

不同应变速率下非贯通裂隙介质的力学特性研究

张平^{1, 2}, 李宁², 贺若兰³, 徐建光²

(1. 湖南大学土木工程学院岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082; 2. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;

3. 长沙理工大学桥梁与结构工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘要: 针对地震、爆破等动力荷载作用下节理裂隙岩体的稳定性问题, 采用含2条、3条闭合非贯通裂隙的类砂岩模型试样, 对应变速率为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 条件下的含裂隙试样进行了单轴加载试验。结果表明: 裂隙试样的变形与内部裂隙的贯通过程紧密相关, 且呈现显著的局部化渐进破坏特征; 随着应变速率的增加, 裂隙试样应力-应变曲线斜率显著增加, 裂隙试样与无裂隙试样弹模差别减小; 不同应变速率下裂隙试样强度明显受控于裂隙的空间位置, 且其面非贯通裂隙试样在倾角为 35° 左右时峰值强度呈现最低值, 这与贯通裂隙试样在 60° 左右时强度出现最小值不同; 不同应变速率下含3条预制裂隙试样破坏时的强度与预制裂隙间的贯通模式有关, 且与发生相同贯通模式时的含2条预制裂隙试样峰值强度基本相同; 裂隙试样峰值强度随应变速率的增加而增加, 且含3条裂隙试样强度增幅较含2条裂隙试样、无裂隙试样明显, 即随着应变速率的提高, 含裂隙试样的弱化作用降低。

关键词: 应变速率; 非贯通裂隙; 力学特性; 渐进破坏; 速率效应

中图分类号: TU458.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)06-0750-06

作者简介: 张平(1975-), 男, 四川南充人, 博士, 讲师, 主要从事岩体动力学与岩土工程数值仿真分析方面的研究工作。

Mechanical properties of fractured media containing intermittent fractures at different strain rates

ZHANG Ping^{1, 2}, LI Ning², HE Ruo-lan³, XU Jian-guang²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Institute of

Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. School of Bridge and Structure Engineering,

Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: Aimed at the dynamic stability of fractured rock mass under earthquake and explosion loading, the mechanical properties of the fractured specimens were studied under uni-axial loading with strain rates $1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, $1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$. The specimens used in this study were made of sandstone-like modeling material and contained two or three intermittent fractures with different geometric distributions. It was shown that the deformation properties of the specimens were correlative with the process of fractures coalescence, and presented localized and progressive damage. With the strain rate increasing, the moduli of specimens increased and the differences between fractured and non-fractured specimens diminished. The peak strengths were primarily dominated by its geometry, and the minimum for the specimens containing co-planar fractures appeared at 35° inclination angle which was different with that for the specimens containing continuous fractures whose minimum appeared at about 60° . The peak strengths for specimens with three fractures depended on the coalescence modes, and its strengths were close to those for specimens with two-fractures whose were similar to coalescence modes. Moreover, the peak strengths increased with the strain rates, and the extent of strength increment for specimens with three fractures was more obvious than that for specimens with two fractures and non-fractured specimens. Thus the conclusion that the weaken effect of the fractures might be lowered with the strain rate increasing could be obtained.

Key words: strain rate; intermittent fracture; mechanical properties; progressive failure; rate effect

0 引言

节理裂隙岩体由于内部节理裂隙的存在使得其力学特性与均匀介质呈现显著的不同^[1]。节理、裂隙的空间位置(如节理长度、倾角, 岩桥长度、倾角)影

响着其在外载下的扩展和贯通过程^[2-5], 并进而影响节

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50479023); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20040700008); 湖南大学科学基金资助项目(521101834)

收稿日期: 2005-05-24

理裂隙岩体的变形和强度特性。而且实际工程岩体常处于地震、爆破及开挖扰动等动力荷载作用之下, 节理裂隙岩体的破坏失稳与节理裂隙岩体的动力学特性密切相关。对不同应变速率条件下完整岩块的动力学特性已开展了广泛的研究^[6-9], 可是这些研究未能考虑岩体中起控制作用的大量成组分布的非贯通裂隙的弱化作用。针对动循环荷载作用下含裂隙类岩石材料的动变形、动强度特性也有一些研究成果^[10-11], 但是动循环荷载作用下速率效应及循环效应的共同作用使得人们较难区分两者的单独影响。

