

# 预制表面裂隙砂岩的动态力学特性及破坏模式

吴浩, 赵国彦, 梁伟章, 王恩杰

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙, 410083)

**摘要:** 为了研究轴向表面裂隙形态对岩石动态力学特性及破坏模式的影响, 将直径×高度为 50 mm×50 mm 的圆柱形黄砂岩分别加工成裂隙深度为 5, 10 和 15 mm 及裂隙数量为 1, 2, 3 和 4 条的不同类别试样, 采用改进的分离式霍普金森压杆实验系统对其进行动静组合加载实验, 并借助高速摄像机观察裂纹扩展及动态破坏过程。研究表明: 裂隙岩样的动态抗压强度、变形模量和峰值应变随裂隙数量和深度增大而先增大后减小; 裂隙岩样变形由裂隙压密闭合阶段、弹性阶段、非线性塑性变形阶段和峰后阶段组成, 呈现显著的塑性特征; 裂隙岩样的破坏模式比较复杂, 主要有剥落破坏、拉剪破坏、剥落贯通破坏和拉伸贯通破坏 4 种; 随着裂隙深度增大, 试样能量吸收率和能耗密度先减小后增大; 与其他含不同裂隙数量的岩样相比, 裂隙数量为 2 时岩样能量吸收率和能耗密度较小, 表明该类试样的破碎块度较大, 这与采用分形理论描述的岩石破坏特征基本相符。

**关键词:** 岩石动力学; 动静组合加载; 分离式霍普金森压杆; 裂隙; 破坏模式; 能量耗散; 分形理论  
**中图分类号:** TU458      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-7207(2019)02-0350-10

## Dynamic mechanical characteristics and failure modes of sandstone with artificial surface cracks

WU Hao, ZHAO Guoyan, LIANG Weizhang, WANG Enjie

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** To study the effects of axial surface cracks on rock dynamic mechanical properties and failure modes, a series of cylindrical yellow sandstones with a diameter of 50 mm and a height of 50 mm were processed into different types of specimens with cracks of 5, 10 and 15 mm in depth as well as 1, 2, 3 and 4 in quantity. The improved split Hopkinson pressure bar (SHPB) testing system was used to carry out the impact loading test under coupled static-dynamic loads. Crack propagation and the dynamic failure process were also monitored by a high speed camera. The results show that dynamic compressive strength, deformation modulus and peak strain of specimens increase firstly and then decrease with the increase of crack number and crack depth. The deformation process of fractured specimens can be sub-divided into four stages: pore compaction-induced closure, elastic stage, non-linear plastic deformation stage and post-peak stage, showing significant plastic properties. There are four types of failure modes for fractured specimens, namely, spalling failure, tensile-shear failure, spalling coalescence failure and tensile coalescence failure. With the increase of crack depth, the energy absorption rate and energy density of the samples decrease firstly and then increase. The energy absorption rate and energy density of fractured specimens containing 2 cracks are the minimum among all specimens. This indicates that the fragmentation of this kind of sample is larger, which basically agrees with the failure characteristics described by the fractal theory.

收稿日期: 2018-02-23; 修回日期: 2018-05-04

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51774321); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018zzts215) (Project(51774321) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2018zzts215) supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities)

通信作者: 赵国彦, 博士, 教授, 从事采矿与岩石力学等研究; E-mail: gy.zhao@263.net

**Key words:** rock dynamics; coupled static-dynamic loads; split Hopkinson pressure bar; crack; failure mode; energy dissipation; fractal theory

受地质作用影响,岩体内部往往产生许多裂隙和孔洞等缺陷,缺陷的存在弱化了岩石的物理力学性能,且缺陷尖端受应力集中作用极易起裂造成岩体失稳破坏。岩体发生变形破坏的实质是内部裂纹萌生、扩展和相互贯通的过程,由此可见,研究裂隙(节理)岩体的力学特性和破裂演化机制至关重要。BOMBOLAKIS<sup>[1]</sup>通过单轴压缩下含单节理树脂材料的光弹实验发现裂隙尖端拉伸翼裂纹的存在;POSTON等<sup>[2]</sup>采用 Griffith 能量准则研究了含裂隙类岩石材料在压剪作用下的断裂机理,揭示了裂纹扩展方向和裂隙走向的关系;NAMAT-NASSER等<sup>[3]</sup>认为裂隙长度是决定类岩石材料破坏模式的重要参数之一;WONG等<sup>[4]</sup>给出单轴压缩下含雁形裂纹类岩石材料中岩桥破坏的3种形式,即拉剪破裂、剪切破裂和翼裂纹拉伸破裂,这与LEE等<sup>[5]</sup>采用近场动力学软件模拟的结果一致;BOET等<sup>[6]</sup>也对含雁形裂纹的石膏材料进行单轴和双轴压缩实验,发现随着围压增大,裂隙尖端产生的翼裂纹转向于裂隙中部萌生直至消失;黄明利等<sup>[7]</sup>对含预制表面双裂隙的透明有机玻璃(PMMA)材料进行单轴压缩实验,分析了裂隙深度和几何分布对三维表面裂纹扩展和贯通机制的影响。此外,WONG等<sup>[8]</sup>还研究含3个平行节理的类型岩石材料的破坏模式,发现最终只有2个节理产生贯通,破坏模式与节理排列形式和节理面的摩擦因数有关。在类岩石材料的研究基础上,FUJII等<sup>[9]</sup>对侧向含不同倾角裂隙的块状砂岩进行单轴压缩实验,发现除在裂隙尖端压应力区产生竖直向上的剪切主裂纹外,在裂隙尖端拉应力区还产生一个与主裂纹贯通的微小拉伸裂纹,但没有得出裂纹起裂应力和裂隙倾角的相关关系;WONG等<sup>[10]</sup>研究了含预制单节理 Carrara 大理岩在单轴压缩下的破裂特征,并基于裂纹扩展路径和起裂机理将破坏模式分为7类即3种拉伸断裂、3种剪切裂纹和1种拉剪混合断裂;LI等<sup>[11]</sup>分析了单轴压缩下含预制裂隙-孔洞缺陷板状大理岩的裂纹扩展和贯通机制,发现裂隙尖端存在拉伸翼裂纹和次生剪切裂纹,并根据声发射特征将破裂全过程分为弹性阶段、裂纹萌生阶段和失稳阶段。另外,YANG等<sup>[12-13]</sup>还探讨了单轴和常规三轴压缩条件下含非共面双裂隙圆柱形大理岩试样的力学特性和三维裂纹演化规律。在静载荷研究的基础上,人们还对动载条件下裂隙岩石的力学

