

内外部缺口对三维正交 M40J/Al 复合材料力学性能的影响

彭辉权 蔡长春 余欢 徐志锋 王振军 兰泽宇
(南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室)

摘 要 以 ZL301 合金为基体,预制体以 M40J 碳纤维为原材料编织成三维正交结构,通过真空压力浸渗法制备了纤维体积分数为 50% 的三维正交 M40J/Al 复合材料,通过 SEM 分析了微观组织和断口形貌,研究了缺口位置对三维正交 M40J/Al 复合材料经向力学性能的影响,并探讨了失效机理。结果表明,室温下含 V 形缺口、矩形缺口、中心圆孔缺口的复合材料抗拉强度分别为 690.7、667.0、314.2 MPa,较无缺口试样(761.0 MPa)分别下降了 9.24%、12.35%、58.71%。相比于外部缺口,内部缺口对三维正交编织结构 M40J/Al 复合材料力学性能影响最大。含中心圆孔缺口的复合材料断裂位置集中在缺口处,对中心圆孔缺口非常敏感,与另外 3 种类型的复合材料相比,其抗拉强度最低。

关键词 缺口位置;三维正交 M40J/Al 复合材料;真空压力浸渗;拉伸失效

中图分类号 TB333 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.01.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Internal and External Notches on Mechanical Properties of Three-dimensional Orthogonal M40J/Al Composites
Peng Huiquan, Cai Changchun, Yu Huan, Xu Zhifeng, Wan Zhenjun, Lan Zeyu
(National Defense Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The three-dimensional orthogonal M40J/Al composites with 50% (volume fraction) fiber were prepared by vacuum pressure infiltration with ZL301 alloy as the matrix and perform made of M40J carbon fiber woven into three-dimensional orthogonal structure. The microstructure and fracture morphology of the composites were analyzed by SEM. The effects of notch position on the longitudinal tensile properties of the three-dimensional orthogonal M40J/Al composites were investigated, and the failure mechanism was discussed. The results indicate that the tensile strengths of the composites with V-notch, rectangular notch and central circular hole notch at room temperature are 690.7、667.0 and 314.2 MPa, respectively, which are 9.24%, 12.35% and 58.71% lower than those of the unnotched specimens (761.0 MPa). The internal notch has the greatest effect on the tensile properties of M40J/Al composites with three-dimensional orthogonal woven structure compared to the external notch. The fracture location of composites containing the central circular hole notch is concentrated at the notch, which is extremely sensitive to the central circular hole notch with the lowest tensile strength compared to the other three types of composites.

Key Words: Notch Location, Three-dimensional Orthogonal M40J/Al Composite, Vacuum Pressure Immersion, Tensile Failure

三维正交碳纤维增强铝基复合材料具有耐疲劳性、抗冲击性好,高比强度和低密度等特点,综合性能良好^[1~3]。为满足设计要求和实际需求,飞机结构中有许多不可避免的缺口或开孔,如耳接口、加工铆接孔等。在材料服役过程中,结构件容易受到外物损伤,如冰雹

撞击,产生裂纹及缺口使材料性能下降^[4,5]。对于连续纤维增强复合材料,由于缺口破坏了纤维的整体性和连续性,会降低复合材料使用寿命。此外,在缺口尖端易引起应力集中,从而使复合材料失效断裂。

XIE B T 等^[6]制备了带方形缺口和圆形缺口的玻

收稿日期:2021-07-21;修改稿收到日期:2021-08-23
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51765045);航空科学基金资助项目(2019ZF056013);江西省自然科学基金资助项目(20202ACBL204010)
第一作者简介:彭辉权,男,1997 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1063875403@qq.com
通信作者:余欢,男,1960 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:yuhwan@163.com
引用格式:彭辉权,蔡长春,余欢,等. 内外部缺口对三维正交 M40J/Al 复合材料力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(1):87-92.
PENG H Q, CAI C C, YU H, et al. Effects of internal and external notches on mechanical properties of three-dimensional orthogonal M40J/Al composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(1):87-92.

