

文章编号:0253-9993(2010)04-0565-06

# 胡家河煤矿主井井筒冻结壁岩石力学特性研究

杨更社<sup>1</sup>, 奚家米<sup>1</sup>, 王宗金<sup>2</sup>, 程 磊<sup>1</sup>, 李慧军<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 中煤矿山建设有限责任公司 特殊凿井公司冻结工程处, 安徽 淮北 235037)

**摘 要:**以陕西胡家河煤矿主井井筒选取的煤岩及砂岩作为具有代表性的岩样,在MTS815试验机上进行不同围压及不同冻结温度条件下的单轴及三轴压缩试验,分析煤岩及砂岩在相同围压不同冻结温度条件下及相同冻结温度不同围压条件下的强度特性,并对2种不同岩样的同一性和差异性进行了比较。结果表明,煤岩和砂岩在冻结的效应方面有着明显的差异性,富水砂岩冻结后对温度的敏感程度要高于煤岩,主要原因是其岩石的内部结构性的差异。

**关键词:**主井;冻结壁;岩石力学;特性

**中图分类号:**TD265.32 **文献标志码:**A

## Study on rock mechanical properties of frozen wall of main shaft in Hujiahe Coal Mine

YANG Geng-she<sup>1</sup>, XI Jia-mi<sup>1</sup>, WANG Zong-jin<sup>2</sup>, CHENG Lei<sup>1</sup>, LI Hui-jun<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China; 2. Special Shaft Sinking Co., Ltd., China Coal Mine Construction Co., Ltd., Huaibei 235037, China)

**Abstract:** Two typical soft rocks that are coal-rock and sandstone were obtained from engineering sites of Hujiahe Coal Mine shaft. The uni-axial compression tests and tri-axial compression tests were conducted on the two types of soft rock at different frozen temperature and different confining pressures. The strength and deformation characteristics under these conditions were analyzed. And their identity and difference were compared either. The results show that due to the internal structural difference, the frozen effect of sandstone and coal exists obvious otherness. Frozen water-rich sandstone is more sensitivity to temperature than that of coal.

**Key words:** main shaft; frozen wall; rock mechanical; properties

近年来,在煤炭开采过程中,矿井建设逐步向深厚冲积层发展,在深厚表土层或岩层中建设井筒,冻结法是有有效穿越不稳定厚表土层或基岩的有效施工方法<sup>[1-2]</sup>。

我国过去的冻结施工主要是在冲积层的土层中,对冻土的研究较多<sup>[3-6]</sup>,涉及冻结岩石的研究较少;有关冻融环境条件下岩石的基本力学特性研究,国内外已有一定的探索,也取得了一定的成果<sup>[7-12]</sup>,但针对实际工程有针对性的研究成果较少。事实上,在矿井建设中遇到越来越多的深部矿井<sup>[2]</sup>,并且岩石与土体并存。近几年来,许多冻结工程中都遇到了深厚

冲积层有较深的岩层,特别是富水的基岩。所以开展深厚富水基岩井筒冻结的岩石力学理论研究对矿井冻结施工的理论研究和实际工程都具有重要的意义。

### 1 胡家河煤矿立井工程地质概况

胡家河煤矿位于陕西省彬县与长武县交界处泾河西岸,主井井筒设计直径为6.5 m,掘进荒直径为8.4 m,深度539 m。由于地层含水层数量较多(11层),井筒涌水量较大。设计主井井筒全深冻结,自然地坪算起主井冻深548 m。冻结井筒表土厚仅11.85 m,岩层厚超过500 m;岩层强度低,遇水易软

化甚至溶解,强度亦会大幅度降低。

胡家河煤矿主井井筒所处的地层情况分别为第四系、白垩系下统、侏罗系中统、侏罗系下统等,主井中心钻孔的地层情况见表 1。

表 1 地层参数\*

Table 1 Parameters of earth rock and soil

地 层	主井中心钻孔		岩石名称		
	系、统	组、段		累深/m	层厚/m
第四系	Q		11.96	11.96	粉土
白垩系下统 K1	洛河组		340.98	329.02	粗粒砂岩
	宜君组		361.39	20.41	砾岩
侏罗系中统 J2	安定组		413.19	51.80	粗粒砂岩
	直罗组		446.17	32.98	砂质泥岩
	延安组		557.35	111.18	砂岩泥岩煤
侏罗系下统 J1	富县组 J		568.50	11.15	泥岩

