

# 冻结温度对砂质泥岩力学特性的影响

奚家米,杨更社,董西好

(西安科技大学 建筑与土木工程学院,陕西 西安 710054)

**摘要:**为了研究冻结温度对砂质泥岩峰值强度、粘聚力、内摩擦角及残余强度的影响规律,分析围压与峰值强度、残余强度的关系,从甘肃新庄煤矿采集砂质泥岩,对加工后的岩样进行干燥和饱水处理,开展常温(+20℃)和不同冻结温度(0℃、-5℃、-10℃、-20℃和-30℃)条件下单轴、三轴力学试验。研究表明:冻结温度对饱和状态下试件力学特性影响较大,温度由-5℃降到-30℃时,峰值强度提高了138.13%~161.60%,粘聚力提高了97.52%,残余强度提高了174.94%~324.30%,内摩擦角提高了15.09%,相对而言,冻结温度对内摩擦角影响小;冻结温度对干燥状态下岩石试件力学特性影响相对较小;同一温度条件下,试件峰值强度、残余强度均随围压增大而增大,经拟合呈线性关系,饱和状态下试件峰值强度、残余强度增加幅度大于干燥状态下的相应值。

**关键词:**岩土工程;砂质泥岩;冻结温度;力学特性;试验研究

中图分类号:TU444

文献标志码:A

## Effect of freezing temperature on mechanical properties of sandy mudstone

XI Jia-mi, YANG Geng-she, DONG Xi-hao

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

**Abstract:** Sandy mudstone collected from Xin Zhuang coal mine were processed into dry and saturated rock samples, then uniaxial and triaxial tests were carried out at the room temperature(+20℃) and different freezing temperatures(0℃, -5℃, -10℃, -20℃ and -30℃). Effect of freezing temperature on the peak strength, cohesion, internal friction angle and residual strength were researched, the relationships between confining pressure and peak strength, residual strength were analyzed. The results show that the impact of freezing temperature on the mechanical properties of the specimen under saturation is relatively great, and when the temperature decreases from -5℃ to -30℃, the peak strength increases by 138.13%-161.60%, the cohesion increases by 97.52%, the residual strength increases by 174.94%-324.30%, and the angle of internal friction increases by 15.09%. The impact of freezing temperature on the internal friction angle is relatively small. The peak strength and the residual strength of specimen increase with the confining pressure under the same temperature, and they fit a linear relationship. The increases of peak strength and the residual strength of saturated specimen are greater than the corresponding increases in the dry state. 4 tabs, 10 figs, 12 refs.

**Key words:** geotechnical engineering; sandy mudstone; freezing temperature; mechanical property; experimental study

0 引言

西部地区煤炭资源丰富,多数上覆巨厚富水白垩系软岩地层,井筒建设多采用冻结法施工。砂质泥岩既是白垩系常见岩层,又是冻结法设计的关键控制层位,其冻结条件下力学特性是冻结设计的基本参数,关系到冻结壁的安全。因此,开展冻结条件下砂质泥岩的力学特性试验具有重要的理论和现实意义。

国内外针对负温或冻融循环条件下岩石力学特性和损伤方面开展了一系列理论和试验研究,取得了一定的研究成果。文献[1-4]以寒区隧道等工程为背景,以花岗岩等硬质岩体为研究对象,探讨了冻融循环次数及冻结温度对岩石力学性质(特别是损伤)的影响;文献[5-7]以红砂岩和页岩为研究对象,通过室内试验,分别探讨了 2 种岩石在干燥与饱和状态下的基本力学性质随冻结温度的变化规律;文献[8]对负温作用下岩体水热耦合模型进行了研究;文献[9-11]以白垩系煤岩、砂岩为研究对象,探讨了围压和温度对岩石力学特性的影响;文献[12]以砂岩泥质为研究对象,主要研究了饱和状态下岩石峰值强度随温度和围压的变化规律。总的来说,现有研究成果主要以寒区工程为背景,探讨冻融循环条件下岩石力学性质的变化及损伤。针对人工冻结条件下岩石力学性质的研究较少,关于人工冻结条件下砂质泥岩力学特性的研究工作还刚刚开始,缺乏系统性,研究成果不能满足工程需要。

