

水分及冻融环境下岩石抗拉力学特性

张慧梅¹, 杨更社²

(1. 西安科技大学 力学系, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:对红砂岩和页岩2种岩石进行干燥、饱水及开放系统下的冻融循环试验,并对各种状态下的岩样进行巴西试验及抗拉强度测试的有效性分析;分析了岩石的损伤劣化及破坏行为,系统研究了岩性、水分及冻融循环作用对岩石抗拉力学特性的影响,并对岩石抗拉压特性的同一性和差异性进行比较.研究表明:水分对岩石内部微观结构产生影响,削弱了岩石颗粒间的连结力;冻融作用产生的冻胀力与孔隙水压力导致岩石内部出现局部损伤;在水分及冻融循环的作用下,岩石抗拉强度及弹性模量显著降低,红砂岩反映更敏感;损伤不仅受岩石内部缺陷随机分布的影响,更重要的是受应力状态的影响,在拉应力作用下岩石缺陷对强度降低特别敏感.

关键词:岩石力学;干燥;饱和;冻融循环;抗拉特性

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1672-9102(2013)03-0035-06

寒区工程结构岩石承受着地下水及冻融循环的作用,导致材料物理力学性质的不可逆劣化,给寒区工程建设造成极大危害^[1-2].因此,作为西部资源开发的基础性研究,认识水分及冻融环境下岩石物理力学特性的变化规律具有及其重要的意义.

迄今为止,国内外对于冻融岩石在压应力条件下的力学特性已作了大量研究^[3-8].然而,地下工程围岩体常处于复杂的应力状态,由于岩石的抗拉强度远低于抗压强度,所以岩体工程总是从拉应力区开始破坏,抗拉强度是岩体工程稳定性评价的重要力学指标^[9].本文针对红砂岩和页岩2种岩石,开展了水分及冻融条件下岩石物理力学特性研究,阐述了水分及冻融循环作用对岩石抗拉性能的影响.

1 试验概况

从工程现场获取红砂岩和页岩2种新鲜完整大岩块,加工成 $\varphi 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 圆柱形标准试样,挑

选波速相近的2种试样各24块作为试验岩样,每3块为1组,共分为8组,分别对应干燥组1组,饱水组1组,冻融组6组.将所有岩样放入烘箱中干燥后置于干燥皿内冷却至室温,然后将饱水组及冻融组岩样加压抽气后吸水饱和,最后将冻融组岩样进行开放系统下的冻融循环试验.试验设备为XMT605快速冻融试验机,单次冻融循环温度变化范围设定为 $+20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +20\text{ }^{\circ}\text{C}$.对干燥、饱水状态及经历设定冻融循环次数后的岩样进行质量测定,计算得到红砂岩和页岩的孔隙率分别为14.26%和2.68%,饱和含水量分别为7.25%和1.12%;同时进行冻融循环过程记录.

将干燥组、饱水组及经历5次,10次,20次,40次,60次,100次冻融循环后的岩样分别进行抗拉力学特性试验.试验设备为WDW-100低温电子万能试验机,试验中应变速率为 0.5 mm/min .

收稿日期:2012-09-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11172232,41272430);陕西省自然科学基金项目(2011JM1003);陕西省教育厅专项基金项目(11JK0525)

通信作者:张慧梅(1968-),女,山西大同人,博士,教授,主要从事力学与岩土工程方面的教学与研究工作. E-mail: zhanghuimei68@163.com

