

基于图像分割的复合材料I型层间断裂裂纹识别研究

伊泽元, 吴震宇

浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年3月9日; 录用日期: 2023年5月11日; 发布日期: 2023年5月18日

摘要

为了研究复合材料的层间抗拉性能, 一般通过双悬臂梁试验测量复合材料I型层间断裂韧性, 它是复合材料分层扩展及失效机制研究的一个重要参数。在DCB试验过程中通常需要暂停试验去多次测量裂纹长度, 这会影响实际断裂裂纹的传播, 导致裂纹测量误差。为了提高复合材料I型断裂韧性试验中的测量效率, 提出一种基于图像分割的复合材料I型层间断裂裂纹识别方法。该方法使用图像分割模型检测裂纹, 能够实时测量I型断裂裂纹的长度。与实际裂纹长度对比, 测量平均误差不超过2.9%, 证明了本方法的准确和高效。

关键词

复合材料, 双悬臂梁, 图像分割, 裂纹

Mode I Interlaminar Fracture Crack Identification of Composite Materials Based on Image Segmentation

Zeyuan Yi, Zhenyu Wu

School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: Mar. 9th, 2023; accepted: May 11th, 2023; published: May 18th, 2023

Abstract

In order to study the interlaminar tensile properties of composite materials, the mode I interla-

minar fracture toughness of composite materials is generally measured by double cantilever beam test, which is an important parameter for the study of delamination propagation and failure mechanism of composite materials. In the DCB test process, it is usually necessary to pause the test to measure the crack length for many times, which will affect the propagation of the actual fracture crack and cause the crack measurement error. In order to improve the measurement efficiency in the mode I fracture toughness test of composite materials, a method for identifying the mode I interlaminar fracture crack of composite materials based on image segmentation is proposed. This method uses image segmentation model to detect cracks and can measure the length of mode I fracture crack in real time. Compared with the actual crack length, the average error of measurement is not more than 2.9%, which proves the accuracy and efficiency of this method.

Keywords

Composite Material, Double Cantilever Beam, Image Segmentation, Crack

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来随着复合材料在航空航天、军事等领域的广泛应用,对复合材料韧性预测方法的研究越来越重要。在复合材料的韧性研究中,通过断裂力学方法研究复合材料分层断裂的韧性是一种有效方法。在使用过程中复合材料的刚度、强度性能会随着断裂裂纹的扩展而下降。复合材料 I 型层间断裂韧性的测量方法通常为单向复合材料的末端切口试样的双悬臂梁(Double cantilever beam, DCB)试验[1]。姚辽军通过对复合材料分层扩展路径和分层扩展断面进行显微镜观察和 SEM 电镜扫描分析,明确了复合材料 I 型静态分层扩展中的典型断面断裂机理[2]。张璐以飞机实际构件中的典型分层缺陷为研究对象,预测分层在压缩载荷及疲劳载荷作用下的扩展情况,定量分析分层缺陷对复合材料结构的影响,并通过双柔度法测试复合材料 I 型层间断裂韧性[3]。

在进行 DCB 实验时,为了保证载荷、位移实时对应,实验人员通常在试验过程中每次发生裂纹扩展时中途暂停,再测量此刻的裂纹长度。该方法虽然能够测量出裂纹长度,但由于实验过程中多次暂停,导致实验过程中的裂纹扩展与真实场景存在一些差异,从而造成测量误差[4]。因此,为了提高 DCB 实验过程中的准确性和效率,提出一种基于图像分割的复合材料 I 型层间断裂裂纹识别方法。首先使用 Sobel 边缘检测算子提取复合材料截面的刻度值信息,然后使用图像分割模型检测复合材料断裂裂纹区域,最后通过裂纹区域长度与刻度值信息计算出断裂裂纹的真实长度值。

2. 裂纹识别方法原理

2.1. Sobel 边缘检测算子

Sobel 算子是一种基于图像强度的一阶微分算子,通常用于图像边缘检测[5]。与 Roberts 算子、Laplacian 算子和 Canny 算子[6]等经典边缘检测算子相比,Sobel 算子具有计算方法简单、处理速度快等优点。传统的 Sobel 算子边缘检测是利用水平方向(0°)和垂直方向(90°)两个方向的边缘检测模板与图像作卷积操作,通过计算图像的一阶导数得到图像的边缘点像素值。在实际使用中 Sobel 算子通常选取 3×3

