

文章编号: 1673-3363-(2014)02-0299-05

负温条件下梅林庙矿红砂岩强度特性 及变形规律研究

单仁亮, 宋立伟, 李东阳, 刘念, 刘衍, 夏宇

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要 利用冻三轴试验机研究了负温条件下梅林庙矿红砂岩的力学特性与变形规律。在-15℃低温条件下对红砂岩施加4种围压, 分析了围压对岩石强度和弹性模量的影响。结果表明, 在冻结条件下红砂岩轴向抗压强度与围压、弹性模量与围压均呈线性关系, 红砂岩仍然遵循库仑强度准则。经回归分析得到红砂岩黏聚力为12.7 MPa, 内摩擦角为30.4°。岩石破坏形式与围压大小相关。

关键词 冻结岩石; 冻三轴试验; 轴向抗压强度; 弹性模量; 负温

中图分类号 TU 452

文献标志码 A

Study on the strength characteristics and deformation rule of red sandstone in Meilinmiao mine under negative temperature

SHAN Renliang, SONG Liwei, LI Dongyang, LIU Nian, LIU Yan, XIA Yu

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology
(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract The study of mechanical properties and deformation rule of Meilinmiao red sandstone have been conducted on freezing triaxial test machine. Four different confining pressures are applied separately on the samples at -15℃, and the effect of confining pressure to rock strength and Young's modulus are analyzed. The results show that both axial compressive strength and Young's modulus increase linearly as the confining pressure increases, and the red sandstone still meet Coulomb criterion. Through regression analysis, the cohesion of red sandstone is 12.7 MPa, and the internal friction angle is 30.4°. The rock failure form is related to confining pressure.

Key words frozen rock; freezing triaxial test; axial compressive strength; Young's modulus; negative temperature

近年来, 随着对煤炭资源需求的不断增加, 煤炭开采的深度越来越大, 涉及在丰厚表土及富水岩层中进行矿井建设等问题, 冻结法凿井是解决上述问题的有效方法。对于低温条件下深厚表土的物理及力学性质, 国内外研究得比较多, 并取得了丰硕

的成果。蒋昱州等^[1]采用岩石力学伺服试验机, 对非贯通预制裂纹大理岩进行单轴压缩试验, 得到各影响因素与单轴抗压强度之间的关系。崔广心^[2]用模拟试验的方法, 得到了深厚中砂层和黏土层中冻结壁厚度的计算公式, 并对冻土、冻结壁力学参数、

收稿日期: 2013-02-13

基金项目: 国家自然科学基金委员会与神华集团有限责任公司联合资助项目(U1261126); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(2010YL09)

作者简介: 单仁亮(1964-), 男, 江苏省大丰市人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程方面的教学与研究。

E-mail: srl@cumtb.edu.cn

Tel: 010-62331019

本构关系和强度理论的研究方法、研究方向提出了建议。陈柏生等^[3]对低温条件下的冻土进行了高应变率动态压缩试验,得到了冻土不仅有温度效应还有应变率效应结论。但关于负温状态下岩石的力学性能,特别是负温条件下饱水岩石力学性能的研究较少。杨更社等^[4]选取 2 种代表性岩石,分别在不同温度和围压下进行了单轴和三轴试验,推导了含温度因子的冻结岩石非线性破坏准则。李云鹏等^[5]对干燥和饱和状态下的低温花岗岩进行了单轴压缩试验,得到了 2 种状态下变形模量与泊松比随温度的变化趋势。金济山^[6]在不同围压下对大理岩进行循环加载试验,研究了应力超过极限强度以后围压对大理岩弹性模量的影响。刘恩龙等^[7]针对砂岩岩样,探讨了在不同围压作用下和轴向循环加载时岩样的动力力学性质,研究了围压对砂岩岩样动力力学性质的影响。孟召平等^[8]研究了不同侧压条件下不同岩性岩石的力学特征,研究结果表明,沉积岩的变形和强度以及破坏机制与其所承受的有效侧压大小有关,不同岩性的岩石刚度和强度均随侧压的增大而增大。尤明庆^[9-13]阐述了宏观均匀致密或仅含有局部缺陷的岩样,平均模量与围压无关,但对于含有裂隙的岩样,平均模量随围压增大,并提出了平均模量与围压关系的指数公式。徐光苗等^[14]以江西红砂岩和湖北页岩为研究对象,分别在不同冻结温度与不同含水率的条件下进行了岩石的单轴压缩和三轴压缩试验,得到了 2 种岩石的抗压强度和弹性模量都随温度降低而增大的结论。吴紫汪等^[15]在一定的加荷速率下,研究了围压和温度对冻结兰州砂土应力-应变特性的影响,发现围压的增大和温度的升高明显增强了冻结砂土塑性及应变硬化性能。朱元林等^[16]对冻土在负温下的变形进行了研究和探讨,结果表明在一定的条件下冻土的弹性模量与温度呈线性关系。

