

冻结饱和砂岩三轴压缩力学特性及 强度预测模型研究

杨更社, 魏 尧, 申艳军, 王 磊, 刘 慧, 董西好, 李晓晋

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 人工冻结法是富水软岩地区地下工程的重要施工方法, 探究冻结岩石强度特性的研究具有重要的理论研究和工程实际意义。白垩系饱和砂岩为研究对象, 开展不同温度(+20 °C, 0 °C, -10 °C 和 -20 °C), 不同围压(0, 2, 4 和 6 MPa)条件下三轴压缩试验。研究结果表明冻结作用对饱和砂岩力学特性有着较大影响: (1) 相同围压, 温度由+20°C 降到-20 °C 时, 峰值强度提高 2~4 倍; (2) 相同温度, 围压由 0 MPa 升至 6 MPa 时, 峰值强度提高 1~3 倍; (3) 此外冻结状态下黏聚力可提高 5 倍, 内摩擦角出现增大趋势。随后基于 5 种已有强度准则理论, 以试验数据为参数计算各准则表达式并对分析各准则对饱和砂岩冻结强度的预测效果, 结果表明 Rocker 准则能够更为准确和方便的预测不同温度下饱和砂岩强度, 并依此提出考虑温度效应的饱和砂岩 Rocker 强度准则, 并验证了其具有良好的预测效果, 上述结果将为低温环境下岩石力学特性研究及地下冻结工程设计施工提供有益的参考。

关键词: 岩石力学; 冻结砂岩; 三轴压缩; 变形破坏; 强度预测

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)04 - 0683 - 12

Mechanical behavior and strength forecast model of frozen saturated sandstone under triaxial compression

YANG Gengshe, WEI Yao, SHEN Yanjun, WANG Lei, LIU Hui, DONG Xihao, LI Xiaojin

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The artificial freezing method has been widely used in excavation of water-rich soft rock layers, and hence, understanding the mechanical properties of frozen rock is of great engineering significance. Taking saturated cretaceous sandstone as testing sample, triaxial compression tests with different confining pressures(0, 2, 4 and 6 MPa) were carried out at different temperatures(+20 °C, 0 °C, -10 °C and -20 °C). The results demonstrate a strong negative correlation between the strength of saturated sandstone and the subzero temperature. Under the same confining pressure, the peak pressure increases by 2 - 4 times when the temperature reduces from +20 °C to -20 °C. At a constant freezing temperature, the peak strength increases by 1 - 3 times when the confining pressure increases from 0 MPa to 6 MPa. Both the cohesive force and the internal friction angle rise with decreasing the temperature, up to 5 times for the former. A strength forecasting model for frozen sandstone is

收稿日期: 2018 - 11 - 30; **修回日期:** 2019 - 01 - 12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774231, 41702334); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2015JQ5186)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51774231 and 41702334) and Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China(Grant No. 2015JQ5186)

作者简介: 杨更社(1962 -), 男, 博士, 1984年毕业于西安矿业学院矿井建设工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事寒区岩石冻融损伤理论分析及工程应用方面的研究工作。E-mail: yanggs@xust.edu.cn。通讯作者: 魏 尧(1989 -), 男, 现为博士研究生, 主要从事寒区岩石冻融损伤试验与理论分析方面的研究工作。E-mail: wy890520@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1417

proposed based on the comparison of prediction accuracy of five existing strength criterion theories according to the test results. The Rocker criterion is proven to be optimal and further modified taking into account the effect of the temperature on its parameters. The above results could provide a guidance for rock excavation both in cold regions and artificial frozen layers.

Key words: rock mechanics; frozen sandstone; triaxial compression; deformation and failure; strength forecasting

1 引言

白垩系弱胶结砂岩是一种非连续、非线性,并且各向异性的天然材料,因为其内部原生含有微孔隙和微裂纹,导致砂岩具有初始损伤效应。岩石在冻结状态下与在常温下有着非常明显的差异性,随着人工冻结施工技术及寒区工程的大力发展,对岩石冻结力学特性的研究变得愈发迫切。

国内外学者关于冻结或者冻融循环条件下的岩石力学特性进行了大量的试验,并且依此开展了岩石损伤理论分析研究,取得了一些有价值的成果。杨更社等^[1-5]依托砂岩和煤为试验介质,开展了不同低温环境下的岩石单轴、三轴压缩,获取不同低温状态下岩石样品的力学参数,进而分析了冻结温度与参数的变化规律。奚家米等^[6]基于饱和砂质泥岩,开展了不同低温,不同围压状态的单轴-三轴压缩试验,分析了饱和砂质泥岩力学特性随温度影响的变化规律,并且探讨了围压对于抗压强度及残余强度的影响。申艳军等^[7]通过设计室内岩石冻融循环试验,探讨冻融循环温度、冻融时长、循环次数对花岗岩、2种砂岩力学参数差异性影响规律,提出了针对不同岩性和孔隙度的进一步提出的测试方案。朱杰等^[8]以泊江海子矿中白垩系地层的泥岩和砂岩为研究对象,着重开展了不同温度(20℃→-20℃)条件下的强度压缩试验,得到了该地区2种软岩在不同围压和温度作用下的力学变化规律。张慧梅等^[9]开展了红砂岩等在不同孔隙率、含水状况下受冻融循环影响导致力学性质劣化试验分析。F. Bayram^[10]对各种冻融循环后土耳其石灰岩9个区域的单轴抗压强度演化进行了系统的试验分析。K. Gholamreza等^[11]针对伊朗中部典型红砂岩开展室内、现场冻融循环下物理力学性质影响特征分析。E. M. Winkler^[12]对岩石的内部水冰相变扩展压力进行了测试,如果假设孔隙冰的体积是恒定的,在-5℃, -10℃和-22℃范围内的孔隙冰的膨胀压力可分别达到61, 113和211.5 MPa。总体而言,因岩性、内部结构形态、含水状况差异,导致的冻融岩石损伤特征及力学参数劣化规律存在显著差异。

研究结果表明了低温冻结岩石强度存在较大的变化,受到试验条件的局限性,无法得到各种温度下的变化规律,故而需在现有研究基础上寻求合理的强度准则来预测各种温度环境下的岩石强度。朱合华等^[13]系统地阐述H-B强度准则研究进展,针对过去30a国内外基于H-B强度准则工程应用的成果进行全面的总结分析。石祥超等^[14]依据常规三轴试验,应用5种强度准则进行最小平均拟合差的定量指标评价,探讨了岩石非线性强度的适用性。沈华章等^[15]在经典弹塑性理论框架下,认为岩石材料在应变软化过程中遵守莫尔-库仑强度准则,塑性变形服从非关联流动法则。尤明庆^[16-17]解释说明了指数强度准则的适用性,以常规单轴及真三轴强度试验为验证对象,说明了指数强度准则的参数需要以偏差绝对值之和的最小为目标,通过拟合试验数据来确定。路德春和杜修力^[18]基于5种岩石材料的真三轴试验数据,进而推导了广义非线性强度理论,并提出2种变换应力空间。目前受试验设备及监测技术的制约,要全面准确地掌握冻结岩石的力学性质较为困难,但又因室内力学试验是确定岩石基本力学性质的基础方法,也是揭示预测岩石类材料强度与变形特性的重要手段。岩石强度是岩石的基本力学性能,同样也是工程稳定性要求的基础。故而需要应用现有研究,正确精准的描述低温复杂环境下饱水软岩的强度,其预测结果的真实性和准确性将会为地下富水白垩系地层的施工提供有价值的理论依据。

强度准则的建立具有很强的差异性,适用性具有针对性,普遍性不强,其原因是由于岩石成岩过程及所处环境,所受应力状态的差异性造成。鉴于此,本文基于白垩系地层富水软岩为研究对象,应用GCTS型岩石力学试验机,系统的对饱和砂岩进行单轴、三轴强度压缩,分析围压和温度对饱和砂岩强度的影响规律以及破坏形态。深入分析直线型M-C准则、H-B准则、广义H-B准则、指数强度准则和Rocker准则对饱和砂岩在不同温度及应力状态下强度的预测准确性和适用性,分析低温作用的影响并依据试验数据的整体效果,提出适用此饱和砂岩考虑温度条件下的非线性强度准则,为地下工