尺寸的模板, 0° 和 90° 的 $3 * 3$ 尺寸 Sobel 算子模板 S_0 和 S_{90} 分别为

$$s_0 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad s_{90} = \begin{bmatrix} -101 \\ -202 \\ -101 \end{bmatrix}$$

假设连续的图像用函数 $f(x, y)$, 其在 (x, y) 处的梯度是一个具有方向和大小的矢量, 即

$$\Delta f(x, y) = \frac{\partial f}{\partial x} i + \frac{\partial f}{\partial y} j \quad (1)$$

式中 i, j 分别是 x, y 方向的单位矢量。

$f(x, y)$ 在 (x, y) 处的梯度幅值表示为

$$|\Delta f(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

2.2. 图像分割算法

图像语义分割是基于标签数据的像素到像素的分类, 将像素(Pixel)按照图像中不同的语义含义进行分割(Segmentation), 也称图像语义标注(Image semantic labeling) [7], 具体实例如图 1 所示。

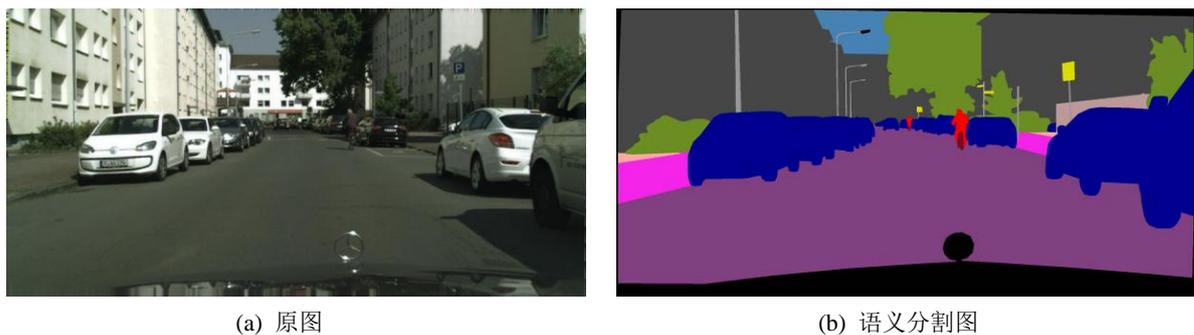


Figure 1. Image semantic segmentation diagram
图 1. 图像语义分割图

Deeplab 语义分割系列是 Google 团队提出的语义分割网络[8], Deeplab v3 的网络结构如图 2 所示, 它的网络结构主要分为编码部分和解码部分。在编码部分, 原始的图像首先通过以深度卷积网络(Deep Convolutional Network, DCNN)为主干的特征提取网络提取特征信息, 从上到下网络越来越深, 其中浅层网络卷积的感受野较小, 主要用于提取图像中的空间信息, 如图像的纹理、轮廓等等; 深层网络卷积的感受野大且融合了浅层的特征, 主要用于提取图像的高级语义信息。在解码部分, 通过上采样的方式还原特征图的尺寸, 为了融合网络结构的上下文信息, 将编码阶段不同深度的输出拼接到解码部分对应尺寸的特征图上。

空间金字塔池化(Atrous Spatial Pyramid Pooling, ASPP)是 DeepLab 中用于语义分割的一个模块。由于图像中待检测物体具有不同的尺度, 给分割增加了难度。因此, DeepLab 设计了一个 ASPP 的模块, 既能得到图像的多尺度信息, 同时计算量又比较小。图 3 即是空间金字塔池化结构, 通过使用不同 rate 大小的空洞卷积(Atrous Convolution)使得每个分支的尺度不同, 最后将不同分支的尺度信息进行融合。

