

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.09.019

基于DIC的聚丙烯酰胺水凝胶缺陷敏感性测定

董晨洋¹, 王震², 刘雯雯¹, 田富成³, 刘艳萍¹

(1. 郑州大学力学与安全工程学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学橡塑模具国家工程研究中心, 郑州 450002;

3. 日本北海道大学先端生命科学研究院, 札幌 001-0021)

摘要: 缺陷敏感性长度(c^*)是表征软材料抗缺陷能力的关键本征参数,其准确测定对于软材料的损伤容限设计及服役可靠性评估至关重要。目前,对于 c^* 的测定通常默认其与试样宏观几何尺寸无关,但该假设缺乏系统的试验验证,且直接影响 c^* 测量的准确性与可重复性。本工作以聚丙烯酰胺水凝胶为模型材料,结合单轴拉伸试验与数字图像相关技术(DIC),系统考察试样长度($0.5H$ 、 H 、 $2H$)和宽度(w 、 $1.5w$ 、 $2w$)对 c^* 的影响。在 $0.6\sim 1.0$ mm小裂纹区间内,通过断裂拉伸比与初始裂纹长度的线性拟合外推得到聚丙烯酰胺水凝胶的 c^* 约为 $2.43\text{ }\mu\text{m}$ 。试验结果表明,不同长度和宽度试样测得的 c^* 变化很小,为 $2.39\sim 2.51\text{ }\mu\text{m}$,均在试验误差允许范围内,符合断裂力学相似性原理;当初始裂纹长度为 6 mm 时,不同几何尺寸试样的裂纹扩展行为、裂纹尖端形貌以及DIC所测应变场演化规律均无明显差异,进一步证实了 c^* 具有几何无关性,是可靠的材料本征参数。该结果为理解软材料的缺陷敏感机制及损伤容限评估提供了系统的试验数据。

关键词: 断裂;水凝胶;几何尺寸;缺陷敏感性长度;数字图像相关法

中图分类号: O346.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)09-0173-08

Determination of flaw sensitivity of polyacrylamide hydrogel by digital image correlation

DONG Chenyang¹, WANG Zhen², LIU Wenwen¹, TIAN Fucheng³, LIU Yanping¹

(1. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. National Engineering Research Center for Advanced Polymer Processing Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

3. Faculty of Advanced Life Science, Hokkaido University, Sapporo 001-0021, Japan)

Abstract: The flaw-sensitivity length (c^*) is a key intrinsic parameter characterizing the defect resistance of soft materials, whose accurate determination is essential for damage tolerance design and service reliability assessment of the soft materials. However, current measurements for c^* typically assume that c^* is independent of macroscopic geometric dimensions of the sample, and this assumption lacks systematic test verification and directly affects the accuracy and repeatability of c^* measurement. In this work, polyacrylamide hydrogel was used as a model material, and uniaxial tensile tests combined with digital image correlation (DIC) were conducted to systematically investigate the influence of specimen length ($0.5H$, H , $2H$) and width (w , $1.5w$, $2w$) on the c^* . In the small crack range of $0.6\sim 1.0\text{ mm}$, the c^* of polyacrylamide hydrogel was determined to be approximately $2.43\text{ }\mu\text{m}$ by linear extrapolation of the fracture tensile ratio versus initial crack length. The experimental results show that the measured c^* of specimens with different lengths and widths have little changes, ranging from 2.39 to $2.51\text{ }\mu\text{m}$, all falling within the experimental error tolerance and conforming to the fracture mechanics similarity principle. When the initial crack length is 6 mm , no obvious differences are observed in crack propagation behavior, crack tip morphology, or strain field evolution measured by DIC of specimens with different geometric dimensions, further confirming that c^* is independent of geometric dimensions and a reliable intrinsic material parameter. This work provides systematic experimental data for understanding the flaw-sensitivity mechanism and assessing the damage tolerance of soft materials.

Keywords: fracture; hydrogel; geometric dimension; flaw-sensitivity length; digital image correlation

通信作者: 田富成, 博士, 助理研究员, 研究方向为计算力学; 刘艳萍, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为高分子材料结构与性能关系

收稿日期: 2026-06-16

引用格式: 董晨洋, 王震, 刘雯雯, 等. 基于DIC的聚丙烯酰胺水凝胶缺陷敏感性测定[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(9): 173-180.

DONG Chenyang, WANG Zhen, LIU Wenwen, et al. Determination of flaw sensitivity of polyacrylamide hydrogel by digital image correlation[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(9): 173-180.