程施工提供有力的依据, 使其能充分发挥岩石材料的自承能力。

2 试验准备

2.1 岩样选取和制备

红砂岩试样尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 和 $\phi 50\text{ mm}\times 30\text{ mm}$, 颜色暗红, 质松, 由泥质胶结物组成。岩样粉末经过 D/max - 2500 型 X 射线衍射仪, 测得主要矿物成分为 48.9%石英、22.9%斜长石、10.7%钾长石、6%方解石和 6%蒙脱石, 其中含包含微量的白云石、绿泥石、赤铁矿等, 化学成分主要为 SiO_2 ,

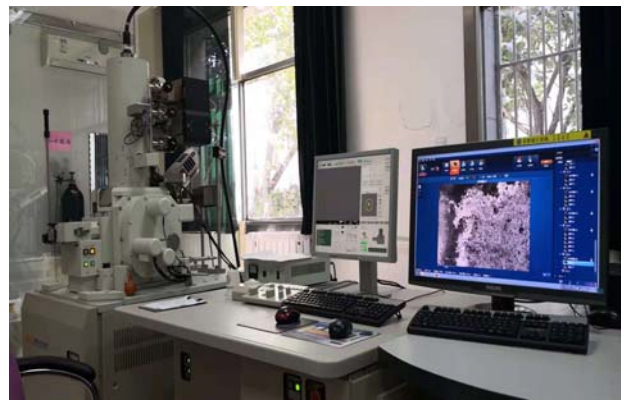
Al_2O_3 , CaO 和 Fe_2O_3 , 属于硬质脆性沉积岩。岩石经过钻、切、磨工序加工成标准圆柱体作为单轴、三轴压缩及抗拉试验试样, 试样两端面不平行度小于 0.05 mm 。

岩石经过扫描电镜成像处理, 可以很清楚地看到岩石为大颗粒胶结而成, 孔隙均匀的填充在岩石内部, 部分孔隙内被黏土矿物填充(见图 1(c)); 颗粒经过 500 倍放大及能谱分析以后, 颗粒表面被蒙脱石及方解石等包裹, 故而形成一定的黏结能力, 但由于存在大量的孔隙结构, 在岩石受力时, 颗粒间很容易发生错动, 强度将会较弱(见图 1(d), (e))。

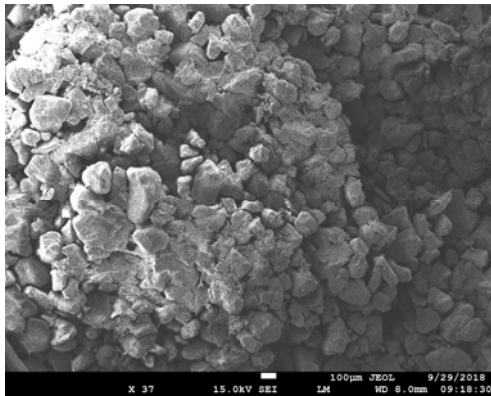
加工好的标准岩样经过声波测试, 以减小岩石



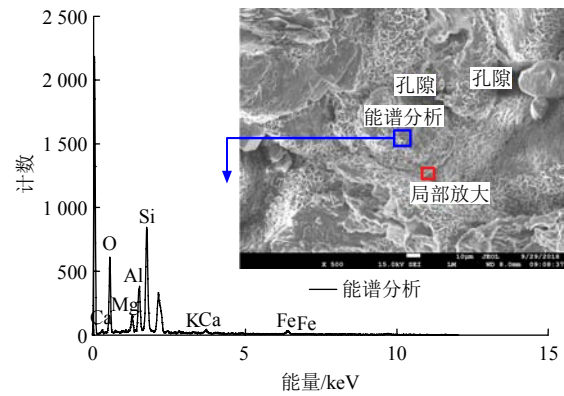
(a) X 射线衍射仪



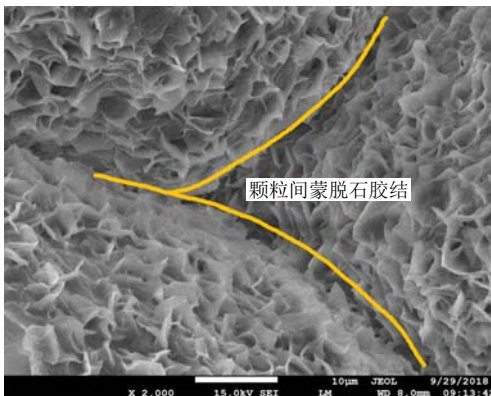
(b) 扫描电镜试验



(c) 整体 37 倍放大



(d) 能谱分析及 500 倍放大



(e) 局部 2000 倍放大



(f) 部分试验岩石样本

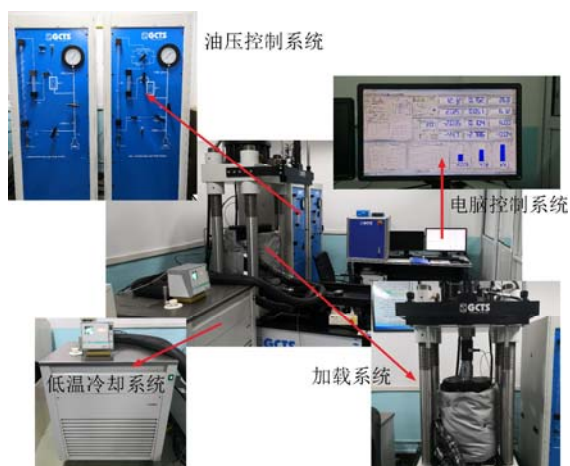
图 1 岩样分析及选取

Fig.1 Analysis and selection of rock samples

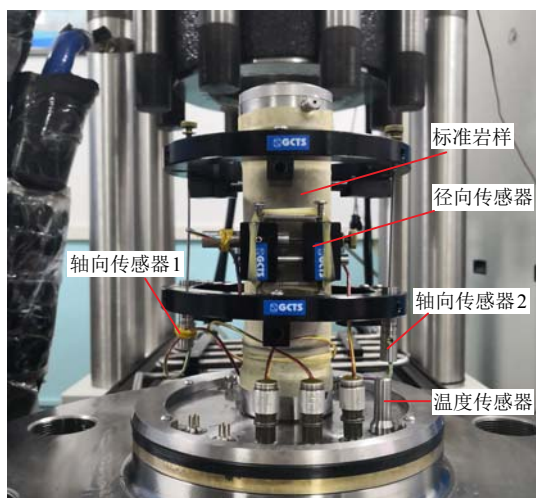
样本的离散型对试验结果的造成误差，声波测试采用 UTA - 2000A 超声波检测分析仪，传感器频率为 35 kHz，采样频率为 10 MHz，时间精度为 0.1 μs，传感器与试样之间用凡士林耦合后进行声波测试，50 个试样的纵波波速为 1 671~2 038 m/s，平均值为 1 867 m/s，离散系数为 1.978%，选取纵波平均值附近的岩石样本进行砂岩强度试验(见图 1(f))。

2.2 试验仪器

不同温度下饱和砂岩的单轴和三轴强度压缩试验采用西安科技大学岩石冻融实验室的 GCTS 电液伺服控制高低温高压岩石三轴测试系统(见图 2)，岩样温度可在加载过程中进行动态控制调整，包含升降温速度及升降温幅度，控温范围是 -30 °C ~ 80 °C，精度±0.01 °C；最大轴向压力为 1 500 kN，最大围压和最大孔压均为 140 MPa，精度 0.1%。试验设备包含 5 大系统，分别为轴向加载、围压加载、孔压加载、高低温控制、数据采集和数据处理组成，



