

平流层飞艇蒙皮材料I型裂纹研究

刘龙斌,李雪,吕明云,糜攀攀,曹帅

北京航空航天大学航空科学与工程学院,北京 100191

摘要 飞艇在平流层环境中受高温低温交替、臭氧、紫外辐射等恶劣工况的影响。为研究平流层飞艇蒙皮材料I型裂纹特性,在单轴向拉伸载荷下,分析了含有初始裂纹的蒙皮材料撕裂裂纹尖端区域变形场的测试方法和裂纹扩展特征。通过初始长度均为20 mm的单边切口人工模拟预制裂纹试样,采用数字散斑相关方法试验,分别获得I型裂纹尖端和垂直裂纹尖端的位移场和应变场分布,结合散斑变形图进行相关计算,发现撕裂裂纹扩展过程为近似的脆性断裂特征,垂直于撕裂裂纹扩展方向的材料试样裂纹尖端变形场呈现为离散阶跃变化特征。研究表明:该方法可以测量平流层飞艇蒙皮用的柔性层压织物的I型裂纹尖端变形场,揭示裂纹尖端初始裂纹的扩展规律和演化特征,获得的大范围屈服裂尖长度的裂纹尖端的变形值曲线,可为平流层飞艇蒙皮材料的撕裂损伤变化分析和裂纹尖端变形场测试提供有效的方法。

关键词 裂纹尖端;数字散斑相关方法;柔性层压织物;断裂力学

中图分类号 V214.8

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.18.001

Mode I Crack Tip Deformation Field for Stratospheric Airship Envelope

LIU Longbin, LI Xue, LÜ Mingyun, MI Panpan, CAO Shuai

School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract The stratospheric airship is affected by the alternating high and low temperatures, the ozone, the ultraviolet radiation and other harsh conditions in the stratosphere environment. This paper studies the crack tip opening displacement (CTOD) fields and the strain distribution test method for the strain field in the stratospheric airship envelope material by uni-axial tensile experiments and the digital speckle correlation method (DSCM). For tearing tests of single edge notched (SEN) specimens, the initial weft crack is prefabricated to a length of 20 mm, and the typical brittle fracture is observed during the crack propagation process and the material specimen deformation field varies in a manner of steps. The calculation results of the displacement and the strain of the weft and warp fibers show that the mode I crack tip deformation field is accurately evaluated by the DSCM, which also displays the initial crack propagation law and the crack evolution characteristics of an SEN crack tip. The crack tip deformation curves for a large scale yielding length is obtained for the design and the deformation test of the high performance stratospheric airship envelope material.

Keywords crack tip; digital speckle method; flexible composites; fracture mechanics

随着世界各国对平流层空间资源的竞相开发和利用,平流层飞艇由于具有定点驻留、高空观测、海洋探测、地质勘探、战场评估和太空探索等诸多领域的潜在应用优势,受到越来越多的关注^[1]。但是蒙皮材料的抗环境损伤和撕裂破坏

性能直接决定了飞艇的飞行性能。飞艇蒙皮在平流层多种环境因素机制耦合作用下,易诱导蒙皮中初始裂纹或缺陷扩展而撕裂破坏,因而研究含有初始裂纹的飞艇蒙皮材料撕裂特性具有重要的科学和工程意义^[2]。

收稿日期:2013-12-09;修回日期:2014-03-12

基金项目:国家航空科技联合基金项目(2012ZA51009)

作者简介:刘龙斌,博士研究生,研究方向为平流层飞艇蒙皮材料、结构与性能分析,电子信箱:longbuaa@sina.com;吕明云(通信作者),研究员,

研究方向为飞行器总体设计,电子信箱:lv503@buaa.edu.cn

引用格式:刘龙斌,李雪,吕明云,等.平流层飞艇蒙皮材料I型裂纹研究[J].科技导报,2014,32(18):15-21.

徐斌等^[3]针对平流层浮空器用层压蒙皮材料,开展不同切口宽度的撕裂试验和数值仿真,获得裂纹尖端的应力强度因子,得到撕裂承载能力随切口宽度增加而降低的规律,但是没有研究裂尖切口附近的变形场分布,对于连续介质的材料,裂纹尖端的应力集中和断裂伸长变形是导致材料破坏的主要原因,并用裂纹尖端的位移场(crack tip open displacement, CTOD)表征测试材料韧性。

万琳辉等^[4]为进一步研究亚临界裂纹的扩展,引入了应力腐蚀 Charle 理论,并结合传统断裂力学中的拉伸应力与压剪应力构建裂纹扩展模型,获得了与时间相关的撕裂扩展参数。张亚等^[5]采用俞茂宏双剪统一强度物理力学理论,基于建立的裂纹模型,研究了试样初始裂纹区域的撕裂裂纹尖端各方向的变形场分布,进而推导拉伸型撕裂裂纹在小范围变形屈服条件下的金属裂纹尖端塑性区尺寸的统一解析解,并运用传统断裂力学中应变能释放率方法推导了线弹性正交异性复合材料板的非弹性主方向的应力变化场和应变变形场计算模型。然而已有研究对于含单边切口初始裂纹,其裂纹尖端的变形场分布并未揭示,也未采用试验方法验证。

