

文章编号: 1001-1986(2015)01-0035-08

# 井筒冻结孔解冻涌水发生机制及其控制技术

吴 璋<sup>1</sup>, 王晓东<sup>1</sup>, 武光辉<sup>2</sup>, 朱明诚<sup>1</sup>

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 陕西彬长矿业集团, 陕西 咸阳 713600)

**摘要:** 针对冻结井筒解冻后频繁发生涌水灾害的情况, 通过工程实例分析了冻结技术、井筒地层条件及解冻涌水特征。结果表明, 涌水发生是由于解冻后冻结止水帷幕失效, 冻结管周围地层介质渗透性增强, 介质接触界面粘结强度降低而致界面缝隙扩大连通, 使冻结钻孔连通含、隔水层而形成竖向导水通道, 通道内高压水通过井筒薄弱部位发生涌水。采取在井筒外围适宜地层开挖环形巷道, 在环形巷道内逐个切断冻结管并向冻结管内外注浆加固, 最后将环形巷道用混凝土回填, 形成人工隔水塞层。利用 RFPA<sup>2D</sup>-Flow 渗流耦合模型验证了该治理方案的可行性, 且利用 FLAC<sup>3D</sup> 程序计算出环形巷道距离井壁 7.50 m 是最佳开凿位置。经该措施处理后的井筒涌水由原来的 90 m<sup>3</sup>/h 降低至 2 m<sup>3</sup>/h, 且井筒保持了稳定。

**关 键 词:** 冻结孔; 井筒; 涌水; 发生机制; 环形截水巷

**中图分类号:** TD 262    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2015.01.008

## Mechanism and control technology of water inrush from shaft freezing holes after thawing

WU Zhang<sup>1</sup>, WANG Xiaodong<sup>1</sup>, WU Guanghui<sup>2</sup>, ZHU Mingcheng<sup>1</sup>

(1. Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China;

2. Shaanxi Binchang Mining Group Corp, Xianyang 713600, China)

**Abstract:** In order to solve water inrush disaster from shaft freezing holes, based on analyzing the characteristic of freezing sinking technology, stratum condition and water inrush status from freezing holes after thawing in some projects, it is indicated that four reasons result in water inrush. Firstly, water-resisting curtain is failure after stratum thawing; secondly, the stratum penetrability increases around freezing holes; thirdly, the interface adhesion strength is reduced, as a result, the aquifer and aquifuge are connected during freezing holes to form vertical channel for water; fourthly, the high confined water can spurt from weakest part of shaft. Calculating by RFPA<sup>2D</sup>-Flow seepage program, the project is workable, and the best radius is 7.50 m to dig circular impermeable tunnel by FLAC<sup>3D</sup>. digging circular tunnel at feasible stratum outside shaft and cutting off freezing pipe to grout, then back-filling the circular tunnel to form artificial aquifuge were taken, the quantity of water inrush was reduced from 90m<sup>3</sup>/h to 2m<sup>3</sup>/h, and the shaft was steady, reaching the aim of control and prevention of water inrush.

**Key words:** freezing holes; shaft; water inrush; occurrence mechanism; circular impermeable tunnel

冻结法凿井最早用于俄国金矿开采, 后由德国工程师将该项技术拓展至煤矿矿井建设<sup>[1]</sup>。冻结法成井技术以其施工方法简单高效, 已经成为我国煤矿建设常用的手段之一<sup>[2-3]</sup>。冻结法的应用目的是将地层冻结形成止水帷幕, 但在成井后解冻地层, 冻结形成的止水帷幕失效, 井筒因此经常发生涌水灾害, 影响矿井的建设和生产安全。

由于涌水灾害的严重性和多发性, 预防和治理

冻结法成井解冻后的涌水灾害已发展成为冻结法凿井技术的重要分支之一。治理冻结井筒涌水目前主要借鉴治理其它涌水灾害所采用的壁后注浆和射孔注浆两种手段<sup>[4-6]</sup>。但壁后注浆属于点对点式治理, 很难阻断导水通道, 在静水压力和开采扰动下会从新的裂隙涌水, 需要反复注浆, 且占用上下井通道影响生产正常进行; 射孔注浆技术难度大, 影响因素多, 费用较高, 且在很多工程中由于后天的建设