为此,本文在前人研究的基础上,结合现有的冻土力学理论,利用 MTS-815 型电液伺服试验机,以砂质泥岩为研究对象,分别开展干燥和饱和状态下岩石冻结力学特性试验,分析 2 种不同状态下岩石峰值强度、粘聚力、内摩擦角、残余强度与温度、围压之间的关系,探讨冻结温度对岩石粘聚力、内摩擦角和残余强度的影响规律。

1 试验方案

1.1 试样制备

砂质泥岩岩样取自甘肃省新庄煤矿副井井筒,从施工现场取得新鲜完整大岩块,用水钻法加工成圆柱形标准试样。先剔除外观有缺陷及视觉上差别明显的试件,再通过 RSM-SY5 智能声波检测仪测定试件的纵波波速,筛选波速相近的试件作为试验岩样。

试样用到干燥与饱和 2 种状态的岩样。干燥岩样的制备方法:将选好的岩样放入烘箱中,在 105 ℃

下烘 48 h 至恒重(24 h 内岩样的质量变化不超过 0.1%),然后称量并记录各岩样的质量。饱和岩样的制备方法:把选好的岩样放入抽气容器中,密封容器,抽取容器中的空气,先抽气 2 h 后再向容器中放入蒸馏水,并继续抽气 4 h 直至无气泡溢出,然后将岩样在水中浸泡 24 h 以上,称取饱和后的岩样在空气中及水中的质量,以此得到岩样的饱和含水量和孔隙度。常温条件下砂质泥岩物理参数见表 1。

表 1 岩石的物理参数

Tab. 1 Initial physical parameters of rock

岩性	天然密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	饱和密度 $\rho_{\text{sat}}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	饱和含水量/%	孔隙度/%
砂质泥岩	2.16	2.27	5.71	12.25

1.2 试验方案

冻结设计方案中盐水温度为-30 ℃,经过冻结井筒周边形成封闭的冻结壁,冻结壁内形成非均匀温度场,最低温度为-30 ℃(冻结管周边),最高温度为 0 ℃(冻结壁边缘),经计算得到冻结壁的平均温度为-8.84 ℃。根据砂质泥岩所在层位埋深,计算得围岩压力为 8 MPa 左右。为使得试验时温度和围压与工程实际基本接近,确定试验条件如表 2 所示。

表 2 试验时温度和压力取值

Tab. 2 Test temperatures and pressure values

试验温度/℃	20	0	-5	-10	-20	-30
试验围压/MPa	0	6	8	10		

分别开展干燥、饱和试样不同温度(20 ℃、0 ℃、-5 ℃、-10 ℃、-20 ℃和-30 ℃)下单轴压缩试验,由试验可得岩石不同温度等级下的应力-应变曲线,经计算可得与温度相对应的单轴抗压强度和弹性模量;同样,开展干燥、饱和试样不同温度(20 ℃、0 ℃、-5 ℃、-10 ℃、-20 ℃和-30 ℃)下三轴压缩试验,每级温度基本对应 4 个围压(0、6、8、10 MPa),由试验可得岩石不同温度等级下的偏应力-应变曲线,通过绘制不同温度下的莫尔圆及其包络线,经计算可得与温度相对应的三轴抗压强度和抗剪强度指标(粘聚力和内摩擦角)。每级温度、围压下取 3 块岩样进行试验,取平均值为试验结果。

1.3 试验过程

设定低温控温箱至相应试验温度,取干燥或饱和岩样,用乳胶套密封好,并逐一编号,放入低温控温箱中冻结,降温速率设置为 1 ℃/h(泥岩层位最大降温速率)。冻结 48 h 后取出试样,在压缩试验机上开展试验,记录荷载-位移曲线信息。单轴、三轴压缩试验均采用轴向位移速率控制方式,控制速率为 0.002 mm/s。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 温度对砂质泥岩峰值强度的影响

图 1、图 2 分别为饱和、干燥状态下砂质泥岩在不同围压条件下的峰值强度与温度的关系曲线。

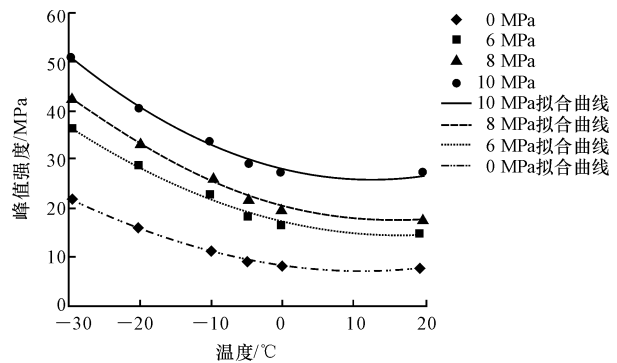


图 1 饱和状态下砂质泥岩峰值强度与温度的关系

Fig. 1 Relationship between peak strength and temperature of saturated sandy mudstone