在材料制备与服役全过程中,微观或宏观缺陷(微孔、划痕、裂纹等)等往往成为应力集中的根源,会在载荷作用下不断萌生、扩展,最终诱发断裂失效,严重影响材料的服役可靠性与使用寿命。缺陷敏感性长度(c^*)是表征材料抗缺陷能力的关键本征长度尺度,当缺陷尺寸超过该临界值 c^* 时,材料的断裂强度、断裂伸长率等关键力学性能指标会明显下降;反之,当缺陷尺寸小于 c^* 时,材料的宏观力学性能通常对缺陷不敏感。因而, c^* 数值越大,表明材料对缺陷的容忍能力越强,抗断裂性能越优异。

不同材料的 c^* 存在显著差异。典型脆性材料的 c^* 通常极小^[1],例如石英玻璃的 c^* 约为1 nm^[2]。相比之下,软材料的 c^* 普遍较大,因此在柔性器件、生物医用等领域具有不可替代的应用优势,但软材料的 c^* 调控机制、缺陷与力学性能的构效关系尚未完全明确,这已成为制约其可靠性设计与工程应用的重要问题^[3-5]。水凝胶作为一类典型的软材料,凭借网络结构可调、力学性能可控的独特优势,成为研究缺陷敏感性的理想模型体系^[6-7]。韧性水凝胶的 c^* 一般可达数百微米以上。为延长水凝胶制品的服役寿命,研究者发展出多种增韧机制,包括牺牲键网络、纳米复合、聚两性电解质机制等^[8-10]。尽管强韧水凝胶具有更强的抗缺陷能力,但其力学性能仍会因大缺陷的存在而显著降低,因此系统研究 c^* 及其影响规律,明确缺陷与力学性能的构效关系,具有重要的理论价值与实际意义。

目前,确定 c^* 的方法主要依赖试验手段,常规做法为对含单边裂纹的试样进行单轴拉伸试验,通过统计断裂参数随初始裂纹长度的变化来确定 c^* ^[2,11-12]。Sun等^[11]采用光弹法和扫描电子显微镜技术,对比裂纹尖端与基体区域的差异,测定了细菌纤维素水凝胶在单调和循环载荷下的 c^* 。Chen等^[13]以含动态二硫键的聚丙烯酰胺水凝胶为模型,发现紫外光照射可促进动态键交换,释放裂纹尖端应力,降低材料的缺陷敏感性。Watanabe等^[14]以聚两性电解质水凝胶为模型,研究了网络结构对 c^* 的影响。从Griffith断裂力学理论出发,将缺陷敏感性与断裂能(G_c)与临界应变能密度(W^*)的比值联系起来,即 $c^* \sim G_c/W^*$ ^[15]。值得注意的是,对于各类水凝胶 c^* 的测定试验中采用的试样几何尺寸不尽相同,但各研究均未将几何尺寸作为试验变量加以考察或讨论,而试样长度、宽度等几何参数是否会改变测定结

果,目前仍缺乏系统研究。该问题不仅关系到 c^* 测量的准确性与可重复性,也关系到其能否作为真正反映材料本征抗缺陷能力的可靠参数。

除合理的试验设计外, c^* 的精准测定还依赖于对裂纹尖端局部变形与应变演化的有效表征。数字图像相关法(DIC)是一种非接触式全场光学测量技术,可用于获取材料表面的位移场和应变场分布,并能够直观揭示裂纹尖端附近的变形集中、应变局域化及损伤演化过程。近年来,DIC已逐步应用于水凝胶大变形和断裂行为研究。Liu等^[16-17]系统评估了DIC技术在水凝胶大变形和大应变梯度下的测量精度,并进一步将DIC应用于聚乙烯醇(PVA)双交联水凝胶的裂纹扩展行为分析。Pan等^[18]利用DIC识别了近乎完美弹性的聚丙烯酰胺水凝胶的非弹性区域。然而,在 c^* 的测定试验中,仍鲜少系统考察试样几何尺寸效应及裂纹尖端应变场演化特征。缺乏局部场的信息支撑,使得现有研究更多停留于宏观断裂参数比较,尚难从变形场角度验证 c^* 的几何独立性及其物理内涵。

为明确试样几何尺寸对软材料 c^* 影响,同时提升 c^* 测定的精准性与研究深度,本研究以聚丙烯酰胺水凝胶为研究模型,结合传统力学试验与DIC技术,通过制备固定配比的水凝胶试样、验证散斑质量可靠性、测定不同初始裂纹长度试样的断裂参数,并结合DIC分析裂纹尖端应变场演化,系统探究试样长度与宽度对 c^* 的调控规律,明确几何参数的影响机制,进而为软材料 c^* 的精准测定、性能优化及工程实际应用提供科学依据与试验支撑。

1 试验部分

1.1 主要原材料

丙烯酸胺(AAm):分析纯,货号为A108465,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

N,N'-甲基双丙烯酰胺(MBAA):优级纯,货号为14085A,上海阿达玛斯试剂有限公司;

2-羟基-4'-(2-羟乙氧基)-2-甲基苯丙酮(Irgacure-2959):优级纯,货号为13053B,上海阿达玛斯试剂有限公司;

石蜡油:货号为P815706,上海麦克林生化科技股份有限公司;

去离子水:实验室自制。

1.2 主要仪器及设备

天平:WTB5003,杭州万特衡器有限公司;

集热式恒温加热磁力搅拌器:DF-101S,巩义市予华仪器有限责任公司;

紫外灯:6 W,深圳市森田精工科技有限公司;

偏光显微镜:BX51,奥林巴斯(中国)有限公司;

电子万能试验机:UTM2203,深圳三思纵横科技股份有限公司;