玻璃纤维增强铝金属层板,研究了缺口的转角半径、偏离轴角等几何参数对拉伸性能的影响,探讨了两种断裂形态随缺口几何形状的变化规律,并分析了损伤演化规律。KAWAI M 等^[7]研究了碳/环氧机织物层合板强度的试样尺寸效应和缺口尺寸效应,发现其缺口强度与缺口尺寸和试样尺寸均有关,利用 Neuber 插值法提出了尺寸效应定律,能够很好地描述 CFRP 机织层合板的试件尺寸效应和缺口尺寸效应对层合板强度的影响。鲍宏琛等^[8]通过试验结合有限元模拟,研究了纤维增强复合材料层合板缺口尺寸和形状效应,比较了含圆孔层合板与含裂缝层合板的破坏失效机制。侯军涛等^[9]采用化学气相沉积法制备了 2D-C/SiC 复合材料,研究了双边对称圆弧缺口试样在不同温度下的拉-拉疲劳性能,发现缺口试样疲劳极限较相同条件下缺口试样的抗拉强度下降了 10%~20%,缺口周围易产生较多横向裂纹。郭洪宝等^[10]制备了 3 种双边缺口(V 形、半圆形和细线形)2D-C/SiC 复合材料,结合有限元模拟分析发现,缺口的存在导致边缘存在应力集中,同一试验条件下半圆型缺口试样的轴向变形、应变集中区域均大于 V 型和细线型缺口试样。秦利军^[11]研究了双边 V 形缺口、中心孔及双边 U 形缺口等多种缺口的三维正交 C/C 复合材料的力学行为,并对材料断裂失效原因进行分析,发现不同缺口会导致程度不一的应力集中和孔周变形,缺口周围的剪切非弹性变形会造成三维正交 C/C 复合材料对缺口不敏感。当前,关于树脂基层合板与陶瓷基复合材料含缺口试样的力学性能研究较多,而针对含缺口的三维编织结构纤维增强金属基复合材料的力学性能研究报道却较少。兰泽宇等^[12]探究了两种不同编织结构(叠层穿刺和三维正交)对含缺口的 C_f/Al 复合材料力学性能的影响,发现缺口的存在会导致复合材料的性能下降,叠层穿刺结构复合材料对缺口更敏感,其抗拉强度较三维正交结构复合材料的下降幅度更大。本课题在前期工作基础上^[12],进一步研究内外部缺口及其形状对三维正交 C_f/Al 复合材料拉伸力学性能的影响,以期完善对含典型缺口(V 形、矩形和中心圆孔)的三维编织 C_f/Al 复合材料力学性能的研究,为该复合材料的结构设计及实际工程应用提供参考。

以 ZL301 合金为基体,采用 M40J 碳纤维编织预制体,通过真空压力浸渗法制备了纤维体积分数为 50% 的三维正交 C_f/Al 复合材料,进行了复合材料经向拉伸性能试验,通过 SEM 分析了微观组织和断口形貌,研究了 V 形缺口、矩形缺口和中心圆孔 3 种典型内外部缺口对复合材料经向拉伸性能的影响,并探讨了失效机理。

1 试验过程

1.1 试验材料

选用 ZL301 合金作为基体材料,其化学成分见表

1。采用 M40J 碳纤维作为预制体原料,该纤维主要性能参数见表 2。三维正交结构预制体编织工艺参数见表 3,实物图见图 1。用石墨模具夹持固定预制体,装入不锈钢模具中,对其进行焊接封边,并对其进行气密性检测,保证预制体封装完好,并在模具下端中央位置焊接升液管。为防止不锈钢模具在气密性检测过程中以及浸渗过程中受到较大气压而发生鼓胀变形,在其周围用不锈钢肋条进行加固。封装实物见图 2。

表 1 基体 ZL301 合金的化学成分

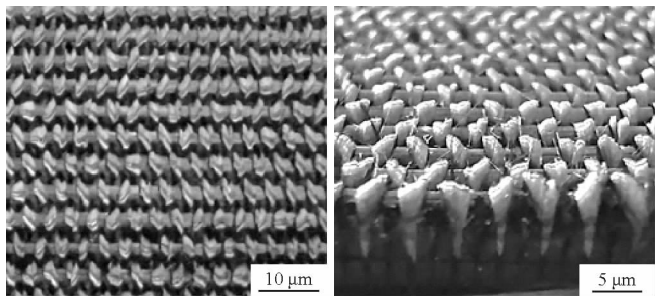
Tab.1 Chemical composition of ZL301 matrix alloy %						
w _B						
Mg	Zn	Cu	Si	Mn	Ti	Al
9.5~11.0	0.15	0.1	0.3	0.15	0.15	余量

表 2 M40J 碳纤维的主要性能参数

Tab.2 Main performance parameters of M40J carbon fiber				
抗拉强度/ MPa	杨氏模量/ GPa	密度/ (g·cm ⁻³)	伸长率/ %	单丝直径/ μm
4 410	377	1.77	1.2	5