随着光学、电子技术等非接触式测试技术的发展,采用数字图像相关方法,测量以金属自然表面本体为散斑场的裂纹尖端细观损伤区域内的变形场,获取 CTOD 试验裂纹尖端扩展区的图像,直接进行非接触式的全场变形测量,实时采集裂纹尖端区变形图像信息^[6-8]。目前该方法在飞艇蒙皮柔性薄膜柔性层压织物材料的大变形状态下的变形场应用研究较少,要求裂纹尖端测量精度高^[3,9]。本试验利用数字散斑相关方法,研究 Kevlar 纤维增强的飞艇蒙皮 I 型模式下裂纹尖端附近区域的变形场,获得含有 I 型预制单边切口试样裂纹尖端的位移场和应变场分布,同时也获得垂直预制初始裂纹方向的试样裂纹尖端附近的经纬向位移场、经纬向应变场以及切应变的分布规律,为大范围裂尖长度的裂纹尖端的应变场分析提供有效的途径。

1 数字散斑法与试样制备

数字散斑法采用小平面假设和基于逆向投影方法^[10-12]进行二维数字散斑相关匹配,利用 2D-DSCM 对不同变形条件下的图像进行立体视觉匹配以及二维坐标对照,按照一定的匹配相关系数,以寻找变形后左右相机拍摄的图像二维坐标进行 2D 匹配^[13-15],获得试样裂纹尖端区域在撕裂过程中的位移和应变变形场。根据数字散斑法的基本原理,试验飞艇蒙皮材料的裂纹尖端的变形场分析流程如图 1 所示。

平流层飞艇蒙皮材料为多层薄膜层压材料^[6],本试验研究的试样为高强度聚芳脂 Kevlar 纤维丝加强的 TPU 层压薄膜材料,采用平纹编织方式。蒙皮材料参数:厚度 0.16 mm,纤维束密度(100×100)根/10 cm,纱线密度 220 g/km,材料面密度 130 g/m²。

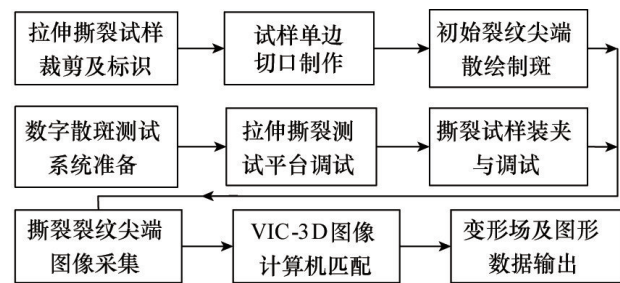


图 1 飞艇蒙皮试样变形分析流程

Fig. 1 Process of airship envelope material specimen deformation analysis

根据美国标准 ASTM D1004-09^[17],制备了 3 种相同的测试试样,试样单边预制初始裂纹长度均是 20 mm。为了得到高质量的数字散斑图,提高数字散斑相关计算的灵敏度与准确度,试件裂纹尖端区域内表面采用了人工制斑的方法,即 CCD 摄像头采集区的人工随机散斑,如图 2 所示。

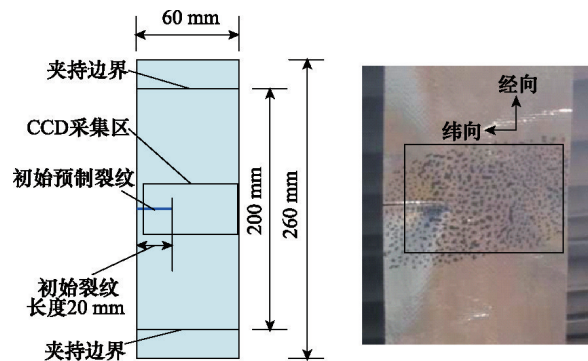


图 2 试样几何尺寸和人工散斑图

Fig. 2 Plane size and the artificial speckle spots of SEN specimens

2 试验过程

图 3 为 I 型加载采用小量程薄膜测试专用拉伸试验台。试样安装卡头采用专用的平行齿槽夹板,保证端头均匀受力,防止表面滑动。加载速度为 1.00 mm/min,对于 Magiscan-2A 图像处理仪,测量位移灵敏度为 1~3 个像素,散斑区选用 9 mm×9 mm 的校准标靶,测量灵敏度为 0.75 μm,应变测量误差为±1%。整个测试都在室温环境中进行,相对湿度 50%。测试中,试样两端拉伸加载和图像采集同时进行,CCD 相机采集散斑图像的频率为 50 Hz,直到整个试样的散斑区全部断裂。利用数字散斑相关分析的软件 VIC-3D 对其进行变形量的提取,获得裂纹尖端区域各个方向的变形量。

