

三维表面裂纹扩展特征的研究*

黄凯珠¹ 黄明利² 焦明若² 唐春安²(¹香港理工大学土木与结构工程系 香港) (²中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071) (³东北大学岩石破裂与失稳研究中心 沈阳 110006)

摘要 用含有预制半圆形三维表面裂纹的冷冻透明有机玻璃材料研究了裂纹的扩展机制, 并对裂纹扩展中的特征应力进行了分析, 同时, 考察了裂纹深度、长度和倾角等几何因素变化对裂纹扩展的影响。研究结果表明, 表面裂纹扩展受裂纹深度 d 与试样厚度 T 影响很大, 当 $d/T \geq 1/3$ 时, 表面裂纹扩展到接近试样端部并穿透到试样的背面, 当 $d/T < 1/3$ 时, 其裂纹扩展长度为预制裂纹直径的 0.5~1 倍时就不再扩展; 裂纹倾角和裂纹相对试样尺寸也影响裂纹扩展。

关键词 断裂力学, 三维表面裂纹, 有机玻璃透明材料, 裂纹扩展, 扩展特征

分类号 O 346.1, TU 458*.3

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2003)增 1-2145-04

CRACK PROPAGATION IN BRITTLE SOLID CONTAINING 3D SURFACE FRACTURE UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

Wong R H C¹, Huang M L², Jiao M R³, Tang C A³¹Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China²Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China³Center for Rockbursts and Induced Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110006 China

Abstract The purpose of this study is to investigate the effect of crack length, fracture angle and boundary effect on the mechanisms of propagation of a half-disk shaped 3-D surface crack under uniaxial compression. Transparency material of PMMA is used in this study. The results of this study can provide a better understanding on the instability of mine pillar.

Key words fracture mechanics, 3D surface crack, PMMA, crack propagation, propagation characteristics

1 前言

矿柱破坏问题的研究是采矿过程中重要的岩石力学问题。通常由于自然因素和人为因素作用, 在矿柱内部和表面都存在着不同深度和倾角的缺陷(如节理、裂纹和孔洞等)。这些裂纹在形态上类似于完全内置的三维(3D)裂纹和表面半穿透裂纹。矿柱的失稳破坏与其内部和表面裂纹的扩展和相互作用密切相关, 矿柱的破坏过程实质上是其内部裂纹在外载条件下扩展演化和贯通的过程。目前, 对矿

柱等构筑物在破坏时, 这些裂纹如何扩展和演化及其受哪些因素影响还不十分清楚。文[1~4]对 3D 内置裂纹扩展及其相互作用进行了系统的试验和理论研究, 他们使用了不同的透明材料, 并用不同的技术使内部产生原有裂纹, 来研究三维裂纹扩展与原有裂纹的结构之间的基本关系。文[1, 2]发现在 3D 内置裂纹模型中, 裂纹仅扩展至原有裂纹长度即停止, 即使载荷进一步增加, 裂纹也不会进一步扩展, 最终的失效在当载荷达到材料的峰值强度时以爆炸状破坏产生。关于半穿透表面裂纹, 在力学上可看做 3D 表面裂纹, 文[3, 4]为研究地震孕育即震源破

2003年3月31日收到初稿, 2003年5月9日收到修改稿。

* 香港理工大学研究基金资助项目(PolyU5049/01E)。

作者 黄凯珠 简介: 女, 现任香港理工大学土木与结构工程系副教授, 主要从事岩土工程方面的研究工作。

裂问题, 采用几种不同预制表面裂纹的材料进行了一些单轴压缩试验研究, 在试样中主要考虑了裂纹面摩擦性状、材料等影响, 但没有考虑裂纹扩展中的边界条件如裂纹切割深度、裂纹相对长度和倾角等的影响。

迄今为止, 有关三维破裂的研究多半是一些定性的结果^[5-7]。本文正是在这一背景下, 用含有预制半圆形表面三维裂纹的冷冻透明脆性有机玻璃材料, 研究了裂纹的扩展机制并对裂纹扩展中的特征应力进行了分析, 同时, 探讨了裂纹深度、长度和倾角等几何因素变化的影响。限于篇幅, 本文只给出单裂纹的情况。

