

文章编号: 1673-3363-(2014)05-0764-05

# 宁正煤田白垩系岩层冻结温度场实测与数值分析

奚家米, 李庆平, 孙永岗, 屈永龙, 李博融

(西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要** 宁正煤田煤层上覆巨厚白垩系富水岩层, 井筒多采用冻结法施工。由于对该岩层冻结温度场扩展特性以及冻结壁受水化热影响范围等缺乏研究, 导致冻结设计不合理、冻结壁交圈时间预判不准确等问题。针对上述问题, 以宁正煤田新庄煤矿风井为背景, 通过现场实测和数值模拟, 对该矿井白垩系砂岩地层冻结温度场扩展特性、外井壁混凝土水化热对冻结壁的影响开展了研究。实测结果表明: 砂岩地层冻结初期温度快速下降, 平均降温速率达  $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ , 冻结锋面的发展速率达  $21.08\text{ mm}/\text{d}$ ; 混凝土水化热对冻结壁温度场的影响大, 冻结壁的融化深度范围为  $440\sim 480\text{ mm}$ , 距离外井壁  $50\text{ mm}$  的 3<sup>#</sup>测点温度升高了  $33.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 平均升温速率达到了  $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。通过对数值模拟与实测结果比较发现: 砂岩地层冻结壁扩展速度、井帮温度等参数值基本一致, 能很好地预测冻结壁温度场变化规律。

**关键词** 白垩系地层; 冻结壁; 温度场; 水化热; 现场实测; 数值模拟

**中图分类号** TD 26

**文献标志码** A

## Measurement and numerical analysis of freezing temperature field in Ningzheng coal field cretaceous rock stratum

XI Jiami, LI Qingping, SUN Yonggang, QU Yonglong, LI Borong

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

**Abstract** Because of very thick water-rich cretaceous strata covered on the seam of Ningzheng coal field, the freezing method is often applied to construct rockshaft. Due to the insufficient research on extension features of the freezing temperature field and the range influence of the frozen wall caused by hydration heat, some problems will exist such as the unreasonable freezing design and the inaccurate time prediction for the closure of freezing wall. Based on the wind well of Xinzhuang mine in Ningzheng coal field, field measurement and numerical simulation have been carried out to study the characteristics of freezing temperature field distribution and influence of outer shaft wall concrete hydration heat. The results show as follows: temperature falling fast at early freezing, the average rate of freezing can reach to  $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ; the development rate of freeze front reaches to  $21.08\text{ mm}/\text{d}$ ; the affect of concrete hydration heat on the temperature field of the frozen wall by side wall is serious, and the melting depth range of the frozen wall can reach  $440\sim 480\text{ mm}$ ; the temperature of 3<sup>#</sup> measuring point from outer wall  $50\text{ mm}$  rises  $33.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  with the average heating rate achieving to  $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ . Results by comparing the numerical simulation and field test show that parameter values are basically identical,

收稿日期: 2013-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272340); 陕西省自然科学基金项目(2011JM5002)

作者简介: 奚家米(1974—), 男, 安徽省芜湖市人, 博士, 副教授, 从事岩土工程、矿井建设方面的研究。

E-mail: xijm@xust.edu.cn

Tel: 13088957996

such as expansion rate of Sandstone freezing wall and well temperature, which can well predict the temperature field variation of frozen wall.

**Key words** cretaceous stratum; frozen wall; temperature field; hydrated heat; actual measurement; numerical simulation