2 岩石冻融循环试验

2.1 岩石冻融劣化过程分析

试验发现,由于红砂岩孔隙率较高,水分子容易渗入岩样内部,在矿物颗粒表面形成浸润、吸附及扩散,增加了岩石颗粒的分散性,岩样表面在第5次冻融循环后随即出现了游离的颗粒;冻融过程中产生的冻胀力和水分迁移使得岩石产生新的损伤,游离颗粒剥落;第10次冻融循环后,岩样四周颗粒剥落加剧,并在上表面出现龟裂现象;第16次冻融循环后,岩样表面形成软化层并出现片状剥落,上表面剥落严重,最大剥落高度达13 mm;之后随着冻融次数的增加,微孔隙不断增大,岩样剥落加剧,但尚能保证试样的完整性;到第32次冻融循环后,岩样表面出现肉眼可见的环向裂纹,并随冻融次数的增加沿裂纹所在的层理方向扩展;到第43次冻融循环后,宏观裂纹出现,岩样沿层理面方向扩展显著,水分向内部迁移,冻融损伤不断加深;第65次冻融循环后,岩样沿层理方向出现断裂,断层处剥蚀严重,断层基本保持平齐;到第71次冻融循环后,所有岩样轻轻触碰便导致整体崩塌。

而页岩由于孔隙率及饱和含水量较低,在冻融循环初期,没有观察到试样表面的变化,但随着冻融循环次数的增加,水分不断向原生缺陷渗透,冻胀力作用于缺陷表面,会产生新的损伤;30次冻融循环后,试样表面沿层理方向微裂纹萌生,但随着冻融循环的进行,裂纹并没有明显的扩展,直到第100次冻融循环后,试样表面都没有出现很明显的细裂纹。整个冻融循环过程中页岩试样没有出现任何形式的剥落及断裂现象。冻融循环对2种岩石产生的损伤劣化模式如图1所示。

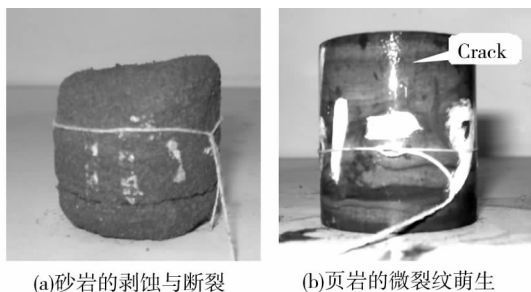


图1 岩石的冻融损伤劣化

Fig. 1 Freeze - thaw damage deterioration of rock

2.2 冻融循环后岩石的质量变化

图2为2种岩石的质量随冻融次数变化的关系曲线。图中 n 为冻融循环次数, m 为岩样经历冻融循

环后扣除冻融损失部分的剩余质量。

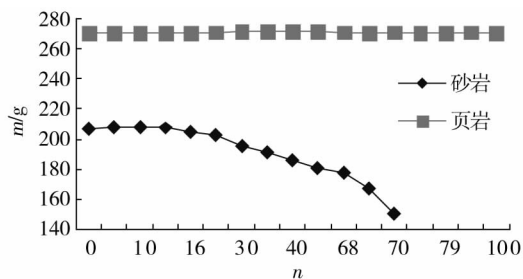


图2 岩石质量随冻融次数的变化图

Fig. 2 Change of the rock weight with freeze - thaw cycle

图中显示:砂岩试样在最初10次冻融循环过程中质量有增加的趋势,但增加幅度仅为0.47%。这主要是因为红砂岩孔隙率及饱和含水量较高,冻融循环过程中由于水冰反复相变造成岩石微孔隙不断增大,水分向内部迁移的结果;而在10次冻融循环之后,由于冻融剥蚀产生的质量损失已经大于由孔隙增大引起的质量增加,岩样残余质量开始减小,且减小幅度不断增加,到第71次冻融循环,岩样总质量减少27.48%。

页岩试样的质量在整个冻融循环过程中总体有所增加,但增加幅度很小,到第100次冻融循环后,岩样总质量增加了0.13%。页岩试样并没有出现剥落及破碎现象,导致其质量增加的主要因素应该是含水量的变化。

与文献[5]同种砂岩 $\varphi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 圆柱形标准试样的冻融试验现象相比,本次试验中小砂岩试样的冻融剥蚀程度严重,尽管没有出现块状剥落模式,但总质量损失比大砂岩试样多23.31%。试验中2种砂岩试样的岩性、含水状态和冻融循环条件完全相同,仅仅是试样的尺寸不同,说明砂岩的冻融损伤及劣化模式存在尺寸效应。而页岩试样的尺寸效应表现不明显。