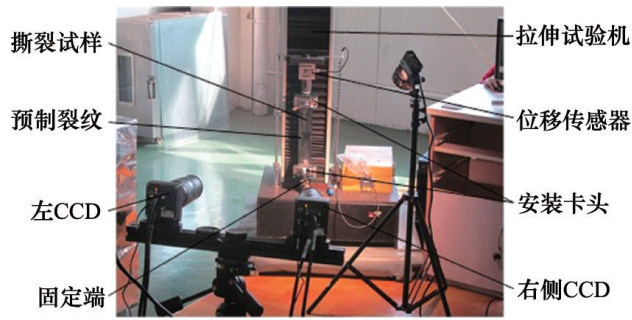


图3 单边切口蒙皮材料撕裂试验与图像采集
Fig. 3 Tearing test and image collecting for SEN specimens

3 结果与讨论

3.1 裂纹尖端变形场

图4为试样I型撕裂裂纹尖端纬向及经向CTOD云图。图4(a)中裂纹尖端纬向CTOD裂纹前端最大,沿着初始裂纹方向逐步递减,蒙皮中纬向纤维束通过纬向移动传递裂纹区域的拉伸应力。由于三角区经向纱束的集中承载作用,裂纹尖端尾部区域几乎没有产生纬向位移。对于经向CTOD,裂纹尖端前部区域没有经向纱线承载,裂纹区纱线成自由状态,经向纱线位移距离裂纹开口端越近,经向CTOD越大,并向裂纹尖端三角区逐渐减小,如图4(b)所示。裂纹尖端后部区域在同一拉伸加载状态中,纱线经向CTOD云图相同,位移大小为1.50~2.15 mm(特征长度为200 mm),因为此区域中纱线未承载裂纹区的载荷,纱线均匀受力伸长,位移变形相等且很小。

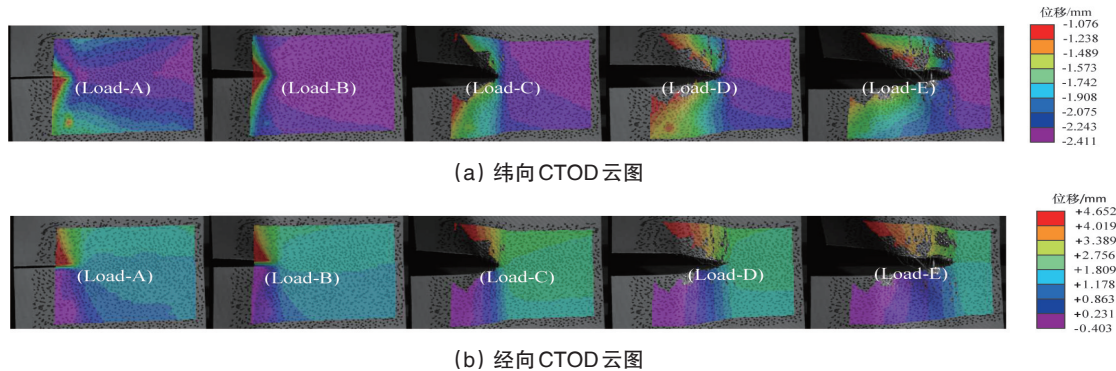


图4 试样I型撕裂裂纹尖端纬向及经向CTOD云图

Fig. 4 CTOD contours of weft and warp at crack tip during mode I tearing crack propagation

对于裂纹尖端应变分布,在形成受力三角区之前,纬向纱线通过横向变形压缩传递初始裂纹区的拉伸应力,试样纬向应变逐渐增至最大(图5(a))。当形成裂纹尖端受力三角区之后,裂纹尖端尾部区域由于受力均匀,横向应变与经向

