

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.09.021

含孔复合材料层合板的压缩性能研究

马少华¹, 费昺强¹, 回丽^{1,2}, 许良¹, 韩放¹

(1. 沈阳航空航天大学机电工程学院, 沈阳 110136; 2. 沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点实验室, 沈阳 110136)

摘要: 对不同圆孔直径和不同孔形的含孔碳纤维增强环氧树脂基复合材料层合板进行了压缩实验, 分析比较了破坏前后的形貌变化, 研究了孔的直径和形状对复合材料层合板压缩强度的影响。结果表明, 对于含圆孔的复合材料层合板, 随着孔径的增大, 压缩强度下降明显, 二者之间并不满足线性关系。对于不同孔形的复合材料层合板, 含圆孔的压缩强度最大, 其次是椭圆孔, 然后是方孔, 最小的是菱形孔。在含孔复合材料结构设计过程中, 应尽量使用圆孔。含孔复合材料层合板的破坏模式都为过孔破坏, 破坏都发生在应力集中的区域, 并且断裂都是沿着应力集中最大的方向扩展。侧面断口主要为剪切失效, 有分层和屈曲的特征。

关键词: 含孔复合材料层合板; 圆孔直径; 孔形; 压缩强度; 破坏模式

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)09-0106-04

Study on Compressive Properties of Composite Laminates with a Hole

Ma Shaohua¹, Fei Bingqiang¹, Hui Li^{1,2}, Xu Liang¹, Han Fang¹

(1. College of Electromechanical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang, 110136, China)

Abstract : According to the compression test of carbon fiber reinforced epoxy resin matrix composite laminates with different hole diameters and shapes, the change of the microscope before and after damage was analyzed and compared, the influences of different hole diameters and shapes on compressive strength of the composite laminates were studied. The results show that with the increase of hole diameters, the compressive strength decrease gradually, but the relationship is not linear. For the different hole shapes of the composite laminates, the compressive strength of circular hole is biggest and followed by ellipse hole, square hole and rhombus hole. In the composite structure design, the circular hole should be used. The failure modes of composite laminates with hole are hole failure, the damage is occurred in the area of stress concentration, and the fracture is extend in the direction of the stress concentration of the largest. The side of fracture morphology is mainly shear failure, and the characteristic of buckling and delaminating.

Keywords : composite laminate with hole ; hole diameter ; hole shape ; compress strength ; failure mode

碳纤维增强复合材料具有高比强度、高比模量,并在耐疲劳性能、冲击性能、耐高低温性能及耐腐蚀性能等方面都有显著的优点,作为一种性能优异的结构材料被广泛应用于航空航天领域^[1-3]。

碳纤维增强复合材料在实际使用过程中与金属材料一样,经常会遇到开孔的问题,金属材料由于各向同性的特点,开孔的问题比较简单,根据应力、应变集中的特点,普遍采用圆形或椭圆形开口^[4]。由于检查、拆装、维护的需要,在碳纤维增强复合材料的结构件中,经常会存在一些孔,如用于螺栓连接的螺栓孔,用于检查的通孔,以及装配孔等,开孔后部分碳纤维被完全切断,而这些孔的存在会对碳纤维增强复合材料的结构强度产生一定的影响,这种影响明显高于金属结构。碳纤维增强复合材料由纤

维和基体组成,开孔会产生严重的应力集中,在孔的周围会出现纤维断裂、基体破坏和分层等损伤形式。碳纤维增强复合材料结构对损伤非常敏感,在损伤状态下其强度会严重降低,特别是压缩强度,因此,碳纤维增强复合材料的开孔压缩性能一直是学者研究的重点^[5]。对此,国内外研究人员已采用多种方法展开了大量的研究工作。

卓越等^[6]采用三种铺层方式的开孔层板进行压缩实验研究,对压缩载荷作用下开孔层板的损伤起始、损伤演化进行了观察和对比,研究结果表明,含45°和90°铺层相邻位置的开孔层板渐进损伤过