DIC机器:上海大学。

1.3 试样制备

利用自由基聚合方法制备聚丙烯酰胺水凝胶。聚丙烯酰胺水凝胶的前驱体是单体 AAm、交联剂 MBAA、光引发剂 Irgacure-2959 的水溶液,合成参数确定为:去离子水与单体物质的量比 $W=8$,交联剂与单体物质的量比 $C=6 \times 10^{-4}$,光引发剂与单体物质的量比为 I ,固定 $I/C=0.4^{[19]}$ 。将混合溶液置于磁力搅拌器搅拌约 30 min 得到前驱体溶液,搅拌时作避光处理。将前驱体溶液放入定制好的聚四氟乙烯模具中,用玻璃板覆盖模具以防止水凝胶聚合时卷曲,室温下在暗盒内用紫外灯固化 30 min,制得有效区域为长(H)40 mm、宽(w)20 mm、厚(t)2 mm 的矩形试样。通过替换模具,制备不同几何尺寸($0.5H$ 、 $2H$ 、 $1.5w$ 、 $2w$)的试样。

1.4 测试与表征

1.4.1 力学性能测试

按照 ASTM D638-14,采用电子万能拉伸试验机进行拉伸试验,选取 100 N 的力传感器,单轴拉伸和循环拉伸速率均为 40 mm/min。名义应力 σ 为施加的载荷除以原始截面积。拉伸比 λ 为当前状态下的变形长度除以初始长度。单轴拉伸时,每个样品重复 3 次试验。为保证循环试验过程中水凝胶因失水造成力学性能的变化,加载前将试样浸泡在石蜡油中 5 min。循环拉伸试验过程中每间隔 2 min 喷洒一次石蜡油。对于单轴拉伸试验,由于试验整体时间较短,对试样不进行处理。

1.4.2 初始裂纹的引入

利用剃须刀片(小裂纹借助钢针)在水凝胶左边边缘沿宽度方向切割以引入初始裂纹,裂纹方向垂直于拉伸方向,裂纹的长度 c 利用偏光显微镜进行测量,试样拉伸有效区域如图 1 所示。

1.4.3 DIC 试验

在进行 DIC 试验前,需提前于试样表面设置散斑。首先在水凝胶试样表面喷上一层薄薄的白漆,然后在距离试样 0.5 m 处均匀喷洒黑漆,使黑色斑点

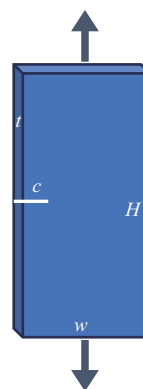


图1 试样几何形状与试样拉伸有效区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen geometry dimensions and effective region for tensile testing

随机洒落在试样表面,从而避免产生大面积黑点,影响数据分析。DIC 试验前调整三脚架的高度、位置以及数码相机(CCD)的角度,使得试样在拉伸过程中始终处于相机视野的中间位置,试验过程中背景为黑色,两侧放置台灯,使采集到的图像亮度均匀。DIC 试验采集到的图像由开源代码 Ncorr 进行分析处理。进行后处理时,相关的计算参数如下:子集大小为 11,子集间距为 2,应变半径为 3。为了定量分析裂纹扩展行为,采用 MATLAB 编写图像处理程序,对拉伸过程中采集的图像进行批处理,实现对裂纹尖端形貌的自动识别与裂纹长度的统计。DIC 分析中,以试样初始状态为参考建立直角坐标系, x 轴沿试样宽度方向(水平方向), y 轴沿长度方向(拉伸方向)。 ϵ_{xx} 和 ϵ_{yy} 分别表示沿 x 轴和 y 轴的正应变分量。

2 结果与讨论

2.1 聚丙烯酰胺水凝胶的 c^* 测定

首先对无缺陷水凝胶试样进行单轴拉伸测试,结果如图 2a 所示。虽然不同拉伸速率时试样断裂应变存在差异,但低应变阶段应力-应变曲线几乎重合,表现出近乎完美的弹性特征。该现象的本质是水凝胶网络结构中存在大量水分,水分子黏度较低,可作为聚合物分子链间的润滑剂,有效降低链间摩擦,因此聚合物链能够在拉伸过程中自由滑动且在低应变阶段不受速率影响。采用 40 mm/min 的拉伸速率,固定最大拉伸比 $\lambda=1.5$,对无缺陷水凝胶试样进行 10 次循环加载-卸载测试,结果如图 2b 所示。可以发现,应力-应变曲线在第 1 次循环中表现出较大滞后,而第 2 至第 10 次循环的应力-应变曲线几乎完全重叠,滞后环极小。图 2c 给出了无缺陷及含不同长度初始裂纹试样的应力-应变曲线。随着

