

DOI: 10.11779/CJGE201912021

基于激光-介质损伤的三维内裂纹 3D-ILC 实现

王海军^{1, 2}, 张九丹³, 任然⁴, 汤雷^{*1, 2}, 钟凌伟³

(1. 南京水利科学研究院材料结构研究所, 江苏 南京 210024; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210024;
3. 河海大学, 江苏 南京 210024; 4. 香港城市大学, 香港 9990773)

摘要: 在材料内部制作可用于试验的真实、可控的三维内裂纹, 一直是断裂力学中的基础性难题。针对此瓶颈, 提出了通过电磁场在试样内部制造等离子体进而制作任意宏观三维内裂纹的全新方法“3D-ILC”, 实现了“内科手术式”制作内裂纹而对表面无任何影响。首先综述传统的脆性材料的内裂纹制作方法及不足, 然后给出激光-介质损伤的基本原理与 3D-ILC 实现方法, 给出基于 3D-ILC 技术的单裂纹、随机多裂纹、双 X 形内裂纹试样实例。通过经典的单轴压缩与巴西圆盘试验, 证明 3D-ILC 在断裂力学三维内裂纹断裂力学研究中的可用性。结果表明: 3D-ILC 相对于传统方法具有以下优势: ①可观测性强; ②简便、快速、高效; ③裂纹真实; ④试样均质度、脆性度高、完整性好; ⑤裂纹数量、尺寸可控。3D-ILC 的提出, 解决了断裂力学百年来在材料内部实现任意可控宏观三维内裂纹这一基本问题, 使原本复杂和高门槛的三维内裂纹扩展断裂研究具备“平民化”的特征, 对于推动断裂力学中内裂纹及三维问题的研究, 具有重要意义。

关键词: 3D-ILC; 三维内裂纹; 断裂力学; 激光介质损伤; 裂纹扩展

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)12-2345-08

作者简介: 王海军(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事断裂力学与岩石力学相关科研工作。E-mail: hjwang@nhri.cn。

Embedded cracks in brittle solids induced by laser-medium interaction (3D-ILC)

WANG Hai-jun^{1, 2}, ZHANG Jiu-dan³, REN Ran⁴, TANG Lei^{1, 2}, ZHONG Ling-wei³

(1. Material and Structure Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210024, China; 3. Hohai University, Nanjing 210024, China; 4. City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The research of fracture mechanics is based on physical experiments, which mainly deal with the specimen containing cracks and defaults. Since surface cracks and penetrated cracks are relatively easy to make and observe, the theoretical study on fracture mostly depends on these two kinds of experiments. The embedded cracks actually can largely influence the characteristics of the materials. However, the experiments with embedded cracks have been a tough task because of the difficulty in the manufacturing technique. A new method (3D-ILC) is proposed for making the internal embedded cracks based on the laser-medium damage theory. Firstly, review of the traditional methods for embedded cracks is given. Then the theory of laser-medium damage is proposed. The specimen examples with a single embedded crack, double X-type cracks and multi-cracks are shown. By the axial compressive experiment tests, the feasibility of 3D-ILC is confirmed. Meanwhile, 3D-ILC has the following advantages: easy observation, economy and efficiency, real cracks, high homogeneity, easy control and great reduction of discretization of results, which is very important in experimental research. The proposed 3D-ILC method will provide vast potential for future development of fracture mechanics.

Key words: 3D-ILC; 3D embedded crack; fracture mechanics; laser medium interaction; crack propagation

0 引言

材料裂纹扩展断裂问题直接关系航空航天、交通、化工、机械、能源、土木等各领域结构的失效、灾变安全问题^[1-3]。从钢材低应力脆断导致的航天、国防尖端产品爆炸^[2, 4], 到地下岩石各尺度断裂造成的地震^[5]、

隧洞失稳^[6]; 从金属、混凝土裂纹扩展造成各类工程

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409170); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20171130); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目(Y419005)

收稿日期: 2017-11-03

*通讯作者 (E-mail: ltang@nhri.cn)

灾害^[3]，再到牙齿破裂、皮质骨骨折等人体硬组织损伤^[7]，都与材料裂纹扩展有关；中国古语“千里之堤，溃于蚁穴”、“墙之崩塌，必因其隙”也包含这个思想。而断裂力学是专门研究含裂纹或缺陷材料的强度和裂纹扩展规律的科学。它萌芽于 1920 年 Griffith 围绕玻璃低应力脆断现象发表的经典论文^[8]，考虑外力下固体中一条孤立裂纹，以热力学能量平衡概念推导出了裂纹扩展判据。其后几十年，经典 Griffith 理论不断完善，随着应力强度因子^[9]、J 积分^[10]等概念及理论的逐渐提出，近代断裂力学建立^[11]。断裂力学理论的发展，在各行业材料、结构安全领域发挥了巨大作用。