响应进行了初步探索。袁林等<sup>[14]</sup>采用 RFPA2D 模拟冲击载荷下含单边双裂隙脆性板状材料中 II 型裂纹的动态扩展过程,分析了材料属性、均质度、入射应力脉冲幅值和历时对裂纹演化机制的影响;岳中文等<sup>[15]</sup>采用落锤对含裂纹 PMMA 材料进行三点弯曲冲击实验,发现随着裂纹倾角增大,扩展速度随之增大,破裂类型由 I 型裂纹变为 I-II 复合型裂纹;宋义敏等<sup>[16]</sup>基于可调速落锤冲击试验机加载装置,采用数字散斑相关方法观察花岗岩 I 型裂纹的动态断裂过程,发现当裂纹张开角为  $0.1^\circ$  时,裂纹扩展速度随着冲击速度增大而增大;王卫华等<sup>[17]</sup>对含贯穿单裂隙的水泥砂浆圆柱体进行分离式霍普金森压杆(SHPB)冲击实验,探索裂隙倾角对其动力学特性的影响,发现动态抗压强度随裂隙倾角增大呈先减小后增大的变化趋势;LI等<sup>[18]</sup>也采用 SHPB 对含单裂隙大理岩进行冲击实验,认为裂隙岩体的动态破坏模式属于剪切破坏;李地元等<sup>[19]</sup>同样采用 SHPB 研究含不同倾角端部裂隙对大理岩动力学特性及破裂特征的影响,发现岩石动力学参数随着裂隙倾角的增大而先减小后增大,破坏模式和裂隙倾角有关。除此之外,还有一些学者采用实验和数值模拟手段对含裂隙巴西圆盘试样的动态劈裂特性进行研究,探索裂隙倾角对动态断裂韧度和断裂机理的影响<sup>[20-22]</sup>。矿山中岩体除了受地应力作用外,还受爆破、机械切削冲击、落矿和矿震的动力强扰动作用,岩体的受力形式属于动静组合加载作用<sup>[23-24]</sup>,因此,仅考虑单一静载和动载的力学环境的研究并不能很好地反映工程实际。考虑到目前关于裂隙岩石在动静组合加载下力学行为的研究较少,而针对岩石裂隙方向与动静加载方向平行的情况更是鲜有报道<sup>[25]</sup>,为此,本文作者利用 SHPB 实验装置对预静载下含轴向表面裂隙的柱状砂岩进行冲击实验,借助高速摄像机分析裂隙条数和深度对岩石动力学特性和破裂机制的影响。

## 1 预静载下 SHPB 冲击试验

### 1.1 试样制备及物理力学参数

本文以完整性和均质性较好的山东黄砂岩为研究对象,采用专业切磨机进行加工。按照国际岩石动力学委员会的建议规范,试样直径和高度均为 50 mm,两端面的不平行度和不垂直度均小于 0.02 mm。室内

测得砂岩参数(取平均值)如下: 密度为  $2.24 \text{ g/cm}^3$ , 纵波波速为  $1780 \text{ m/s}$ , 单轴抗压强度为  $68 \text{ MPa}$ , 抗拉强度为  $4 \text{ MPa}$ , 弹性模量为  $8 \text{ GPa}$ , 泊松比为  $0.22$ , 内聚力和内摩擦角分别为  $7.68 \text{ MPa}$  和  $31^\circ$ 。试样分为完整试样和表面预制裂隙试样 2 类。裂隙从试样母线开口往径向方向延展, 裂隙宽度为  $3 \text{ mm}$ , 深度分别为  $5, 10$  和  $15 \text{ mm}$  共 3 种情况, 每种深度裂隙岩样的裂隙数量又包括 1, 2, 3 和 4 条共 4 种情况。多裂隙沿试样轴线对称分布, 2, 3 和 4 条裂隙间的水平夹角分别为  $180^\circ, 120^\circ$  和  $90^\circ$ 。本次冲击实验共设计 13 组, 其中完整试样 1 组, 裂隙试样 12 组, 每组实验重复 3 次, 制备的含表面裂隙的砂岩试样见图 1。



图 1 含表面裂隙砂岩试样

Fig. 1 Sandstone specimens with surface cracks

## 1.2 试验装置及原理

采用改进的杆径为  $50 \text{ mm}$  的 SHPB 装置进行动静组合冲击试验, 该改进装置中设计的纺锤形冲头产生的半周期正弦加载波消除了传统圆柱形冲头产生的矩形波中的波形畸变和 Pochhammer-Chree 振荡, 能够实现近似恒定应变率加载。实验系统由纺锤形冲头、入射杆(长度为  $2.0 \text{ m}$ )、透射杆(长度为  $1.5 \text{ m}$ )、缓冲杆(长度为  $0.5 \text{ m}$ )、CS-1D 动态应变仪、DL-750 示波器和 Fastcam Sa1.1 高速摄像仪及轴压加载装置等组成。杆件材质为  $40\text{Cr}$  合金, 弹性极限达  $800 \text{ MPa}$ , 纵波波速为  $5410 \text{ m/s}$ , 密度为  $7.81 \text{ g/cm}^3$ 。预加的静态轴压采用手动加压泵进行加卸载。动静组合加载实验系统示意图见图 2。