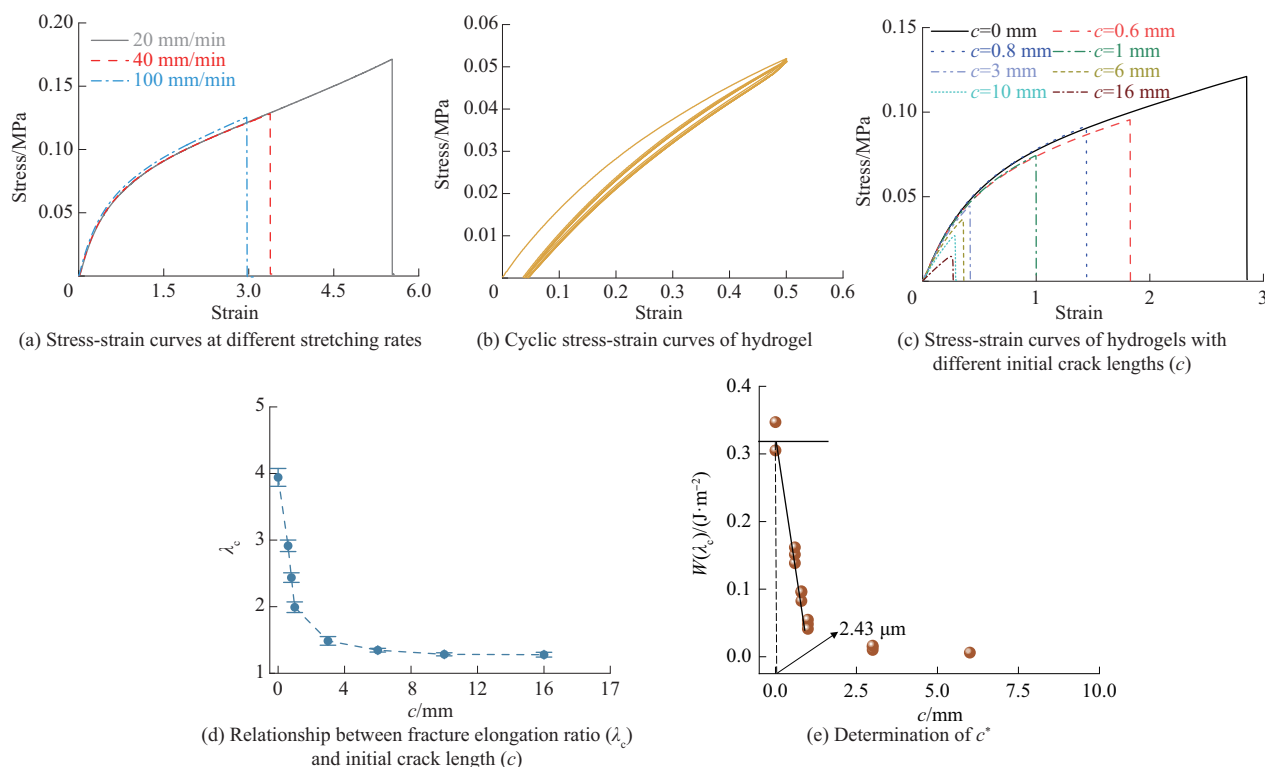


图2 聚丙烯酰胺水凝胶的单轴拉伸测试结果

Fig. 2 Uniaxial tensile test results of polyacrylamide hydrogel

初始裂纹长度的增加,试样的断裂应力呈逐渐降低趋势,断裂应变也随之减小,表现出典型的缺陷敏感行为。断裂拉伸比随初始裂纹长度的变化趋势如图2d所示,在0.6~1 mm小裂纹尺寸范围内,断裂拉伸比与初始裂纹长度呈现良好的线性相关性。

为计算水凝胶的 c^* ,采用 Neo-Hookean 模型单轴拉伸格式来评估各裂纹下的断裂功 $W(\lambda_c)^{[2]}$

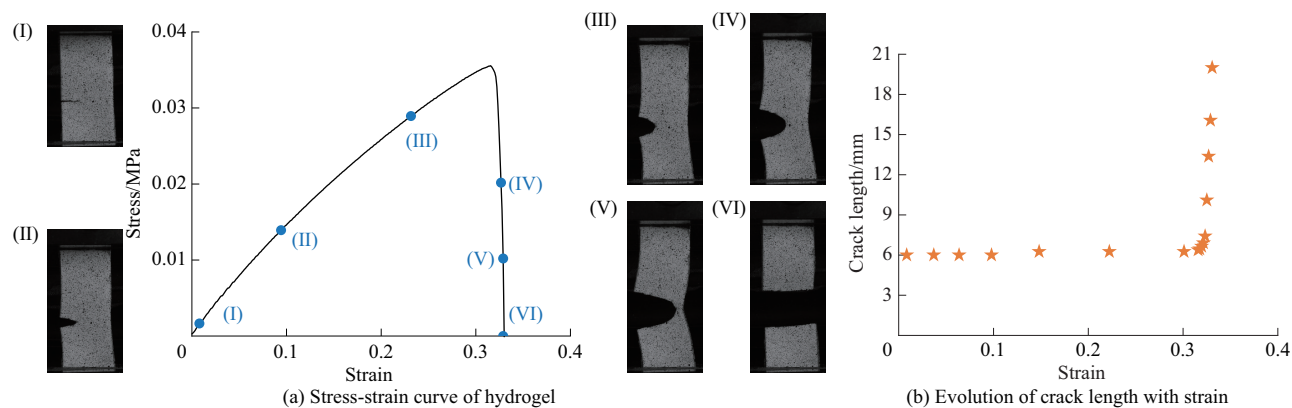
$$W(\lambda_c) = \frac{\mu}{2} (\lambda_c^2 + 2\lambda_c^{-1} - 3) \quad (1)$$