针对工程中常见的雁行和共面排列节理, 本文采用含 2 条、3 条不同空间位置预制非贯通裂隙的类砂岩模型试样, 对应变速率为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 条件下裂隙的贯通过程及含裂隙试样的力学特性进行了试验研究, 揭示了裂隙介质与无裂隙(完整)介质不同应变速率下力学特性的差异。

1 试验总体设计

1.1 试验材料和试样制备

模型材料配比: 重晶石: 沙子: Case 石膏: 蒸馏水 = 20: 40: 23: 17 (重量比), 沙子由两级清洁粒组 0.15~0.30、0.09~0.15 mm 组成, 重量比为 6: 4。表 1 分别列出模型材料及砂岩^[12]物理力学参数和量纲分析结果, 比较可知: 模型材料和砂岩的宏观特性基本相同, 因此将此材料归为类砂岩材料。

模型在组装的有机玻璃板(厚 8.0~10.0 mm)中浇注, 玻璃板内部尺寸为(即模型的几何尺寸): 120 mm×60 mm×25 mm。玻璃上、下盖板刻槽的位置和方位预先确定(以便裂隙预制时薄钢片的插入和定位), 固定预制裂隙长度 $2a = 12.0 \text{ mm}$ (a 为裂隙半长度)和岩桥长度 $2b = 20.0 \text{ mm}$; 变化裂隙倾角 α 及岩桥倾角 β 。两条雁行排列预制裂隙倾角 α 分别为 45° 和 75° , 岩桥倾角 β 分别为 45° 、 75° 、 90° 和 105° ; 2 条共面排列预制裂隙倾角 α 与岩桥倾角 β 相等(即 $\alpha = \beta$), 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化, 见图 1 (a)。

含 3 条裂隙试样裂隙倾角 α ($\alpha = \beta_1$) 分别为 45° 和 75° , 岩桥倾角 β_2 分别为 75° 、 90° 和 105° (文中

采用 45° – 45° – 75° 表示裂隙试样几何布置, 分别为裂隙倾角 α – 岩桥倾角 β_1 – 岩桥倾角 β_2 , 其它依此类推), 见图 1 (b)。

采用预埋抽条法制作闭合裂隙, 预埋薄钢片厚 0.1 mm, 待试样在模具中浇注、振动后至初凝时将薄钢片抽出, 利用石膏混合料凝固过程中发热膨胀使裂隙面闭合。试样在模具中放置 24 h 后脱模, 然后放入 105°C 烘箱内加热 48 h 使其烘干以保证模型材料的脆性特性。最后通过光源对试样裂隙表面进行检查, 不能透光的试样作为试验所需的含闭合预制裂隙的试样。

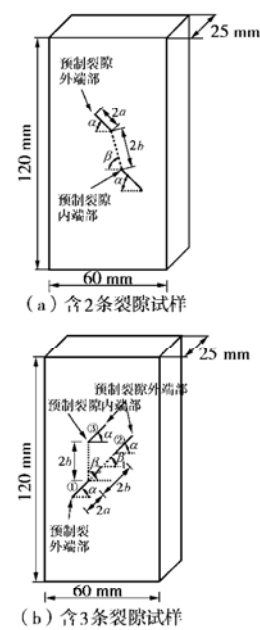


图 1 含 2 条、3 条裂隙试样及裂隙几何布置示意图
Fig. 1 Geometry of model specimens containing two or three fractures

1.2 试验装置和荷载控制

加载系统采用 MTS-810 静动三轴伺服材料试验机, 数据由计算机自动采集。采用位移控制的单轴加载; 为比较加载速率变化对试样变形破坏过程的影响, 采用一次加载, 在试样变形为 0.8 mm 时卸载(经过多次试验, 发现当试样变形达到 0.8 mm 时已丧失承载能力, 但尚未出现崩落); 采用的应变速率 $\dot{\epsilon}$ 分别为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 和 $1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。

表 1 材料物理力学参数比较 Table 1 Comparison of physico-mechanical parameters of materials												
参数或 π 因子	单轴抗压 强度 σ_{uc} /MPa	抗拉 强度 σ_t /MPa	弹模 E /GPa	I 型断裂韧 度 K_{IC} /(MPa·m ^{0.5})	重度 γ /(kN·m ⁻³)	裂隙 长度 L /m	泊松 比 μ	裂隙面摩 擦系数 f	$\gamma L/E$	$K_{IC}/(\sigma_{uc} L^{0.5})$	σ_{uc}/σ_t	E/σ_{uc}
砂岩 ^[12]	20~170	4~25	3~35	0.22~2.66	23	0.12	0.02~ 0.20	0.47~ 0.67	1.5×10^{-7}	0.015~0.183	5~7.4	150~ 206
本文材料	7.34	1.24	1.41	0.164	17.78	0.012	—	0.58	1.5×10^{-7}	0.204	5.92	192