试验中, 借助轴压装置先手动预加轴压静载, 然后打开激发装置组合开关完成氮气的充-放过程, 高压氮气驱动的冲头撞击入射杆即产生具有较长上升段脉冲的入射应力波, 传播到试样 2 个界面后分别在入射杆和透射杆中产生反射应力波和透射应力波。借助应变片监测到各应力波的电压信号, 根据应力波理论可计算试样的动态应力、应变及应变率<sup>[26]</sup>。

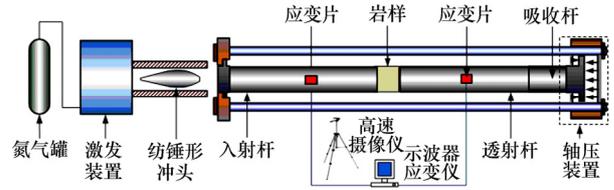


图 2 动静组合加载实验系统示意图

Fig. 2 Diagram of experimental system for coupled static-dynamic loads

$$\sigma_S(t) = [\sigma_I(t) - \sigma_R(t) + \sigma_T(t)]A/(2A_S) \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_S(t) = \frac{C}{El} [\sigma_R(t) + \sigma_T(t) - \sigma_I(t)] \quad (2)$$

$$\varepsilon_S(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_S(t) dt \quad (3)$$

根据能量守恒定律可以得到杆件的入射能、反射能和透射能间的能量演化关系, 其计算公式分别为

$$W_I = \frac{AC}{E} \int_0^t \sigma_I^2(t) dt \quad (4)$$

$$W_R = \frac{AC}{E} \int_0^t \sigma_R^2(t) dt \quad (5)$$

$$W_T = \frac{AC}{E} \int_0^t \sigma_T^2(t) dt \quad (6)$$

$$W_S = W_I - W_R - W_T \quad (7)$$

$$\rho_W = W_S / V_S \quad (8)$$

式中:  $\sigma_I(t)$ ,  $\sigma_R(t)$  和  $\sigma_T(t)$  分别为  $t$  时刻试样入射应力、反射应力和透射应力;  $\sigma_S(t)$ ,  $\varepsilon_S(t)$  和  $\dot{\varepsilon}_S(t)$  分别为  $t$  时刻试样动态应力、应变及应变率;  $A$ ,  $E$  和  $C$  分别为弹性杆截面积、弹性模量和波速;  $l$ ,  $A_S$ ,  $\rho_W$  和  $V_S$  分别为试样的长度、截面积、能耗密度和体积;  $W_I$ ,  $W_R$ ,  $W_T$  和  $W_S$  为杆系的入射能、反射能、透射能和耗散能。

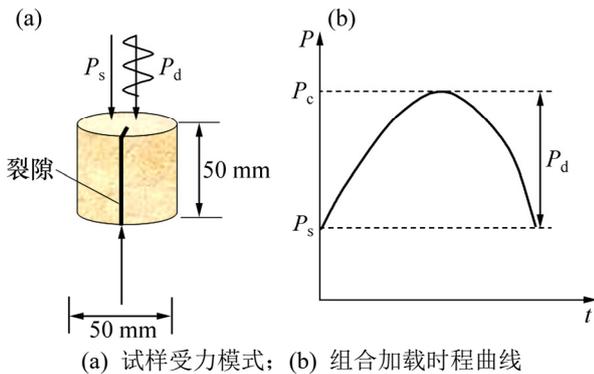
## 1.3 试验方案及结果

本文主要研究动静组合加载下表面裂隙深度及数量对砂岩力学特性和破坏模式的影响, 并与完整试样对比分析。冲击气压统一设为  $0.6 \text{ MPa}$ , 保证入射能近似相等; 轴压定为  $3 \text{ MPa}$ , 保证试样夹持完好, 以考察裂隙岩样的动载响应和破裂特征。试样加载模型示意图见图 3(其中,  $P_s$  为一维静载,  $P_d$  为动载,  $P_c$  为组合加载,  $P_c = P_s + P_d$ )。高速摄像仪帧频率设为  $6.25$  万帧, 即每  $16 \mu\text{s}$  拍摄 1 次。

以试样 0-0-1 为例(其中, 数字 0, 0 和 1 分别代表试样裂隙数量、裂隙深度和试样序号), 动载下试样的冲击波时程曲线见图 4(a); 经过信号处理可得应力波时程曲线, 见图 4(b)。由图 4(b)可知: 透射波和入射波与反射波的叠加波基本重合, 尤其是峰前曲线。由

由此可见: 试样在变形过程中满足应力平衡条件的假设, 改进的 SHPB 装置符合一维应力波传递特性, 可以有效消除波形弥散和惯性效应。

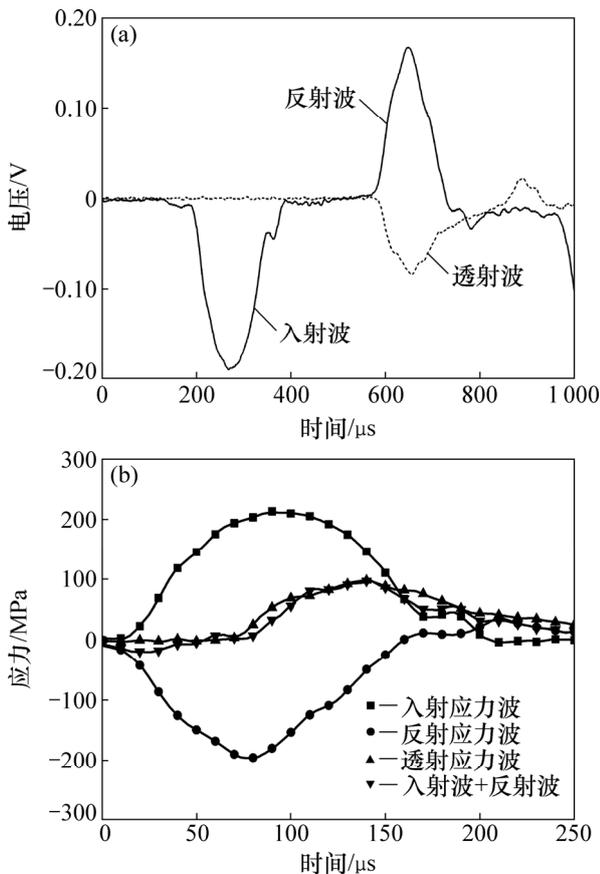
对各组试样应变电压信号进行处理, 代入式(1)~(8)可得试样的各项力学参数和能量演化关系。本文选取其中有代表性的试样进行分析, 裂隙试样冲击实验结果见表1。