2 试验模型设计装置和加载过程

本研究的主要目的是探讨裂纹切割深度、裂纹长度和相对加载轴方向倾角对表面切割的椭圆裂纹的裂纹扩展演化过程及其特征的影响, 同时, 对表面裂纹与穿透二维裂纹及内置三维裂纹之间的扩展特征差别进行了探讨。本文选择有机玻璃作为主要试验材料, 因为该材料非常透明, 便于观察裂纹的扩展过程。试验模型预制裂纹参数示意图见图 1, 共设计了 3 组模型: (1) 试样厚度变化模型, 共进行 4 个试样的试验, 试样长为 130 mm, 宽为 65 mm, 厚度分别为 12.5, 20, 25, 30 和 40 mm。裂纹为半圆形钱币状, 裂纹与试样表面的交线长度为 21.94 mm, 裂纹深度 $d = 8.25$ mm。为便于与文[5]的试验结果对比, 裂纹与加载轴方向夹角取 45° 。(2) 裂纹倾角变化模型, 先后用 2 批材料共进行了 2 组试验, 矩形方柱试样长为 130 mm, 宽为 65 mm, 厚为 30 mm。裂纹为半圆形钱币状, 1 组裂纹长 $2c = 21$ mm, 深度 $d = 8.2$ mm; 另 1 组裂纹长 $2c = 19$ mm, 深度 $d = 7.4$ mm。裂纹与加载轴方向夹角 α 为 $15^\circ \sim 60^\circ$ (15° 增量)和 $70^\circ \sim 80^\circ$ (5° 增量)。(3) 裂纹长度变化模型, 保持裂纹倾角 $\alpha = 70^\circ$ 和切割深度 $d = 7.4$ mm 等参数不变, 改变裂纹长度, 裂纹长度 $2c$ 为 20~50 mm (5 mm 增量)。

由于有机玻璃材料(PMMA)在常温时为弹塑性材料, 但在低温下表现为较好的脆性, 为使试验结果能模拟脆性岩石特征, 在加载前先进行冷冻处理, 即用颗粒状干冰将试样冷冻 24 h, 取出试样时试样温度达到 -72°C 。单轴加载试验是在 WF-5562s 型试验机上进行的, 在加载方向装置 2 个位移计测量。所有载荷和位移全部数据由连接在微机上的型

号为 KYOWAUCAM-10B 的数据接收仪接收处理。裂纹扩展演化过程用型号 TRV900E 的 SONY 数字摄像机记录。在初始加载时, 加载速率控制在 (70 kN/min)。当有裂纹萌生后, 为便于观察裂纹扩展过程, 将加载速率减为 (35 kN/min)。在试验机上进行单轴加载试验时, 为避免试样加载过程中温度波动太大, 加载时在试样周围用块状干冰将试样包围, 以保证试验结束时试样的温度下降不低于 -50°C 。