从表 1 可以看出,胡家河煤矿主井所处地层的岩石多为砂岩、砂质泥岩等强度较低的岩石,并且胡家河煤矿井筒所处地层属于富水地区,含水层数量较多,井筒的涌水量大\*。人工冻结一方面使岩石强度明显提高;另一方面,人工冻结形成的冻结壁很好的阻隔了周围岩土体和开挖井筒之间水分的迁移,这对施工起到了很好的保护作用。冻结壁的安全是冻结施工的技术核心,所以对冻结壁岩石冻结力学特性的研究尤为重要。

## 2 试验方案

### 2.1 岩石试样

试验取主井中心钻孔洛河组的砂岩和煤岩两种岩石岩样。取样从现场主井中心钻孔取回大块砂岩和煤块,在实验室用套孔岩芯制样。试样为圆柱形,直径 50 mm,高 100 mm。由于该岩层均处于富水地段,因此均可视为饱和状态。岩样均作了饱和处理,具体方法:把选好的试样放入抽气容器中,密封容器,以 0.1 MPa 压力抽取容器中的空气,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,然后将试样在水中浸泡 24 h,称取饱和后岩样在空气中的质量及水中的质量,以得到岩样的饱和含水量及空隙度。2 种岩石在常温条件下,初始物理参数平均值详见表 2。

### 2.2 试验仪器

试验所需仪器:① 电子天平(精度±0.01 g)、千分尺、真空抽气设备、水槽等;② DWX-30 低温箱,精

表 2 两种岩石物理参数

Table 2 Physical parameters of two types of rocks

岩 性	天然密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	饱和密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	饱和含 水量/%	空隙 度/%
砂岩	2.32	2.75	7.46	13.33
煤岩	1.47	1.63	1.32	2.40

确到 1℃工业用高精度低温冷冻箱;③ MTS-815 岩石力学伺服试验机。

### 2.3 冻结温度的确定

根据资料,胡家河矿冻结壁平均冻结温度为-8.84℃,冻结盐水温度为-28℃。因此取井壁冻结温度为最高温度,以冻结盐水温度为最低温度,考虑实际试验条件及成果的普遍性,最终确定试验冻结温度为-5、-10、-20、-30℃。

### 2.4 围压的确定

考虑实际井筒冻结设计过程中,冻结壁外壁设计荷载(冻结压力)的标准值应按重液水平地压取值。因此,围压的确定也应跟所属地层的水平地压相符,重液公式可表述为

$$P_0 = 0.013H \quad (1)$$

式中, $P_0$ 为水平地压标准值; $H$ 为地层所处深度。

根据岩石所处地层深度为 510~720 m,同时考虑实验的可行性及结果的普遍性,最终确定试验围压为 6、8、10 MPa 三个等级。

### 2.5 试验过程

由于该岩层均处于富水地段,因此对试验试样进行了饱水处理。饱水前后在电子天平上称其质量,确定饱水含量;然后在高精度低温冷冻箱里进行冻结,冻结速率为 1℃/h。为了防止水分流失和三轴试验时岩样在油压里的接触,试样饱水冻结后加载前全部加上橡皮模。分组置于恒温箱内,恒温时间不小于 24 h,以备试验用。试验时竖向加载速率为 0.05 MPa/s,三轴试验的横向采用油压。

## 3 试验结果及其分析

### 3.1 煤岩和砂岩试验结果

图 1、2 分别为常温和不同温度条件下煤岩与砂岩单轴和三轴压缩的应力应变曲线。

从图 1、2 可以看出,不论是冻结煤岩还是冻结砂岩,三轴压缩实验从加载到破坏都经过了压密、弹性增长、塑性屈服和破坏过程。由于三轴实验中围压的加载方式,使得压密过程不明显,直接进入弹性增长