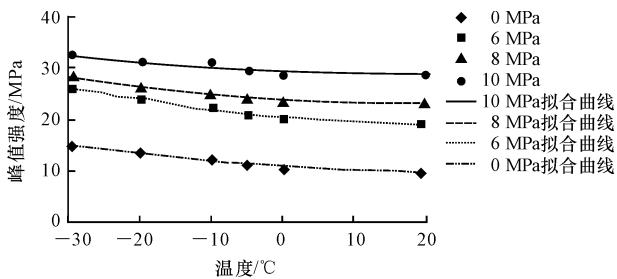


图 2 干燥状态下砂质泥岩峰值强度与温度的关系

Fig. 2 Relationship between peak strength and temperature of dry sandy mudstone

由图 1 可以看出,饱和状态下砂质泥岩的峰值强度随着温度的降低而提高。温度由 20 ℃ 降至 0 ℃ 时,峰值强度无明显变化;当温度降至 0 ℃ 以下时,峰值强度显著提高。根据试验结果,温度由 0 ℃ 降到 -30 ℃,围压为 10 MPa 时,其峰值强度由 25.23 MPa 提高到 51.01 MPa;围压为 8 MPa 时,其峰值强度由 17.25 MPa 提高到 43.11 MPa;围压为 6 MPa 时,其峰值强度由 13.76 MPa 提高到 35.97 MPa;围压为 0 MPa 时,其峰值强度由 8.48 MPa 提高到 20.17 MPa。由图 2 可以看出,干燥状态下砂质泥岩的峰值强度随着温度的降低略有提高。以围压 0 MPa 为例,当温度由 0 ℃ 降到 -30 ℃ 时,其峰值强度由 10.87 MPa 提高到 14.14 MPa,仅提高了 3.27 MPa。由图 1、图 2 对比可以看出,在相同围压条件下,温度对饱和岩石峰值强度影响程度明显大于干燥岩石。

对试验所得数据进行拟合,岩石峰值强度与温度的关系可表示为

$$\sigma_1 = a_1 T^2 + b_1 T + c_1 \quad (1)$$

式中: $\sigma_1$  为冻结岩石峰值强度(MPa); $T$  为试样温度(℃); $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$  为试验参数。

### 2.2 围压对砂质泥岩峰值强度的影响

图 3、图 4 分别为饱和、干燥状态下砂质泥岩不同冻结温度条件下岩石峰值强度与围压的关系曲线。

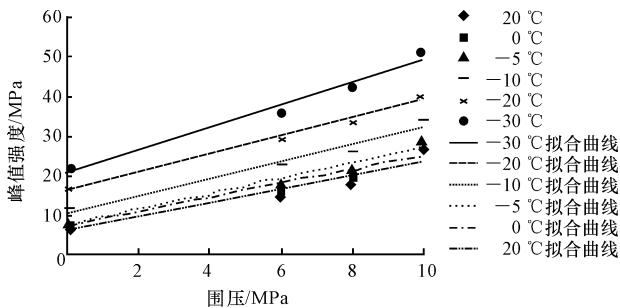


图 3 饱和状态下砂质泥岩峰值强度与围压的关系

Fig. 3 Relationship between peak strength and confining pressure of saturated sandy mudstone

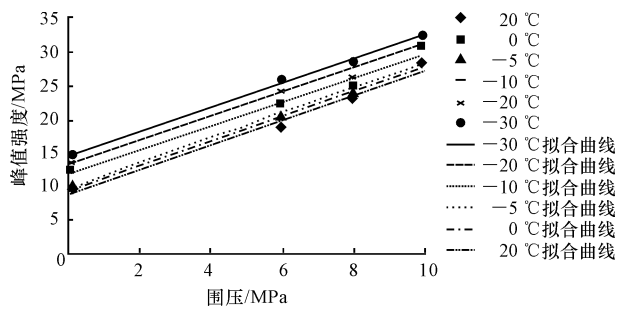


图 4 干燥状态下砂质泥岩峰值强度与围压的关系

Fig. 4 Relationship between peak strength and confining pressure of dry sandy mudstone

