

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.2168

基于 3D-ILC 球体 45° 三维双内裂纹复合断裂研究

张 珂^{1,2}, 王海军², 任 然³, 汤 雷², 郁舒阳¹, 刘鑫娜¹, 顾 浩¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 深圳水务集团, 深圳 518000)

摘 要: 断裂力学是各领域基础科学, 材料内裂纹相互作用是断裂力学的重要研究领域, 但目前球体内裂纹相互作用研究成果较少。基于三维激光疲劳内裂纹 (3D-ILC) 技术, 在对球体试样表面无任何损伤的情况下, 制作三维平行纯内裂纹, 开展 45° 倾角平行双内裂纹单轴压缩试验, 对双内裂纹的裂纹扩展过程、应力双折射规律、断口特征、破坏形态、相互作用等多方面开展研究, 进行含双内裂纹 I-II-III 型圆球断裂数值模拟, 分析 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 分布规律, 与试验相符。结果表明: (1) 球体双内裂纹在单轴压缩下之间发生屏蔽作用, 主裂纹面穿过两预制内裂纹; (2) 翼型裂纹光滑区呈现 I-II 型裂纹断口特征, 翼型裂纹侧面撕裂区呈现“矛状”III 型裂纹特征; (3) 基于 M 积分计算的 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 分析与基于断裂特征的 I、II、III 型裂纹类型分析一致。3D-ILC 技术可用于球体内裂纹相互作用断裂试验研究, 球体内裂纹试验与理论分析为脆性材料内裂纹扩展及相互作用研究提供试验与理论参考。

关 键 词: 三维激光疲劳内裂纹 (3D-ILC); 断裂力学; 内裂纹扩展; 脆性材料; 裂纹相互作用

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 12-4731-09

Fracture characteristics of sphere with 45° double embedded cracks based on 3D-ILC

ZHANG Ke^{1,2}, WANG Hai-jun², REN Ran³, TANG Lei², YU Shu-yang¹, LIU Xin-na¹, GU Hao¹

(1. College of Water Resources and Hydropower, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China; 3. Shenzhen Water Group, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Crack interaction in materials is an important research area of fracture mechanics that plays a fundamental role in various fields, but few studies have been conducted on the interaction between internal cracks of brittle spherical material. Based on the 3D-internal laser-engraved crack (3D-ILC) technology, two 45° embedded cracks were generated internally in the spherical glass, and uniaxial compression test was performed. The crack propagation, failure morphology and interaction of the cracks were analysed in this experimental research. The distributions of K_I , K_{II} , K_{III} were also analysed based on the M-integral, and the results were consistent with experiments. The results show that: 1) The interaction between two cracks occurs in the test. Due to the shielding effect between the double embedded cracks, the crack growth presents obvious anti-symmetric characteristics. 2) The wing crack growth surface presents both smooth area and tear area, corresponding to the I-II crack and III crack respectively. 3) The simulation result is consistent with the experimental observation. The 3D-ILC technology introduced by the paper can provide experimental and theoretical basis for the study of fracture theory of brittle spheres with parallel internal cracks.

Keywords: 3D-internal laser-engraved crack (3D-ILC); fracture mechanics; internal crack propagation; brittle material; interaction of cracks

1 引 言

1920 年 Griffith^[1]对脆性材料的断裂理论作出

开创性研究, 以能量平衡为基础建立裂纹失稳扩展判据, 成为了现代断裂力学不断发展的基石。随着大工业技术的发展, 材料部件的脆性断裂频繁发生,

收稿日期: 2018-11-28

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2016YFC0401801); 国家自然科学基金 (No.U1765204, No.51409170, No.51739008); 江苏省自然科学基金面上项目 (No.BK20171130); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No.Y419005)。

This work was supported by the National Key Research and Development Plan Project (2016YFC0401801), the National Natural Science Foundation of China (U1765204, 51409170, 51739008), the Jiangsu Provincial Natural Science Foundation Funded Project (BK20171130) and the Special Fund for Basic Research Business Expenses of Central-Level Public Welfare Research Institutes (Y419005).

第一作者简介: 张珂, 女, 1995 年生, 硕士研究生, 主要从事地下工程及断裂力学方面的研究工作。E-mail: 1264365675@qq.com

通讯作者: 王海军, 男, 1985 年生, 博士, 硕士生导师, 高级工程师, 主要从事断裂力学及岩石力学相关的科研工作。E-mail: hjwang@nhri.cn

传统的强度理论已难于满足现代结构和材料设计要求,由此断裂力学理论越来越得到人们重视。

球体作为自然界较为完美的几何形态,也是生活工业中常见的几何形态,研究者对其开展了大量试验与理论研究。试验方面:Xavier等^[2]对玻璃球体在准静态压缩以及边缘冲击试验下裂纹的萌生模式进行监测和研究;Salman等^[3]通过试验研究了不同的冲击荷载下玻璃球体破坏形式及其随球体尺寸和冲击速度的变化规律;Schonert^[4]通过试验研究了在较高冲击荷载下球面锥形裂纹的扩展路径;Shipway^[5]、Kienzler^[6]等研究动态载荷作用下变形球体内部的应力分布。数值理论方面:Zhu等^[7]利用近场动力学(PD)理论模拟球体在不同加载条件下的破碎特性;Ma等^[8]采用连续离散耦合分析方法(FDEM)模拟均质圆球冲击作用下的破碎形态,对脆性材料断裂机制和分形特征进行了研究;陈兴等^[9]利用脆性材料强度的Weibull分布,研究圆球在不同冲击破坏荷载作用下裂纹的萌生、扩展以及破碎过程。

