

文章编号:1007-9629(2022)08-0830-06

植物纤维金属层合板的抗低速冲击性能

赵艺桥, 于涛*, 郭逸纯, 沈轶鸥

(同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘要:为了提升植物纤维增强复合材料的冲击性能,采用亚麻纤维增强环氧树脂(FFRP)与具有较高韧性的铝合金薄板进行层间混杂,制得亚麻纤维铝合金层合板(FFML);另外,为了提升铝合金薄板表面积及其与树脂基体的界面结合能力,对铝合金薄板进行了一系列表面处理,并与FFRP层合板进行了对比试验.结果表明:铝合金薄板可以有效提升植物纤维增强复合材料的初始刚度、最大冲击载荷及吸收能,并使其破坏模式从脆性破坏转变为塑性破坏;与FFRP层合板相比,经表面处理过的FFML最大冲击载荷与吸收能量分别提升了136%和58%,损伤面积下降了84%.

关键词:植物纤维;纤维金属层合板;层间界面;低速冲击;能量吸收

中图分类号:TU599

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.08.009

Low Velocity Impact Performance of Plant Fiber Metal Laminates

ZHAO Yiqiao, YU Tao*, GUO Yichun, SHEN Yiou

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Flax fiber fabric and aluminum alloy sheet with relative high toughness were hybridized interlaminar in order to fabricate plant fiber metal laminate(FML), which promoted the impact properties of the composites. A series of surface treatments were carried out on aluminum alloy sheet to increase the specific surface area and enhance the interlayer bonding ability with matrix. The results show that the metal layer can effectively improve the initial stiffness, maximum impact load and energy absorption capacity of the composite, and change the failure mode of the composite from brittle failure to plastic failure. Compared with the flax fiber reinforced composite(FFRP) laminate, the maximum impact load and absorbed energy of fabricate flax fiber metal laminate(FFML) increase by 136% and 58%, respectively, and the damage area decreases by 84%.

Key words: plant fiber; fiber metal laminate; interlayer interface; low velocity impact; energy absorption

来源于农业产物的植物纤维具有较高的比强度和比模量、吸音隔热、环境友好等特点^[1-2],可用于制造结构功能一体化的绿色内饰结构.植物纤维增强复合材料在民机、汽车与建筑等领域均具有良好的发展前景^[3-5].但相比于人造纤维增强复合材料,较低的抗冲击强度限制了其作为主承载结构的应用^[6-8].

纤维金属层合板(FML)是金属薄板和纤维增强树脂预浸料交替铺设后,在一定温度和压力下固化成型的层间混杂复合材料^[9-10].FML具有密度小、冲

击性能好、疲劳寿命长和损伤容限高等特征^[11-12].其在低速冲击下的塑性变形十分明显,更易于确定损伤发生的位置.已有研究表明以金属为面板,剑麻纤维织物增强环氧树脂为芯材的纤维金属层合板的抗冲击性能相比剑麻纤维增强环氧树脂复合材料提高了5倍以上^[13].但是,由于采用了二次胶接的成型方式,其黏结性能较差^[14].因此,如果对金属及纤维表面进行改性,改善金属与纤维层间界面性能,将显著提升植物纤维增强复合材料的力学性能^[15-16].

收稿日期:2021-06-08; 修订日期:2021-07-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11872279)

第一作者:赵艺桥(1997—),女,重庆彭水人,同济大学硕士生.E-mail:1930904@tongji.edu.cn

通讯作者:于涛(1980—),男,吉林吉林人,同济大学教授,博士生导师,博士.E-mail:yutao@tongji.edu.cn

本研究主要针对植物纤维增强复合材料韧性较低的问题,采用亚麻纤维织物/铝合金薄板层间混杂的方法,在不损伤亚麻纤维自身结构和牺牲复合材料面内性能的基础上,从降低损伤面积、提升最大冲击载荷及吸收能量等方面来改善复合材料的抗低速冲击性能。

1 试验部分

1.1 试验材料

植物纤维采用比利时 LINEO 公司提供的单向亚麻纤维织物(面密度 200 g/m^2 ,厚度 0.18 mm);铝合金薄板采用日本轻金属株式会社生产的铝合金 Al2040-T3 薄板(密度 2.7 g/cm^3 ,厚度 0.2 mm);树脂基体采用上海众思实业有限公司提供的双酚 A 环氧树脂体系(EP, 牌号 E-51,环氧树脂、固化剂和促进剂的质量比为 $100:80:1$)。

