

三维裂纹布置角度对砂浆材料强度的影响

林春金, 朱维申, 李术才, 郭彦双, 温暖冬, 杨磊

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

摘 要: 利用伺服控制试验系统及声发射设备对含有单椭圆裂纹的非均质砂浆材料进行物理试验, 获得了单轴加载作用下不同布置角度的三维内部裂纹试样的全应力-应变曲线和声发射数据。找到了声发射数据与应力-应变曲线的对应关系。根据对应关系, 判断出试样的起裂应力及破坏应力。分析了裂纹布置角度对材料强度的影响, 分析表明: 裂纹与加载方向为 45° 夹角时最难破坏, 与加载方向成 60° 夹角时最容易破坏。此外, 裂纹尖端起裂应力为试样极限强度的 $86.07\% \sim 87.42\%$ 。

关 键 词: 非均质材料; 三维裂纹; 声发射; 材料强度; 裂纹扩展

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Influence of 3D-crack angle on strength of mortar ematerial

LIN Chun-jin, ZHU Wei-shen, LI Shu-cai, GUO Yan-shuang, WEN Nuan-dong, YANG Lei

(Research Center of Geotechnical and Structural Engineer, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: A series of experimental tests for heterogeneous brittle mortar material containing pre-existing internal crack were carried out. The complete stress-strain curves and acoustic emission data of the mortar material in uniaxial compression were obtained using acoustic emission equipment and serve-controlled test machine. Based on these data, the relation of complete stress-strain curves and acoustic emission data were searched. Then the influence of crack angle on the strength of mortar specimens were analysed judging the initiation stress and failure stress of mortar specimens. It is concluded that the strength of mortar specimens is the lowest at $\alpha = 60^\circ$ and the highest at $\alpha = 45^\circ$. In addition, the initiation stress on the tips of cracks is about $86.07\% \sim 87.42\%$ of the failure strength of the specimens.

Key words: heterogeneous materials; 3D-crack; acoustic emission; material strength; crack propagation

1 引 言

岩体是一种多裂隙体, 裂纹扩展和裂纹间的相互作用及其贯通破裂机制一直是断裂力学研究的重要课题。对于实际岩体来讲, 无论裂纹是赋存于岩体内部还是局部表面出露, 这些裂纹本质上都是三维的。长期以来, 为了避免三维裂纹研究中所出现的数学上的巨大困难, 大部分研究者都假设裂纹为二维形式, 在试验和理论上完成了大量的有关受压情况下, 二维裂纹的扩展、相互作用和贯通机制的研究工作^[1~7]。然而对于三维裂纹的研究将具有更加深远的学术意义和广泛的工程意义。

国内外许多学者在三维裂纹扩展及其导致岩石破坏方面做了大量的研究, Wong 采用 PMMA、大

理岩等材料研究了含张开型三维表面裂纹扩展规律^[8]。Adams、Sines、A.V. Dyskin 等人采用均质材料研究了预制币形裂纹的扩展情况, 并进行了初步的理论分析^[9~13]。但是真实岩石都是非均质的, 与均质材料的破坏有着很大的区别, 为了解非均质材料内置裂纹的扩展规律, 本文采用非均质的砂浆材料进行物理试验, 利用声发射技术跟踪裂纹开裂过程, 研究了不同角度布置的三维内置椭圆裂纹对砂浆材料强度的影响。

2 试验材料和试样准备

选择水泥、河砂作为主要原料的砂浆试验材料, 为了便于制作内置裂纹, 加入少量减水剂增加材料的流动性。材料的重量配比为: C42.5 硅酸盐水泥:

砂（粒径小于 5 mm）：减水剂：水 = 1：2.34：0.01：0.35。砂浆材料的物理力学参数见表 1。试验所选用的砂浆材料具有以下优点：

（1）力学性能稳定，不易受环境条件（温度、湿度等）的影响；

（2）便于试件的加工及裂纹制作；

（3）试验材料为非均质材料，脆性较高，压拉比达到 22，与岩石脆性相近。

（4）取材方便，价格便宜。

试样的长、宽、厚为 140 mm×70 mm×70 mm，试样的内部裂纹采用预埋 0.3 mm 厚的椭圆聚酯薄膜片形成，椭圆聚酯薄片长轴 $2a=30$ mm，短轴 $2b=15$ mm，裂纹长轴与加载方向夹角 α 分别为 30° ， 45° ， 60° ， 75° ，见图 1。椭圆聚酯薄片采用自己设计加工的小模具敲击制作。试样由可拆卸的钢模具浇注而成，浇注前用细线将预制椭圆聚酯片调整好角度，固定在模具上。试样在裂纹处可以形成光滑表面，用以模拟非摩擦型三维内置裂纹面。制作的整个过程在振动台上进行，以使试样密实。制作完成后放入养护箱养护 7 d，养护完成后拆模修整试样并编号。

