

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0989

冻结饱水单裂隙岩体力学特性试验研究

杨 昊^{1,2}, 张晋勋¹, 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: 通过相似单裂隙岩体冻结三轴试验, 研究裂隙倾角、迹长、隙宽、围压和温度对单裂隙岩体力学特性的影响, 试验结果表明: 裂隙岩体力学参数与倾角呈二次函数分布, 与迹长呈指数函数分布, 通过拟合式(3)可近似计算岩体强度; 岩体强度与围压呈线性分布, 负温条件下泊松比和弹性模量受围压影响较小; 隙宽小于 0.1 mm 或大于 0.8 mm 时, 岩体强度随隙宽增大而减小, 隙宽在 0.1~0.8 mm 之间时, 岩体力学参数几乎不受隙宽影响; 岩体强度随温度降低而增大的作用机制是岩体孔隙水和裂隙水冻结成冰, 增大了颗粒间的凝聚力和摩擦角; 裂隙倾角影响破裂面的起始位置, 迹长影响破裂面的扩展规模, 围压影响破裂面的延伸方向; 倾角对岩体强度影响最大, 迹长次之, 温度影响最小。

关 键 词: 单裂隙岩体; 裂隙产状; 冻结温度; 力学性质

中文分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)04-1245-11

Experimental study on mechanical properties of frozen saturated single fractured rock mass

YANG Hao^{1,2}, ZHANG Jin-xun¹, 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: In this paper, a series of triaxial compression experiments was performed to investigate the effects of fracture dip, trace length, gap width, confining pressure and temperature on mechanical properties of the single-fractured rock mass. Experimental results show that the mechanical parameters of rock mass exhibit the quadratic function with dips and the exponential distribution with trace length, respectively. Moreover, the fitting formula (3) is employed to calculate rock mass strength approximately. It is found that rock mass strength linearly increases with the confining pressure. However, Poisson ratio and elastic modulus under negative temperature are independent of the confining pressure. The strength of rock mass decreases with the increase of gap width when it is less than 0.1 mm or greater than 0.8 mm. However, mechanical parameters are irrelevant to the gap width when it locates between 0.1 mm and 0.8 mm. Water, existing in pores and fractures, freezes under negative temperature so that both the cohesion and friction angle between rock particles are increased. Hence, the change of water form is the reason why the rock mass strength increases with reducing temperature. Results also show that the fracture angle affects the initial position of failure surface, the trace length affects the expansion scale of failure surface, and the confining pressure influences the extension direction of failure surface. In addition, the crack dip is the most sensitive influencing parameter to the strength of rock mass, followed by trace length, with the least temperature.

Keywords: single-fractured rock; fracture morphology; frozen temperature; mechanical properties

1 引 言

无论岩体结构多么复杂, 大致可以划分 4 种类型: 含单一裂隙岩体、含两条平行裂隙岩体、含两条相交裂隙岩体以及由以上 3 种基本裂隙形态构成的多裂隙岩体^[1]。由此可见, 单裂隙是最简单、最

基础、最重要的岩体构成形式, 单裂隙岩体的力学性质也是研究复杂裂隙岩体力学性质的基石。

经过国内外学者坚持不懈的努力研究, 单裂隙岩体力学特性已经取得了一定的成果。肖桃李^[2]、李廷春^[3]、陈新^[4]、张伟^[5]等通过人工材料模拟单裂隙岩体室内试验, 研究裂隙岩体倾角^[2]、迹长(连

收稿日期: 2016-05-03

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: 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

通率)^[3]、围压^[4]、应变速度^[5]等因素对岩体力学特性及破坏形态的影响；黄达^[6]、肖桃李^[7]等分别采用数值模拟和相似试验的方法，研究单裂隙岩体的破坏形态，并详细剖析各影响因素的作用机制；此外，蒋明镜^[8]、韩建新^[9]、Jaeger^[10]等采用理论分析的方法，研究岩体的强度与裂隙面的倾角、凝聚力、摩擦角和岩块的凝聚力、摩擦角之间的关系。

认真归纳前人的研究成果，得到以下几点共识：①裂隙岩体的强度受裂隙倾角、迹长、贯通率、围压等因素共同影响^[2-5]；②裂隙岩体破坏形态主要为剪切破坏，分为沿裂隙面剪切破坏和岩块剪切破坏两种形式，并且破坏形态受倾角和围压影响显著^[6, 10]；③裂隙岩体受压时，裂隙两端压应力集中，裂隙上下面拉应力集中，并且集中程度随倾角增大逐渐减小^[7]；④压剪破坏岩体实测值与理论值差别较小，拉剪破坏岩体实测值与理论值差别较大^[8-9]。

虽然前人已经做了大量的研究，但仍有一些问题需要我们完善：①考虑负温条件的岩体力学特性研究较少；②研究成果基于不同的工程背景，得到的规律无法形成系统的研究体系；③研究成果多集中于单因素分析，多因素分析鲜有报道；④岩体影响因素众多，但没有区分哪些是主要因素，哪些是次要因素。

因此，本文以梅林庙矿冻结井壁工程为依托^[11-12]，以预制单裂隙类岩石（模拟冻结裂隙红砂岩）为研究对象，研究裂隙倾角、迹长、隙宽、围压、温度对单裂隙岩体力学特性的影响，研究成果具有重要的工程价值和指导意义。

2 试验方案

裂隙岩体试件的获取有两种方法：①按一定角度直接钻取岩芯。优点是试验对象为原岩，获得的参数及变化规律准确，可直接用于理论分析和工程实践，缺点是实际岩体很难同时满足岩块的统一性和裂隙的差异性；②通过相似配比获得类岩石试样。优点是可获得满足试验要求的各种产状的岩体试件，缺点是试验对象并非真实的岩石，试验结果的有效性会有一定的质疑。考虑到试验的数量及难易程度，最终采用第 2 种方法制作裂隙试件。

2.1 相似材料的选取

参考文献^[13]，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 、凝聚力 c 、内摩擦角 φ 为控制参量。

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

根据相似理论，可得式（1），因此，在保证水泥砂浆和红砂岩的力学参数相等时，可以利用水泥砂浆（下称类岩石）代替红砂岩进行试验研究。

表 1 为两种材料的力学参数，对比分析可知，类岩石和红砂岩在负温条件下的强度参数和变形参数近似相等，满足试验要求。

表 1 类岩石材料与红砂岩力学参数

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

岩石类型	单轴强度 σ_c /MPa	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν	凝聚力 c /MPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)
红砂岩 (-10 $^\circ\text{C}$)	43.07	2.49	0.172	14.2	22.5
类岩石 (-10 $^\circ\text{C}$)	44.71	2.51	0.173	16.1	18.7

2.2 试件制作

考虑到红砂岩的各向异性和剪胀性，在表 1 类岩石配比不变的基础上，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%（人工级配砂粒孔径筛余从大到小按比例 0: 2: 3: 4: 6: 5 混合）制作试件，试件尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ，冻结饱水裂隙试件的详细制作过程参考文献^[12]。