3 冻融岩石抗拉性能试验

3.1 巴西试验方法

获得岩石抗拉强度值的试验方法主要分为直接法和间接法两大类。直接拉伸法虽然可以获得拉伸强度,但试件必须安装在拉伸夹具中,要保证试件表面既不被损伤又要夹紧比较困难,而且在试件两端连接处往往存在应力集中现象,影响岩石的抗拉强度测试。因此多采用间接拉伸法。

在间接拉伸试验方法中,最著名的是巴西试验法(Brazilian test),俗称劈裂试验法。巴西试验是在圆柱体试样的直径方向上对试样施加压力,使试样中

心线上的水平正应力处于均匀受拉状态,尽管该拉应力比值比垂直方向压应力的值低得多,但由于岩石的抗拉强度远远小于其抗压强度,因此试件沿径向产生张拉破坏.通过圆盘劈裂破坏时的加载轴压可换算岩石的抗拉强度,计算公式为

$$\sigma_b = \frac{2P_{\max}}{\pi dt} \quad (1)$$

式中, σ_b 为岩石的抗拉强度; P_{\max} 为试件劈裂破坏时的最大荷载; d 和 t 为试件的直径和厚度.

巴西试验法的实质是压应力作用下的拉伸破坏,试样由中心部位起裂,平面径向破裂,是目前国内外岩土工程界测定岩石抗拉强度最基本、应用最广泛的试验方法^[10-11].本次试验采用巴西法间接测定岩石的抗拉强度.

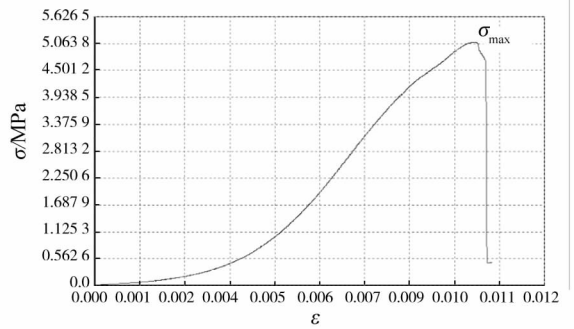
3.2 岩石破坏过程及破坏形态

图3(a)给出了典型劈裂破坏砂岩试样13-7的应力应变曲线.

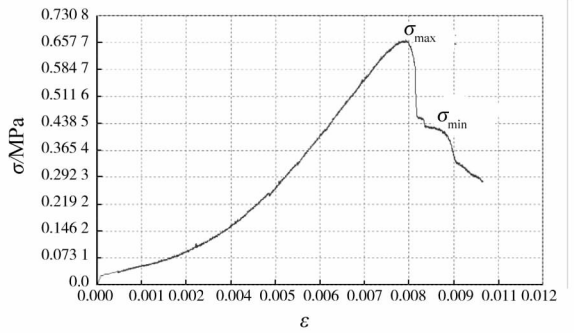
从图3(a)可以看出,在试验加载初期,应力-应变曲线中出现压密段,随着应力的增加,只是在试样的中间部位出现一些发生拉伸损伤的单元,由于材料的非均匀性,这些单元分布在试样中部一定宽度的区域内.由于微元破裂数目很少,这些单元损伤释放的能量较少,所以整个试样的应力-应变曲线仍然基本保持线性关系,岩石的宏观行为主要体现为弹性变形.随着外部载荷的增加,这些损伤的单元发展成为拉张裂纹并互相贯通(该裂纹称为主裂纹),导致整个试样的劈裂破坏,应力-应变曲线上应力跌落.拉张破坏过程中,岩石结构出现宏观不连续,这种现象本质上是形成了新结构面,并且应力状态发生相应调整,属于典型的结构非线性问题.材料性质细观非均匀性和缺陷分布的随机性是造成岩石内部裂纹产生以及宏观应力-应变曲线非线性的根本原因.

应该指出,部分试件在达到加载过程的最大应力 σ_{\max} 后,应力应变曲线会发生一个先下降后上升的过程,同时观察到裂纹从试样中心部位引发,并且顺着加载直径的方向扩展,其后还可能会观察到在主裂纹两侧出现次生裂纹.对应代表性试件14-5,10-20的应力应变曲线如图3(b)及图3(c)所示.