表 3 三维正交编织结构预制体工艺参数

Tab.3 Process parameters of preform with 3D orthogonal woven structure			
预制体尺寸 (长×宽×厚)/mm	纱线规格	织物密度	体积分 数
230×230×4	经纱:6k/股×3 股 纬纱:6k/股×2 股 Z 向纱:6k/股×1 股	经纱:12 根/cm 纬纱:5±0.5 根/cm	50%



(a) 面内结构纤维 (b) 厚度方向纤维

图 1 三维正交编织结构纤维预制体

Fig.1 Fiber preform with 3D orthogonal woven structure

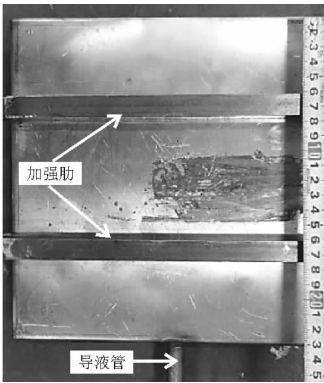


图 2 封装实物图

Fig.2 Package drawing

1.2 试验方法

采用真空压力浸渗法制备三维正交编织结构 M40J/Al 复合材料。首先将 ZL301 铝锭放入坩埚中，置入箱式电阻炉中使铝锭熔化，再精炼除杂。将精炼好的铝液和封装好的预制体分别放入真空压力浸渗设备的上、下室。关闭真空浸渗炉，抽去空气，充入 0.5 MPa 氩气(纯度为 99.99%)。对预制体进行升温预热，并对基体合金加热使其保持液态，待上、下室分别达到设定温度后保温一段时间。再抽真空至 20 Pa，升起坩埚使铝液进入升液管，然后充入 7 MPa 氮气使铝液冲压到封装件中，保压 20 min 后排出氮气，随炉缓冷至室温后取出脱模，制备成三维正交 M40J/Al 复合材料。真空压力浸渗炉示意图见图 3。

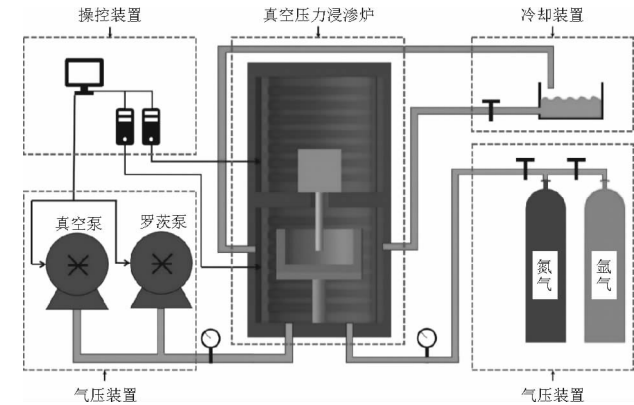


图 3 真空压力浸渗炉示意图

Fig.3 Schematic diagram of vacuum pressure infiltration furnace

1.3 性能测试与表征

参照 ASTM D3552-2017 标准，分别截取尺寸为 152 mm×14 mm×4 mm 的无缺口和含缺口拉伸试样。V 形缺口夹角为 60°，深度为 1 mm，圆角半径为 0.6 mm；矩形双边缺口宽度、深度均为 1 mm，最窄截面宽度为 5 mm；中心圆孔缺口的圆孔半径为 1 mm。拉伸试样见图 4。采用 Instron5582 电子万能试验机进行拉伸性能测试，载荷的加载方向与复合材料的经向纤维平行，加载速率为 1.5 mm/min，试验机同步记录材料加载过程中位移与载荷变化情况，直至试样断裂失效，所得力学性能结果取 3 个有效数据的平均值。采用 FEI Nova Nano SEM450 场发射扫描电镜进行微观形貌观察，采用 Dino-Lite AM4113ZT 型显微镜对拉伸断口进行观察。抗拉强度计算如下：