联系人: 马少华, 硕士, 工程师, 主要从事复合材料性能测试方面的研究

收稿日期: 2015-07-07

程较为明显,在压缩载荷下会较早地出现损伤。崔海坡等^[7]对不同含孔复合材料层合板在压缩载荷作用下的逐渐破坏过程进行了分析,结果表明,应用三维逐渐积累损伤理论和分析技术,可以较准确地模拟含孔复合材料层合板在压缩载荷作用下的逐渐破坏过程。欧阳林辉等^[8]在高温环境下对开孔复合材料层合板进行压缩性能实验及其损伤的有限元分析,结果表明,复合材料层合板开孔压缩有限元损伤分析能够很好地模拟压缩过程中的损伤扩展和最终破坏,并预测了复合材料层合板的压缩失效模式和压缩强度。C. H. Wang^[9]等对含孔复合材料结构的剩余强度进行了研究,结果表明,随着损伤的加重,含孔复合材料的剩余强度显著降低。J. Lee 等^[10]通过一系列的实验研究了层合板厚度对复合材料开孔层合板压缩性能的影响,结果表明,随着试样厚度的增加开孔压缩强度逐渐增大。

笔者针对国产编织碳纤维增强环氧树脂基复合材料,采用不同孔径和形状的含孔试样进行了压缩性能实验,分析了孔的直径和形状对层合板压缩强度的影响,并借助体式显微镜观察了试样破坏前后的形貌,分析比较了破坏前后的形貌变化,以期对复合材料的结构设计和性能提供数据参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

3K 编织碳纤维布:江苏恒神股份有限公司;

环氧树脂:BA9916- II,北京航空制造工程研究所。

1.2 主要设备及仪器

雕铣机:N-1325 型,沈阳广达科技发展有限公司;

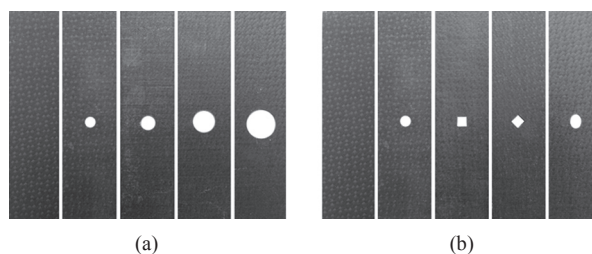
电子万能实验机:Instron 5982 型,美国 Instron 公司;

体式显微镜:WHX-2000 型,瑞士 Keyence 公司。

1.3 试样制备

预浸料按照 $[(45^\circ/-45^\circ)/(0^\circ/90^\circ)]_{4s}$ 进行铺层,采用热压罐法成型,制备碳纤维增强环氧树脂基复合材料层合板。固化工艺为:室温抽真空,真空度不低于 0.098 MPa,热压罐中施加的压力不低于 0.6 MPa,升温速率为 $2^\circ\text{C}/\text{min}$,至 180°C 保持 180 min,然后降温至 60°C 以下后卸压,降温速率为 $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 。利用复合材料雕铣机,将其加工成长为 300 mm、宽为 36 mm 的两种类型试样:一种是圆

孔径不同,直径分别为 0,6,10,15,20 mm;另外一种孔形不同,分别为未开孔、直径为 6 mm 的圆形,边长为 6 mm 的正方形、边长为 6 mm 的菱形、长轴为 8 mm 和短轴为 4 mm 的椭圆。两种类型的试样如图 1 所示。



a—不同孔径;b—不同孔形

图1 两种类型的试样

复合材料属于难加工材料,在加工孔的过程中,如果受到的轴向力过大就会引起分层等损伤,由于碳纤维属于脆性材料,在开孔过程中还会使孔的形状发生变化。采用金刚石钻头加工孔,孔周围没有裂纹产生,打磨后孔的边缘光滑、无毛刺,如图 2 所示,试样符合实验要求。