但是以上试验或数值模拟都针对完整球体,实际上内部含有裂纹和类裂纹缺陷是材料的固有属性,内裂纹的扩展及内裂纹之间的相互作用,对材料属性影响巨大^[10]。由于在内裂纹研究领域,预制裂纹加工、裂纹扩展监测等难度较大,因此,目前对含三维纯内裂纹的球体试验及理论研究一直较少,对于平行双内裂纹的起裂、扩展及裂纹相互作用研究更是很少涉及。

针对此问题,基于王海军等^[11]首次提出的三维激光疲劳裂纹(3D-ILC)技术,选用固体力学经典材料玻璃,在对表面无任何影响的情况下,在球体内部凭空生成宏观封闭内裂纹,解决了双内裂纹制作问题,利用光学双折射材料解决了裂纹扩展以及应力分布的实时观测问题。本文将从①试样破坏过程、应力双折射云纹、起裂破坏等特征荷载,②内裂纹扩展位移监测,③I-II-III型扩展面特征,④破坏形态与断口4个方面来展示物理试验成果,揭示压缩下含45°双内裂纹球体断裂特性规律,同时将从数值计算原理、应力-应变分布、归一化 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 分布及与物理试验的对比开展理论分析,阐述未来研究方向及挑战,为双内裂纹断裂、相互作用机制及I-II-III型复合断裂规律、理论研究及修正提供试验及理论依据。

2 试样的制备与试验方法

2.1 3D-ILC技术

3D-ILC是王海军等^[11]于2017年首次提出,实

现了在对材料表面无任何影响的情况下,在其内部任意制作内裂纹。

若在一完整物体内部完成“内科手术式”精确结构改变而对其他部分不造成影响,以常规机械力学理论判断,制作三维内裂纹的难度很高,几乎是不可能实现。但是,电磁及波等物理场可以穿透物体并作用于内部,王海军等^[11]通过甄别各类场作用,最终提出3D-ILC方法,通过电磁场的穿透性,作用于材料内部,形成物质第4态,达到对表面无任何影响的情况下,进而制作宏观内裂纹。这一材料内裂纹成型工艺成果在国内外属于创新性工作,具体原理参见文献[11],为尊重3D-ILC的原创性,此处不对3D-ILC的核心细节进行重复论述,目前已应用于含内裂纹孔口试样断裂^[12]及含内裂纹巴西圆盘断裂^[13]研究中。

2.2 试样材料的选择

早在20世纪,Griffith创立的线弹性断裂力学正是建立在玻璃基础上,李世愚^[14]在《岩石断裂力学导论》中同样提出:固体力学的所有开拓性试验都采用玻璃作为基本样品材料,断裂力学也不例外。玻璃因其固有的脆性成为脆性固体断裂力学的经典材料。本文试样材料选用玻璃,主要优势为:①玻璃具有均质,各向同性、线弹性的特点,在裂纹扩展之前准确遵循胡克定律,可以排除诸多复杂因素的干扰;②同时玻璃是应力双折射光敏材料,为试验中定性观测应力分布、裂纹扩展提供基础。

Griffith^[1]针对玻璃,研究了单一穿透裂纹的起裂与扩展问题,为断裂力学奠定了基础。其后,许多学者进行了以玻璃为基础的经典试验,如Lawn等^[15]利用玻璃得到了在球形压头滑过的经典锥形裂纹痕迹;Orowan^[16]利用玻璃来研究环境分子对脆性固体裂纹扩展的吸附作用和附着功;Knauss^[17]运用玻璃进行了纯III型裂纹研究,观察到了准螺旋形破坏特征。

因此,玻璃在断裂力学研究的经典性得到了几十年的证明,基于玻璃材料的经典Griffith理论仍在不断发展,成为各断裂力学分支如岩石断裂力学等的基础理论。

2.3 研究方案

如表1所示,为研究含双内裂纹圆球在单轴压缩下的断裂特性,共设置3组含45°平行双内裂纹试样,编号A1~A3。分析内容包括:破坏过程、应力云纹特征、破坏形态、裂纹扩展面特征、数值仿真研究。

2.4 试样设计与制作

利用3D-ILC技术在对表面无任何影响情况

表 1 试样编号及方案
Table 1 Sample number and scheme

试样类别	编号	示意图	加载方案		分析内容				
			是否破坏	目的	破坏过程	破坏形态	裂纹特征	应力云纹	数值模拟
含裂纹试样	A1		√	试样破坏过程观察	√	√	√	√	√
	A2		√		√	√	√	√	√
	A3		√		√	√	√	√	√

下，制作双内裂纹。如图 1 所示，直径为 80 mm，含两条平行纯封闭预制圆形内裂纹，与表面不相交。两条裂纹分别为上裂纹、下裂纹（为方便后续对两条内裂纹进行区分），裂纹直径约 22 mm，两裂纹间距为 15 mm，裂纹面与水平向倾角为 45°（与垂直加载方向夹角为 45°），两裂纹中心连线中点为球体的圆心。

