

# 白垩系地层冻结砂岩物理力学试验研究

李博融, 杨更社, 奚家米, 陈新年

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:**为进一步认识白垩系地层冻结砂岩的物理力学特性,开展了不同温度状态下饱和中砂岩和粗砂岩的单轴压缩试验,对岩石应力应变状态、破坏形态及对岩石单轴抗压强度、弹性模量进行分析研究。结果表明:随着温度的降低,白垩系地层冻结砂岩单轴抗压强度和弹性模量明显增大,应力-应变曲线的压密段和塑性变形段不明显,表现出明显的弹性和脆性特征;岩样主要破坏形态为劈裂破坏和单斜面剪切破坏,且破坏强度较低;试样的单轴抗压强度值都随温度的降低而不断增大,同一温度状态下,中砂岩单轴抗压强度明显小于粗砂岩,且泊松比随温度的降低而减小,同等温度条件下粗砂岩泊松比小于中砂岩。依据试验结果可为冻结法凿井冻结壁和井壁的设计提供可靠的参数。

**关键词:**白垩系地层;冻结砂岩;冻结法凿井;物理力学试验

中图分类号: TD265.3 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2015)05-0030-04

## Experimental study on physical mechanics of freezing sandstone of Cretaceous Strata

LI Bo - rong, YANG Geng - she, XI Jia - mi, CHEN Xin - nian

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

**Abstract:** In order to further understand the physical mechanics features of the freezing sandstone in Cretaceous Strata, the uniaxial compression tests of the saturated medium sandstone and coarse sandstone under the different temperature status were conducted. With the analysis on the rock stress and strain status and the failure mode, the experiment study was conducted on the uniaxial compressive strength and elastic modulus. The results showed that with the temperature dropped, the uniaxial compressive strength and elastic modulus of the freezing Cretaceous rock would be increased obviously. The compaction section and plastic deformation section of the stress - strain curve would be more and more not obvious and the more clear elastic and fragility features would be appeared. The major failure mode of the rock samples was a split failure and monoclinic shearing failure and the failure strength was relatively low. The uniaxial compressive strength values of the samples would continuously increased with the temperature reduced. Under the same temperature status, the uniaxial compressive strength of the medium sandstone would be obviously lower than the coarse sandstone. The Poisson Ratio would be reduced with the temperature reduced. Under the same temperature, the coarse sandstone would be lower than medium sandstone. The rest results could provide the references to the design parameters of the freezing wall and mine shaft liner for the mine freezing shaft sinking.

**Key words:** Cretaceous Strata; freezing sandstone; mine freezing shaft sinking; physical mechanics experiment

## 0 引言

目前,陕西、甘肃、内蒙古和新疆等西部地区已出现了矿井建设的新高潮,并且建井深度也进一步加深,这些新建的矿井均要穿越很大的白垩系、侏罗系等第三系地层,而这些地层的特性与东部地区有很大的差异<sup>[1-2]</sup>。由于冻结法凿井在穿越白垩系地

层中的适用性,在这些地区得到了广泛的应用,但是由于人们对白垩系地层冻结砂岩的物理力学性研究还未有比较统一的认知,主要体现在,对常温、高温条件下岩石物理力学性质以及冻融循环后的岩石损伤特性已有比较深入的认识和了解,也做了大量理论和试验方面的工作,而对低温下富水白垩系砂岩的物理力学性质研究甚少。在西部地区冻结法建井

收稿日期: 2014-10-18; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.05.008

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272340, 41302228); 陕西省自然科学基金资助项目(2011JM5002)

作者简介: 李博融(1983—),男,陕西咸阳人,博士研究生。Tel: 18049091211, E-mail: 382573577@qq.com

引用格式: 李博融,杨更社,奚家米,等.白垩系地层冻结砂岩物理力学试验研究[J].煤炭科学技术,2015,43(5):30-33,16.