本文在前人研究的基础上,针对广泛分布于内蒙古鄂尔多斯梅林庙矿区的红砂岩,展开了负温条件下岩石力学性能的研究,分析了采用冻结法施工的梅林庙煤矿红砂岩强度及变形规律,分析了在-15℃的低温条件下梅林庙矿红砂岩轴向抗压强度与围压的关系以及弹性模量随围压变化的规律。

在内蒙古中西部、陕西北部、宁夏大部以及甘肃中东部,能源资源极其丰富,并且该范围内广泛

分布着红砂岩,冻结法凿井非常适合该地区矿井建设。目前针对红砂岩的研究很少,对红砂岩在低温条件下力学特性及变形规律的研究具有重要意义。

1 试样制备与试验方法

1.1 红砂岩岩样的制备

从梅林庙矿井 563~600 m 的深度范围内选取新鲜完整的大块红砂岩块石,然后立即运到试样加工工厂钻取试样,加工后尺寸为 $\Phi 39.1 \text{ mm} \times L 80 \text{ mm}$ 。为了尽量接近岩石常年浸于地下水的环境状态,保证岩样充分饱水,在用抽气装置把孔隙中的气体抽出以后,将岩样完全浸入水中保持 24 h,然后取出将表面水珠擦干,用塑料保鲜薄膜将试样包裹平整,放进低温控制箱保持在-15℃至少 24 h。每个围压下测试 3 个岩样,以保证试验结果的可靠性。

1.2 试验方法

本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。将事先冷冻好的岩样套上橡胶膜,在上下端部加上钢制压头,并在试样中部安装好径向应变传感器,将试样放进压力室,然后将提前冷却至-15℃的航空硅油用泵输进冻三轴试验机的压力室,为试件提供稳定的负温环境。之后通过试验机上下降温压板将油温控制在-15℃,油温稳定 2 h 之后进行加载。本次试验控制条件设为位移控制,压头的轴向位移速度参考国际岩石力学学会试验标准专业委员会(1979)建议的加载速率值,最后确定为 0.1 mm/min。在初始阶段,围压和轴压以 1:1 的比例同时进行加载,直至围压达到目标值后,围压保持不变,轴压继续加载,一直到岩样破坏,停止试验。参考煤炭行业标准 MT/T 593.1-2011,岩样围压的取值按重液公式计算:

$$p_0 = 0.013H \quad (1)$$

式中: p_0 为水平地压标准值, MPa; H 为岩石埋置深度, m。

2 试验结果与分析

2.1 负温下围压对岩石强度的影响

试验结果发现,在负温条件下围压对红砂岩轴向抗压强度有明显影响,随着围压的增大,岩样轴向抗压强度提高。在 4 种不同围压下岩石的轴向抗压强度、弹性模量以及泊松比列于表 1 中。

表 1 不同围压下轴向抗压强度、弹性模量及泊松比
Table 1 Axial compressive strength, elastic modulus and Poisson ratio under different confining pressures

σ_3 / MPa	0			4			8			12		
$\sigma_{1, f}$ / MPa	40.9	44.3	47.0	53.0	58.9	54.2	70.0	71.5	74.3	78.1	78.7	80.7
E_t / GPa	1.520	1.599	1.623	1.657	2.438	1.957	2.793	2.621	3.100	3.330	3.451	3.584
μ	0.156	0.151	0.148	0.179	0.159	0.187	0.150	0.161	0.142	0.238	0.195	0.183