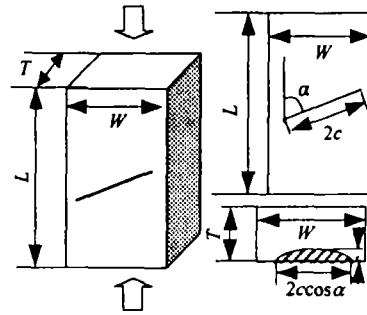


图 1 预制裂纹参数示意图

Fig.1 Layout of 3D surface crack

3 试验结果讨论

3.1 典型表面裂纹的扩展特征分析

本次试验进行了大量预制半圆形表面裂纹试样试验, 尽管由于原始裂纹不同, 几何形态会导致表面裂纹扩展各有所不同, 但这些表面裂纹在扩展中仍有许多共同的特征, 完全有别于预制内部裂纹的 3D 裂纹和穿透的 2D 裂纹扩展特征。图 2 给出了典型表面裂纹在单轴不同载荷时裂纹扩展过程(图 2 中 σ_p 为试样达到峰值强度时的应力), 同有关脆性材料中 2D 裂纹和 3D 内置钱币状裂纹^[2]相比具有如下特征: (1) 初始萌生裂纹一般出现于裂纹上下端点较近的地方, 但一般不会出现于正端点处, 裂纹呈一维线状, 类似于 2D 穿透裂纹萌生的翼形裂纹(图 2(a))。(2) 随着载荷增加, 在预制裂纹前缘的上下两端对称出现“花瓣状”裂纹(图 2(b), (c)), 开始时, 这种裂纹扩展方向以预制裂纹边缘中线为界分别向上下 2 个方向扩展, 随着载荷增加裂纹扩展最终偏向与裂纹面垂直方向。裂纹最终扩展长度约为 $2c$ 的一半时停止, 这与文[2]中 3D 裂纹类似。(3) 随着载荷的进一步增加, 端部萌发的翼形裂纹会快速扩展, 和穿透裂纹扩展相似, 最终和试样端部贯通(图 2(d)), 此后, 试样很快达到峰值强度, 这又很类似 2D 裂纹的扩展特征, 但和 2D 穿透裂纹不同的是 2D 裂纹所萌生的翼形裂纹面和试样表面相正

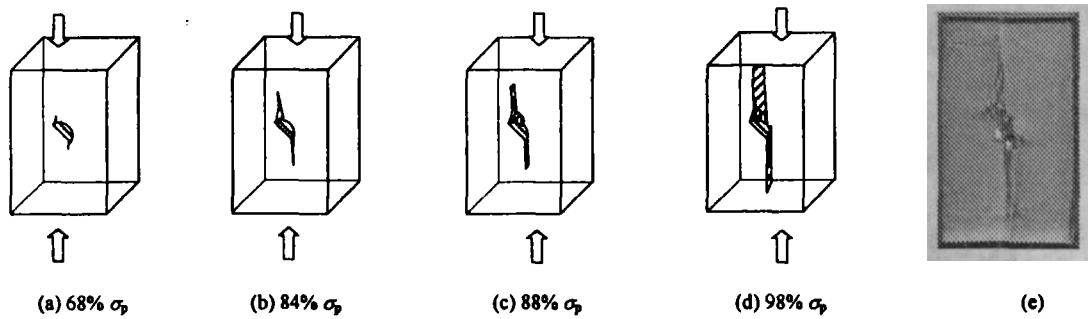


图 2 典型表面裂纹在单轴不同载荷时裂纹扩展过程
Fig.2 The propagation process of a 3-D surface crack

交，而表面裂纹萌生的翼形裂纹穿透到试样背面的裂纹面和试样表面成一锐角(图 2(e))。

3.2 影响表面裂纹扩展机制的因素分析

3.2.1 不同切割深度影响分析

文[2]所作的内置 3D 裂纹，其裂纹扩展长度为预制裂纹直径的 1~1.5 倍时，裂纹就不再扩展。而文[3, 4]的试验发现，萌生裂纹可以扩展到试样背面与其交线成相当规则的雁行排列，最后，所有次级破裂都趋向于与主加载轴方向平行。通过对预制不同切割深度的裂纹进行试验发现，表面裂纹扩展特征依赖于预制裂纹的切割深度 d 和试样厚度 T 的比值。

图 3(裂纹与加载轴方向夹角为 45° ，裂纹与试样表面的交线长度为 21.94 mm)给出了不同 d/T 值的裂纹最终扩展特征。从图 3 可以看出：(1) 当 $d/T \geq 1/3$ 时(图 3(b)~(d))，从最终扩展结果来看，表面裂纹的扩展和 2D 穿透裂纹(图 3(a))更为相似，其破坏形式为以翼形裂纹扩展到接近将试样劈裂并穿透到试样的背面；(2) 当 $d/T < 1/3$ 时，表面裂纹的扩展裂纹很难穿透试样扩展到背面(图 3(e), (f))，其裂纹扩展长度为预制裂纹直径的 0.5~1 倍时就不再扩展，扩展特征与文[2]所作的 3D 内置裂纹接近(图 3(g))。

为验证以上结论对 3D 内置裂纹的适用性，特制作内置 3D 裂纹 PMMA 试样，其中，3D 内置钱币状裂纹直径占试样宽度的 33%，相当于表面裂纹 $d/T = 1/3$ 情况。从其最终扩展结果可以看出(图 3(h))，萌生裂纹已扩展到接近试样端部。以上结论可以说明，3D 裂纹的萌生和扩展特征受裂纹相对试样尺寸影响很大。