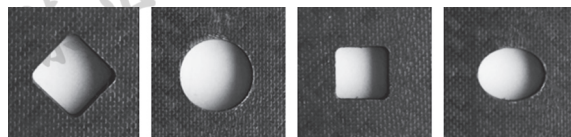


图2 孔边表面状态

1.4 性能测试

开孔复合材料的压缩强度依据 ASTM D6484 /D6484M- 2014 测试。实验过程中为了防止试样的整体屈曲失稳,采用了带边界支持的防失稳夹具,如图 3 所示。

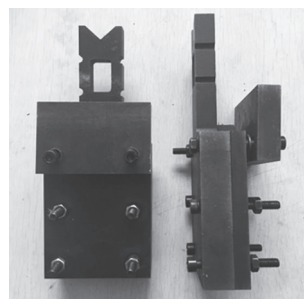


图3 防失稳夹具

用体式显微镜观察试样的断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 圆孔直径对复合材料层合板压缩强度的影响

圆孔直径对复合材料层合板压缩强度的影响如图 4 所示。

从图 4 可以看出,未开孔时复合材料层合板的

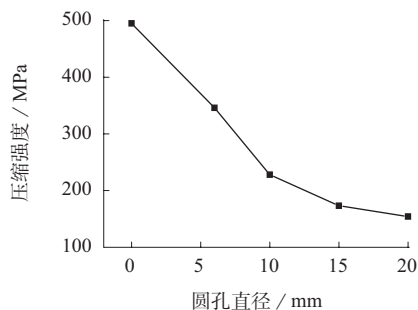


图4 圆孔直径对复合材料层合板压缩强度的影响

压缩强度为 495 MPa,随着圆孔直径的增大,复合材料层合板的压缩强度明显下降,二者之间并不满足线性关系,当圆孔直径为 10 mm 时出现拐点,随后复合材料层合板的压缩强度缓慢下降。这是因为在试样尺寸保持不变的情况下,随着圆孔直径的增大,孔的面积也逐渐增大,从而使试样受到的损伤也逐渐增大,最终使试样的承载能力,特别是承压的能力显著下降。当圆孔直径增大到 10 mm 之后,复合材料层合板的压缩强度缓慢下降,当圆孔直径为 20 mm 时,复合材料层合板的压缩强度仅为 154 MPa,仅是未开孔时的 31%;当圆孔直径为 6 mm 时,复合材料层合板的压缩强度为 346 MPa,复合材料层合板的压缩强度保持率为 70%,有着较高的保持率。可见,对于含圆孔的复合材料层合板来说,和未开孔时相比,圆孔的直径越小,复合材料层合板的压缩强度下降越小,保持率越高。因此,在实际的工程应用中孔径不宜过大。

2.2 孔形对复合材料层合板压缩强度的影响

孔形对复合材料层合板压缩强度的影响如图 5 所示。

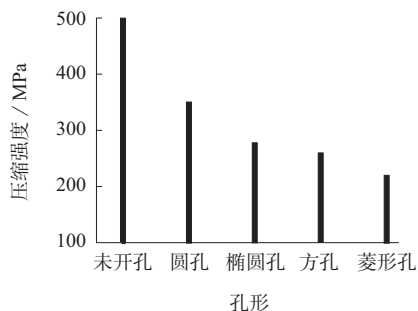


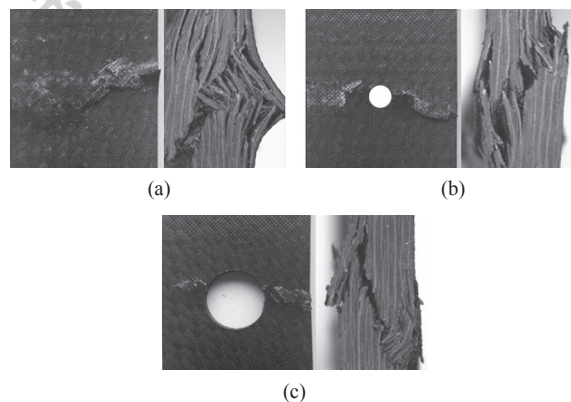
图5 孔形对复合材料层合板压缩强度的影响

从图 5 可以看出,对于复合材料层合板,圆孔的压缩强度最大,达到 346 MPa,与未开孔的压缩强度相比,保持率为 70%,其次为椭圆孔,压缩强度为 273 MPa,保持率为 55%,然后是方形孔,压缩强度为 255 MPa,保持率为 51%。压缩强度最小的是菱形孔,仅为 215 MPa,保持率仅为 43%。分析原因