(a) 试样受力模式; (b) 组合加载时程曲线

图3 试样加载模型示意图

Fig. 3 Diagram of specimens loading model



(a) 冲击波时程曲线; (b) 应力波时程曲线

图4 试样0-0-1冲击波及应力波时程曲线

Fig. 4 Time history curves of shock wave and stress wave of specimen 0-0-1

表1 裂隙试样物理参数及冲击实验结果

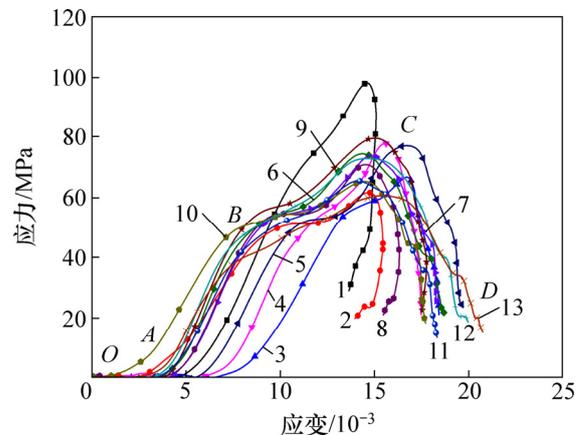
Table 1 Physical parameters and impact test results of fractured specimens

试样编号	直径/mm	高度/mm	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	纵波速度/(m·s <sup>-1</sup> )	动态抗压强度/MPa	应变率/s <sup>-1</sup>
0-0-1	49.10	50.90	2 228	1 708	101.43	104.22
1-5-3	48.80	50.20	2 323	1 969	62.52	110.15
1-10-1	48.80	51.00	2 223	1 775	67.18	103.84
1-15-2	49.20	50.50	2 215	1 743	78.31	103.84
2-5-1	49.00	50.40	2 210	1 708	74.56	108.85
2-10-2	48.60	50.20	2 204	1 585	77.74	121.09
2-15-1	49.00	50.50	2 219	1 641	74.25	112.14
3-5-1	48.90	50.60	2 211	1 932	71.31	116.56
3-10-1	48.60	51.20	2 238	1 996	79.71	122.26
3-15-3	48.50	50.90	2 325	1 828	66.18	116.82
4-5-1	49.00	50.80	2 233	1 651	66.37	118.62
4-10-2	48.90	50.70	2 211	1 881	73.54	124.77
4-15-2	48.90	50.30	2 211	1 890	61.10	122.35

## 2 裂隙岩石动力学特性

### 2.1 岩石动态抗压强度变化规律

图5所示为试样动态应力-应变曲线。由图5可知: 裂隙对岩石动态抗压强度具有显著的劣化效应, 组合加载下完整岩样(0-0-1)的动态抗压强度远远大于完整岩石的静载单轴抗压强度, 动态强度增长因子(即动态抗压强度与静态抗压强度的比值)由完整岩石时

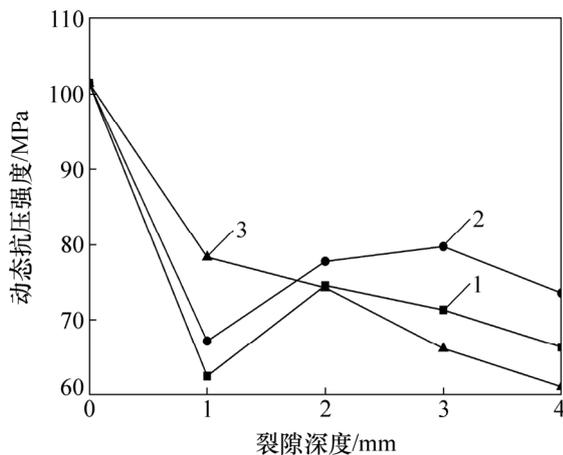


试样编号: 1—0-0-1; 2—1-5-3; 3—1-10-1; 4—1-15-2; 5—2-5-1; 6—2-10-2; 7—2-15-1; 8—3-5-1; 9—3-10-1; 10—3-15-3; 11—4-5-1; 12—4-10-2; 13—4-15-2。

图5 试样动态应力-应变曲线

Fig. 5 Dynamic stress-strain curves of specimens

的 1.49 降低到裂隙数量为 4、深度为 15 mm 时的 0.90。作用机制分析如下：当裂隙数量为 1 条时，随着裂隙深度由 5 mm 增大到 15 mm，受单裂隙剥落破坏厚度渐增影响，岩石动态抗压强度由 62.52 MPa 逐渐增大到 78.31 MPa；当裂隙数量为 2~4 条时，岩石呈现多种破坏类型；随着裂隙深度增大，岩石动态抗压强度先增大后减小；当裂隙深度为 10 mm、裂隙数量为 3 条时试样强度最大，达 79.71 MPa；当裂隙深度分别为 5 mm 和 10 mm 时，随着裂隙数量增大，岩石破坏特征由“自由”剥落向“限制性”剥落及裂隙贯通破坏转变，故试样动态抗压强度基本上呈先增大后减小的抛物线变化趋势；当裂隙深度为 15 mm 时，多裂隙试样破坏主要由裂隙贯通导致的岩桥破坏引起，因此，岩石动态抗压强度随裂隙数量增大近似呈线性减小，最小为 61.10 MPa，此时，裂隙数量为 4 条。裂隙对试样动态抗压强度的影响见图 6。含不同裂隙形态试样的动态抗压强度呈现上述变化规律与其自身破坏模式有关。