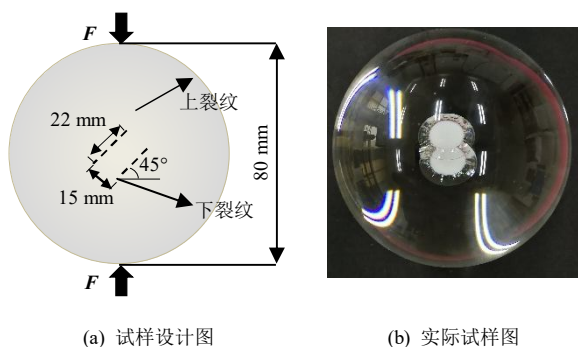


图 1 含双内裂纹圆球试样

Fig.1 Sphere specimen with double embedded cracks

2.5 加载仪器系统

试验仪器采用 WHY-3000 伺服压载系统，单轴压缩加载，力值控制模式，速率 0.05 kN/s；周边设置高清摄像头实时捕捉监测裂纹不同角度的动态扩展变化；放置聚光灯调节光线。试验仪器布置如图 2 所示。

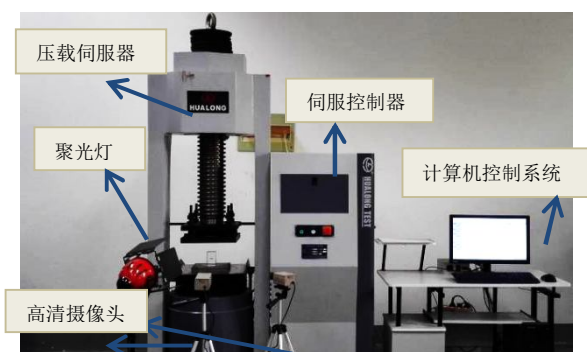


图 2 加载系统

Fig.2 Loading system

由于脆性试验中应力集中较为敏感，试样端部易因不平整或不光滑而产生应力集中影响试验质量，为避免应力集中现象，同时减少端部摩擦效应，在试样顶部与底部各放置一块厚度 3 mm 的光滑 PMMA 板。

2.6 双折射效应的应用

玻璃等非晶介质在无应力状态下通常呈现光学各向同性，当外力作用施加，材料内部产生应变，折射率特征因此发生改变，显示出光学各向异性，这与应力分布有关，即当平面偏振光垂直射入有内应力的玻璃时，将产生传播速度不同的两束光线，遵循折射定律的寻常光 o 和不遵循折射定律的非常光 e ，此为应力双折射现象。 o 和 e 频率、振动方向相同，存在固定相位差，可产生干涉条纹，由此效应可实现试样端部、裂纹周围应力场分布及动态变化观测，判定应力集中，并纠正试验偏心。依据应力-光学定律^[18]：当入射光入射试验对象时，由于双折射效应，主应力与相应的折射率有如下关系：

$$n_1 - n_2 = (C_1 - C_2)(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

式中： σ_1 、 σ_2 分别为试样在压载作用下主应力； n_1 、 n_2 分别为 σ_1 、 σ_2 方向的折射率； C_1 、 C_2 分别为材料应力-光学系数。偏振光通过试样产生的光程差 Δ 为

$$\Delta = (n_1 - n_2)h \quad (2)$$

式中： h 为介质厚度。由式 (1)、(2) 建立应力与光学量的对应关系：

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \Delta / hC \quad (3)$$

式中： $C = C_1 - C_2$ 。

3 试样破坏过程、云纹特征

为方便理解，本节首先给出整体的裂纹扩展破坏过程、应力云纹特征，以方便读者更好地从整体上把握试验过程。完整试样与含内裂纹试样破坏过程如图 3 所示。



(a) 应力双折射正视图



(b) 应力双折射侧视图

图3 试样破坏过程

Fig.3 Failure process of specimen

3.1 裂纹扩展过程

单轴压缩下,完整试样与含 45° 双内裂纹试样典型试验破坏过程如图3所示。

3.2 双内裂纹生长过程

如图3所示,含双内裂纹试样的断裂破坏可分为:起裂、裂纹扩展、破坏3个阶段。

(1)起裂阶段:当平均加载值达到14.75 kN时,下裂纹下尖端处可见生长出翼裂纹,与原预制内裂纹呈一定夹角;荷载达到20.42 kN时,上裂纹上尖端开始起裂,并萌生翼裂纹。

(2)裂纹扩展阶段:扩展前期随着荷载增加,上裂纹的上翼裂纹和下裂纹的下翼裂纹呈一定起裂角后均呈近似 90° 向上、下加载方向扩展,速度缓慢。随荷载进一步增加,当 $F=37.8$ kN时,上裂纹上翼、下裂纹下翼扩展迅速,分别向试样顶部、底部逼近,裂纹扩展由稳定扩展变为非稳定扩展。

(3)破坏阶段:下裂纹下端的翼裂纹迅速向试样底端生长,最终当平均峰值荷载达到37.93 kN时,主裂纹由试样底端加载点产生,迅速向顶端生长,最终主裂纹面从两裂纹中间将试样劈裂为两半。

3.3 内裂纹扩展监测

对于传统裂纹扩展的监测,碍于材料本身非透明、非均质的特性,多集中于易于观测的表面裂纹扩展速度监测^[19],而对三维内裂纹扩展缺少位移、速度等的定量描述。本文对双内裂纹的扩展位移进行测定,得到内裂纹扩展位移-力值曲线,如图4所示。