如图 1 所示，单裂隙岩体迹长为 a （迹长中点与母线中点重合，且裂隙面的中心在轴线上）；裂隙的宽度为 D ；裂隙的倾角为 θ 。

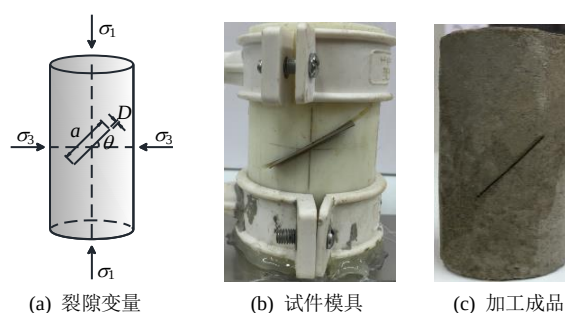


图 1 单裂隙岩体示意图

Fig.1 The schematic of single fractured rock mass

2.3 试验加载

负温环境下，将预制试件两端加上钢制压头，套上乳胶套密封，中部安装径向位移传感器，装入压力室，泵入负温航空硅油，打开冷浴系统直至油温达到试验温度，恒定 2 h 后，进行加载试验。轴向加载采用位移控制，加载速率为 0.12 mm/min，围压按静水压力加载，待围压达到设定值后，保持

围压不变, 继续加轴压, 直至试件破坏^[14]。

3 试验结果及分析

3.1 倾角对单裂隙岩体力学特性的影响

裂隙倾角 θ 分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° , 迹长 a 分别为 4、10、20、30 mm, 试验温度 $T = -10^\circ\text{C}$, 围压 $\sigma_3 = 8\text{ MPa}$, 隙宽 D 取 0.1 mm。参考文献[12]计算岩体最大主应力及变形参数, 列于表 2。

表 2 不同倾角和迹长岩石力学参数
Table 2 Mechanical parameters of fractured rock mass under different dips and trace lengths

编号	倾角 $\theta/(^\circ)$	迹长 a/mm	最大主应力 σ_1/MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
JD1	0	4	59.02	2.63	0.175
JD2	0	10	53.26	2.55	0.159
JD3	0	20	35.78/44.88	2.41	0.129
JD4	0	30	23.25/45.48	2.15	0.122
JD5	15	4	57.31	2.62	0.174
JD6	15	10	48.43	2.53	0.152
JD7	15	20	40.89	2.41	0.115
JD8	15	30	39.07	2.21	0.098
JD9	30	4	56.70	2.62	0.172
JD10	30	10	43.24	2.49	0.146
JD11	30	20	36.34	2.38	0.105
JD12	30	30	32.20	2.29	0.103
JD13	45	4	56.52	2.56	0.170
JD14	45	10	33.91	2.38	0.137
JD15	45	20	28.32	2.22	0.084
JD16	45	30	25.70	2.09	0.044
JD17	60	4	53.22	2.51	0.172
JD18	60	10	29.70	2.18	0.080
JD19	60	20	25.56	1.95	0.067
JD20	60	30	23.64	1.89	0.051
JD21	75	4	58.80	2.61	0.171
JD22	75	10	48.51	2.42	0.131
JD23	75	20	45.62	2.35	0.126
JD24	75	30	43.32	2.33	0.118
JD25	90	4	60.26	2.64	0.171
JD26	90	10	62.62	2.63	0.169
JD27	90	20	62.17	2.63	0.173
JD28	90	30	61.05	2.63	0.172

篇幅限制, 只给出 JD1~JD4 试件的应力-应变曲线 (如图 2 所示)。在 28 组试验中, 只有 JD3 和 JD4 这两组试件的应力-应变曲线发生跌落, 这一现象符合文献[4]描述的裂隙岩体在小倾角时, 出现多峰应力-应变曲线, 当裂隙迹长为 4 mm 和 10 mm 时, 并没有出现应力跌落现象, 并且岩体强度较大。笔者认为, 产生这一现象的主要原因在于 JD1 和 JD2 试件迹长较小, 岩桥面积较大, 承载时不会产

生突变现象。为方便下文岩体强度分析, 定义应力-应变曲线的峰值强度 σ_f 为岩体强度。

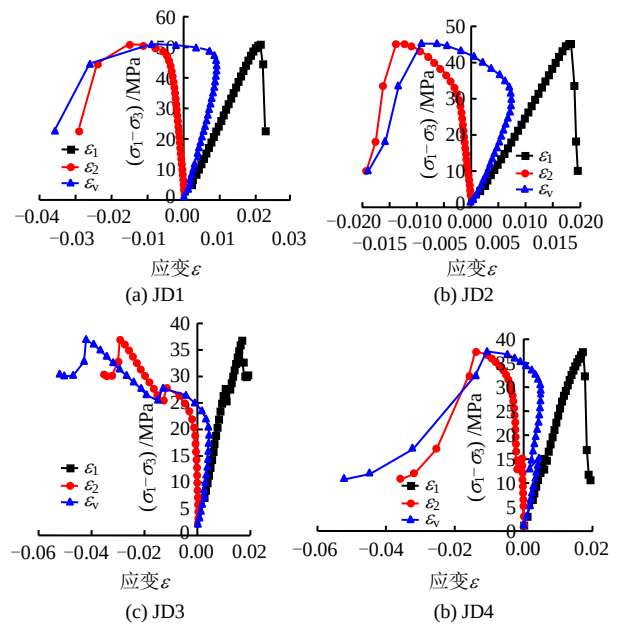


图 2 应力-应变曲线($\theta=0^\circ$)

Fig.2 Stress-strain curves ($\theta=0^\circ$)

图 3 给出了岩体强度随倾角的变化规律, 其中虚线为强度跌落值 (下同)。由图 3 和表 2 可知: ①当迹长为 4 mm (10%直径长度, 下同) 时, 岩体的抗压强度随倾角变化很小, 强度均值为 57.4 MPa, 方差为 4.5, 整体变化较小; ②迹长为 10 mm (25%) 时, 裂隙岩体的强度随倾角的增大, 先减小后增大, 最小值出现在倾角为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 之间, 最大值出现在 90° 时, 且强度值近似等于完整岩石的强度; ③迹长为 20 mm (50%) 和迹长为 30 mm (75%) 时, 裂隙试件的强度变化规律与迹长为 10 mm 时试件的变化规律相同, 即试件的强度随倾角的增大先减小后增大, 在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 之间, 裂隙岩体强度最小, 90° 时裂隙岩体强度最大, 强度近似等于完整岩石强度。

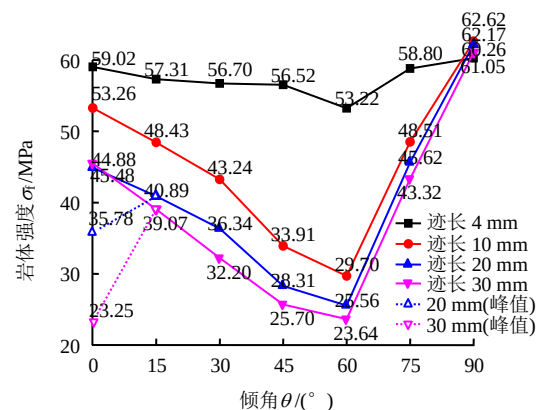


图 3 倾角对强度的影响

Fig.3 The effect of dip on strength

图 4 为变形参数与倾角的变化规律,分析可知:

- ①迹长 $<4\text{ mm}$ 时,裂隙试件的弹性模量和泊松比变化较小,近似认为岩体的变形参数不随倾角而改变;
- ②迹长为 10 mm 和 20 mm 时,裂隙试件的弹性模量和泊松比随倾角的增大先减小后增大,最小值出现在倾角为 60° 时,最大值出现在 90° 时;
- ③迹长为 30 mm 时,裂隙试件的弹性模量和泊松比的测量值波动较大,原因在于径向变形是通过计算径向应变仪放置在轴线中点处的 4 个接触点的径向位移平均值得到的,对于均质材料,径向变形是连续的,但裂隙岩体的径向位移是非连续的,尤其是贯通度较大的岩体,中点处的径向位移并不能准确反映裂隙岩体的变形特性。值得注意的是当裂隙的倾角为 90° 时,无论迹长如何变化,试件弹性模量和泊松比分别在 $2.6\sim 2.7\text{ GPa}$ 和 $0.168\sim 0.173$ 内小幅波动,且数值近似等于完整岩石试件的弹性模量 2.51 GPa 和泊松比 0.173 。

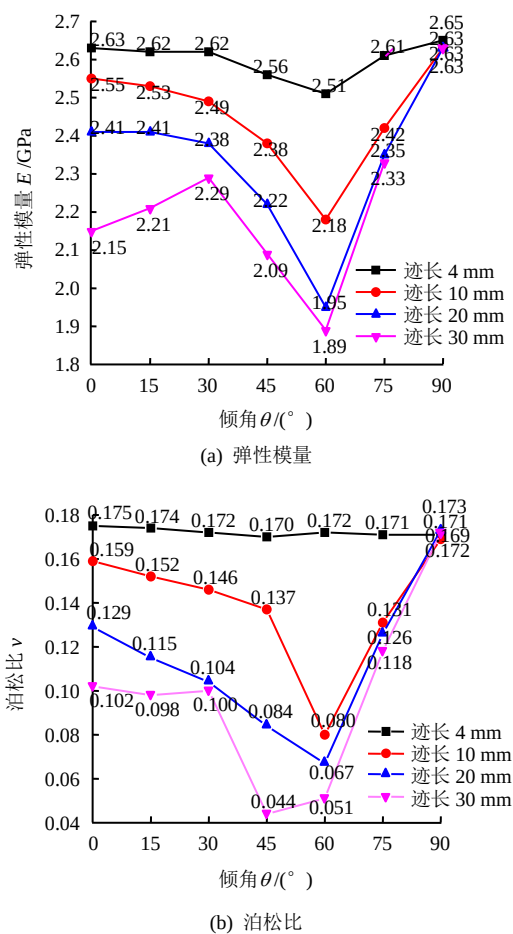


图 4 倾角对弹性模量及泊松比的影响
Fig.4 The effect of dip on elastic modulus and Poisson ratio

3.2 迹长对单裂隙岩体力学特性的影响

将表 2 中的数据以迹长为横坐标,强度、弹性

模量和泊松比为纵坐标,绘于图 5 中。

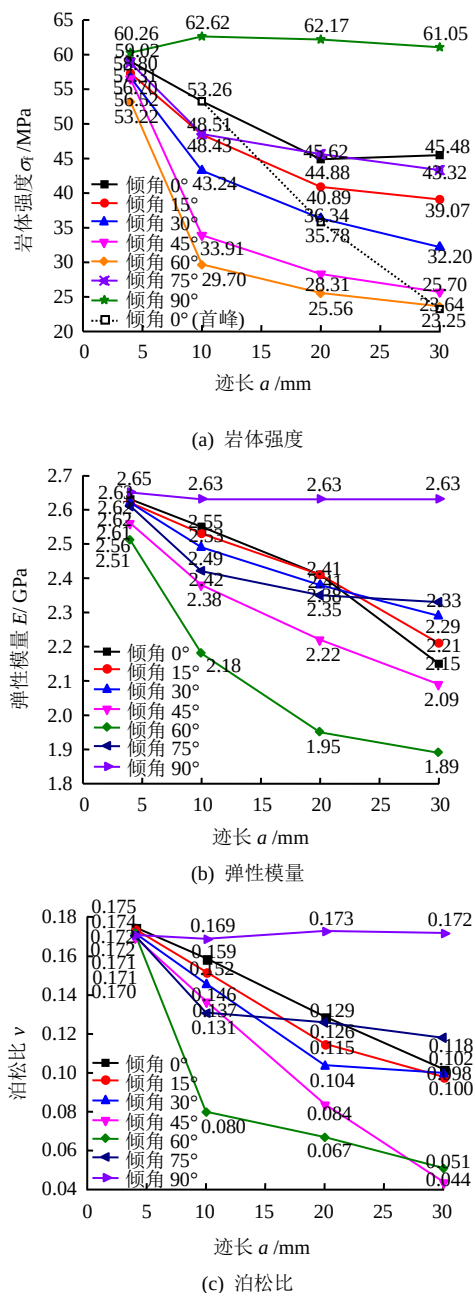


图 5 迹长对强度、弹性模量及泊松比的影响
Fig.5 The effect of trace length on strength, elastic modulus and Poisson ratio

图 5 为岩体强度和变形参数随迹长的变化规律,由图 5(a)可知:①倾角为 0° 时,裂隙岩体强度随迹长增大逐渐减小,减小速率相对缓慢(实线),若以应力跌落值作为岩体强度,那么岩体强度下降最迅速,原因在于裂隙倾角为 0° 时,裂隙两端部岩桥出现压应力集中,最先发生破坏,破坏荷载与迹长大小的平方负相关,因此,强度下降速率大于其他裂隙倾角岩体强度下降的速率;②倾角为 $15^\circ\sim 75^\circ$ 时,裂隙岩体的强度随迹长的增大而减小,其中

迹长在 4~10、10~20 mm 和 20~30 mm 这 3 个阶段内变化时, 裂隙岩体强度的下降速率不同, 在 4~10 mm 范围内下降速率最快, 在 20~30 mm 范围内下降速率最慢, 即贯通率在 25% 以内, 裂隙岩体强度衰减最快; ③倾角为 90° 时, 试件的强度不受迹长影响, 平均强度为 61.53 MPa, 近似等于完整试件强度 (60.3 MPa) [12]。

图 5(b)、5(c) 为迹长对弹性模量和泊松比的影响, 可以看出, 变形参数随迹长的变化规律与最大主应力随迹长的变化规律相似。①倾角为 90° 时, 弹性模量和泊松比不受迹长影响, 均值为 2.64 GPa 和 0.172, 与完整岩石的弹性模量 2.65 GPa 和泊松比 0.173 近似相等; ②倾角在 15°~75° 时, 弹性模量和泊松比随迹长的增大而减小, 倾角为 45° 和 60° 时, 弹性模量和泊松比的变化幅度明显大于 15°、30° 和 75°, 倾角为 15° 和 75° 时, 变形参数在迹长大于 20 mm 后 (贯通率 > 50%) 变化缓慢; ③倾角为 0° 时, 裂隙两端岩桥发生纯压破坏, 外荷载由裂隙填充物-冰和岩桥共同承担, 迹长较小时, 冰含量少, 强度小, 可忽略不计, 岩体变形特性取决于岩桥; 迹长较大时, 外荷载由岩桥和冰共同承担, 岩体变形特性取决于冰-岩复合体; 当裂隙贯通时, 岩体变形特性则完全取决于冰。

