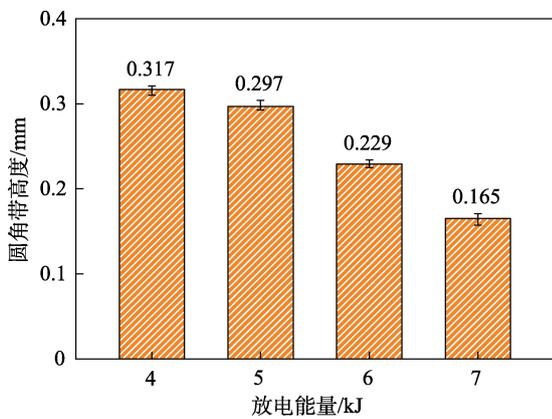


图 9 铝合金圆角带的高度  
Fig.9 The height of rollover zone for aluminum alloy layer

特别地,当放电能量为 7 kJ 时,在冲孔横截断面能够观察到额外的分层损伤,如图 8 区域 4 所示。该分层损伤出现在 90°纤维(顶部第 2,3 层碳纤维)与 0°纤维(顶部第 4 层碳纤维)之间,而在 4,5,6 kJ 放电能量下,并未观察到上述分层损伤。由上文可知,在电磁冲裁过程,材料会发生弯曲变形。对顶部碳纤维层而言,弯曲变形的程度受铝合金圆角带高度的影响。当放电能量为 7 kJ 时,铝合金层圆角带所占比例很小,留给顶部碳纤维层变形的空间有限,在冲裁速

度较快的情况下,90°纤维层内部由于没有足够的材料流动空间而被斜向挤压,分层损伤由此产生。上述现象正好解释了 2.1 节中在  $F_d$  模型下能量提升至 7 kJ 时,板料的分层因子骤然上升的原因,上述分层损伤即为超声 C 扫描检测结果(见图 5)所表示的局部损伤。

### 2.3 层间分层损伤

通过超声 C 扫描技术和扫描电子显微镜虽然能够评估板料整体的分层损伤情况,但是针对层间分层损伤方面的评价仍有所欠缺。无论是超声 C 扫描技术还是扫描电子显微镜微观检测方法,从原材料准备,经过试验、制样,再到分层损伤检测的全过程,所消耗的时间及经济成本是不可忽视的,因此,如果能够通过较为经济的方式,完成不同工艺参数下板料分层缺陷的评估,并对实际生产提供指导作用,将是一项相当有意义的工作。文中借助数值模拟的方式对 CFRP/Al 夹层板进行层间分层损伤的评估,评估结果如图 10 所示。需要说明的是,为了能够更加直观地看出损伤区域的形状,将 1/4 圆进行镜像补全为完整圆形,其中完全损伤的单元已被删除。此外,为了量化评估,基于  $F_d$  模型计算各层间分层因子,相应结果如图 11 所示。