收稿日期: 2013-09-10

基金项目: 陕西省科学技术研究发展计划项目(2012K08-06)

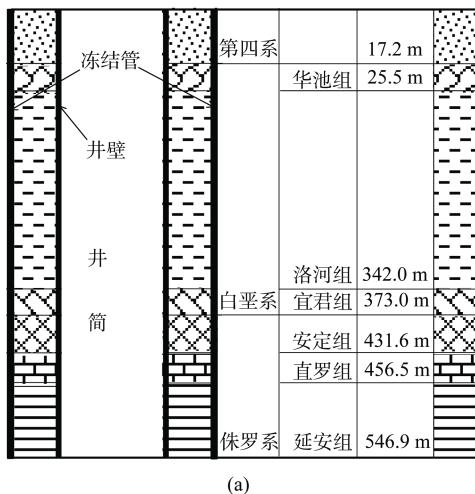
作者简介: 吴璋(1973—), 男, 陕西富平人, 研究员, 从事煤田地质及矿井水害防治技术研究。

E-mail: wuzhang@cctegxian.com

引用格式: 吴璋, 王晓东, 武光辉, 等. 井筒冻结孔解冻涌水发生机制及其控制技术[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(1):35-42.

改造，已不具备采用该方法的基本条件。

本文以陕西某在建矿井为例，在分析冻结成井技术、地层条件、涌水点状况等的基础上，解释冻结管解冻后涌水发生的机制，并研究以在适宜地层形成人工隔水层的方法阻断涌水通道，达到堵水效果。该方法利用置换法形成人工隔水地层，消除地面或井筒注浆无法形成完整面状隔水帷幕的缺陷，以达到彻底杜绝冻结管周围涌水隐患的目的，目前在国内外应用尚属首例，未见相关文献报道。



(a)

## 1 井筒涌水概况

陕西某在建矿井，设计生产能力为 6 Mt/a，采用立井开拓方式。主立井设计深度为 545.95 m，净径 6.50 m，采用全深冻结施工成井。冻结作业前在井筒外围布设了 36 个用于安装冻结管的  $\Phi 190$  mm 钻孔，孔深与主井深度相同，内置  $\Phi 140$  mm 冻结管，循环冻结液在地层中形成冻结帷幕。主立井井壁采用双层钢筋混凝土塑料夹层复合井壁支护结构形式(图 1)。

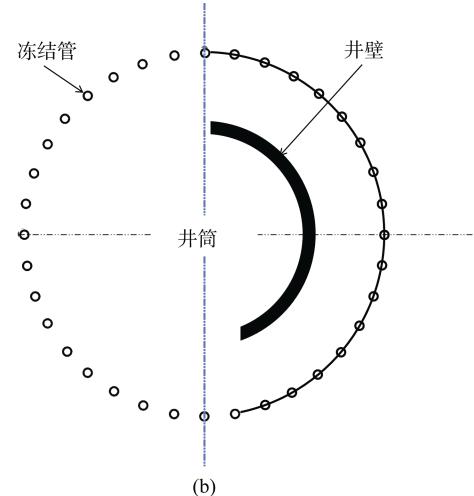


图 1 井筒地层(a)及井筒剖面(b)图

Fig. 1 Shaft stratum (a)and section (b)

由于主井功能性强，需要开挖贯通的辅助巷道和硐室较多，出水事故多次发生。第一次是主井井筒箕斗装载硐室 1 号检修通道(-471.8 m)出水，出水口有大量黄泥水并夹杂有少量灰绿色泥岩碎石，井筒总出水量达到  $128 \text{ m}^3/\text{h}$ (含约  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  井壁淋水)。后经封闭 1 号检修通道和壁后注浆，主井总涌水量降至  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  以下。随着第一次出水治理的结束，主井静止水位回升，次年-350 m 阀门检修硐室涌水，水量达  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ ，致使主井井筒总涌水量又升至  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  以上。第三次是主立井通风联络巷贯通施工中，扰动 9 号冻结管引起出水，出水口伴有大量黄泥并夹杂少量灰绿色泥岩碎石，出水量达到  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ 。经近 3 个月的壁后注浆治理(包括主井-350 阀门检修硐室出水)，主井总涌水量已降至  $1.25 \text{ m}^3/\text{h}$ 。次日，已形成近两年的箕斗装载硐室(-470 m)混凝土顶板突然破裂并发生涌水，最大涌水量达  $140 \text{ m}^3/\text{h}$ ，稳定涌水量约  $90 \text{ m}^3/\text{h}$ ，夹杂大量黄泥和岩石碎屑，再次造成井筒和巷道内无法正常作业。因此，如何根治井筒涌水是本文研究的核心任务。