基于前面的研究, 岩体强度受裂隙倾角和迹长共同影响, 应同时分析这两个影响因素。为方便计算, 构建岩体强度与倾角和迹长的函数 $\sigma_f(a, \theta)$, 且应满足强度 σ_f 与倾角 θ 符合二次分布与迹长 a 符合指数分布 [2, 10]。

$$\sigma_f = A_1 + A_2 e^{(-a/A_3)} + [e^{(-a/A_3)} - 1](A_4 \theta + A_5 \theta^2) \quad (2)$$

式中: A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 为待定参数; 并且该函数还应满足下列边界条件:

(1) 倾角 $\theta = 0^\circ$, 岩体强度 σ_f 随迹长 a 增大而减小。

(2) 倾角 $\theta \in (0^\circ \sim 90^\circ)$, 岩体强度 σ_f 随迹长 a 增大近似指数递减; 迹长 $a = 0$ mm, 岩体强度 σ_f 即为完整岩石强度, 与倾角无关。

(3) 迹长 $a \in (0 \sim 40$ mm), 岩体强度 σ_f 与倾角 θ 呈抛物线关系。

通过 Origin 曲面拟合功能, 计算待定参数, 代入式 (2), 得

$$\sigma_f = 42.83 + 20.53 e^{(-a/36.17)} + [e^{(-a/36.17)} - 1](2.08\theta - 0.023\theta^2) \quad (3)$$

将拟合曲面绘于图 6, 相关系数 $R=0.893$, 可见, 构造函数 $\sigma_f(a, \theta)$ 与实测数据相关性较好。因此, 可通过式 (3) 估算不同倾角和不同迹长条件下, 裂隙岩体强度。

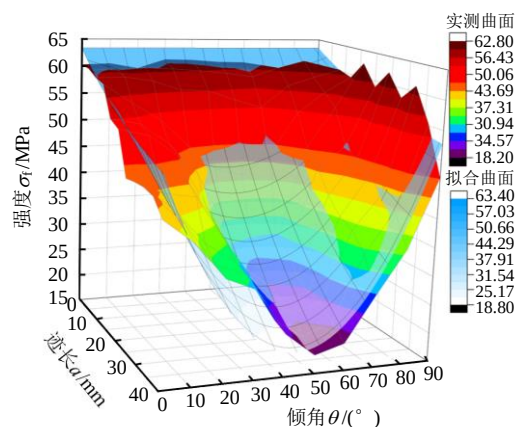


图 6 迹长和倾角对强度的影响
Fig.6 The effect of trace length and dip on strength

图 7 给出不同倾角、迹长裂隙岩体试件的破坏形态 (JD1~JD28), 破坏形态可分为 3 类: ①破裂面沿裂隙发展的剪切破坏, 代表试件有 JD7、JD8、JD11、JD12、JD15、JD16、JD19、JD22 和 JD24。特点: 裂隙迹长较大 (贯通率 > 50%), 岩体强度较小, 裂隙端部只产生翼裂纹, 无反翼裂纹; ②破裂面贯穿裂隙面的张拉破坏, 代表试件有 JD1、JD2、JD3、JD4、JD5、JD6、JD17、JD21、JD25、JD26、JD27、JD28。特点: 岩体强度较大, 形成多条平行于轴线方向的破裂面, 且破裂面形态几乎不受裂隙影响, 终、始点均在上下端面; ③前两种破坏形态的组合形式——拉剪破坏, 代表试件有 JD9、JD10、JD13、JD14、JD18、JD20 和 JD23。实际工程中这种破坏形式居多, 特点: 主破裂面沿裂隙方向延展, 但在裂隙端部或中部会产生多条次破裂面, 并延伸至试件端部, 岩体强度介于前两类试件强度之间, 破坏后会形成大块散体结构, 且各块体间联系较少。通过以上分析可知, 倾角影响破裂面的起裂位置, 迹长影响破裂面的扩展规模。

3.3 隙宽对单裂隙岩体力学特性影响

裂隙岩体宽度分别为 0.05、0.10、0.20、0.30、0.45、0.60、0.80、0.90 mm, 裂隙倾角 $\theta = 45^\circ$, 迹长 $a = 20$ mm, 试验温度 $T = -10^\circ\text{C}$, 围压为 $\sigma_3 = 8$ MPa。

图 8 为岩体应力-应变曲线, KD1、KD2、KD7 和 KD8 试件峰后出现应力强化现象。其中 KD1 强化段较长, 取台阶处的应力为试件强度; KD2、KD7 和 KD8 试件强化段较短, 取峰值强度作为岩体的强

度, 计算相关参数列于表3。

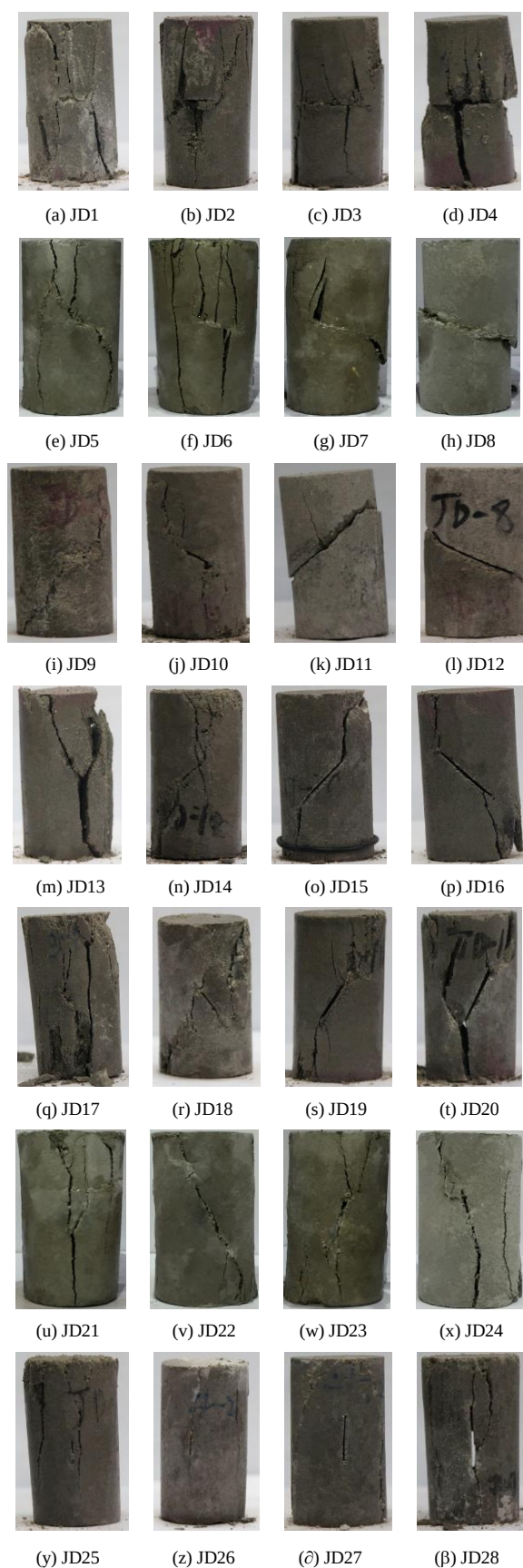


图7 不同迹长和倾角单裂隙岩体破坏形态

Fig.7 Failure modes of single fractured rock mass with different dips and trace lengths