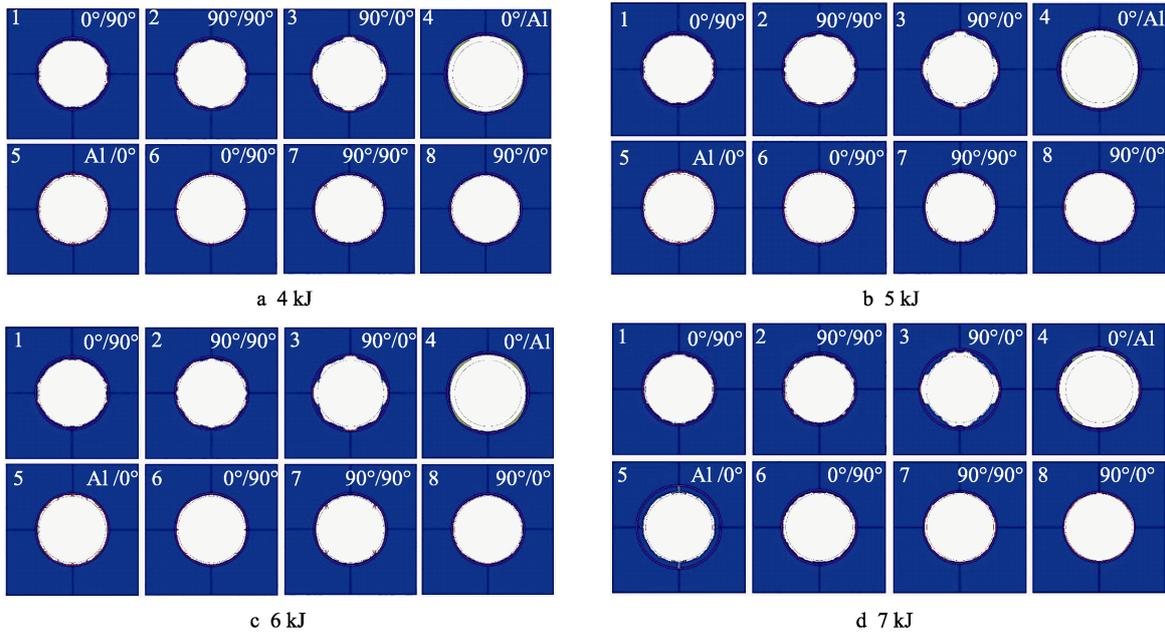


图 10 不同放电能量下的层间分层损伤

Fig.10 The interlaminar delamination damage under different discharge energies

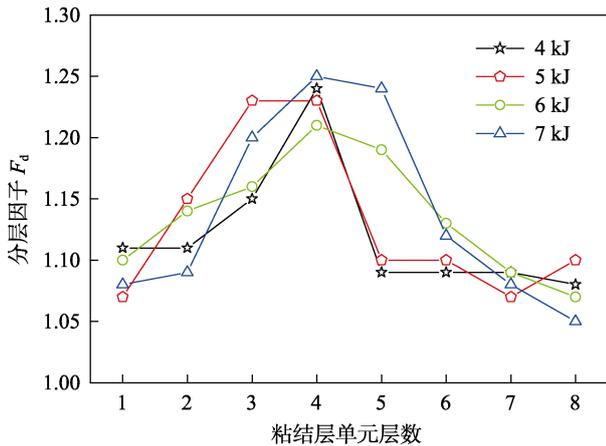


图 11 不同放电能量下的层间分层因子

Fig.11 The interlaminar delamination factor under different discharge energies

由图 10 可知，CFRP/Al 夹层板各层间的分层损伤情况不尽相同。可以看出，前 3 层粘结层单元为顶部 4 层碳纤维层之间的粘结单元，其损伤区域较不规则。由前文可知，顶部碳纤维层受到弯曲变形而产生分层，同时由于纤维铺层的方向变化造成材料受力状态沿着圆周方向不均匀，所以损伤区域也在圆周方向出现变化。从第 1 层到第 4 层，纤维弯曲变形的程度逐渐加剧，分层损伤程度也逐渐增大。从图 11 可以看到，4 种放电能量下，最大分层因子都出现在第 4 层粘结单元处(即顶部碳纤维层与铝合金层交界处)。相较于 2.1 节超声 C 扫描检测结果，数值模拟所测分层因子偏小，造成这个结果主要是由于在实际冲孔过程中受各种因素的影响，会加剧损伤程度。至于底部碳纤维层，在冲裁过程中主要在剪切载荷(沿最大剪应变速度方向)的作用下撕裂，并没有发生弯曲变形，

因此分层损伤较小，而且，底部碳纤维层损伤区域的边界接近于纤维断裂的边界，因此损伤分布较为均匀。同时，由于底部碳纤维层断裂后形成剪切带从凹模刃口处向板料内侧延伸(偏向孔轴线方向)，并在与铝合金交界处终止，所以底部碳纤维层的分层损伤从第 5 层到第 8 层单元逐渐减小。整体而言，从冲孔入口到出口，层间分层损伤呈现出先增大后减小的趋势。