断裂力学理论建立在试验基础之上，材料中裂纹根据位置及几何特征分为 3 种类型：表面裂纹、穿透裂纹及内裂纹（深埋裂纹），如图 1 所示。

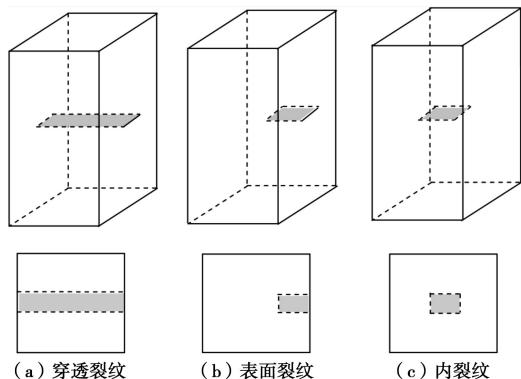


图 1 穿透裂纹、表面裂纹及内裂纹示意图(灰色为裂纹)

Fig. 1 Penetrated crack, surface crack and embedded crack

但是，自 20 世纪 20 年代以来，试验多以穿透裂纹或表面裂纹为主，三维内裂纹的试验研究一直落后于前两种裂纹。其原因有两方面：①技术问题，表面及穿透裂纹制作并不存在技术瓶颈，如表面裂纹可以直接通过切割法^[12]等完成，穿透裂纹采用薄板切割法、三点弯曲或疲劳法^[11-13]制作。但是，对于内裂纹，可以想象，在一完整物体内部形成“内科手术式”精确结构改变而对其他部分不造成影响，技术难度极高，以常规机械力学理论判断，甚至是不可能实现^[14]。②观测问题，表面及穿透裂纹都与材料表面相交，便于观测。但是，三维内裂纹在材料内部，即使借助 CT^[15]、声发射^[16]或超声技术^[17]，其扩展过程及形态仍难以直接观测及追踪。如 Griffith 的薄壁玻璃圆管和球形玻璃灯泡试验^[11]、Sommer 的 I-III 复合型裂纹^[18]，其他如典型的单边切口梁、双悬臂、双扭、压痕断裂试验、平板裂纹试验等及衍生出的各种尺寸、倾角、多裂纹、雁形裂纹试验等^[11, 13, 19-20]，都是表面或贯穿裂纹。

由于这两方面制约，内裂纹试验虽经过不断研究但至今仍存在尚未解决的问题，进展远不及前两类裂

纹。目前，内裂纹试验从观测角度可分为非透明和透明材料试验。前者采用水泥、外添加剂等材料浇注^[21]或烧结^[22]成型，用预埋薄片模拟裂纹，或者将材料切断在表面制作裂纹后再黏合成试样^[23]，显然此类方法裂纹扩展过程难以观测。透明脆性材料，由于其观测方便，在内裂纹试验中得到高度重视与发展，目前可归纳为以下 4 类经典方法。Adams 等^[24]1978 年首先采用有机玻璃 PMMA 材料结合切割-粘贴法，开展三维内裂纹扩展研究。Dyskin 等利用树脂材料容易成型、快速固化特征提出了预埋-浇筑法^[25]和热诱导法^[26]进行了三维内裂纹扩展理论研究。另外，3D 打印法被一些学者认为极具潜力^[12]。虽然这些方法不断得到改进^[27-28]，在一定程度解决了一些问题，但是，仍存在较为明显的缺陷：预制裂纹非天然真实裂纹、裂纹形态难以控制、试样完整性、材料相似性难以保证等（章节 2 详述）。

三维内裂纹分布于各类材料之中且影响巨大^[29-30]。建立在表面及贯穿裂纹试验结论上的理论在解决真正的三维内裂纹情况时，难以避免各种假设及难点。内裂纹的相关断裂力学理论及更为通用的三维断裂力学理论的建立与发展也需要以直接的三维内裂纹试验为基础。但是，如前所述，内裂纹试验仍存在诸多问题难以克服。因此，真实、可控、便捷、可视的三维内裂纹的实现一直是制约断裂力学研究的一个基础性难题。

针对此瓶颈性问题，本文首次提出了基于激光-介质损伤理论的任意数量、尺寸的三维内裂纹实现方法，并命名为“3D-ILC”（3D-internal laser-engraved crack），三维激光疲劳内裂纹，真正实现了“内科手术式”改变材料内部结构而对以外部分不造成影响的三维内裂纹制作。

1 传统方法及其不足

1.1 切割-粘贴法

切割-粘贴法是由 Adams 等^[24]于 1978 年提出，用于研究脆性材料内部的三维裂纹在压缩荷载下的扩展规律。其方法为将 PMMA 板材进行切割，然后在切割面相同位置处，制作完全对称的表面裂纹，后将两块切割的 PMMA 板或玻璃粘贴成含有预制裂纹的透明脆性材料。制作过程如图 2 所示：此方法应用较为有限，其缺陷在于：①裂纹的相似性问题：人工切割裂纹具有切割厚度和明显的拼接特征，人工裂纹对真实的裂纹模拟程度是个问题。②材料的相似性问题：PMMA 为非脆性材料，为保证脆性度必须保持超低温冷冻状态^[31]，增加了试验难度，另外本身为切割后形