(a) 岩石三轴压缩强度测试系统



(b) 岩样变形及温度监测装置

图2 GCTS 岩石低温三轴测试系统

Fig.2 GCTS rock low temperature triaxial testing system

可以完成高低温环境，高压应力条件下的岩石单轴和三轴压缩试验，同时可同步记录岩石加载过程中的轴向应变、径向应变以及应力 - 应变曲线。图 3 为岩石单轴抗拉试验机，该设备可以实现圆盘劈裂法试验。



图3 岩石抗拉试验机

Fig.3 Rock tensile testing machine

2.3 试验方案

所有试验样本放入烘箱 105 °C 条件下 24 h 的烘干，随后将干燥样本在真空饱和仪中进行不低于 12 h 的真空饱和，饱和样本在 GCTS 样本仓中进行装样，为防止岩样表明的水分蒸发以及降温过程中的水分迁移，保证试验的准确性，对岩样表明进行凡士林密封处理。根据冻结立井常用温度，试验设置 3 组温度，常温条件为对比分析组，分别为 +20 °C，0 °C，-10 °C 和 -20 °C；根据岩石埋深，设置 4 组围压，分别为 0，2，4 和 6 MPa。饱和砂岩单轴 - 三轴试验依据如下操作方法：(1) 完成装样后，调节温控系统以最大降温速率(10 °C/h)对岩样仓进行低温冻结，由常温(+20 °C)分别降至试验温度(常温条件下忽略此步骤)，并且恒温 8 h^[19]以上，以保证岩石样本内部温度均匀后方可进行力学试验；(2) 采用应力控制方式，按照 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 的条件加载试验设定的围压，加载速率为 0.05 MPa/s，稳压 2 min；(3) 维持围压不变，控制轴向应变为 0.12 mm/min 的速率，以消除加载速率对试验结果的影响，施加轴向压力直至冻结软岩破坏，整个加载过程中岩样仓温度始终保持为设计温度。

岩石抗拉强度试验采用劈裂法，将不同温度环境处理后的 $\phi 50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 试样放入压力机，要求上下承压板与岩样间各放置一根压条，为了把所有的压力变为沿直径方向分布的线性荷载，使试件中产生垂直于荷载作用线的张应力，并且保证通过圆

柱中心, 以防止受力偏心。以 0.5 MPa/s 的加载速率加载, 至试件破坏, 读取荷载值, 按照下式计算:

$$R_t = \frac{2P_t}{\pi DH} \quad (1)$$

式中: R_t 为岩石抗拉强度(MPa); P_t 为破坏荷载(N); D , H 分别为试件直径和高度(mm)。

3 试验结果分析

3.1 变形特征

图 4 为不同温度下饱和砂岩单轴和三轴压缩试验应力 - 应变曲线, 从图 4 可以看出, 单轴和三轴压缩过程经历压密阶段、线弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段。随着温度的降低, 各围压下砂岩强度均出现明显的增长; 相同围压情况下, 应变随温度的降低而减小, 岩石表现出明显的脆性破坏。 $+20\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 0\text{ }^\circ\text{C}$ 区间, 应变变化较小, 分析原因可能是由于岩石颗粒间的水分子未能全部发生冻结, 进而导致强度冰晶体与岩石颗粒的黏结强度增加不大; $0\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -10\text{ }^\circ\text{C}$ 区间, 应力大幅增加, 应变却出现大

幅减小, 4 种围压状态应变降低幅度在 0.143%~0.258%, 颗粒间被填充的水全部变为冰晶体, 与岩石颗粒相互黏结, 强度有着提高, 宏观表现出明显的脆性; $-10\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -20\text{ }^\circ\text{C}$ 区间, 应力相比 $0\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -10\text{ }^\circ\text{C}$ 区间增加幅度减弱, 在此低温环境下, 冰晶体均已全是冻结, 强度继续增加的原因可能是低温环境改变岩石颗粒与冰晶体的胶结状态。电镜扫描结果中, 岩石内部含有大量的 SiO_2 , Al_2O_3 和 CaO 等, 在缓慢冷却情况下, 温度越低, 水分子和界面硅羟基键将会存在较强氢键的作用; 负温较高时, SiO_2 界面水在缓慢降温过程中将存在不具有晶化转变过程, 2 种材料的结合性将会弱化^[20]。宏观上表现为强度压缩试验中, 岩石初始孔隙压密阶段很短, 屈服阶段也很短, 岩石破坏后峰值强度下降很快, 存在较小的残余强度, 整个冻结岩石有着塑性特性。低温环境下, 围压的增加导致压密阶段进一步缩短, 峰值前的屈服现象开始明显, 塑性变形转变为脆性变形, 峰值点所对应的应变前移, 峰值强度大幅提高, 岩石破坏后应力衰减速度减慢, 残余强度会随温度的下降开始增加。

扫描电镜结果如图 1(c)所示, 砂岩中含有大量

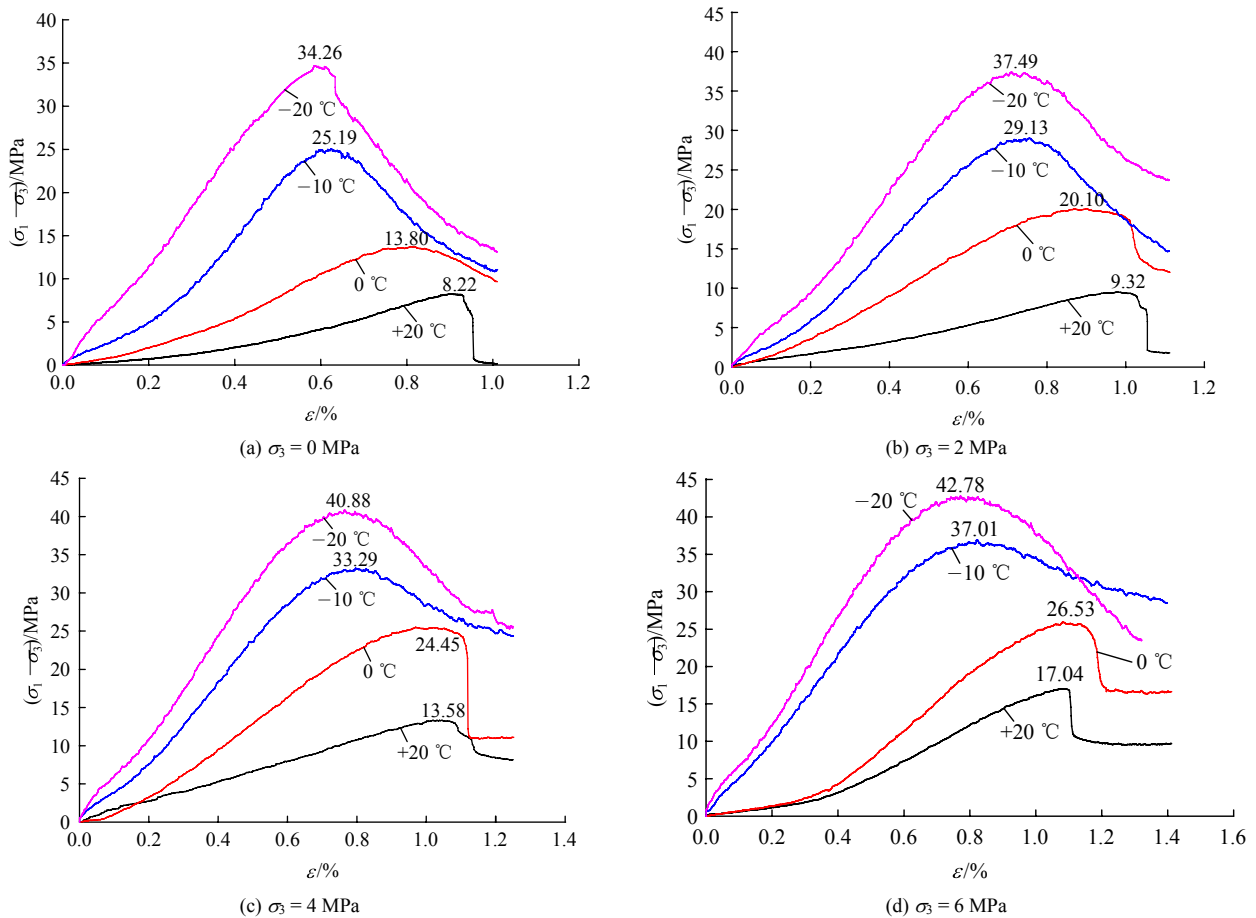


图 4 不同温度、不同围压下饱和砂岩应力 - 应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of saturated sandstone under different temperatures and different confining pressures