LI Bo - rong, YANG Geng - she, XI Jia - mi, et al. Experimental study on physical mechanics of freezing sandstone of Cretaceous Strata [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5): 30-33, 16.

过程中,井筒将穿越许多的白垩系富水地层,其具有成岩晚、含水量大、泥质弱胶结、强度低等特点,而在井筒冻结工程的设计时岩土体冻结前后的物理力学参数是最基本的选取指标<sup>[3~5]</sup>。因此,有必要对不同低温下,饱和白垩系地层砂岩的强度性质进行系统的试验研究。笔者针对饱水状态下不同深度、不同岩性常温与负温下白垩系地层岩石进行室内试验研究,进而为该地区冻结法凿井冻结壁和井壁的设计参数的选取提供参考。

## 1 冻结砂岩物理力学特性试验

### 1.1 岩石试样及试验设备

试验的白垩系地层砂石岩样取自甘肃新庄煤矿风井井筒白垩系地层,将现场取来的岩石加工成需要的圆柱体规格 50 mm × 100 mm(图 1),形状和尺寸都满足试验要求。在 MTS 电液伺服实验系统进行试验。根据工程勘察报告和冻结壁与井壁相关设计施工资料,新庄风井井筒穿越白垩系地层涌水量大,岩石处于饱和状态,冻结壁平均温度为 -10 ℃,去回路盐水管内冻结盐水温度为 28~30 ℃,考虑实际试验条件与工程水文、地质条件的相似性,选取 25、-5、-10、-20、-30 ℃ 五个温度等级进行饱水状态的单轴压缩试验。

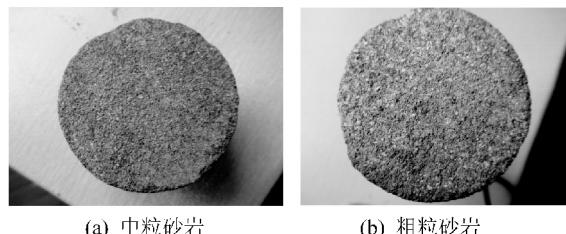


图 1 白垩系砂岩试样

### 1.2 试验步骤

- 1) 将加工好的岩石试样进行编号,随后将编过号的试样浸入封闭的水缸中,进行抽气处理,随后持续浸泡 24 h。
- 2) 将饱和处理的岩石试样放入预先设定好温度的低温控温箱内,并将冻结速率设置为 1 ℃ /h。
- 3) 冻结 48 h 后,给岩样套上橡胶套并将其安放在 MTS 设备的压缩试验机上。
- 4) 启动 MTS 试验机进行加载,加载完成后,取下破裂岩样,并从控制电脑内收集试验数据和信息。
- 5) 将未加载岩样依次加载,直到所有试样加载完毕,收集所有试验数据进行分析计算。

### 1.3 试验数据分析

借助 MTS-815 电液伺服试验机系统对饱和中砂岩试样(2 个试样分别记作 DZ1 和 DZ2) 及饱和粗砂岩试样(2 个试样分别记作 DC1 和 DC2) 进行不同温度下的单轴抗压强度试验,结果如图 2 所示,DZ1+25 代表 DZ1 试样、在 25℃ 温度下试验。