## 2 井筒涌水发生机制

### a. 井筒地层条件

井筒穿过第四系黄土及夹卵石土层，白垩系下

统洛河组、宜君组，侏罗系中统安定组、直罗组、延安组及侏罗系下统富县组等基岩地层，岩层主要由细粒砂岩、中粒砂岩、粗粒砂岩、泥岩、砂质泥岩和煤层组成。多数岩层强度较低，中上部砂岩、泥岩、砂质泥岩松软易碎，煤层厚度大。白垩系下统洛河组和侏罗系中统延安组为主要基岩含水层，含水层厚度大。

### b. 渗流通道

冻结法施工是将冻结管周围一定范围地层内的水分由液相变为固相，形成截流帷幕，达到封堵水流通道从而阻止两侧水分交流的目的。在井筒形成后将地层解冻，水分由固相转化为液相，冻结帷幕消失，水流通道重新被打开。井筒质量合格无缺陷的理想状态下，地层的水分在井筒周围固定层位绕流，而一旦井筒某些部位出现缺陷，具有较大压力水头的承压水将由缺陷或薄弱部位渗出或涌出。对于施工工艺等因素造成的井筒接茬、蜂窝等缺陷，水会从缺陷部位以渗流的方式流出或管状流喷出，出水量相对较小，危害较小，针对此种水害，工程上采用壁后注浆较为成功。该煤矿主井筒前期出现的淋水和-350 m 阀门检修洞室出水均属于此例，也都采用壁后注浆成功解决。

然而主井箕斗装载硐室 1 号检修通道出水、主

立井通风联络巷中9号冷冻管出水和箕斗装载硐室混凝土顶板破裂涌水，均伴有大量黄泥和岩石碎屑，具有大通道出水的特点，分析认为是冻结孔外环形地层空间出水。分析冻结技术特点、地层条件以及冻融原理，在超低温冻结和解冻过程中，造成该种高强度涌水灾害主要有四方面的因素：一是冻结管周围一定范围内岩体介质和水泥结石介质材料内部损伤严重，结构孔隙增多增大，造成裂隙扩展、沟通，导致介质强度降低渗透性增强<sup>[7-10]</sup>，解冻后形成良好的导水通道；二是两相介质粘结面材料变形参数差异，出现变形不协调，致使介质接触面粘结强度降低，粘结界面裂隙扩展贯通<sup>[11-14]</sup>；三是冻结钻孔可能存在的固管水泥浆充填不饱满，形成一定范围内的竖向人工通道；四是井筒上布置的巷道或硐室的混凝土顶板穿过冻结管位置较薄弱，冻结孔内形成竖向环形通道后产生的高水压力将顶板压裂，形成压溃出水。

综上所述，材料、结构、工艺等多方面的原因，使冻结过程中的阻水构造在解冻过程中功效退化，而转变成水的良好通道（冻结孔周围一定范围内的环形导水通道），贯通了冻结孔全深范围内所有的含水层和隔水层，在孔内形成高压水头，一旦遇到井筒内较薄弱部位，便可能出现压溃涌水的灾害。另外再伴随涌水的水流冲刷，通道会越来越大、越来越畅通，涌水量也越来越大。