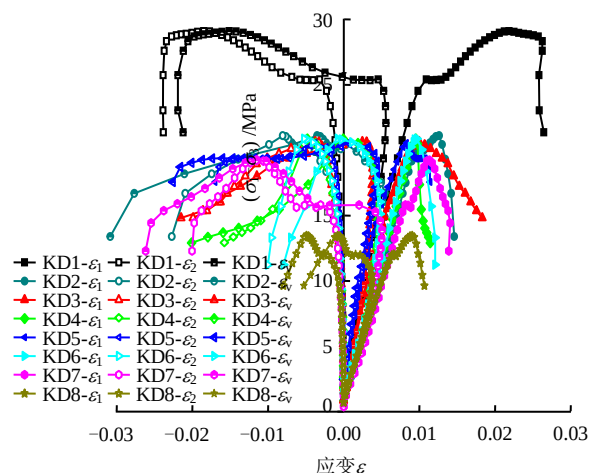


图8 不同裂隙宽度岩体应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of fractured rock mass with different gap widths

表3 不同裂隙宽度岩体力学参数

Table 3 Mechanical parameters of fractured rock mass with different gap widths

试验编号	裂隙宽度 /mm	强度 σ_1 /MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
KD1	0.05	33.41	2.39	0.087
KD2	0.10	28.44	2.25	0.082
KD3	0.20	28.64	2.34	0.091
KD4	0.30	28.86	2.18	0.084
KD5	0.45	28.55	2.26	0.090
KD6	0.60	28.88	2.41	0.084
KD7	0.80	23.81	2.10	0.071
KD8	0.90	20.03	1.83	0.062

如图9和表3所示, 岩体强度在隙宽为0.05 mm时最大为33.41 MPa, 在0.05~0.6 mm之间, 其值分别为28.44、28.64、28.86、28.55 MPa和28.88 MPa, 较其均值28.67 MPa分别变化了0.8%、0.1%、0.66%、0.42%和0.73%, 变化幅度较小, 当隙宽等于0.8 mm和0.9 mm时, 强度迅速下降, 因此, 可以认为饱冰裂隙岩体在隙宽小于0.05 mm (0.1%试件高度) 和大于0.8 mm (1%试件高度) 时, 隙宽对强度影响显著。

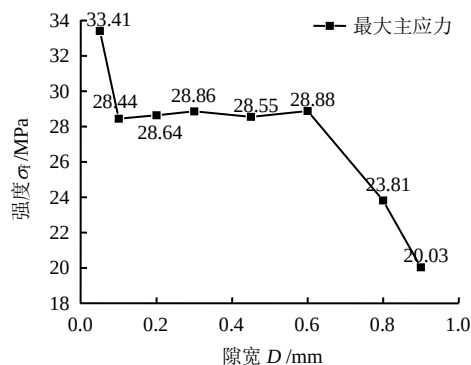


图9 隙宽对强度的影响

Fig.9 The effect of gap width on strength

图 10 为岩体变形参数随隙宽的变化规律, 当隙宽在 0.05~0.6 mm 时, 弹性模量分别为 2.39、2.25、2.34、2.18、2.26 GPa 和 2.41 GPa, 较平均值 2.305 GPa 分别变化 3.69%、2.39%、1.52%、5.42%、1.95%和 4.56%, 近似相等。当隙宽大于 0.8 mm 时, 弹性模量迅速降低, 产生这一现象的原因在于随着裂隙间距的增大, 岩桥的高度增大, 决定岩体强度因素由岩桥的承载力转变为岩桥的稳定性, 这一观点在图 11 中可以得到验证。泊松比随隙宽 (0.05~0.9 mm) 变化较小, 且数值也较小 (均值 0.081 4), 远小于完整岩石的泊松比 (0.174)。

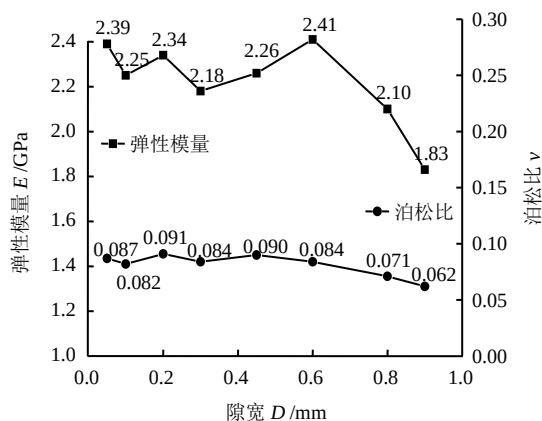


图 10 隙宽对弹性模量和泊松比的影响
Fig.10 The effect of gap width on elastic modulus and Poisson ratio

图 11 为不同隙宽岩体的破坏形态, 隙宽较小时 (KD1、KD2) 岩体破裂面沿裂隙发生剪切破坏, 破裂面比较粗糙, 裂隙端部岩桥呈压碎状态, 表面有颗粒剥落, 岩体发生延性破坏 (见图 8); 隙宽在

0.2~0.6 mm 之间, 岩体破坏形态不确定, 其中 KD3、KD4 试件沿裂隙破坏, 裂隙端部形成明显的反翼裂纹, 裂隙只作为翼裂纹或反翼裂纹的组成部分存在, KD5 和 KD6 试件的破裂面起始于裂隙端部, 但不沿裂隙扩展, 其破坏形态为经过裂隙端部的剪切破坏; 隙宽较大时 (KD7、KD8), 岩体破裂面沿裂隙发展, 裂隙上下岩块发生错动, 破裂面较平滑, 并且裂隙端部的翼裂纹、反翼裂纹和圆柱侧面构成的三角区域极不稳定, 易发生崩落破坏。

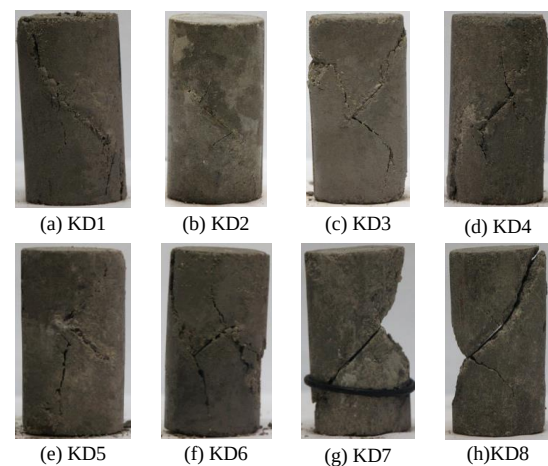


图 11 不同隙宽单裂隙岩体破坏形态
Fig.11 Failure modes of single fractured rock mass with different gap widths