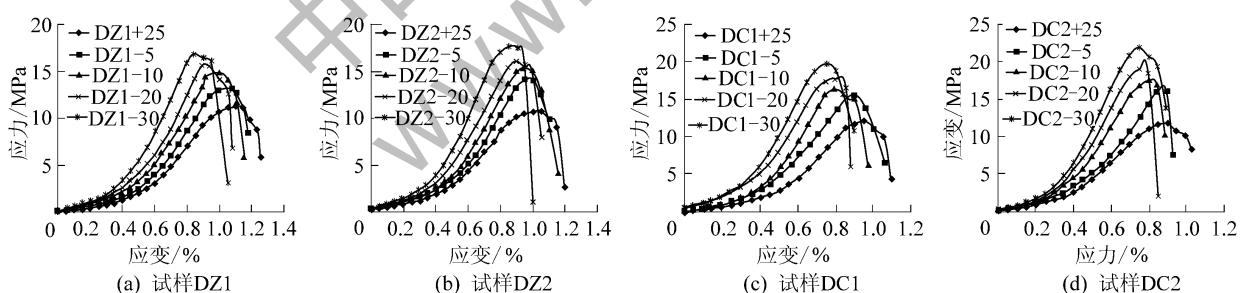


图 2 饱和中砂岩、粗砂岩在不同温度下应力 - 应变曲线

通过对图 2 分析可知,粗砂岩不同温度下单轴抗压强度要高于中砂岩,这是由于粗砂岩的结构比较致密,内部空隙、裂隙较少,遇水软化的程度较低,因此在该层位围岩的抗压强度要高于中砂岩层位<sup>[6~7]</sup>。在岩石的冻结过程中,岩石内部的空隙、裂隙水逐渐变成了固态冰,而固态冰本身就具有一定的强度,对整个岩石的内部结构起了支撑的作用,所以 4 组饱和砂岩试样的单轴抗压强度都随温度的降低而增大。由于冻结砂岩的这种特性加上冻结砂岩

内部孔隙冰填补了岩石内部的涌水通道,进而起到了止水的作用,因此冻结法能有效提高围岩强度并起到封水的作用。

## 2 试验结果分析

### 2.1 岩石应力应变状态分析

通过观察和分析图 2 的应力 - 应变关系曲线可以发现,各组试样具有相似的变化特征,这些变化规律大致可以分为以下 4 个阶段。

1) 岩石内部孔隙、裂隙压密段。由于岩石内部存在有孔隙和裂隙,这些空孔隙、裂隙随着轴压的增大逐渐闭合,应力 - 应变曲线表现为斜率不断增长的上凹型曲线,斜率的增长幅度与岩石内部孔隙、裂隙的数量有关,同时,在这个阶段岩样水平方向的应变变化很小,随着压力的增大岩样体积逐渐变小。通过分析同组岩石不同温度状态下的应力 - 应变曲线变化可以看出,该阶段在常温下的岩样表现的更为明显,这是由于随着温度的降低岩样内的孔隙水和裂隙水凝结成冰,岩样体积增大内部孔隙、裂隙被冰填满,且冰本身具有一定的强度,因而对于冻结状态下的岩石,随着轴压的增大,岩石内部的压实闭合效果不是很明显。

2) 岩石弹性变形阶段。在该阶段,岩样内部的孔隙、裂隙或节理面已经基本完成了压实和闭合,随着应力的增长应变近似为线性增长,岩样的应力 - 应变曲线也表现为直线。在此阶段,不同温度下的岩样都表现出了较好的弹性变化,因此,通常取该阶段的斜率作为岩石的弹性模量取值。通过观察各组应力 - 应变曲线可以看出,与单轴抗压强度指标类似,岩石的弹性模量也随温度的降低逐渐增大,在曲线中表现为随温度的降低斜率逐渐增大。

3) 岩石塑性变形并屈服阶段。随着轴向压力的持续加载,已经压实闭合的裂隙开始达到临界值并出现劈裂并扩展等现象,岩石内部开始快速形成许多新的水平向的细微裂隙,直至试件达到屈服极限状态,岩石的应力 - 应变曲线一直表现为斜率不断减小的上凸曲线。在此阶段即使停止加载,变形也不能恢复,具有明显的塑性变形特征。通过各组应力 - 应变曲线对比可知,常温下岩石此阶段表现得更为明显,这是由于随着温度的降低岩石内的孔隙、裂隙水逐渐凝结成冰,岩石的脆性不断增强而塑性却不断减弱引起的,因此在采用冻结法施工时,尽管冻结岩土体的强度增大,但是由于塑性变形阶段很短,一旦达到屈服极限,留给施工人员的补救时间也很短,在设计和施工中要特别注意。