### c. 涌水来源及涌水量

井筒全长通过的含水层有第四系松散层含水层、白垩系洛河组承压含水层和侏罗系延安组承压含水层。其中第四系潜水含水层由砂、含泥砂的砂砾卵石层组成，含水层厚度约12m，由大气降水补给为主，富水性中等，埋藏较浅，厚度较薄，不是当地主要含水层。白垩系洛河组含水层是井筒掘进通过的最长含水层，厚度约为324m，单位涌水量q为0.23 L/(s·m)，渗透系数K为0.21 m/d，富水性中等—强，其他含水层富水性中等—弱。侏罗系延安组承压含水岩组包括岩性为砂砾岩、中粗粒砂岩与粉细粒砂岩及泥岩、砂质泥岩，单位涌水量q为0.09 L/(s·m)，K为0.24 m/d，属弱富水性含水层，但具较高的承压水头。因此矿井的涌水量主要取决于洛河组含水层。

采用承压—潜水完整井公式(1)<sup>[15]</sup>，计算预测揭露单个冻结管环形空间上下导水通道时最大涌水量。取洛河组砂岩渗透系数的上限0.24 m/d，假设环形空间中的剩余水柱高度为0m，以钻孔半径0.19m作为“大井法”承压转无压计算公式的引用半

径，计算出单个冻结管环形空间导水通道涌水量约是160.2 m<sup>3</sup>/h，与实测最大涌水量相当。

$$Q = \frac{\pi K (2HM - M^2 - h_0^2)}{\ln R_0 - \ln r_0} \quad (1)$$

式中 Q 为涌水量，m<sup>3</sup>/d；K 为渗透系数，m/d；H 为承压水头高度，m，取290.6m；M 为承压水含水层厚度，m，取105.8m；h<sub>0</sub> 为剩余水柱厚度，m，取0m；R 为影响半径，m，取 R=10s<sub>w</sub> $\sqrt{K}$ =1423.6m；s<sub>w</sub> 为降深，m，取290.6m；r<sub>0</sub> 为引用半径，m，取0.19m；R<sub>0</sub> 为引用影响半径，m，R<sub>0</sub>=r<sub>0</sub>+R=1424m。

## 3 井筒涌水控制技术

该矿主立井出水次数多，历时长，曾采用多种治理方法，既采用了常规的壁后注浆技术，也采用了针对冻结孔的引流注浆技术<sup>[16]</sup>。由于后期的井口施工影响，已不具备采用射孔注浆的技术条件，而引流注浆技术操作周期长，且在未扰动的情况下很难发现冻结孔外围的环形导水通道。此类方法对涌水治理也不彻底，且不能做到灾害预防。随着对涌水危害和涌水通道的研究，认识到必须对所有冻结钻孔进行隔水和止水处理，才能达到治理和预防此类灾害的效果。

### 3.1 涌水控制方案

#### a. 涌水控制理念及方案

根据涌水现象及机制分析，冻结管解冻后冻结管壁以外一定范围内地层介质性质和结构发生了变化，治理该灾害的理念重点在于改善地层介质的渗透特性和改造地层形成人工隔水层。

结合现有工程技术手段，本研究试图通过在冻结管周围渗透性较大地层内注浆以降低较大范围内地层的渗透性，并在特定层位利用混凝土置换一定范围内的地层介质形成人工隔水层，阻断冻结管周围的环形导水通道。该方案从材料和结构两方面措施着手，达到治理和预防涌水灾害的目的，解除水害对矿井投产后正常产煤的潜在威胁。

主立井冻结的36个冻结孔环形布置于井筒周围（图1），因此通过工程措施形成的人工隔水层应是以冻结孔轴线为中心线的具有一定宽度的环形带。在特定层位围绕井筒开挖环形巷道，逐个揭露、截断冻结管，并向冻结管内和周围一定范围地层中注浆，最后用混凝土充填整个巷道，形成人工隔水层。考虑到安全的因素，先行施工环形巷道，再在该巷道中采用掏耳硐的方式逐个揭露冻结钻孔。

#### b. 涌水控制效果预测

在井筒内实施涌水治理措施后，根据井筒周围

地层水分渗流情况可以判断涌水治理技术的效果。利用 RFPA<sup>2D</sup>-Flow 渗流耦合程序系统模拟上覆含水层在增设隔水层前后承压水通过冻结管环形空间的渗流，揭示冻结管环形空间导水现象、上覆岩层渗流规律，以及措施的作用效果。