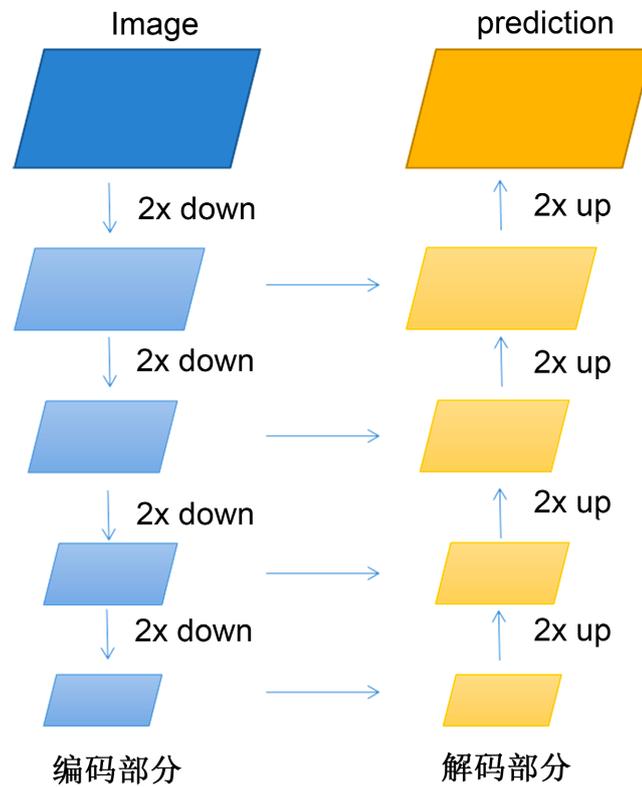


Figure 2. Deeplab V3 image segmentation network structure

图 2. Deeplab V3 图像分割网络结构

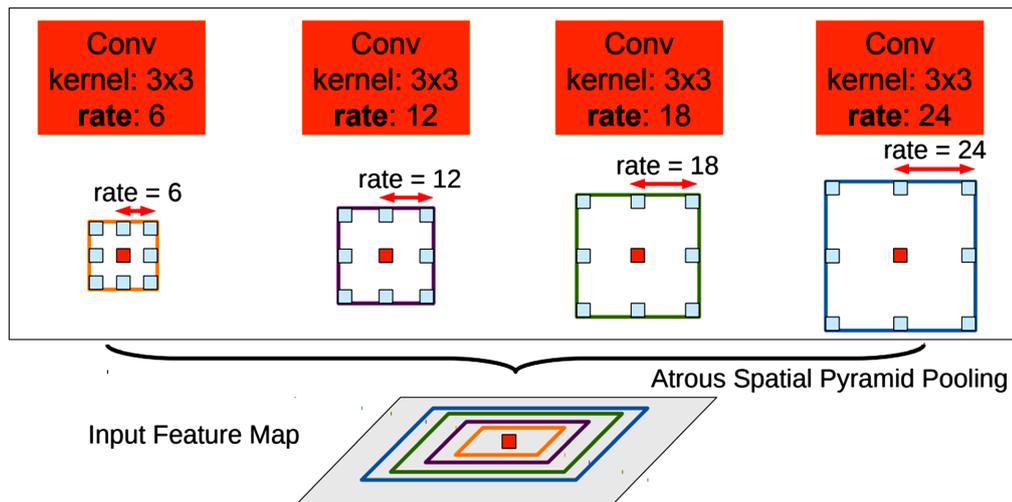


Figure 3. Space pyramid pool

图 3. 空间金字塔池化

3. 裂纹识别模型构建

3.1. 准备数据集

使用相机拍摄复合材料 DCB 试验过程, 采集复合材料 I 型层间断裂裂纹图片, 图片的分辨率为 1920 * 1080, 图片的样例图如图 4 所示。

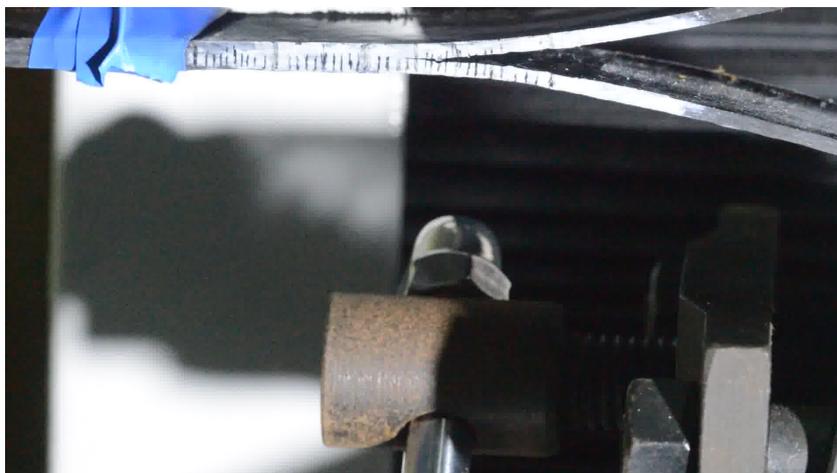


Figure 4. Interlayer fracture crack diagram of Type I composite material
图 4. 复合材料 I 型层间断裂裂纹图