4) 岩石破坏后阶段。岩石试样达到强度极限后,试样内部裂隙不断积累并形成贯通的破坏面,应力 - 应变曲线表现为斜率为负值下凹曲线,试样承载力随轴向应变的增长迅速降低至残余强度,此时破坏后的试样仍能保持完整且具有一定的承载力。

通过对各组白垩系地层岩石的应力、应变变化规律分析可知,随着温度的降低,白垩系地层冻结岩

石单轴抗压强度和弹性模量明显增大,应力 - 应变曲线的压密段和塑性变形段越来越不明显,表现出更明显的弹性和脆性特征。

## 2.2 白垩系地层岩石的破坏形态分析

岩石材料属于各项异性材料,岩石内部裂隙和节理发育也都不尽相同,所以岩石材料的破坏形态也多种多样<sup>[8]</sup>,本次试验的白垩系地层软岩试验破坏形态主要有2种:一种是基本平行于轴向的劈裂破坏,另一种是单斜面剪切破坏,如图3所示部分岩样破坏后的形态。

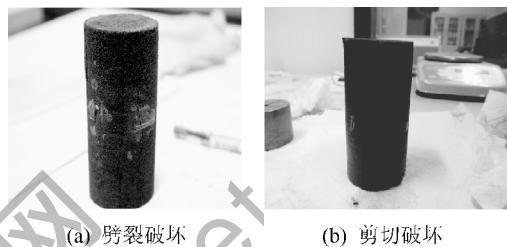


图3 部分白垩系地层饱水岩石破坏后形态

## 2.3 不同温度下岩石单轴抗压强度分析

据图2的应力 - 应变曲线得出不同温度下白垩系地层饱和砂岩的单轴抗压强度,见表1。

表1 不同温度下白垩系地层饱和砂岩单轴抗压强度

岩性	取样标高/m	编号	不同温度下单轴抗压强度/MPa				
			-30 °C	-20 °C	-10 °C	-5 °C	25 °C
中砂岩	-632	DZ1	16.943	15.783	14.976	13.265	11.335
		DZ2	17.633	16.072	15.928	14.072	10.709
		均值	17.288	15.928	15.111	13.669	11.002
粗砂岩	-841	DC1	19.554	17.583	16.536	15.860	12.263
		DC2	21.848	18.987	17.435	16.076	11.817
		均值	20.701	18.285	16.986	15.968	12.040

由表1看出,4组试样的单轴抗压强度都随温度的降低而不断增大,同一温度状态下,中砂岩单轴抗压强度明显低于粗砂岩。为进一步说明单轴抗压强度与试样温度之间的关系,将表中2组岩样单轴抗压强度的平均值绘制成单轴抗压强度随温度变化的散点图并进行拟合,如图4所示。

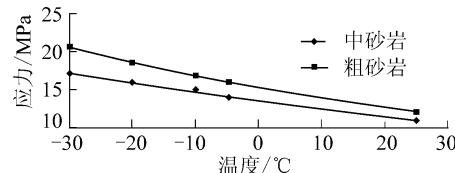


图4 饱和砂岩单轴抗压强度均值和温度拟合曲线

图4中的2组试样均适用二次多项式进行拟

合,饱和中砂岩、饱和粗砂岩应力  $\sigma$  与温度  $t$  的函数关系分别为:  $\sigma = 0.0005t^2 - 0.113t + 13.489$ ;  $\sigma = 0.001t^2 - 0.15t + 15.193$ 。

#### 2.4 不同温度下岩石弹性模量及泊松比分析

弹性模量是描述岩石材料弹性变形特性的一个很重要的力学参数,在冻结壁与井壁的设计中有很重要的作用<sup>[9-11]</sup>,笔者通过计算图 2 的各组试件应力-应变曲线弹性变形段的斜率,获得了饱和砂岩在不同温度下的弹性模量,见表 2。