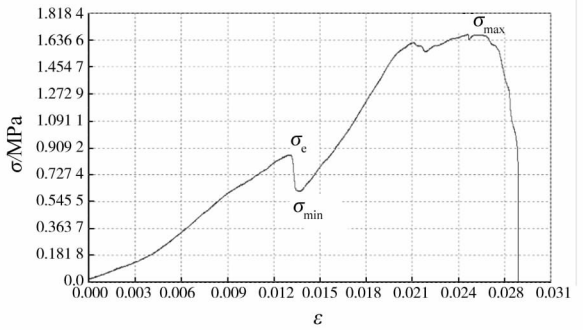
2种岩样巴西试验的破坏形态如图4所示.试件的破坏形式大部分为破坏面通过中心线,沿径向裂开成2个半圆盘,劈裂面几乎呈一平面(图a);部分试件从接近平台和外表面圆弧交接处引发次生裂纹(图b);随着冻融循环次数的增加,极少数试件加载点附近出现破坏区,但破坏面积较小(图c);只有个别试件中心出现一定的破碎带(图d).



(a)13-7试件



(b)14-5试件



(c)10-20试件

图3 典型劈裂抗拉试件应力应变曲线

Fig. 3 Stress - strain curves of typical splitting tensile specimens

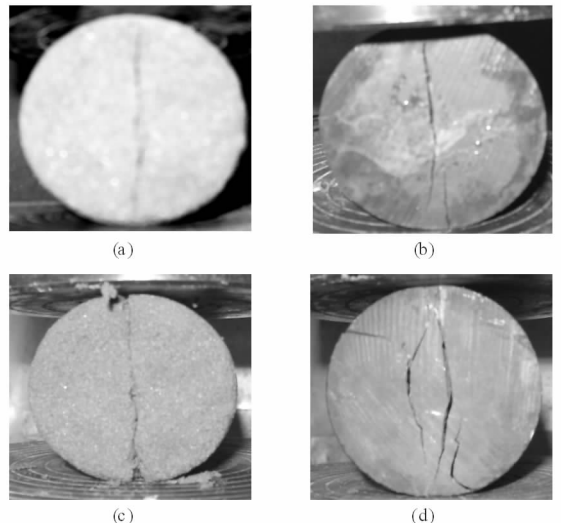


图4 冻融岩石劈裂抗拉破坏形态

Fig. 4 The failure modes of splitting tensile for freeze - thaw rock

3.3 抗拉强度测试的有效性分析

从 2 种岩石的试验数据来看,与岩石的抗压力学特性相比,抗拉强度的测定结果出现较大的离散性.巴西试验测得的强度也称为劈裂抗拉强度,试样破裂的理想状态是从试样中心起裂,沿加载直径方向扩展,一劈为二.次生裂纹何时何处产生及如何发展直接影响到应力-应变曲线的形态,并从根本上影响到测试的有效性^[12].因此在分析试验结果之前,应判断测试的有效性.

正常和有效的试验记录如图 3(b)所示,它的特点是:直线段代表的弹性变形刚一结束就达到最大应力 σ_{max} ,然后应力迅速下降到一个局部最小值 σ_{min} ,下降的幅度应该比较大才可以使裂纹的扩展达到临界值,后又开始转为缓慢上升,但不会超过前面的 σ_{max} ,这表明次生裂纹发生在主裂纹基本上完成主导作用之后,此时主裂纹对确定抗拉强度 σ_b 和断裂韧度 I_{cK} 的主导机制已经完成^[14],这样的次生裂纹对测试结果并无大碍,故认为试验有效.

不正常或无效的试验记录如图 3(c)所示,它的特点是:弹性变形结束时的应力 σ_e 并不是整个试验记录的最大值,其后的局部最小应力 σ_{min} 与 σ_e 相差不大,这表明垂直直径上的裂纹并没有扩展到临界长度,甚至初始裂纹并不是中心起裂,其后应力强度因子的逐渐减小使裂尖继续向前扩展变得困难^[14],而离裂尖稍远的两向压缩应力场的作用,使主裂纹难以贯通直径从而使试样一分为二;应力继续上升时会大于 σ_e ,这表明主裂纹对试样破裂没有起到主导作用,次生裂纹反而成了主导裂纹.