注: “—” 表示未进行测试。

2 裂隙介质变形特性分析

2.1 不同应变速率下应力 - 应变曲线对比

根据已有的静、动荷载分级标准^[6], 本文应变速率为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的试验结果可分别看作是静载、动载的结果。将 2 种应变速率下无裂隙试样、含 3 条不同空间位置裂隙试样的应力应变曲线绘于图 2 中。

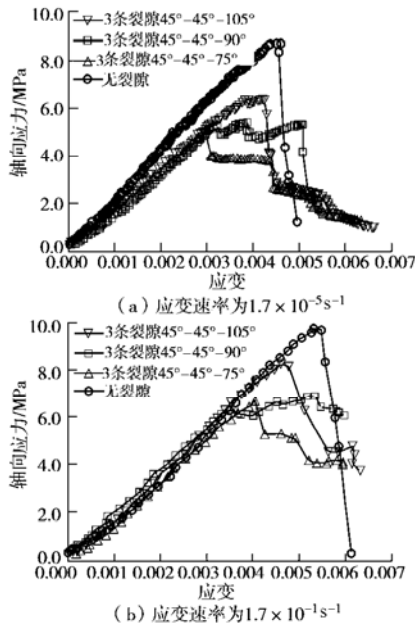


图 2 无裂隙及 3 条裂隙试样应力 - 应变曲线对比

Fig. 2 Comparisons of stress-strain curves between non-fractured and three-fractured specimens

从图 2 中可见, 含裂隙试样峰值后区均出现了应力跌落, 有残余强度出现; 应变速率为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时裂隙试样存在着一定的初始闭合变形, 曲线斜率低于无裂隙试样; 而应变速率升至 $1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 时裂隙试样初始压密段不再明显; 且裂隙试样应力 - 应变曲线斜率增加, 裂隙试样与无裂隙试样弹模差别减小, 即动载下预存裂隙的弱化作用降低。

2.2 裂隙数目对裂隙介质变形的影响

将应变速率为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 条件下含 2 条、3 条岩桥倾角相等 (以 β_2 为准) 裂隙试样的应力 - 应变曲线绘于图 3 (a)、(b) 中。

从图 3 中可见, 不同应变速率下含 2 条裂隙试样与 3 条裂隙试样峰值前应力 - 应变曲线基本吻合, 含不同裂隙数目的试样应力 - 应变曲线只是峰值强度出现了少许的差异; 含裂隙试样内裂隙数目越多, 应力的跌落次数就越多, 呈现显著的渐进破坏特征。

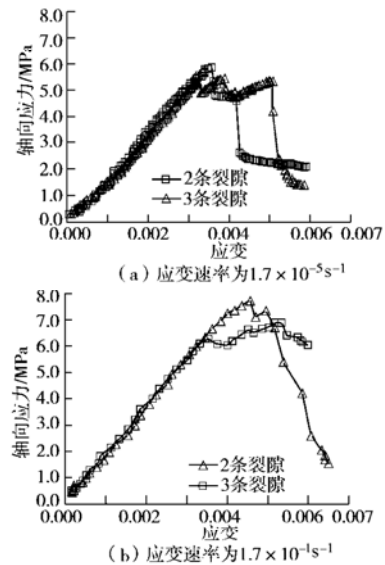


图 3 含 2、3 条裂隙试样应力 - 应变曲线对比

Fig. 3 Comparisons of stress-strain curves between two-fractured and three-fractured specimens

2.3 裂隙贯通过程对裂隙介质变形的影响

结合应变速率为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时含裂隙试样 ($45^\circ-45^\circ-90^\circ$) 预制裂隙贯通过程, 可将裂隙试样应力 - 应变曲线与裂隙贯通过程进行对照分析, 以揭示裂隙贯通过程对裂隙介质变形特性的影响, 见图 4。当裂隙试样岩桥处无贯通时, 裂隙试样应力 - 应变曲线呈现线性增长 (图中 OA 段); 当裂隙试样裂隙②、③间出现贯通时 (图 4 中 A 点), 应力出现跌落, 但并未在整个试样中形成贯通性的宏观破裂面; 随着荷载的增加, 裂隙①、③间产生贯通 (图 4 中 B 点), 此时峰值强度出现, 随后应力跌落至残余强度。