$$\sigma_b = \frac{P_{\max}}{S_0} \quad (1)$$

式中， σ_b 为抗拉强度，MPa； $P_{\max}$ 为最大载荷，N； S_0 为缺口处最小原始截面积，mm²。

缺口敏感系数计算如下：

$$q_t = \frac{\sigma_{b0}}{\sigma_H} \quad (2)$$

式中， q_t 为缺口敏感系数； σ_{b0} 为光滑试样的抗拉强度，MPa； σ_H 为缺口试样的抗拉强度，MPa。

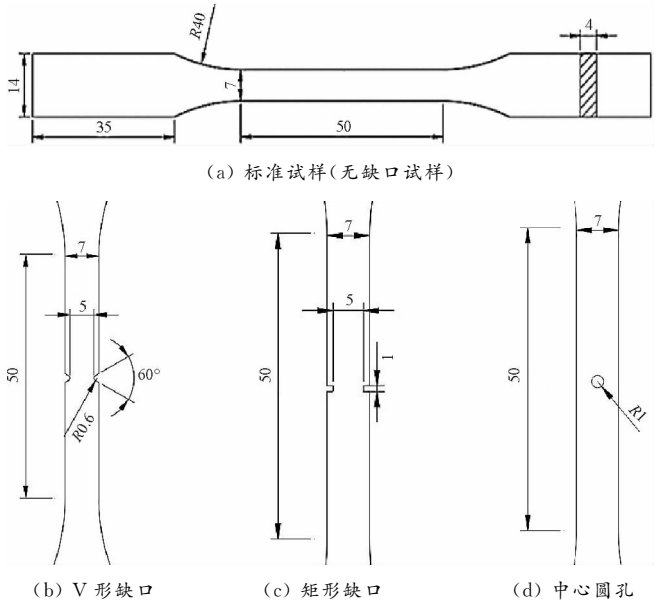


图 4 不同类型拉伸试样的示意图

Fig.4 Schematic diagram of different types of tensile specimens

2 试验结果与分析

2.1 结构特征与微观组织

图 5 为三维正交 M40J/Al 复合材料板件中截取的试样。可以看出，经向纤维束和纬向纤维束分别沿空间 X 轴、Y 轴垂直分布。Z 向纤维束的弯曲处搭接在预制体表面的纬向纤维束处，对垂直交叉的经、纬向纤维起到捆绑束缚作用。



图 5 三维正交结构 M40J/Al 复合材料实物图

Fig.5 Entity of 3D orthogonal M40J/Al composites

图 6 为三维正交结构 M40J/Al 复合材料经向、纬向以及 Z 向截面的微观组织。可以看出，纤维束在浸渗过程中未被熔融铝液冲散，保持了预制体原有结构，经向、纬向以及 Z 向纤维束基本呈相互垂直结构。三维正交结构预制体内部纤维基本保持平直结构，纤维束之间的间隙可形成较为顺畅的浸渗通道，可减少浸渗缺陷的产生。对复合材料进行致密度测试，结果是平均致密度为 96.07%，3 个方向截面均未见明显微观缺陷，浸渗效果良好。

纤维束与纤维束之间较大的空隙完全被基体合金充填,纤维整体分布较为均匀,个别地方稍有偏聚现象。利用扫描电镜,发现纤维束内部的纤维在基体合金中分布较为均匀,但也存在局部的纤维偏聚现象,从而使得纤维束内部可能出现局部的微小间隙。在拉伸载荷作用下,这些纤维束内部的微小间隙易发生损伤并产生微裂纹,使得基体与纤维之间出现界面脱粘,并随着拉伸载荷的加大致使纤维束遭到破坏。

