

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.12.023

冻结条件下平行双裂隙岩体力学特性试验研究

张晋勋¹, 杨昊^{1,2}, 单仁亮², 武福美¹, 郭志明²

(1. 北京城建集团有限责任公司 博士后工作站, 北京 100088; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘 要: 裂隙是影响工程岩体稳定的重要因素, 而平行双裂隙是一种重要的裂隙分布形式, 基于已有的研究成果, 开展一系列平行双裂隙类岩石三轴压缩试验, 研究裂隙产状对平行双裂隙岩体力学性质和破坏形态的影响。试验结果表明: 平行双裂隙岩体强度、弹性模量和泊松比受迹长和迹长比共同影响, 受裂隙间距影响较小, 随倾角增大, 先减小后增大; 倾角 $<30^\circ$ 时, 破裂面起始于裂隙端部贯穿岩桥, 并沿最大主应力方向发展, 倾角在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间时, 沿其中一条裂隙剪切破坏。迹长和迹长比较小时 (贯通率 $<25\%$, 迹长比 <2.5), 破坏形态与裂隙无关; 迹长较大 (贯通率 $>75\%$), 迹长比较小时 (迹长比 <1), 破坏形态取决于长裂隙; 迹长介于两者之间时 (贯通率 $25\% \sim 75\%$), 迹长比接近 1 时, 受两条裂隙共同影响。

关键词: 平行双裂隙岩体; 裂隙倾角; 裂隙间距; 迹长; 力学性质

中文分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 12-3573-09

Experimental study on mechanical characteristics of two parallel fractured rock under frozen condition

ZHANG Jin-xun¹, YANG Hao^{1,2}, SHAN Ren-liang², WU Fu-mei¹, GUO Zhi-ming²

(1. Postdoctoral Workstation, Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing, 100083, China)

Abstract: Cracks significantly influence the stability of rock engineering, and two parallel cracks are the severe distribution forms of cracks. A series of triaxial compression tests were conducted on sandstone specimens with two parallel cracks to investigate the effect of fracture morphology on its mechanical properties and failure modes. The results showed that strength, elastic modulus and Poisson's ratio of fractured rock were influenced by both the trace length and the trace length ratio. It was also found that these parameters decreased first, then increased immediately with dip increments, and less varied with spacing between cracks. When the dip angle was less than 30° , the failure plane initiated from crack tips and propagated through the rock bridge along the direction of principal stress. Shear failures localised within one crack, when the angle was between 30° and 60° . For the rock specimen with small trace length and trace length ratio (continuity $<25\%$, trace length ratio <2.5), failure modes were not influenced by cracks. Failure modes depended on the crack with a longer trace length, when the trace length became significant (continuity degree $>75\%$), but the trace length ratio remained relatively small (trace length ratio <1). For the rock with moderate cracks (continuity falls between $25\% \sim 75\%$) and the trace length ratio of approximately 1, failure modes were controlled by two cracks.

Keywords: two parallel fractured rock; fracture dip; fracture spacing; trace length; mechanical properties

1 引 言

岩石结构无论多么复杂, 大体可以简化为含单一裂隙岩体、含两条平行裂隙岩体、两条相交裂隙岩体以及由以上 3 种情况组成的复合岩体。

针对这一观点国内外学者做了大量研究, 杨米

加等^[1]采用摩尔-库仑准则, 建立了单裂隙岩石强度和破坏形式与应力状态的关系。刘红岩等^[2]研究了预制节理岩体单轴荷载条件下的强度特性及破坏模式, 结果表明, 裂隙倾角和贯通率对峰值强度影响显著, 长径比对峰值影响不大; 破坏形态以剪切滑移破坏居多。黄达等^[3]采用数值方法研究应变率对

收稿日期: 2015-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41572270)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC) (41572270).

第一作者简介: 张晋勋, 男, 1967 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地震工程, 混凝土结构及地铁工程等领域的研究工作。E-mail: 99983618@qq.com

通讯作者: 杨昊, 男, 1988 年生, 博士后, 主要从事岩土体冻结技术方面的研究工作。E-mail: yanghao380073@126.com

单裂隙砂岩力学特性的影响,得到随着应变率的提高,损伤裂纹及宏观裂隙类型越多,损伤程度越大,端部效应越明显的结论。肖桃李等^[4-5]研究预制单裂隙类岩石材料三轴压缩条件下的力学特性及破坏形式,得到“三轴压缩条件下,围压影响试样宏观破裂模式,预制裂隙长度影响裂隙扩展的规模,预制裂隙倾角是新裂隙起裂的诱因”的结论。李宏哲等^[6]认为,大理岩的破坏形式主要取决于节理面与最大主应力夹角的大小,与围压相关性较小;当夹角 $\theta > 40^\circ$ 时,试件强度与完整岩石相当,夹角 $\theta < 40^\circ$ 时,试件破坏强度显著降低。向天兵等^[7]探讨开挖卸荷与支护应力路径下,裂隙岩体的破坏模式,试验表明,卸荷影响和支护效果均与应力状态、支护强度及结构面参数有关。PRUDENCIO等^[8]认为,多组平行双裂隙的破坏模式取决于围压和各节理之间的方位关系。LI等^[9]通过水平和竖向层理加、卸载试验,得到卸荷对节理岩体的强度的影响大于加载试验。Bahaaddini等^[10]采用PFC-3D和室内试验相结合的方法,研究节理形态对岩体力学特性和破坏模式的影响,结果表明,岩体力学特性和破坏模式受节理方向、岩桥倾角和主应力与节理交角影响显著。