是,圆孔边缘较为圆滑,应力集中较小;对于椭圆孔,当椭圆的短轴与载荷方向平行时,应力集中程度较圆形孔大,但其边缘比较圆滑,减少了应力集中;方孔的四个顶点处会出现较大的应力集中;对于菱形孔,在菱形的尖端会出现更大程度的应力集中,使得其更容易发生破坏。因此在含孔复合材料结构的设计过程中,最好不要使用方孔和菱形孔,尽量使用圆孔。对于必须采用方孔的情况,也要充分考虑结构的受力方向,使方孔的上下两对边要与载荷方向平行,以此来保证含孔结构的压缩强度的最大化^[11]。

2.3 断口形貌分析

复合材料层合板开孔压缩失效类型可分为脆性断裂、纤维压入和分层三种模式。脆性断裂是由孔边 0° 层压缩屈曲不稳定扩展引起的,其失效模式是纤维压缩屈曲;分层是由于层间损伤扩展引起的,层间损伤通常是由于基体损伤或者自由边应力不连续引起的,其失效模式是分层损伤;纤维压入则同时包括分层和纤维屈曲两种失效模式,但其失效模式仍是孔边纤维压缩屈曲^[5]。不同圆孔直径试样的破坏模式如图 6 所示。



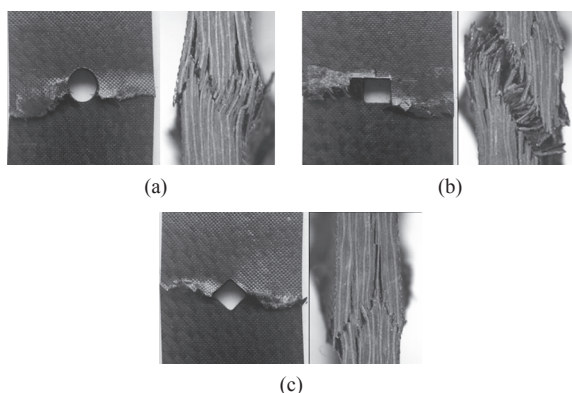
a—未开孔正面（左图）和侧面（右图）；
b—圆孔直径 6 mm 正面（左图）和侧面（右图）；
c—圆孔直径 15 mm 正面（左图）和侧面（右图）

图6 不同圆孔直径的断口形貌

从图 6 可以看出,未开孔试样在工作段发生破坏时,工作段有明显的纤维压入现象(见图 6a 左图),其余含孔试样的破坏形式都为过孔破坏,在孔的两边也存在明显的纤维压入现象(见图 6b 左图、图 6c 左图)。利用体式显微镜观察侧面断口形貌,未开孔试样可见大量的分层和纤维的断裂,纤维压缩屈曲特征明显(见图 6a 右图);孔径为 6 mm 的试样主要为剪切分层失效,有少量的屈曲特征(见图 6b 右图);孔径为 15 mm 的试样主要为剪切失效,有少量的分层,断面与加载方向约成 45° 角,可以观

观察到微屈曲等失效特征(见图6c右图)。

椭圆孔、方孔、菱形孔试样的断口形貌如图7所示。



a—椭圆孔正面(左图)和侧面(右图);
b—方孔正面(左图)和侧面(右图);
c—菱形孔正面(左图)和侧面(右图)

图7 椭圆孔、方孔、菱形孔试样的断口形貌

从图7可以看出,不同孔形的破坏模式也都为过孔破坏,破坏都发生在应力集中的区域,并且断裂都是沿着应力集中最大的方向扩展。利用体式显微镜观察试样的侧面形貌可以发现,椭圆孔的试样失效模式为剪切分层失效,有大量的分层和微屈曲特征(见图7a右图);方孔试样由于应力集中现象严重,发生了剪切屈曲失效,可见大量的弯折带(见图7b右图);菱形孔的试样可见少量的分层,呈现出楔形断口的特征(见图7c右图)。