3.4 围压对单裂隙岩体力学特性影响

选取岩体倾角 $\theta=45^\circ$, 迹长 $a=20$ mm, 裂隙宽度 $D=0.1$ mm, 试验温度 T 为 -5 、 -10 、 -15 $^\circ\text{C}$, 围压 σ_3 为 4、8、12 MPa。以 0 MPa, 10°C 时作为对照组。试验编号及试验数据列于表 4。

表 4 不同温度和围压单裂隙岩体力学参数

Table 4 Mechanical parameters of single fractured rock mass with different temperature and confining pressure							
编号	温度/ $^\circ\text{C}$	围压/MPa	最大主应力 σ_1 /MPa	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν	凝聚力 c /MPa	摩擦角 φ / $^\circ$
WD1	10	0	9.23	1.12	0.098	3.61	12.24
WD2	10	4	14.60	1.28	0.102		
WD3	10	8	21.29	1.42	0.104		
WD4	10	12	27.58	1.67	0.108		
WD5	-5	0	10.36	2.05	0.092	4.48	15.03
WD6	-5	4	19.88	2.10	0.081		
WD7	-5	8	26.50	2.12	0.079		
WD8	-5	12	30.82	2.19	0.080		
WD9	-10	0	11.66	2.12	0.093	4.89	17.40
WD10	-10	4	23.21	2.20	0.083		
WD11	-10	8	28.06	2.22	0.084		
WD12	-10	12	34.75	2.31	0.082		
WD13	-15	0	15.60	2.19	0.087	6.32	17.72
WD14	-15	4	27.86	2.21	0.082		
WD15	-15	8	32.98	2.28	0.080		
WD16	-15	12	38.45	2.37	0.080		

温度相同时 (见图 12), 裂隙岩体的最大主应力与围压正相关, 近似满足线性规律, 对散点进行线性拟合得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= 1.53\sigma_3 + 8.96 & R &= 0.997 \\ \sigma_1 &= 1.7\sigma_3 + 11.6 & R &= 0.950 \\ \sigma_1 &= 1.85\sigma_3 + 13.3 & R &= 0.950 \\ \sigma_1 &= 1.87\sigma_3 + 17.2 & R &= 0.950 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对应的相关系数较高, 拟合结果较好, 说明负温条件下单裂隙岩体仍满足 M-C 准则。

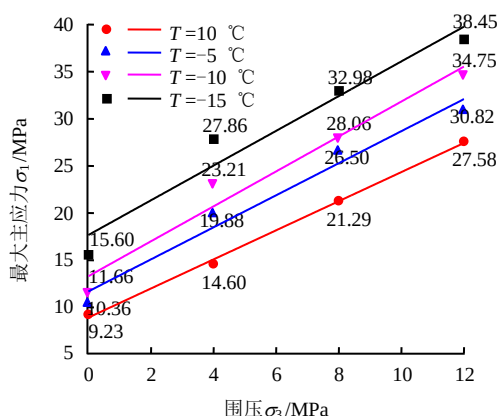


图 12 最大主应力与围压拟合图

Fig.12 The fitting chart of the maximum principal stress and confining pressure

利用 M-C 准则的推导公式 (5), 反算饱冰单裂隙岩体的凝聚力 c 和摩擦角 φ , 结果列于表 4。

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (5)$$

图 13 为最大主应力与围压的关系, 当温度 T 分别为 10 °C 和负温时, 弹性模量随围压的变化趋势明显不同。温度 $T=10$ °C 时, 弹性模量随围压的增大而增大, 围压为 12 MPa 时, 弹性模量为 1.67 GPa, 较 0 MPa 围压时 (1.12 GPa) 提升了 49%, 可见弹性模量变化之显著。温度 T 为负温时, 同温度试件的弹性模量变化不明显, 以 $T=-5$ °C 为例, 不同围压时, 弹性模量分别 2.05、2.10、2.12 GPa 和 2.19 GPa, 均值为 2.115 GPa, 各围压下弹性模量较均值分别变化了 3.1%、0.71%、0.24% 和 3.5%, 波动幅度较小, 温度为 -10 °C 和 -15 °C 时也有相同的规律。可以推断: 负温时, 弹性模量不随围压增加而变化; 常温时, 弹性模量随围压增加而增大。主要原因在于孔隙和裂隙中的水在常温加压时可以自由排除, 孔隙和裂隙被压密; 而负温加压时, 水冻结成冰, 使得加围压达不到压密的作用, 致使弹性

模量不随围压而变化。

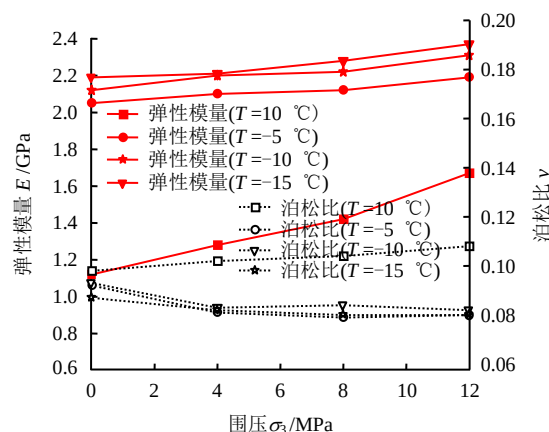


图 13 围压对弹性模量和泊松比的影响

Fig.13 The effect of confining pressure on the elastic modulus and Poisson ratio

常温条件下 ($T=10$ °C), 泊松比随围压增加略有增大, 不同围压对应的泊松比分别为 0.098、0.102、0.104、0.108, 较均值 (0.103) 波动幅度分别 4.90%、0.97%、0.97%、4.90%。负温条件下, 以 -5 °C 为例, 不同围压对应的泊松比依次为 0.092、0.081、0.079 和 0.080, 较均值 (0.083) 分别变化了 10.8%、2.4%、4.8% 和 3.6%, 通过上面两组数据对比可以看出, 无论是正温还是负温, 泊松比均不随围压而变化 (见图 13)。

3.5 温度对单裂隙岩体力学特性影响

图 14 为最大主应力与温度的关系式, 由图可知, 岩体强度随温度降低而增大, 指数拟合后得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_3 = 0 \text{ MPa} & \quad \sigma_1 = 9.29 + 0.37e^{\frac{x}{5.31}} & R &= 0.997 \\ \sigma_3 = 4 \text{ MPa} & \quad \sigma_1 = 11.57 + 5.94e^{\frac{x}{14.86}} & R &= 0.999 \\ \sigma_3 = 8 \text{ MPa} & \quad \sigma_1 = 18.84 + 5.04e^{\frac{x}{14.76}} & R &= 0.961 \\ \sigma_3 = 12 \text{ MPa} & \quad \sigma_1 = 26.02 + 3.44e^{\frac{x}{11.56}} & R &= 0.972 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

因此, 围压给定时, 可通过式 (6) 计算不同温度条件下裂隙岩体强度。

图 15 给出弹性模量和泊松比随温度的变化规律, 可以看出, 裂隙岩体的弹性模量随温度降低而增大, 但负温时, 弹性模量变化较小, 且数值明显高于正温时弹性模量。以围压 $\sigma_3=0$ MPa 为例, 负温条件下, 弹性模量较均值 (2.12 GPa) 分别变化了 3.3%、0% 和 3.3%, 但比正温时 (1.12 GPa) 提升了 89.3% (4.8 MPa 和 12 MPa 分别提升了 69.5%、55.4% 和 37.1%), 因此, 可以推断: ①弹性模量在