3.2.2 裂纹与加载轴夹角影响分析

为研究裂纹不同倾角时扩展机制的影响，特先后作了 2 批试样，裂纹与加载轴方向夹角变化为

$15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 75^\circ$ 和 80° 。从试样典型试验结果来看，在裂纹角为 15° 和 30° 的试样中，在试样达到屈服时仍未观察到裂纹萌生和扩展。而在裂纹角为 45° 后，裂纹全部扩展，这与文[1~4]表面裂纹和 3D 内置裂纹扩展特征有所不同，具体来讲有以下特征：(1) 由于这组试样中 d/T 为 0.25~0.28，因而，在这些试样中都没有观察到有扩展裂纹贯穿到试样背面的现象(图 3(e))；(2) 裂纹与加载轴方向夹角大于或等于 60° 后(图 4)，扩展裂纹呈贝壳状从裂纹上部或下部向刻有裂纹的自由表面方向扩展，最终和表面贯通使得有半球状块体从表面崩落。在裂纹角为 45° 时则没有这一现象发生。这可能与裂纹倾角变大时，裂纹向自由表面的应力集中区扩大有关。

3.2.3 裂纹长度影响分析

由于冷冻的 PMMA 材料在与加载轴夹角较大时裂纹更易萌生，因此，试验时选择裂纹角为 70° 并保持不变，考察裂纹长度 $2c = 20, 25, 30, 35, 40, 45$ 和 50 mm 时对表面裂纹扩展的影响，典型试验结果如图 5。从图 5 所给出的不同长度裂纹扩展特征来看，这些裂纹仍然具有图 4 所示的大倾角裂纹扩展特征，即裂纹都向自由表面扩展并贯通，所不同的是，当裂纹长度 $2c$ 增加到 50 mm 时，同样出现贯通到试样背面的拉张裂纹，使试样纵向劈裂。

4 结 论

本文用含有预制 3D 表面裂纹的冷冻脆性有机玻璃(PMMA)材料，在单轴加载下，对 3D 裂纹扩展演化过程进行了观测，同时，对裂纹相对切割深度、裂纹倾角和裂纹长度等因素影响进行了研究。结果表明：(1) 当 $d/T \geq 1/3$ 时，表面裂纹的扩展和 2D 穿透裂纹相似，其破坏形式为以翼形裂纹扩展到接