1.2 铝合金薄板表面处理

首先使用钻床对铝合金薄板进行钻孔以增强树脂在制备层合板过程中的流动性,钻孔孔径 1 mm ,相邻两孔间隔 25 mm 。使用 250 颗粒度的打磨机沿金

属轧制方向进行打磨抛光;之后将其置于碱性溶液(30 g/L 氢氧化钠水溶液以及 30 g/L 碳酸钠水溶液)中在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 水浴中加热 1 min 进行碱处理,取出后用蒸馏水冲洗并干燥;再将其放入 400 g/L 硝酸水溶液中,在室温下浸泡 $2\sim 5 \text{ min}$ 后取出,用蒸馏水冲洗,随后浸入 $m(\text{FeSO}_4):m(\text{H}_2\text{SO}_4):m(\text{H}_2\text{O})$ 为 $15:37:48$ 的硫酸铁水溶液中,在 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 下浸泡 8 min 后取出,用蒸馏水冲洗^[17];最后将铝合金薄板浸泡在质量分数为 2% 的硅烷偶联剂(牌号为 KH550)水溶液中 10 min ,取出后在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥 1 h 待用^[18-19]。

1.3 复合材料的制备

采用热压成型工艺制备亚麻纤维铝合金层合板(FFML),并在相同工艺下制备亚麻纤维增强环氧树脂复合材料(FFRP)层合板作为参照组。制备前,将亚麻纤维织物放入烘箱中于 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘 4 h 以去除水分。FFML 与 FFRP 的铺层分别为 $[\text{Al}/0^\circ/90^\circ/\text{Al}/90^\circ/0^\circ/\text{Al}]$ 与 $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]$,铺层后在 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 下保温 30 min , $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 下保温 2 h ,具体铺层与成型工艺详见图 1。成型后的复合材料用铣床切割成 $70 \text{ mm}\times 70 \text{ mm}$ 的方板,FFML 与 FFRP 层合板的尺寸参数详见表 1。

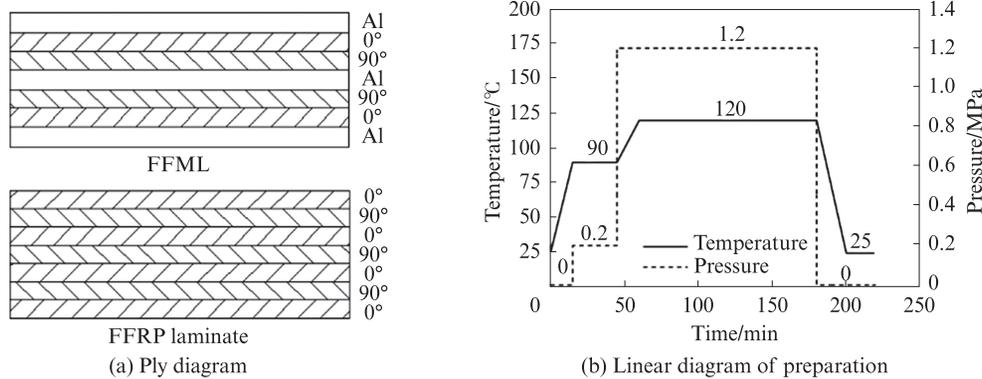


图1 FFML与FFRP层合板的铺层与成型工艺示意图

Fig. 1 Ply diagram and linear diagram of preparation of FFML and FFRP laminate

表1 FFML与FFRP层合板的尺寸参数

Table 1 Dimension parameters of FFML and FFRP laminate

Sample	Density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Volume fraction of metal/%	Thickness/mm
FFML	1.42	18	2.45 ± 0.10
FFRP	1.20	0	2.58 ± 0.23

1.4 测试与表征

采用落锤冲击试验机(Instron Ceast 9350)对FFML与FFRP层合板进行低速冲击测试。将试样置于内径为 50 mm 的圆环形支撑之上,冲头直径为 5 mm ,冲击能量为 10 J 。通过扫描电子显微镜(Zeiss, Ultra55)观察试样的表面形貌。