3.2. 标注数据

共采集 485 张断裂裂纹图片, 然后使用 labelme 标注工具对图片进行标注, 图像中需要标注的类别有横截面区域和断裂裂纹区域两个类别。标注好的图片如图 5 所示, 其中红色区域为复合材料的横截面, 绿色区域为复合材料层间断裂裂纹。

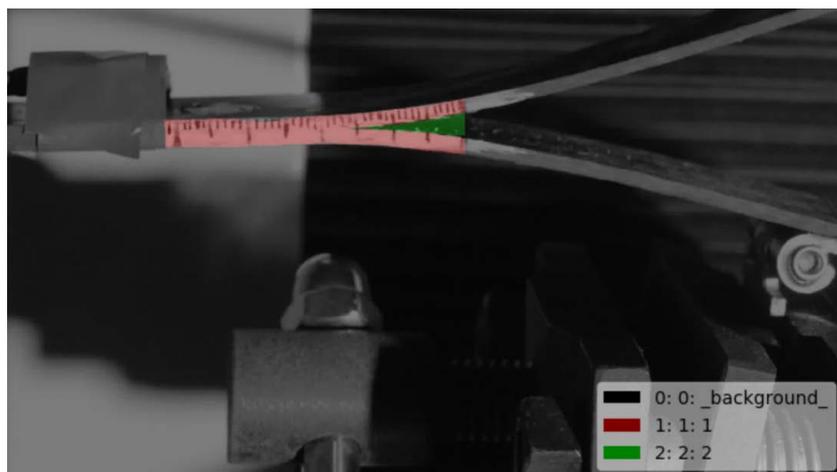


Figure 5. Effect drawing of fracture crack picture annotation
图 5. 断裂裂纹图片标注效果图

3.3. 训练裂纹分割模型

我们将标注好的数据分为训练集和测试集, 其中训练集样本数量为 385 张, 测试集数据为 100 张, 训练集和测试集数据随机分配。训练模型时需要设置下面的部分参数, 图像输入尺寸 $inputSize = 512 * 512$, 初始学习率 $lr_start = 1e-3$, 衰减权重 $weight_decay = 1e-4$, 最大训练次数 $max_iter = 40000$ 。分割模型的训练过程如图 6 所示。

随着模型的训练迭代次数的增加, 模型的 loss 误差越来越小, loss 值从最开始的 5.3 下降到 0.69。训练 40,000 轮迭代后 loss 收敛得到最终的模型。训练好的分割模型在测试集中的结果为 $mIOU = 0.946$ 。

```

INFO train_fengxi.py(367): it: 50/40000, lr: 0.001000, loss: 5.3015, eta: 9:43:34, time: 42.9457
INFO train_fengxi.py(367): it: 100/40000, lr: 0.000999, loss: 4.1141, eta: 9:32:10, time: 42.2331
INFO train_fengxi.py(367): it: 150/40000, lr: 0.000998, loss: 3.6332, eta: 9:28:20, time: 42.3192
INFO train_fengxi.py(367): it: 200/40000, lr: 0.000997, loss: 3.3139, eta: 9:25:16, time: 42.0787
INFO train_fengxi.py(367): it: 250/40000, lr: 0.000995, loss: 3.3640, eta: 9:23:09, time: 42.0815
...
...
...
INFO train_fengxi.py(367): it: 38800/40000, lr: 0.000044, loss: 0.6997, eta: 0:14:23, time: 35.7936
INFO train_fengxi.py(367): it: 38850/40000, lr: 0.000042, loss: 0.6995, eta: 0:13:47, time: 35.9456
INFO train_fengxi.py(367): it: 38900/40000, lr: 0.000040, loss: 0.6689, eta: 0:13:11, time: 35.9738
INFO train_fengxi.py(367): it: 38950/40000, lr: 0.000039, loss: 0.6773, eta: 0:12:35, time: 35.7057
INFO train_fengxi.py(367): it: 39000/40000, lr: 0.000037, loss: 0.6790, eta: 0:11:59, time: 35.7803
INFO train_fengxi.py(367): it: 39050/40000, lr: 0.000035, loss: 0.6768, eta: 0:11:23, time: 36.4146
INFO train_fengxi.py(367): it: 39100/40000, lr: 0.000034, loss: 0.6911, eta: 0:10:47, time: 35.8759
INFO train_fengxi.py(367): it: 39150/40000, lr: 0.000032, loss: 0.6916, eta: 0:10:11, time: 36.1204
INFO train_fengxi.py(367): it: 39200/40000, lr: 0.000030, loss: 0.6910, eta: 0:09:35, time: 35.7819
INFO train_fengxi.py(376): evaluating the model ...
INFO train_fengxi.py(382): compute the mIOU
INFO train_fengxi.py(416): mIOU50 is: 0.9642731547355652, mIOU75 is: 0.9642731547355652