表 1 砂浆材料物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical properties of mortar material

参数	σ_c / MPa	σ_t / MPa	E / GPa	V	K_I / MPa·m ^{1/2}
所用砂浆材料	50.26	2.19	22.09	0.142	0.581

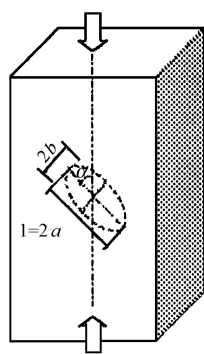


图 1 裂纹布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of crack disposal

3 试验装置

整个试验装置如图 2 所示，试验装置主要包括山东大学岩土与结构工程研究中心自行设计的全数字电液伺服控制刚性岩石三轴试验机和美国声发射仪。轴向荷载和位移采用 500 kN 的荷载传感器和 5 mm 位移传感器采集，侧向位移采用 2 个 4 mm 位

移传感器采集。声发射探头用胶带贴在试样两端采集声发射信号，为避胶带对试样端部的约束作用，尽可能采用短的胶带固定探头。试验开始前，将声发射计算机和压力试验机计算统一时间，便于通过时间将声发射数据和压力机数据对应起来。试验过程中采用位移加载，加载速度为 0.002 mm/s。压力试验机同时采集轴向位移、轴向荷载、侧向位移。

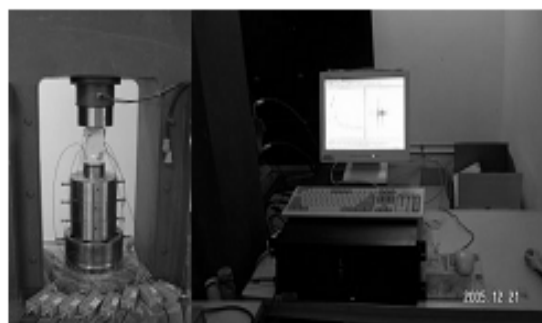


图 2 伺服试验机及声发射设备

Fig.2 Servo-controlled test machine and acoustic emission equipment

4 试验过程及结果讨论

4.1 裂纹起裂、扩展、破坏应力判断方法

国内外主要采用声发射技术研究不透明材料的破裂过程，本试验中裂纹扩展过程也主要通过声发射信号判断。试验开始前将声发射和试验机时间调为同一时刻，通过时间将采集完成的声发射数据和应力数据对应起来，见图 3。找到声发射信号对应的试样应力状态。利用图 3 中的曲线将试样破坏分为 4 个阶段。

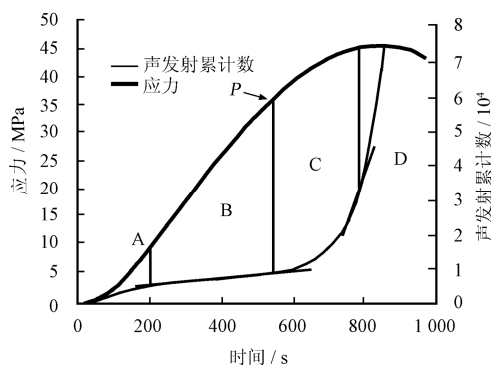


图 3 试样破坏 4 个阶段

Fig.3 Four moments of crack propagation

第 1 阶段为压密阶段（图中 A 区），试件内一些软弱介质、细小空洞被挤密，伴随有少量的声发射信号产生，声发射累计数有小段上升（A 区）；第 2 阶段（B 区）为弹性变形阶段，声发射累计数以稳定的速度上升，试件内基本无其他破坏；第 3 阶