总结前人的研究可以得到如下成果:①岩体的倾角和迹长对岩体力学性质的影响较大;②岩体的强度和破坏形式并非完全由节理控制;③围压有抑制岩体各向异性的作用。但研究仍然存在一定不足:①研究单裂隙岩体较多,双裂隙岩体研究较少;②研究内容较少考虑实际工程条件,如围压、温度等;③研究成果较零散,并没有形成完整的研究体系。

针对以上几点不足,在文献[11]的基础上,综合梅林庙矿风井冻结施工地质条件,采用相似材料室内试验的方法,着重研究平行双裂隙间距、倾角和迹长对岩体力学特性的影响。研究结果对冻结井筒的设计和施工具有重要的指导意义。

2 试验方案

裂隙原岩试件获取主要有两种方法:①在大量岩体中寻找符合试验要求的裂隙岩体,按一定倾角钻取岩芯,加工成标准尺寸试件^[12];②在完整的标准试件上预压致裂,形成裂隙试件^[13]。但实际操作中,笔者按上述两种方法很难获得大量满足试验精度和数量要求的原岩试件。因此,本文采用国内外学者普遍认可的预制裂隙类岩石试件的方法获得裂隙试件。

2.1 相似材料及配比

综合文献[2, 4-5]以及相关书籍^[14],选取相似材料的密度 ρ 、弹性模量 E 、泊松比 ν 、单轴抗压强度 σ_c 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 为控制参量,相似理论推导相似系数如下:

$$\left. \begin{aligned} C_\varphi = C_\nu = 1 \\ C_E = C_{\sigma_c} = C_c = ML^{-1}T^{-2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

只要保证水泥砂浆的力学参数与红砂岩的力学参数^[15]相等,就可以用水泥砂浆(下称类岩石)代替红砂岩进行试验研究。考虑到红砂岩的各向异性和剪胀性,在保证原配比不变的基础上,选用人工级配砂石,并适当加入软木屑。经过多组配比试验,最终选定相似材料各组成成分的配比为,水泥(C):砂(S):水(W):减水剂(A):软木屑=1:2:0.45:0.6%:0.1% (人工级配砂粒按孔径(4.75: 2.36: 1.18: 0.6: 0.3: 0.15)筛余=0: 2: 3: 4: 6: 5混合配比)。

表1 类岩石材料与红砂岩力学参数^[15]

Table 1 Mechanical parameters of rock-like materials and red sandstone

编号	抗压强度 σ_c / MPa	弹性模量 E / GPa	泊松比 ν	凝聚力 c / MPa	摩擦角 φ / ($^\circ$)
红砂岩(10 $^\circ$ C)	39.50	1.84	0.188	15.1	17.3
类岩石(10 $^\circ$ C)	39.46	1.93	0.195	14.9	15.3
红砂岩(-10 $^\circ$ C)	43.07	2.49	0.172	14.2	22.5
类岩石(-10 $^\circ$ C)	44.71	2.51	0.173	16.1	18.7

由表1可知,类岩石和红砂岩在常温和负温条件下的强度参数和变形参数近似相等,因此,可以用类岩石材料代替红砂岩研究裂隙产状对岩体力学特性的影响。

2.2 试样制备方法

双裂隙试件几何形态如图1所示, a_1 、 a_2 分别为两条裂隙的迹长(中点位于轴线上), θ_1 和 θ_2 为对应的倾角, b 为两条裂隙间距。

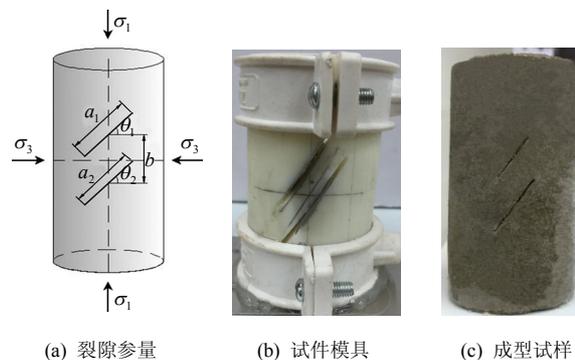


图1 平行双裂隙岩体示意图

Fig.1 Schematic and image of rock specimen with two parallel cracks

按设计配合比，将水泥、砂子、软木屑混合均匀，倒入一定比例含减水剂的自来水，高速搅拌 5 min，使原材料拌合均匀，倒入制作好的试模内，插入钢片（厚度为 0.1 mm），再一同放到振动台上振捣（120 s 左右），待试件表面无气泡溢出，停止振捣，端面抹平后放入恒温、恒湿养护室内养护。养护 4 h 后拔出钢片（早于 3 h 拔出，裂隙上下砂浆塌落、黏连；晚于 5 h 裂隙两端易损坏，且不易拔出），继续养护 24 h 后拆模，剔除表面气泡较多的试件，将满足要求的试件放入恒温、恒湿养护室内继续养护至 28 d，取出试件，用切割机将端面整平，测量试件的直径、高度和质量，剔除不符合试验标准和密度偏差较大的试件，剩余试件按试验要求统一编号，放入水中饱水冷冻处理，制成含冰裂隙岩体试件。