注： $\sigma_{1, f}$ 为轴向抗压强度； E_t 为岩样切线弹性模量； μ 为岩样泊松比。

不同围压下的典型应力应变曲线如图 1 所示。

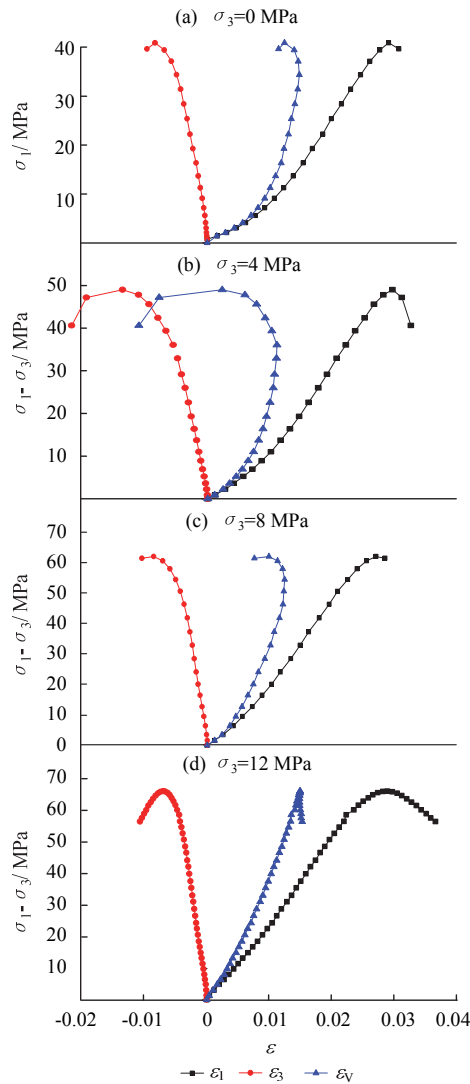


图 1 不同围压下的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves under different confining pressures

岩石的应力应变曲线是描述岩石力学性能的重要手段，对于冻三轴试验机内的岩样，三轴受压更接近于冻结法施工中岩石的真实状态。

从图 1 可看出：1) 主应力差-轴向应变曲线呈现出一定的局部非线性，在曲线的初始阶段，岩石被压密，曲线呈现下凹阶段，这主要是由于岩样的层间压密效应引起的。试件端部具有较好的平整度

和平行度，曲线下凹部分就不明显，在这个压密过程之后，曲线总体上呈现比较理想的线弹性关系。

2) 在-15℃的低温条件下，岩样经过压密以后，随着轴压的增加，其轴向应力应变关系进入线弹性阶段，在临近破坏的短时间段内出现非线性弹性变形。3) 岩样体应变曲线经历很明显的 3 个阶段：体积变形阶段、体积不变阶段和扩容破坏阶段。图 2 所示岩样轴向抗压强度与围压的关系曲线表明：在-15℃的条件下，当围压不大于 12 MPa 时，岩石轴向抗压强度随围压的增加而增加，利用计算机拟合得到线性方程：

$$\sigma_{1, f} = 3.05\sigma_3 + 44.35 \quad (2)$$

式中： $\sigma_{1, f}$ 为岩样轴向抗压强度，MPa； σ_3 为岩样围压，MPa。相关系数 $R^2=0.95$ 。

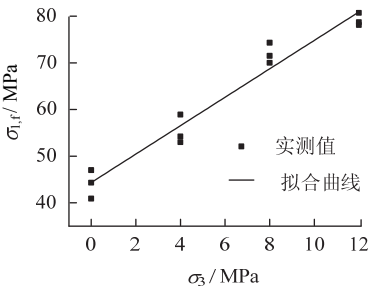


图 2 围压与轴向抗压强度的关系

Fig.2 The relationship of axial compressive strength and confining pressure

$$\sigma_{1, f} = \sigma_3 \cdot \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (3)$$

利用 Origin 对图 2 中不同围压下实测各点进行回归分析，得到红砂岩抗剪强度指标分别为： $c=12.7$ MPa， $\varphi=30.4^\circ$ 。

这表明红砂岩埋置深度越深，轴向抗压强度越高。破坏形式随着围压的增加发生了变化，在围压为 0，4 MPa 时，岩样发生张拉破坏，首先在岩石端部位置出现细微裂缝，裂缝大致平行于试样轴线。随着轴向荷载增加，裂缝逐渐扩展，导致岩石承载力下降，岩石发生破坏，破坏形式如图 3a 所示。当围压超过 8 MPa 时，岩样发生剪切破坏，破

坏时剪切面与轴线成一定角度,如图 3b 所示。

岩石在开挖以后发生弹性变形释放,所以在试验开始阶段,岩样会经历压实和变形恢复的过程。岩样端部的平整度及平行度影响图 1 中初始下凹曲线段的长度,端面越平整,下凹段越短,所以在试件加工过程中,要尽量保证端部平整性满足要求。在负温条件下红砂岩岩样呈脆性破坏。