1.5 有限元模型

1.5.1 铝合金的本构模型

采用弹塑性模型对铝合金的弹塑性行为进行数值计算。其中,采用各向同性弹性和各向同性硬化模型分别描述铝合金的弹性和塑性行为。对于本研究中使用的铝合金 Al2040-T3 薄板,其杨氏模量 $E=73.1 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.34$,其各向同性硬化参数详见表 2。采用初始损伤、渐进损伤和最终破坏模型来模拟铝合金的损伤和破坏。通过 Abaqus 软件提供的剪切破坏模型和拉伸破坏模型以及两者的组合来模拟铝合金的高应变率变形。剪切破坏模型采用等效塑性应变作为破坏准则,拉伸破坏模型则采用静压作

表2 铝合金Al2040-T3薄板各向同性硬化参数
Table 2 Isotropic hardening data for the Al2040-T3

Yield stress/MPa	76	100	113	122	150	176	183	186
Plastic strain	0	0.007 4	0.011 7	0.020 0	0.036 3	0.070 0	0.100 0	0.200 0

为破坏准则。

1.5.2 FFRP的本构模型

采用能够模拟各向异性材料初始损伤和损伤演化的Abaqus模型对FFRP的弹脆性行为进行数值计算,包括张力下的纤维断裂、压缩时的纤维屈曲、横向拉伸和剪切作用下的基体开裂以及横向压缩和剪切下的基体破碎这4种失效模式。FFRP的线性损伤演化如图2所示,FFRP的正交各向异性弹性参数详见表3。表3中: E 表示弹性模量, ν 表示泊松比, G 表示剪切模量;下标1表示面内材料主方向,2表示面内垂直于材料主方向,3表示面外垂直于平面(1、2)方向。

1.5.3 有限元分析

采用Hashin失效判据来反映材料损伤失效的过程。一般采用接触算法和接触对算法来模拟接触和交互。为模拟冲击下FFRP与铝合金之间的相互作用,定义了相邻两层之间的一般接触相互作用,以及冲头表面与各层中心节点集之间的面-面接触对,其接触均定义为线性函数的(软化)接触关系。表4给出

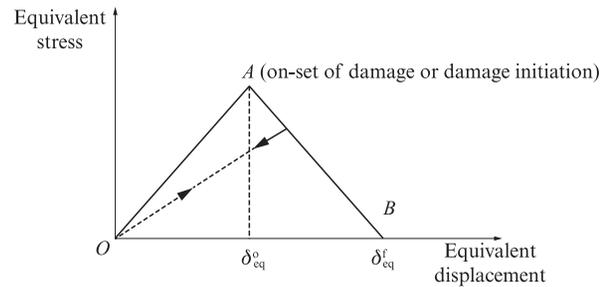


图2 FFRP的线性损伤演化
Fig. 2 Linear damage evolution of FFRP

表3 FFRP正交各向异性弹性参数
Table 3 Orthotropic elasticity data of FFRP

$E_{11}/$ GPa	$E_{22}/$ GPa	$E_{33}/$ GPa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	$G_{12}/$ GPa	$G_{13}/$ GPa	$G_{23}/$ GPa
10.1	6.2	6.2	0.12	0.12	0.14	4.5	4.5	2.7

了用于冲头与铝合金层(pro-Al)、冲头与亚麻纤维层(pro-FFRP)、铝合金层与亚麻纤维层(Al-FFRP),以及亚麻纤维层间(FFRP-FFRP)的接触相互作用特性。为了更精确地模拟冲击破坏过程,本模型采用如图3所示的典型网格划分方法。

表4 接触相互作用特征
Table 4 Contact interaction properties

Interaction	Contact algorithm	Mechanical constraint formulation	Friction formulation	Friction coefficient	Pressure-overclosure	Contact stiffness/MPa
Pro-Al	Contact pair	Kinematic	Penalty	0.10	Linear	0.1
Pro-FFRP	Contact pair	Kinematic	Penalty	0.15	Linear	0.5
Al-FFRP	General contact	Penalty	Penalty	10.00	Linear	10 000.0
FFRP-FFRP	General contact	Penalty	Penalty	100.00	Linear	15 000.0