微裂隙，扩展方向不定，并且颗粒之间存在大量孔隙，属于大孔隙类岩石。饱和冻结砂岩在三轴压缩试验过程中，矿物颗粒会存在3个过程：弹性变形→裂隙滑移→孔隙闭合。温度和围压的改变影响着岩石颗粒与冰晶体颗粒之间的摩擦效果，引发岩石产生不同的破坏特征。围压的存在是岩石裂隙发生闭合，相对滑移就会减少，随围压的增加闭合效果会更加完整，试样的轴向变形就会减小，从而使岩石具有较大的弹性模量；另一方面，水填充了颗粒间的孔隙，低温环境下转化为冰晶体，冰颗粒与岩石颗粒间产生摩擦力，并且有相互约束的作用，故而受温度与围压的双重影响，冻结岩石的强度会随温度与围压的影响而发生改变。

表1为不同温度、不同围压砂岩试样三轴压缩试验结果。表中 T 为冻结温度； σ_1 和 σ_3 分别为峰值强度和围压值； R_t 为岩石抗拉强度； c 和 φ 分别为黏聚力和内摩擦角；从表1中可以看出：在常温 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 和经历 $0\text{ }^\circ\text{C}$ ， $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ， $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 低温冻结后，试样峰值强度随围压增大而单调增加。相同温度，随围压3次增加，峰值强度每次升高 $4\sim 6\text{ MPa}$ ；相同围压，随温度3次降低，峰值强度每次增大 $8\sim 12\text{ MPa}$ 。抗拉强度及黏聚力呈现增加趋势，内摩擦角同样也呈现出增加趋势，但随温度降低增加幅度出现减小现象。

表1 不同温度、不同围压砂岩三轴压缩试验结果

Table 1 Triaxial compression test results of sandstones with different temperatures and different confining pressures

$T/^\circ\text{C}$	编号	D/mm	H/mm	σ_3/MPa	σ_1/MPa	R_t/MPa	c/MPa	$\varphi/(^\circ)$
20	R-A2	51.00	100.80	0	8.20			
	R-A3-1	50.80	99.84	2	11.32	0.72	2.26	25.12
	R-A3-2	50.80	98.44	4	17.58			
	R-A3-3	50.86	100.30	6	23.04			
0	R-B2	50.62	100.14	0	13.80			
	R-B3-1	50.80	98.84	2	22.10	1.32	4.60	30.16
	R-B3-2	50.76	101.18	4	28.45			
	R-B3-3	50.82	100.40	6	32.54			
-10	R-C2	50.80	100.20	0	25.19			
	R-C3-1	51.00	101.18	2	31.13	3.46	7.27	31.04
	R-C3-2	50.82	99.92	4	37.29			
	R-C3-3	50.60	99.62	6	43.01			
-20	R-D2	50.80	99.92	0	34.26			
	R-D3-1	50.90	100.32	2	39.49	6.61	11.20	31.67
	R-D3-2	50.80	100.80	4	44.88			
	R-D3-3	50.90	100.48	6	48.78			

从表1可以看出，饱和砂岩的单轴抗压强度均随着温度的降低而增大；砂岩的单轴抗压强度在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 为 8.2 MPa ， $0\text{ }^\circ\text{C}$ 为 13.8 MPa ， $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 为 25.19 MPa ， $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 为 34.26 MPa ，总共增长了 317.8% ，说明温度对这冻结岩石强度变化的影响较大。随着负温的降低，抗压强度增长幅度大致为同条件环境下单轴强度的 $3\sim 4$ 倍。岩石大孔隙的存在，使得含水率很大，低温环境中，自由水含量随温度下降大量减少，含冰量对应增加。冰颗粒的存在使冰、岩颗粒间胶结能力增强，故而破坏强度会因温度的下降而出现成倍增长。所以，富水软岩地层应用人工冻结法施工对于提升岩石强度有着显著的效果。

3.2 破坏特征

当岩石发生张拉、剪切和塑性硬化破坏时，其形式与宏观破坏相似，在有围压存在的试验中，围压对于破坏样式具有如图5所示关系。

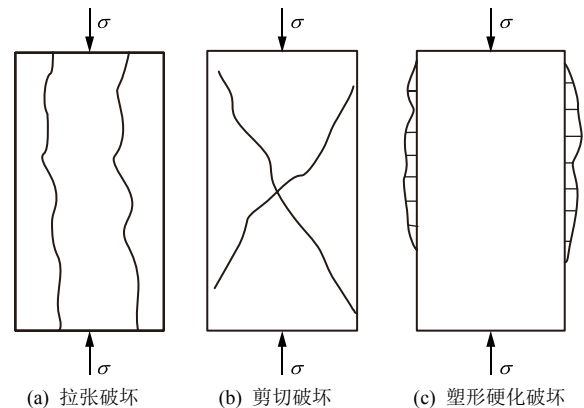


图5 岩石压缩试验3种破坏形式

Fig.5 Three failure modes of rock compression test

(1) 冻结砂岩试样在竖向加载条件下，发生破坏主要表现为与最大主应力方向一致的张拉破坏，且张拉破裂面明显；(2) 试验中部分试样的破坏形式会发生由张拉向剪切破坏的转变，此转变过程中试验系统的围压也对应发生增长；(3) 当试验中应力-应变曲线出现下沉段时，表明试样开始由剪切破坏向塑性屈服阶段过渡，表现为屈服硬化，此过程中围压会维持在某一特定增长值上。

通过观察试样在常温与不同冻结温度下的破坏形式，如图6所示，可将饱和砂岩试样不同温度下的单轴、三轴压缩试验最终的破坏形式归纳为以下3类：少数试样出现张拉破坏，此时破坏面由单一的张拉面为主，破坏形式与三轴压缩试验相似；以剪切破坏为主的试样，其表现为试样对角线方向形成有贯穿整个试样的一条或多条裂隙，具有清晰地

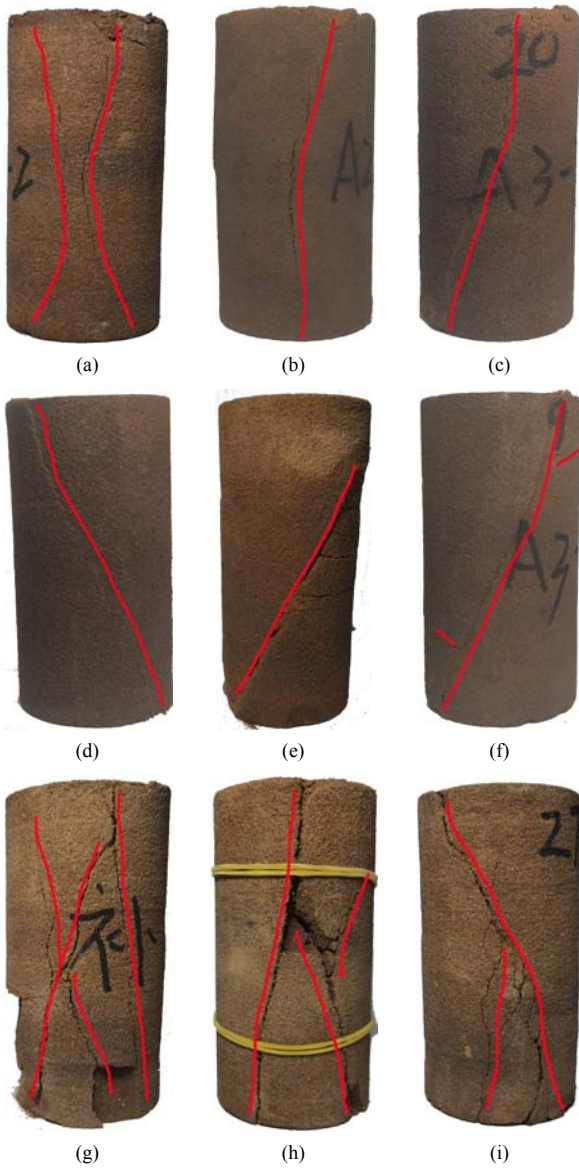


图 6 部分岩样破坏形态

Fig.6 Failure modes of some rock samples

剪切破坏面, 而少部分试样由于抗拉强度较低, 除主要剪切破坏面外还会出现大量局部破坏面; 以张拉和剪切共同作用破坏的形式, 试样两端侧面有层状剥落出现, 同时沿轴向有较多劈裂出现, 而试样的整体破坏是由 2 个或多个相互连接的剪切面共同实现的。