2.3 试验加载方案

负温三轴试验是在中国矿业大学（北京）城市地下工程实验室的冻三轴试验机上完成的。详细步骤见文献[15]。轴向加载采用位移控制，加载速率为 0.12 mm/min，围压按静水压力条件施加，加载速率为 50 kPa/s，待围压达到设定值后，保持围压不变，继续加载轴压至岩样破坏。

3 试验结果分析

3.1 间距对岩体力学特性的影响

裂隙间距 b 分别取 4、8、12、20 mm（占试件高度的 5%、10%、15%、25%），裂隙迹长 $a_1 = a_2 = 20$ mm，裂隙倾角 $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ ，温度 $T = -10^\circ\text{C}$ ，围压 $\sigma_3 = 8$ MPa。

由图 2 可知，双裂隙岩体在不同间距条件下偏

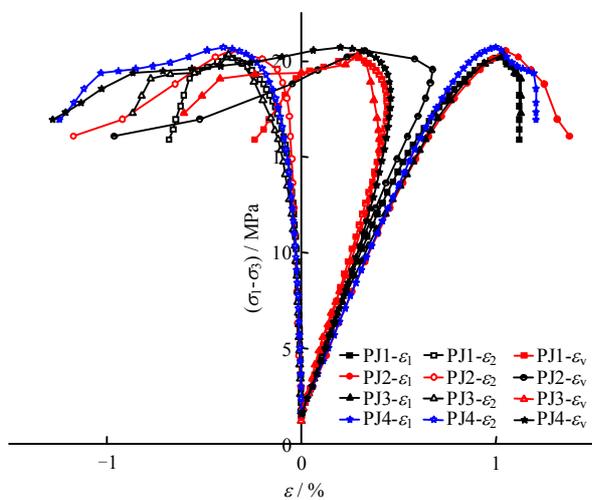


图 2 不同间距裂隙岩体应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of fractured rock with different spacing

应力近似相等，弹性阶段的轴向和径向斜率也近似相等，按规范《人工冻土物理力学性能试验》^[16]的要求计算弹性模量和泊松比，列于表 2。

表 2 间距对力学特性的影响
Table 2 The influence of spacing on rock mechanical properties

编号	裂隙间距 / mm	最大主应力 σ_1 / MPa	弹性模量 E / GPa	泊松比 ν	轴向应变 ϵ_1	径向应变 ϵ_2
PJ1	4	28.20	2.29	0.084	0.010 3	0.003 9
PJ2	8	28.52	2.28	0.085	0.010 5	0.003 6
PJ3	12	28.33	2.29	0.084	0.010 4	0.003 7
PJ4	20	28.69	2.32	0.084	0.010 0	0.004 0

将表 2 中的参数绘于图 3、4 中。其中，与双裂隙试件对应的单裂隙试件（倾角 45° ，迹长 20 mm）的最大主应力为 28.32 MPa，弹性模量为 2.22 GPa，泊松比为 0.084，如虚线所示。

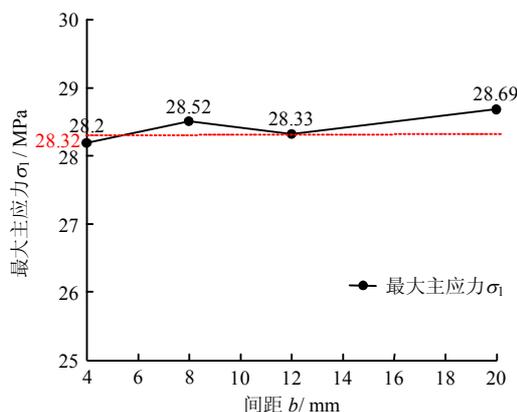


图 3 间距对最大主应力的影响
Fig.3 The influence of spacing on the maximum principal stress

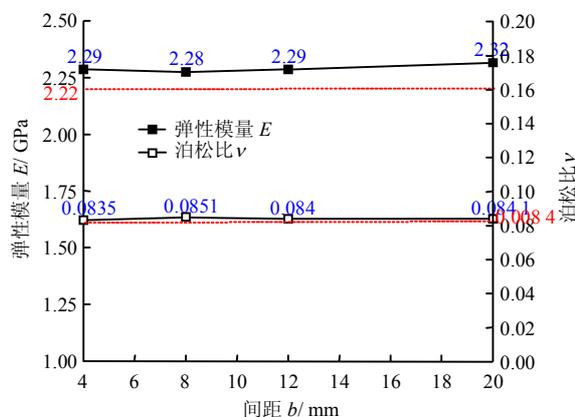


图 4 间距对弹性模量和泊松比的影响
Fig.4 The influence of spacing on elastic modulus and Poisson's ratio

通过图 3、4 数据的分布状态，经计算可知，平行双裂隙岩体（平均强度 28.44 MPa、平均弹性模

量 2.3 GPa 和平均泊松比 0.084 2) 与对应的单裂隙岩体的力学性质近似相等。

据图 5 所示, 不同间距双裂隙岩体主破裂面均起始于裂隙端部, 并在两条裂隙间的某一位置产生一条近似垂直裂隙方向的贯通裂纹直至另一条裂隙, 并沿着第 2 条裂隙的方向继续延伸, 直至贯通整个试件。随着裂隙间距的增大, 裂隙的边界条件发生变化, 破坏形式随之改变, PJ1、PJ2 裂隙的尖端产生近似平行于最大主应力方向的张拉破坏; PJ3、PJ4 的尖端产生沿裂隙扩展的剪切破坏。