通过抗拉强度测试的有效性分析,2 种岩石在干燥、饱和状态及经历不同冻融循环次数后的巴西试验结果见表 1 及表 2.

3.4 试验结果分析

3.4.1 水分对岩石抗拉特性的影响

由表 1 及表 2 可以看出,2 种岩石在经历冻融循环作用之前,其力学性质受水分影响程度迥异.干燥状态时,红砂岩的抗拉强度为 1.568 MPa,弹性模量为 0.234 GPa;饱水状态时,其抗拉强度为 0.486 MPa,弹性模量为 0.133 GPa.在水分的作用下,红砂岩强度损失 69.01%,弹性模量损失 43.16%.同样可以看出,在水分的作用下,页岩抗拉强度损失 28.0%,弹性模量损失 8.98%.由此可见,红砂岩的遇水软化性比页岩大,尤以强度最为显著.

分析认为,红砂岩为孔隙式胶结结构,胶结成分以泥质为主;页岩主要成分为云母,硅质胶结.红砂岩浸水后,泥质杂基很容易与水发生反应,水分子进

入岩样内部,润湿岩石自由面上的矿物颗粒,同时会产生孔隙水压力,削弱了岩石颗粒间的连结力,使岩石强度及弹性模量急剧下降.

表 1 红砂岩巴西试验结果

Tab. 1 Results of Brazilian test of red sandstone

含水状态	冻融次数 n	破坏荷载 P_{max}/kN	抗拉强度 σ_b/MPa	弹性模量 E/GPa
干燥	0	6.158	1.568	0.234 0
	0	1.909	0.486	0.133 0
	5	1.033	0.263	0.100 0
饱水	10	0.750	0.191	0.082 0
	20	0.636	0.162	0.060 0
	40	0.459	0.117	0.031 0
	60	0.185	0.047	0.009 6

表 2 页岩巴西试验结果

Tab. 2 Results of Brazilian test of shale

含水状态	冻融次数 n	破坏荷载 P_{max}/kN	抗拉强度 σ_b/MPa	弹性模量 E/GPa
干燥	0	6.158	1.568	0.234 0
	0	23.173	5.901	1.327
	5	20.727	5.278	1.026
	10	17.856	4.547	0.889
饱水	20	16.627	4.234	0.816
	40	16.658	4.242	0.700
	60	16.211	4.128	0.650
	100	15.798	4.023	0.623

3.4.2 冻融循环对岩石抗拉特性的影响

由表 1 及表 2 可以看出,2 种岩石的抗拉强度均随冻融循环次数的增大而减小.从饱水状态到冻融循环 5 次后,砂岩的抗拉强度降低显著,由 0.486 MPa 减少到 0.263 MPa,降低了 45.9%,之后随着冻融循环的进行,强度降低幅度有所减缓,40 次冻融循环后,冻融损伤再次加剧.经历 60 次冻融循环后,红砂岩抗拉强度衰减幅度为 90.3%;页岩在最初 20 次冻融循环内强度下降明显,从 5.901 MPa 降低到 4.234 MPa,下降幅值为 28.25%,而在 20~100 次冻融循环之间,其强度下降趋势缓慢.经历 100 次冻融循环后,页岩抗拉强度共损失了 31.83%;砂岩受冻融循环作用引起的强度损失较页岩大.

2 种岩石弹性模量与强度的冻融效应具有相似的规律,但弹性模量的冻融损失更大.在冻融循环早期,弹性模量均随冻融循环次数的增大而减小;40 次冻融循环后,砂岩的弹性模量急剧减少,而页岩下降趋势平缓.从饱水状态到 60 次冻融循环后,砂岩弹性模量损失了 92.8%,页岩损失了 51.02%.