由图 3、图 4 可以看出,在相同温度条件下,围压对饱和、干燥状态下砂质泥岩峰值强度影响都很大。以饱和状态下砂质泥岩试验结果为例,当围压由 0 MPa 增加到 10 MPa,温度为 0 ℃ 时,其峰值强度由 8.48 MPa 提高到 25.23 MPa;温度为 -5 ℃ 时,其峰值强度由 8.62 MPa 提高到 27.97 MPa;温度为 -10 ℃ 时,其峰值强度由 11.77 MPa 提高到 33.7 MPa;温度为 -20 ℃ 时,其峰值强度由 17.06 MPa 提高到 40.27 MPa;温度为 -30 ℃ 时,其峰值强度由 20.17 MPa 提高到 51.01 MPa。

饱和、干燥状态下砂质泥岩的峰值强度随着围压的增大呈线性增大,经拟合,两者的关系可表示为

$$\sigma_1 = k_1 \sigma_3 + l_1 \quad (2)$$

式中: $k_1$ 、 $l_1$  为试验参数; $\sigma_3$  为围压。

### 2.3 温度对砂质泥岩粘聚力、内摩擦角的影响

根据三轴试验结果,按照莫尔-库仑强度准则,经计算,可以得到不同温度时砂质泥岩的粘聚力、内

摩擦角的值。砂质泥岩粘聚力、内摩擦角与温度的关系分别如图 5、图 6 所示。

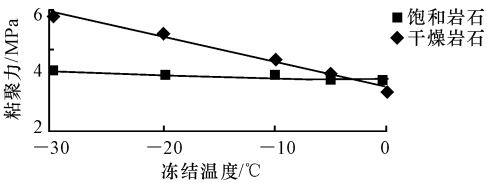


图 5 砂质泥岩粘聚力与温度的关系

Fig. 5 Relationship between cohesion and temperature of sandy mudstone

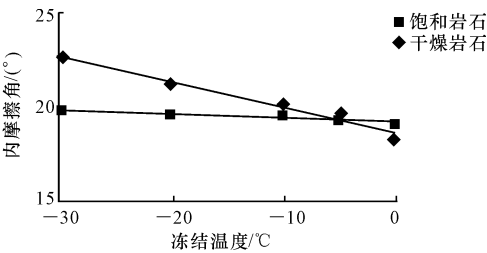


图 6 砂质泥岩内摩擦角与温度的关系

Fig. 6 Relationship between internal friction angle and temperature of sandy mudstone

由图 5 可以看出,饱和状态下砂质泥岩的粘聚力随着温度的降低而增大,温度对干燥状态下岩石粘聚力的影响很小。当温度由 0 °C 降到 -30 °C 时,饱和状态下砂质泥岩的粘聚力由 2.83 MPa 增大到 5.59 MPa,提高了 97.52%,而干燥状态下岩石的粘聚力由 2.55 MPa 增大到 2.98 MPa,仅提高了 16.86%。

由图 6 可以看出,饱和岩石、干燥岩石的内摩擦角均随着温度的降低略有增大,相同的温度梯度条件下,饱和岩石内摩擦角增大幅度要比干燥岩石的大。温度由 -5 °C 降到 -30 °C 时,饱和岩石的内摩擦角由 19.62° 增大到 22.58°,仅提高了 15.09%。可见,冻结温度对砂质泥岩的内摩擦角影响较小。

对试验所得数据进行拟合,砂质泥岩的粘聚力、内摩擦角与温度的关系可表示为

$$\varphi = -k_2 T + l_2 \tag{3}$$

式中: $\varphi$  为内摩擦角; $k_2$  为温度系数; $l_2$  为试验常数。

2.4 冻结温度、围压对砂质泥岩残余强度的影响

残余强度是指岩石在破坏后所残留的抵抗外荷的能力。根据试验结果,干燥和饱和状态下砂质泥岩在不同围压、冻结温度条件下的残余强度如表 3、表 4 所示。

2.4.1 砂质泥岩残余强度与冻结温度的关系

为了直观反映冻结温度对砂质泥岩残余强度的影响,分别将干燥和饱和状态下的试验结果按不同围压绘成散点图,并对其进行拟合,如图 7、图 8 所示。

表 3 不同温度、围压条件下饱和砂质泥岩的残余强度

Tab. 3 Residual strengths of saturated rock sample at different temperatures and confining pressures