应变基本保持恒定(图5(b)),裂纹尖端三角区承载裂纹区传递的拉伸应力,三角区附近的切应变始终比其他附近区域偏大(图5(c))。

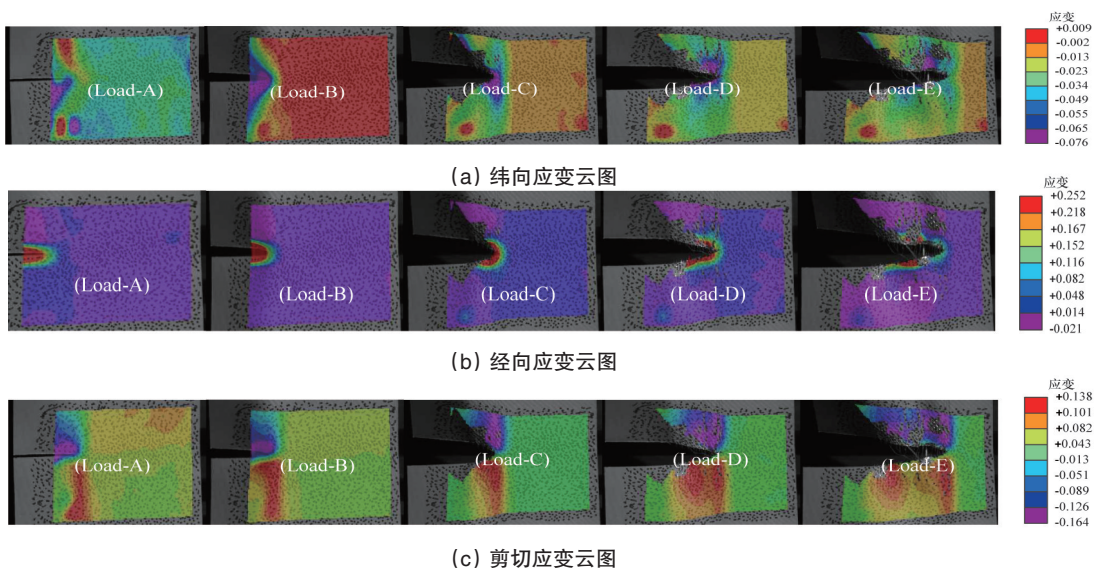


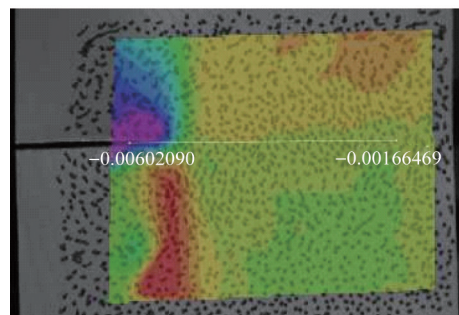
图5 撕裂过程中裂纹尖端纬向应变,经向应变以及剪切应变云图

Fig. 5 Strain contours of weft, warp and shear at crack tip during the tearing crack propagation

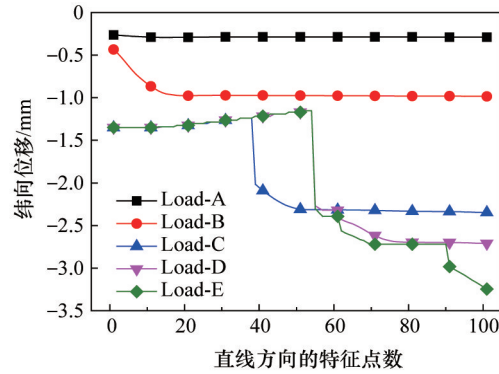
3.2 裂纹尖端变形场

图6为撕裂裂纹在不同载荷下裂纹尖端初始裂纹方向的变形计算值。为研究沿着撕裂裂纹扩展方向的变形场特征,选取裂纹尖端纬向方向直线范围作为计算区域(图6(a))。

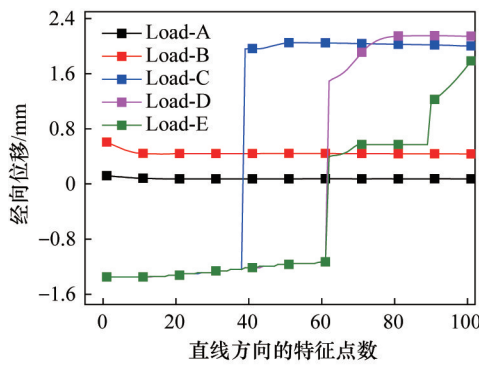
计算时在距离试样左侧边 20 mm 处,沿着初始裂纹方向从左往右依次平均提取 100 个特征点,编号 1~100,长度为 35 mm,采用 VIC-3D 数字散斑程序计算试样在匀速加载直至撕裂破坏过程中的各特征点变形值,结果如图6(b)~(f)所示。