与文献[9]冻融岩石的抗压特性相比,2种岩石抗拉压特性的冻融效应具有相同的规律性,然而又表现出明显的区别:岩石抗拉特性对冻融循环反映更敏感,表现为岩石的抗拉强度及弹性模量损失率更大,尤以红砂岩最为明显;在冻融循环后期,页岩抗拉强度的稳定性较抗压强度次之;相同冻融条件下,2种岩石的抗拉强度及弹性模量较压应力状态下一般要小一个数量级.分析认为,岩石内部孔隙裂隙受拉开张,而受压时闭合,因此拉压状态对缺陷的敏感性明显不同,在拉应力的作用下岩石缺陷对强度降低特别敏感,抗压不抗拉是岩石等脆性材料本身的一种固有特性,这是导致岩石抗拉特性对冻融循环敏感的主要原因.

3.4.3 岩石冻融损伤特性分析

岩石内部广泛分布着原始的细观缺陷,在冻融循环的作用下,其内部发生水冰相变及水分迁移,产生的冻胀力与孔隙水压力导致微裂纹、微孔隙扩展、汇合及贯通,从而使岩石物理力学性质产生不可逆劣化.因此,岩石的变形破坏是由细观缺陷聚集而导致的连续损伤过程.

根据损伤力学理论,可以选择宏观物理量表征岩石的劣化程度,定义冻融损伤变量为

$$D_n = 1 - \frac{E_n}{E_0} \quad (2)$$

式中 E_0 及 E_n 分别为冻融前和 n 次冻融循环后岩石的弹性模量.

根据表1及表2中的试验参数,由式(2)计算得到砂岩和页岩的冻融损伤变量随冻融循环次数的演化曲线如图5所示.图中 n 为冻融循环次数, D_n 为冻融损伤变量.

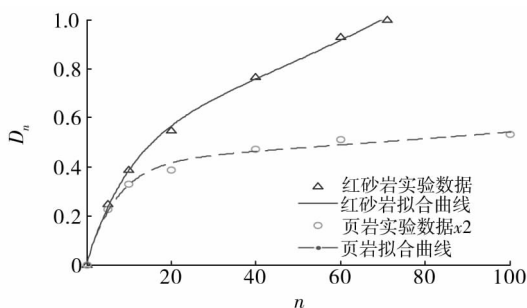


图5 2种岩石冻融损伤演化曲线

Fig. 5 Evolution curve of freeze - thaw damage for two types of rock

岩石冻融损伤值与冻融次数的函数表达式为红砂岩

$$D(n) = 0.5417e^{0.0088n} - 0.5354e^{-0.0953n} \quad (3)$$

$$D(n) = 0.4194e^{0.0026n} - 0.415e^{-0.0138n} \quad (4)$$

图中显示,红砂岩的冻融损伤变量随着冻融循环次数的增加显著增大,经历5次、10次、20次、40次、60次冻融循环后,其冻融损伤变量分别为0.247,0.386,0.548,0.765,0.928,至71次冻融循环后,红砂岩冻融崩塌,损伤变量为1.而页岩在最初20次冻融循环内,损伤程度差异显著,损伤变量由0增加到0.385,之后损伤变量增加趋势变缓,经历100次冻融循环后,冻融损伤变量为0.531.

2种岩石的结构、构造及矿物成分的不同,是造成冻融损伤特性差异的主要原因.

4 结论

1) 水分的存在对岩石内部微观结构产生影响,削弱了岩石颗粒间的连结力,使岩石抗拉强度及弹性模量降低.红砂岩为孔隙式胶结结构,胶结成分以泥质杂基为主,遇水软化性较页岩大.

2) 在冻融循环的作用下,红砂岩以颗粒状及片状的形态剥落,并沿水平层理面产生断裂;页岩表现为原生缺陷的不断扩展.2种岩石的抗拉强度及弹性模量均随冻融循环次数的增大而减小,红砂岩对冻融循环反映更敏感.

3) 损伤的物理机制主要是微空洞和微裂纹,而这些微空洞和微裂纹是有方向性的.损伤不仅受缺陷随机分布的影响,更重要的是受应力状态的影响,研究不同应力状态对岩石冻融损伤扩展特性的影响具有重要意义.