3 结论

(1) 对于含圆孔的复合材料层合板,随着孔径的增大,其压缩强度下降明显,二者之间并不满足线性关系。

(2) 对于不同孔形的复合材料层合板,含圆孔的复合材料层合板的压缩强度最大,然后依次是椭圆孔、方孔,菱形孔的压缩强度最小,因此在含孔复合材料结构的设计过程中,最好不要使用方孔和菱形孔,尽量使用圆孔。

(3) 含孔复合材料层合板的破坏模式都为过孔破坏,破坏都发生在应力集中的区域,并且断裂都是沿着应力集中最大的方向扩展。侧面断口主要为剪切失效,有分层和屈曲的特征。

参考文献

- [1] 包建文,陈祥宝. 发动机用耐高温聚酰亚胺树脂基复合材料的研究进展[J]. 航空材料学报,2012,32(6):1-13.
Bao Jianwen, Chen Xiangbao. Advanced in high temperature polyimide resin matrix composites for aero engine [J]. Journal of Aeronautical Materials,2012,32(6):1-13.
- [2] 梁春华,李晓欣. 先进材料在战斗机发动机上的应用与研究趋势[J]. 航空材料学报,2012,32(6):32-36.
Liang Chunhua, Li Xiaoxin. Application and development trend of advanced materials for fighter engine [J]. Journal of Aeronautical Materials,2012,32(6):32-36.
- [3] 马立敏,张嘉振,岳广全,等. 复合材料在新一代大型民用飞机中的应用[J]. 复合材料学报,2015,32(2):317-322.
Ma Limin, Zhang Jiazhen, Yue Guangquan, et al. Application of composites in new generation of large civil aircraft[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2015,32(2):317-322.
- [4] 李翠敏. 三维编织复合材料开孔前后剪切性能[D]. 上海: 东华大学,2013.
Li Cuimin. Shearing properties of 3D braided composites with and without open-holes[D]. Shanghai:Donghua University,2013.
- [5] 关志东,黎增山,刘德博,等. 复合材料层板开孔压缩损伤分析[J]. 复合材料学报,2012,29(3):167-172.
Guan Zhidong, Li Zengshan, Liu Debo, et al. Damage analysis of open-hole compression laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2012,29(3):167-172.
- [6] 卓越,关志东,周睿,等. 复合材料开孔层板压缩渐进损伤实验研究[J]. 复合材料学报,2015,32(4):90-94.
Zhuo Yue, Guan Zhidong, Zhou Rui, et al. Investigation on the progressive damage of open-hole composite laminates under compression load[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2015,32(4):90-94.
- [7] 崔海波,温卫东,崔海涛,等. 含孔复合材料层合板在压缩载荷下的三维逐渐损伤[J]. 机械工程学报,2006,42(8):89-94.
Cui Haipo, Wen Weidong, Cui Haitao, et al. Three-dimensional progressive damage of laminated composites with a hole under compressive loading[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2006,42(8):89-94.
- [8] 欧阳林辉,霍世慧,汪帮耀. 高温下开孔复合材料层合板压缩实验及有限元分析[J]. 航空制造技术,2013(8):75-78.
Ouyang Linhui, Huo Shihui, Wang Bangyao. Compressive experiment and finite element analysis of open hole composites laminate at high temperature[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2013(8):75-78.
- [9] Wang C H, Gunnion A J, Orifici A C, et al. Residual strength of composite laminates containing scarfed and straight-sided holes[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing,2011,42(12):1951-1961.
- [10] Lee J, Soutis C. Thickness effect on the compressive strength of T800 / 924C carbon fibre-epoxy laminates[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,2005,36(2):213-227.
- [11] 李明,马力,吴林志,等. 含孔复合材料层合板拉伸强度研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(S1):1-5.
Li Ming, Ma Li, Wu Linzhi, et al. Tensile strength of composite laminated plate containing a hole[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2011,43(S1):1-5.