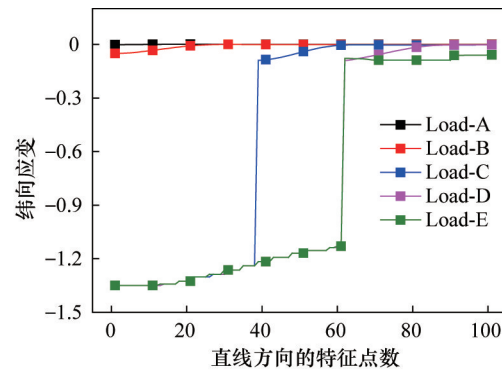
(a) 初始裂纹方向的特征直线选取



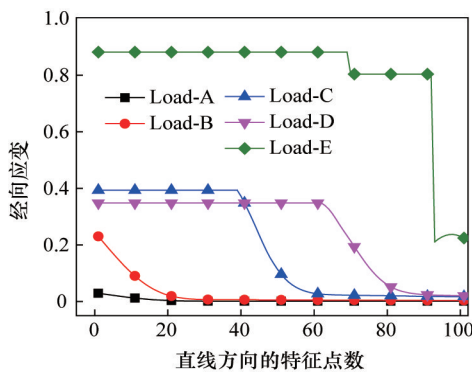
(b) 纬向位移变化



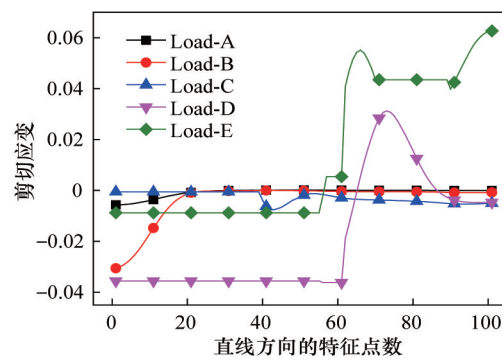
(c) 经向位移变化



(d) 纬向应变变化



(e) 经向应变变化



(f) 剪切应变变化

图6 不同载荷下裂纹尖端初始裂纹方向变形计算值

Fig. 6 Deformation calculation of initial crack direction at the crack tip area under different tearing loads

对含有单边初始切口裂纹的飞艇蒙皮材料试样,在经向单轴加载过程中,随着单向拉伸撕裂位移的增加,在初始预制切口的裂纹尖端形成最大断裂受力三角形之前,裂纹尖端逐渐出现一定程度的钝化,裂纹尖端直线方向纬向位移变形很小,位移 1.3 mm 左右(图6(b)),而经向纱线的位移变形逐渐增大,由最开始的-1.5 mm 增至 2.1 mm(图6(c)),并且经

向位移变形远大于纬向位移。当开始形成应力三角区(Del-zone),裂纹尖端区域出现纱线部分损伤,在继续加载过程中,所有纱线均受拉力而伸长,尖端第1根纱线断裂时,撕裂破坏强力还没有达到最大值,裂纹尖端纱线变形也未达到断裂伸长率,在少量几根纱线断裂后,对应的经纬向曲线出现最大突变。随着裂纹尖端沿着裂纹直线方向扩展前移,切

口后端经向纱线逐根迅速断裂,经纬向纱线的位移变形逐渐减小为零,此时形成新的裂纹区,而新裂纹区域的经纬向纱线基本不再承载。

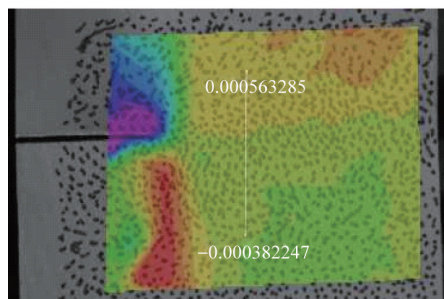
当未形成最大受力三角区之前,纬向应变的变化趋势与位移变化规律相同(图6(d))。而经向纱线的应变随着单向拉伸撕裂位移的增加,应变值迅速增大,直至形成最大的应力三角区,此时由于裂纹尖端区域出现纱线部分损伤,裂纹尖端点的应力达到最大值,对应的裂纹尖端区域经向应变也增至最大值0.9(图6(e))。当形成应力三角区后,随着裂纹沿着直线方向扩展,切口经向纱线迅速断裂,破坏后的经向纱线的应变迅速减小,裂纹区的载荷传递至新形成的裂纹尖端三角区,并且裂纹尖端后部区域当裂纹未形成时,始终只承受很小的拉伸载荷。

裂纹尖端切应变在未形成最大应力三角区前,尖端直线范围内不传递裂纹区的拉伸载荷,纱线承载拉力很小,此区

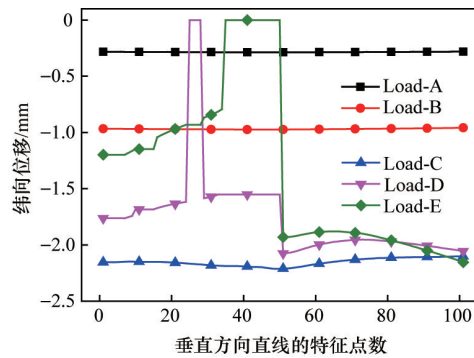
域的切应变很小,切应变值在 $-0.04\sim+0.04$ (图6(f))。当形成应力三角区后,尖端区域通过传递裂纹区的拉伸载荷,剪应力对应的剪应变迅速增大,由于新裂纹尖端的形成,裂纹尖端呈现失稳现象,当纱线断裂后,只有起黏结作用的胶层和基体承载,尖端区的纱线塑形变形会进一步变大,塑性区会沿着裂纹扩展,剪应变即使在应力三角区消失之后仍然保持在较大的范围,以继续传递新形成裂纹区的拉伸载荷。