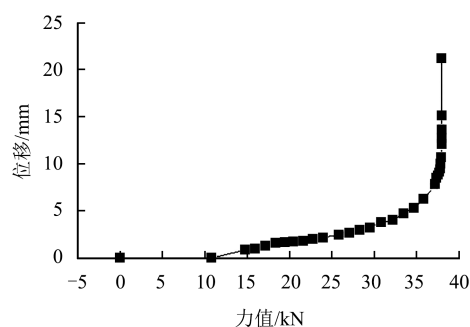


图4 位移-力值曲线

Fig.4 Displacement-force curve

3.4 应力双折射规律

传统上对材料应力双折射规律研究多基于无缺陷固体材料,对含双内裂纹的球体脆性材料几乎没有,仅对含内裂纹的巴西圆盘试样有所涉及^[13]。本文得到了含平行双内裂纹脆性球体的应力双折射规律:

①内裂纹的存在使球体整个应力分布有了明显改变,条纹色彩清晰可见,说明单轴压缩下球体应力在内裂纹周围存在应力集中现象;②随力值增加,试样内部应力云纹条数逐渐密集,条纹颜色逐渐变浅;③云纹集中在上、下裂纹中部与尖端,呈水滴状,同时随着荷载增加,水滴状逐渐向裂纹处变小收缩,颜色不断发生变化;④在两预制内裂纹之间,也可观察到明显条纹,且色彩逐渐由深到浅,由最终的相连状逐渐旋转分开,体现两条内裂纹之间应力逐渐增大的

变化过程, 应力集中愈加强烈; ⑤试样破坏前后, 内裂纹周边云纹色彩消失不见, 说明此时内部应力迅速向四周释放。

4 I-II-III 型扩展面特征

4.1 双裂纹屏蔽作用

为了说明双内裂纹的相互屏蔽作用, 本文首先给出了作者前期开展的含单内裂纹球体的扩展形态试验结果^[20], 如图 5(a)、5(b)所示, 扩展形态上下尖端均呈包裹状翼型裂纹, 上下对称, 即上下翼裂纹扩展

幅度相同。

本次试验双内裂纹扩展形态如图 5(c)、5(d), 上、下裂纹的尖端同样呈包裹状翼裂纹扩展, 但由于双内裂纹上裂纹上端与下裂纹下端分别相较另外一端更靠近试样上下加载点的竖直连线, 因此所受张拉应力更大, 形成双内裂纹尖端的屏蔽作用。在这种屏蔽作用下, 整个裂纹扩展特征呈现出反对称的特征, 以上裂纹上端与下裂纹下端的翼型裂纹扩展为主, 对上裂纹下端与下裂纹上端存在屏蔽作用, 最终呈现前者扩展幅度较大, 后者虽有扩展但幅度较小的裂纹形态。