由于岩石构造本身以及形成历史的复杂性, 使得试样内部无可避免的出现瑕疵与孔隙, 再加上本试验采用的是黏结能力弱的泥质胶结型砂岩, 经电镜扫描能谱分析, 泥质胶结物中存在有大量的亲水性矿物, 故经过饱水后的试样黏结部位的含水量会高于其他部位, 再通过冻结后, 使得高含水部位的体积增大倍数高于其他部位, 故部分试样在冻结过程中出现冻胀破坏现象; 同时发现个别试样在冻结

后出现环状裂纹即裂纹平行于沉积节理方向, 原因是由于试样的采集是沿垂直于沉积节理方向钻取的, 破坏了试样所处的围压环境, 再加上沿沉积节理方向的胶结力弱于垂直节理方向, 故冻结饱和和试样时, 当水冻结胀应力沿沉积节理方向的应力高于该方向的抗拉强度时, 即发生沿环向的裂纹。

4 强度准则适用性探讨

4.1 强度准则

复杂应力状态下岩石的强度屈服和破坏特征是研究岩石三轴强度准则的基础^[21]。

(1) Mohr-Coulomb 强度准则

M-C 强度准则在岩体工程设计和地质环境构造等方面被广泛使用, 该准则具有明确的物理背景, 故而成为岩石力学经典强度理论, 其表达式为

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + \sigma_c \quad (2)$$

式中: k 为不同围压对三轴强度的影响系数, σ_c 为不同温度环境下岩石试样的单轴抗压强度。

(2) H-B 强度准则

H-B 强度准则是在 1980 年由 E. Hoek 和 E. T. Brown^[23-24]首次提出, 该公式反映了岩石破坏时主应力之间存在着非线性关系, 其表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{0.5} \quad (3)$$

式中: m_i 为岩石量纲一的经验参数, 反映岩石的软硬程度, 取值范围为 0.001~25.0。岩石参数 m_i 虽然可以通过查询表很方便地获得, 更为精确的取值可以通过室内试验获得。参数 m_i 可以从单轴压缩试验和抗拉试验获得, 计算方法如下:

$$m_i = 16 \frac{R_t}{\sigma_c} - \frac{\sigma_c}{R_t} \quad (4)$$

(3) 广义 H-B 强度准则

广义 H-B 强度准则是 E. Hoek 等^[25]于 1992 年对 H-B 强度进行了优化改进, 适用性范围扩展到岩石和岩体, 其表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (5)$$

式中: m_b , a 为不同岩体的量纲经验参数; s 为反映岩体破碎程度的参数。E. Hoek^[26]提出了基于地质

强度指标(*GSI*)的岩体参数 m_b , s , a 的取值方法, 其中 *GSI* 插值查表得到

$$\left. \begin{aligned} m_b &= \exp\left(\frac{GSI-100}{28}\right)m_i \\ s &= \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right) \\ a &= 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(4) 指数强度准则

指数强度准则是由 M. Q. You^[27]提出, 该公式在对试验数据进行拟合时, 能够反映出拟合偏差, 并针对异常数据点能够进行识别剔除^[28], 其表达式为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = Q_\infty - (Q_\infty - \sigma_c) \exp\left(-\frac{K_0 - 1}{Q_\infty - \sigma_c} \sigma_3\right) \quad (7)$$

式中: Q_∞ 为主应力差的极限值, K_0 为围压 0 时强度对围压的导数值。

(5) Rocker 强度准则

Rocker 强度准则是由 B. J. Carter 等^[29]提出的, 其表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_c \left(\frac{\sigma_3}{R_t} + 1 \right)^{m_i} \quad (8)$$

式(8)中, 指数 m_i 取值范围为 0.3~1。

本文选取 5 种常规三轴强度准则, 分别对不同围压, 不同温度下饱和砂岩强度压缩试验数据进行分析, 重点对强度准则的普遍适用性给予探讨研究。通过试验数据分别计算各准则中的相关试验常数, 代入强度准则的计算公式, 得到不同温度下的数学表达式如表 2 所示。

将表 2 中的准则表达式与试验点绘于同一图中, 如图 7 所示。结果表明: Mohr-Coulomb 强度准则具有明确的物理背景, 较低负温(0 °C→-20 °C)对饱和砂岩抗压强度的预测结果与试验值较为接近, 但随冻结温度的继续下降, 抗压强度将会线性增加, 这很明显不符合实际情况。4 种温度下对抗拉强度的预测结果分别为 3.31, 4.74, 8.45, 14.10 MPa, 是试验值 0.72, 1.32, 3.46, 6.61 MPa 的 2~5 倍, 显然, 基于 M-C 强度准则对饱和砂岩的整体拟合效果不理想。相同温度环境下, 处于低围压状态下(0 MPa→6 MPa)状态下的效果较好, 当围压继续增加后, 预测结果明显高估了岩石自身强度, 并且对岩石的抗拉强度预测偏差较大, 所以该准则只能应用在特定条件下的砂岩破坏所对应的最大最小主应力间的关系。尤明庆^[30]指出, 岩石是一种特殊

表 2 不同温度下不同强度准则表达式

Table 2 Different strength criterion expression formulas at different temperatures

强度准则	试验温度/°C	表达式
Mohr-Coulomb 准则	20	$\sigma_1 = 2.539\sigma_3 + 8.418$
	0	$\sigma_1 = 3.128\sigma_3 + 14.837$
	-10	$\sigma_1 = 2.981\sigma_3 + 25.212$
	-20	$\sigma_1 = 2.447\sigma_3 + 24.510$
H-B 强度准则	20	$\sigma_1 = \sigma_3 + 8.2(1 + 1.217\sigma_3)^{0.5}$
	0	$\sigma_1 = \sigma_3 + 13.8(1 + 0.646\sigma_3)^{0.5}$
	-10	$\sigma_1 = \sigma_3 + 25.19(1 + 0.202\sigma_3)^{0.5}$
	-20	$\sigma_1 = \sigma_3 + 34.26(1 + 0.061\sigma_3)^{0.5}$
广义 H-B 强度准则	20	$\sigma_1 = \sigma_3 + 8.2(0.52 + 1.017\sigma_3)^{0.5}$
	0	$\sigma_1 = \sigma_3 + 13.8(0.57 + 0.541\sigma_3)^{0.5}$
	-10	$\sigma_1 = \sigma_3 + 25.19(0.57 + 0.168\sigma_3)^{0.5}$
	-20	$\sigma_1 = \sigma_3 + 34.26(0.57 + 0.050\sigma_3)^{0.5}$
指数强度准则	20	$\sigma_1 = 41.62 - 33.42 \exp(-0.098\sigma_3)$
	0	$\sigma_1 = 61.65 - 47.85 \exp(-0.086\sigma_3)$
	-10	$\sigma_1 = 70.67 - 45.48 \exp(-0.082\sigma_3)$
	-20	$\sigma_1 = 72.02 - 37.76 \exp(-0.079\sigma_3)$
Rocker 强度准则	20	$\sigma_1 = 8.2(1 + \sigma_3 / 0.72)^{0.456}$
	0	$\sigma_1 = 13.8(1 + \sigma_3 / 1.32)^{0.512}$
	-10	$\sigma_1 = 25.19(1 + \sigma_3 / 3.46)^{0.536}$
	-20	$\sigma_1 = 34.26(1 + \sigma_3 / 6.61)^{0.562}$