式中: λ_c 为材料的断裂拉伸比; μ 为材料的剪切模量。

考虑到聚丙烯酰胺水凝胶在低应变下呈线弹

性且体积近似不可压缩(泊松比 $\nu \approx 0.5$),应变5%~15%的线性段拟合得到杨氏模量 E ,根据线弹性理论,剪切模量 $\mu = E/[2(1+\nu)] = E/3$,代入计算即可^[20]。将小裂纹的断裂功进行线性拟合,得到线性段与无缺陷下断裂功外推线的交点,作为初始几何尺寸下聚丙烯酰胺水凝胶的 c^* ^[14],结果如图2e所示。本工作制备的聚丙烯酰胺水凝胶的 c^* 为 $2.43 \mu\text{m}$ 。

为进一步探究裂纹扩展行为与缺陷敏感性的关联,本文选取初始裂纹长度 $c=6 \text{ mm}$ 的试样进行单轴拉伸试验,并结合 DIC 技术实时记录拉伸过程中裂纹形貌,结果如图3所示。由图3a和图3b可

图3 $c=6 \text{ mm}$ 的水凝胶应力-应变曲线及裂纹演化Fig. 3 Stress-strain curve and crack evolution of hydrogel with $c=6 \text{ mm}$

知,当宏观应变小于0.2时,裂纹长度基本维持在初始值6 mm附近,未发生明显扩展。该阶段对应裂纹尖端的初始能量积累过程,裂纹尖端始终保持相对锐利的几何形态,未出现明显钝化现象,且裂纹尖端前方未观测到显著的变形集中区;同时,裂纹面保持平直光滑,其两侧材料未出现明显损伤。当宏观应变增加至约0.25时,裂纹尖端区域由尖锐几何形状逐渐转变为圆弧形,并随应变增大以圆弧形态持续向前扩展,直至试样发生断裂。利用CCD相机实时跟踪整个裂纹扩展过程,统计结果显示断裂发生前的0.1 s内,裂纹长度从16 mm迅速扩展至20 mm,累计扩展长度达4 mm,计算可得平均裂纹扩展速度为40 mm/s。

采用Ncorr软件对DIC试验数据进行后处理,可获得裂纹扩展过程中试样表面的应变场分布。为保障试验数据的真实性与可靠性,需利用循环加载试验验证水凝胶试样表面散斑图案的稳定性及耐久性。固定最大拉伸比1.5进行10个循环的加载-卸载,利用CCD跟踪循环试验前后试样主体区域的图像如图4a、图4b所示,通过Ncorr软件分析参考图像与循环后图像之间的变形差异。其中图4c、图4d分别为 x 、 y 方向的应变场分布,可见两个方向的应变值仅为 10^{-2} 量级,且应变场均未呈现任何不规则分布模式,表明所制备的散斑图案具有良好的稳定性与耐久性,可满足后续单轴拉伸及循环加载条件下的裂纹扩展研究需求。图4e为 $c=6$ mm的试样在拉伸过程中 x 、 y 方向的应变场分布,可清晰观察到裂纹尖端存在明显的应力集中现象,且形成了呈蝴蝶翅膀状的特征应变区,这与裂纹尖端的应力分布规律一致。

2.2 几何尺寸对 c^* 的影响

为探究试样几何尺寸对 c^* 的影响,制备了不同几何尺寸的水凝胶试样,其中长度变量有 $0.5H$ 和 $2H$,宽度变量设置为 $1.5w$ 和 $2w$,所有试样厚度均保持2 mm。图5a给出了不同长度试样的断裂拉伸比与初始裂纹长度的关系曲线。随着初始裂纹长度的增加,两种不同长度试样断裂拉伸比均呈逐渐降低趋势,表现出典型的缺陷敏感行为;且在 $0.6\sim 1$ mm小裂纹尺寸范围内,各长度试样的断裂拉伸比与初始裂纹长度均呈现良好的线性相关性,与初始几何尺寸试样的规律一致。利用上述 c^* 判定方法,可确定长度为 $0.5H$ 和 $2H$ 的聚丙烯酰胺水凝胶的 c^*