温度/°C	不同 $\sigma_3$ (MPa) 的饱和砂质泥岩残余强度/MPa			
	0	6	8	10
20	4.75	5.25	6.16	11.57
0	5.51	7.98	8.87	12.77
-5	6.13	8.23	11.26	14.60
-10	9.17	12.52	16.07	17.21
-20	13.04	16.95	18.85	22.79
-30	14.88	21.34	26.14	31.81

表 4 不同温度、围压条件下干燥砂质泥岩的残余强度

Tab. 4 Residual strengths of dry rock sample at different temperatures and confining pressures

温度/°C	不同 $\sigma_3$ (MPa) 的干燥砂质泥岩残余强度/MPa			
	0	6	8	10
20	5.03	7.57	9.27	12.97
0	5.96	7.87	9.81	13.02
-5	6.52	8.72	10.11	13.15
-10	6.99	10.48	11.83	13.86
-20	7.41	11.51	12.59	14.23
-30	7.82	11.88	13.31	15.38

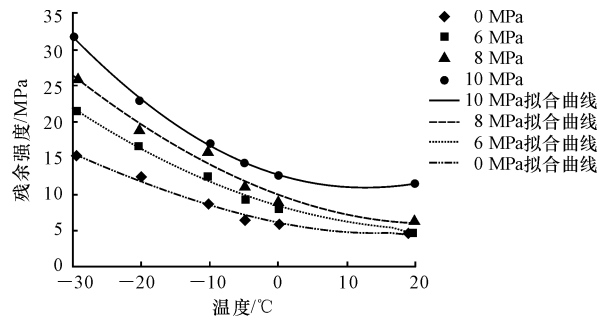


图 7 饱和状态下砂质泥岩残余强度与温度的关系

Fig. 7 Relationship between residual strength and temperature of saturated sandy mudstone

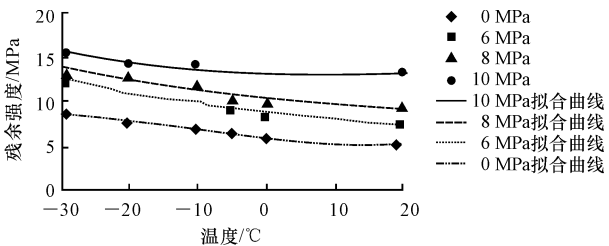


图 8 干燥状态下砂质泥岩残余强度与温度的关系

Fig. 8 Relationship between residual strength and temperature of dry sandy mudstone

由图 7、图 8 可以看出,干燥与饱和状态下砂质泥岩的残余强度均随温度的降低而提高。温度由 20 °C 降至 0 °C 时,残余强度无明显变化;当温度降至 0 °C 以下时,残余强度显著提高。根据试验结果,温度由 0 °C 降到 -30 °C,围压 10 MPa 时,饱和状态下砂

质泥岩的残余强度由 12.77 MPa 增加到 31.81 MPa;围压 8 MPa 时,残余强度由 8.87 MPa 增加到 26.14 MPa;围压 6 MPa 时,残余强度由 7.98 MPa 增加到 21.34 MPa;围压 0 MPa 时,残余强度由 5.51 MPa 增加到 14.88 MPa。相同温度变化梯度下,干燥状态下砂质泥岩的残余强度也有一定程度的提高,但提高的幅度远小于饱和状态下试样的相应值。围压 10 MPa 时,干燥状态下砂质泥岩的残余强度由 13.02 MPa 增加到 15.38 MPa,仅提高了 2.36 MPa;围压 8 MPa 时,残余强度提高了 3.5 MPa;围压 0 MPa 时,残余强度提高了 1.86 MPa。

对试验所得数据进行拟合,砂质泥岩的残余强度与温度的关系可用二次多项式表示为

$$\sigma_r = a_2 T^2 + b_2 T + c_2 \quad (4)$$

式中:  $\sigma_r$  为砂质泥岩残余强度(MPa);  $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$  为试验参数。