\* 陕西煤业集团公司。陕西彬长煤业公司胡家河煤矿立井建设设计资料,2008。

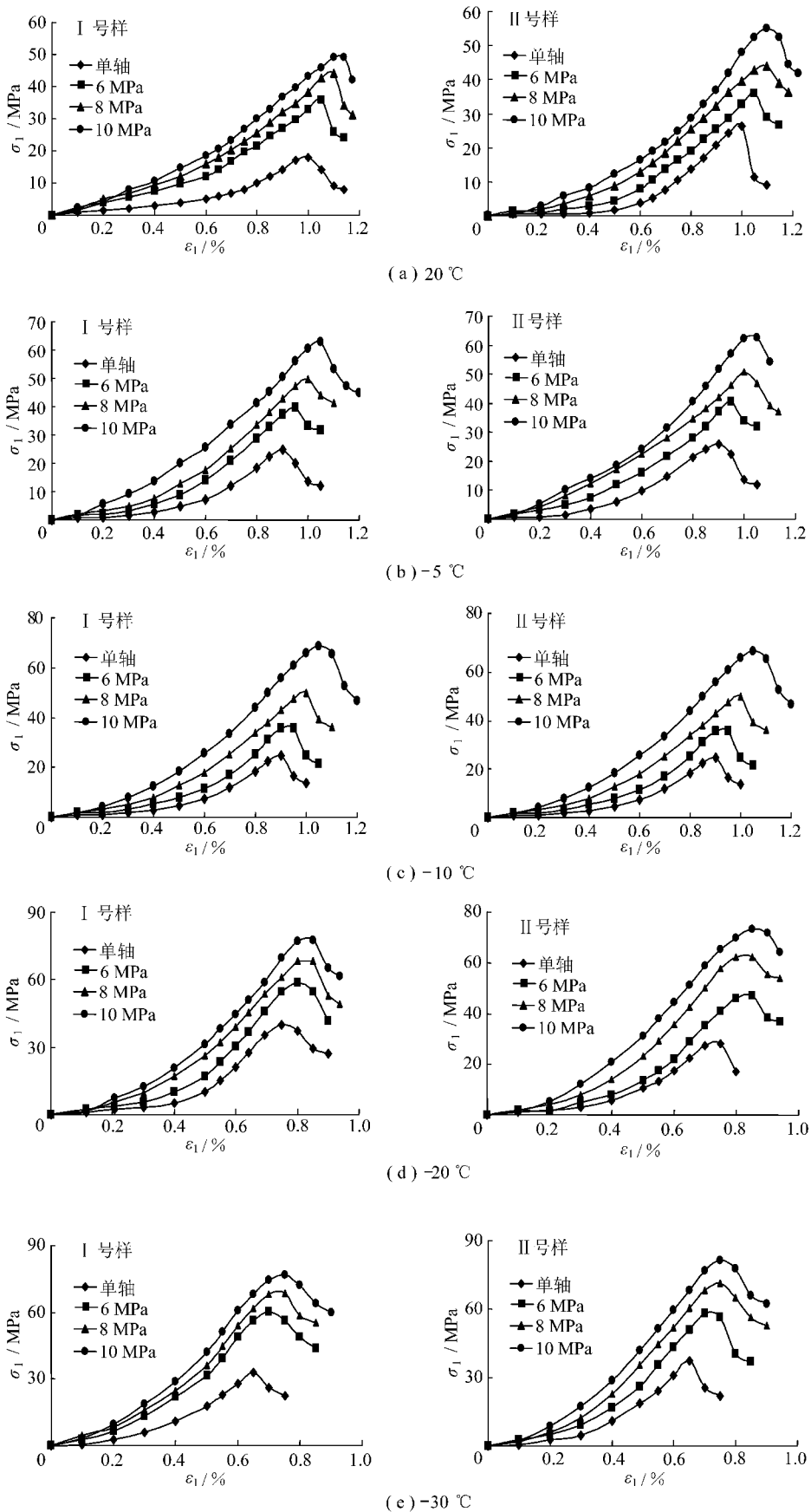


图1 不同温度条件下煤岩单轴和三轴压缩的应力-应变曲线

Fig. 1 Curves of uniaxial and triaxial stress-strain for coal samples in different temperatures