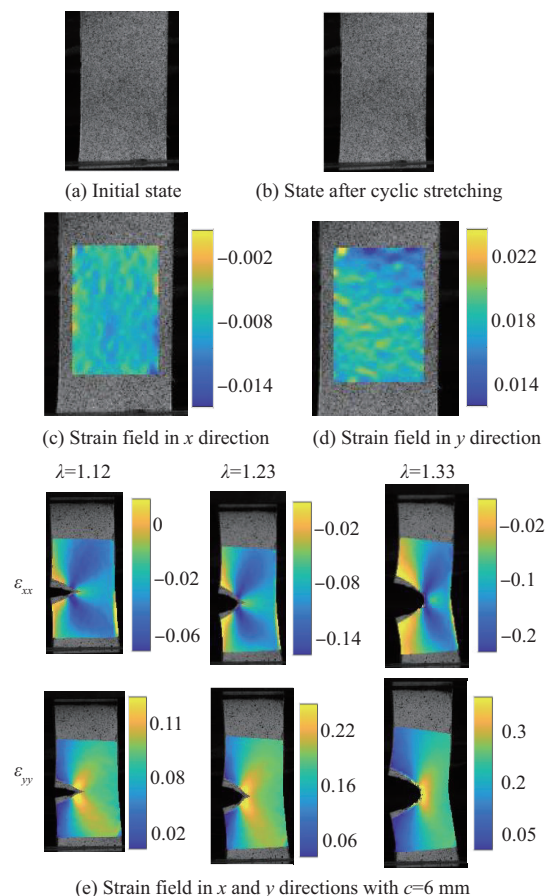


图4 散斑质量验证及应变场分布

Fig. 4 Speckle quality verification and strain field distribution

分别为 $2.39\ \mu\text{m}$ 和 $2.51\ \mu\text{m}$ (图5b)。图5c为不同宽度试样的断裂拉伸比与初始裂纹长度的关系曲线,与不同长度试样的规律一致。随着初始裂纹长度的增加,试样断裂拉伸比逐渐降低,同样表现出典型的缺陷敏感行为。通过线性拟合和交点判定,可确定宽度为 $1.5w$ 和 $2w$ 的聚丙烯酰胺水凝胶的 c^* 分别为 $2.40\ \mu\text{m}$ 和 $2.47\ \mu\text{m}$ (图5d)。改变尺寸测得 c^* 的平均值为 $2.44\ \mu\text{m}$,相对标准偏差约为2.0%,小于试验误差允许值(5%),可见由不同几何尺寸试样所测得的 c^* 均在试验误差允许范围内,变化很小。从材料本征属性角度分析, c^* 可视为表征聚丙烯酰胺水凝胶抗缺陷能力的稳定特征长度尺度。

为更直观地呈现不同几何尺寸试样的力学性能差异,对所有不同尺寸水凝胶试样的断裂应变、断裂应力、 c^* 进行统计整理,结果见表1。随着试样长度的增加,断裂应变呈现先降低后升高的变化趋势,断裂应力表现出相同的趋势,且 $0.5H$ 与 $2H$ 规格试样的断裂应力数值相差不大。试样长度的变化主要通过影响标距内应力状态及体积缺陷概率来

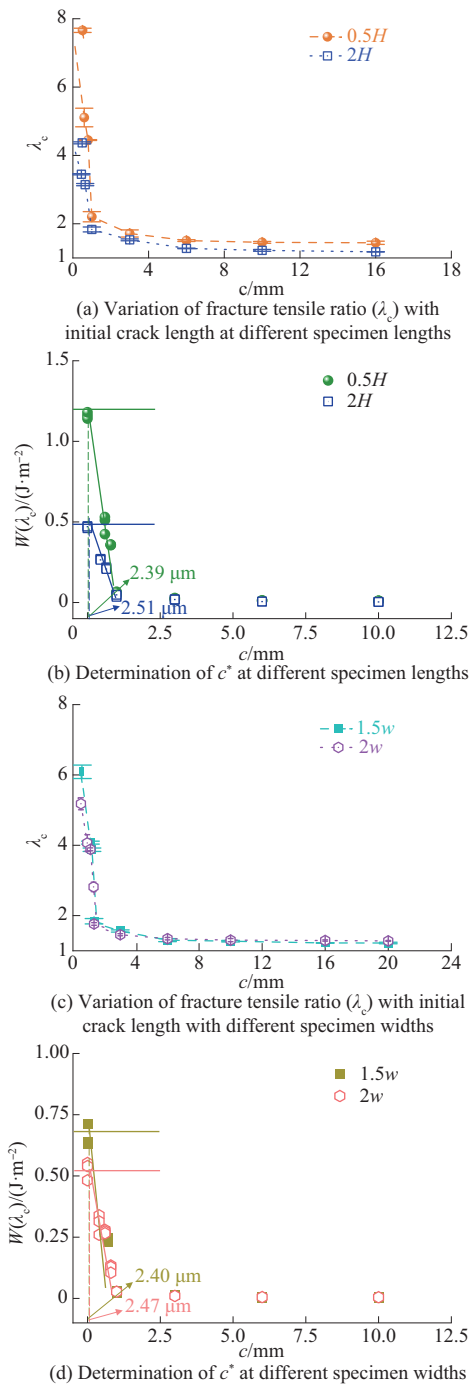


图5 不同几何尺寸下试样的断裂拉伸比-初始裂纹长度曲线和 c^*
Fig. 5 Fracture tensile ratio-initial crack length curves and c^* of specimens at different geometric dimensions

改变断裂响应。当试样长度较小($0.5H$)时,夹具端部约束在标距内形成三轴应力状态,对裂纹尖端扩展产生抑制作用,使断裂应变和断裂应力偏高。当长度增至 H 时,试样中部进入纯单轴应力状态,可有效消除夹具端部约束带来的影响,反映材料真实单轴拉伸性能,数值最低;当长度进一步增至 $2H$ 时,体积缺陷概率上升与应力分布均匀化两种效应

表1 不同几何尺寸试样的力学性能参数

Tab. 1 Mechanical property parameters of specimens with different geometric dimensions

Geometric dimensions/mm	Fracture strain (defect-free)	Fracture stress (defect-free)/MPa	$c^*/\mu m$
$H=40, w=20$	2.94	0.119	2.43
$0.5H=20, w=20$	6.66	0.156	2.39
$2H=80, w=20$	3.37	0.159	2.51
$H=40, 1.5w=30$	5.09	0.137	2.40
$H=40, 2w=40$	4.18	0.129	2.47