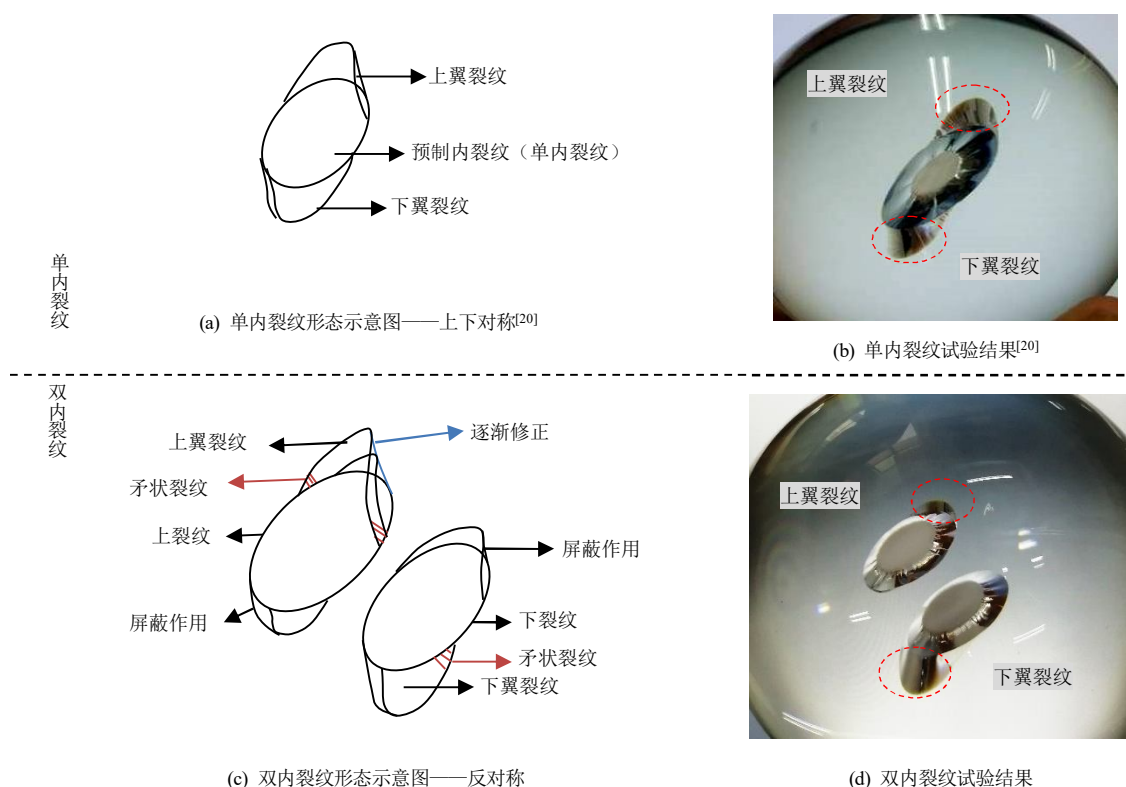


图 5 内裂纹扩展形态对比图

Fig.5 Schematic diagrams and test results of internal crack growth morphology

4.2 I-II-III 型裂纹扩展面分区

由图 6 可明显看出, 翼裂纹靠近原内裂纹的两侧出现了褶皱状线性汇流的现象, 将两条裂纹上、下尖端的翼裂纹分为光滑区与撕裂区。

(1) 光滑区: 两条内裂纹扩展形成反对称, 上裂纹上端与下裂纹下端翼裂纹扩展程度较大, 翼裂纹面呈圆弧状, 且在与其内裂纹连线 $2\beta = 50^\circ$ 范围角内光滑平整, 为 I-II 复合裂纹扩展特征。上裂纹下端与下裂纹上端翼裂纹扩展由于屏蔽作用扩展较小, 只出现光滑区。

(2) 撕裂区: 上裂纹上端与下裂纹下端均可清晰看到, 在翼裂纹面光滑区的两侧边缘, 出现条纹状撕

裂的裂纹形态, 呈汇流形态。撕裂区两边对称, 长度为 $L = 5 \text{ mm}$, 为 I-II-III 型复合裂纹作用结果。

4.3 I-II 型裂纹扩展路径 (光滑区)

仔细观察试样 C 组翼裂纹可看出 (见图 5(c)、5(d)), 在光滑区, 内裂纹在起裂时, 上下尖端起裂方向与原内裂纹呈一定角度, 随裂纹进一步扩展, 翼裂纹发生偏转, 逐渐修正为与加载方向平行, 此现象表明, 脆性裂纹扩展往往倾向于 I 型裂纹扩展。当叠加上 II 型场作用时, 剪应力作用使裂纹偏离原来的平面, 朝着剪切荷载最小的方向发生, 使裂纹总是会回到与最大主拉应力垂直的一个稳定的平面上, 即 I 型裂纹平面。这与裂纹在 I-II 型复合作用下, 最终更

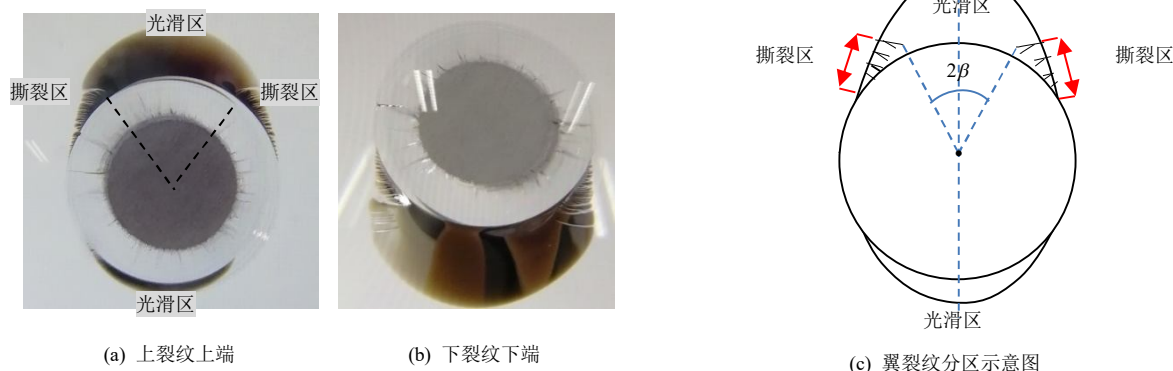


图6 翼裂纹分区图
Fig.6 Partition map of wing cracks

倾向于纯 I 型裂纹扩展，与试样破坏时出现竖直裂纹现象一致。

4.4 III 型裂纹下 twist hackle 特征（撕裂区）

撕裂区细节形态见图 7，外文称“twist hackle”^[15]、“lances”^[21]，中文称“矛头”、“鱼叉”、“河流”。

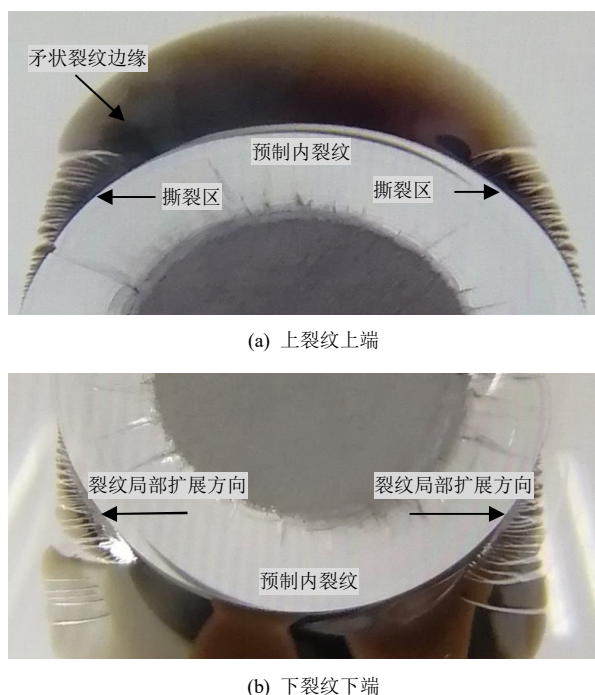


图7 矛状裂纹
Fig.7 Partition map of spear cracks

撕裂区裂纹每个裂隙表面都从原来的裂隙平面上旋转，以响应主张力轴的横向旋转或扭转发生改变，存在多级支点，靠近内裂纹尖端侧数量密集，线形较细，外侧边缘线形较粗。撕裂区裂纹扩展的局部方向是从线形数量较多的分支特征向收敛性和线形数量较少的方向发展，沿着该扩展方向，裂纹