近年来,我国西部地区矿井建设过程中,井筒要穿过厚度数百米、含水量大、强度低的白垩系软岩地层,普通法凿井技术难以通过,多数井筒采用冻结法施工<sup>[1]</sup>。但是由于对该地层冻结温度场缺乏系统研究,冻结壁平均温度、扩展速度以及岩层冻结速率等参数由设计人员凭经验选取,导致冻结设计不尽合理。另外,由于西部地区煤层埋藏深,设计井壁厚度大,浇注混凝土会产生大量的水化热,会促使一部分冻结壁融化,这将严重削弱冻结壁的强度和稳定性。特别是现场为了保证井壁混凝土在脱模时有足够的早期强度而加入一定量的早强剂,温度升高、冻结壁融化现象更加突出。针对上述工程技术问题,国内外专家学者对白垩系地层冻结壁温度场开展了一些研究<sup>[2-9]</sup>,取得的研究成果对指导工程起到了积极的作用。但是,研究工作还不够系统,研究成果不能很好地满足工程需求,特别是不同矿区白垩系地层工程地质和水文地质的差异,温度场发展规律也有所不同。

宁正煤田是陇东能源基地主要煤田之一,矿区位于甘肃省庆阳市正宁县及宁县境内,煤炭资源量 3 159.55 Mt,煤层埋深在 800 m 以下,上覆厚度 600 余米的白垩系富水软岩地层。矿区井筒都将采用冻结法施工,针对该地层开展冻结温度场分布规律的研究工作势在必行,也是井筒安全、高效施工的重要保障。

1 工程概况

宁正煤田新庄煤矿位于甘肃省宁县,矿井建设规模为 800 万 t/a,采用主、副(风)立井综合开拓方式。风井井筒设计全深 966.6 m,净直径 7.5 m,最大掘进荒径 11.3 m。井筒穿过第四系表土层 210.61 m,白垩系岩层 653.88 m,侏罗系煤岩层 109.01 m。地层主要包括第四系孔隙潜水含水层、白垩系、侏罗系砂岩孔隙、裂隙等 6 个主要含水层组,预测井筒最大涌水量为 2 186.38 m<sup>3</sup>/h。井壁采用双层钢筋混凝土复合结构,外壁厚 500~550 mm,内壁厚 600~1 350 mm,混凝土强度等级 C50~C80。

风井井筒从井口垂深 90 m 处开始冻结,冻结深度为 910 m,主要冻结参数见表 1。

表 1 新庄风井冻结参数  
Table 1 Xinzhuang wind shaft freezing parameters

井筒直径/m	最大开挖荒径/m	冲积层厚度/m	白垩系地层厚/m	冻结管圈径/m	冻结深度/m	冻结孔数/个	冻结管间距/m
7.5	11.3	210.6	653.88	15.9	910	38	1.313

2 冻结壁温度场实测与分析

2.1 监测方案

为了准确掌握冻结温度场发展规律,实时调控冻结站开机台数,实现冻结井筒信息化施工,同时为得到冻结壁平均温度、扩展速度以及岩层冻结速率等参数,在井筒冻结壁外侧分别布置了 C1, C2, C3 等 3 个测温孔。C1 测孔布置在地下水流上方冻结孔外侧主面上,距布孔圈径 1.5 m; C2 测孔布置在地下水流上方冻结孔终孔孔间距较大处圈径外侧界面上,距布孔圈径 1.5 m; C3 测孔布置在 550 m 水平孔间距最大处外侧界面上,距布孔圈径 1.8 m,测温孔布置如图 1 所示。采用一线总线测温系统,集中监测、即时显示、定时采集。

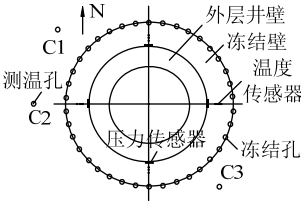


图 1 冻结孔及冻结壁测试元件布置图  
Fig.1 Test components layout in freezing hole and frozen wall

2.2 监测结果分析

为了与本文后述冻结壁径向测温结果进行对比,仅对井口标高以下-632 m 处砂岩地层温度场发展变化情况进行分析。根据该层位测温孔实测数据,温度与冻结时间的关系如图 2 所示。