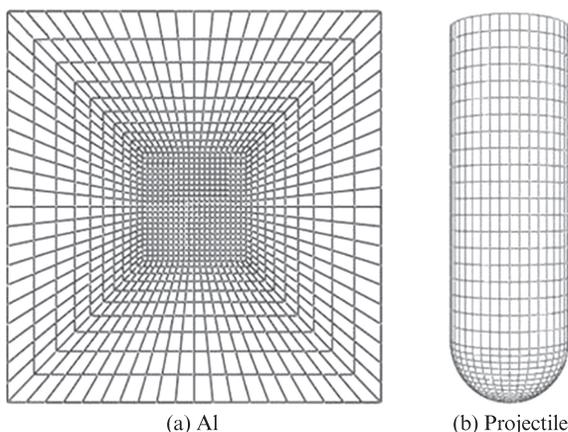


图3 典型网格划分方法

Fig. 3 Typical mesh generation method

2 结果与讨论

2.1 表面处理后的铝合金的表面形貌

图4为铝合金表面微观形貌。由图4可以发现,经过一系列表面处理,铝合金的表面形貌发生了明显改变,划痕及表面的氧化铝膜层被去除,酸处理使金属表面形成了微米尺度的凹坑,这增加了金属表面的粗糙度和比表面积,而硅烷处理使金属表面的化学键发生了重构,并与硅烷反应形成薄膜包覆在金属表面^[20-21]。

图5为FFML中铝合金-亚麻纤维层界面形貌。由图5可见,铝合金与环氧树脂基体的界面粘接紧密,经表面处理,铝合金与亚麻纤维层的界面处呈

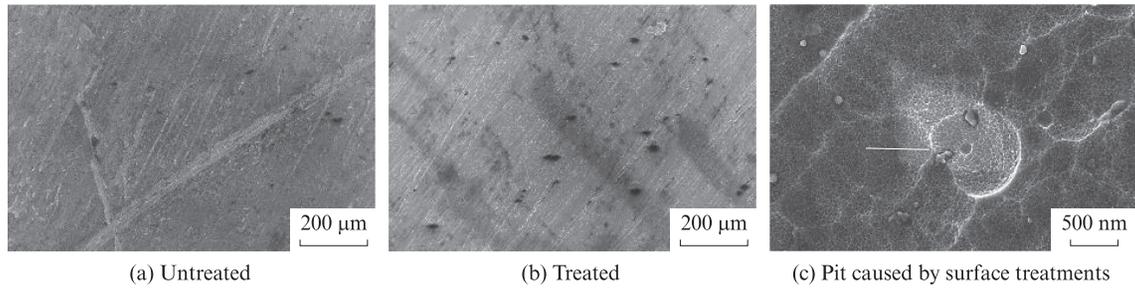


图4 铝合金表面微观形貌

Fig. 4 Microstructure of the Al alloy

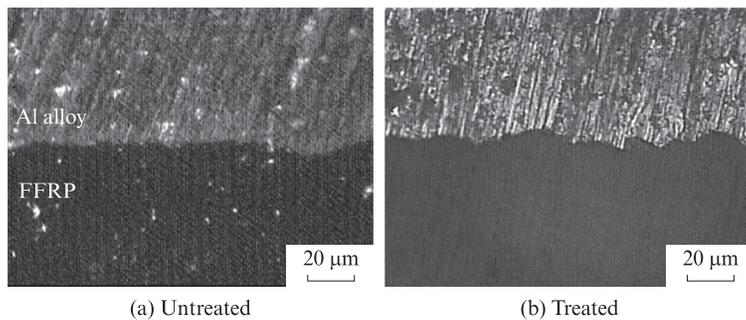


图5 FFML中铝合金-亚麻纤维层界面形貌

Fig. 5 Microstructure of Al-FFRP interface of FFML

现出更加凹凸不平的特征,证明上述表面处理可有效增大铝合金与树脂基体的接触面积,促进树脂进一步浸润和改善层间界面性能.

2.2 FFML的抗低速冲击性能

图6为FFRP层合板、未经表面处理及经表面处理后的FFML在10 J冲击能量下的典型冲击载荷-位移曲线.冲击后3种层合板下表面和横截面的损伤形貌见图7.由图6、7可以发现,3组试样均发生了穿透性破坏,但FFRP层合板与FFML却具有明显不同的冲击响应;FFML的刚度和最大冲击载荷明显高于FFRP层合板,且经表面处理后的FFML的刚度增大,证明对铝合金的表面处理确实有效提升了层合板的界面性能,经表面处理后的FFML最大冲击载荷比FFRP层合板最大冲击载荷提升了136%;FFRP层合板的冲击载荷在达到初始损伤阈值后表现为急剧下降,这是由于在外力冲击下层合板下表面纤维受到张力而发生断裂所致;而FFML由于引入了韧性较大的铝合金层,在达到初始损伤阈值后,其冲击载荷未有明显下降,反而呈现出逐渐增加的趋势,直至发生穿透破坏.通过计算冲击载荷-位移曲线下的面积得到层合板的吸收能量,可以发现:经表面处理后的FFML除了具有最高的冲击载荷外,其吸收能量也最多.由3种层合板下表面的损伤形貌(图7(a)~(c))可以看出,FFRP层合板发生了大面积的冲击损伤,而FFML的损伤面积明显小于FFRP层合板.由3种层