段(C区)为裂纹扩展阶段,当应力施加到一定强度(图中P点)时,内置裂纹开始扩展,随后声发射累计曲线的斜率明显增大,直至应力接近试件的峰值强度;第4阶段(D区)为试件整体失稳阶段,此时预制裂纹以及扩展裂纹共同形成贯通整个试件的断层,试件开始整体失稳破坏,声发射累计曲线几乎呈现垂直上升的趋势,这是因为断层的错动使得声发射信息急剧增多。

4.2 试验结果对比

利用上述的试验装置和裂纹扩展判断方法,对砂浆材料的完整试样,裂纹布置角度 α 分别为 30° , 45° , 60° , 75° 的试样进行单轴加载试验。裂纹试样应力-时间曲线、声发射-时间曲线见图4。

试验结果表明:完整试样峰值强度为48.4 MPa,比采用直径50 mm的标准试样测试的抗

压强度略低。主要因为水泥砂浆试样变大,包含的微小缺陷增多,强度有所降低。完整试样在应力为48.28 MPa时,声发射曲线几乎垂直上升,试样发生整体剪切破坏,接近试样峰值强度,说明采用声发射曲线判断的试件破坏情况、寻找对应的破坏应力是合理可行的方法。

含不同角度 α 裂纹的试样起裂应力、峰值强度见表2。试样峰值强度由高到低依次为:完整试样, $\alpha=45^\circ$ 裂纹试样, $\alpha=30^\circ$ 裂纹试样, $\alpha=75^\circ$ 裂纹试样, $\alpha=60^\circ$ 裂纹试样。试样破坏初始阶段,试样表面看不到破坏痕迹,只能根据声发射曲线判断试样内部破坏的剧烈程度。试样应力-应变曲线达到峰值以后试样表面才开始出现裂痕,裂痕沿试样的对角线逐渐增大,最终发生沿裂纹面的整体剪切破坏,破坏型式见图5。