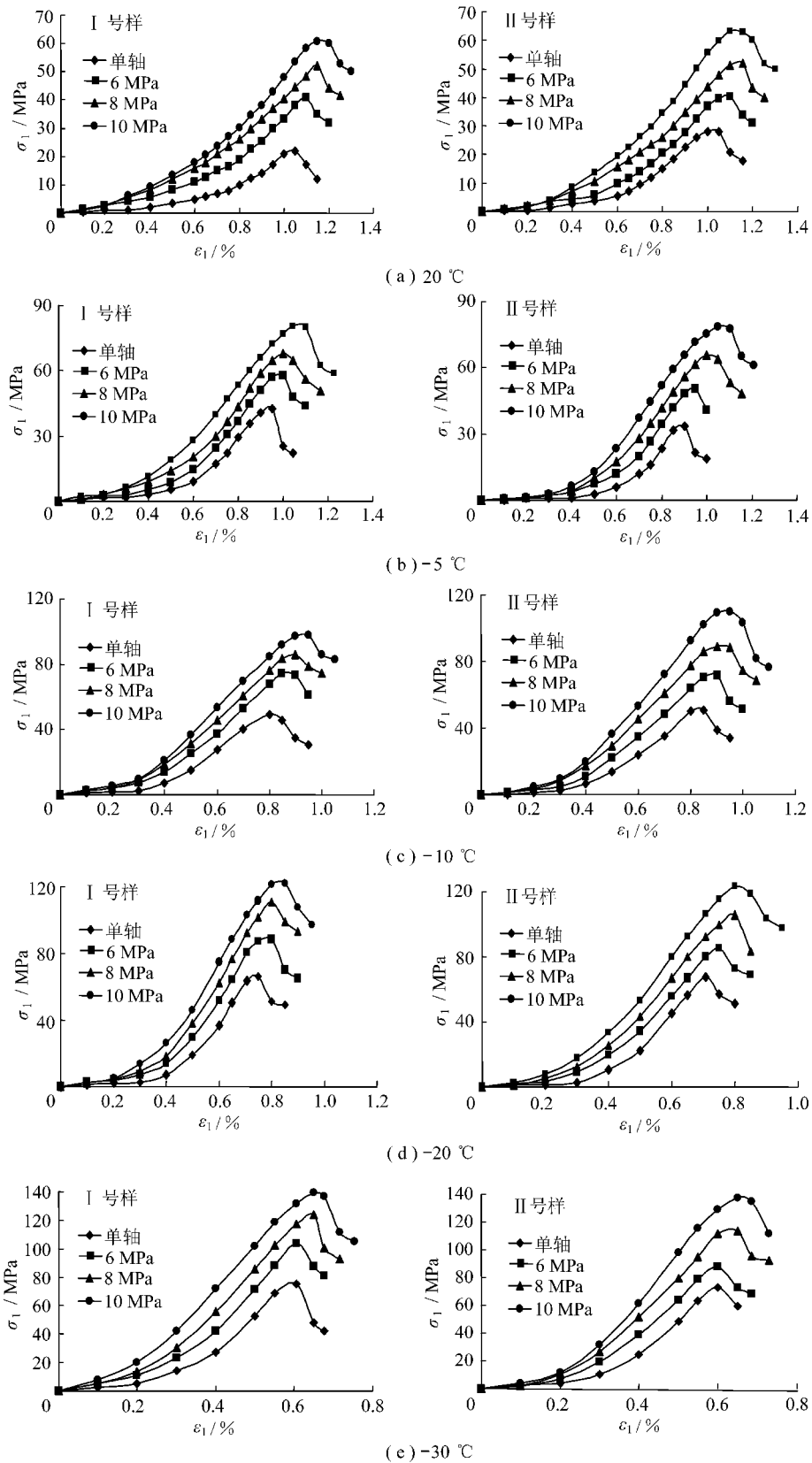


图2 不同温度条件下砂岩单轴和三轴压缩的应力-应变曲线

Fig. 2 Curves of uniaxial and triaxial stress-strain for sandstone samples in different temperatures