成整体断裂后黏贴而成, 材料完整性存疑。

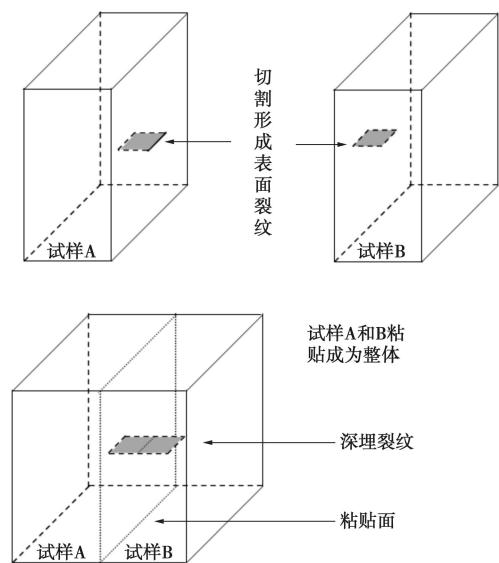


图 2 切割-粘贴法

Fig. 2 Embedded crack by cut-glue method

1.2 预埋-浇筑法

此方法由 Dyskin 等于 1994 年在澳大利亚提出, 用于研究岩石三维内裂纹的起裂扩展贯通机理^[25]。首先制作模具, 预制裂纹采用两片中间涂油的紧贴铝箔片模拟, 采用棉线固定于模具中, 将环氧树脂浇筑到含有薄片的模具中, 浇注成型后将棉线取出, 如图 3 所示。自此方法提出后, 被大量研究者采用, 如郭彦双等^[31]、朱珍德等^[27, 33]、付金伟等^[26, 33]都是采用该方法进行类岩石内裂纹的断裂规律研究。此方法的缺陷在于: ①裂纹问题: 将预埋的金属片和云母片视为裂纹, 显然和现实中的真实裂纹有较大差距。②脆性度问题: 如 Dyskin 试样拉压比只有 $1/3 \sim 1/4$ ^[25], 经过后来学者改进配方在低温下也只能达到 $1/7$ ^[34], 且不稳定, 裂纹扩展的规律性是否适用于脆性材料值得推敲。③试样在加载过程中必须保持低温状态才能保证其脆性度, 极大提高了试验的难度, 其温度变化也会对试验结果造成影响。即使保证了低温条件下也难以保证试验成功率, 如何甄别正确的试验结果也是个问题。



图 3 预埋-浇注法 (模具及含薄片试样)

Fig. 3 embed-cast method

1.3 热诱导法

此方法由 Dyskin 等于 2003 年在澳大利亚提出^[26], 用于研究多个三维内裂纹的起裂扩展破坏机理。使用特殊固化方式对树脂中的多个裂纹进行热诱导, 通过使用高催化剂比并在烘箱中在约 60°C 下固化 1.5 h, 在试样内诱发多个裂纹。热诱导法的一个优势在于得到的裂纹不需要用切割手段实现或金属片模拟, 且试样避免了切割粘贴操作。其不足之处在于:

(1) 裂纹位置、尺寸、开裂方向等都是随机性的, 难以控制, 若想得到特定试样, 其概率极低。

(2) 与预埋-浇筑法相同, 难以保证材料的脆性度, 试验需要在低温下开展, 增加了试验难度。

1.4 3D 打印法

3D 打印技术目前实现了表面裂纹的制作, 其裂纹形态与切割相似, 材料与浇注材料相似^[14]。对于如玻璃等透明脆性材料内裂纹的 3D 打印, 尚未见报道, 一些研究者认为将来可能是内裂纹制作的一个突破技术^[12], 因此本文列出供参考。3D 打印玻璃需要在 1000°C 以上高温将石英砂熔融后打印, 难度高。文献^[35], 也仅是实现了各种形状的高质量玻璃打印, 如图 4 所示, 其透明度和均质度并不能达到传统玻璃制作工艺水平, 技术仍有待突破。即使 3D 打印玻璃技术成熟, 仍可能面临下列问题: ①根据 3D 打印原理, 可能仍无法避免设置支撑或采用异质薄片打印的方法模拟裂纹。同时, 裂纹是和试样同时生成, 不是在固体成型后生成真实裂纹。②相比较来讲, 需要保证高纯度的原材料, 且要进行高温作业, 需要的设备也更多, 技术复杂, 成本高昂。

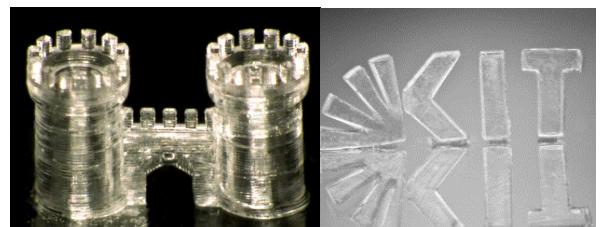


图 4 3D 打印玻璃^[35]

Fig. 4 Glasses by 3D printing technology^[35]

综上, 透明脆性材料中三维内裂纹的传统制作方法都有一定的缺陷性, 严重制约着相关三维内裂纹扩展断裂研究。为此本文提出的 3D-ILC 法将克服以上所述方法的不足, 快捷的在透明脆性材料内制作出任意的三维内裂纹, 脆性度高、裂纹真实、无需低温试验条件等。