裂隙深度/mm: 1—5; 2—10; 3—15。

图 6 裂隙对试样动态抗压强度的影响

Fig. 6 Effects of cracks on dynamic compressive strength of specimens

## 2.2 岩石动态变形特性

由图 5 中裂隙试样的动态应力-应变曲线可知：试样变形呈现明显的阶段特征，大致分为裂隙压密闭合阶段(OA)、弹性阶段(AB)、非线性塑性变形阶段(BC)和峰后阶段(CD)。试样的裂隙压密闭合阶段较为明显，且变形量相对较大，可能与施加的预静载及试样端部涂抹较厚的凡士林有关。完整岩石的非线性塑性阶段较裂隙岩样时间短，峰后呈现脆性特征。裂隙岩样经弹性变形阶段后进入非线性塑性阶段，塑性变形速率先增大后减小，呈现“台阶”特征，峰后表现出塑

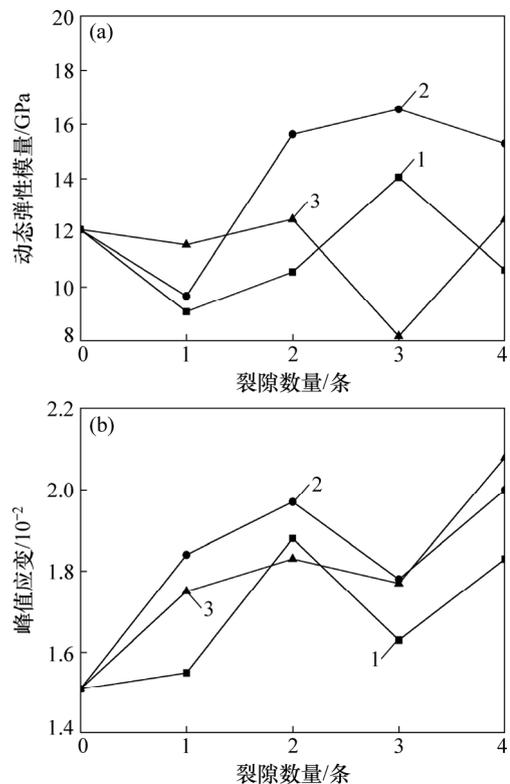
性特性，主要是因为裂隙岩样的自由面比完整岩样的大，提供了瞬态变形的空间。从图 5 还可以看出：部分岩样如 0-0-1 和 1-5-3 等岩样峰后曲线出现回弹现象，说明峰后试样并没有完全破坏，试样释放的弹性能大于入射能，仍具有一定的承载性能。

参照静态下切线弹性模量的定义确定动载变形模量。

$$E_d = \frac{\sigma_{d50}}{\epsilon_{d50}} \quad (9)$$

式中： $E_d$  为动态弹性模量； $\sigma_{d50}$  和  $\epsilon_{d50}$  分别为试样 50% 的峰值应力及其对应的应变。

用动态变形模量和峰值应变来反映试样加载阶段动载压缩变形特征，裂隙对试样动态变形参数的影响见图 7。由图 7(a)可知：试样动态弹性模量的变化规律与动态抗压强度的变化规律基本一致，大多数裂隙岩样的弹性模量低于完整岩样的弹性模量，整体趋势随裂隙数量增大而先增大后减小，最大为 16.56 GPa，最小为 8.18 GPa，但相同裂隙数量岩样的动态弹性模量随裂隙深度变化规律不显著，这可能与岩石试样自身的离散性有一定关系。从图 7(b)可以看出：裂隙试



(a) 动态弹性模量; (b) 峰值应变

裂隙深度/mm: 1—5; 2—10; 3—15。

图 7 裂隙对试样动态变形参数的影响

Fig. 7 Effects of cracks on dynamic deformation parameters of specimens

样的峰值应变普遍大于完整岩样的应变(1.51%), 随着裂隙数量增大, 峰值应变呈增大趋势。裂隙深度为 10 mm 的试样峰值应变较裂隙深度为 5 mm 和 15 mm 时的试样峰值应变略大, 主要是因为 10 mm 裂隙岩样不易产生剥落破坏, 表现出较强的塑性行为, 而裂隙深度为 5 mm 和 15 mm 时的裂隙试样分别以剥落破坏和裂隙贯通破坏为主。

### 3 破坏模式与能量演化

#### 3.1 岩石破坏模式分析

各试样破坏形态见表 2(其中, 0-0-0 试样为静载下进行单轴抗压温度测试的标准试样, 断面形态中细线代表裂缝, 粗线代表裂纹扩展路径)。由表 2 可知: 静载下砂岩试样发生剪切破坏, 动载下完整岩石破坏模式为轴向劈裂, 而裂隙岩石的动态破坏模式比较复杂, 与裂隙形态有关, 主要有张应变剥落破坏、拉剪破坏、剥落贯通破坏和拉伸贯通破坏 4 种。

单裂隙岩样均呈剥落破坏, 随着裂隙深度增大, 剥落厚度越来越大, 沿裂隙剥落越来越困难, 因而试样表现出动态抗压强度增高的趋势。含对称双裂隙试样剥落较单裂隙岩样剥落方位受限, 表现为剥落块度明显增大, 因而试样的动态抗压强度比单裂隙岩样的大; 裂隙深度分别为 5 mm 和 10 mm 的试样破坏模式为张应变剥落破坏, 15 mm 裂隙试样岩桥较窄, 裂隙间产生贯通, 试样发生了拉剪破坏, 故动态抗压强度较前 2 种试样又变低。含对称分布的 3 裂隙试样总体动态抗压强度低于双裂隙试样动态抗压强度, 5 mm 裂隙试样、10 mm 裂隙试样和 15 mm 裂隙试样破坏模式分别为张应变剥落、剥落贯通和拉伸贯通, 动态抗压强度先增大后减小。分析其原因, 裂隙深度为 10 mm 试样的剥落厚度大于裂隙深度为 5 mm 时试样的剥落厚度, 而裂隙深度为 15 mm 时, 试样裂隙产生拉伸贯通以致试样动态抗压强度显著变低。含对称分布的 4 裂隙试样强度随裂隙深度依然呈先增大后减小的趋势, 其动态抗压强度总体比 3 裂隙试样强度要低, 主要是因为裂隙数量增大使试样动态抗压强度弱化。裂