扩展路径清晰可见，由多并一，逐渐汇流、合并，汇集为较粗的母支，形成类似矛状裂纹特征。

翼裂纹外侧边缘呈不连续缺口，明显在内裂纹平面法线方向以及平行于内裂纹平面共同受到剪切撕裂作用，发生错动，通过裂纹前端的断裂而容纳成许多平行但非共面的节段。然后是横向断裂，允许分开的裂纹连接，从而在矛状裂纹边缘形成“线”或“台阶”，认为撕裂区裂纹是在 I-II-III 复合型裂纹作用下所产生。

5 破坏形态

含 45° 内裂纹试样最终破坏形态如图 8 所示。裂纹类型可分为：上翼裂纹，下翼裂纹，主裂纹。

临近峰值荷载时，下裂纹下端扩展速度加快，迅速向试样底端加载点逼近，翼裂纹影响范围越来越大，进而主裂纹面在底端加载点附近产生，连通上、下裂纹后迅速向顶端加载点扩展，最终将整个球体劈裂。此过程中，主裂纹面在靠近上、下翼裂纹面时，发生局部弯曲，与翼裂纹面局部重合，并在试样断口上、下端形成明显凹凸弧状曲面，凹面部分光滑平整，凸面部分认为由于受到二次冲击破坏形成弧状波纹。

6 数值模拟分析

6.1 数值原理

本文不再对应力-应变理论赘述，对于应力强度因子计算采用 M 积分方法^[22-23]（交互式积分（interaction integral））。利用 M 积分可同时计算出各向同性和一般各向异性材料中的 3 种断裂模式的应力强度因子（ K_I 、 K_{II} 和 K_{III} ）：

$$K_I = \frac{\mu\sqrt{2\pi}(x_b - x_a)}{\sqrt{r_{a-b}}(2 - 2x)} \quad (4)$$

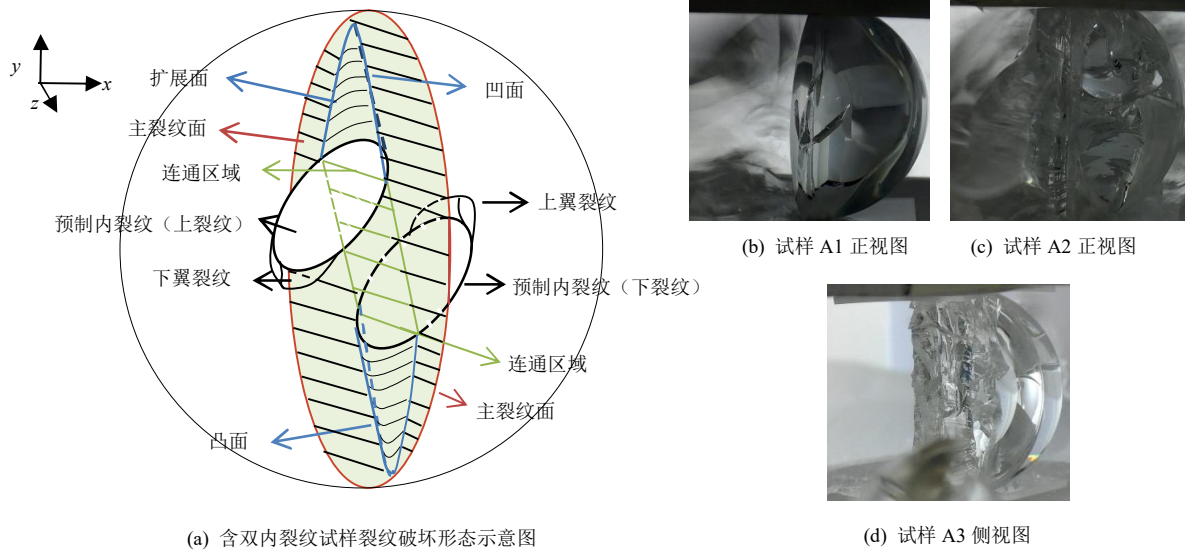


图 8 含双内裂纹试样破坏形态
Fig.8 Failure morphology of specimen with double embedded cracks

$$K_{II} = \frac{\mu\sqrt{2\pi}(y_b - y_a)}{\sqrt{r_{a-b}}(2 - 2y)} \quad (5)$$

$$K_{III} = \frac{\mu\sqrt{2\pi}(z_b - z_a)}{\sqrt{r_{a-b}}} \quad (6)$$

式中： μ 为剪切模量； r 为计算节点至裂纹尖端的距离； x_i 、 y_i 、 z_i 为相应节点 x 、 y 、 z 向的位移。

6.2 数值模型

建立含双内裂纹球体模型进行数值计算，整体网格与双内裂纹如图 9 所示。

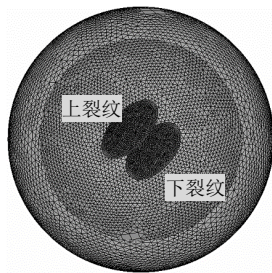


图 9 含双内裂纹球体模型网格图
Fig.9 Grid diagram of a spherical model with double embedded cracks