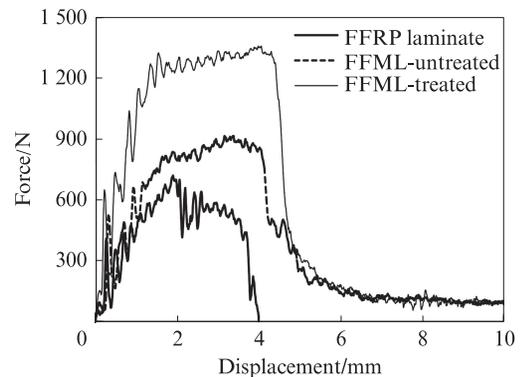


图6 3种层合板在10 J冲击能量下的典型冲击载荷-位移曲线

Fig. 6 Typical impact force-displacement curves of three type of laminates subjected to 10 J impact energy

合板冲击损伤处的横截面形貌(图6(d)~(f))可以发现:FFRP层合板表现出明显的脆性断裂模式,如纤维断裂、分层等,其整体变形较小;而FFML因含有韧性较好的铝合金层,产生了较大的塑性变形并抑制了层合板的大面积损伤,延长了冲击响应时间.另外,由图7还可以发现,经表面处理后的FFML在冲击损伤后未发生明显的分层,而未经表面处理的FFML在冲击损伤的位置有较大面积的分层现象.

图8总结了3种层合板在10 J冲击能量下的损伤面积(拉伸强度)及吸收能量(拉伸模量).由图8可以发现,经表面处理,FFML的吸收能量明显提升了58%,同时冲击后的损伤面积下降了84%.虽然引入

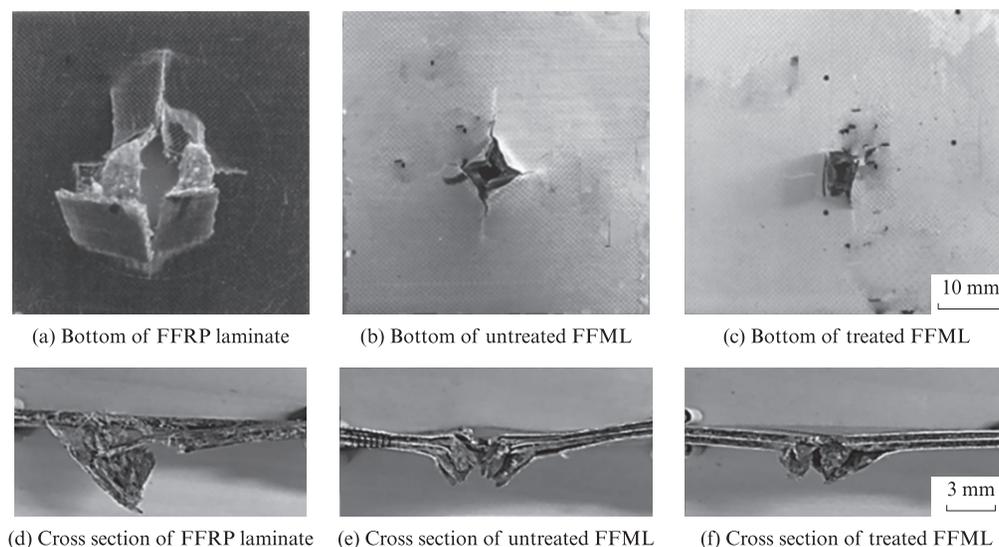


图7 冲击后3种层合板下表面和横截面的损伤形貌

Fig. 7 Damage morphology for bottom and cross section of three type of laminates after impacting