表 2 试样破坏形态

Table 2 Failure patterns of specimens

试样编号	断面形态	柱面形态	最终形态	破坏模式	试样编号	断面形态	柱面形态	最终形态	破坏模式
0-0-0				剪切破坏	2-15-1				拉剪破坏
0-0-1				劈裂破坏	3-5-1				剥落破坏
1-5-3				剥落破坏	3-10-1				剥落贯通
1-10-1				剥落破坏	3-15-3				拉伸贯通
1-15-2				剥落破坏	4-5-1				剥落破坏
2-5-1				剥落破坏	4-10-2				拉伸贯通
2-10-2				剥落破坏	4-15-2				拉伸贯通

隙深度较小时试样易于剥落,随着裂隙深度增大,破坏模式由剥落破坏向拉伸破坏转变,且试样强度随岩桥宽度减小而减小。

### 3.2 岩石能量演化规律

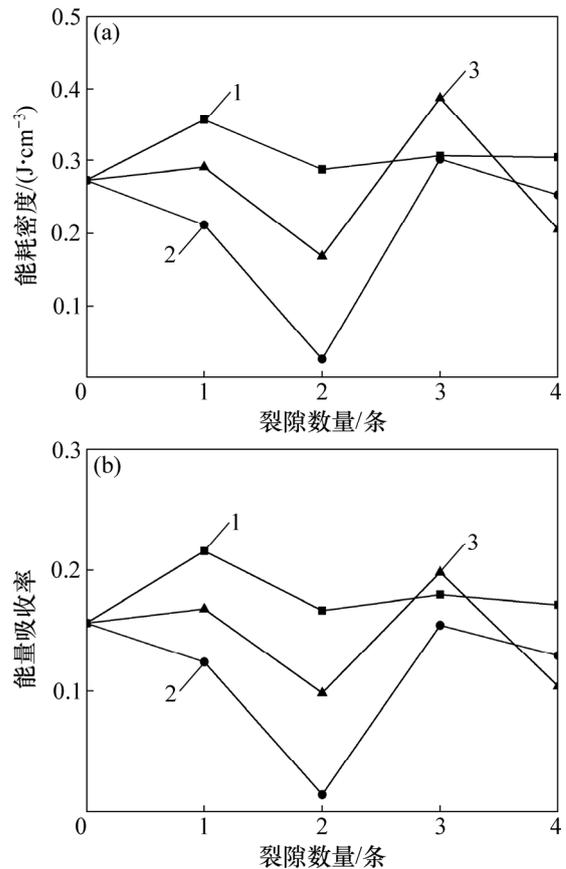
岩石在变形过程中能量始终发生变化,岩石发生变形破坏是能量驱动下的一种状态失稳现象,其实质是能量耗散在一定条件下的突变,因此,从能量角度研究岩石的力学行为可以很好地解释岩石破坏特性。由式(4)~(8)可得到试样的能量传递规律,各裂隙试样能量见表 3。其中,试样入射能为 160 J 左右,其变化趋势与应变率的变化趋势保持一致。试样能耗密度和能量吸收率随裂隙数量的变化见图 8。

在动态实验中,能量耗散主要为裂纹萌生、扩展和贯通所需的塑性变形能。能耗密度和能量吸收率越大,表明岩样内部扩展的裂纹数量越多,宏观上表现为试样的破碎块度越小,即破碎程度越严重。由图 8 可知:试样能耗密度和能量吸收率随裂隙数量的变化趋势保持一致,裂隙深度为 5 mm 时试样的能耗密度和能量吸收率相对较大,试样破碎最剧烈;裂隙深度为 15 mm 试样的破碎程度次之;裂隙深度为 10 mm 试样能量吸收率和能耗密度最小,表明该类试样的破碎块度最大。从裂隙数量的影响角度分析,裂隙数量为 2 时的试样较其他裂隙数量试样的能量吸收率和能耗密度要小,试样发生破坏时的定向剥落厚度和裂隙贯通长度相对较大,故该类试样破坏块度较大,峰后仍具有一定的承载性能。

表 3 裂隙试样能量

Table 3 Energy results of fractured specimens

试样编号	入射能/ J	反射能/ J	透射能/ J	耗散能/ J	能耗密度/ (J·m <sup>-3</sup> )	能量吸收率
0-0-1	167.98	109.40	32.28	26.30	0.27	0.16
1-5-3	153.47	106.48	13.82	33.18	0.36	0.22
1-10-1	159.84	126.28	13.72	19.84	0.21	0.12
1-15-2	162.12	116.34	18.50	27.27	0.29	0.17
2-5-1	161.22	116.76	17.56	26.90	0.29	0.17
2-10-2	158.00	137.82	17.89	2.29	0.03	0.01
2-15-1	154.62	122.33	17.06	15.22	0.17	0.10
3-5-1	158.07	113.45	16.19	28.43	0.31	0.18
3-10-1	176.20	130.02	18.91	27.27	0.30	0.15
3-15-3	172.13	125.19	13.24	0.39	0.39	0.00
4-5-1	159.06	118.94	12.83	27.30	0.30	0.17
4-10-2	174.02	135.50	15.98	22.54	0.25	0.13
4-15-2	168.18	139.88	10.79	17.51	0.21	0.10



(a) 试样能耗密度随裂隙数量的变化;  
(b) 试样能量吸收率随裂隙数量的变化  
裂隙深度/mm: 1—5; 2—10; 3—15。

图 8 试样能耗密度和能量吸收率随裂隙数量的变化

Fig. 8 Changes of energy density and energy absorption rate with number of cracks