材料, 结构形式导致力学特性存在着非均匀性, 岩石内部受力不均, 试验结果会呈现出非线性关系。

Hoek-Brown 准则和广义 Hoek-Brown 准则对砂岩的抗压强度预测值与试验值差异较大。20 °C 状态下的饱和砂岩, 强度准则均给出了很高的预测估计, 对抗拉强度的预测较为接近试验值; 0 °C 状态下的冻结砂岩, 强度准则对抗压和抗拉均给出了较接近试验数据的预测估计; -10 °C 状态下的冻结砂岩, Hoek-Brown 准则对抗压强度的预测较为真实准确, 抗拉值明显增大, 而广义 Hoek-Brown 准则的抗压预测值比实际值要低, 抗拉值较准确; -20 °C 状态下的变化趋势与-10 °C 状态的趋势接近相同, 但广义 Hoek-Brown 准则在-20 °C 状态抗拉预测值显著大于实际值。分析原因可能是 20 °C 饱水状态削弱了岩石强度, 故而 2 种预测值相比实际值要增加, 而 0 °C 的预测较为准确, 是因为产生部分冰晶体来弥补饱水状态的削弱部分, 冰晶体增强强度, 饱和削弱强度, 故而预测强度较为准确。针对-10 °C 和

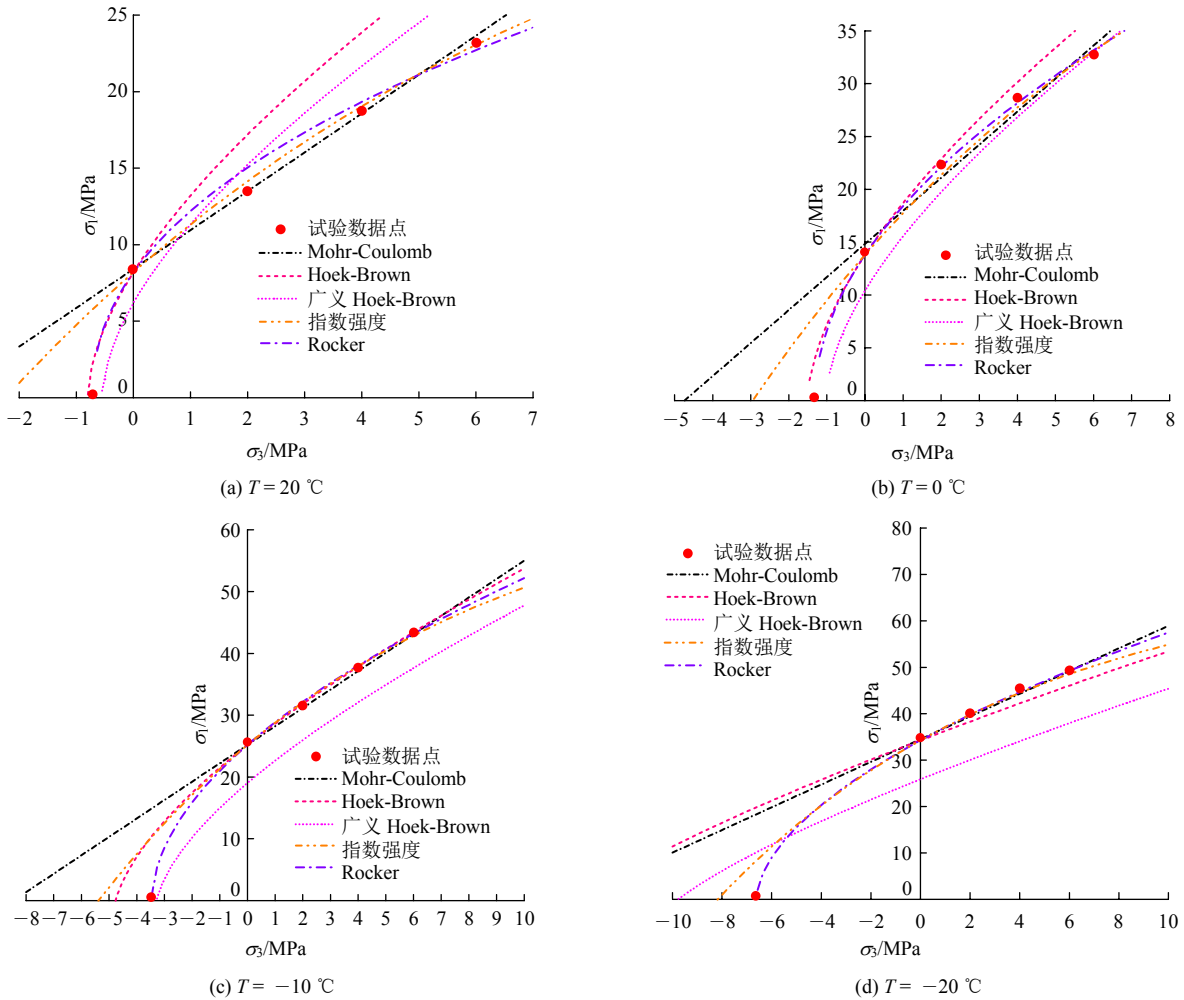


图 7 不同温度下饱和砂岩强度准则曲线

Fig.7 Strength criterion curves of saturated sandstone at different temperatures

-20 °C 的预测值较低, 可能是低温环境下对 m_b , s , a 值的预估影响, 学者在预估这三参数时未涉及温度变化的影响, 故而使其预测值与实际值相差甚远, 考虑是冻结状态相比原生结构发生了损伤破坏, 影响三参数的计算可能偏小, 故而导致抗压强度预测值比实际值偏小。

指数强度准则对不同温度的饱和砂岩抗压强度的预测值与试验值基本一致, 但指数强度准则对抗拉强度均给出了偏高的估计, 在 σ_3 轴负方向区近乎直线, 明显偏离抗拉强度试验点。其中 4 种温度状态下的预测值分别为 2.21, 2.95, 5.44, 8.06 MPa, 基本上是试验值的 2~3 倍, 显然不适合预测砂岩的抗拉强度计算; 并且指数强度准则需要计算大量的参数, 方可进行强度预测, 考虑到每一种参数会在不同条件的下变化, 故而认为该准则不能更好的适用于不同温度下饱和砂岩中。

Rocker 准则是基于单轴抗压、抗拉强度及指数 m_1 确定的, 而对饱和砂岩的抗拉值是将试验值直接

代入式(8), 从图 7 可以看出, 抗压强度的预测值与试验值偏差较小。随围压的增大, 峰值强度的增幅有趋于平稳的趋势, 这也比较符合实际情况。此外, 该公式的计算较为简单直接, 通过单轴抗压、直接剪切试验分别获取 σ_c , R_1 , 即可很好地预测不同温度下饱和砂岩强度。

饱和砂岩 5 种强度准则预测曲线如图 7 所示, 综上所述: 直线型的 M-C 强度准则的预测曲线随 σ_3 增大, σ_1 将会偏离大多数试验数据; H-B 准则和广义 H-B 准则受温度影响较大, 预测值与试验值从抗压、抗拉强度来说都存在较大的偏差; 指数强度准则对抗压强度有很好的预测, 抗拉存在偏差, 计算复杂; Rocker 准则对抗压、抗拉强度都能较好的预测, 计算公式简单方便, 能够很好地对不同温度饱和砂岩强度进行预测分析。

