

UPVC 板材冲击断裂实验分析

吕 婧¹, 王 磊²

(1. 青岛黄海学院 智能制造学院, 山东 青岛 266500; 2. 中电科思仪科技股份有限公司, 山东 青岛 266500)

摘要:基于断裂力学理论,采用实验为基本研究手段,结合数字图像相关技术和断裂试验,研究 UPVC 板材在冲击荷载作用下的断裂性能。结果表明,在相同的冲击能作用下,复合型裂纹启裂的时间比纯 I 型裂纹的启裂时间早;纯 I 型裂纹的扩展速度大于复合型裂纹的扩展速度,两种裂纹的扩展速度都随裂纹扩展量的增加而逐渐减小,纯 I 型裂纹按照纯 I 型扩展路径扩展,复合型裂纹按照复合型扩展路径扩展并受 I 型主导;将数字图像技术应用于冲击荷载作用下的断裂问题是切实可行的。

关键词:UPVC; 数字图像; 冲击断裂; 实验分析

中图分类号:O346.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)14-0271-04

UPVC(unplasticized polyvinyl chloride),通常称为硬聚氯乙烯(PVC),是一种以 PVC 树脂为原料,不含增塑剂的高分子材料,具有绝缘、耐腐蚀、重量轻等特点。目前已作为部分金属的替代品广泛应用于建筑、化工、包装、排水工程等相关领域。目前对 UPVC 的力学性能研究集中在准静态实验研究,徐惠俭^[1]简单分析了 UPVC 材料的加工方法以及各种添加剂和助剂的最佳使用量和各自的适用条件,提出可以通过添加改性剂来提高 UPVC 管的韧性从而达到提高 UPVC 管的抗冲击能力的目的。罗筑等^[2]将 PVC 材料制成对含穿透裂纹的三点弯试样进行试验,分析了断面粗糙度与断裂能之间的对应关系,并结合试样断口的形貌特征,探讨了 PVC 材料的断裂过程和机制。冯芷平等^[3]提出冲击试样尺寸、试验装置、试验技术、温度、试样的成型工艺和试样材质不均匀等方面都会影响 PVC 材料的冲击性能。

材料在爆炸、冲击等动荷载作用下会发生应变率效应,使其表现出与准静态荷载作用下截然不同的性质。例如,强度的成倍增加或塑性性能的严重改变,因此对材料在冲击荷载作用下力学性能的研究是非常有必要的。为了更好地对 UPVC 板材在冲击荷载作用下的力学性能进行研究,基于前人的研究基础,根据数字图像相关技术,从弹塑性断裂力学的角度出发,对其进行冲击断裂实验研究^[4]。

1 冲击断裂试验方法

冲击实验采用落锤冲击试验装置,可方便地调节锤头的重量和高度,冲击试验机下半部分是一个可升降的“V”字形支座,顶端跨距为 180 mm,与准静态断裂试验的支座跨距保持一致,方便试验数据的处理和对比。

试件冲击荷载作用下试件破坏的时间仅为几毫秒,为了采集下试件破坏过程中的数字图像,需建立一套高速数字图像采集系统。高速数字图像采集系统包括高速摄像机、TTL 信号触发器、PFV (photron FASTCAM viewer) 软件、具有千兆网卡的电脑、冷光源。最终建立由落锤冲击试验机、高速数字图像采集系统和高速数据采集系统组成的冲击断裂试验系统,如图 1 所示。