为了更好地描述裂隙岩样的损伤破坏程度,采用分形几何理论对试样破碎程度进行分析,并探讨分形维数和能耗密度和能量吸收率的关系。收集冲击后的试样碎块,分别采用筛径为 5, 10, 15, 20 和 40 mm 的标准筛将破碎岩石分为直径为[0, 5), [5, 10), [10, 15), [15, 20), [20, 40)和[40, 50) mm 共 6 个等级。由文献[27]可知岩石冲击破碎后的块度分布表达式如下:

$$\frac{m_d}{m_T} = \left(\frac{d}{d_m}\right)^{3-D} \quad (10)$$

式中:  $d$  为碎块粒径;  $d_m$  为最大粒径(50 mm);  $m_d$  为粒径小于  $d$  的试样碎块累计质量;  $m_T$  为碎块总质量;  $D$  为试样碎块分形维数。

对式(10)两边取对数可得  $3-D$  即  $\lg(m_d/m_T)$  和  $\lg(d/d_m)$  拟合直线的斜率。试样碎块分级质量统计及拟合结果分别见表 4 和图 9。由表 4 可知:在相同裂隙

表 4 试样碎块分级质量统计结果

Table 4 Grading quality statistic result of specimen fragment

试样编号	直径/mm						$m_T/g$	$D$
	[0, 5)	[5, 10)	[10, 15)	[15, 20)	[20, 40)	[20, 40)		
0-0-1	7.8	6.4	7.0	24.8	52.2	112.2	210.4	1.59
1-5-3	73.8	20.0	22.8	35.0	34.2	0	185.8	2.57
1-10-1	70.0	21.4	40.2	26.8	29.0	0	187.4	2.34
1-15-2	51.2	16.2	19.4	46.2	70.4	0	203.4	2.55
2-5-1	44.2	16.0	16.8	30.2	88.0	0	195.2	2.30
2-10-2	22.0	7.8	14.4	37.6	76.4	43.6	201.8	1.97
2-15-1	34.0	11.0	20.4	29.6	100.2	0.0	195.2	2.16
3-5-1	41.8	13.4	24.8	35.2	41.0	35.0	191.2	2.32
3-10-1	36.4	6.2	14.0	44.0	93.8	5.0	199.4	2.16
3-15-3	11.8	7.4	14.6	44.2	123.0	0	201.0	2.63
4-5-1	56.2	14.8	29.4	14.8	69.8	0	185.0	2.44
4-10-2	53.4	15.2	20.8	21.0	70.4	0	180.8	2.42
4-15-2	53.4	20.4	31.0	37.6	38.2	0	180.6	2.43

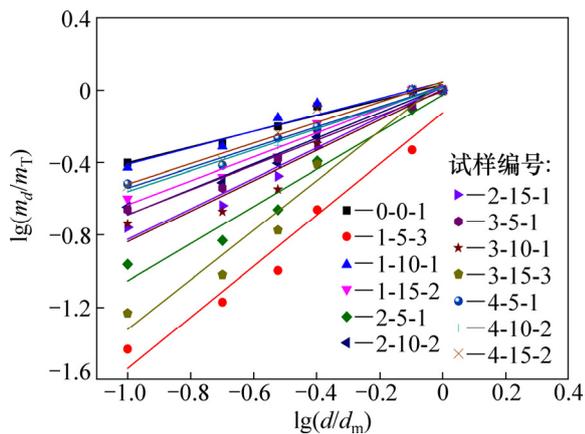


图 9  $\lg(m_d/m_T)$ 和  $\lg(d/d_m)$ 的拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of  $\lg(m_d/m_T)$  and  $\lg(d/d_m)$

深度下, 裂隙数量为 2 的试样分形维数相对较小; 随着裂隙深度逐渐增大, 当裂隙数量为 1~3 条时, 分形维数逐渐减小; 当裂隙数量为 4 条时, 试样分形维数呈现出先减小后增大的趋势。分形维数越大, 试样破碎程度越大。由此可见, 采用分形维数表征的试样破碎块度和能耗密度与能量吸收率反映的试样破碎程度基本相吻合。

### 4 结论

1) 在动静载荷作用下, 当裂隙深度为 5 和 10 mm 时, 试样动态抗压强度随着裂隙数量增大而先增大后

减小; 当裂隙深度为 15 mm 时, 试样动态抗压强度随着裂隙数量增大逐渐减小; 当裂隙条数为 1 条时, 试样动态抗压强度随裂隙深度增大逐渐增大; 当裂隙数为 2~4 条时, 试样动态抗压强度随裂隙深度增大而先增大后减小。动态弹性模量整体上随裂隙数量增大而先增大后减小, 与动态抗压强度变化规律基本一致; 裂隙试样的峰值应变普遍大于完整岩样的峰值应变, 随裂隙数量的增大, 峰值应变呈增大趋势, 裂隙深度为 10 mm 的试样峰值应变比裂隙深度为 5 mm 和 15 mm 时的要大。裂隙岩样的变形分为裂隙压密闭合阶段、弹性阶段、非线性塑性变形阶段和峰后阶段。

2) 除裂隙数量为 2、深度为 15mm 的试样发生拉剪破坏外, 当裂隙数量为 1 和 2 时不同裂隙深度的试样均发生剥落破坏; 当裂隙数量为 3 和 4 时, 试样由裂隙深度较小时的单一剥落破坏模式向裂隙深度较大时的拉伸贯通复合模式转变。

3) 裂隙岩样破碎块度越小, 能耗密度、能量吸收率和分形维数越大, 三者可以有效表征裂隙试样的破碎特性并表现出较好的一致性。当裂隙数量为 2 时岩石破碎块度相对较大, 随着裂隙深度的增大, 岩石破碎块度基本上呈先减小后增大的趋势。