### 3 结语

从板料分层损伤、横截面微观形貌及层间分层损伤等方面，研究了不同放电能量对 CFRP/Al 夹层板电磁冲孔分层缺陷的影响，主要结论如下。

1) 当放电能量为 4~6 kJ 时，板料的等效分层因子和最大分层因子 ( $F_{ed}$  和  $F_d$ ) 均随放电能量的增加而减小。当放电能量为 7 kJ 时，板料的等效分层因子 ( $F_{ed}$ ) 仍然呈下降趋势，然而由于高速载荷作用下局部损伤的存在，板料的最大分层因子 ( $F_d$ ) 骤然上升，并超过了放电能量为 4 kJ 时的最大分层因子。总体来说，在 6 kJ 放电能量下，能够获得较为优良的冲孔质量。

2) CFRP/Al 夹层板冲孔件的横截面大致可以分为平滑区和粗糙区两部分，其中平滑区包括顶部碳纤维层、铝合金层圆角带和光亮带，粗糙区包括底部碳纤维层、铝合金层断裂带和毛刺。对于所有放电能量，顶部碳纤维层与铝合金层之间会产生较为明显的分层损伤。特别地，当放电能量为 7 kJ 时，在高速载荷作用下会产生局部分层损伤。

3) CFRP/Al 夹层板分层缺陷产生的主要原因是

顶部第4层碳纤维(0°纤维)和铝合金层顶部(圆角带)变形程度有差异。造成上述差异的原因,一方面是因为碳纤维和铝合金材料在物理特性上存在一定差异,导致在电磁冲裁载荷作用下,二者的变形不同步;另一方面是因为顶部第4层碳纤维(0°纤维)的回弹现象较铝合金层更明显。特别地,当放电能量为7 kJ时,顶部90°纤维层内部由于没有足够的材料流动空间而被斜向挤压,局部分层损伤由此产生。

4) CFRP/Al 夹层板各层间的分层损伤情况不尽相同。对于顶部碳纤维层,从第1层到第4层,分层损伤程度逐渐增大。对于底部碳纤维层,分层损伤从第5层到第8层单元逐渐减小。整体而言,从冲孔入口到出口,层间分层损伤呈现出先增大后减小的趋势,最大分层损伤出现在第4层粘结单元处(即顶部碳纤维层与铝合金层交界处)。