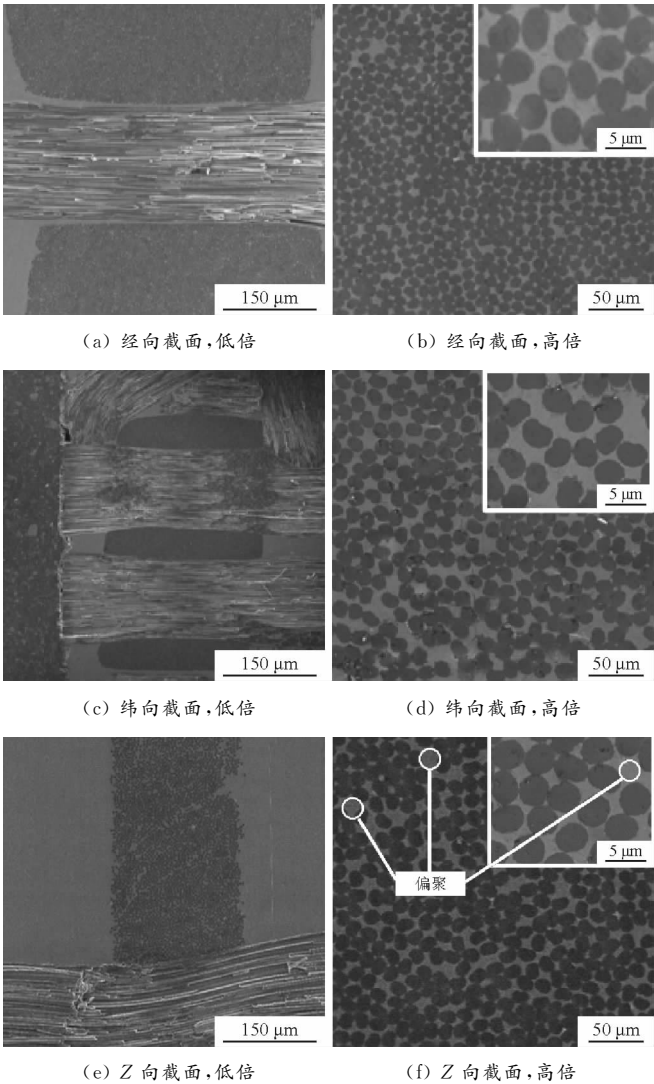


图 6 三维正交结构 M40J/Al 复合材料微观组织

2.2 缺口类型对复合材料力学性能的影响

2.2.1 抗拉强度和缺口敏感系数分析

图 7 为 M40J/Al 复合材料不同试样的抗拉强度。可以看出,缺口的存在使复合材料的抗拉强度减小。三维正交结构 M40J/Al 复合材料无缺口试样的抗拉强度为 761.0 MPa,而含 V 形缺口、矩形缺口试样的抗拉强度分别为 690.7、667.0 MPa,较无缺口试样分别下降了 9.24%、12.35%。含中心圆孔试样的抗拉强度为 314.2 MPa,与无缺口试样相比下降幅度达 58.71%。

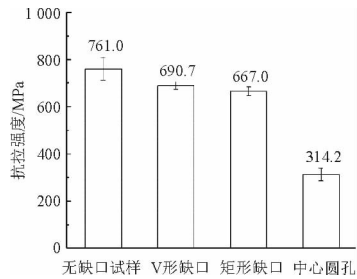


图 7 三维正交结构 M40J/Al 复合材料不同类型试样的抗拉强度

Fig.7 Tensile strength of different types of 3D orthogonal M40J/Al composites specimens

通过计算,含 V 形缺口、矩形缺口试样的缺口敏感系数分别为 1.10、1.14,含中心圆孔缺口试样的缺口敏感系数为 2.42。两种典型的外部缺口(V 形缺口和矩形缺口)试样的缺口敏感系数相对较小,抗拉强度下降幅度也较小。而含内部缺口(中心圆孔)试样的缺口敏感系数相对较大,抗拉强度下降幅度也较大。这表明,中心圆孔这一内部缺口对三维正交 M40J/Al 复合材料力学性能影响较外部缺口更大。从缺口敏感系数来看,复合材料对 V 形缺口和矩形缺口不敏感,对中心圆孔缺口非常敏感。

2.2.2 拉伸载荷-位移曲线分析

图 8 为三维正交结构 M40J/Al 复合材料不同试样的拉伸载荷-位移曲线。可以看出,无缺口试样载荷-位移曲线上升趋势较为均匀。拉伸载荷方向平行于经向纤维排布方向,施加载荷时基体首先承受载荷,同时传递给纤维,经向纤维较早地起到承担载荷作用,所以在拉伸载荷施加初始阶段由基体合金与经向纤维共同承担载荷。在第 I 阶段,载荷较小,4 种试样载荷-位移曲线基本一致,表现出线性弹性行为。随着载荷逐渐增大,基体发生塑性变形并逐渐产生裂纹,承担载荷的主体发生改变,由基体合金和纤维共同承担载荷转为由纤维受载。在第 II 阶段,载荷较大,经向纤维起到承担载荷的主导作用,而缺口的存在破坏了部分经向纤维的连续性,使得含缺口试样承载能力均下降,复合材料表现

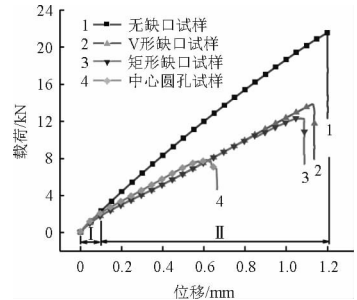


图 8 三维正交结构 M40J/Al 复合材料试样的拉伸载荷-位移曲线

Fig.8 Tensile load-displacement curve of 3D orthogonal M40J/Al composite specimen