4.2 考虑温度效应的 Rocker 强度准则

结果分析 Rocker 强度准则更为简单、方便和精准的预测不同温度环境的饱和砂岩强度。Rocker 公式

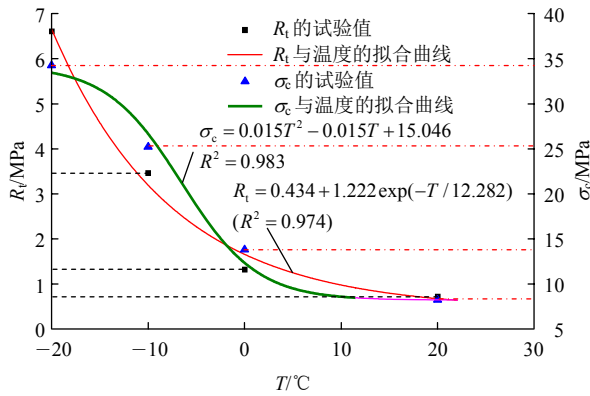


图8 σ_c , R_1 与温度的拟合曲线
 Fig.8 Fitting curve of σ_c , R_1 and temperature

中的主应力 σ_1 和无侧限单轴抗压强度 σ_c 、抗拉强度 R_1 及系数 m_i 均会受冻结温度影响，而偏应力 σ_3 为试验控制条件，与外界环境无关，属于人为控制条件。

峰值强度随着冻结温度的降低有所提高，随着围压的增大而提高。峰值强度与温度的关系近似满足二次多项式，故而无侧限单轴抗压强度与温度关系采用二次函数拟合^[31]，比较能准确地反映出温度对无侧限单轴抗压强度的影响，函数方程为

$$\sigma_c = A_1 T^2 + B_1 T + C_1 \quad (9)$$

抗拉强度随冻结温度关系采用 ExpDec1 函数拟合，ExpDec1 为一阶衰减指数函数，冻结软岩由 $-20\text{ }^\circ\text{C} \sim +20\text{ }^\circ\text{C}$ 强度下降，受到低温环境冰晶体的作用，强度受到温度影响发生衰减。函数方程为

$$R_1 = A_2 + B_2 \exp(-T/C_2) \quad (10)$$

参数 m_i 与温度关系拟合采用线性函数，函数方程为

$$m_i = kT + b \quad (11)$$

式中： k , b 为参数 m_i 与温度拟合直线的斜率与截距。

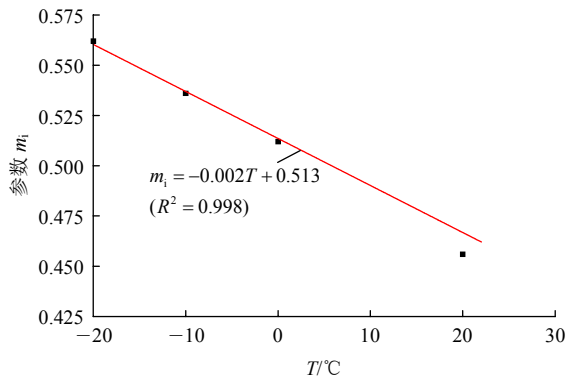


图9 参数 m_i 与温度的拟合曲线
 Fig.9 Fitting curve of parameter m_i and temperature

将式(9)~(11)代入式(8)，得到

$$\sigma_1 = \begin{cases} (A_1 T^2 - B_1 T + C_1) \left[\frac{\sigma_3}{A_2 + B_2 \exp(-T/C_2)} + 1 \right]^{kT+b} \\ \sum_{i=0}^2 A_i T^i \left[\frac{\sigma_3}{B + C \exp(-T/D)} + 1 \right]^{kT+b} \end{cases} \quad (13)$$

式中： A_i , B , C , D , k , b 均为试验常数。将表 2 中的试验数据代入，可以求得试验常数，分别取 $\sigma_3 = 0, 2, 4, 6\text{ MPa}$ ，得 4 条预测曲线如图 10 所示。

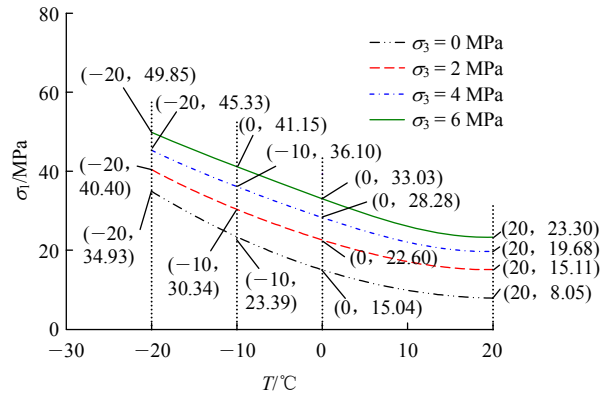


图10 考虑温度效应的 Rocker 强度准则预测曲线
 Fig.10 Rocker strength criterion prediction curve considering temperature effect

图 10 表明不同围压下，4 条预测曲线的趋势基本相同， $\Delta\sigma_{02} > \Delta\sigma_{24} > \Delta\sigma_{46}$ ($\Delta\sigma_{ij}$ ，其中 ij 代表相同温度不同围压下的应力差)，表明围压增加，强度的增幅将会减弱。预测曲线中 $+20\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow +10\text{ }^\circ\text{C}$ 曲线斜率最小，在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 以后强度增幅很快。鉴于实验设备的原因，对于温度低于 $-30\text{ }^\circ\text{C}$ 的强度变化需要进一步试验分析，分析存在 2 种可能，强度进一步提升，也可能强度会出现下降，原因是过冷将会造成岩石内部水分迁移，造成局部冻胀损伤，宏观表现为强度下降。而围压越大，冰晶体产生的冰胀力与围压二者共同作用下将会对岩石颗粒的劣化作用就会越强，表现为强度下降速率加快。故此预测曲线仅适用于温度范围在 $+20\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow -20\text{ }^\circ\text{C}$ 的饱和砂岩。

式(13)得到的考虑温度效应的 Rocker 准则在相应温度条件下，饱和砂岩的强度预测值与试验值接近相同，表明该式能够很好的反映出不同温度下饱和砂岩的抗压强度。从预测值与试验值的比值中，可以看出常温状态下岩石强度的预测离散性较大一些，但围压的升高，预测值更加接近试验值；随温度的下降，预测值的离散性表现微弱， $0\text{ }^\circ\text{C}$ ， $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 与 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 状态下的冻结岩石强度预测值与试验值的误差比仅为 $1\% \sim 7\%$ 。

表 3 饱和砂岩考虑温度效应的 Rocker 准则强度预测值与试验值对比

Table 3 Comparison between strength prediction values by Rocker criterion and test values for saturated sandstone considering temperature effect

温度/°C	试验值/MPa				预测值/MPa				$\sigma_{i(\text{预测值})} / \sigma_{i(\text{试验值})}$			
	$\sigma_3 = 0$	$\sigma_3 = 2$	$\sigma_3 = 4$	$\sigma_3 = 6$	$\sigma_3 = 0$	$\sigma_3 = 2$	$\sigma_3 = 4$	$\sigma_3 = 6$				
20	8.20	11.32	17.58	23.04	8.05	15.11	19.68	23.30	0.98	1.33	1.12	1.01
0	13.80	22.10	28.45	32.54	15.04	22.60	28.28	33.03	1.09	1.02	0.99	1.02
-10	25.19	31.13	37.29	43.01	23.39	30.34	36.10	41.15	0.93	0.97	0.97	0.96
-20	34.26	39.49	44.88	48.78	34.93	40.40	45.33	49.85	1.02	1.02	1.01	1.02

5 结 论

以饱和砂岩为例,进行了不同围压和不同温度条件下的单轴、三轴强度压缩及抗剪强度试验,分析了不同条件工况下饱和砂岩的强度特性。随后基于 5 种常见的强度准则,将试验常数代入计算公式,分析了不同温度下各强度准则预测值与试验值的偏差性。将预测效果较好的 Rocker 准则各参数考虑温度效应的影响,提出了预测曲线,结果较准确。