参考文献:

- [1] 周翠英,彭泽英,尚伟,等.论岩土工程中水-岩相互作用研究的焦点问题[J].岩土力学,2002,23(1):124-128.
Zhou C Y, Peng Z Y, Shang W, et al. On the key problem of the water - rock interaction in geoenvironment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(1): 124 - 128.
- [2] 李宁,程国栋,谢定义.西部大开发中的岩土力学问题[J].岩土工程学报,2001,23(3):268-272.
Li N, Cheng G D, Xie D Y. Geomechanics development in civil construction in Western China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 268 - 272.
- [3] Matsuoka N. Mechanics of rock breakdown by frost action: an experimental approach[J]. Cold Regions Science and Technology, 1990, 17(3): 253 - 270.
- [4] Liu Q S, Xu G M, Hu Y H. Study on basic mechanical behaviour of rocks at low temperature[J]. Key Engineering Materials, 2006, 306 - 308: 1479 - 1484.

- [5] 张慧梅,杨更社. 岩石冻融力学实验及损伤扩展特性[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(1):140-145.
Zhang H M, Yang G S. Freeze - thaw cycling and mechanical experiment and damage propagation characteristics of rock [J]. Journal of China University of Mining and Technology,2011,40(1):140-145.
- [6] 杨更社,吕晓涛. 富水基岩井筒冻结壁砂质泥岩力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(4):492-496.
Yang G S, Lv X T. Experimental study on the sandy mudstone mechanical properties of shaft sidewalls under the frozen conditions [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2012,29(4):492-496.
- [7] 袁超,唐海,屈延嗣. 岩石压缩条件下微裂纹扩展机制研究及数值模拟[J]. 矿业工程研究,2011,26(2):13-17.
Yuan C, Tang H, Qu Y S. Numerical simulation and mechanism analysis of micro - crack growth in rock under compressive stress [J]. Mineral Engineering Research,2011,26(2):13-17.
- [8] 张业炜,杨新安. 砂性地层中盾构隧道掘进围岩变形特性[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2011,26(4):37-42.
Zhang Y W, Yang X A. Deformation characteristics of the shield tunneling surrounding rock in sandy stratum[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition),2011,26(4):37-42.
- [9] 谢和平,陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京:科学出版社,2004.
Xie H P, Chen Z H. Rock mechanics [M]. Beijing: Science Press,2004.
- [10] ISRM. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,1978,15(3):99-103.
- [11] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50266-99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,1999.
National Standards Writing Group of P. R. C. GB/T50266-99 Standard test method for rock engineering [S]. Beijing: China Planning Press,1999.
- [12] 王启智,贾学明. 用平台巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模量、拉伸强度和断裂韧度—第一部分:解析和数值结果[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(9):1285-1289.
Wang Q Z, Jia X M. Determination of elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks by using flattened Barzilian disk specimen—Part I: Analytical and numerical results [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(9):1285-1289.

Anti - tensile mechanical characteristics of rock under moisture and freeze - thaw condition

ZHANG Hui - mei¹, YANG Geng - she²

(1. Department of Mechanics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The drying, saturated and freeze - thaw cycling tests were conducted for the two types of rock which are red sandstone and shale, then Brazilian test and the effectiveness analysis of tensile strength measurement were carried out on various states. The rock damage deterioration and failure process were investigated, the influence of lithology, moisture and freeze - thaw cycle on tensile mechanical characteristics of rock were studied systematically, and the identity and discrepancy of rock tensile and compressive properties were compared. It is shown that, the moisture impacts on the internal microstructure of rock and leads to the decrease of bonding force between rock particles. The frozen - heave force and pore water pressure generate by the freeze - thaw action results in local damage in rock interior. In the role of moisture and freeze - thaw cycles, the tensile strength and elastic modulus decrease significantly, and the reflection of red sandstone is more sensitive. The damage of rock is affected not only by the random distribution of internal defects, but also by the stress state even more important, the rock defects are particularly susceptible to the reduction of intensity under the state of tensile stress.

Key words: rock mechanics; dry; saturation; freeze - thaw cycle; tensile characteristics