阶段,因为围压较大的原因,两种冻结岩石的塑性屈服阶段较单轴明显很多,但随着温度降低依然出现塑性减弱、脆性增强的情况。在温度相同的条件下,到

达峰值破坏时所对应的应变,相对于单轴压缩实验,两种冻结岩石的变形较大,即在温度相同的情况下围压增大塑性增强。

在同一温度条件下,随着围压的增大,不论是煤岩还是砂岩的三轴抗压强度明显提高,达到破坏荷载所对应的应变也增大,即塑性增强;在围压相同的条件下,随着温度降低,两种岩石的三轴抗压强度均增大,相比较而言,砂岩的三轴抗压强度增大更加明显,即砂岩的三轴抗压强度对温度更敏感,主要是由于砂岩相对于煤岩来说,空隙大、含水量大,冻结后对温度的反应敏感。煤岩和砂岩在冻结效应方面有着明显差异性的主要原因是其岩石的内部结构性的差异,煤岩是腐植质经过长期地质构造形成的物质,空隙度小,仅为2.4%,饱和含水量仅为1.32%;砂岩为大空隙结构,空隙度13.33%,饱和含水量为7.46%,所以富水砂岩冻结后对温度敏感程度明显高于煤岩。强度随温度降低而增大的主要原因是温度降低时,赋存于岩石内部孔隙中的水分发生相变,内部孔隙水分凝成冰,在孔隙壁上产生巨大冻胀力,其值远远超过岩石的强度。

人工冻结正是具有这两方面的优点:①人工冻结明显提高了岩石强度;②人工冻结形成的冻结壁很好地阻隔了周围岩体和开挖井筒之间水分的迁移,这对施工起到很好的保护作用。

### 3.2 冻结岩石峰值强度与温度和围岩的关系

为了研究冻结岩石的抗压强度与温度之间的关系,根据试验结果绘制了单轴条件及三轴不同围压条件下温度与峰值强度的曲线,以I号样为例,如图3所示,在单轴条件下,可以近似地认为,抗压强度与温度的绝对值成正比例关系,用数学公式可以表示为

$$\sigma_1 = A|t| + B \quad (2)$$

根据数据拟合曲线关系式,即

砂岩样:  $\sigma_1 = 0.6641|t| + 40.034$

相关系数  $R=0.9743$

煤样:  $\sigma_1 = 0.7042|t| + 19.034$

相关系数  $R=0.9913$

在三轴条件下,抗压强度与温度是非线性关系。由于本次试验的冻结温度有4个级差(-5、-10、-20、-30℃),要总结出三轴条件下抗压强度与冻结温度的具体关系式还需大量的试验验证。

图4为不同温度条件下不同围压与抗压强度的关系。由图4可以得出,围压对于抗压强度的作用是非常明显的,随着围压的增大,冻结岩石的抗压强度线性增大,两者关系可表达为

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + b \quad (3)$$

式中,  $k$ 、 $b$  均为试验参数,该参数与温度等试验条件相关。

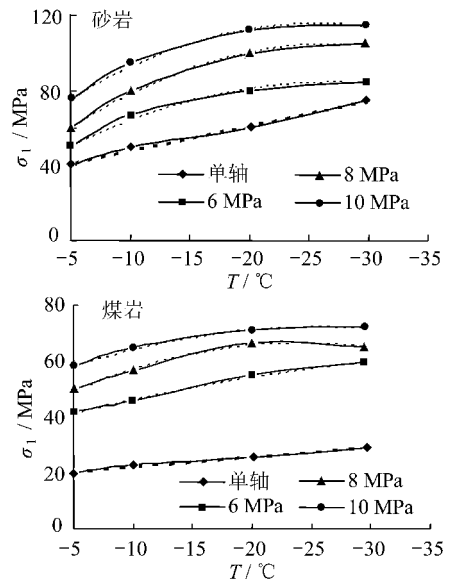


图3 岩石抗压强度与冻结温度的关系  
Fig. 3 Relationship between compression strength and different temperatures for two samples

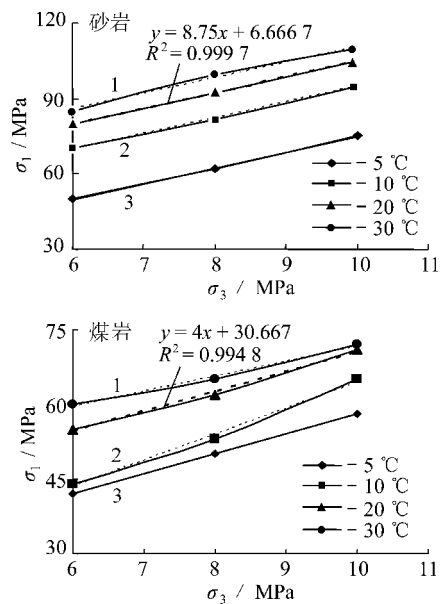


图4 不同温度条件下抗压强度与围压的关系  
Fig. 4 Relationship between compression strength and confining pressures for two samples