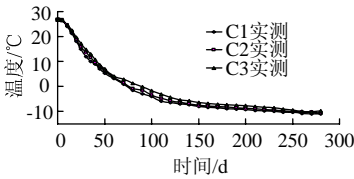


图 2 测温孔的实测温度变化曲线  
Fig.2 Measured temperature change curve of thermometer hole

由图 2 可看出:在冻结初期,该地层岩体温度变化较快,岩体温度与时间近乎呈线性关系;C1 测温孔的降温速度最快,其次是 C2 测温孔,C3 测温孔降温速度最慢。主要由于 C2 测温孔位于冻结孔终孔间距较大处圈径外侧界面上,受到冻结管的影响相对于 C1 测温孔较小,C3 测温孔距离冻结管的距离较远,总体上 3 个测温孔温度差距不大。

根据冻结钻孔偏斜情况,距井口 632 m 处砂岩地层,C1,C2,C3 测温孔距最近冻结管的距离分别为 1 602,1 780,1 977 mm。经计算,积极冻结期间,该地层岩体平均降温速率为 0.23 °C/d。根据测温孔的温度降到 0 °C 的时间和与最近冻结管之间的距离,计算得出 C1,C2,C3 测温孔处的冻结锋面的发展速率分别为 21.36,21.32,21.08 mm/d。所测数据基本反映了冻结过程中冻结壁的发展规律。进入维护冻结期后,冻结壁温度随时间变化速率降低,冻结壁厚度也相应缓慢增长,维护冻结期冻结壁平均温度最终稳定在-9.45~-11.03 °C 之间。

根据分析计算结果可知,西部地区白垩系软岩地层平均降温速率和冻结壁扩展速度远高于冲积地层,在今后类似地层的冻结设计时,应加大冻结管单位热流量取值或增大装机备用系数。在进行冻结壁交圈时间预判和试开挖时间确定时应充分考虑这一重要特征,以缩短工期、节约冻结成本。

### 3 水化热对冻结壁温度场影响的实测与分析

#### 3.1 监测方案

在井口标高以下-632 m 处白垩系砂岩地层冻结壁内布置了测温元件,冻结壁温度监测点布置情况如图 1 所示。冻结壁径向温度测温元件均匀地布置在风井井筒的 4 个方向,在每个测温孔内布置 6 个测点,其中 3 个布置在冻结壁内,编号为 1,2,3,3 个位于外井壁内,编号为 4,5,6,其中 1~2 号之间的间距为 350 mm,2~3 号的间距为 200 mm,3~4 号的间距为 100 mm,其径向布置如图 3 所示。

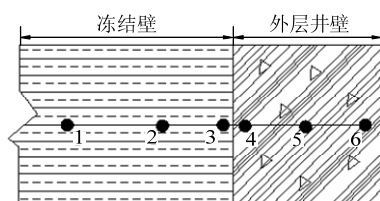


图 3 测温元件埋设位置

Fig.3 Embedding position of temperature measuring instrument

#### 3.2 监测结果分析

将冻结壁径向测温的实测数据绘制降温曲线如图 4 所示。

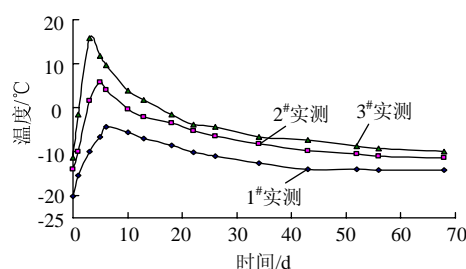


图 4 冻结壁径向温度实测曲线图

Fig.4 Simulate radial temperature change curve of frozen wall

从图 4 中可看出:外井壁混凝土浇筑后产生的水化热对冻结壁的温度产生了影响,影响过程可分为 2 个阶段。

1) 温度升高阶段:该阶段混凝土水化热的释放,使得外层井壁内部温度迅速上升,从而引起井壁处的冻结壁温度升高,其中测点 3#距离外井壁 50 mm,升温速度最快,升高幅度也最大,达到了 33.6 °C;测点 2#距离井壁 250 mm,升温幅度达到 25 °C;测点 1#距离外井壁 600 mm,距离井壁最远,水化热影响下所达到的最高温度为-6.2 °C,此处冻结壁未被融化。该阶段 1#,2#,3#测点受水化热影响的升温速率分别为 2.6,3.94,8.9 °C/d。