```

Figure 6. Training process of crack segmentation model

图 6. 裂纹分割模型训练过程

4. 复合材料层间 I 型层间断裂裂纹识别实验

4.1. 横截面刻度信息提取

图 7 是复合材料横截面区域, 在 DCB 实验过程中我们需要提取截面区域的刻度信息, 方便后续过程中对断裂裂纹的长度进行识别。首先通过图像分割模型提取出复合材料横截面区域, 由于横截面区域的颜色信息较多, 在进行刻度边缘提取时需要将横截面区域图像进行灰度化处理。原始图像有 R、G、B 三个通道, 通过公式(1)将其转换为单通道灰度图:

$$f(x, y) = 0.299R(x, y) + 0.587G(x, y) + 0.114B(x, y) \quad (3)$$

其中, R、G、B 分别表示图像的红、绿、蓝通道, (x, y) 表示图像像素坐标, f 是得到的灰度图像。



Figure 7. Schematic diagram of cross section of composite material

图 7. 复合材料横截面示意图

对复合材料横截面区域图像灰度化处理, 然后使用垂直方向的 Sobel 边缘检测算法提取该区域中刻度信息, 图 8 是经过 Sobel 边缘检测算子处理后的图像, 横截面的刻度信息被提取出来。整个提取流程如图 9 所示。

4.2. 断裂裂缝检测

在 DCB 实验过程中, 我们通过训练好的裂纹分割模型对复合材料 I 型层间断裂裂纹进行实时分割, 裂纹的分割结果如图 10 所示。分割模型能够准确的提取到断裂裂纹。



Figure 8. Cross section region processed by Sobel edge detection operator
图 8. Sobel 边缘检测算子处理后的横截面区域

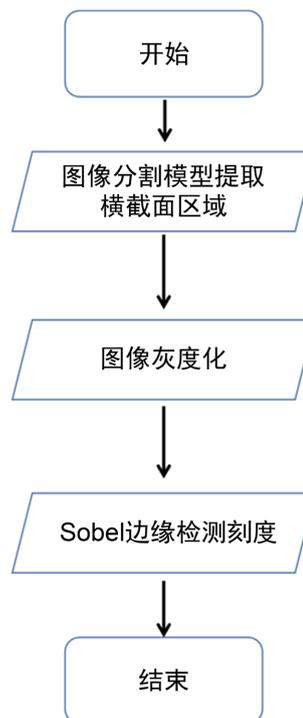


Figure 9. Flow chart of cross section scale information extraction
图 9. 横截面刻度信息提取流程图

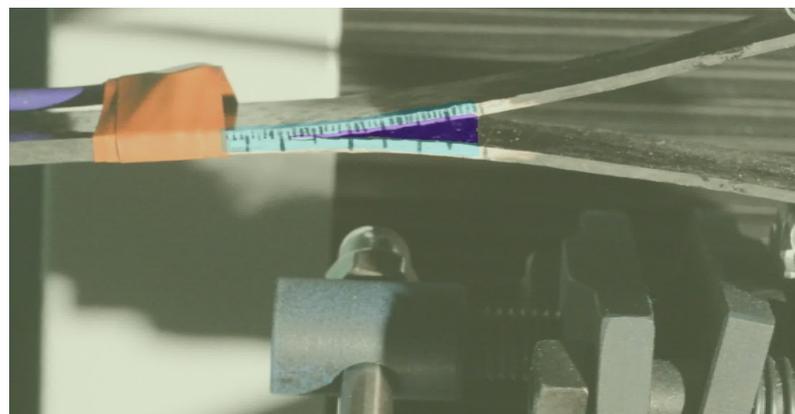


Figure 10. Segmentation effect of crack segmentation model
图 10. 裂纹分割模型的分割效果图

4.3. 断裂裂纹长度识别分析

在 DCB 实验过程中, 通过 Sobel 边缘算子提取到横截面的刻度信息, 然后通过裂纹分割模型提取到断裂裂纹的区域, 最后将断裂裂纹区域尺寸映射到实际的长度值。这样在 DCB 实验过程中就能实时的计算出复合材料 I 型层间断裂裂纹的长度, 避免在实验时中途暂停去测量裂纹长度。图 11 是 DCB 实验过程中, 图像分割方法自动识别出的裂纹长度与实际长度的比较结果。横坐标为 DCB 实验过程中的时间, 纵坐标为断裂裂纹的长度, 实验过程中随着时间变化裂纹长度逐渐变大。图像分割方法识别的裂纹长度与实际长度平均误差为 2.9%, 说明基于图像分割的复合材料 I 型层间断裂裂纹识别方法在 DCB 实验过程中能够有效的识别出裂纹长度。