出非线性力学响应特征。在有效承载范围内含 V 形缺口和矩形缺口试样的载荷-位移曲线走势基本相同,最大承受载荷和拉伸位移十分接近,这表明二者失效模式类似。而含中心圆孔试样最先失效断裂,承载能力最低,极限载荷远小于其他 3 种类型试样,这表明中心圆孔缺口对复合材料失效载荷有着很大的影响。

3 断面形貌与失效分析

图 9 为 M40J/Al 复合材料不同类型拉伸试样的断面形貌。从图 9a 可以看出,无缺口试样断裂在试样的圆弧过渡段;试样两侧边缘处存在较长且不规整的被拔出纤维,中间经向纤维拔出长度较短,纬向纤维受经向

纤维的拉伸作用以及基体变形的挤压作用,无法保持原有的结构,被拉伸变形,在基体和纤维断裂时被连带斜向拔出。从图 9b、图 9c 可以看出,这两种试样均未在缺口处断裂,说明 V 形缺口和矩形缺口不是试样断裂的主要因素。这两种试样两侧的经向纤维均有非常明显的拔出现象。试样边缘处的经向纤维因缺口存在而不再连续。由于试样从完整板件中切取,边缘处纬向纤维束、Z 向纤维束也不再保持完整结构,基体、纬向纤维以及 Z 向纤维对经向纤维的固定能力较弱,在拉伸载荷作用下,最边缘的经向纤维束被完整拔出。从图 9d 可以看出,试样从中心圆孔处断裂,基体被撕裂且断口不规整,试样两侧边缘处的经向纤维被较为完整的拔