数值模型采用二维平面应力薄板模型，模型高度方向取矿井地表至煤层底板的实际厚度，宽度取 300 m，模型划分为 108×100 个单元，整个模型的弹性模量、抗压强度和渗透系数服从 Weibull 分布。模型水平压力取地层垂直应力(静水压力状态)，模

型下端取固定端约束，且不渗水，上端面为自由端；模型左、右侧分别约束其水平方向位移，允许模型因自重应力而产生沉降。在洛河组和延安组增加渗流边界条件，洛河组加 2 MPa 水压，延安组加 1 MPa 水压，以此模拟承压水的补给。

由于井田地层倾角平缓，无明显大的断裂构造，各地层广泛分布，并延展至井田外无限远，所以各含水层可视为无界承压含水层。模型计算中取洛河组及侏罗系含水层渗透系数和平均单位涌水量取前述数值。表 1 为模型岩石力学参数，图 2 为数值计算模型。

表 1 渗流模拟岩石物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters for seepage simulation

地层岩性	厚度 /m	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙率 /%	相对密度	含水率 /%	坚固性系数	饱和抗压强度/MPa	软化系数	泊松比	抗剪强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	内摩擦角 /(^)
洛河组砂岩	324.40	2.51	6.10	2.66	1.74	1.00	4.70	0.45	0.30	0.66	0.22	39.62
宜君组粗砾岩	30.90	2.73	2.93	2.80	2.01	2.50	13.50	0.54	0.15	1.24	0.68	40.08
安定组泥岩	58.30	2.58	10.60	2.83	2.74	2.40	15.20	0.63	0.25	1.38	0.79	41.22
直罗组泥岩	21.30	2.53	10.90	2.84	2.14	2.00	9.70	0.46	0.24	1.14	0.50	40.63
延泥岩	24.50	2.61	8.90	2.85	2.21	3.00	20.53	0.61	0.22	2.50	1.06	38.65
安粗粒砂岩	46.60	2.52	8.39	2.73	0.39	2.60	15.07	0.59	0.21	1.68	0.78	40.31
组煤	23.60	1.33	5.00	1.40	4.51	1.30	8.53	0.64	0.24	1.26	0.37	38.57

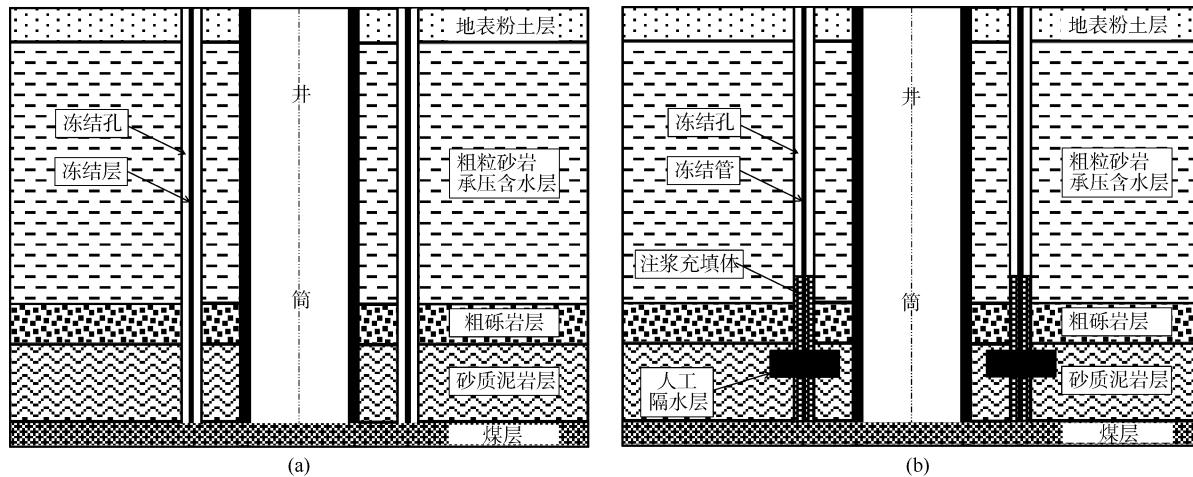


图 2 渗流模拟计算示意模型

Fig.2 Model of seepage simulation

由图 3 可以看出，在洛河组的下覆岩层水流矢量为很小，表明该地层中水流较少。分析原因是由于宜君组结构致密，含水性极弱，可视其为相对隔水层。在宜君组、安定组及直罗组之间水流矢量也为零，表明层间越流补给极为微弱，安定组和直罗组均为泥岩，也可视作相对隔水层。