致谢: 非常感谢团队李夕兵老师研发的改进型霍普金森压杆实验平台, 其在岩石动力学领域取得的大量科研成果也为论文的顺利撰写提供了很好的借鉴和参考。

## 参考文献:

- [1] BOMBOLAKIS E G. Photoelastic stress analysis of crack propagation within a compressive stress field[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1963: 36–38.
- [2] POSTON T, STEWART I. Catastrophe theory and its applications[M]. London, UK: Pitman, 1978: 41–43
- [3] NAMAT-NASSER S, HORII H. Compression-induced nonlinear crack extension with application to splitting, exfoliation, and rockburst[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 87(8): 6805–6821.
- [4] WONG R H C, CHAU K T. Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1998, 35(2): 147–164.
- [5] LEE J, HA Y D, HONG J W. Crack coalescence morphology in rock-like material under compression[J]. *International Journal of Fracture*, 2017, 203(1/2): 1–26.
- [6] BOET A, EINSTEIN H H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1998, 35(7): 863–888.
- [7] 黄明利, 黄凯珠. 三维表面裂纹相互作用扩展贯通机制试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(9): 1794–1799.  
HUANG Mingli, HUANG Kaizhu. Experimental study on propagation and coalescence mechanism of 3D surface cracks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(9): 1794–1799.
- [8] WONG R H C, CHAU K T, TANG Chun'an, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws-part I: experimental approach[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2001, 38(7): 909–924.
- [9] FUJII Y, ISHIJIMA Y. Consideration of fracture growth from an inclined slit and inclined initial fracture at the surface of rock and mortar in compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004, 41(6): 1035–1041.
- [10] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2009, 46(2): 239–249.
- [11] LI Yinping, CHEN Longzhu, WANG Yuanhan. Experimental research on pre-cracked marble under compression[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, 42(9/10): 2505–2516.
- [12] YANG Shengqi, JIANG Yuzhou, XU Weiya, et al. Experimental investigation on strength and failure behavior of pre-cracked marble under conventional triaxial compression[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45(17): 4796–819.
- [13] YANG Shengqi, DAI Yonghao, HAN Lijun, et al. Experimental study on mechanical behavior of brittle marble samples containing different flaws under uniaxial compression[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, 76(12): 1833–1845.
- [14] 袁林, 徐涛, 赵高峰, 等. 冲击载荷作用下准脆性材料 II 型裂纹扩展规律研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(10): 3155–3162.  
YUAN Lin, XU Tao, ZHAO Gaofeng, et al. Study of mode II crack propagation of quasi-brittle material under impact loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(10): 3155–3162.
- [15] 岳中文, 杨仁树, 孙中辉, 等. 含倾斜边裂纹岩石冲击断裂模拟试验[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(9): 1456–1460.  
YUE Zhongwen, YANG Renshu, SUN Zhonghui, et al. Simulation experiment of rock fracture containing inclined edge crack under impact load[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(9): 1456–1460.
- [16] 宋义敏, 杨小彬, 金璐, 等. 冲击载荷作用下岩石 I 型裂纹动态断裂试验研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(11): 49–53, 60.  
SONG Yimin, YANG Xiaobin, JIN Lu, et al. Dynamic fracture test for rock I-type crack under impact load[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(11): 49–53, 60.
- [17] 王卫华, 李坤, 王小金, 等. SHPB 加载下含不同倾角裂隙的类岩石试样力学特性[J]. *科技导报*, 2016, 34(18): 246–250.  
WANG Weihua, LI Kun, WANG Xiaojin, et al. Experimental study of mechanical properties of rocklike specimens containing single cracks of different inclination angles under SHPB loading[J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34(18): 246–250.
- [18] LI Xibing, ZHOU Tao, LI Diyuan. Dynamic strength and fracturing behavior of single-flawed prismatic marble specimens under impact loading with a split-hopkinson pressure bar[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2016, 50(1): 1–16.
- [19] 李地元, 韩震宇, 孙小磊, 等. 含预制裂隙大理岩 SHPB 动态力学破坏特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(12): 2872–2883.  
LI Diyuan, HAN Zhenyu, SUN Xiaolei, et al. Dynamic mechanical failure characteristics of marble with artificial flaws under SHPB tests[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(12): 2872–2883.
- [20] JIA Zongliang, CASTRO-MONTERON A, SHAH S P. Observation of mixed mode fracture with center notched disk specimens[J]. *Cement and Concrete Research*, 1996, 26(1): 125–137.
- [21] 朱万成, 逢铭璋, 唐春安, 等. 含预制裂纹岩石试样在动载荷作用下破裂模式的数值模拟[J]. *地下空间与工程学报*, 2005, 1(6): 856–858.  
ZHU Wancheng, PANG Mingzhang, TANG Chun'an, et al.

- Numerical simulation on failure process of pre-cracked rock disk under dynamic loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 856–858.
- [22] 冯峰, 王启智. 大理岩 I-II 复合型动态断裂的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1579–1586.
- FENG Feng, WANG Qizhi. An experimental study of mixed-mode I-II dynamic fracture of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1579–1586.
- [23] 李夕兵, 周子龙, 叶州元, 等. 岩石动静组合加载力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1387–1395.
- LI Xibing, ZHOU Zilong, YE Zhouyuan, et al. Study of rock mechanical characteristics under coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1387–1395.
- [24] 宫凤强, 李夕兵, 刘希灵, 等. 一维动静组合加载下砂岩动力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2076–2085.
- GONG Fengqiang, LI Xibing, LIU Xiling, et al. Experimental study of dynamic characteristics of sandstone under one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2076–2085.
- [25] 夏开文, 徐颖, 姚伟, 等. 静态预应力条件作用下岩板动态破坏行为试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 35(5): 1122–1132.
- XIA Kaiwen, XU Ying, YAO Wei, et al. Experimental study of dynamic fracture behavior of brittle rock plate under static pre-loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 35(5): 1122–1132.
- [26] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 20–21.
- LI Xibing. Rock dynamics fundamentals and applications[M]. Beijing: Science Press, 2014: 20–21.
- [27] 谢和平. 分形几何及其在岩土力学中的应用[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(1): 14–24.
- XIE Heping. Fractal geometry and its application to rock and soil materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(1): 14–24.

(编辑 伍锦花)