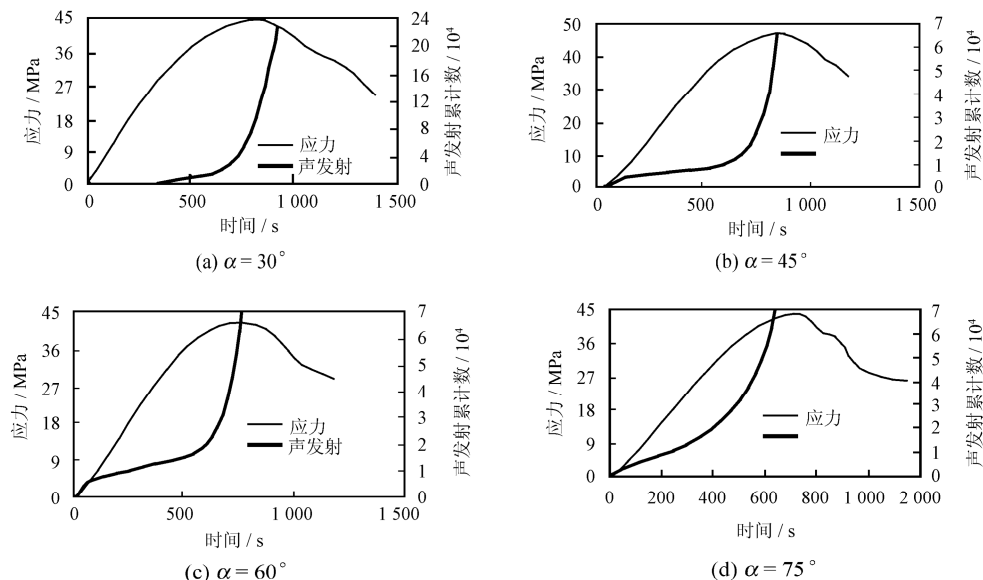


图4 含不同裂纹试样的应力时间和声发射时间曲线

Fig.4 Curves of stress-time and AE-time of specimens containing different cracks

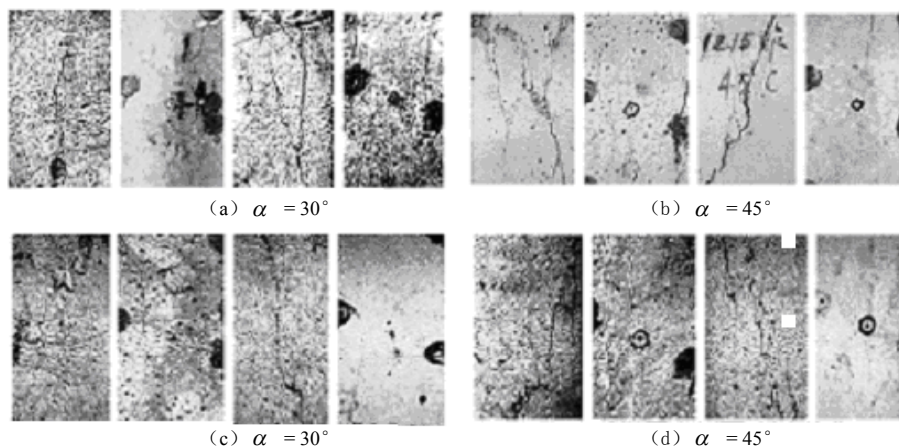


图5 裂纹角度 α 为 30° , 45° , 60° , 75° 的试样破坏型式

Fig.5 Crack coalescence pattern of specimens at crack angles of $\alpha=30^\circ$, 45° , 60° , 75°

表 2 不同试样起裂应力、峰值强度
Table 2 Initiation stresses and maximum stresses of different specimens

试样类型	起裂应力 / MPa	峰值强度 σ / MPa	起裂应力 / 峰值强度 / %
完整试件	43	48.44	88.77
$\alpha = 45^\circ$ 裂纹试样	40	46.47	86.07
$\alpha = 30^\circ$ 裂纹试样	39	44.61	87.42
$\alpha = 75^\circ$ 裂纹试样	38.22	43.81	87.24
$\alpha = 60^\circ$ 裂纹试样	37.26	42.63	87.40

为了更直观地比较不同角度布置的裂纹对砂浆材料强度的影响,将裂纹不同角度布置的试样应力-应变曲线,轴向应力-横向应变曲线放在同一坐标系下进行比较,见图 6。试样起裂应力、峰值强度对应的轴向应变和横向应变见表 3、表 4。

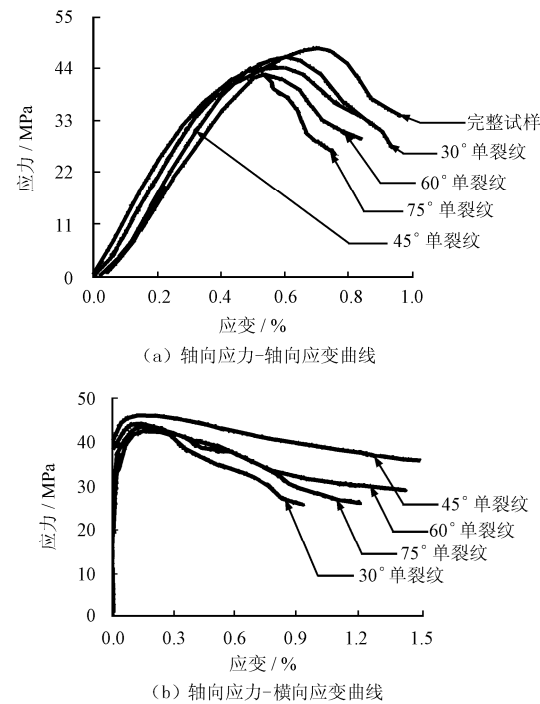


图 6 不同试样轴向应力-轴向应变、
轴向应力-横向应变曲线

Fig.6 Curves of axial stress-axial strain and axial stress-side direction strain of different specimens

表 3 裂纹角度 α 不同的试样不同阶段轴向应变
Table 3 Axial strain of specimens containing different angles cracks at different moments

试样类型	起裂时轴向应变 / 10^{-3}	整体破坏时 轴向应变 / 10^{-3}	峰值强度对应 轴向应变 / 10^{-3}
完整试件	0.43	0.65	0.55
$\alpha = 45^\circ$ 裂纹试样	0.40	0.62	0.52
$\alpha = 30^\circ$ 裂纹试样	0.39	0.60	0.51
$\alpha = 75^\circ$ 裂纹试样	0.38	0.58	0.50
$\alpha = 60^\circ$ 裂纹试样	0.37	0.56	0.49