处理后的冻结孔中，在混凝土填充处原有水流被隔断，表明添加的混凝土起到了隔绝水流的作用，在隔水层的上下方均没有出现水流箭头，表明隔水层起到了隔水效果。

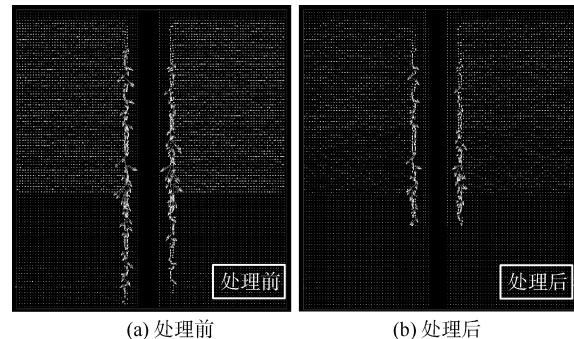


图 3 承压水渗流矢量图

Fig.3 Seepage vectorgraph of confined water

从图4可以看出，在洛河组内水平方向的流量大于垂直方向，当接近冻结孔时，水平方向的流量开始减少，垂直方向的流量开始急剧增加；当越过冻结孔后，水平和垂直方向的流量逐渐减少，直到井壁处减小为零。由此可见，冻结孔周围一定范围内形成了水的良好通道，水流量较大，且井壁是良好的隔水构造。

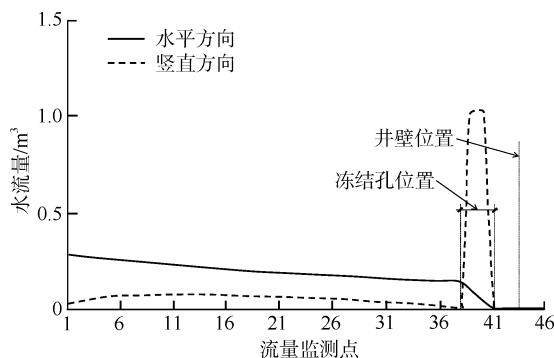


图4 处理前洛河组内到井壁-245 m 标高水流量图

Fig.4 Seepage water flow at horizontal direction before treatment from Luohe Formation to shaft wall in level -245 m

冻结孔周围地层(标高-335~402 m)(图5)，在没有填充混凝土前，垂直方向的流量较高，在形成混凝土层后，水平和垂直方向流量均降低为零，由此可以看出混凝土层成为良好的隔水层，阻止了水通过冻结管周围的环形空间向下补给。

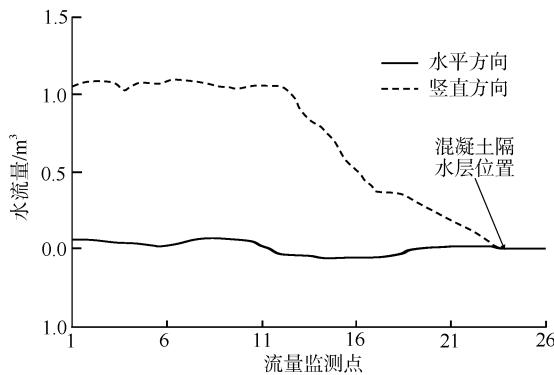


图5 处理后环形导水通道内-335~402 m 标高水流量图

Fig.5 Water flow in circular channel of water after treatment from level -335 m to -402 m

### 3.2 环形巷道设计

#### a. 环形巷道开凿层位

环形巷道的开凿层位需满足几个关键要素，首先要位于井筒主要含水层之下及井筒主要巷道和硐室之上，达到保护工程设施阻隔含水层的目的；其次巷道要选在岩性较好的岩层中，有利于巷道围岩稳定，施工条件好，有利于混凝土浇筑；第三是巷道顶底板有良好隔水层，防止发生绕流；最后还要