### 2.4.2 砂质泥岩残余强度与围压的关系

同样,根据试验结果也得到了不同冻结温度下,干燥与饱和状态下砂质泥岩残余强度与围压的关系,如图 9、图 10 所示。

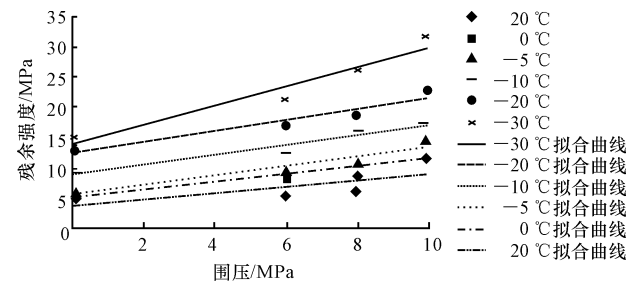


图 9 饱和状态下砂质泥岩残余强度与围压的关系  
Fig. 9 Relationship between residual strength and confining pressure of saturated sandy mudstone

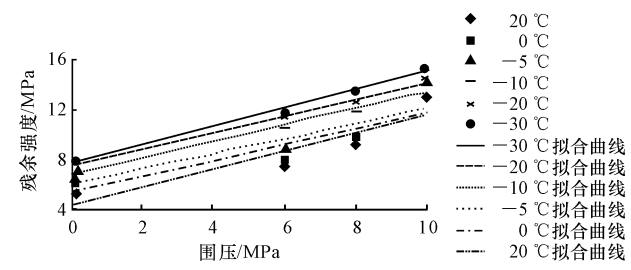


图 10 干燥状态下砂质泥岩残余强度与围压的关系  
Fig. 10 Relationship between residual strength and confining pressure of dry sandy mudstone

从图 9、图 10 可以看出,相同温度条件下,干燥与饱和状态下砂质泥岩残余强度均随着围压的增加而提高。围压由 0 MPa 增加到 10 MPa,温度为 0 °C 时,饱和状态下砂质泥岩的残余强度由 5.51 MPa 提高到 12.77 MPa;温度 -5 °C 时,残余强度由 6.13 MPa 提

高到 14.6 MPa;温度为 -10 °C 时,残余强度由 9.17 MPa 提高到 17.21 MPa;温度为 -20 °C 时,残余强度由 13.04 MPa 提高到 22.79 MPa;温度为 -30 °C 时,残余强度由 14.88 MPa 提高到 31.81 MPa。相同围压变化情况下,干燥状态下砂质泥岩的残余强度也有一定程度的提高,温度为 0 °C 时,残余强度由 5.96 MPa 提高到 13.02 MPa;温度为 -5 °C 时,残余强度由 6.52 MPa 提高到 13.15 MPa;温度为 -10 °C 时,残余强度由 6.99 MPa 提高到 13.86 MPa;温度为 -20 °C 时,残余强度由 7.41 MPa 提高到 14.23 MPa;温度为 -30 °C 时,残余强度由 7.82 MPa 提高到 15.38 MPa。

对试验所得数据进行拟合,砂质泥岩的残余强度与围压的关系可表示为

$$\sigma_r = k_3 \sigma_3 + l_3 \quad (5)$$

式中:  $k_3$ 、 $l_3$  为试验参数。

试验结果表明,干燥与饱和状态下砂质泥岩的峰值强度、抗剪强度(内摩擦角、粘聚力)以及残余强度均随温度的降低而有不同程度的提高,且主要发生在温度降至 0 °C 以后,但是温度对饱和状态岩石试件强度特性的影响程度远大于干燥状态下的相应值。其主要原因是:温度降至 0 °C 后,饱和试件中裂隙水和孔隙水凝结成冰(水凝结成冰的比例随冻结温度的降低而逐渐增大),充填了岩石试件内部裂隙和孔隙,同时,也提高了岩石试件内部微裂纹的粘结作用,以上是导致饱和和砂质泥岩峰值强度、抗剪强度(内摩擦角、粘聚力)以及残余强度大幅度提高的主要原因。另外,温度的降低也会导致岩石颗粒体积产生收缩,颗粒之间排列更加紧密,从而使得岩石试件强度略有提高。由于干燥状态下的砂质泥岩不含水或微含水,温度的降低仅能影响岩石颗粒排列,所以对强度特性影响较小。另外,砂质泥岩无论是干燥还是饱和状态,其峰值强度、残余强度均随围压的加大呈线性增加。由于围压的作用,砂质泥岩原有孔隙裂隙被压密闭合,从而使得岩石试件刚度和强度加大。