图 5 平行双裂隙岩体破坏形态

Fig.5 Failure modes of specimens with two parallel cracks

3.2 倾角对岩体力学特性的影响

平行双裂隙倾角 $\theta_1 = \theta_2$ 分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° , 双裂隙迹长 $a_1 = a_2 = 20 \text{ mm}$, 间距 $b = 12 \text{ mm}$, 试验温度 $T = -10^\circ\text{C}$, 围压 $\sigma_3 = 8 \text{ MPa}$, 其中 HB1 和 HB2 为补做试验。

图 6 所示, 倾角不同, 裂隙岩体的偏应力大小也不相同, PQ5 最大, PQ4 最小; 弹性模量大小也不相等, 计算相关力学参数列于表 3。

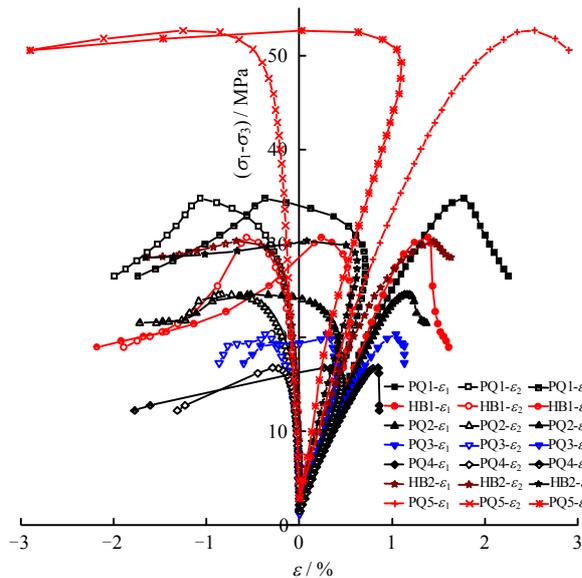


图 6 不同倾角裂隙岩体应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of fractured rock with different dip angles

表 3 倾角对力学特性的影响

Table 3 The influence of dip angles on rock mechanical properties

编号	倾角 $\theta / (^\circ)$	最大主应力 σ_1 / MPa	弹性模量 E / GPa	泊松比 ν	轴向应变 ϵ_1	径向应变 ϵ_2
PQ1	0	42.82	2.24	0.107	0.017 7	0.010 7
HB1	15	38.63	2.24	0.103	0.013 8	0.005 8
PQ2	30	32.55	2.37	0.098	0.011 6	0.008 4
PQ3	45	28.33	2.29	0.084	0.010 4	0.003 7
PQ4	60	24.76	2.05	0.071	0.008 5	0.002 9
HB2	75	38.29	2.31	0.126	0.014 4	0.006 8
PQ5	90	60.68	2.61	0.170	0.025 0	0.013 0

表 3 给出不同倾角岩体的力学参数, 将双裂隙岩体和对应的单裂隙岩体 (迹长、倾角与 PQ 试件相同) 的最大主应力绘于图 7, 弹性模量和泊松比绘于图 8, 双裂隙岩体的破坏形态绘于图 9。

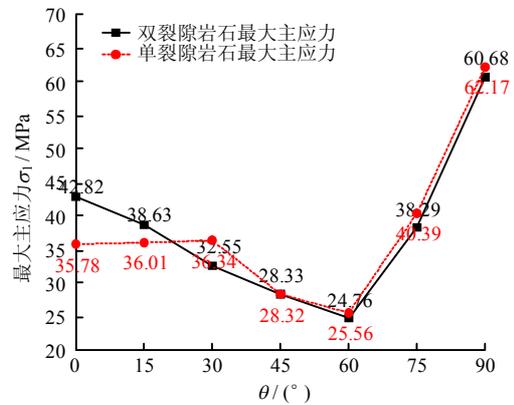


图 7 倾角对岩体最大主应力的影响

Fig.7 The influence of dip angles on the maximum principal stress

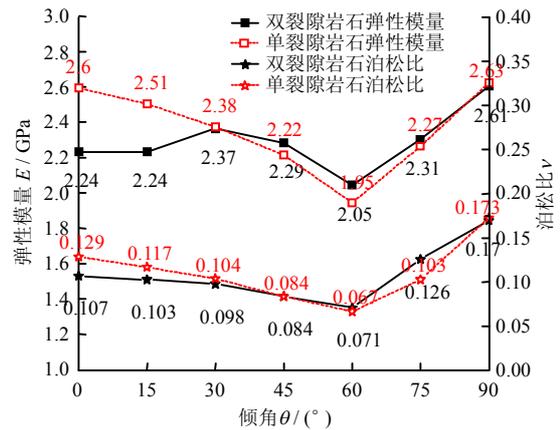


图 8 倾角对弹性模量和泊松比的影响

Fig.8 The influence of dip angles on elastic modulus and Poisson's ratio

由图 7 可知, 倾角较小时 ($0^\circ \leq \theta_1 = \theta_2 \leq 30^\circ$), 平行双裂隙岩体抗压强度与单裂隙岩体抗压强度存在一定的差异性, 无明显的规律可循; 当倾角 $\theta_1 = \theta_2 \geq 30^\circ$ 时, 平行双裂隙岩体的强度和变化规律与单裂隙岩体的强度和变化规律相同, 因此, 可