2 3D-ILC 基本原理与实现方法

2.1 激光-介质损伤理论

在一完整物体内部形成“内科手术式”结构改变

而对改变处以外的物体部分及表面不造成影响, 理论上采用机械方法难以实现。但是, 波和磁等物理场可以穿透物体甚至作用于内部。本文甄别了可能的波、磁方法, 最终基于激光-介质损伤原理, 成功实现了在玻璃材料内制作任意的三维内裂纹。

3D-ILC 基本原理有两点: 一是激光聚焦形成等离子体爆破形成“介质击穿区”; 二是高频激光热冲击形成疲劳“裂纹扩展环”, 裂纹尖端光滑整齐。光滑整齐的“裂纹扩展环”, 是 3D-ILC 与以往方法最大的区别。

激光与介质材料的相互作用, 最为熟知的有折射、反射等, 但远不止此。如图 5 所示, 通过在透明体材料内部聚焦脉冲激光, 使激光能量密度在聚焦点 o 处超过材料破坏阈值, 将激发等离子体^[36]及逆韧致吸收作用^[37], 在聚焦处出现“介质击穿”形成爆破。其外在表现特征及内在物理化学机理十分复杂, 目前仍在探索研究阶段, 但通常认为存在以下阶段:

(1) 当入射脉冲激光通过透镜在介质内聚焦, 激光能量密度在聚焦处达到破坏阈值时, 介质中性分子出现轴向非线性电离现象, 现有理论包括雪崩电离、光子吸收电离, 隧道电离等理论^[38-39]。电离作用造成聚焦部位介质的中性分子电离形成等离子体, 即由原子及原子团被电离后产生的正负离子组成的离子化气体状物质, 尺度大于德拜长度的宏观电中性电离气体, 为除固、液、气外物质存在的第四态^[40]。电离作用往往和激光前进方向相反, 形成等离子体通道。

(2) 聚焦部位介质转化生成的等离子体和激光发生非线性逆韧致吸收作用^[37], 激光能量被等离子体强烈吸收收转变为大量的热能和化学能, 称之为激光能量沉积^[36]。同时, 对后面介质产生屏蔽效应^[41], 大部分激光无法继续透射, 透射后激光, 出现强度降低, 波形畸变等。除此之外, 介质对激光的本征吸收也产生了热效应^[41]。

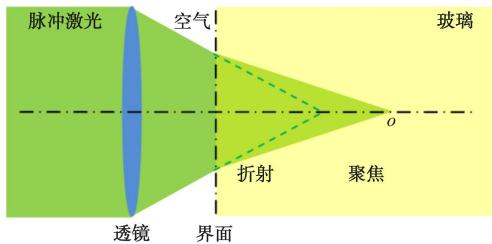


图 5 激光聚焦入射透明材料示意图 (未考虑自聚焦)

Fig. 5 Laser-medium interaction

(3) 非线性逆韧致吸收产生的大量能量, 造成局部高温高压, 引起应力致使介质在聚焦处破裂甚至微爆、熔融, 或称为“介质击穿”, 成为 3D-ILC 的基础。破裂往往和等离子体通道或激光入射方向垂直。根据激光参数及作用时间不同, 伴随出现的还有很多光电

化学现象包括光致变色、光致晶化、光致相变、折射率变化等^[42], 此处不一一介绍。

在形成激光-介质损伤时, 可以通过控制脉冲激光参数如激光波长、强度、作用时间等控制破裂规模, 目前技术条件存在纳秒激光、飞秒激光等。同时和介质材料本身的“损伤阈值”相关, 现阶段指标包括“能量密度”、“光束强度”等。

2.2 3D-ILC 实现流程

3D-ILC 的具体的实现流程如下: 取透明脆性材料, 选定预制裂纹的位置和范围, 通过建模可以控制任意尺寸、数量的内裂纹, 进行微机控制脉冲激光, 透过聚焦透镜射入透明材料内部选定区域, 根据 2.1 节激光-介质损伤原理形成破裂面, 本文称为介质击穿区, 视觉呈现白色。破裂边缘会朝外发生疲劳裂纹扩展, 裂纹尖端光滑整齐, 本文称为裂纹扩展环, 与“介质击穿区”相连, 由此在预制裂纹的位置形成宏观三维内裂纹, 而透明材料的其余部分保持原样。形成的宏观三维内裂纹称为 3D-ILC, 这种方法称为 3D-ILC 法。操作在常温环境下完成, 对于一直径 2 cm 的圆形 3D-ILC, 在数分钟内即可完成。

3 3D-ILC 的实例

3D-ILC 法可用于玻璃材料, 以下给出单裂纹、多裂纹等实例及 3D-ILC 裂纹面特征。

3.1 单内裂纹实例

激光器采用半导体泵浦, 纳秒脉冲激光, 波长 532 nm。采用玻璃材料, 尺寸为 4 cm × 4 cm × 8 cm。空白试样和含有圆形单 3D-ILC 的试样如图 6 所示。3D-ILC 细部图如图 7, 可以看出 3D-ILC 有两部分组成, 一部分为白色“介质击穿区”, 另一部分为尖端光滑整齐的“裂纹扩展环”, 视觉上一圈圈的彩色反射波纹特征明显。