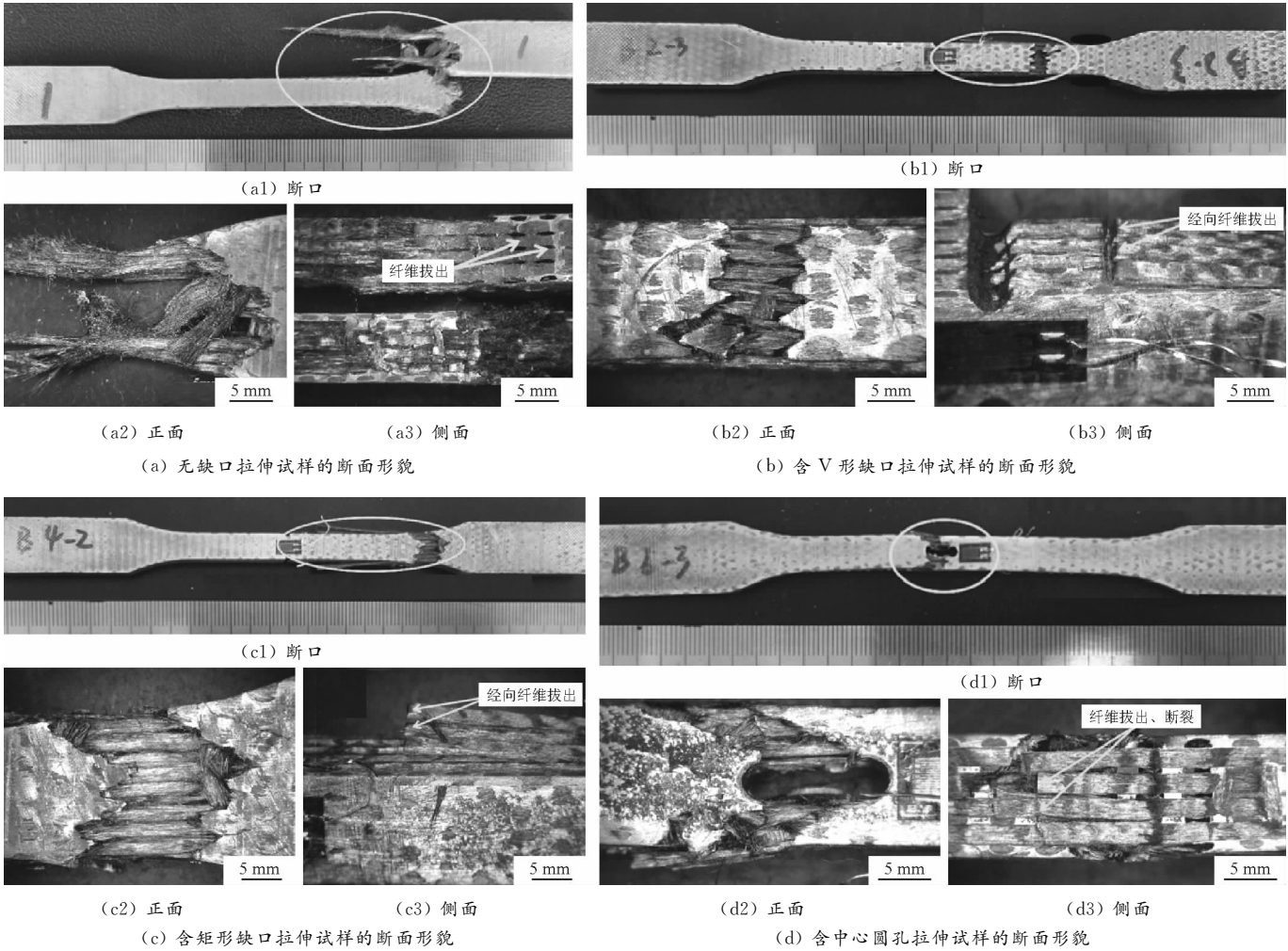


图 9 三维正交 M40J/Al 复合材料不同类型拉伸试样的断面形貌

Fig.9 Cross section morphology of different tensile specimens of 3D orthogonal M40J/Al composites

出,且纤维断口较为平齐。

对三维正交结构 C_t /Al 复合材料各类型试样的断裂形貌与位置分析,可以发现无缺口试样的失效方式为基体开裂、部分纤维拔出以及经向纤维断裂,含 V 形缺口和含矩形缺口试样拉伸失效的主导因素均为界面脱粘和边缘处经向纤维横向开裂引起材料产生裂纹损伤。含中心圆孔缺口试样拉伸失效的原因是基体与纤维预

制体结构的完整性均遭到破坏。

图 10 为不同类型三维正交结构的单胞示意图。缺口的存在使试样在进行拉伸试验时,承载的经向纤维数量减少。从图 10b、图 10c 可以看出,V 形缺口和矩形缺口破坏了边缘处经向纤维的连续性,使原本贯穿试样整体的纤维束从中部断开,而试样中央部位的经向纤维束尚未破坏。从图 10d 可以看出,中心圆孔使试样中心

处的纤维遭到破坏,使原本为整体的经向纤维分为两个部分,基体可以从圆孔周围以及试样边缘同时开裂,从而导致纤维与基体的脱粘现象在承载过程中较早发生。在缺口引入过程中,试样缺口横截面积相同,被缺口破坏的经向纤维束数量相同。对于含 V 形缺口和矩形缺口的试样,边缘处不连续的经向纤维包含在缺口内,而含中心圆孔缺口的试样,除缺口处包含不连续的经向纤维外,

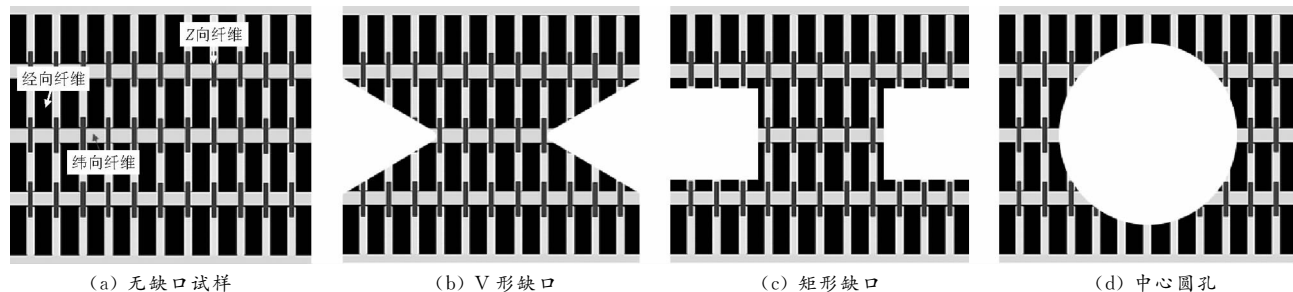


图 10 不同类型的三维正交结构单胞示意图

Fig.10 Cell diagram of specimens with different types of three-dimensional orthogonal structure