1.  $y=9.25x+5.4333, R^2=0.9901$ ; 2.  $y=1.7x+23.133, R^2=0.9954$ ; 3.  $y=7.325x+1.1333, R^2=0.9839$

不同冻结温度条件下式(3)的具体形式及  $k$ 、 $b$  试验参数如图4所示。

## 4 结 论

(1) 饱水岩石冻结后,其强度有明显的提高。说明井筒施工过程中,只要冻结设备及冻结工艺合理,冻结效果是可以保证的。人工冻结明显提高了岩石强度;冻结壁很好地阻隔了周围岩体和开挖井筒之间

水分的迁移,这对施工起到很好的保护作用。

(2)岩石的冻结效果,取决于岩石本身的材料组织结构和含水量。饱水煤岩和砂岩的冻结试验表明:岩石冻结后,随着温度的降低,砂岩的强度增大更加明显,即砂岩的三轴抗压强度对温度更敏感,主要是由于砂岩相对于煤岩来说,空隙大、含水量大,冻结后对温度的反应敏感。赋存于岩石内部孔隙中的水分发生相变,内部孔隙水分凝成冰,在孔隙壁上产生巨大冻胀力,其值远远超过岩石的强度。

由于试验的试样数量有限,本文的结论只是在一定条件下的。更为普遍的结论有待大量的试验进一步的验证。

### 参考文献:

- [1] 崔广心,杨维好,吕恒林. 深厚表土层中的冻结壁和井壁[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1998.  
Cui Guangxin, Yang Weihao, Lü Henglin. Frozen soil wall and shaft lining in deep alluvium[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1998.
- [2] 崔广心. 深土冻土力学——冻土力学发展的新领域[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 97-99.  
Cui Guangxin. Mechanics of frozen soil for deep alluvium: a new field of frozen soil mechanics[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(2): 97-99.
- [3] 崔广心. 论深厚表土层中确定地下结构物外荷载的基础理论——深土力学[J]. 煤炭学报, 1999, 24(2): 254-259.  
Cui Guangxin. The basic theory for analyzing loads on underground structure in deep alluvium-mechanics of deep soil[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(2): 254-259.
- [4] 周国庆,夏红春,赵光思. 深部土—结构接触面与界面层力学特性的直接剪切试验[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1 157-1 162.  
Zhou Guoqing, Xia Hongchun, Zhao Guangsi. Direct shear experiment of deep soil-structure interface and interface layer mechanical characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1 157-1 162.
- [5] 程桦,蔡海兵. 特厚表土层冻结方案多目标灰色局势决策[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2007, 27(3): 22-25.  
Cheng Hua, Cai Haibing. Multi-target gray situation decision-making for project determination of shaft freezing in deep alluvium[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 27(3): 22-25.
- [6] 汪仁和,李栋伟,王秀喜. 井筒开挖下非线性冻结壁的应力场和位移场计算[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(11): 1 562-1 565.  
Wang Renhe, Li Dongwei, Wang Xiuxi. Nonlinear model calculating frozen wall stress and displacement fields in shaft excavation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(11): 1 562-1 565.
- [7] 赖远明,吴紫汪,朱元林,等. 大坂山隧道围岩冻融损伤的CT分析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(3): 206-210.  
Lai Yuanming, Wu Ziwang, Zhu Yuanlin, et al. CT analysis of frost damage of the surrounding rocks of a tunnel in the daban mountain[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(3): 206-210.
- [8] 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 Gengshe, Pu Yibin, 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.
- [9] 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.
- [10] Yang Gengshe, Zhang Quansheng, Pu Yibin. Study on the damage propagation characteristics of rock under the frost and thaw condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 838-842.
- [11] 徐光苗,刘泉声. 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): 2 502-2 508.  
Xu Guangmiao, Liu Quansheng. Experimental study on basic mechanical behaviors of rocks under low temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 502-2 508.
- [12] 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): 1 479-1 484.  
Xu Guangmiao. Study on mechanical characteristics and multiphysical coupling problems of rock at low temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1 479-1 484.