与主井联通通畅，利于环形空间涌水时临时排水以及治理。

综合考虑以上几点，确定井筒里程位置-432 m 的通风联络巷为施工环形巷道的最佳位置。巷道在洛河组合水层(-350 m)以下，岩性是粗粒砂岩，上下均为十几米厚的泥岩隔水层，本身是上仓联络巷与主立井的通风联络巷，与主井贯通，施工时可从副立井进入，运输条件良好，不影响主立井的其他工作。另外，矿井的主要构筑措施和采煤工作均处于该层以下，在该层进行封堵作业，可以起到消除上部水对采煤工作和构筑物的危害。

#### b. 环形巷道优化设计

由于环形巷道设计于冻结管周围，距离井壁较近，其开挖会对井壁产生扰动。合理的环形巷道布置、巷道断面等关键参数关系着涌水治理效果，以及井筒的稳定性。环形巷道内壁距井筒井壁的距离L如果较小，会导致新开拓环形巷道的塑性区与主井形成的塑性区相互重叠，产生更大的松动圈，从而导致井筒破坏；如果较大，会造成环形截水巷的长度增加，工程成本增大。

采用通用的数值分析软件 FLAC<sup>3D</sup>对环形截水巷开挖过程进行数值计算，根据其结果分析最合理的L值，确定环形截水巷的位置。计算中采用莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则判断岩体的破坏形式。模拟研究的该矿竖井井筒呈圆形，应用的冻结参数相同，整体具有对称特征。环形巷道布置于粗砂岩层中，在通风联络巷内开拓，结合工程施工和后续工程措施的特点，环形巷道及耳硐的断面为2 m×2 m的矩形断面，顶板1 m为粗砂岩。取硐室3~5倍硐径为施工影响范围，模型具体尺寸范围为：宽44.5 m，高22.0 m，长22.5 m，模型剖分后，47 922个单元。考虑整个模型对井壁的稳定性，模型下边界取固定位移，上边界按地面埋深围岩应力计算取荷载边界，其他边界取法向位移约束。材料参数见表2，数值计算模型见图6。

表2 环形巷道数值计算材料参数  
Table 2 Material parameters of circular tunnel

材料	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
泥岩	4.0	2.5	0.77	0.22	41	2 200
粗砂岩	7.7	5.3	2.1	1.10	41	2 400
泥岩	2.9	1.7	0.64	0.22	39	2 200
混凝土	18.9	13.9		2.10		2 500

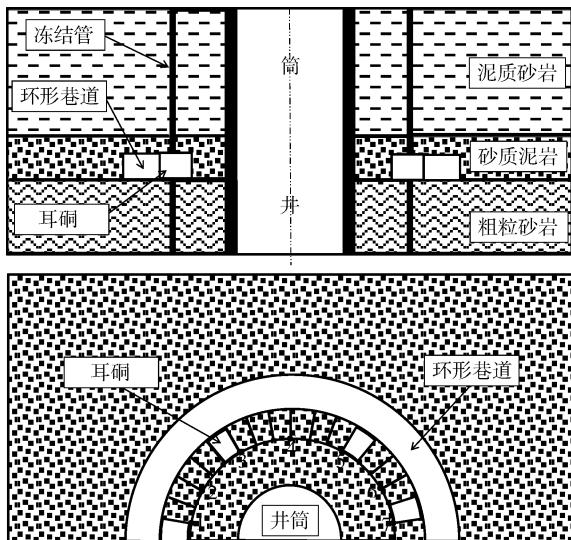


图 6 环形巷道数值计算模型示意图

Fig. 6 Numerical model for circular tunnel

从图 7 可以看出, 当  $L$  为 6.50~7.00 m 时, 内壁出现正向位移, 代表此处受拉力影响, 这对抗拉强度远远小于其抗压强度的混凝土来说是非常不利的; 从  $L$  为 7.00 m 开始, 主井内壁、外壁正向位移、切向位移随着  $L$  的增大而减小;  $L$  大于 7.50 m 时, 位移趋于 0。因此,  $L$  为 7.50 m 是环形巷道的最佳位置。