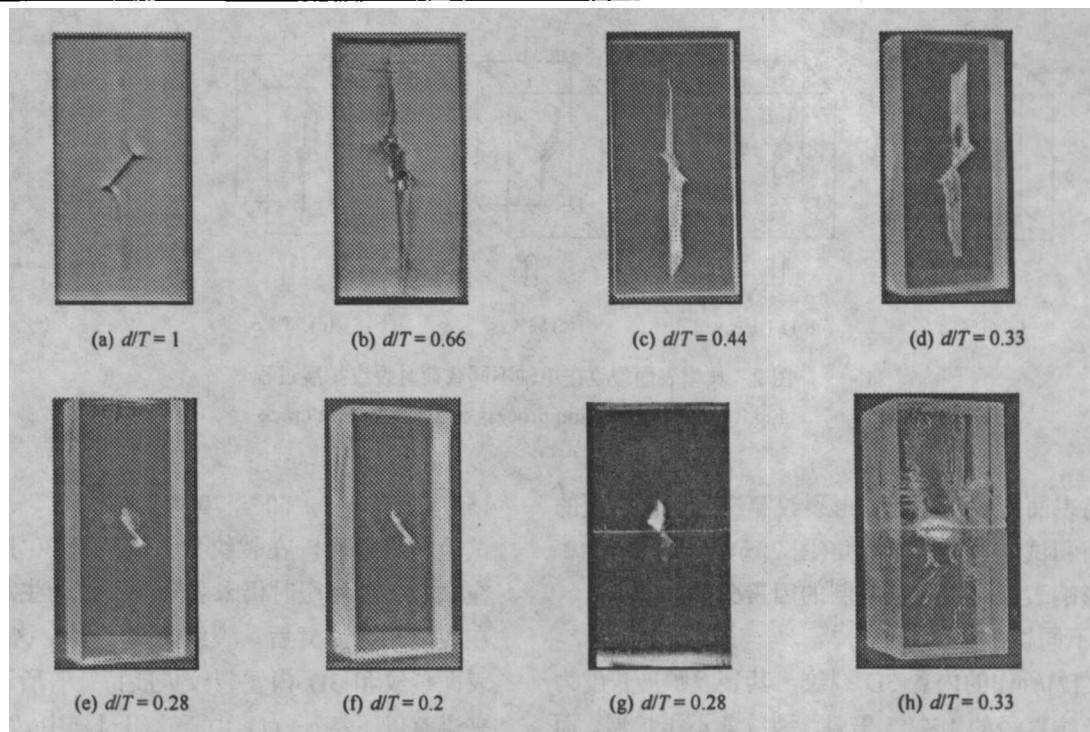


图 3 不同 d/T 值 3D 表面及内置裂纹最终扩展特征

Fig.3 Propagation of a 3-D surface crack with different ratio of d/T

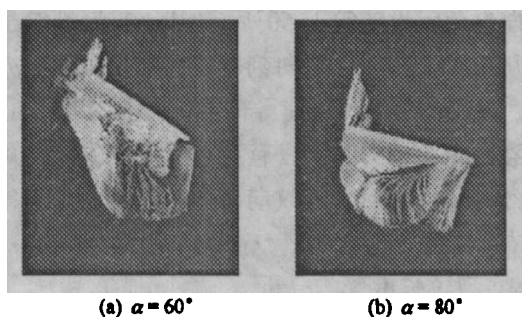


图 4 单轴加载下不同倾角裂纹扩展特征

Fig.4 Spalling failure mode under uniaxial loading with $\alpha > 45^\circ$

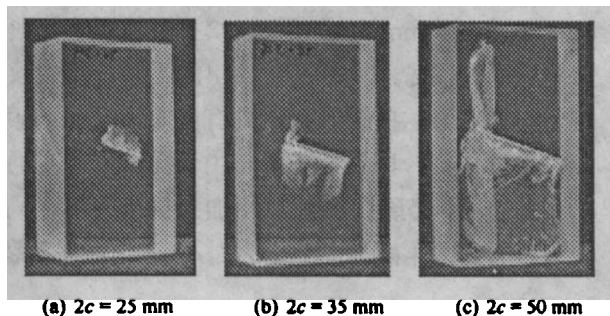


图 5 不同长度裂纹扩展特征($d/T = 0.25$)

Fig.5 Crack growth with different length ($d/T = 0.25$)

近将试样劈裂并穿透到试样的背面；当 $d/T < 1/3$ 时，其裂纹扩展长度为预制裂纹直径的 $0.5 \sim 1$ 倍时就不再扩展，扩展特征与 3D 内置裂纹更为接近。(2) 裂

纹倾角越大，裂纹同时萌生的面积越大，最后，呈半球形和界面贯通。(3) 裂纹相对试样尺寸越大，裂纹扩展受到的边界影响越大。

研究结果对于理解矿柱破坏机制及其稳定性评估无疑也是大有裨益的。

参考文献

- 1 Germanovich L N, Salganik R L, Dyskin A V, et al. Mechanisms of brittle fracture of rock with multiple pre-existing cracks in compression[J]. PAGEOPH, 1994, 143(1/2/3): 117~149
- 2 Dyskin A V, Germanovich L N, Jewell R J, et al. Study of 3D mechanisms of crack growth interaction in uniaxial compression[J]. ISRM News Journal, 1994, 2(1): 17~24
- 3 滕春凯, 尹祥础, 李世愚等. 非穿透裂纹平板试件三维破裂的试验研究[J]. 地球物理学报, 1987, 30(4): 371~378
- 4 李世愚, 滕春凯, 刘绮亮等. 三维破裂及其在地震和断层研究中的应用(综述)[J]. 地震地磁观测与研究, 1998, 19(1): 11~24
- 5 黄明利, 唐春安, 朱万成. 岩石破裂过程的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 468~471
- 6 傅宇方, 黄明利, 任凤玉等. 不同围压条件下孔壁周边裂纹演化的数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 577~583
- 7 黄明利, 唐春安. 非均匀因素对 I 型裂纹扩展、相互作用影响的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1111~1114