由此可见, 裂隙介质的宏观变形是与其内部裂隙间的贯通过程紧密相关的。同时可见, 在含 3 条裂隙试样的整个变形至破坏过程中, 试样内①、②裂隙间并无共面贯通发生, 这表明外载下裂隙试样每条裂隙并非同时扩展, 而总是沿一定岩桥倾角发生贯通, 形成局部化破裂带。

3 裂隙介质强度特性分析

本文着重分析裂隙倾角为 45° 时含裂隙试样的强度变化规律。

3.1 裂隙空间位置对裂隙试样强度的影响

(1) 雁行排列

将不同应变速率下裂隙倾角为 45° 时不同岩桥倾角含 2 条预制裂隙试样峰值强度随岩桥倾角关系绘于图 5 (a) 中, 可发现: 非叠合裂隙 (岩桥倾角为 75° 和 90°) 贯通时的荷载均低于叠合裂隙 (岩桥倾角为

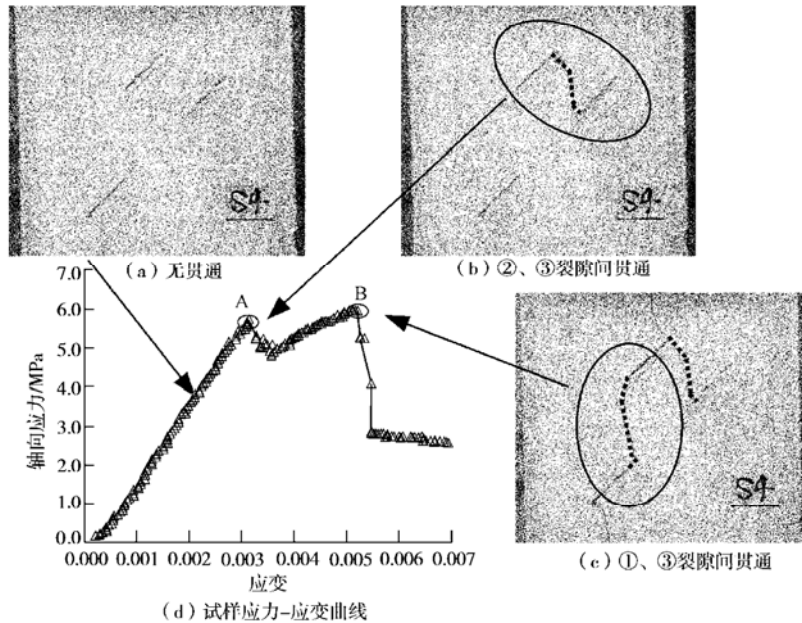


图4 静载下(应变速率为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) 3条裂隙试样 ($45^\circ-45^\circ-90^\circ$) 应力-应变曲线及裂隙贯通过程

Fig. 4 Stress-strain curves and schematic diagram of coalescence processes for $45^\circ-45^\circ-90^\circ$ specimens under static loading

105°); 在裂隙倾角为 45° 条件下, 岩桥倾角为 75° 时试样强度最低。

叠合裂隙试样 ($45^\circ-105^\circ$) 分支裂纹间的屏蔽效应 (Shielding Effect) [13] 使其强度明显增大。即当翼裂纹扩展到接近另一预制裂隙时, 由于另一预制裂隙与翼裂纹扩展方向斜交, 因此会阻碍它的扩展, 需要增加荷载才能产生最后的贯通, 这就造成试样表观强度增大, 从图 5(a) 中可见, 其强度值甚至高于 $45^\circ-45^\circ$ 共面预制裂隙。

(2) 共面排列

将不同应变速率下倾角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的含 2 条共面非贯通裂隙试样破坏时峰值强度随裂隙倾角的关系绘于图 5 (b) 中, 可以发现: 无裂隙试样峰值强度均大于裂隙试样; 该曲线随裂隙倾角的增加而呈现先降低后上升的趋势; 且该曲线在裂隙倾角为 35° 左右呈现最小值, 这与贯通性裂隙试样裂隙倾角为 60° 左右呈现最小值相差较大。这一结果也充分说明了对非贯通裂隙试样的强度分析并不能沿用贯通裂隙试样的单一弱面理论 [14], 而应从裂隙扩展、相互连接、贯通过程进行解释、分析 [15]。由此可见, 不同应变速率下裂隙试样的强度明显受控于裂隙的空间位置。