3.3 垂直于裂纹扩展方向变形场计算与分析

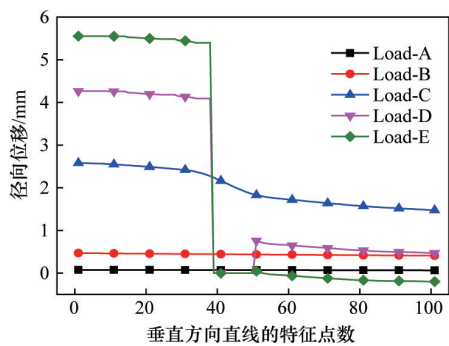
图7为撕裂裂纹在不同载荷下裂纹尖端垂直于初始裂纹方向的变形计算。沿着垂直于初始裂纹方向(图7(a)中白色线段),选取计算范围的直线距离试样左侧边30 mm,特征直线的长度仍然为35 mm。计算分析时以选取的直线长度自下而上平均划分为100个特征点,依次编号1~100。采用与初始裂纹方向计算相同的方法,获得试样在匀速加载直至撕裂破坏过程中的各特征点变形计算值,见图7(b)~(f)。



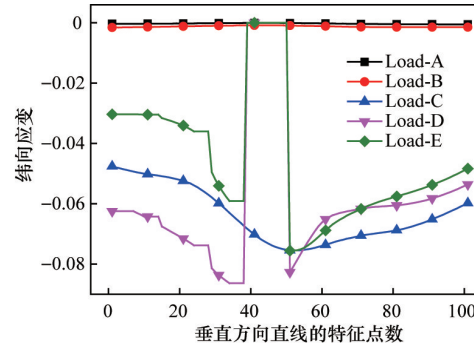
(a) 垂直方向的特征直线选取



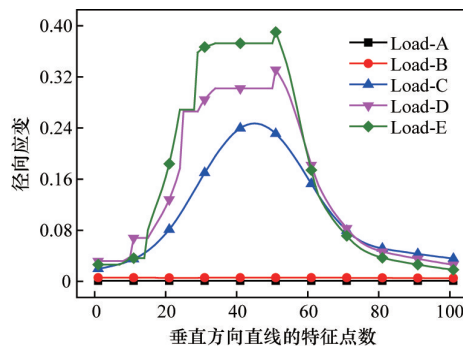
(b) 纬向位移变化



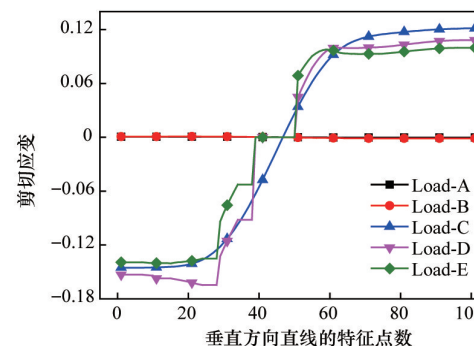
(c) 径向位移变化



(d) 纬向应变变化



(e) 径向应变变化



(f) 剪切应变变化

图7 不同载荷下垂直初始裂纹方向变形计算曲线

Fig. 7 Deformation curves at the perpendicular direction of initial crack under different tearing loads

如图7(b)所示,纬向张开位移表现为阶跃递增规律,对于含有单边初始切口初始裂纹的飞艇蒙皮材料试样,试样初始裂纹长度均为20 mm,在经向单轴拉伸加载过程中,纬向位移增至最大,约2 mm。随着垂直方向撕裂位移的增加,在初始预制切口的裂纹尖端形成最大断裂受力三角形之前,裂纹尖端逐渐出现一定程度的钝化,垂直初始裂纹方向纬向位移变形很小,当即将形成应力三角区时,纬向位移突然增大至三角区形成。

如图7(c)所示,垂直初始裂纹方向的经向纱线的位移变形逐渐增大,由最开始的0.1 mm增至5.5 mm,卡头端部位移无变化,并且经向位移变形远大于纬向位移,裂纹尖端区域经向位移呈现均匀变化现象。当开始形成应力三角区后,裂纹尖端区域出现经向纱线部分损伤,在继续加载过程中,所有经向纱线均受拉力而伸长,裂纹尖端受力三角区第1根经向纱线断裂时,撕裂破坏强力还没有达到最大值,裂纹尖端经向纱线变形值也未达到断裂伸长率,在裂纹尖端三角区少量几根纱线断裂后,相应的经纬向纱线位移出现最大范围的阶跃突变,随着裂纹尖端沿着裂纹水平线方向扩展前移,裂纹尖端三角区已经稳定不扩张,初始裂纹后端经向纱线逐渐迅速断裂,经纬向纱线的位移变形逐渐减小为0,此时形成新的裂纹尖端受力承载区,而新裂纹区域的经纬向纱线基本不再承载,位移值基本保持不变。