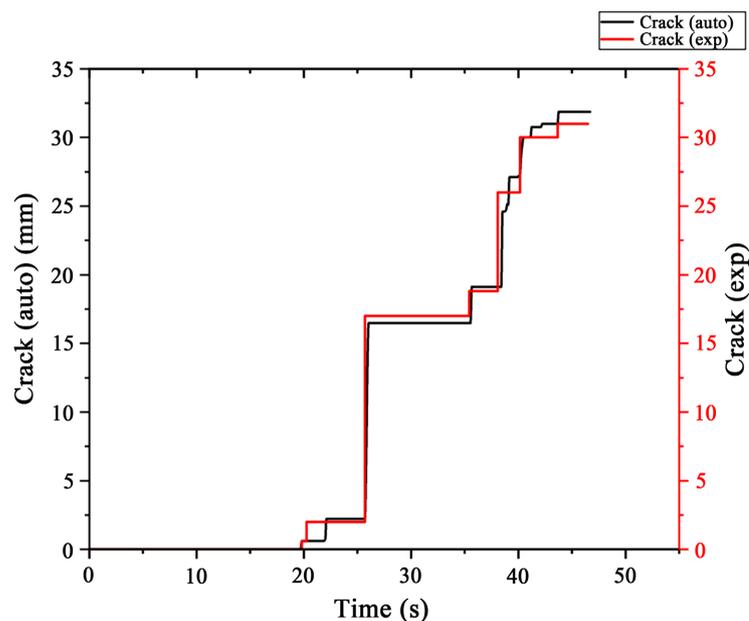


Figure 11. Comparison of image segmentation crack recognition results

图 11. 图像分割裂纹识别结果对比

5. 结论

为了解决 DCB 实验过程中人工测量复合材料 I 型层间断裂裂纹长度带来的误差问题, 本文提出一种基于图像分割的复合材料 I 型层间断裂裂纹识别方法。该方法通过 Sobel 边缘检测算子提取复合材料横截面的刻度信息, 然后利用图像分割模型获取断裂裂纹的区域, 最终识别出断裂裂纹的真实长度值。通过实验表明, 本文提出的方法能够有效地识别出 DCB 实验过程中复合材料 I 型层间断裂裂纹的长度, 提高了 DCB 实验过程中裂纹长度测量的准确率和效率, 为后面的复合材料分层韧性预测提供了重要参数指标。

参考文献

- [1] 康永胜, 张小章, 王黎明, 等. 圆弧形单向纤维增强树脂复合材料的 I 型层间断裂韧性测试及分析[J]. 复合材料学报, 2021, 38(9): 10.
- [2] 姚辽军. 复合材料层间 I 型静态及疲劳断裂机理研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- [3] 张璐. 含分层缺陷复合材料层合板分层扩展行为与数值模拟研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

- [4] Zhu, J. and Gao, Z. (2007) Research on Crack Measurement Technique in Solids Material with Digital Image Correlation (DIC). *Key Engineering Materials*, **353**, 2606-2610.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.353-358.2606>
- [5] 李迪, 吴奇, 杨浩森. 基于改进 Sobel 算子的边缘检测系统的设计与实现[J]. 信息技术与网络安全, 2022, 41(3): 13-17.
- [6] Chakravarthi, M.K. and Vinay, P. (2014) LabVIEW Based Comparison of Various Edge Detection Techniques for Bug Classification. *International Journal of Materials Science*, **9**, 6381-6390.
- [7] Lu, X., Wang, W., Shen, J., *et al.* (2022) Zero-Shot Video Object Segmentation with Co-Attention Siamese Networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **2022**, 44.
- [8] Chen, L.C., Papandreou, G., Schroff, F., *et al.* (2017) Rethinking Atrous Convolution for Semantic Image Segmentation. *Computer Vision and Pattern Recognition*.