负温条件下要明显大于正温条件,但在负温条件下随温度变化幅度较小;②围压越大,弹性模量在正负温度间的差值越小。正温时岩体的泊松比大于负温,而负温时的泊松比受温度影响较小。

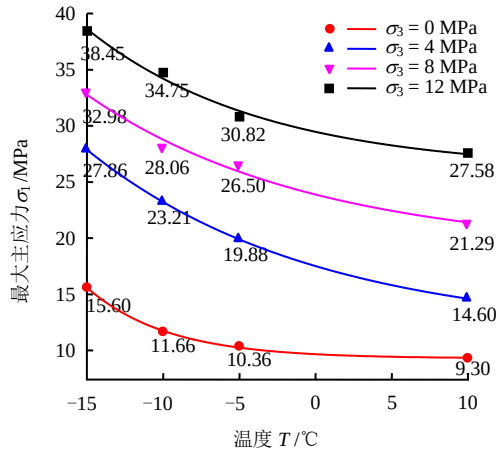


图 14 温度对最大主应力的影响

Fig.14 The effect of temperature on the maximum principal stress

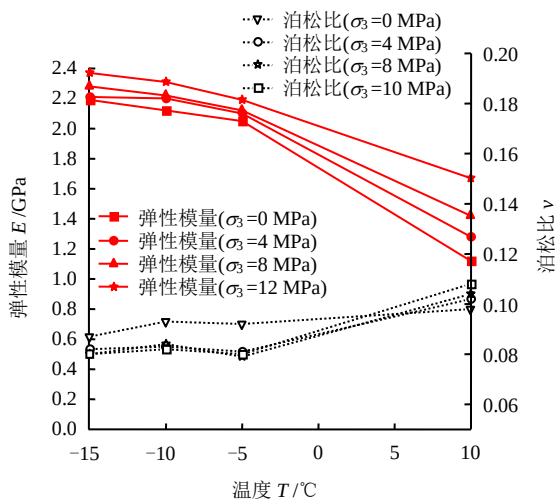


图 15 温度对弹性模量和泊松比的影响

Fig.15 The effect of temperature on the elastic modulus and Poisson ratio

图 16 为强度参数随温度的变化,可以看出黏聚力和摩擦角随温度的降低而增大,负温裂隙岩体的黏聚力较常温分别增大了 1.24、1.35 倍和 1.75 倍,摩擦角分别增大了 1.23、1.42 倍和 1.45 倍,完整岩石(类岩石)在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的摩擦角为 18.72° ,黏聚力为 16.03 MPa 。由此可以推断:①裂隙的存在使得岩石的摩擦角和黏聚力同时降低,但黏聚力降低幅度较大(16.03 MPa 至 4.89 MPa),是导致岩石强度降低的主要原因;②裂隙岩体的强度随温度的降低而升高的主要原因是孔隙冰和裂隙冰的存在,使得岩石矿物颗粒之间的黏聚力和摩擦角同时增大。

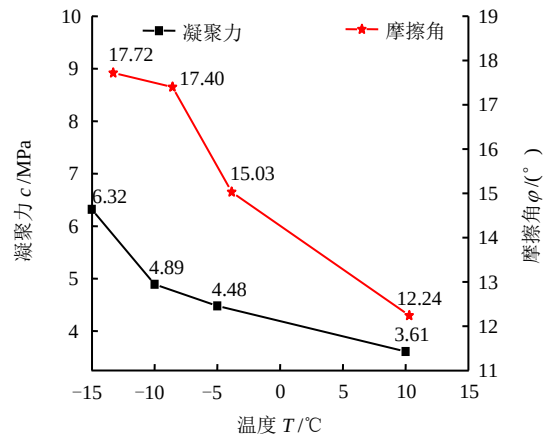


图 16 温度对强度参数的影响

Fig.16 The effect of temperature on strength

图 17 为岩体的破坏形态,可见岩体的破坏形态均是沿裂隙发展的剪切破坏。破裂面均起始于裂隙端部,零围压时,破裂面终止于圆柱试件的上下端面,高围压时,终止于试件的侧面,并且高围压时产生翼裂纹(主破裂面)和反翼裂纹(次破裂面),反翼裂纹沿最大主应力方向扩展,贯穿整个试件。而不同温度条件下,岩体的破坏形态并没有明显的差异。由此可以推断:温度不影响岩体的破坏形态,但围压对破坏形态有一定影响,主要影响破裂面的发展方向。

3.6 影响因素分析

本文影响因素共有 5 种,首先选取基本参照试件(基本试验条件:倾角 $\theta=45^{\circ}$,迹长 $a=20\text{ mm}$,隙宽 $D=0.1\text{ mm}$,温度 $T=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,围压 $\sigma_3=8\text{ MPa}$),然后在基本试验条件的基础上,改变其中一个因素的不同水平,测定该影响因素对岩体力学特性的影响因子,最后对比各影响因子的大小,确定各因素影响作用的大小。由于本文所选的 5 个因素的量纲不同,无法直接进行对比,因此,需要引入一个无量纲参量 γ_i ,用于描述单位影响因素下,各影响因素对岩体强度影响作用的大小:

$$\gamma_i = \frac{\frac{|\sigma_{ij} - \sigma_{is}|_{\max}}{\sigma_{is}}}{\frac{j_{\sigma_{ij}} - j_{\sigma_{is}}}{j_{\max} - j_{\min}}} \quad (7)$$

式中: i 为影响因素类型,包括倾角 θ 、迹长 a 、隙宽 D 、温度 T 和围压 σ_3 ; j 为影响因素 i 的水平取值范围,例如,当 i 为倾角时,则 j 的取值范围为 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$; σ_{is} 为基本参照试件的强度; $|\sigma_{ij} - \sigma_{is}|_{\max}$ 为与基本试件强度差的最大值; $j_{\sigma_{is}}$ 为影响因素为 i 时,

基本试件强度对应的 i 的取值; j_{σ_y} 为与基本试件强

度差的最大值对应的 i 的取值。

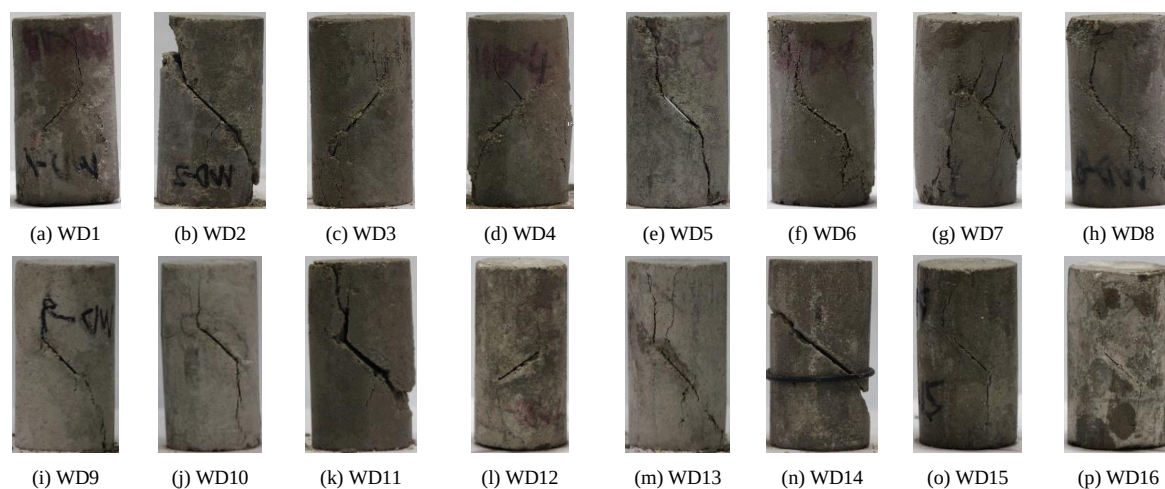


图 17 不同温度和围压单裂隙岩体破坏形态

Fig.17 Failure modes of single fractured rock mass with different temperature and confining pressure