表 2 不同温度下白垩系地层饱和砂岩弹性模量

岩性	取样标高/m	编号	不同温度下的弹性模量/GPa				
			-30 °C	-20 °C	-10 °C	-5 °C	25 °C
中砂岩	-632	DZ1	1.413 6	1.192 6	1.079 2	1.020 4	0.769 6
		DZ2	1.547 4	1.308 5	1.153 6	0.919 6	0.813 5
		均值	1.480 5	1.250 5	1.116 4	0.970 0	0.791 6
粗砂岩	-841	DC1	1.952 0	1.858 0	1.491 7	1.319 1	0.949 8
		DC2	2.182 5	1.668 5	1.622 3	1.305 4	1.028 4
		均值	2.067 2	1.763 2	1.557 0	1.312 3	0.989 1

由表 2 可以看出,4 组白垩系地层岩石试样的弹性模量都随温度的降低而不断增大,在同等温度状态下,粗砂岩的弹性模量要明显大于中砂岩。为进一步说明饱和砂岩弹性模量与试样温度之间的关系,将表中 2 组岩样弹性模量的平均值绘制成弹性模量随温度变化的散点图并进行拟合,如图 5 所示。

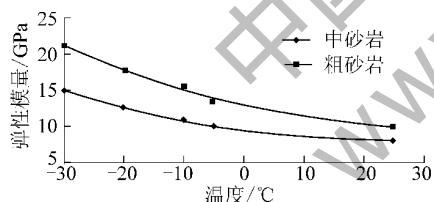


图 5 饱和砂岩弹性模量均值和温度拟合曲线

经过对比和验证 2 组试样均适用二次多项式进行拟合,且相关系数都接近于 1。饱和中砂岩、饱和粗砂岩弹性模量  $E$  与温度  $t$  的函数关系分别为

$$E = 0.0002t^2 - 0.0115t + 0.9399$$

$$E = 0.0003t^2 - 0.0185t + 1.2782$$

在冻结法凿井工程中,泊松比是冻结壁与井壁设计过程中十分重要的力学参数,确定材料泊松比的方法有很多种,通常取岩石在单轴压缩弹性阶段内横向应变与纵向应变的比值<sup>[12]</sup>,据试验结果计算得到饱和砂岩在不同温度下的泊松比见表 3。

由表 3 可以看出,4 组试样的泊松比都随温度

的降低而不断减小,同一温度下粗砂岩泊松比明显

表 3 不同温度下白垩系饱和砂岩泊松比

岩性	取样标高/m	编号	泊松比				
			-30 °C	-20 °C	-10 °C	-5 °C	25 °C
中砂岩	-632	DZ1	0.162 2	0.200 8	0.210 1	0.253 4	0.288 8
		DZ2	0.174 6	0.214 8	0.213 5	0.244 8	0.272 4
		均值	0.168 4	0.207 8	0.221 8	0.251 1	0.280 6
粗砂岩	-841	DC1	0.114 3	0.150 6	0.176 3	0.201 1	0.249 2
		DC2	0.104 5	0.139 6	0.151 9	0.190 1	0.242 4
		均值	0.109 4	0.145 1	0.164 1	0.195 6	0.245 8

小于中砂岩<sup>[13-14]</sup>。为进一步说明饱和砂岩泊松比与试样温度之间的关系,将表中 2 组岩样的平均值绘制成泊松比随温度变化的散点图并进行拟合,如图 6 所示。