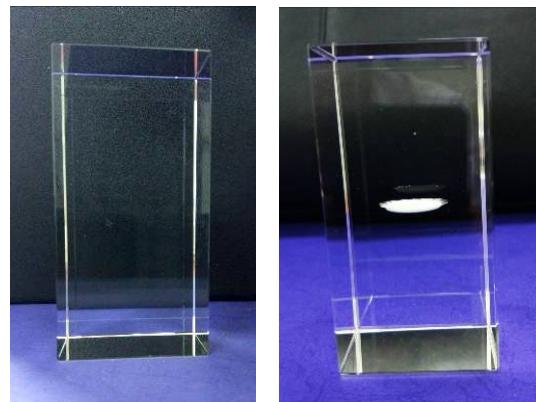


图 6 空白试样与含 3D-ILC 试样对比

Fig. 6 Glass samples with and without 3D-ILC

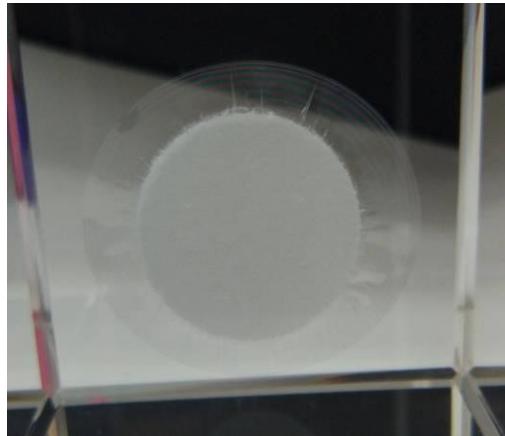


图 7 3D-ILC 细部图

Fig. 7 Detailed view of 3D-ILC

3.2 多裂纹实例

3D-ILC 技术可以实现任意数量和尺寸的三维内裂纹, 且对试样形状无严格要求。以下给出随机分布多 3D-ILC 试样、含 3D-ILC 圆柱试样、双 X 形 3D-ILC 试样实例, 如图 8, 9 所示。制作参数和 3.1 节单裂纹相同。

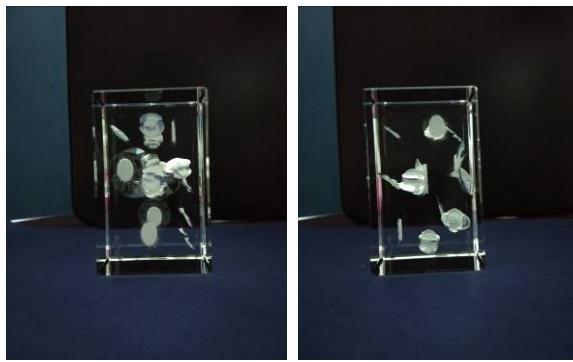


图 8 随机分布多 3D-ILC 试样(正视图与侧视图)

Fig. 8 Sample with multi-3D-ILCs

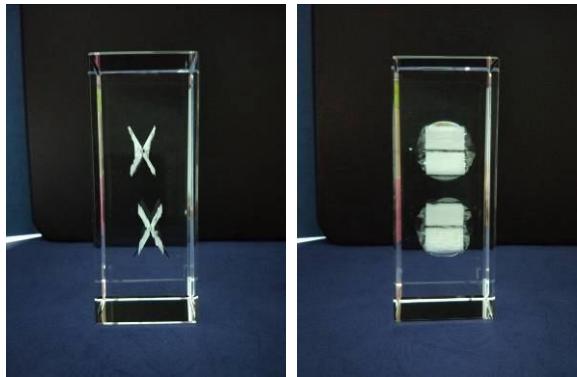


图 9 含双 X 形 3D-ILC 试样(正视图与侧视图)

Fig. 9 Glass sample with double X-shape 3D-ILCs

4 3D-ILC 有效性

4.1 单轴压缩裂纹扩展试验

为验证 3D-ILC 试样在断裂力学试验中的有效性,

开展了含 3D-ILC 试样的单轴压缩试验, 此时为 I-II-III 型复合裂纹, 试验结果如图 10 所示, 3D-ILC 出现翼型扩展。此处仅为证明 3D-ILC 在断裂力学中的可用性, 试验成果将另文详述。

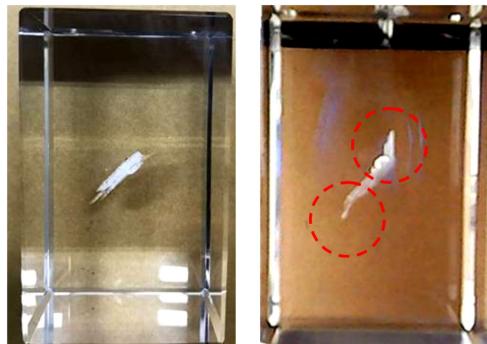


图 10 单轴压缩试验(红色虚线内为裂纹扩展)