2) 温度下降阶段:随着混凝土内的水化反应逐渐减缓,所释放的水化热量减少,在冻结管内冻结盐水的持续作用下,冻结壁的温度重新下降,再次形成冻结壁。2#测点和 3#测点分别在 10 d 和 15 d 后温度降到 0 °C,回冻速率分别达到了 1.2 °C/d 和 1.4 °C/d。

为了进一步了解水化热对冻结壁的影响范围,根据 3 个测点的最高温度及测点与井帮的距离,可得出升温峰值与井帮距离关系曲线如图 5 所示。

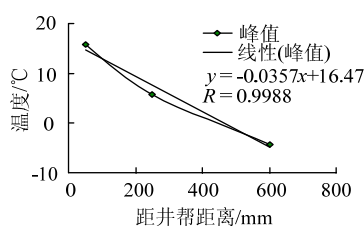


图 5 冻结壁径向温度峰值与井帮距离关系曲线

Fig.5 Relation curve of frozen wall radial temperature peak and shaft wall distance

由图 5 知,受水化热影响各测点升温峰值随距井帮距离近乎线性变化,由此可估算出该层位水化热影响下冻结壁的融化深度范围为 440~480 mm。

冻结壁的主要功能是封堵地下水和承受临时荷载,以保证凿井施工安全顺利进行。考虑到白垩系岩层的自身强度,冻结壁设计时多以能够承受地下水压力为原则,以封堵地下水为主要目的,设计冻结壁厚远小于东部地区冲积地层设计值,冻结深度达 900 m 的井筒,冻结壁厚度仅为 3.5~4.0 m。但是,由于白垩系地层导热系数大,热传导好,导致内壁浇注混凝土水化热能够比较快地传递到冻结壁内部,水化热对冻结壁的影响范围大,融化范围近 500 mm。另外,西部地区白垩系地层冻结井筒在井筒外壁混凝土浇筑时,多数井筒外壁与冻结壁之间未铺设任何保温材料或仅铺设一层塑料薄膜,而两淮地区在冻结壁与井壁之间一般铺设 25~75 mm 厚的泡沫塑料板来保温,西部地区冻结井筒施工未采取保温措施也是冻结壁融化深度大的重要原因之一。根据实测结果及分析,对西部白垩系地层冻结井筒设计、施工提出如下建议:冻结壁设计时应考虑井壁浇筑时水化热对冻结壁影响范围较大这一因素,确保冻结井筒安全顺利施工;井筒施工时应作保温处理,在冻结壁与井壁之间铺设一定厚度的泡沫塑料板,减小水化热对冻结壁的影响,同时也为井壁创造较好的养护环境;井壁设计时多采用高强度混凝土,减小井壁厚度,避免大体积混凝土浇筑时大量水化热的产生;施工时要对冻结壁、井壁进行温度、应力的监测,以便实时控制施工状况,保证凿井施工的顺利进行。

4 冻结温度场数值计算

4.1 冻结温度场数学模型

冻结壁在冻结的过程中,伴随着液态和固态的转化,因此立井冻结温度场是一个存在相变及边界不稳定、边界随温度变化而变化的不稳定的导热问题。一般在求解冻结壁温度场时,常忽略土体在竖直方向上的传热,并把问题转化为轴对称的平面问题。其导热方程如式(1)所示:

$$\frac{\partial t_n}{\partial \tau} = \alpha_n \left( \frac{\partial^2 t_n}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_n}{\partial r} \right) \quad (\tau > 0, 0 < \gamma < \infty) \quad (1)$$