认为平行双裂隙岩体的强度近似等于单裂隙岩体的抗压强度。

由图 8 可知，弹性模量和泊松比也表现出与最大主应力相似的变化规律，① 裂隙倾角较小（ $0^\circ \sim 30^\circ$ ）时，平行双裂隙岩体的弹性模量和泊松与单

裂隙试件的弹性模量和泊松比数值差异较大，相关性差；② 弹性模量与最大主应力在倾角为 60° 时最小；倾角 90° 时最大，且近似等于完整试件的弹性模量和最大主应力值；③ 泊松比在倾角 45° 时最小，倾角 90° 时最大。

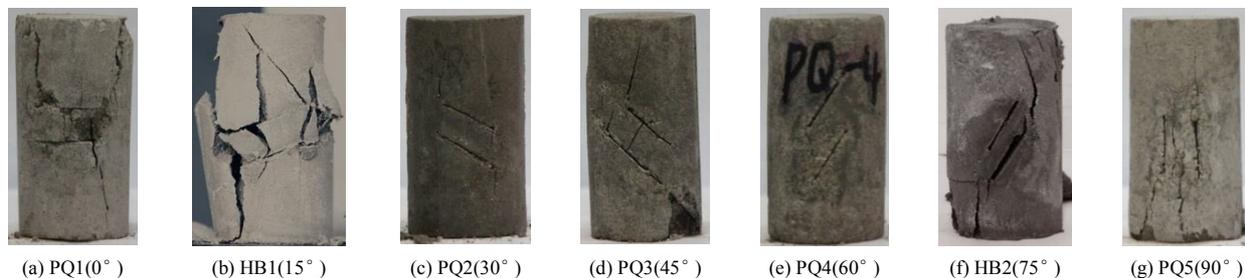


图 9 平行双裂隙岩体破坏形态
Fig.9 Failure modes of specimens with two parallel cracks

如图 9 所示，平行双裂隙岩体的破坏形态随倾角的变化而变化，倾角为 0° 时，破坏形态为 X 型，起裂点均在裂隙的端部，并且两条裂隙间的岩桥损伤较大；倾角为 15° 时，主破裂面是一个由裂隙、岩桥及裂隙两侧的岩体组成的破碎带，破碎带完全被压碎；倾角在 30° 、 45° 、 60° 时，破坏形式较统一，破裂面均由一条裂隙开始，贯穿岩桥，到达另一条裂隙，在第 2 条裂隙端部继续扩展，直至试件整体破坏，不同的是贯穿岩桥的位置不同， 30° 和 60° 时，贯穿起始点在端部， 45° 时贯穿起始点在中间；倾角为 75° 时，破裂面沿其中一条裂隙，裂隙端部产生张拉裂纹；倾角 90° 时，裂隙试件的破坏模式为典型的张拉破坏，破裂面不沿裂隙延展。

3.3 迹长对岩体力学特性的影响

平行双裂隙迹长 a_1 、 a_2 分别为 4、10、20、30 mm，倾角 $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ 、间距 $b = 12$ mm、试验温度 $T = -10^\circ\text{C}$ 、围压 $\sigma_3 = 8$ MPa。去除重复性试验，裂隙试件编号及力学参数列于表 4。

表 4 迹长对裂隙岩体力学特性的影响
Table 4 The influence of trace lengths on rock mechanical properties

编号	迹长 a_1/a_2	最大主应力 σ_1/MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	轴向应变 ε_1	径向应变 ε_2
PL1	4/4	52.59	2.47	0.152	0.022 0	0.013 7
PL2	4/10	38.24	2.34	0.139	0.014 6	0.010 5
PL3	10/10	32.35	2.29	0.140	0.013 2	0.005 3
PL4	4/20	29.82	2.19	0.080	0.010 5	0.004 8
PL5	10/20	26.31	2.11	0.055	0.011 6	0.007 4
PL6	20/20	24.12	2.07	0.066	0.007 3	0.001 7
PL7	4/30	25.82	2.66	0.056	0.008 6	0.002 6
PL8	10/30	23.53	2.58	0.065	0.008 7	0.002 3
PL9	20/30	22.17	2.28	0.056	0.011 5	0.002 5
PL10	30/30	21.19	1.97	0.085	0.008 8	0.002 4

由表可知，裂隙岩体的力学参数同时受两条迹长影响，以最大主应力为例，将不同迹长对应的最大主应力绘成三维曲面图（见图 10）。

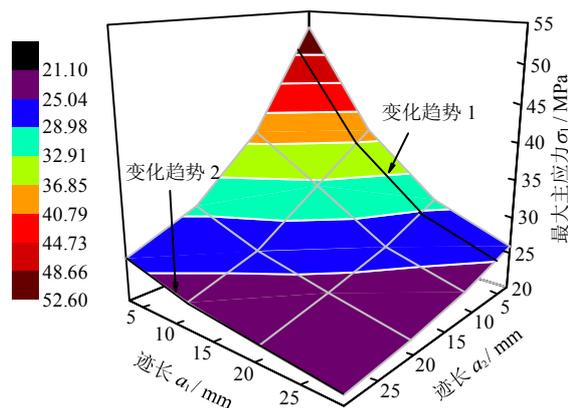


图 10 迹长对最大主应力的影响
Fig.10 The influence of trace lengths on the maximum principal stress

如图所示，双裂隙岩体的强度受两条裂隙迹长大小影响显著，强度与两条迹长形成一个对称的曲面，该曲面与任意截面相交所形成的曲线，即为一条迹长确定时（大小为坐标值），岩体强度随另一条迹长的变化曲线。图 10 包含了平行双裂隙岩体强度随迹长变化的全部情况。