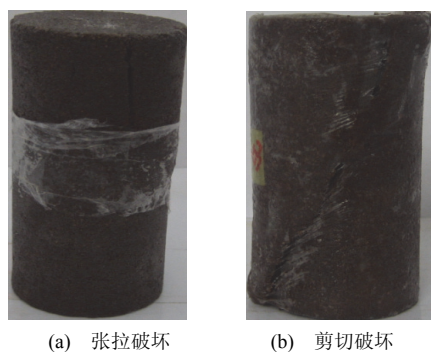


图 3 红砂岩的典型破坏形式

Fig.3 Typical failure of red sandstone

在弹性范围内应力应变关系满足下式:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{E}[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E}[\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E}[\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)]\end{aligned}\quad (4)$$

由上式中各分式相加得到:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{1-2\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (5)$$

式中: $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 分别为 Z, X, Y 方向的线应变; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为 Z, X, Y 方向的应力值, 其中 σ_1 以线性增加, $\sigma_2=\sigma_3$ 为围压, 是常数。

在图 1 应力应变曲线上,主应力差达到 15 MPa 以后, 体应变与主应力差呈线性增长, 这与式(5)表述的结果是吻合的, 即弹性阶段 ε_v 是 $\sigma_1-\sigma_3$ 的线性函数。图 1 中所有状态下体应变均会收敛到某一常数, 体应变增量接近于零。随着轴压的增加, 径向应变的速率增大, 岩样进入扩容破坏阶段。

2.2 负温下围压对岩石弹性模量的影响

负温条件下应力-应变曲线反映冻结状态下岩石的力学特性。常用的计算岩石弹性模量法有 3 种: 切线、平均和割线弹性模量。MT/T 593.1-2011 给出一种计算切线弹性模量的方法:

$$E_t = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{0.5}}{\varepsilon_{0.5}} \quad (6)$$

式中: E_t 为弹性模量, MPa; $\varepsilon_{0.5}$ 为 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{0.5}$ 所对应

的应变值; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{0.5}$ 为 50% 的破坏应力, MPa。

通过对试件施加不同的围压, 分析不同埋置深度的红砂岩弹性模量的变化趋势。根据式(6), 分别得到不同围压下的弹性模量, 并列于表 1 中。

将每个围压下的岩样弹性模量值绘于图 4, 并进行回归分析, 得到了弹性模量与围压的关系式:

$$E_t = 0.161\sigma_3 + 1.504 \quad (7)$$

相关系数 $R^2 = 0.9113$ 。

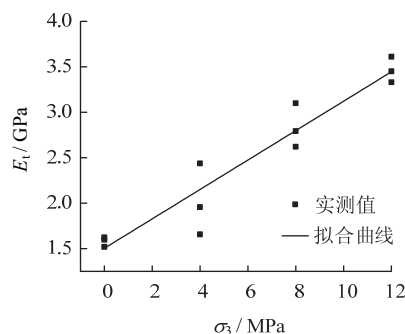


图 4 弹性模量拟合直线

Fig.4 The fitted line of Young's modulus

图 4 表明, 在 -15 °C 负温条件下, 当围压变化范围有限时, 红砂岩弹性模量与围压基本呈线性关系。按照重液公式(1)计算, 当围压为 12 MPa 时, 对应的岩层埋置深度为 923 m, 所以对于采用冻结法施工的梅林庙煤矿红砂岩, 在 900 m 深度范围内, 可采用式(7)来确定不同埋深处红砂岩的弹性模量。

2.3 负温下围压对岩石泊松比的影响

根据 MT/T 593.1-2011 中给出的泊松比计算方法(8)计算不同围压下红砂岩泊松比, 并列于表 1 中。

$$\mu = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (8)$$

式中: ε_1 为对应主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与应变关系曲线直线段的轴向应变; ε_3 为计算轴向应变所对应的试样总平均径向应变。

从表 1 可以看出, 在 -15 °C 负温条件下, 在不同围压下, 红砂岩泊松比波动幅度很小, 受围压影响较弱。

3 结 论

1) 对于梅林庙矿井中的红砂岩, 在 -15 °C 的低温条件下, 当岩石所处深度在 0~900 m 深度范围内时, 围压对其力学性能有很大影响, 轴向抗压强度与围压基本呈线性关系, 围压越高, 轴向抗压强度越高。负温状态下的红砂岩遵循库仑强度准则, 黏聚力为 12.7 MPa, 内摩擦角为 30.4°。岩样破坏时