6.3 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 分析

对于双内裂纹，以上、下裂纹中的最大应力强度因子 $K_{I\max}$ 、 $K_{II\max}$ 、 $K_{III\max}$ 为基准，定义 $|K_i/K_{i\max}|$ 为相对应力强度因子，其中 $i = I, II, III$ 。绘制含双内裂纹试样的 I、II、III 型归一化 K 随裂纹相对周长变化的曲线如图 10 所示，规律如下：

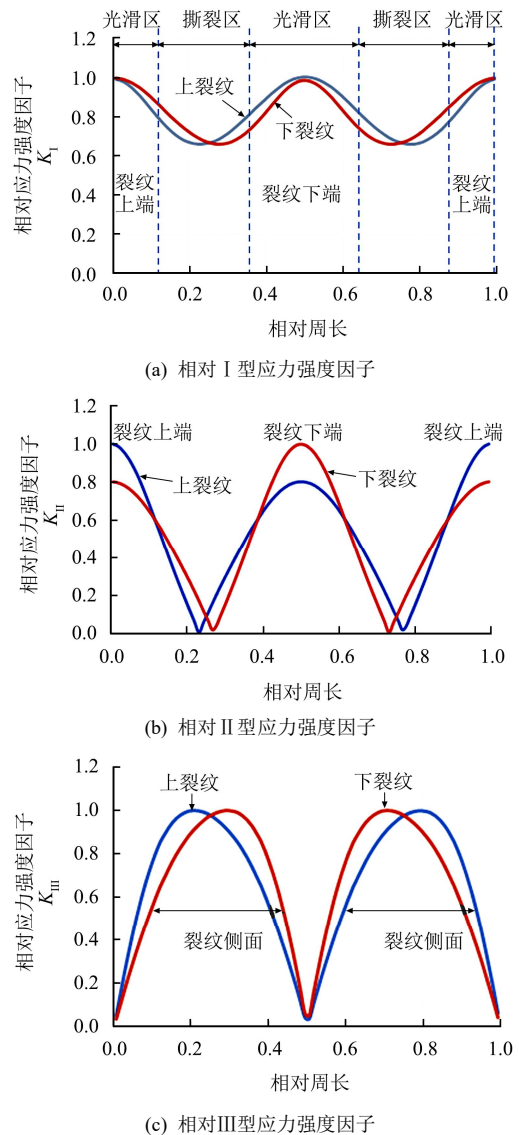


图 10 应力强度因子
Fig.10 Distribution of SIF

(1) 屏蔽作用

对于含双内裂纹试样: 上裂纹上端 K_{II} > 下裂纹上端 K_{II} , 上裂纹下端 K_{II} < 下裂纹下端 K_{II} , 这是由于上裂纹上端与下裂纹下端在 II 型场作用下, 扩展程度较大, 而上裂纹下端与下裂纹上端则相对扩展很小, 试验裂纹扩展形态相一致。

(2) 光滑区

光滑区的两裂纹上、下端 K_I , K_{II} 均达到最大, $K_{III} = 0$, 说明由于两裂纹之间对称的力作用, 使得在上裂纹上翼尖端与下裂纹下翼尖端同时存在张拉与错动, 说明光滑区主要由 I-II 型复合裂纹作用下产生。

(3) 撕裂区

光滑区, 即上、下裂纹的上下端 $K_{III} = 0$, 而上、下裂纹的撕裂区 K_{III} 达到最大, 同时在撕裂区 $K_{II} \neq 0$, 越靠近内裂纹两侧 K_{II} 越小, 在两侧为 0, 验证了试验中观察到的矛状裂纹形态为 I-II-III 型复合裂纹作用下产生。

7 结 论

(1) 球体双内裂纹在单轴压缩下之间发生屏蔽作用, 最终呈现双内裂纹的上裂纹上端与下裂纹下端较上裂纹下端与下裂纹上端扩展幅度大的反对称内裂纹扩展特征。主裂纹面穿过两预制内裂纹, 试样从中间劈裂。

(2) 球体内裂纹断口在翼型裂纹光滑区呈现 I-II 型裂纹断口特征, 翼型裂纹侧面呈现矛状 III 型裂纹特征。

(3) 基于 M 积分计算的 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 分析与基于断口特征的 I、II、III 型裂纹类型分析一致。