式中:  $t_n$  为温度分布,℃;  $n$  为岩土的状态,  $n=1, 2$  分别表示融土、冻土;  $\tau$  为冻结时间, s;  $r$  为圆柱坐标,以井筒中心为原点, m;  $\alpha_n$  为导温系数,  $m^2/s$ ,

$\alpha_n=\lambda_n/c_n$ ,  $\lambda_n, c_n$  分别为岩土体的导热系数和比热容。

4.2 计算模型

井筒的设计荒径为 11.3 m,取冻结壁的影响范围为 30 m,根据测试元件埋置深度,取-632 m 深处的中粒砂岩为研究对象,按平面问题建立冻结温度场的有限元计算模型。

4.3 边界条件及参数

仪器埋设的位置为井下-632 m 处,从开始冻结到开挖至该层位,历时 256 d,根据冻结盐水的降温情况,确定冻结管外壁的温度情况,如表 2 所示。在冻结开始之前测得该处的岩石温度为 26.8 ℃,即模型的外边界的温度恒为 26.8 ℃。

表 2 冻结管外壁温度值

Table 2 Temperature value of freezing pipe ektexine

冻结时间/d	0	1	5	10	30	90	120	180	240	256
盐水温度/℃	26.8	6.9	-10.2	-17.6	-27.8	-29.4	-29.7	-29.3	-30.6	-30.1
冻结管外壁温度/℃	26.8	11.9	-5.2	-12.6	-22.8	-24.4	-24.6	-25.1	-26.6	-27.3

通过对该地层白垩系中砂岩进行一系列室内热物理实验可知,模拟所需地层的物理力学参数值及冻结的相关参数如表 3 所示。

表 3 白垩系地层岩石物理热力学参数表

Table 3 Cretaceous strata rock thermal physics parameters table

深度/ m	比热容/ (kJ·(kg·℃) <sup>-1</sup> )		导热系数/ (W·(m·℃) <sup>-1</sup> )		天然 密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	初始 地温/ ℃	含水量/ %
	冻结	非冻结	冻结	非冻结			
-632	0.579	0.765	3.13	2.073	2230	26.8	23.4

4.4 模拟结果分析

数值模拟测温孔测点温度与冻结时间的关系如图 6 所示。

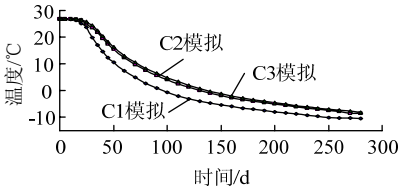


图 6 测温孔的模拟温度变化曲线

Fig.6 Simulate temperature change curve of thermometer hole

由图 6 及图 2 对比可知:在冻结初期,模拟值比实测值变化较慢,进入温度随时间成线性的变化阶段所需的时间较长,总体上,实测结果与模拟结果基本一致,各测点温度的实测值和模拟值相差不到 10%,进一步验证了实测结果反映的规律。

冻结 256 d 时井筒掘砌至-632 m 水平, 实测和数值模拟的开挖荒径上的冻结壁温度见表 4, 实测井帮温度在-7.8~-8.5 °C 之间, 模拟井帮温度在-8.1~-8.7 °C 之间, 模拟与实测的结果能较好地吻合。

表 4 井帮温度实测与模拟结果  
Table 4 Simulation and experimental results  
for temperature well

方位角/(°)	0	90	180	270
实测温度/°C	-7.8	-8.2	-8.1	-8.5
模拟温度/°C	-8.1	-8.3	-8.4	-8.7

## 5 结 论

1) 白垩系砂岩地层在冻结初期岩体温度快速下降, 温度与时间近乎呈线性关系。该岩层平均降温速率达 0.23 °C/d, 冻结锋面的发展速率达 21.08 mm/d, 降温速率和冻结壁扩展速度远高于冲积地层。冻结设计、冻结壁交圈时间预判以及试开挖时间确定时, 应充分考虑这一重要特征。