#### 参考文献:

- [1] 胡斌. 汽车行业发展对轻质结构部件的需求与展望[J]. 精密成形工程, 2020, 12(3): 120—124.  
HU Bin. Demand and Prospect for Lightweight Structural Components in Automotive Industry[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(3): 120—124.
- [2] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 1—23.  
LI Yong-bing, MA Yun-wu, LOU Ming, et al. Advances in Welding and Joining Processes of Multi-Material Lightweight Car Body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 1—23.
- [3] FANG X, ZHANG F. Hybrid Joining of a Modular Multi-Material Body-In-White Structure[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 275: 116351.
- [4] JIANG H, ZENG C, LI G, et al. Effect of Locking Mode on Mechanical Properties and Failure Behavior of CFRP/Al Electromagnetic Riveted Joint[J]. Composite Structures, 2020, 257: 113162.
- [5] CUI J, LIAO H, DUAN L, et al. Experimental Investigation on Electromagnetic Punching Process of Hybrid CFRP/Al Stacks under Different Discharge Energies[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 153: 106789.
- [6] ZITOUNE R, KRISHNARAJ V, COLLOMBET F. Study of Drilling of Composite Material and Aluminium Stack[J]. Composite Structures, 2010, 92: 1246—1255.
- [7] GENG H, SUN L, LI G, et al. Fatigue Fracture Properties of Magnetic Pulse Welded Dissimilar Al-Fe Lap Joints[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 121: 146—154.
- [8] BUKHARI S M, KANDASAMY J, HUSSAIN M M. Investigations on Drilling Process Parameters of Hybrid Composites with Different Stacking Sequence[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4: 2184—2193.
- [9] TAKETA I, USTARROZ J, GORBATIKH L, et al. Interply Hybrid Composites with Carbon Fiber Reinforced Polypropylene and Self-Reinforced Polypropylene[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41: 927—932.
- [10] DHAND V, MITTAL G, RHEE K Y, et al. A Short Review on Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 73: 166—180.
- [11] SANDA A, ARRIOLA I, NAVAS V G, et al. Ultrasonically Assisted Drilling of Carbon Fibre Reinforced Plastics and Ti6Al4V[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 22: 169—176.
- [12] KUO C, WANG C, LIU M. Interpretation of Force Signals into Mechanical Effects in Vibration-Assisted Drilling of Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP)/Aluminium Stack Materials[J]. Composite Structures, 2017, 179: 444—458.
- [13] LIANG X, WU D, GAO Y, et al. Investigation on the Non-Coaxiality in the Drilling of Carbon-Fibre-Reinforced Plastic and Aluminium Stacks[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 125: 1—10.
- [14] YAO L, WANG C Z, HE W T, et al. Influence of Impactor Shape on Lowvelocity Impact Behavior of Fiber Metal Laminates Combined Numerical and Experimental Approaches[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 145: 106399.
- [15] JIANG H, CONG Y, ZHANG X, et al. Fatigue Degradation after Salt Spray Ageing of Electromagnetically Riveted Joints for CFRP/Al Hybrid Structure[J]. Materials & Design, 2018, 142: 297—307.
- [16] JIANG H, SUN L Q, DONG D Y, et al. Microstructure and Mechanical Property Evolution of CFRP/Al Electromagnetic Riveted Lap Joint in a Severe Condition[J]. Engineering Structures, 2019, 180: 181—191.
- [17] KRISHNARAJ V, ZITOUNE R, COLLOMBET F. Comprehensive Review on Drilling of Multi-Material Stacks[J]. Journal of Machining and Forming Technologies, 2010, 2: 1—32.
- [18] KLOCKE F, SHIROBOKOV A, KERCHNAWE S, et al. Experimental Investigation of the Hole Accuracy, Delamination, and Cutting Force in Piercing of Carbon Fiber Reinforced Plastics[J]. Procedia CIRP, 2017, 66: 215—220.
- [19] GAUGEL S, SRIPATHY P, HAEGER A, et al. A Comparative Study on Tool Wear and Laminate Damage in Drilling of Carbon-Fiber Reinforced Polymers (CFRP) [J]. Composite Structures, 2016, 155: 173—183.
- [20] TSAO C C, HOCHENG H. Taguchi Analysis of Delamination Associated with Various Drill Bits in Drilling of Composite Material[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44: 1085—1090.
- [21] VOISEY K T, FOUQUET S, ROY D, et al. Fibre Swelling during Laser Drilling of Carbon Fibre Composites[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44: 1185—1197.

- [22] THIÉBAUD R, DREZET J M, LEBET J P. Experimental and Numerical Characterisation of Heat Flow during Flame Cutting of Thick Steel Plates[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214: 304—310.
- [23] CHAMARTHI S, REDDY N S, ELIPEY M K, et al. Investigation Analysis of Plasma Arc Cutting Parameters on the Unevenness Surface of Hardox-400 Material[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 64: 854—861.
- [24] DUAN L, JIANG H, ZHANG X, et al. Experimental Investigations of Electromagnetic Punching Process in CFRP Laminate[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2021, 36(2): 223—234.
- [25] GEIER N, SZALAY T. Optimisation of Process Parameters for the Orbital and Conventional Drilling of Uni-Directional Carbon Fibre-Reinforced Polymers (UD-CFRP)[J]. *Measurement*, 2017, 110: 319—334.
- [26] TSAO C C, KUO K L, HSU I C. Evaluation of a Novel Approach to a Delamination Factor after Drilling Composite Laminates Using a Core-Saw Drill[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 59: 617—622.
- [27] 孙鼎伦, 陈全明. 机械工程材料学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1992: 32—33.
- SUN Ding-lun, CHEN Quan-ming. *Mechanical Engineering and Materials Science*[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1992: 32—33.
- [28] DUAN L, FENG X, CUI J, et al. Effect of Angle Deflection on Deformation Characteristic and Mechanical Property of Electromagnetic Riveted Joint[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112: 3529—3543.
- [29] 高玉魁, 陶雪菲. 高速冲击表面处理对金属材料力学性能和组织结构的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(4): 4—29.
- GAO Yu-kui, TAO Xue-fei. A Review on the Influences of High Speed Impact Surface Treatments on Mechanical Properties and Microstructures of Metallic Materials[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(4): 4—29.