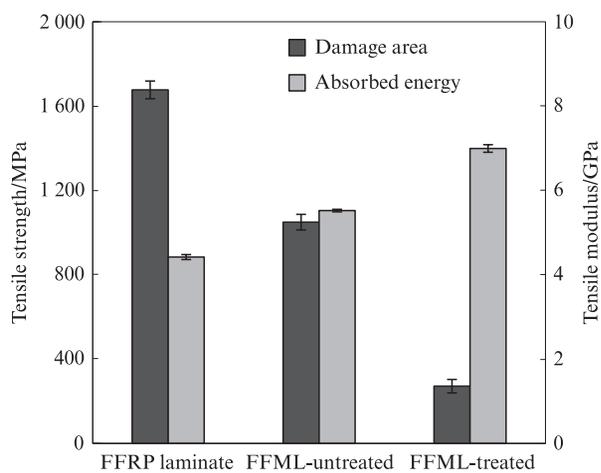


图8 3种层合板在10 J冲击能量下的损伤面积及吸收能量

Fig. 8 Damage area and absorbed energy of three type of laminates subjected to 10 J impact energy

铝合金会增加层合板质量,但是在去除密度的影响之后(除以密度以得到体积的吸能比),经表面处理后的FFML吸收能量依然比FFRP层合板高34%。

表5给出了经表面处理后FFML在10 J冲击能量下的性能,包括数值计算与试验测试的初始刚度(K_i)、最大冲击载荷(P_{max})及吸收能量(E_a)。由表5可以发现,数值计算与试验测试结果具有较好的一致性,证明有限元模型所使用的接触参数能较为准确地模拟出纤维金属层合板的冲击过程。

采用有限元模拟经表面处理后FFML在10 J冲击能量下的破坏形貌,见图9。由图9可以看出,有限元模拟结果展现了经表面处理后FFML在10 J冲击能量下的破坏模式特征,层合板下表面的冲击中心区域发生了局部塑性变形,其中铝合金沿裂纹发生

塑性变形,连同亚麻纤维层一起产生断裂损伤。进一步说明韧性较高的金属板夹层和表层能使局部区域产生塑性变形以吸收更大的能量。

表5 经表面处理后FFML在10 J冲击能量下的性能
Table 5 Performance of treated FFML subjected to 10 J impact energy

Performance	Experimental value	FE simulated value	Devatation/%
$K_i/(N \cdot m^{-1})$	2 328	2 633	13
P_{max}/N	1 332	1 373	3
E_a/J	6.995	7.230	3

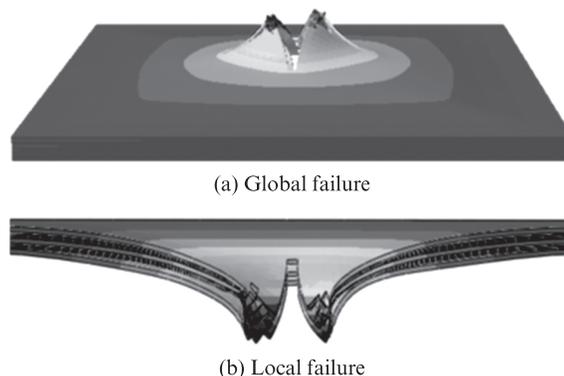


图9 有限元模拟经表面处理后FFML在10 J冲击能量下的破坏形貌

Fig. 9 Simulation results of failure modes for treated FFML subjected to 10 J impact energy

3 结论

(1)通过对铝合金进行表面处理,增加了其比表面积,从而显著提升了铝合金与树脂基体的界面结合能力,有效改善了其冲击韧性较差的问题。

(2)经表面改性后,亚麻纤维铝合金层合板的冲击性能比亚麻纤维环氧树脂层合板有明显提高,最大冲击载荷和吸收能量分别提升了136%、58%,且损伤面积下降了84%。

(3)亚麻纤维增强环氧树脂与铝合金的层间混杂能够大幅提升层合板的初始刚度、最大冲击载荷及吸收能量,层合板的破坏模式也从脆性破坏转变为塑性破坏。

参考文献:

- [1] AHMAD F, CHOI H S, PARK M K. A review: Natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties [J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2015, 300(1):10-24.
- [2] BOURMAUD A, BEAUGRAND J, SHAH D U, et al. Towards the design of high-performance plant fibre composites[J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 97:347-408.
- [3] 朱泽华,朱德滨,程承.水泥基植物纤维复合材料耐水性研究[J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(8):103-106.
ZHU Zehua, ZHU Debin, CHENG Cheng. Experimental research on water resistance of cement-based plant fiber composites [J]. *New Building Materials*, 2020, 47(8):103-106. (in Chinese)
- [4] 陆秀丽.植物纤维增强水泥基复合材料研究进展[J]. *低温建筑技术*, 2020, 42(8):28-31.
LU Xiuli. Research progress of plant fiber cement-based composite material [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2020, 42(8):28-31. (in Chinese)
- [5] 马东方,马伯翰,张幸铨.冲击荷载下植物纤维增强高聚物复合材料的力学性能[J]. *高压物理学报*, 2019, 33(2):117-124.
MA Dongfang, MA Bohan, ZHANG Xingqiang. Mechanical properties of natural fiber reinforced polymer composites under impact loading[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(2):117-124. (in Chinese)
- [6] OHTA T, MORII T, HAMADA H. Mechanical property and fracture characteristics of glass and jute fiber reinforced polypropylene hybrid composites [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2009(Suppl 2):387-391, 395. (in Chinese)
- [7] 胡静,蔡雄峰,胡昂,等.金属网对玻璃纤维增强复合材料低速冲击损伤特性的影响[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(1):58-64.
HU Jing, CAI Xiongfeng, HU Ang, et al. Influence of metal mesh on low-velocity impact damage characteristics of glass fiber reinforced composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(1):58-64. (in Chinese)
- [8] CANTWELL W J, MORTON J. The impact resistance of composite materials-A review[J]. *Composites*, 1991, 22(5), 347-362.
- [9] DHAKAL H N, ZHANG Z Y, BENNETT N, et al. Low-velocity impact response of non-woven hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites: Influence of impactor geometry and impact velocity[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(9): 2756-2763.
- [10] PETRUCCI R, SANTULLI C, PUGLIA D, et al. Mechanical characterisation of hybrid composite laminates based on basalt fibres in combination with flax, hemp and glass fibres manufactured by vacuum infusion [J]. *Materials and Design*, 2013, 49:728-735.
- [11] SANJAY M R, MADHU P, JAWAID M, et al. Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172:566-581.
- [12] LEE H S, CHO D, HAN S O. Effect of natural fiber surface treatments on the interfacial and mechanical properties of henequen/polypropylene biocomposites [J]. *Macromolecular Research*, 2008, 16(5):411-417.
- [13] RUKSAKULPIWAT Y, SRIDEE J, SUPPAKARN N, et al. Improvement of impact property of natural fiber-polypropylene composite by using natural rubber and EPDM rubber [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2009, 40(7):619-622.
- [14] VLOT A. Impact loading on fibre metal laminates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(3): 291-307.
- [15] MACHADO GOMES VIEIRA L, DOS SANTOS J C, HALLAK PANZERA T, et al. Novel fibre metal laminate sandwich composite structure with sisal woven core [J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, 99:189-195.
- [16] PROLONGO S G, URENA A. Effect of surface pre-treatment on the adhesive strength of epoxy-aluminium joints [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009, 29(1):23-31.
- [17] 公晋芳.硅藻土/聚丙烯复合材料的吸声性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(4):678-682.
GONG Jinfang. Investigation of sound absorption properties research of diatomite/polypropylene composite materials [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(4):678-682. (in Chinese)
- [18] 杨建明,郭思彤,徐新华,等.气凝胶绝热板热工性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(5):786-791.
YANG Jianming, GUO Sitong, XU Xinhua, et al. Thermal performance study of aerogel insulating panels [J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(5):786-791. (in Chinese)
- [19] 余煜玺,马锐,王贯春,等.高比表面积、低密度块状Al₂O₃气凝胶的制备及表征[J]. *材料工程*, 2019, 47(12):136-142.
YU Yuxi, MA Rui, WANG Guanchun, et al. Preparation and characterization of Al₂O₃ bulk aerogel with high specific surface area and low density [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(12):136-142. (in Chinese)
- [20] 汪亮,宣天鹏,周赞,等.铝合金表面硅烷处理技术的研究现状[J]. *电镀与环保*, 2012, 32(6):3-6.
WANG Liang, XUAN Tianpeng, ZHOU Yun, et al. Research status of silane treatment technology for aluminum alloy surface [J]. *Electroplating and Pollution Control*, 2012, 32(6):3-6. (in Chinese)
- [21] RIDER A N, ARNOTT D R. Boiling water and silane pre-treatment of aluminium alloys for durable adhesive bonding [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2000, 20(3):209-220.