2) 外井壁混凝土水化热对冻结壁温度场的影响大, 冻结壁的融化深度范围为 440~480 mm, 距离外井壁 50 mm 的 3#测点温度升高了 33.6 °C, 平均升温速率达到了 2.6 °C/d。冻结壁设计时应考虑这一因素, 井筒施工时应作保温处理, 确保冻结井筒安全顺利施工。

3) 冻结温度场发展规律以及井帮温度的模拟结果与实测结果基本相符, 可有效地预测冻结壁温度场变化规律, 是白垩系岩层冻结设计与优化的可靠技术手段。

## 参考文献:

- [1] 邓维国, 申建红, 乔光磊. 西部地区煤矿建井存在的一些问题思考[J]. 建井技术, 2010, 31(4): 1-3.  
DENG Weiguo, SHEN Jianhong, QIAO Guanglei. Some issues on the coal mine well construction in western region[J]. Mine Construction Technology, 2010, 31(4): 1-3.
- [2] 高娟, 冯梅梅, 杨维好. 渗流作用下裂隙岩体冻结温度场分布规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 68-73.  
GAO Juan, FENG Meimei, YANG Weihao. Research on distribution law of frozen temperature field of fractured rock mass with groundwater seepage[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 68-73.
- [3] 王涛, 岳丰田, 檀鲁新, 等. 白垩系地层冻结温度场实测与数值模拟分析[J]. 煤炭技术, 2009, 28(3): 121-123.  
WANG Tao, YUE Fengtian, TAN Luxin, et al. Analysis of actual measure and numerical simulation for freeze temperature field in cretaceous stratum[J]. Coal Technology, 2009, 28(3): 121-123.
- [4] 岳丰田, 王涛. 扎赉诺尔矿区白垩系地层冻结温度场实测与分析[J]. 河北理工大学学报, 2009, 31(2): 119-122, 130.  
YUE Fengtian, WANG Tao. Survey and analysis of frozen temperature field of the cretaceous stratum in the Zhalainguoer mining site[J]. Journal of Hebei Polytechnic University, 2009, 31(2): 119-120, 130.
- [5] 张驰, 杨维好, 杨志江, 等. 深厚含水基岩区立井外壁冻结压力的实测与分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 33-38.  
ZHANG Chi, YANG Weihao, YANG Zhijiang, et al. In-situ measurement and analysis of freezing pressure of outer shaft lining in deep aqueous bed rock[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 33-38.
- [6] 陈军浩, 张瑞, 陈飞敏. 白垩系地层冻结施工立井融化规律现场实测研究[J]. 煤炭工程, 2013(3): 4-7.  
CHEN Junhao, ZHANG Rui, CHEN Feimin. Study on site measurement of thawing law for mine freezing shaft sinking in cretaceous strata[J]. Coal Engineering, 2013(3): 4-7.
- [7] 乔熙, 刘阳, 李安安, 等. 虎豹湾矿井冻结温度场数值模拟与实测对比[J]. 河北理工大学学报, 2011, 33(2): 1-5.  
QIAO Xi, LIU Yang, LI An'an, et al. The Comparative analysis of the numerical simulation and actual measurement of the freezing temperature field in Hubaowan Mine[J]. Journal of Hebei Polytechnic University, 2011, 33(2): 1-5.
- [8] 王衍森, 李炳胜, 张开顺, 等. 冻结井外壁温度场的数值模拟方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 316-320.  
WANG Yansen, LI Bingsheng, ZHANG Kaishun, et al. Numerical simulation about temperature field of outer shaft lining during freezing sinking[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(3): 316-320.
- [9] 许影, 汪仁和. 混凝土井壁水化热对白垩侏罗系地层冻结壁的影响[J]. 煤炭工程, 2011(12): 102-105.  
XU Ying, WANG Renhe. Hydrated heat of mine shaft concrete liner affected to mine shaft freezing wall in cretaceous jurassic strata[J]. Coal Engineering, 2011(12): 102-105.