表 5 为各因素影响因子, 分析数据可以发现 $\gamma_{\theta} > \gamma_a > \gamma_{\sigma_3} > \gamma_D > \gamma_T$, 因此, 本文研究的 5 种影响因素对岩体强度的影响作用排序: 倾角最大, 迹长次之, 围压和隙宽随后, 温度影响最小。因此, 复杂节理岩体强度分析时, 应重点分析影响作用大的因素, 酌情分析影响作用小的因素。

表 5 影响因子
Table 5 Influence factors

影响因素 i	σ_{is}	$ \sigma_{ij} - \sigma_{\text{is}} _{\text{max}} / \sigma_{\text{is}}$	$ (j_{\sigma_{ij}} - j_{\sigma_{\text{is}}}) / (j_{\text{max}} - j_{\text{min}}) $	影响因子 γ_i
倾角 θ	28.31	1.196	0.50	2.392
迹长 a	28.31	1.003	0.62	1.617
隙宽 D	28.44	0.296	0.94	0.315
温度 T	28.06	0.241	0.80	0.301
围压 σ_3	28.06	0.585	0.67	0.873

4 结 论

(1) 裂隙岩体强度、弹性模量和泊松比随倾角增加先减小后增大, 近似呈二次函数分布; 倾角为 90° 时, 岩体力学参数近似与完整岩石相等; 倾角为 0° , 迹长较大 (贯通率大于 50%) 时, 裂隙两端岩桥压应力集中, 先于上下岩块破坏, 导致应力-应变曲线出现多峰现象。

(2) 裂隙岩体强度、弹性模量随迹长增大而减小, 近似呈指数分布; 贯通率小于 10% 时, 岩体力学参数可按完整岩石计算, 贯通率在 10%~25% 之间时, 岩体力学参数衰减最快; 通过拟合式 (3) 可近似计算不同倾角、不同迹长条件下裂隙岩体强度。

(3) 隙宽小于 0.1 mm 或大于 0.8 mm 时, 岩体强度随隙宽增大而减小, 但两者有本质区别, 隙宽

小于 0.1 mm 时, 裂隙两端岩桥发生压密破坏, 隙宽小于 0.8 mm 时, 裂隙两端岩桥发生剪切破坏, 隙宽在 0.1~0.8 mm 范围内时, 岩体强度变化幅度较小, 破坏形态具有不确定性; 隙宽大于 0.8 mm 时, 弹性模量随隙宽增大而减小, 隙宽小于 0.1 mm 时, 弹性模量变化幅度较小; 隙宽在 0.05~0.9 mm 之间, 泊松比变化幅度较小。

(4) 裂隙岩体强度、弹性模量、凝聚力和摩擦角均随温度减小而增大, 其作用机制是孔隙水和裂隙水冻结成冰, 增大颗粒间的凝聚力和摩擦角; 围压有抑制负温对弹性模量增强的作用; 负温岩体泊松比小于常温岩体, 且负温条件下泊松比不随温度而变化。

(5) 裂隙岩体强度随围压增加而增大, 近似满足线性 M-C 准则; 负温条件下弹性模量受围压影响较小, 但常温条件下弹性模量随围压变化显著; 泊松比不受围压影响。

(6) 单裂隙岩体主要有 3 种破坏形态: 沿裂隙面发展的剪切破坏、贯穿裂隙面的张拉破坏以及两者组合的拉剪破坏; 倾角影响破裂面的起始位置, 迹长影响破裂面的扩展规模, 围压影响破裂面的延伸方向。

(7) 倾角对岩体强度影响最大, 迹长次之, 温度影响最小, 复杂岩体强度分析时, 可适当减少影响作用较小的因素, 提高工作效率。

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 Jia-mi, HE Yong-nian. Analysis of properties of broken rock[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2001, 30(1): 9–13.
- [2] 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.
- [3] 李廷春, 吕海波. 三轴压缩载荷作用下单裂隙扩展的CT 实时扫描试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 289–296.
- LI Ting-chun, LÜ Hai-bo. CT real-time scanning tests on single crack propagation under triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(2): 289–296.
- [4] 陈新, 廖志红, 李德建. 节理倾角及连通率对岩体强度、变形影响的单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 781–789.
- CHEN Xin, LIAO Zhi-hong, LI De-jian. Experimental study of effects of joint inclination angle and connectivity rate on strength and deformation properties of rock masses under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(4): 781–789.
- [5] 张伟, 周国庆, 张海波, 等. 倾角对裂隙岩体力学特性影响试验模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(1): 30–33.
- ZHANG Wei, ZHOU Guo-qing, ZHANG Hai-bo, et al. Experimental research on the influence of obliquity on the mechanical characteristics of a fractured rock mass[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2009, 38(1): 30–33.
- [6] 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): 536–545.
- HUANG Da, CEN Duo-feng, HUANG Run-qiu. 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): 536–545.
- [7] 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.
- [8] 蒋明镜, 张宁, 申志福, 等. 含裂隙岩体单轴压缩裂纹扩展机制离散元分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3293–3301.
- JIANG Ming-jing, ZHANG Ning, SHEN Zhi-fu, et al. DEM analyses of crack propagation in flawed rock mass under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(11): 3293–3301.
- [9] 韩建新, 李术才, 李树忱, 等. 贯穿裂隙岩体强度和破坏方式的模型研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 178–184.
- HAN Jian-xin, LI Shu-cai, LI Shu-chen, et al. Model study of strength and failure modes of rock mass with persistent cracks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp. 2): 178–184.
- [10] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. Fundamentals of rock mechanics (4th ed)[M]. Malden: Blackwell Publishing Ltd., 2007: 103.
- [11] 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 temperatures under triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33 (Supp. 2): 3657–3664.
- [12] 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: 51–70.
- YANG Hao. Experimental study on mechanical properties and failure modes of ice-saturated fractured rock[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2015: 51–70.
- [13] 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.
- [14] 单仁亮, 郭志明, 刘校东, 等. 低温冻结岩土三轴试验机的改进研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(4): 96–98.
- SHAN Ren-liang, GUO Zhi-ming, LIU Xiao-dong, et al. Improvement of low-temperature permafrost triaxial testing machine[J]. **Coal Engineering**, 2015, 47(4): 96–98.