Fig. 10 Propagation of 3D-ILC in axial compressive test

4.2 巴西圆盘裂纹扩展试验

为进一步验证 3D-ILC 的有效性, 开展含有 3D-ILC 的巴西圆盘试样劈裂试验, 试验结果如图 11 所示, 3D-ILC 沿加载方向出现裂纹扩展。试验规律与成果将在其他论文中专门给出, 此处仅以此例进一步证明 3D-ILC 在断裂力学试样中的可用性。

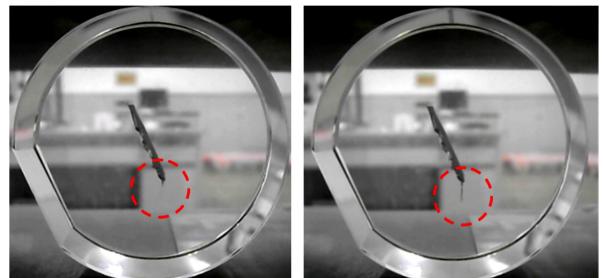


图 11 压载过程中 3D-ILC 扩展

Fig. 11 Propagation of 3D-ILC in Brazilian disc tests

5 3D-ILC 的优势讨论

5.1 3D-ILC 的优势与特点

(1) 裂纹真实。3D-ILC 为真实裂纹, 不是预埋-浇注法中采用云母或金属片并涂油的方式模拟裂纹; 而切割-粘贴法裂纹面存在切割厚度, 同时裂纹面本身也是拼接而成, 完整度不够。

(2) 可观测性强。由于材料的高透明性, 3D-ILC 扩展过程具有极强的可观测性, 减少了各种无损检测方法的高昂费用及间接观测带来的不便与误差。

(3) 简便、快速、高效。一方面指试样制作: 如图 7 含单 3D-ILC 试样, 可在数分钟之内即可完成, 成本较低。另一方面指加载条件要求低: 避免了预埋-浇注法等需要在保持-20℃及以下的加载条件, 开展 3D-ILC 断裂试验更加便捷。

(4) 试样均质度、脆性度高、完整性好。玻璃因均质、各向同性、在裂纹扩展之前严格遵循胡克定律, 是脆性固体断裂力学中的经典材料。正如李世愚等^[9]在《岩石断裂力学》一书中指出:“固体力学的所有开拓性试验都是采用玻璃作为基本样品材料, 断裂力学也不例外”。

(5) 裂纹数量、尺寸可控。这是 3D-ILC 的一个极重要特点。裂纹形态在电脑上完成建模, 可精确控制, 由此可为内裂纹扩展试验提供符合要求的试样, 图 7~11 给出了实例证明。

(6) 玻璃为天然应力双折射材料, 为试样应力分布的观测分析提供了基础。

5.2 3D-ILC 的“平民化”及其意义

断裂力学中内裂纹问题及三维问题试验存在两方面的制约: ①试验条件门槛高, 以往方法多需要冷冻环境下做试验, 以保证材料的脆性度; ②观测瓶颈, 对于非透明材料的裂纹扩展过程, 需要实时 CT、MRI 等设备的投入, 一方面成本高, 另一方面追踪裂纹扩展过程, 这些仪器也不能完美解决问题。

由于 3D-ILC 采用玻璃材料, ①其脆性度不需要通过温度进行控制, 因此极大降低了试验对环境的要求; ②由于其高透明度, 避免了高昂的间接检测设备的投入, 如 CT 设备, 且避免了检测观测的不便及误差。由此极大降低了断裂力学中内裂纹问题及三维问题试验研究门槛, 使内裂纹问题及三维问题的研究具备“平民化”特征。而一项原本复杂和高昂的研究工作变的平民化, 普通科研者都可以参与, 将为此领域研究的发展奠定基础。

6 结 论

(1) 3D-ILC 的提出, 解决了在不影响表面的情况下, 在脆性材料内部实现任意可控的三维深埋裂纹制作这一基本问题, 使原本在制作及观测两方面复杂而成本高昂的内裂纹及三维问题的试验, 具备“平民化”特征, 为推动脆性材料断裂力学中内裂纹问题及三维问题的研究奠定基础。

(2) 3D-ILC 基于激光-介质损伤原理, 由“介质击穿区”和“裂纹扩展环”组成, 前者视觉上为白色, 且表面质地松散, 后者光滑齐整, 彩色反射波纹明显。是否制作出裂纹尖端光滑整齐的“裂纹扩展环”, 是 3D-ILC 与其他方法最大的区别之一。

(3) 3D-ILC 和传统方法相比具备: 可观测性强; 简便、快速、高效; 裂纹真实; 试样均质度、脆性度高、完整性好; 裂纹数量、形状、方向可控等优势。

(4) 通过含 3D-ILC 试样的单轴压缩试验、巴西圆盘试验, 3D-ILC 扩展开裂特征明显, 3D-ILC 在三

维内裂纹的断裂力学试验研究中的可用性得到证明。

参 考 文 献:

- [1] 余寿文. 断裂力学的历史发展与思考[J]. 力学与实践, 2015, 37(3): 390 - 394. (YU Shou-wen. The history and development of fracture mechanics[J]. Mechanics in Engineering, 2015, 37(3): 390 - 394. (in Chinese))
- [2] 国峰楠. 含界面非均匀材料的热断裂力学研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. (Guo Feng-nan. Study on thermal fracture mechanics of non-uniform materials with interface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese))
- [3] 徐世娘, 董丽欣, 王冰伟, 等. 我国混凝土断裂力学发展三十年[J]. 水利学报, 2014, 45(增刊 1): 1 - 9. (XU Shi-yu, DONG Li-xin, WANG Bing-wei, et al. The development of concrete fracture mechanics in China for 30 years[J]. Hydraulic Engineering, 2014, 45(S1): 1 - 9. (in Chinese))
- [4] 霍 醒. 断裂力学判据的评述[J]. 力学学报, 2016, 48(4): 741 - 753. (HO Xing. A review of fracture mechanics criteria[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4): 741 - 753. (in Chinese))
- [5] 袁进科, 裴向军. 汶川地震震裂山体裂缝变形特征与动力机制研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(6): 848 - 855. (YUAN Jin-ke, PEI Xiang-jun. Study on fracture deformation characteristics and dynamic mechanism of fractured mountain body in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(6): 848 - 855. (in Chinese))
- [6] 刘泉声, 魏 莱, 刘学伟, 等. 基于 Griffith 强度理论的岩石裂纹起裂经验预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1561 - 1569. (LIU Quan-sheng, WEI Lei, LIU Xue-wei, et al. Empirical prediction method of rock crack initiation based on Griffith strength theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1561 - 1569. (in Chinese))
- [7] 安兵兵. 生物硬组织材料的变形与断裂机理研究及材料设计[D]. 上海: 上海大学, 2012. (AN Bing-bing. Study on deformation and fracture mechanism and material design of bio-hard tissue materials[D]. Shanghai: Shanghai University, 2012. (in Chinese))
- [8] GRIFFITH. The phenomena of rupture and flow in solids[J]. Phil Trans Roy Soc, 1920, 221: 163 - 198.
- [9] IRWIN G R. Analysis of stresses and strains near end of a crack traversing a plate[J]. J Appl Mech, 1957, 24: 361 - 364.

- [10] RICE J R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1968, **35**(2): 379 – 386.
- [11] LAWN B. *Fracture of brittle solids*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [12] 赵洪宝, 胡桂林, 李伟, 等. 预制裂隙岩石裂纹扩展规律的研究进展与思考[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, **12**(增刊2): 899 – 906. (ZHAO Hong-bao, HU Gui-lin, LI Wei, et al. The research progress and thinking on the crack growth of the pre-fabricated crack rock[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, **12**(S2): 899 – 906. (in Chinese))
- [13] 李世愚, 和泰名, 尹祥础. 岩石断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (LI Shi-yu, TAI Ming, YIN Xiang-chu. *Rock fracture mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [14] JIANG C, ZHAO G, ZHU J, et al. Investigation of dynamic crack coalescence using a gypsum-like 3d printing material[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, **49**(10): 3983 – 3998.
- [15] 赵毅鑫, 龚爽, 姜耀东, 等. 基于半圆弯拉试验的煤样抗拉及断裂性能研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, **35**(6): 1255 – 1264. (ZHAO YI-xin, GONG Shuang, JIANG Yao-dong, et al. Study on tensile and fracture properties of coal samples based on semicircle bending tensile test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(6): 1255 – 1264. (in Chinese))
- [16] 王慧晶. 基于声发射参数的材料疲劳断裂研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013. (WANG Hui-jing. Study on fatigue fracture of materials based on acoustic emission parameters[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [17] 袁红梅. 黏结结构界面缺陷超声检测技术及其应用研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010. (YUAN Hong-mei. Ultrasonic testing technology for interfacial defects of bonded structures and its application[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [18] SOMMER E. Formation of fracture lances in glass[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1969, **1**(3): 539 – 546.
- [19] 朱维申, 陈卫忠, 申晋. 雁形裂纹扩展的模型试验及断裂力学机制研究[J]. *固体力学学报*, 1998, **19**(4): 75 – 80. (ZHU Wei-shen, CHEN Wei-zhong, SHEN Jin. Study on the model test and fracture mechanics of the extension of the goose-shaped crack[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1998, **19**(4): 75 – 80. (in Chinese))
- [20] SARFARAZI V, HAERI H. A review of experimental and numerical investigations about crack propagation[J]. *Computers and Concrete*, 2016, **18**(2): 235 – 266.
- [21] 李术才, 杨磊, 李明田, 等. 三维内置裂隙倾角对类岩石材料拉伸力学性能和断裂特征的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, **28**(2): 281 – 289. (LI Shu-cai, YANG Lei, LI Ming-tian, et al. Effect of three-dimensional built-in fracture dip angle on tensile mechanical properties and fracture characteristics of rock-like materials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(2): 281 – 289. (in Chinese))
- [22] 李廷春, 吕海波, 王辉. 单轴压缩载荷作用下双裂隙扩展的CT扫描试验[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(1): 9 – 14. (LI Ting-chun, LÜ Hai-bo, WANG Hui. CT scanning test of double crack propagation under uniaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(1): 9 – 14. (in Chinese))
- [23] 林鹏, 周雅能, 李子昌, 等. 含三维预置单裂纹缺陷岩石破坏试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, **27**(增刊2): 3882 – 3887. (LIN Peng, ZHOU Yan-neng, LI Zi-chang, et al. Experimental study on rock failure with 3-D pre-placed single crack defects[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(S2): 3882 – 3887. (in Chinese))
- [24] ADAMS M, SINES G. Crack extension from flaws in a brittle material subjected to compression[J]. *Tectonophysics*, 1978, **49**(1): 97 – 118.
- [25] DYSKIN A, JEWELL R, JOER H, et al. Experiments on 3-D crack growth in uniaxial compression[J]. *International Journal of Fracture*, 1994, **65**(4): 77 – 83.
- [26] DYSKIN A V, SAHOURYEH E, JEWELL R J, et al. Influence of shape and locations of initial 3-D cracks on their growth in uniaxial compression[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, **70**(15): 2115 – 2136.
- [27] FU J, CHEN K, ZHU W, et al. Progressive failure of new modelling material with a single internal crack under biaxial compression and the 3-D numerical simulation[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2016, **165**: 140 – 152.
- [28] 朱珍德, 林恒星, 孙亚霖. 透明类岩石内置三维裂纹扩展变形试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, **37**(4): 913 – 921. (ZHU Zhen-de, LIN Xie-xing, SUN Ya-lin. Experimental study on 3-D crack propagation and deformation of transparent rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(4): 913 – 921. (in Chinese))
- [29] 程靳, 赵树山. 断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