## 3 结 语

- (1)砂质泥岩的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,峰值强度与围压满足线性增大的关系。
- (2)砂质泥岩的粘聚力随冻结温度的降低线性增加,但冻结温度对岩石内摩擦角的影响较小。
- (3)随着温度的降低,岩石的残余强度呈增长趋

势,二者之间的关系可用二次多项式表达,围压与残余强度的关系符合一次函数形式的数学关系式。

(4)冻结温度对饱和砂质泥岩力学性质的影响大于对干燥砂质泥岩力学性质的影响。

(5)冻结作用下砂质泥岩力学特性与其含水率密切相关,本文仅对饱和与干燥 2 种极限状态下的试件开展了试验研究,成果还不够系统。下一步应开展不同含水率下砂质泥岩冻结力学特性试验,研究冻结作用下含水率对其力学参数的影响规律。

## 参考文献:

## References:

- [1] 杨更社,蒲毅彬,马巍.寒区冻融环境条件下岩石损伤扩展研究探讨[J].实验力学,2002,17(2):220-226.  
YANG Geng-she,PU Yi-bin,MA Wei. Discussion on the damage propagation for the rock under the frost and thaw condition of frigid zone[J]. Journal of Experimental Mechanics,2002,17(2):220-226. (in Chinese)
- [2] 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):1409-1412.  
YANG Geng-she,ZHANG Quan-sheng,PU Yi-bin. Preliminary study on meso-damage propagation characteristics of rock under condition of freezing temperature[J]. Rock and Soil Mechanics,2004,25(9):1409-1412. (in Chinese)
- [3] 徐光苗,刘泉声,彭万巍,等.低温作用下岩石基本力学性质试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(12):2502-2508.  
XU Guang-miao,LIU Quan-sheng,PENG Wan-wei, 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. (in Chinese)
- [4] Liu Q S,Xu G M,Hu Y H. Study on basic mechanical behaviors of rocks at low temperature[J]. Key Engineering Materials,2006(306-308):1479-1484.
- [5] 张继周,缪林昌,杨振峰.冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(8):1688-1694.  
ZHANG Ji-zhou,MIAO Lin-chang,YANG Zhen-feng. Research on rock degradation and deterioration mechanisms and mechanical characteristics under cyclic freezing-thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(8):1688-1694. (in Chinese)
- [6] 刘成禹,何满潮,王树仁,等.花岗岩低温冻融损伤特性的实验研究[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2005,20(1):37-40.  
LIU Cheng-yu,HE Man-chao,WANG Shu-ren,et al. Experimental investigation freeze-thawing damage characteristics of granite at low temperature[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science Edition,2005,20(1):37-40. (in Chinese)
- [7] 徐光苗.寒区岩体低温、冻融损伤力学特性及多场耦合研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):1078.  
XU Guang-miao. Study on mechanical characteristics and multi-physical coupling problems of rock at low temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(5):1078. (in Chinese)
- [8] 谭贤君,陈卫忠,贾善坡,等.含相变低温岩体水热耦合模型研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(7):1455-1461.  
TAN Xian-jun,CHEN Wei-zhong,JIA Shan-po,et al. A coupled hydro-thermal model for low temperature rock including phase change[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(7):1455-1461. (in Chinese)
- [9] 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 Geng-she,XI Jia-mi,LI Hui-jun,et al. Experimental study of rock mechanical properties under tri-axial compressive and frozen conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(3):459-464. (in Chinese)
- [10] 杨更社,奚家米,王宗金,等.胡家河煤矿主井井筒冻结壁岩石力学特性研究[J].煤炭学报,2010,35(4):565-570.  
YANG Geng-she,XI Jia-mi,WANG Zong-jin,et al. Study on rock mechanical properties of frozen wall of main shaft in Hujiaye Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(4):565-570. (in Chinese)
- [11] 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 Geng-she,XI Jia-mi,LI Hui-jun,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)
- [12] 杨更社,吕小涛.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 Geng-she,LU Xiao-tao. 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. (in Chinese)