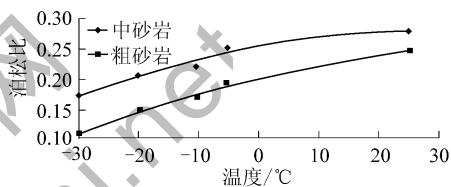


图 6 饱和砂岩泊松比均值和温度拟合曲线

经过对比和验证 2 组试样均适用二次多项式进行拟合,且相关系数都接近于 1,拟合形态很好。饱和中砂岩、饱和粗砂岩泊松比  $\mu$  与温度  $t$  的函数关系分别为:  $\mu = -0.000003t^2 - 0.0019t + 0.254$ ;  $\mu = 0.000002t^2 - 0.0024t + 0.1999$ 。

### 3 结 论

1) 不同低温下,2 种白垩系地层砂岩的单轴压缩变形都经历了孔隙压密、弹性变形、塑性变形和应变软化 4 个阶段;随着温度降低,孔隙压密阶段变短,弹性阶段斜率增大,塑性阶段也越来越短,且峰后曲线急速降低,甚至垂线下降,说明岩石不断呈脆性破坏;冻结砂岩的横向应变与轴向应力的变化具有一定的相关性,并在极限荷载处存在转折点;体积应变在压密和弹性变形阶段均处于压缩减小变化,随后才出现膨胀变形;随温度的降低,2 种岩石均表现出脆性增强,塑性减弱的特性。

2) 2 种白垩系地层砂岩的弹性模量均随温度的降低而增大,中粒砂岩的最大均值为 1.481 GPa,而粗粒砂岩则为 2.067 GPa;2 种岩石的泊松比均随温度降低而降低,中粒砂岩从 0.281 降至 0.168,粗粒砂岩则从 0.246 降至 0.109;拟合得二次多项式比较适合表示白垩系砂岩的弹性模量、泊松比与温度的相关性。

(下转第 16 页)

效益。采用廉价充填材料对空巷充填后能够实现资源整块回采,减少煤炭损失,仅六盘区就能多回采煤炭资源30万t,同时也节省了搬家倒面费用。3号煤层为优质无烟煤,市场前景良好,而海天煤业完整资源区域匮乏,空巷充填以后,形成完整资源开采区域,对于提升矿井经济效益,提高矿井采出率,延长矿井服务年限,意义重大。如果在众多资源整合矿井巷式开采区域,以及“三下”压煤区推广应用该技术,则经济效益更加显著。

## 5 结 论

1) 粉煤灰基似膏体充填材料以粉煤灰为主料、配以熟石灰和充填辅料,随着充填辅料含量的增加,抗压强度逐渐增加,至充填辅料含量5%时,90 d 单轴抗压强度为6.55 MPa,辅料掺量5%控制膨胀率为2.4%,浆液30 min内的净浆流动度大于210 mm,经过现场实践可满足空巷充填的要求。

2) 地面综合制浆泵站整站由计算机全自动化控制,该系统是两台涡流泵交替工作的半连续搅拌、连续放浆,配合合理的循环比设计,由管路自流输送,可以使系统稳定高效地工作。

3) 采用似膏体材料充填替代传统的过空巷的方法,降低了瓦斯、水患、顶板等事故对人员造成伤害的风险,也节省了搬家倒面的时间和费用,为解决空巷问题提出了一种新型而合理的方法。

### 参考文献:

- [1] 宇文旭. 山西省煤炭产业调整和振兴规划 [J]. 山西能源与节

(上接第33页)

3) 冻结砂岩在单向荷载作用下,内部微孔隙被压密,随后发生弹性变形,若继续加载则出现新的微裂纹,并且新旧裂纹发展扩大至连接贯通,达到破坏极限,峰值后岩石仍有一定的承载力,出现应变软化现象;冻结白垩系地层砂岩的单轴破坏以张拉破坏(劈裂破坏)的形式为主。

### 参考文献:

- [1] 杨更社,奚家米. 煤矿立井冻结设计理论的研究现状与展望分析 [J]. 地下空间与工程学报,2010,21(3):627-635.
- [2] 刘莹. 负温下白垩系岩石的物理力学性能试验研究 [J]. 煤炭工程,2011(1):82-84.
- [3] 汪崇鲜. 淤泥质冻土的物理力学性能试验研究 [J]. 煤炭科学技术,2000,28(8):9-12.
- [4] 陈湘生. 地层冻结技术 40 年 [J]. 煤炭科学技术,1996,24(1):13-15.
- [5] 张文. 我国冻结法凿井技术的现状与成就 [J]. 建井技术,2012,33(3):4-13.