如图7(d)所示,纬向纱线因不产生纬向滑移,仅仅传递经向纱线的剪切载荷,应变变化值范围很小,最大应变约为0.083。当未形成裂纹尖端最大受力三角区之前,纬向应变几乎为0。垂直初始裂纹方向的纬向应变的变化趋势与位移变化规律相同,而当形成应力三角区有经向承载纱线断裂时,纬向应变开始产生阶跃突变,使得已经损伤的受力三角区在单向拉伸载荷下重新形成新的应力三角区。

如图7(e)所示,裂纹尖端点的应力达到最大值时,对应的裂纹尖端区域经向应变也增至最大值0.4。未形成裂纹尖端最大应力三角区时,经向应变约为0。经向纱线的应变随着单向拉伸撕裂载荷的增加,应变值迅速增大,直至形成最大的应力三角区,因为此时裂纹尖端区域出现纱线部分损伤。当形成应力三角区后,随着裂纹沿着水平线方向扩展,垂直初始裂纹切口的经向纱线迅速断裂,破坏后的经向纱线的应变迅速减小,呈现阶跃递减规律,将已经形成裂纹区的全部载荷传递至新形成的裂纹尖端三角区,并且裂纹尖端后部区域当裂纹未形成时,始终只承受很小的拉伸载荷,经向应变值约为0.05。

如图7(f)所示,裂纹尖端切应变在裂纹扩展前端纱线伸长之前,裂纹尖端垂直方向范围内不传递裂纹区的拉伸载荷,纱线承载拉力很小,此区域的切应变很小,切应变值保持为0,当开始形成应力三角区后,尖端区域通过传递已经形成裂纹区的拉伸载荷,剪应力增加导致对应的剪应变迅速增大,剪应变值在垂直裂纹方向上呈非线性阶跃变化,切口位

置的变化率达到最大,在距离切口一定范围内基本保持稳定。由于新裂纹尖端的形成,裂纹尖端呈现失稳现象,当纱线断裂后,只有起黏结作用的蒙皮材料胶层和功能层基体承受载荷,尖端区的纱线塑形变形会进一步变大,塑性区会沿着裂纹扩展,剪应变即使在应力三角区消失之后仍然保持在较大的范围波动,以继续传递新形成裂纹区的拉伸载荷。

4 结论

1) 对于Kevlar纤维增强的平流层飞艇蒙皮用的柔性层压织物复合材料,在含有单边切口单轴加载情况下,采用数字散斑相关方法试验获得裂纹扩展过程为近似的脆性断裂特征,数字散斑方法可以有效的测定平流层飞艇柔性蒙皮材料撕裂裂纹尖端的局部变形场,相比其他传统的测量方法如电测法、干涉法、云纹法等,数字散斑法这种非接触式高分辨率测量方法能够更大地提高变形场的测量精度,从而得到更加精确可靠的实验结果。

2) 裂纹扩展过程中,逐步形成受力三角区,并随着拉伸载荷的增加,三角区位移变形逐渐增大,直至第1根纱线拉伸至断裂伸长率,裂纹尖端会出现钝化过程,直至纱线失稳全部断裂,但是由于蒙皮材料主要是材料中编织层压纱线承载,弹性模量高,强度大,裂纹尖端不出现大范围塑形变形。

3) 在裂纹扩展前移过程中,裂纹尖端前部区域的经纬向位移变形、经纬向应变很大,但是尖端后部区域由于未传递裂纹区的拉伸载荷,对应的位移变形和应变分布均匀,变化范围较小。通过裂纹尖端直线方向的位移与应变曲线,获得撕裂裂纹尖端扩展过程中的经纬向位移、经纬向应变及切应变的变化规律和演化特征,经纬向应变在纱线断裂后几乎为0,而切应变在新应力三角区消失后,再次形成的裂纹尖端呈现失稳现象,导致其始终保持较大的范围内波动。

参考文献(References)

- [1] 姚伟,李勇,王文隽,等.美国平流层飞艇发展计划和研制进展[J].航天器工程,2008,17(2):69-75.
Yao Wei, Li Yong, Wang Wenjun, et al. Development plan and research progress of stratospheric airship in USA[J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(2): 69-75.
- [2] 王兆希, 袁宝峰, 逢型召. 平流层浮空器用柔性复合材料的断裂性能[J]. 复合材料学报, 2011, 28(2): 211-216.
Wang Zhaoxi, Dou Baofeng, Pang Xingzhao. Fracture properties of flexible composites from aerostat[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(2): 211-216.
- [3] 徐斌, 颜银标. 断裂韧度CTOD评定技术的现状及应用[J]. 材料导报, 2012, 26(11): 124-129.
Xu Bin, Yan Yinbiao. The overview of assessment technique of CTOD experiment and its application[J]. Materials Review, 2012, 26(11): 124-129.
- [4] 万琳辉, 曹平, 黄永恒, 等. 岩石亚临界裂纹扩展及其应用研究[J]. 科技导报, 2010, 28(9): 42-46.