以图 10 变化趋势 1、2 为例，分别代表一条裂隙迹长为 4、30 mm 时，岩体强度随另一条裂隙迹长的变化规律。当一条裂隙为 30 mm 时，岩体强度几乎不随另一条裂隙迹长改变而改变；而当一条裂隙迹长为 4 mm 时，岩体强度受另一条裂隙迹长影响显著。

由此可见，裂隙的强度不仅与两条迹长的大小

有关，还与两条裂隙的迹长比密切相关。为了弄清岩体性质与迹长的具体关系，引入迹长比 γ ，用于表述两条裂隙迹长的比值， n_σ 、 n_E 、 n_ν 分别代表强度折减系数、弹性模量折减系数和泊松比折减系数，按式 (2) 计算，计算结果列于表 5。

$$n_\sigma = \frac{\sigma_1}{\sigma_0}, \quad n_E = \frac{E_1}{E_0}, \quad n_\nu = \frac{\nu_1}{\nu_0} \quad (2)$$

式中： σ_1 、 E_1 、 ν_1 为不同迹长裂隙岩体的最大主应力、弹性模量和泊松比； σ_0 、 E_0 、 ν_0 为对应的单裂隙岩体的最大主应力、弹性模量和泊松比。

表 5 迹长对岩体力学特性的影响
Table 5 The influence of trace lengths on rock mechanical properties

迹长 a_1 / mm	迹长 a_2 / mm	迹长比 γ	最大主应力 σ_1 / MPa	强度折减系数 n_σ	弹性模量 E / GPa	弹模折减系数 n_E	泊松比 ν	泊松比折减系数 n_ν
4	0	0.00	56.52	1.00	2.56	1.00	0.17	1.000
	4	1.00	52.59	0.93	2.47	0.97	0.152	0.894
	10	2.50	38.24	0.68	2.34	0.91	0.139	0.818
	20	5.00	29.82	0.53	2.19	0.86	0.081	0.476
	30	7.50	25.85	0.46	2.01	0.79	0.042	0.247
10	0	0.00	33.91	1.00	2.38	1.00	0.137	1.000
	4	0.40	38.24	1.13	2.34	0.98	0.139	1.015
	10	1.00	32.35	0.95	2.29	0.96	0.14	1.022
	20	2.00	26.31	0.78	2.11	0.89	0.072	0.526
	30	3.00	23.53	0.69	1.98	0.83	0.043	0.314
20	0	0.00	28.32	1.00	2.22	1.00	0.084	1.000
	4	0.20	29.82	1.05	2.19	0.99	0.081	0.964
	10	0.50	26.31	0.93	2.11	0.95	0.072	0.857
	20	1.00	24.12	0.85	2.07	0.93	0.066	0.786
	30	1.50	22.17	0.78	1.98	0.89	0.043	0.512
30	0	0.00	25.57	1.00	2.09	1.00	0.044	1.000
	4	0.13	25.82	1.01	2.01	0.96	0.042	0.955
	10	0.33	23.53	0.92	1.98	0.95	0.043	0.977
	20	0.67	24.12	0.94	1.98	0.95	0.043	0.977
	30	1.00	21.19	0.83	1.97	0.94	0.043	0.966

将表 5 中的折减系数和迹长比绘于图 11~13 中，并对散点进行指数拟合，列于式 (3)，对应的相关系数 R 分别为 0.887、0.838 和 0.694，相关性较好。因此，在迹长和单裂隙岩体参数已知时，可通过式 (3) 求得双裂隙岩体的强度、弹性模量和泊松比。

$$\left. \begin{aligned} n_\sigma &= 0.348 + 0.639 \exp\left(-\frac{\gamma - 0.339}{3.874}\right) \\ n_E &= 0.749 + 0.205 \exp\left(-\frac{\gamma - 0.637}{4.525}\right) \\ n_\nu &= 0.144 + 0.754 \exp\left(-\frac{\gamma - 0.641}{3.706}\right) \end{aligned} \right\} (3)$$

图 14 给出平行双裂隙岩体随迹长变化的破坏形态。以一组试件 PL1、PL2、PL4、PL7 为例，该组试件中一条裂隙 a_1 的迹长为 4 mm， a_2 的迹长分别为 4、10、20、30 mm。PL1 试件为典型的剪切破坏，试件中部裂隙处破碎严重，但破坏形式不受裂隙影响；PL2 主破裂面为剪切破坏，但在主破裂面与 a_2 裂隙相交处，形成沿 a_2 裂隙发展的次破裂面，

笔者重复 3 次 PL2 试验，得到的结果不完全相同，有两组试验是沿 a_2 裂隙剪切破坏，有一组是图 14 所示的破坏形式，笔者认为，PL2 试件的破坏形态具有不确定性，裂隙分布状态处于岩体破坏形态受裂隙影响和不受裂隙影响的临界状态；PL4 和 PL7 试件的 a_1 与 a_2 数值差较大，试件产生沿较大裂隙延