形缺口试样。

试验采用哑铃状试样,易在圆弧过渡段产生应力集中,在进行切割取样时圆弧过渡段(试样根部)也容易形成加工缺陷,导致试样在受载时,圆弧过渡段及其附近区域易产生应力集中现象。另一方面,材料在制备时纤维结构可能存在不均匀现象。对于三维正交结构,圆弧过渡段的经向纤维缺乏连续性。当基体合金受拉伸作用发生较大的形变时,应力集中处和结构不均匀的位置先产生裂纹导致断裂失效。在经向、纬向以及 Z 向纤维束交织处,纤维与基体结合强度相对较弱,而且纬向、Z 向纤维与基体的界面受载方向垂直于界面方向,在载荷逐渐增大的过程中,界面会发生脱粘,并且沿纤维束表面扩展。脱粘后的纤维承载能力下降,当载荷达到一定程度时,纤维脆性断裂,试样也断裂失效。

4 结 论

(1)采用真空压力浸渗法制备的三维正交 M40J/Al 复合材料平均致密度为 96.07%,浸渗效果良好,纤维束之间基体合金未见明显微观缺陷,纤维束内部存在少量的局部纤维偏聚及微小间隙。

(2)室温下含 V 形缺口(深度为 1 mm,圆角半径为 0.6 mm)和矩形缺口(深度、宽度均为 1 mm)的三维正交编织结构 M40J/Al 复合材料的抗拉强度分别为 690.7、667.0 MPa,较无缺口试样(761.0 MPa)分别下降了 9.24%、12.35%;含中心圆孔缺口(圆角半径为 1 mm)的复合材料抗拉强度为 314.2 MPa,下降幅度最大,达 58.71%。含 V 形缺口、矩形缺口与含中心圆孔缺口试样的缺口敏感系数分别为 1.10、1.14、2.42。

(3)试样中心缺口对三维正交编织结构 M40J/Al

复合材料力学性能的影响大于试样边缘缺口,该复合材料对中心圆孔缺口非常敏感,对 V 形缺口和矩形缺口不太敏感。中心圆孔破坏了试样中心处经向纤维的整体性,降低了复合材料的有效承载面积,在拉伸变形时,使得应力集中沿着圆孔边缘分布,基体从圆孔周围以及试样边缘同时开裂,导致复合材料承载能力较差。

参 考 文 献

- [1] HUANG L J, GENG L, PENG H X. Microstructurally inhomogeneous composites: Is a homogeneous reinforcement distribution optimal? [J]. Progress in Materials Science, 2015, 71: 93-168.
- [2] HATTRICK-SIMPERS J, WEN C, LAUTERBACH J. The materials super highway: integrating high-throughput experimentation into mapping the catalysis materials genome[J]. Catalysis Letters, 2015, 145(1): 290-298.
- [3] 张大伟,张琦,樊晓光,等.碳纤维增强树脂基复合材料和金属材料连接技术综述:应用和展望[J].稀有金属材料与工程, 2019, 48(1): 44-54.
- [4] 舒畅,程铭,许煜,等.航空发动机压气机叶片外物损伤规律研究[J].机械工程学报, 2019, 55(13): 87-94.
- [5] 舒畅,程铭,许煜,等.不同金属硬物冲击航空发动机叶片损伤研究[J].航空动力学报, 2020, 35(1): 18-29.
- [6] XIE B T, GAO L, JIAN G S, et al. Notched tensile response and damage mechanism of the GLARE laminate[J]. Journal of Composite Materials, 2020, 54(22): 3 037-3 046.
- [7] KAWAI M, MITANI S. A size effect law for notched tensile strength of woven carbon/epoxy laminates[J]. Advanced Composite Materials, 2016, 25(2): 177-207.
- [8] 鲍宏琛,刘广彦.纤维增强复合材料层合板缺口尺寸及形状效应数值模拟[J].复合材料学报, 2017, 34(5): 987-995.
- [9] 侯军涛,乔生儒,韩栋,等.2D-C/SiC 缺口试样的拉-拉疲劳损伤[J].材料导报, 2005(11): 140-143.
- [10] 郭洪宝,王波,矫桂琼,等.2D-C_f/SiC 复合材料缺口试件拉伸力学行为研究[J].材料工程, 2013(5): 83-88.
- [11] 秦利军. 三维编织 C/C 复合材料关键基础力学性能研究[D].合肥:中国科学技术大学, 2013.
- [12] 兰泽宇,余欢,徐志峰,等.碳纤维编织结构对 C_f/Al 复合材料拉伸性能的影响[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 552-557.

(编辑:刘卫)