3.2 裂隙数目对裂隙试样强度的影响

将应变速率为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 条件下裂隙倾角为 45° 时不同岩桥倾角含 2、3 条预制裂隙试样峰值强度随岩桥倾角 (以 β_2 为准) 的关系绘于图 6。可以发现: 由于含 3 条裂隙试样破坏时的强度主要受 ①、③两条裂隙的贯通控制, 因此其强度与 ①、③裂

隙相同空间展布的含 2 条裂隙试样强度数据比较接近, 应变速率为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时最大相差幅度不到 6%; 应变速率为 $1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 时最大相差 9.7%。

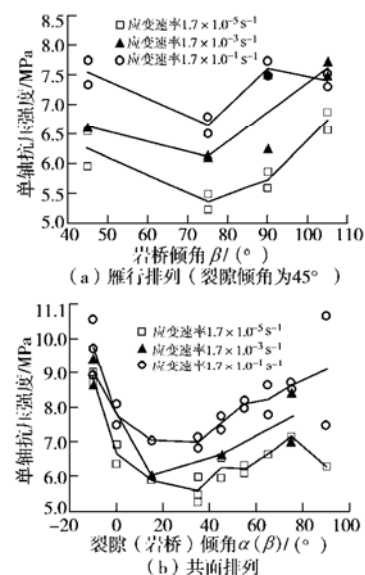


图5 不同应变速率下裂隙试样强度随岩桥倾角变化规律

(无裂隙试样强度按裂隙 (岩桥) 倾角为 -10° 绘出以作对比)

Fig. 5 Peak strengths vs rock bridge angle at different strain rates

因此可以认为: 在当前裂隙空间位置及应变速率条件下, 含 3 条预制裂隙试样破坏时的强度与预制裂隙间岩桥的贯通模式有关, 且与发生相同贯通模式时含 2 条预制裂隙试样峰值强度基本相同; 裂隙数目的增加对试样强度的影响较小, 因而仅仅将预存裂隙的总数目作为变量引入公式来考虑多裂隙的作用并不合适, 而应考虑对试样破坏起控制作用的裂隙数目 [15]。

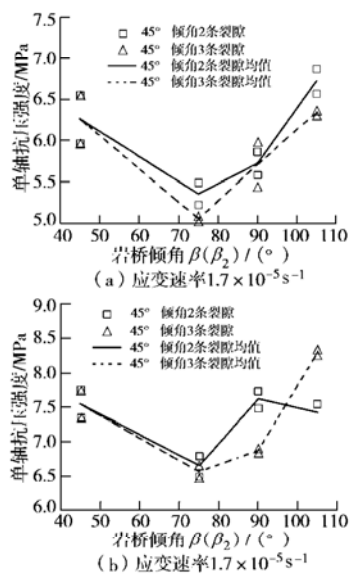


图 6 含 2、3 条裂隙试样强度随岩桥倾角变化规律对比
Fig. 6 Comparisons of peak strengths between two-fractured and three-fractured specimens

3.3 应变速率对裂隙试样强度的影响

将不同应变速率条件下裂隙倾角为 45°含 3 条裂隙试样峰值强度随岩桥倾角（以 β_2 为准）的变化示于图 7，为了对比，同时将 45°-45°含 2 条裂隙试样的峰值强度数据也一并绘于图中。

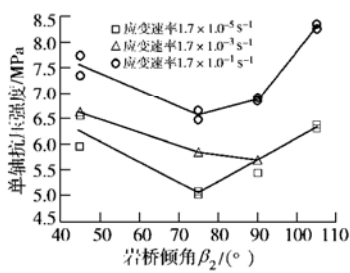


图 7 不同应变速率下含 3 条裂隙试样强度随岩桥倾角变化规律对比
Fig. 7 Peak strengths vs rock bridge angle at different strain rates for three-fractured specimens