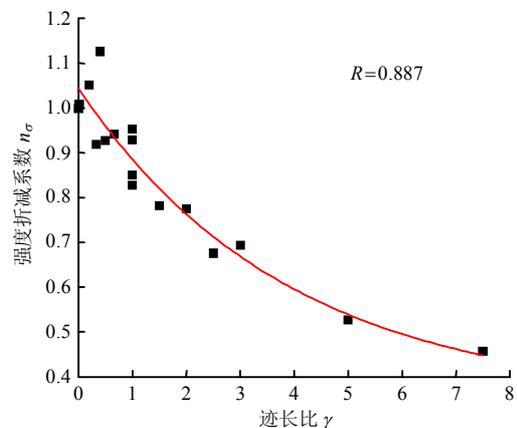


图 11 强度折减系数与迹长比的关系
Fig.11 The relationship between the strength reduction factor and trace length ratio

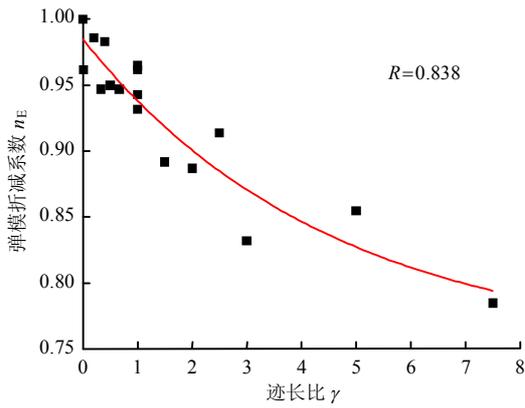


图 12 弹模折减系数与迹长比的关系

Fig.12 The relationship between the elastic modulus reduction factor and trace length ratio

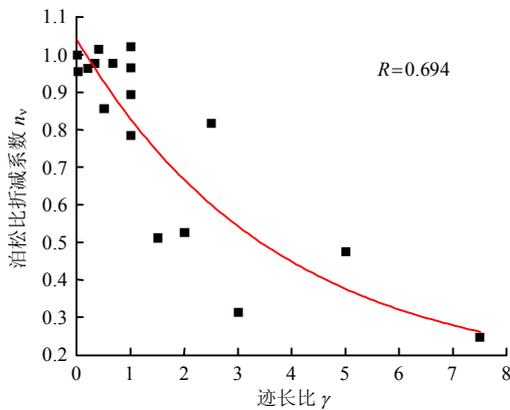


图 13 泊松比折减系数与迹长比的关系

Fig.13 The relationship between Poisson's ratio reduction factor and trace length ratio

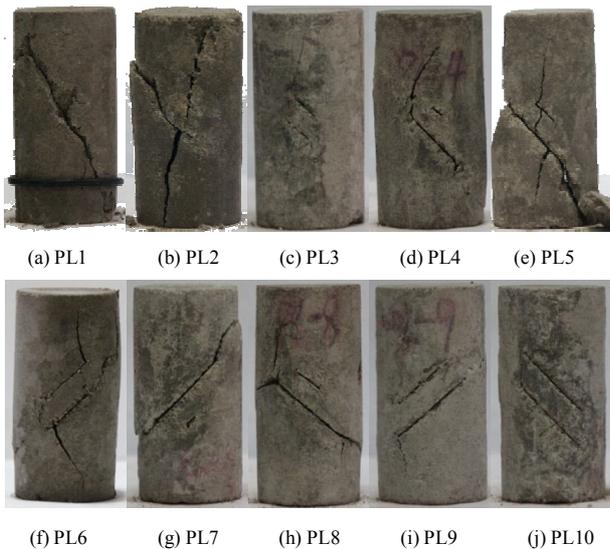


图 14 平行双裂隙岩体破坏形态

Fig.14 Failure modes of two parallel fractured rock

展的剪切滑移破坏,短裂隙不影响试件的破坏形态。同样, PL2、PL3、PL5 和 PL8, PL4、PL5、PL6 和 PL9, PL7、PL8、PL9 和 PL10 也能得到相似的

变化规律。

表 5 和图 14 所示,平行裂隙岩体的破坏形态可以划分为 3 类^[17-18]: 第 1 类,裂隙 a_1 迹长较小(贯通率 $<25\%$),且裂隙 a_2 与 a_1 的迹长比在 $0\sim 2.5$,裂隙岩体的破坏形态与裂隙无关,取决于岩石本身的力学性质;第 2 类,裂隙 a_1 迹长较大(贯通率 $>75\%$),且裂隙 a_2 与 a_1 的迹长比 <1 ,此时裂隙岩体的破坏形态主要由裂隙 a_1 决定,裂隙 a_2 不影响试件的破坏形态;第 3 类,裂隙 a_1 介于前两种情况之间(贯通率在 $25\%\sim 75\%$),裂隙 a_2 与 a_1 的迹长比在 1 左右,破坏形态受裂隙 a_1 和 a_2 共同影响,两条裂隙及之间的岩桥形成一个破裂区,破裂面起始于破裂区尖端,产生两种破坏形式:第 1 种沿与裂隙成 90° 的方向直至贯穿上下端面;第 2 种沿长裂隙继续破坏,延伸至试件侧面,形成沿裂隙发展的剪切破坏,值得注意的是岩体沿哪个方向破坏,取决于裂隙迹长的大小。

4 结 论

(1) 平行双裂隙岩体的强度、弹性模量和泊松比不随裂隙间距的改变而改变,数值与对应的单裂隙岩体近似相等;试件破坏形态起始于一条裂隙端部,贯穿裂隙间岩桥并沿另一条裂隙延展,最终导致试件整体破坏;破坏形态随间距的增加呈现张拉破坏向剪切破坏转移。