能,2009(4):10-12.

- [2] 中国政府网. 目前全国正在进行资源整合的小煤矿数量有5000多处 [EB/OL]. [2014-02-26] http://www.gov.cn/zxft/ft203/content\_1681339.htm.
- [3] 胡炳南. 我国煤矿充填开采技术及其发展趋势 [J]. 煤炭科学技术,2012,40(11):1-5.
- [4] 缪协兴. 综合机械化固体充填采煤技术研究进展 [J]. 煤炭学报,2012,37(8):1247-1255.
- [5] 贾凯军,冯光明. 煤矿超高水材料充填开采技术及其展望 [J]. 煤炭科学技术,2012,40(11):6-9.
- [6] 冯光明. 超高水充填材料及其充填开采技术研究与应用 [D]. 徐州:中国矿业大学,2009:90.
- [7] 贾凯军,冯光明,李华健,等. 薄煤层超高水材料充填开采相似模拟试验研究 [J]. 煤炭学报,2013,38(S1):267-271.
- [8] 刘辉,邓喀中,何春桂,等. 超高水材料跳采充填采煤法地表沉陷规律 [J]. 煤炭学报,2013,38(S1):272-276.
- [9] 孙万明,刘鹏亮,崔锋,等. 高水材料条带充填开采地表沉陷主控因素分析 [J]. 煤炭科学技术,2013,41(12):11-14.
- [10] 柯国军,杨晓峰,彭红,等. 化学激发粉煤灰活性机理研究进展 [J]. 煤炭学报,2005,30(3):366-370.
- [11] 钱觉时. 粉煤灰特性与粉煤灰混凝土 [M]. 北京:科学出版社,2002:217-222.
- [12] 王福元,吴正严. 粉煤灰利用手册 [M]. 2 版. 北京:中国电力出版社,2004:63-112.
- [13] 王迎春,苏英,周世华. 水泥混合材和混凝土掺和料 [M]. 北京:化学工业出版社,2011:45-101.
- [14] 付冬平. 粉煤灰的活化研究及其在注浆工程中的应用 [D]. 长沙:中南大学,2003:6-30.
- [15] 管学茂,杨蕾. 混凝土材料学 [M]. 北京:化学工业出版社,2011:50-66.
- [16] 葛兆明,余成行,魏群,等. 混凝土外加剂 [M]. 2 版. 北京:化学工业出版社,2012:101-116.

- [6] 奚家米. 深厚富水软岩井筒冻结壁力学特性及应用研究 [D]. 西安:西安科技大学,2011.
- [7] 祁连光,杨科,陆伟. 煤系地层岩石单轴抗压强度统计分析 [J]. 煤炭科学技术,2013,41(2):100-103.
- [8] 杨更社,奚家米,李慧军,等. 三向受力条件下冻结砂岩力学特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(3):459-464.
- [9] 荣传新. 深厚冲积层冻结壁与井壁的力学特性及其共同作用机理研究 [D]. 合肥:中国科学技术大学,2006.
- [10] 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.
- [11] 姜国静,王建平,刘晓敏. 超厚黏土层冻结压力实测研究 [J]. 煤炭科学技术,2013,41(3):43-46.
- [12] 沈显杰,杨淑贞,张文仁. 岩石热物理性质及其测试 [M]. 北京:科学出版社,1988.
- [13] 杨更社,奚家米,李慧军. 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,2012,23(4):690-697.
- [14] 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.