(1) 强度特性方面:常温状态下饱和砂岩的强度明显较低;随冻结温度的下降,强度提升明显,大孔隙高含水的岩石对于低温环境十分敏感。相同围压下,低温强度比常温强度提升 1~4 倍,围压越大,抗压强度的增幅也不断提高;相同温度下,围压从 0~6 MPa,强度提升 1~3 倍。针对此饱和砂岩,温度对强度的敏感程度高于围压。

(2) Mohr-Coulomb 准则对于较大低温(低于-20 °C)和较大围压(大于 6 MPa)时,饱和冻结软岩的预测效果不理想。Hoek-Brown 准则及广义 Hoek-Brown 准则二者的整体预测效果不理想;指数强度准则和 Rocker 准则对于抗压强度的预测效果较好,但综合抗压、抗拉及公式的简单实用性三者对比分析,Rocker 强度准则能够更好的进行不同温度环境下饱和砂岩的强度预测。

(3) 根据试验结果,得到了+20 °C→-20 °C 环境下,针对饱和砂岩仅含温度及围压与抗压强度的关系式,提出了考虑温度效应的非线性 Rocker 强度准则,试验结果与计算预测值的误差比仅为 1%~7%。

参考文献(References):

[1] 杨更社, 奚家米, 李慧军, 等. 三向受力条件下冻结岩石力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 459 - 464.(YANG Gengshe, XI Jiami, LI Huijun, et al. Experimental study of rock

mechanical properties under triaxial compressive and frozen conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 459 - 464.(in Chinese))

- [2] 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.(in Chinese))
- [3] 杨更社, 奚家米, 王宗金, 等. 胡家河煤矿主井筒冻结壁岩石力学特性研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 565 - 570.(YANG Gengshe, XI Jiami, WANG Zongjin, et al. Study on rock mechanical properties of frozen wall of main shaft in Hujiahe Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 565 - 570.(in Chinese))
- [4] 杨更社, 奚家米, 李慧军, 等. 煤矿立井井筒冻结壁软岩力学特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 690 - 697.(YANG Gengshe, XI Jiami, LI Huijun, et al. Experimental study on the mechanical properties of soft rock of coal mine shaft sidewalls under the frozen conditions[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(4): 690 - 697.(in Chinese))
- [5] 杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻结温度对岩石细观损伤扩展特性影响研究初探[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1 409 - 1 412.(YANG Gengshe, ZHANG Quansheng, PU Yibin. Preliminary study on meso-damage propagation characteristics of rock under condition of freezing temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1 409 - 1 412.(in Chinese))
- [6] 奚家米, 杨更社, 庞磊, 等. 低温冻结作用下砂质泥岩基本力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1 262 - 1 268.(XI Jiami, YANG Gengshe, PANG Lei, et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of sandy mudstone under low freezing temperature[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1 262 - 1 268.(in Chinese))
- [7] 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 岩石冻融循环试验建议性方案探讨[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1 775 - 1 782.(SHEN Yanjun, YANG Gengshe, RONG Tenglong, et al. Proposed scheme for freeze-thaw cycle tests on rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1 775 - 1 782.(in Chinese))
- [8] 朱杰, 徐颖, 李栋伟, 等. 泊江海子矿白垩纪地层冻结软岩力学特性试验[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2016, 46(3): 798 - 804.(ZHU Jie, XU Ying, LI Dongwei, et al. Experimental study on

- mechanical properties of frozen soft rock of cretaceous formation in Bojianghaizi mine[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2016, 46(3): 798 - 804.(in Chinese)
- [9] 张慧梅, 张蒙军, 谢祥妙, 等. 冻融循环条件下红砂岩物理力学特性试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(1): 69 - 74.(ZHANG Huimei, ZHANG Mengjun, XIE Xiangmiao, et al. The experimental study on the physical and mechanical properties of red sandstone under the action of freeze-thaw cycles[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015, 46(1): 69 - 74.(in Chinese))
- [10] BAYRAM F. Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 83(12): 98 - 102.
- [11] GHOLAMREZA K, REZA Z S, YASIN A. The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of Upper Red Formation sandstones, central part of Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 8(8): 5991 - 6001.
- [12] WINKLER E M. Frost damage to stone and concrete: geological considerations[J]. Engineering Geology, 1968, 2(5): 315 - 323.
- [13] 朱合华, 张琦, 章连洋. Hoek-Brown 强度准则研究进展与应用综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 1945 - 1964. (ZHU Hehua, ZHANG Qi, ZHANG Lianyang. Review of research progresses and applications of Hoek-brown strength criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 1945 - 1964.(in Chinese))
- [14] 石祥超, 孟英峰, 李 皋. 几种岩石强度准则的对比分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增1): 209 - 217.(SHI Xiangchao, MENG Yingfeng, LI Gao. Comparative analyses of several rock strength criteria[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp.1): 209 - 217.(in Chinese))
- [15] 沈华章, 王水林, 刘泉声. 模拟应变软化岩石三轴试验过程曲线[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1647 - 1654.(SHEN Huazhang, WANG Shuilin, LIU Quansheng. Simulation of constitutive curves for strain-softening rock in triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1647 - 1654.(in Chinese))
- [16] 尤明庆. 完整岩石的强度和强度准则[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2013, 52(5): 569 - 583.(YOU Mingqing. Strength and strength criteria for intact rocks[J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2013, 52(5): 569 - 583.(in Chinese))
- [17] 尤明庆. 围压对岩石试样强度的影响及离散性[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 929 - 937.(YOU Mingqing. Effect of confining pressure on strength scattering of rock specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 929 - 937.(in Chinese))
- [18] 路德春, 杜修力. 岩石材料的非线性强度与破坏准则研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2394 - 2408.(LU Dechun, DU Xiuli. Research on nonlinear strength and failure criterion of rock material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12): 2394 - 2408.(in Chinese))
- [19] 申艳军, 杨更社, 王 铭, 等. 冻融循环过程中岩石热传导规律试验及理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2417 - 2425.(SHEN Yanjun, YANG Gengshe, WANG Ming, et al. Experimental and theoretical study on thermal conductivity of rock under cyclic freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2417 - 2425.(in Chinese))
- [20] 黄秀峰, 潘礼庆, 李晨曦, 等. 低温下二氧化硅孔隙内水的振动性质[J]. 物理学报, 2012, 61(13): 136801.(HUANG Xiufeng, PAN Liqing, LI Chenxi, et al. Vibrational dynamics of water confined in mesoporous silica under low temperature[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(13): 136801.(in Chinese))
- [21] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. Fundamentals of rock mechanics[M]. New York: Black Well Publishing, 2007: 90 - 97.
- [22] 中华人民共和国行业标准编写组. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL264—2001 Water conservancy and hydropower engineering specifications for rock tests[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001.(in Chinese))
- [23] HOEK E, BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1980, 106(9): 1013 - 1035.
- [24] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rocks[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980: 527.
- [25] HOEK E, WOOD D, SHAH S. A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses[C]// HUDSON J A ed. Proceedings of the Rock Characterization, Symposium of ISRM. London: British Geotechnical Society, 1992: 209 - 214.
- [26] HOEK E. Strength of rock and rock masses[J]. International Society for Rock Mechanics News Journal, 1994, 2(2): 4 - 16.
- [27] YOU M Q. True triaxial strength criteria for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(1): 115 - 127.
- [28] 尤明庆. 岩石强度准则的数学形式和参数确定的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2172 - 2183.(YOU Mingqing. Study of mathematical equation and parameter determination of strength criteria for rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2172 - 2183.(in Chinese))
- [29] CARTER B J, DUNCAN S E J, LAJTAI E Z. Fitting strength criteria to intact rock[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1991, 9(1): 73 - 81.
- [30] 尤明庆. 岩石的力学性质[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 60 - 64.(YOU Mingqing. Mechanical properties of rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 60 - 64.(in Chinese))
- [31] 奚家米, 杨更社, 董西好. 冻结温度对砂质泥岩力学特性的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(4): 92 - 97.(XI Jiami, YANG Gengshe, DONG Xihao. Effect of freezing temperature on mechanical properties of sandy mudstone[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science, 2014, 34(4): 92 - 97.(in Chinese))