呈脆性破坏, 破坏后还有部分残余强度。

2) 梅林庙矿红砂岩在 -15°C 的低温条件下, 弹性模量与围压基本呈线性关系, 泊松比受围压影响较弱。

3) 负温条件下岩样破坏形式与围压大小相关, 在围压小于等于 4 MPa 时, 岩样以张拉破坏为主, 而当围压超过 8 MPa 时, 岩样以剪切破坏为主。

参考文献:

- [1] 蒋昱州, 杨圣奇, 徐卫亚, 等. 非贯通裂纹岩石压缩试验及非线性回归分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(3): 290-296.
JIANG Yuzhou, YANG Shengqi, XU Weiya, et al. Compression test of intermittent crack under uniaxial and nonlinear regression[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(3): 290-296.
- [2] 崔广心. 深厚冲积层中冻结壁厚度的研究[J]. 冰川冻土, 1995, 17(增刊 1): 26-34.
CUI Guangxin. Study on the thickness of frozen wall in deep alluvium[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(Sup 1): 26-34.
- [3] 陈柏生, 胡时胜, 马芹永, 等. 冻土动态力学性能的实验研究[J]. 力学学报, 2005, 37(6): 724-728.
CHEN Baisheng, HU Shisheng, MA Qinyong, et al. Experimental research of dynamic mechanical behaviors of frozen soil[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005, 37(6): 724-728.
- [4] 杨更社, 奚家米, 邵学敏, 等. 冻结条件下岩石强度特性的试验[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(1): 14-18.
YANG Gengshe, XI Jiami, SHAO Xuemin, et al. Experimental study on rock strength properties under freezing conditions[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30(1): 14-18.
- [5] 李云鹏, 王芝银. 岩石低温单轴压缩力学特性[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(6): 671-675.
LI Yunpeng, WANG Zhiyin. Uniaxial compressive mechanical properties of rock at low temperature[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(6): 671-675.
- [6] 金济山. 围压对大理岩的弹性模量的影响[C]//地球物理研究所四十年(1950-1990)会议论文集, 1990: 125-131.
- [7] 刘恩龙, 黄润秋, 何思明. 循环加载时围压对岩石动力特性的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3009-3013.
LIU Enlong, HUANG Runqiu, HE Siming. Influence of confining pressure on dynamic properties of rock samples subjected to cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3009-3013.
- [8] 孟召平, 彭苏萍, 凌标灿. 不同侧压下沉积岩变形与强度特性[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 15-18.
MENG Zhaoping, PENG Suping, LING Biaocan. Characters of the deformation and strength under different confining pressures on sedimentary rock[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 15-18.
- [9] 尤明庆. 围压对杨氏模量的影响与裂隙摩擦的关系[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊 1): 167-170.
YOU Mingqing. Effect of confining pressure on the Young's modulus of rock specimen and the friction in fissures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24 (Sup 1): 167-170.
- [10] 尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 53-60.
YOU Mingqing. Effect of confining pressure on the Young's modulus of rock specimen and the friction in fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 53-60.
- [11] 尤明庆. 复杂路径下岩样的强度和变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 23-28.
YOU Mingqing. Strength and deformation of rock under complex loading path[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 23-28.
- [12] 尤明庆, 苏承东, 徐涛. 岩石试样的加载卸载过程及杨氏模量[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 588-592.
YOU Mingqing, SU Chengdong, XU Tao. Loading or unloading process in axial direction and Young's modulus of rock specimen[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 588-592.
- [13] 尤明庆. 试验结果的数学拟合与力学模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 251-257.
YOU Mingqing. Discussion on mathematical fitness and mechanical model of experimental results[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 251-257.
- [14] 徐光苗, 刘泉声, 彭万巍, 等. 低温作用下岩石基力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2502-2508.
XU Guangmiao, LIU Quansheng, PENG Wanwei, et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of rocks under low temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2502-2508.
- [15] 吴紫汪, 马巍, 张长庆, 等. 冻结砂土的强度特性[J]. 冰川冻土, 1994, 16(1): 15-20.
WU Ziwan, MA Wei, ZHANG Changqing, et al. Strength characteristics of frozen sandy soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(1): 15-20.
- [16] 朱元林, 张家懿. 冻土的弹性变形及压缩变形[J]. 冰川冻土, 1982, 4(3): 29-39.
ZHU Yuanlin, ZHANG Jiayi. Elastic and compressive deformation of frozen soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1982, 4(3): 29-39.