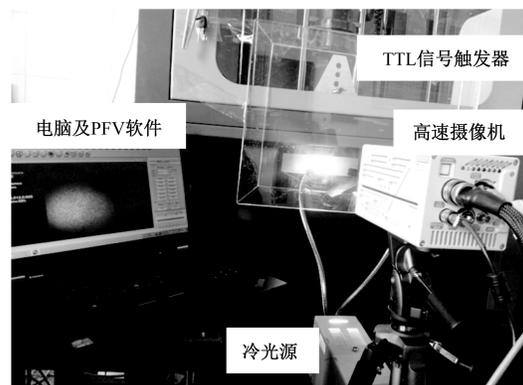


图 1 数据采集系统

收稿日期:2023-03-02

基金项目:青岛黄海学院校级课题(2021KJ11)。

作者简介:吕婧(1988—),女,山东潍坊人,青岛黄海学院智能制造学院,副教授,硕士,研究方向为复合断裂。

试件采用三点弯试件,在试件的下表面用手锯切出 10 mm 的机械口,然后用美工刀在该试件上切 1 mm 的尖口,形成纯 I 型试件和裂纹方位不对称的复合型试件。实验开始前同样对试件进行制斑,然后用 MTS810 疲劳试验机预置 3 mm 长裂纹,使预制的疲劳裂纹平直且与机械尖口形成理想尖裂纹。最终用于试验的试件规格为 200 mm×50 mm×15 mm。疲劳裂纹预制好后,冲击试验系统对 UPVC 材料的三点弯试件进行冲击断裂试验^[5]。冲击断裂试验用落锤冲击试验机施加冲击荷载,锤头重量为 8 kg,冲击高度为 250 mm。高速数字图像采集系统采集下试件受冲击荷载作用而发生断裂时裂纹扩展的数字图像,高速摄像机与试件表面垂直,试验过程中采集裂纹扩展的数字图像,高速摄像机的拍摄速度分为 5 000fps/s 和 30 000fps/s,对应的分辨率分别是 512×512pixel 和 512×64pixel。高速数据采集系统采集下落锤冲击试件时的力与时间关系曲线($F-t$)和加速度与时间关系曲线($a-t$)。试验开始前将试件放置在落锤冲击试验机可升降的“V”字形支座上。为了方便后期数字图像的处理,在每次试验前,都需要对采集的图像进行纵向和横向标定。

2 裂纹扩展速度

UPVC 试件在冲击荷载作用下发生断裂,用高速摄像机可拍摄下试件断裂时,裂纹扩展的数字图像。当高速摄像机的拍摄速率为 30 000fps/s 时,采集下纯 I 型和复合型加载方式下的数字图像。

UPVC 材料在受冲击荷载作用时,裂纹扩展的速度并不是一个恒定的值,随着高速裂纹扩展量的增加及冲击力的变化,裂纹的扩展速度也会发生变化^[6]。而且在纯 I 型和复合型两种不同的加载方式下,裂纹的扩展速度也不相同。根据数字图像相关技术,对采集下的含裂纹 UPVC 材料在冲击荷载作用下裂纹扩展的数字图像进行计算分析,可得出 UPVC 材料在纯 I 型和复合型的冲

击荷载作用下,裂纹扩展速度 v 与裂纹扩展量 Δa 之间的关系。

设 x_1, x_2 为前后两张数字图像计算出的裂纹在 x 方向上的扩展量, y_1, y_2 为裂纹在 y 方向上的扩展量。因为高速摄像机的拍摄速度为 30 000 fps/s,前后两张数字图像拍摄的时间间隔就等于 1/30 000 s。则冲击荷载作用下裂纹扩展速度的具体计算方法^[7]为

$$\begin{cases} v = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{1/30\,000} \\ v_x = \frac{|x_2 - x_1|}{1/30\,000} \\ v_y = \frac{|y_2 - y_1|}{1/30\,000} \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)和高速摄像机采集下的数字图像,可计算出含裂纹 UPVC 材料在冲击荷载作用下裂纹扩展速度与高速裂纹扩展量之间的变化关系,如表 1 所示。

含裂纹的 UPVC 材料在纯 I 型加载方式下,锤头接触试件后的图片的第 12 张数字图像可以观察到裂纹开始扩展,每张图片的拍摄间隔为 1/30 000 s,则裂纹的启裂时间为 12/30 000 = 4×10^{-4} s。在复合型加载方式下,可以观察到裂纹开始扩展的是锤头接触试件后的第 7 张数字图像,则裂纹的启裂时间为 7/30 000 $\approx 2.33 \times 10^{-4}$ s。说明在相同的冲击能作用下,复合型裂纹启裂的时间比纯 I 型裂纹的启裂时间早,在冲击荷载作用下复合裂纹更容易启裂,这可能与应力波的入射和反射角有关,这部分内容今后可做更深入的研究。

纯 I 型裂纹的扩展速度大于复合型裂纹的扩展速度,两种裂纹的扩展速度都随裂纹扩展量的增加而减少。纯 I 型裂纹在 x 方向上的分速度为 0,裂纹按照纯 I 型扩展路径扩展。复合型裂纹在 x 和 y 方向上的分速度都不为 0, y 方向的裂纹扩展速度远大于 x 方向,所以复合型裂纹按照复合型扩展路径扩展,受 I 型主导。