(4) 本文 3D-ILC 技术可用于球体内裂纹相互作用断裂试验研究, 球体试验与理论分析为脆性材料双内裂纹研究提供依据。

参 考 文 献

- [1] GRIFFITH A. A. The Phenomena of rupture and flow in solids[J]. *Philtransrsoca*, 1921, 221(2): 163—198.
- [2] XAVIER BRAJER, PASCAL FORQUIN, RENÉ GY, et al. The role of surface and volume defects in the fracture of glass under quasi-static and dynamic loadings[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, 316(1): 42—53.
- [3] SALMAN A D, GORHAM D A. The fracture of glass spheres[J]. *Powder Technology*, 2000, 107(1): 179—185.
- [4] SCHÖNERT K. Fracture at work[C]//Proceedings of 4th Tewksbury Symposium on Fracture. [S. l.]: University of Melbourne, 1979.
- [5] SHIPWAY P H, HUTCHINGS I M. Philosophical magazine A: physics of condensed matter, structure, defects and mechanical properties[J]. 1993, 67(6): 1389—1404. DOI: 10.1080/01418619308225362.
- [6] KIENZLER R, SCHMITT W. On single-particle comminution; numerical analysis of compressed spheres[J]. *Powder Technology*, 1990, 61(1): 29—38.
- [7] ZHU F, ZHAO J D. A peridynamic investigation on crushing of sand particles[J]. *Géotechnique*, 2019, 69(6): 526—540.
- [8] MA G, ZHOU W, ZHANG Y, et al. Fractal behavior and shape characteristics of fragments produced by the impact of quasi-brittle spheres[J]. *Powder Technology*, 2018(325): 498—509.
- [9] 陈兴, 马刚, 周伟, 等. 无序性对脆性材料冲击破碎的影响[J]. *物理学报*, 2018, 67(14): 219—228.
CHEN Xing, MA Gang, ZHOU Wei, et al. The impact of disorderliness on the impact fracture of brittle materials[J]. *Journal of Physics*, 2008, 67(14): 219—228.
- [10] 高玉臣, 朱蓓. 含微裂纹材料的损伤理论[J]. *力学学报*, 1987, 19(6): 541—549.
GAO Yu-chen, ZHU Wei. Damage theory of materials containing micro-cracks[J]. *Journal of Mechanics*, 1987, 19(6): 541—549.
- [11] 王海军, 张九丹, 任然, 等. 基于激光-介质损伤的三维深埋裂纹 3D-ILC 实现[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(12): 2345—2352.
WANG Hai-jun, ZHANG Jiu-dan, REN Ran, et al. Embedded cracks in brittle solids induced by laser-medium interaction(3D-ILC)[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(12): 2345—2352.
- [12] 王海军, 郁舒阳, 任然, 等. 基于 3D-ILC 含三维内裂纹孔口脆性固体断裂特性试验[J]. *岩土力学*, 2019, 40(6): 2200—2212.
WANG Hai-jun, YU Shu-yang, REN Ran, et al. Study on failure of brittle solid with circular hole and internal crack based on 3D-ILC[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(6): 2200—2212.
- [13] 王海军, 张九丹, 任然, 等. 基于 3D-ILC 含不同角度

- 内裂纹圆盘断裂特性试验[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1636—1644.
- WANG Hai-jun, ZHANG Jiu-dan, REN Ran, et al. Fracture characteristics of Brazilian disc with fully internal cracks based on 3D-ILC[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(9): 1636—1644.
- [14] 李世愚, 和泰名, 尹祥础. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- LI Shi-yu, HE Tai-ming, YIN Xiang-chu. Introduction to rock fracture mechanics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010.
- [15] LAWN B R, WIEDERHORN S M, ROBERTS D E. Effect of sliding friction forces on the strength of brittle materials[J]. **Journal of Materials science**, 1984, 19(8): 2561—2569.
- [16] OROWAN E. The fatigue of glass under stress[J]. **Nature**, 1994, 154: 341—343. DOI: 10.1038/154341a0.
- [17] KNAUSS W G. An observation of crack propagation in anti-plane shear[J]. **International Journal of Fracture Mechanics**, 1970, 6(2): 183—187.
- [18] 雷振坤. 结构分析数字光测力学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2012.
- LEI Zhen-kun. Structural analysis of digital optical mechanics[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2012.
- [19] 刘彩平, 段庆全. 脆性岩石中裂纹速度效应的试验研究[J]. 金属矿山, 2010(4): 37—40.
- LIU Cai-ping, DUAN Qing-quan. Experimental study on crack velocity effect in brittle rocks[J]. **Metal Mine**, 2010(4): 37—40.
- [20] 王海军, 郁舒阳, 汤子璇, 等. 基于 3D-ILC 含 60° 内裂纹脆性球体 I-II-III 型断裂研究[J/OL]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1—10. [2019-11-18]https://doi.org/10.16285/j.rsm.2019.1071.
- WANG Hai-jun, YU Shu-yang, TANG Zi-xuan, et al. Brittle fracture of spheric solid with a 60° internal crack using 3D-ILC[J/OL]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(5): 1—10. [2019-11-18]https://doi.org/10.16285/j.rsm.2019.1071.
- [21] SOMMER E. Formation of fracture ‘lances’ in glass[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 1969, 1(3): 539—546.
- [22] BANKS-SILLS L, WAWRZYNEK P A, CARTER B, et al. Methods for calculating stress intensity factors in anisotropic materials: part II—arbitrary geometry[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2007, 74(8): 1293—1307.
- [23] CHANG J H, CHIEN A J. Evaluation of M-integral for anisotropic elastic media with multiple defects[J]. **International Journal of Fracture**, 2002, 114(3): 267—28.

上接第 4730 页

- [17] 国际法制计量组织. OIML R121 饱和盐溶液标准相对湿度值[S]. 北京: 全国物理化学计量技术委员会, 2000.
- The International Organization of Legal Metrology. OIML R121 The scale of relative humidity (RH) of air certified against saturated salt solutions[S]. Beijing: the International Organization of Legul Metrology, 2000.
- [18] 孙文静, 孙德安. 非饱和土力学试验技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- SUN Wen-jing, SUN De-an. Experimental technology on unsaturated soil mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2018.
- [19] 孙文静, 孙德安, 刘仕卿, 等. 高吸力下高庙子钙基膨润土的土水-力学特性[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 346—353.
- SUN Wen-jing, SUN De-an, LIU Shi-qing, et al. Hydro-mechanical behaviour of GMZ Ca-bentonite at high suctions[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(2): 346—353.
- [20] YAGHOUBI P. Development of biochar-amended landfill cover for landfill gas mitigation[D]. Chicago: University of Illinois at Chicago, 2011.