- Wan Linhui, Cao Ping, Huang Yongheng, et al. Subcritical crack growth of rocks and its applications[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(9): 42-46.
- [5] 张亚, 强洪夫, 杨月诚. 复合型裂纹小范围屈服下裂尖塑性区统一解[J]. 机械工程学报, 2007, 43(2): 50-54.
Zhang Ya, Qiang Hongfu, Yang Yuecheng. Unified solutions to mixed mode crack tip under small scale yielding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(2): 50-54.
- [6] 刘保琼, 李勇. 韧性金属裂纹尖端损伤区内应变场测量——数字散斑相关法应用[J]. 实验力学, 1993, 8(1): 11-17.
Liu Baochen, Li Yong. Measurement of strain field in damage zone around crack-tip—Application of digital[J]. Journal of Experiment Mechanics, 1993, 8(1): 11-17.
- [7] 代树红, 马胜利, 潘一山, 等. 数字散斑相关方法测定岩石I型应力强度因子[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2501-2507.
Dai Shuhong, Ma Shengli, Pan Yishan, et al. Evaluation of mode I stress intensity factor of rock utilizing digital speckle correlation method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2501-2507.
- [8] Bizeul M, Bouvet C, Barrau J J, et al. Fatigue crack growth in thin notched woven glass composites under tensile loading. part II: Modelling[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(3): 297-305.
- [9] Kim S C, Kim J S, Yoon H J. Experimental and numerical investigations of mode I delamination behaviors of woven fabric composites with carbon, Kevlar and their hybrid fibers[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, 12(2): 321-329.
- [10] 陈华. 基于数字散斑相关方法的视觉变形测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
Chen Hua. Study of vision deformation measurement technologies based on digital speckle correlation method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology University, 2008.
- [11] Sutton M A, Orteu J J, Schreier H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications [M]. Springer, 2009: 75-212.
- [12] 樊雪松. 数字散斑相关方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
Fan Xuesong. Study of digital speckle correlation method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [13] Chen Z X, Liang J, Guo C. Application of digital speckle correlation method to deformation measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1480-1485.
- [14] Meng L B, Jin G C, Yao X F. Application of iteration and finite element smoothing technique for displacement and strain measurement of digital speckle correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(1): 57-63.
- [15] 柴兴华. 结合数字散斑干涉和数字图像相关的三维形变测量研究 [D]. 北京: 北京信息科技大学, 2010.
Chai Xinghua. Combined with digital speckle pattern interferometry and digital image correlation of three-dimensional deformation measurement study[D]. Beijing: Beijing University of Information Science and Technology, 2010.
- [16] 曹旭, 王伟志, 顾正铭. 平流层浮空器蒙皮材料力学性能细观分析 [C]//2008年中国浮空器大会论文集. 长沙: 中国航空学会, 2008: 290-295.
Cao Xu, Wang Weizhi, Gu Zhengming. Study on the microcosmic mechanical property of stratosphere airship composite envelope[C]// Proceeding of Chinese Aerstats Conference 2008. Changsha: China Aviation Institute Press, 2008: 290-295.
- [17] American Society for Testing and Materials. ASTM D1004-2009 standard test method for tear resistance (graves tear) of plastic film and sheeting [S]. New York: American Society for Testing and Materials, 2009.

(责任编辑 赵业玲)

·学术动态·



中国科学技术协会

云南省党政领导与院士专家座谈会在昆明举行

2014年5月25日,第16届中国科协年会重要活动——云南省党政领导与院士专家座谈会在昆明举行。院士专家与云南省委、省政府党政领导面对面交流,为云南省跨越发展建言献策。全国政协副主席、中国科协主席韩启德,云南省委书记、省人大常委会主任秦光荣出席会议并讲话,云南省委副书记、省长李纪恒主持会议,中国科协副主席、党组副书记、书记处书记张勤,云南省委副书记仇和,云南省政协主席罗正富出席。

包括中国科学院院士、中国工程院院士在内的13名专家、学者就云南对外开放、新型城镇化、生态文明建设等经济社会发展中的重大课题,以及高原特色农业、生物医药、能源、有色金属、旅游业等特色优势产业发展问题各抒己见,提出许多具有很强的针对性的建议。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/15662989.html>。