(2) 平行双裂隙岩体的强度、弹性模量和泊松比在倾角大于 30° 时,可按对应的单裂隙岩体计算;倾角小于 30° 时,其力学参数与单裂隙岩体参数差异较大,无规律可循;破坏形态与倾角关系密切,倾角较小时 ($<30^\circ$),裂隙尖端应力集中并相互贯通,破坏形式以受压破坏为主,岩桥破损严重,倾角在 30° 、 45° 、 60° 时,破坏形式以贯穿岩桥的剪切破坏为主,但岩桥起裂位置不同, 30° 和 60° 时,岩桥起裂点在端部, 45° 时起裂点在中间,倾角为 75° 时,破坏形式以沿裂隙扩展的张拉破坏为主,倾角为 90° 时,破坏形式为张拉破坏,且与裂隙无关。

(3) 平行双裂隙岩体的力学性质及破坏形态受迹长影响显著,折减系数与迹长比近似呈指数关系,可通过拟合式估算双裂隙岩体的力学参数;迹长和迹长比较小时(贯通率 $<25\%$,迹长比 <2.5),破坏形态与裂隙无关,迹长较大(贯通率 $>75\%$)、迹长比 <1 时,破坏形态取决于迹长较大的裂隙,迹长介于两者之间时(贯通率 $25\%\sim 75\%$ 、迹长比 ≈ 1),破坏形态受两条裂隙共同影响。

参 考 文 献

- [1] 杨米加, 贺永年. 破裂岩石的力学性质分析[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(1): 9—13.
YANG Mi-jia, HE Yong-nian. Analysis of properties of broken rock[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2001, 30(1): 9—13.
- [2] 刘红岩, 黄好诗, 李楷兵, 等. 预制节理岩体试件强度及破坏模式的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1235—1241.
LIU Hong-yan, HUANG Yu-shi, LI Kai-bing, et al. Test study of strength and failure mode of pre-existing jointed rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(5): 1235—1241.
- [3] 黄达, 岑夺丰, 黄润秋. 单裂隙砂岩单轴压缩的中等应变率效应颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 535—545.
HUANG Da, CEN Duo-feng, HUANG Run-qiu, et al. Influence of medium strain rate on sandstone with a single pre-crack under uniaxial compression using PFC simulation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(2): 535—545.
- [4] 肖桃李, 李新平, 郭运华. 三轴压缩条件下单裂隙岩石的破坏特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3251—3256.
XIAO Tao-li, LI Xin-ping, GUO Yun-hua. Experimental study of failure characteristic of single jointed rock mass under triaxial compression tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(11): 3251—3256.
- [5] 肖桃李, 李新平, 贾善坡. 深部单裂隙岩体结构面效应的三轴试验研究与力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1666—1673.
XIAO Tao-li, LI Xin-ping, JIA Shan-po. Triaxial test research and mechanical analysis based on structure surface effect of deep rock mass with single fissure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(8): 1666—1673.
- [6] 李宏哲, 夏才初, 王晓东, 等. 含节理大理岩变形和强度特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2118—2123.
LI Hong-zhe, XIA Cai-chu, WANG Xiao-dong, et al. Experimental study on deformation and strength properties of jointed marble specimens[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(10): 2118—2123.
- [7] 向天兵, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 三向应力状态下单结构面岩石试样破坏机制与真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2908—2916.
XIANG Tian-bing, FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui, et al. Rock failure mechanism and true triaxial experimental study of specimens with single structural plane under three-dimensional stress[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10): 2908—2916.
- [8] PRUDENCIO M, VAN SINT JAN M. Strength and failure modes of rock mass models with non-persistent joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 2007, 44(6): 890—902.
- [9] LI J L, WANG L H, WANG X X, et al. Research on unloading nonlinear mechanical characteristics of jointed rock masses[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2010, 2(4): 357—364.
- [10] BAHAAADDINI M, SHARROCK G, HEBBLEWHITE B K. Numerical investigation of the effect of joint geometrical parameters on the mechanical properties of a non-persistent jointed rock mass under uniaxial compression[J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 49(1): 206—225.
- [11] 杨昊. 饱冰裂隙岩体力学特性和破坏形态试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.
YANG Hao. Experimental study on mechanical properties and failure modes of ice-saturated fractured rock[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2015.
- [12] 张志刚, 乔春生, 李晓. 单节理岩体强度试验研究[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(4): 34—39.
ZHANG Zhi-gang, QIAO Chun-sheng, LI Xiao. Experimental study on the strength of single joint rock mass[J]. *China Railway Science*, 2007, 28(4): 34—39.
- [13] 刘光廷, 叶源新, 胡昱, 等. 单裂隙砂砾岩体变形规律研究[J]. 水利发电学报, 2007, 26(5): 25—30.
LIU Guang-ting, YE Yuan-xin, HU Yu, et al. Study on the deformation law of calcirudite rock mass with a single fracture[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2007, 26(5): 25—30.
- [14] 李晓红, 卢义玉. 岩石力学实验模拟技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 25—43.
LI Xiao-hong, LU Yi-yu. Rock mechanics experiment simulation technology[M]. Beijing: Science Press, 2007: 25—43.
- [15] 单仁亮, 杨昊, 郭志明, 等. 负温饱水红砂岩三轴压缩强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 2): 3657—3664.
SHAN Ren-liang, YANG Hao, GUO Zhi-ming, et al. Experimental study of strength characters of saturated red sandstone on negative temperature under triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(Supp.2): 3657—3664.