从图 5、7 中不同应变速率条件下含 2 条雁行、共面排列裂隙试样以及含 3 条裂隙试样峰值强度随岩桥倾角变化曲线的对比可见，不同应变速率下裂隙试样强度随岩桥倾角的变化规律接近。即：裂隙倾角为 45°时各裂隙试样峰值抗压强度在岩桥倾角为 75°时达到最小值；非叠合裂隙试样强度均低于叠合裂隙试样强度，且小于共面裂隙试样强度。

同时可以发现，随着应变速率的增加，裂隙试样的强度都得到了显著增大；应变速率 $\dot{\epsilon}$ 从 $1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 至 $1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 变化时裂隙试样强度增幅较小，应变速率 $\dot{\epsilon}$ 从 $1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 至 $1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 变化时裂隙试样强度增幅较大；且裂隙试样强度平均值增幅大于无裂隙试样，如表 2~4（单位：MPa）。同时，从表 2~4 中

不同应变速率下裂隙试样与无裂隙试样强度降幅数据的对比可见（表中“（）”内数据），随着应变速率的提高，裂隙试样较无裂隙试样的强度降幅比例普遍降低。同时，对比表 4、2 可发现，不同应变速率下含 3 条裂隙试样的强度增幅与含 2 条裂隙试样相比呈现上升趋势。

表 2 不同应变速率下含 2 条雁行裂隙试样强度对比

Table 2 Comparison of strengths at different strain rates for specimens containing two echelon fractures

裂隙空间位置	无裂隙	45°-75°	45°-90°	45°-105°
$\dot{\epsilon} = 1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$	8.86	5.36 (39.5)	5.73 (35.3)	6.72 (24.2)
$\dot{\epsilon} = 1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$	9.75	6.65 (31.8)	7.61 (21.9)	7.42 (23.9)
强度增幅/%	10.1	24.2	32.9	10.4

注：表中“—”表示试样端部破坏；“（）”中数据表示裂隙试样与无裂隙试样相比的强度降幅（%）。

表 3 不同应变速率下含 2 条共面裂隙试样强度对比

Table 3 Comparison of strengths at different strain rates for specimens containing two co-planar fractures

裂隙空间位置	无裂隙	0°-0°	15°-15°	35°-35°
$\dot{\epsilon} = 1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$	8.86	6.65 (24.9)	5.89 (33.5)	5.60 (36.8)
$\dot{\epsilon} = 1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$	9.75	7.80 (20.0)	7.03 (27.9)	6.99 (28.3)
强度增幅/%	10.1	17.3	19.3	24.9

裂隙空间位置	45°-45°	55°-55°	65°-65°	75°-75°
$\dot{\epsilon} = 1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$	6.26 (29.3)	6.21 (29.9)	6.64 (25.1)	7.14 (19.4)
$\dot{\epsilon} = 1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$	7.55 (22.6)	8.08 (17.1)	8.21 (15.8)	8.61 (11.7)
强度增幅/%	20.7	30.1	23.7	20.5

注：表中“（）”中数据表示裂隙试样与无裂隙试样相比的强度降幅（%）。

表 4 不同应变速率下含 3 条裂隙试样强度对比

Table 4 Comparison of strengths at different strain rates for specimens containing three fractures

裂隙空间位置	无裂隙	45°-45°-75°	45°-45°-90°	45°-45°-105°
$\dot{\epsilon} = 1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$	8.86	5.06 (42.9)	5.71 (35.6)	6.34 (28.4)
$\dot{\epsilon} = 1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$	9.75	6.57 (32.6)	6.88 (29.4)	8.30 (14.9)
强度增幅/%	10.1	29.9	20.3	30.9

注：表中“（）”中数据表示裂隙试样与无裂隙试样相比的强度降幅（%）。

这充分说明：含裂隙试样速率效应较无裂隙试样明显，且随着裂隙数目的增加这一效应愈加显著，即速率效应具有裂隙数目相关性；同时，随着应变速率的提高，含裂隙试样的弱化作用降低。

4 结 论

(1) 裂隙试样的变形是与其内部岩桥的贯通过程紧密相关的，随着裂隙试样内裂隙数目的增加，应力的跌落次数就越多，裂隙试样呈现显著的局部化渐进破坏特征。

(2) 随着应变速率的增加，裂隙试样初始压密段不再明显；裂隙试样应力 - 应变曲线斜率增加，与无

裂隙试样弹模差别不显著,即动载下预存裂隙的弱化作用降低。

(3) 不同应变速率下裂隙试样强度明显受控于裂隙的空间位置,且共面非贯通裂隙试样在倾角为 35° 左右时峰值强度呈现最低值,与贯通裂隙试样在 60° 左右时强度出现最小值不同。