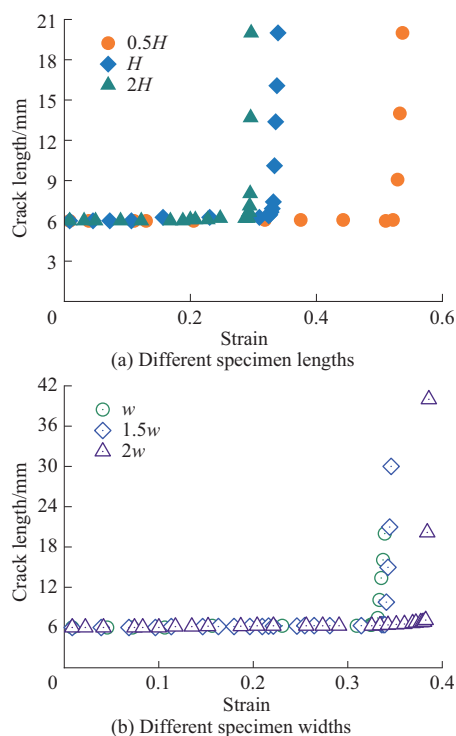
Notes: H is length of specimen; w is width of specimen; c^* is flaw-sensitivity length.

竞争,使断裂应变和断裂应力较长度为 H 时略有回升。

随着宽度的增加,断裂应变呈现先升高后降低的变化趋势,断裂应力也遵循相同规律,而不同宽度试样的 c^* 同样维持在试验可接受的误差范围内。宽度的变化主要通过影响加载过程中的应力状态,进而调控材料的断裂行为:当宽度较小时,试样处于平面应力状态,利于聚合物链段的重排与取向,但裂纹尖端约束弱;当宽度增加至 $1.5w$ 时,试样进入平面应力向平面应变的过渡,产生一定的三轴应力效应,这种约束作用可在一定程度上抑制裂纹尖端区域的过早屈服,使材料能够承受更高的应力与更大的变形,因此断裂应力与断裂应变均出现提升;当宽度增加至 $2w$ 时,有效体积显著增大,包含大尺寸微观缺陷的概率提高,此类大尺寸微观缺陷易成为断裂起始点,最终导致材料的断裂应变与断裂应力出现下降。

为进一步探究试样几何尺寸对裂纹扩展行为的影响,选取初始裂纹长度 $c=6$ mm的不同几何尺寸试样开展单轴拉伸试验,并利用DIC技术全程记录裂纹扩展全过程,对裂纹长度随应变的扩展规律进行统计分析,试验结果如图6所示。尽管试样几何尺寸存在差异,但裂纹扩展的整体趋势高度一致:加载前期,裂纹沿初始方向稳定向前扩展,且不同尺寸试样的裂纹前期扩展速率基本相当,其中不同长度试样的裂纹前期扩展速率约为 0.004 mm/s,不同宽度试样的裂纹前期扩展速率约为 0.011 mm/s;当加载接近断裂阶段时,裂纹均出现明显加速扩展现象,直至贯穿试样宽度,最终导致试样断裂失效。

结合图5和图6可以发现,不同长度与宽度试样虽然在无缺陷断裂应力、断裂应变以及裂纹扩展速率等宏观响应上存在一定差异,但其 c^* 具有高度一致性。首先,直接验证了 c^* 作为材料本征参数的

图6 $c=6$ mm时,试样单轴拉伸中的裂纹长度变化Fig. 6 Change in crack length during uniaxial tensile testing of specimens at $c=6$ mm

可靠性—— c^* 由聚合物微观网络结构及内禀断裂过程区尺寸决定,与试样宏观几何尺寸无关,只要测试条件满足断裂力学基本要求,测得的 c^* 差异很小。其次,不同长度试样的裂纹扩展行为证实了裂纹尖端应力场的相似性:根据断裂力学理论,几何相似的含裂纹体的裂纹尖端应力强度因子与绝对尺寸无关,本试验中不同长度试样表现出高度一致的裂纹扩展行为,DIC观测亦显示裂纹尖端形貌与扩展路径相似,表明长度变化未改变裂纹尖端局部力学环境。对于宽度变化,试验同样验证了断裂力学相似性原理的适用性:尽管宽度不同导致应力状态从平面应力向平面应变过渡,但由于聚丙烯酰胺水凝胶近似不可压缩,且本试验设定的宽度范围内应力状态转变尚未达到影响断裂行为的程度,因此各宽度下裂纹扩展趋势仍保持相似。值得指出的是,大尺寸试样断裂应变下降源于随机工艺缺陷的统计体积效应,但该效应并不影响 c^* 的测定。这是因为 c^* 由小裂纹区间(0.6~1 mm)断裂拉伸比 λ_c -初始裂纹长度 c 拟合曲线的回归斜率外推得到,该斜率反映裂纹尖端的局部断裂行为,与远离尖端的随机缺陷分布无关。综上,长度与宽度试验相互印证,佐证了 c^* 作为几何无关的材料本征参数的核心结论。

3 结论

(1)通过试验确定聚丙烯酰胺水凝胶的 c^* 为 $2.43 \mu\text{m}$ 。断裂拉伸比随初始裂纹长度变化呈典型缺陷敏感特征:0.6~1 mm小裂纹范围内,断裂拉伸比与初始裂纹长度线性相关。