- (CHENG Jin, ZHAO Shu-shan. Fracture mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [30] KOLARI K. A complete three-dimensional continuum model of wing-crack growth in granular brittle solids[J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, **115**: 27 - 42.
- [31] 郭彦双, 林春金, 朱维申. 脆性材料中三维裂隙断裂试验、理论与数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊 1): 3191 - 3195. (GUO Yan-shuang, LIN Chun-jin, ZHU Wei-shen. Theoretical and numerical simulation of three-dimensional fracture test in brittle materials[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S1): 3191 - 3195. (in Chinese))
- [32] TANG H, ZHU Z, ZHU M, et al. Mechanical behavior of 3D crack growth in transparent rock-like material containing preexisting flaws under compression[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015(2): 1 - 10.
- [33] 付金伟, 朱维申, 谢富东, 等. 岩石中三维双裂隙组扩展和贯通过程的试验研究和弹脆性模拟[J]. 岩土力学, 2013, **34**(9): 2489 - 2496. (FU Jin-wei, ZHU Wei-shen, XIE Fu-dong, et al. Experimental study and elastic brittleness simulation of the propagation and penetration process of three-dimensional double-crack groups in rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(9): 2489 - 2496. (in Chinese))
- [34] 孙亚霖, 朱珍德, 林恒星. 透明类岩石材料内置裂隙试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2015, **32**(2): 1 - 4. (SUN Yi-lin, ZHU Zhen-de. Experimental study on the built-in fracture of transparent rock materials[J]. Journal of Hebei Engineering University (Natural Science Edition), 2015, **32**(2): 1 - 4. (in Chinese))
- [35] KOTZ F, ARNOLD K, BAUER W, et al. Glass, three-dimensional printing of transparent[J]. Nature, 2017, **544**(7650): 337 - 379.
- [36] 巫殷忠. 飞秒激光在固体材料上制作微结构的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008. (WU Yin-zhong. Fabrication of microstructure on solid materials by femtosecond laser[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese))
- [37] 王敏. 飞秒激光加工玻璃材料微结构技术研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2016. (WANG Min. Study on the microstructure of glass material for femtosecond laser processing[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016. (in Chinese))
- [38] 游牧. 超短激光脉冲与透明介质相互作用[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2005. (YOU Mu. The ultrashort laser pulse interacts with the transparent medium[D]. Xi'an: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Optical Precision Machinery Research Institute), 2005. (in Chinese))
- [39] 刘大勇. 石英玻璃中飞秒激光三维加工阈值的研究及其应用[D]. 北京: 北京大学, 2008. (LIU Da-yong. Study on the threshold of femtosecond laser three-dimensional machining in quartz glass and its application[D]. Beijing: Peking University, 2008. (in Chinese))
- [40] CHEN F F, 林光海. 等离子体物理学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1980. (CHEN F F, LIN Guang-hai. Introduction to plasma physics[M]. Beijing: Science Press, 1980. (in Chinese))
- [41] 王玺. 准分子激光损伤 K9 玻璃和熔石英的理论与实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016. (WANG Xi. Theoretical and experimental study on excimer laser damage of K9 glass and fused quartz[D]. Hefei: China University of Science and Technology, 2016. (in Chinese))
- [42] 姜雄伟, 朱从善, 武四新, 等. 玻璃在飞秒激光作用下的新现象[J]. 世界科技研究与发展, 2000, **21**(1): 36 - 38. (JIANG Xiong-wei, ZHU Cong-shan, WU Si-xin, et al. New phenomena of glass under femtosecond laser[J]. World Sci-Fech Research and Development, 2000, **21**(1): 36 - 38. (in Chinese))