(4) 试验验证了不同应变速率下预制裂隙试样的峰值强度与试样内预存裂隙数目没有必然的联系,而与引起贯通失效的裂隙数目有关。因此,采用预存裂隙数目的方法考虑多条裂隙对含裂隙试样强度的影响显然放大了多裂隙的作用。

(5) 裂隙试样峰值强度随应变速率的增加而增加,且含3条裂隙试样强度增幅较含2条裂隙试样、无裂隙试样明显;即随着应变速率的提高,含裂隙试样的弱化作用降低。

致谢:本文试验研究得到中国科学院兰州冻土工程国家重点实验室马巍研究员、赖远明研究员及办公室主任王贵荣同志的关心和指导;在试验的具体操作中得到了常小晓工程师、杨曙光同志以及徐彬、全晓娟、李国玉的大力协助,在此特别致谢!

参考文献:

- [1] 李 宁,张 平,陈蕴生.裂隙岩体试验研究进展与思考[C]//中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集.北京:中国科学技术出版社,2002:63 - 69. (LI Ning, ZHANG Ping, CHEN Yun-sheng. The progress and thought of the experimental study for the cracked rock mass[C]// Proceedings of the 7th Rock Mechanics and Engineering Conference. Beijing: China Science and Technology Press, 2002: 63 - 69.)
- [2] WONG R H C, CHAU K T. Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, **35**(2): 147 - 164.
- [3] BOBET A, EINSTEIN H H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, **35**(7): 863 - 888.
- [4] WONG R H C, CHAU K T, TANG C A, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws-Part I: experimental approach[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**: 909 - 924.
- [5] 朱维申,李术才,陈卫忠.节理岩体破坏机理和锚固效应及工程应用[M].北京:科学出版社,2002:133 - 140. (ZHU Wei-shen, LI Shu-cai, CHEN Wei-zhong. Fracture mechanism and anchoring effect of jointed rock mass and its application in engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 133 - 140.)
- [6] 李夕兵,古德生.岩石冲击动力学研究内容及其应用[J].西部探矿工程,1996,8(6):1 - 2. (LI Xi-bing, GU De-sheng. Research content and application of rock impulsion dynamics[J]. West-China Exploration Engineering, 1996, **8**(6): 1 - 2.)
- [7] 金丰年,杨海杰.岩石的载荷速度效应[J].岩石力学与工程学报,1998,17(6):711 - 717. (JIN Feng-nian, YANG Hai-jie. Loading-rate effect of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, **17**(6):711 - 717.)
- [8] LI H B, ZHAO J, LI T J. Triaxial compression tests on a granite at different strain rates and confining pressures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, **36**: 1057 - 1063.
- [9] 孙 钧.岩石动力学研究的若干问题[C]//中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集.北京:中国科学技术出版社,2002:4 - 8. (SUN Jun. Some problems in research on rock dynamics[C]// Proceedings of the 7th Rock Mechanics and Engineering Conference. Beijing: China Science and Technology Press, 2002: 4 - 8.)
- [10] LI N, CHEN W, ZHANG P, et al. The mechanical properties and a fatigue-damage model for jointed rock masses subjected to dynamic cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38** (7): 1071 - 1079.
- [11] LI N, ZHANG P, CHEN Y S, et al. Fatigue properties of cracked, saturated and frozen sandstone samples under cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, **40**(1): 145 - 150.
- [12] FARMER I W. Engineering properties of rocks[M]. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1983: 20 - 85.
- [13] 陈宜亨,师俊平.微裂纹屏蔽机理的力学理论[J].力学进展,1998,28(1):43 - 57. (CHEN Yi-heng, SHI Jun-ping. The mechanical theory of the microcrack shielding mechanism[J]. Advances in Mechanics, 1998, **28**(1): 43 - 57.)
- [14] JAEGER J C. Shear failure of anisotropic rocks[J]. Geological Magazine, 1960, **97**(1): 65 - 72.
- [15] 张 平.裂隙介质静动应力条件下的破坏模式与局部化渐进破坏模型研究[D].西安:西安理工大学,2004:76 - 88. (ZHANG Ping. Research on failure modes and localized progressive failure model of the cracked media under static and dynamic stress conditions[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004:76 - 88.)