(2)试样宏观几何尺寸对 c^* 的影响较弱,改变试样长度和宽度, c^* 变化很小,处于试验误差允许范围内;初始裂纹长度为6 mm时,各尺寸试样裂纹扩展行为规律一致,符合断裂力学相似性原理,证实 c^* 为水凝胶本征参数,与宏观几何尺寸无关。

(3)本文从宏观断裂响应与局部变形场演化两个层面验证了聚丙烯酰胺水凝胶缺陷敏感性长度的稳定性与几何相对独立性。为软材料缺陷敏感机制的试验认识、损伤容限评估以及柔性电子、生物医用等领域的可靠性设计提供了试验依据。

参考文献

- [1] GAO H J, CHEN S H. Flaw tolerance in a thin strip under tension[J]. Journal of Applied Mechanics, 2005, 72(5):732-737.
- [2] CHEN C, WANG Z J, SUO Z G. Flaw sensitivity of highly stretchable materials[J]. Extreme Mechanics Letters, 2017, 10:50-57.
- [3] KLOTZ B J, OOSTERHOFF L A, UTOMO L, et al. A versatile biosynthetic hydrogel platform for engineering of tissue analogues[J]. Advanced Healthcare Materials, 2019, 8(19). DOI: 10.1002/adhm.201900979.
- [4] HU L X, CHEE P L, SUGIARTO S, et al. Hydrogel-based flexible electronics[J]. Advanced Materials, 2023, 35(14). DOI: 10.1002/adma.202205326.
- [5] NI C J, CHEN D, WEN X, et al. High speed underwater hydrogel robots with programmable motions powered by light[J]. Nature Communications, 2023, 14(1). DOI:10.1038/s41467-023-43576-6.
- [6] 李贤真, 李彦锋, 朱晓夏, 等. 高分子水凝胶材料研究进展[J]. 功能材料, 2003, 34(4):382-385.
LI Xianzhen, LI Yanfeng, ZHU Xiaoxia, et al. Study advances on polymeric hydrogels[J]. Journal of Functional Materials, 2003, 34(4):382-385.
- [7] 陈咏梅, 董坤, 刘振齐, 等. 高强度双网络高分子水凝胶:性能、进展及展望[J]. 中国科学:技术科学, 2012, 42(8):859-873.
CHEN Yongmei, DONG Kun, LIU Zhenqi, et al. Double network hydrogel with high mechanical strength: Performance, progress and future perspective[J]. Scientia Sinica Technologica, 2012, 42(8):859-873.
- [8] GONG J P, KATSUYAMA Y, KUROKAWA T, et al. Double-network hydrogels with extremely high mechanical strength[J]. Advanced Materials, 2003, 15(14):1 155-1 158.
- [9] HARAGUCHI K, TAKEHISA T. Nanocomposite hydrogels: A unique organic-inorganic network structure with extraordinary mechanical, optical, and swelling/de-swelling properties[J]. Advanced Materials, 2002, 14(16):1 120-1 124.

- [10] SUN T L, KUROKAWA T, KURODA S, et al. Physical hydrogels composed of polyampholytes demonstrate high toughness and viscoelasticity[J]. *Nature Materials*, 2013, 12(10):932–937.
- [11] SUN D Q, ZHOU Y F, GUO H Y, et al. Flaw sensitivity of bacterial cellulose hydrogel under monotonic and cyclic loadings[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 303:110134. DOI:10.1016/j.engfracmech.2024.110134.
- [12] ZHOU Y F, HU J, ZHAO P P, et al. Flaw-sensitivity of a tough hydrogel under monotonic and cyclic loads[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2021, 153. DOI: 10.1016/j.jmps.2021.104483.
- [13] CHEN X, LIN J Y, YANG H, et al. Flaw sensitivity of hydrogels with dynamic covalent bonds[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2024, 67. DOI:10.1016/j.eml.2024.102129.
- [14] WATANABE R, TSUCHIBORA H, KIYAMA R, et al. Flaw sensitivity of tough and self-healing hydrogels with hierarchical structure[J]. *Polymer Science & Technology*, 2025, 1(5):476–487.
- [15] LONG R, HUI C Y, GONG J P, et al. The fracture of highly deformable soft materials: A tale of two length scales[J]. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 2021, 12(1):71–94.
- [16] LIU M, GUO J, HUI C Y, et al. Application of digital image correlation (DIC) to the measurement of strain concentration of a PVA dual-crosslink hydrogel under large deformation[J]. *Experimental Mechanics*, 2019, 59(7):1 021–1 032.
- [17] LIU M C, GUO J Y, LI Z L, et al. Crack propagation in a PVA dual-crosslink hydrogel: Crack tip fields measured using digital image correlation[J]. *Mechanics of Materials*, 2019, 138. DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.103158.
- [18] PAN Y D, ZHOU Y F, SUO Z G, et al. Inelastic zone around crack tip in polyacrylamide hydrogel identified using digital image correlation[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 289. DOI:10.1016/j.engfracmech.2023.109435.
- [19] WANG Y C, NIAN G D, KIM J, et al. Polyacrylamide hydrogels. VI. Synthesis-property relation[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2023, 170. DOI:10.1016/j.jmps.2022.105099.
- [20] ANSETH K S, BOWMAN C N, BRANNON-PEPPAS L. Mechanical properties of hydrogels and their experimental determination[J]. *Biomaterials*, 1996, 17(17):1 647–1 657.