$\alpha = 45^\circ$	4.23	5.48	5.99
$\alpha = 30^\circ$	3.81	5.34	5.66
$\alpha = 75^\circ$	3.76	4.99	5.21
$\alpha = 60^\circ$	3.72	4.94	5.17

表 4 裂纹角度 α 不同的试样不同阶段的横向应变
Table 4 Side direction strain of specimens containing different angles cracks at different moments

试样	起裂时横向应变 / 10^{-4}	整体破坏时横向应变 / 10^{-3}	峰值强度对应 横向应变 / 10^{-3}
$\alpha = 45^\circ$	1.71	0.784	1.57
$\alpha = 30^\circ$	3.17	0.767	1.61
$\alpha = 75^\circ$	4.20	1.54	1.83
$\alpha = 60^\circ$	5.28	1.56	1.91

从图 6 可以看出:裂纹的布置角度对试样的起裂应力、峰值强度有较大影响。试样的峰值强度越高,其起裂应力、后期强度越高,破坏时横向应变越小。同时,内置裂纹缺陷的存在使砂浆材料起裂破坏应力降低,含有裂纹的试样起裂应力为峰值强度的 86.07 %~87.42 %,对实际工程中根据起裂应力判断破坏强度有一定的参考意义。

5 结 论

(1) 采用聚酯椭圆薄片模拟非摩擦型裂纹,通过细线精确定位裂纹,成功制作了含有不同角度布置裂纹的砂浆试样。通过统一声发射设备和伺服压力试验机试验时间,找到了声发射数据对应的应力应变数据,较准确地判断了裂纹起裂应力,破坏应力。

(2) 裂纹布置角度 α 对材料的强度有很大影响。试样破坏应力由高到低依次为: $\alpha = 45^\circ$ 裂纹试样, $\alpha = 30^\circ$ 裂纹试样, $\alpha = 75^\circ$ 裂纹试样, $\alpha = 60^\circ$ 裂纹试样,并且含有裂纹的试样起裂应力为峰值强度的 86.07 %~87.42 %,对实际工程中根据起裂应力判断破坏强度有一定的参考意义。

参 考 文 献

[1] 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) : 355—360.
ZHU Wei-shen , CHEN Wei-zhong , SHEN Jin. Simulation experiment and fracture mechanism study on propagation of echelon pattern cracks[J]. ACTA Mechanica Sinica, 1998, 19 (4) : 355—360.
[2] Bobet A, Einstein H H. Fracture coalescence in rock—type materials under uniaxial and biaxial compression[J].

- Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 1998, 35(7): 863—888.
- [3] N G W Cook. The failure of rock[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 1965, 2: 389—403.
- [4] C H Scholz. Experimental study of the fracturing process in brittle rock[J]. **J. Geophys. Res.**, 1968,74(4): 1 447—1 454.
- [5] Tang C A, Lin P, Wong RHC, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws. II. Numerical approach[J]. **Int. J. Rock Mech. Min Sci**, 2001, 38(7): 925—939.
- [6] WONG RHC, LAU KW, Lin P. A numerical and experimental study of the effects of non-persistent joints on slope stability[A]. **Symposium on Slope Hazards and Their Prevention**[C]. Hong Kong: [s.n.], 2000.
- [7] Wong RHC, Lin P, Chau KT, et al. The effects of confining compression on fracture coalescence in rock-like material[J]. **Key Eng. Mater.**, 2000, 183—187: 857—862.
- [8] R H C. Wong, C .M. Law, K T. Chau, et al. Crack propagation from 3-D surface fractures in PMMA and marble specimens under uniaxial compression[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci**, 2004, (3): 1—6.
- [9] 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: 2 115—2 136.
- [10] Adams M, Sines G. Crack extension from flaws in brittle material subjected to compression[J]. **Tectonophysics**, 1978, 49: 97—118.
- [11] A V Dyskin, Leonid N Germanovichb, Konstantin B Ustinov A 3-D model of wing crack growth and interaction[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 1999,63: 81—110.
- [12] E Sahouryeh, A V Dyskin, L N Germanovich. Crack growth under biaxial compression[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2002, 69: 2 187—2 198.
- [13] L N Germanovich, A V Dyskin. Fracture mechanisms and instability of openings in compression International[J]. **Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37: 263—284.