表 1 不同加载方式下裂纹扩展速度

纯 I 型	裂纹扩展量 $\Delta a/\text{mm}$		7.065 217	14.021 74	20.326 09	25.326 09
	速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	v_x	211.956 5	208.695 7	189.130 4	150
		v_y	0	0	0	0
		v	211.956 5	208.695 7	189.130 4	150
复合型	裂纹扩展量 $\Delta a/\text{mm}$		6.638 553	12.868 02	18.431 64	22.971 1
	速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	v_x	196.362 9	183.272 1	166.908 5	134.181 3
		v_y	33.241	36.565 1	26.592 8	23.268 7
		v	199.156 6	186.884 1	166.908 5	136.183 9

3 裂纹尖端位移场、应变场分析

含裂纹 UPVC 材料在冲击荷载作用下的断裂试验位移场和应变场用 Vic2D 计算软件计算得出。通过 Vic2D 计算软件对高速图像采集系统采集下的数字图像进行计算,为了提高计算精度, Vic2D 要求数字图像的分辨率至少为 512×512 pixel,因此在拍摄时将高速摄像机的拍摄速度设置为 5 000 fps/s。

拍摄速度的降低,采集到的裂纹扩展的图片也相对较少,当观察到裂纹开始扩展时裂纹尖端已受多股反射应力波冲击,无法计算出裂纹扩展时的位移场和应变场,所以在此只计算裂纹开始扩展前的位移场和应变场^[8]。

图 2 为用 Vic2D 软件得出的纯 I 型和复合型加载方式下,裂纹启裂时 U 、 V 方向位移场。图 3 为用 Vic2D 软件得出的纯 I 型和复合型加载方式下,裂纹启裂时 x 方向、 y 方向和 xy 平面应变场。用试件未受力时采集下的数字图像为参考图像,计算区域为 430×380 pixel,计算区域的分辨率尽量接近裂纹尖端,计算过程中选取子集大小为 43 pixel。

如图 2 所示,裂纹启裂前裂纹尖端的位移场与准静态荷载作用下位移场的分布形式基本相同,在纯 I 型加载方式下位移场呈对称分布,在复合型加载方式下位移场向荷载施加方向偏移,说明将数字图像技术应用于冲击荷载作用下的断裂问题是切实可行的。对图 3 所示的裂纹尖端的应变场的计算结果不太理想,认为计算结果较差是因为数字图像的分辨率过低导致的,可以通过提高数字图像分辨率来解决这一问题,但由于试验设备有限,所以当拍摄速度为 5 000 fps/s 时,分辨率最高只能到 512×512 pixel,影响了计算结果的准确性。

4 结论

根据 UPVC 板材在冲击荷载作用下断裂试验过程中采集下来的数字图像,得出了 UPVC 材料纯 I 型和复合型断裂时的裂纹扩展路径及裂纹扩展速率;通过 Vic2D 计算软件计算 UPVC 试件在冲击荷载作用下裂纹启裂前的位移场与应变场。最终得到以下结论:

1) 根据采集图片得出,相同的冲击能作用下,复合型裂纹启裂的时间比纯 I 型裂纹的启裂时间早。

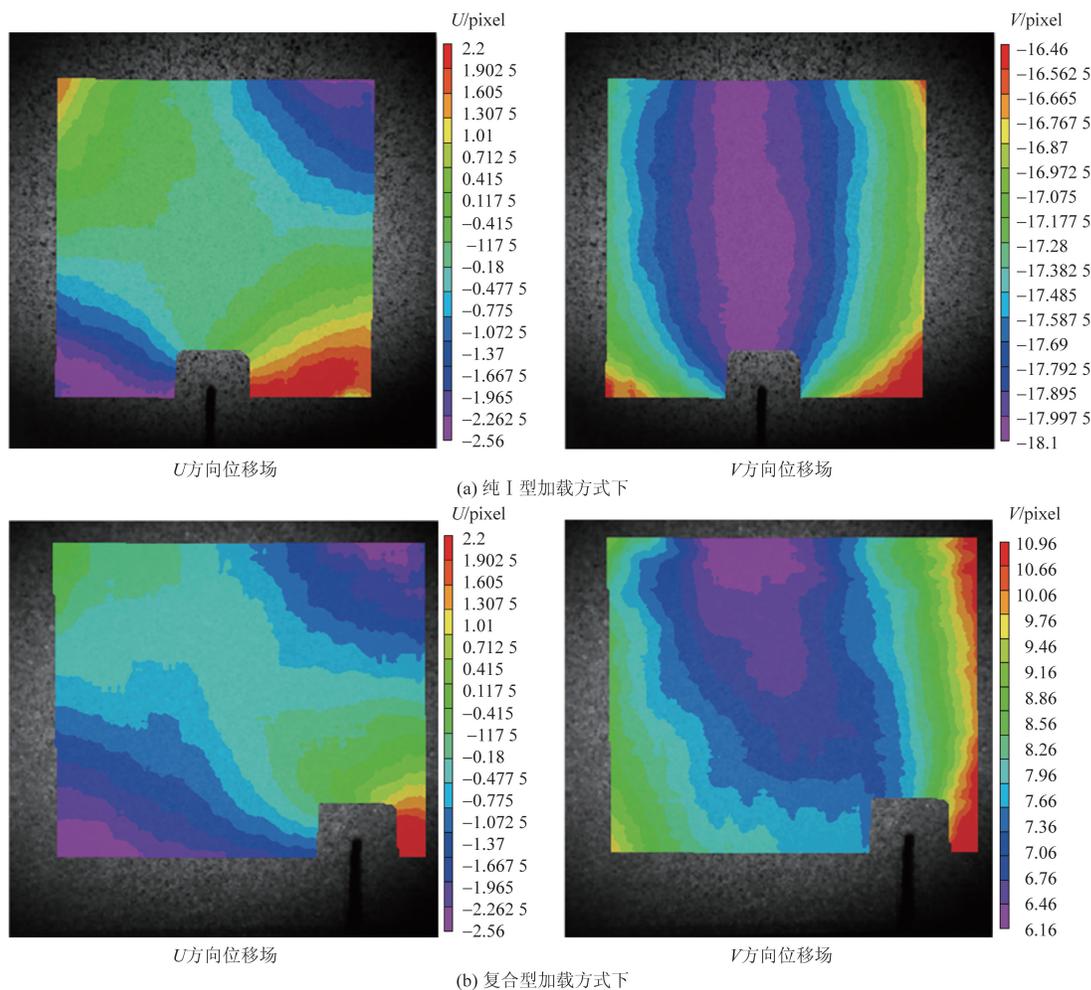


图 2 裂纹启裂前裂纹尖端位移场

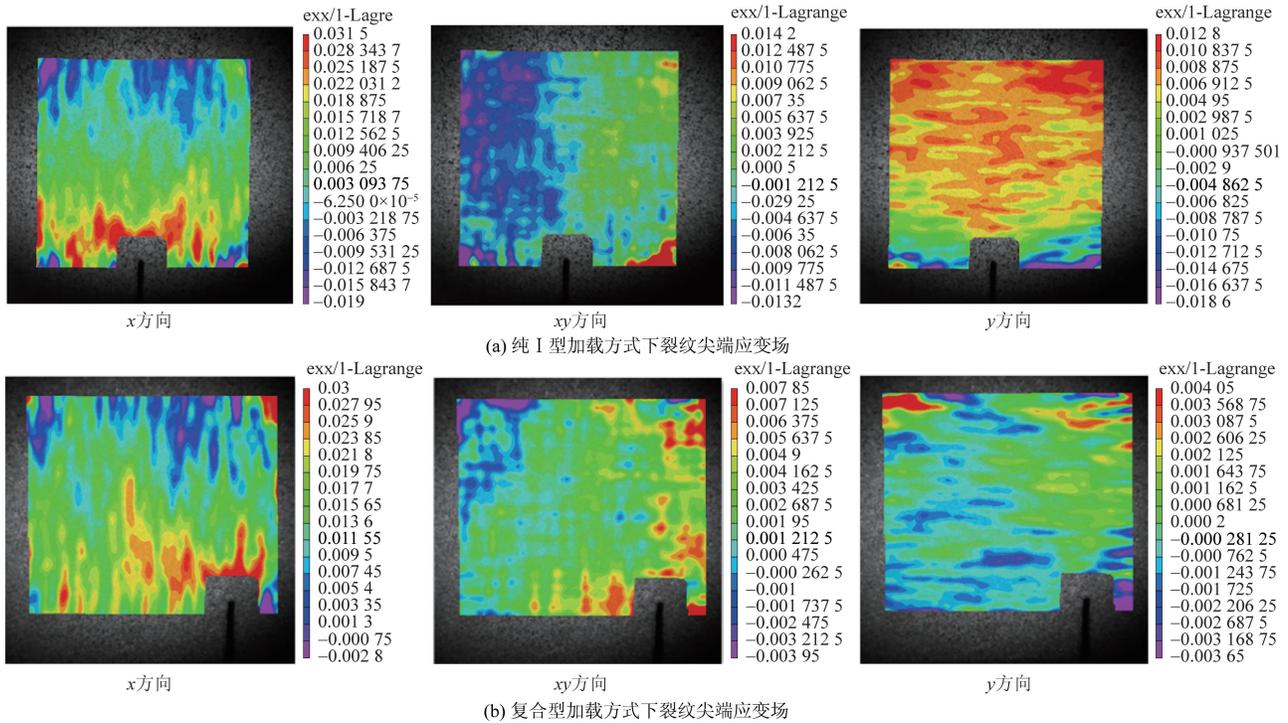


图 3 裂纹启裂前裂纹尖端应变场

2) 纯 I 型裂纹的扩展速度大于复合型裂纹的扩展速度, 两种裂纹的扩展速度都随裂纹扩展量的增加而逐渐减小。纯 I 型裂纹按照纯 I 型扩展路径扩展。复合型裂纹按照复合型扩展路径扩展, 受 I 型主导。

3) 裂纹启裂前裂纹尖端的位移场与准静态荷载作用下位移场的分布形式基本相同, 在纯 I 型加载方式下位移场呈对称分布, 在复合型加载方式下位移场向荷载施加方向偏移, 说明将数字图像技术应用于冲击荷载作下的断裂问题是切实可行的。

参考文献

[1] 徐惠俭. UPVC 芯层发泡管材生产工艺的影响因素[J]. 石化技术与应用, 2002(5): 324-326, 292.

[2] 罗筑, 胡世军, 黄浩, 等. PP/PEO/OMMT 复合材料微观形态及力学性能研究[J]. 塑料科技, 2010(8): 29-32.

[3] 冯芷平, 陈铸山, 冯文兴. PVC 聚合釜用材料冲击性能影响因素分析[J]. 石油和化工设备, 2009, 12(1): 35-38.

[4] 吕婧, 王磊, 孙维丽, 等. 塑性材料薄板复合断裂研究[J]. 应用力学学报, 2021(5): 2196-2200.

[5] CHEN S H, ZANG M, WANG D, et al. Finite element modelling of impact damage in polyvinyl butyral laminated glass[J]. Composite Structures, 2016, 138: 1-11.

[6] 周孙基, 程磊, 王立伟, 等. 连续损伤力学基临界奇异指数与破坏时间预测[J]. 力学学报, 2019(5): 1372-1380.

[7] 梁亚运, 杨邦成, 高启林, 等. UPVC 疲劳与损伤性能的研究[J]. 价值工程, 2017(6): 172-175.

[8] 陈以一, 卞若宁. 钢框架节点局部断裂冲击作用实验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007(3): 299-303, 314.

Experimental Analysis of Impact Fracture of UPVC Sheet

LYU Jing¹, WANG Lei²

(1. School of Intelligent Manufacturing, Qingdao Huanghai University, Qingdao 266500, Shandong, China;
2. Ceyear Technologies Company Limited, Qingdao 266500, Shandong, China)

Abstract: Based on the theory of fracture mechanics, the fracture properties of UPVC sheets under impact load were studied by means of experiments, combined with digital image correlation technology and fracture tests. The results are as follows: Under the same impact energy, the crack initiation time of mixed mode crack is earlier than that of pure mode I crack. The growth speed of pure mode I crack is higher than that of composite crack, and the growth speed of both types of cracks decreases with the increase of crack growth. The pure mode I crack propagates along the pure mode I propagation path. The mixed mode crack propagates along the mixed mode propagation path and is dominated by mode I. It is feasible to apply digital image technology to fracture under impact load.

Keywords: UPVC; digital image; impact fracture; experimental study