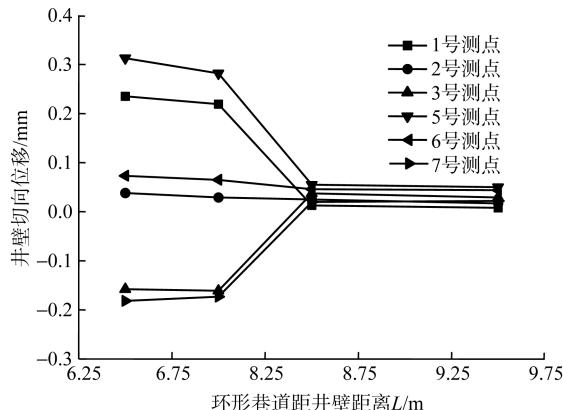


图 7 井筒内壁切向位移图

Fig. 7 Tangential displacement of shaft internal wall

### 3.3 井筒稳定性监测方案

由于巷道的开挖及注浆, 可能导致周围岩体的应力重分布, 使得围岩和井筒产生变形, 因此, 在施工过程中, 必须对重点部位进行监测。本次监测包括主井井壁水平位移监测、环形截水巷及耳硐表面位移监测, 地表沉陷引起的竖向位移监测。

#### a. 井壁水平位移监测

在施工前后保持对主井井壁水平位移进行监测, 坚向共布置 5 个监测断面, 每个断面在水平方向上设 4 条监测线, 具体位置如图 8 所示。通过施工过程中井壁收敛变形的监测, 最终分析巷道开挖对井壁的影响。

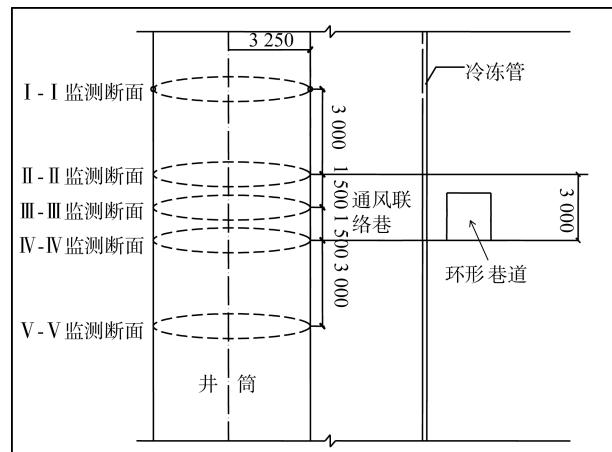


图 8 井筒井壁监测断面布置图(单位: mm)

Fig. 8 Monitoring section of shaft internal wall

#### b. 环形巷道位移监测

在环形巷道施工中, 为了动态反映围岩状况, 设置监测断面进行实时监测。监测断面和测点布置如图 9 所示。

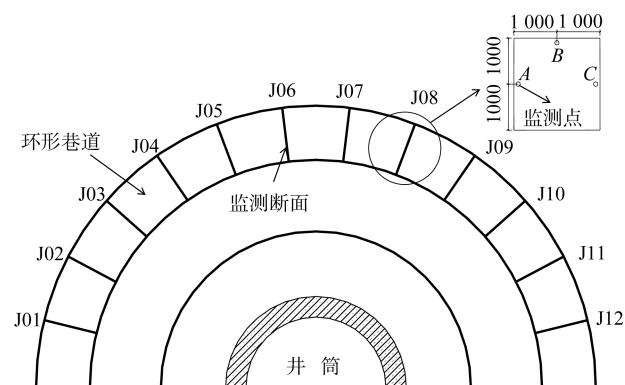


图 9 环形巷道监测位置及断面布置图(单位: mm)

Fig. 9 Monitoring position and section of circular tunnel

#### c. 地表竖向位移监测

在井筒附近地表共设径向监测线 4 条, 环向监测线 5 条(图 10), 直径 13.7 m, 将开挖环形巷道范围全部包含在内。在地面设置成品沉降观测标志, 测量地表变形, 用以分析由于巷道施工造成地表沉降。

## 4 涌水控制效果

### 4.1 井筒稳定性

#### a. 井壁水平位移监测

主井内壁测线于施工前布置开始监测, 至施工完成段时间, 共监测 110 d。在监测期间, 井壁断面所有测线的收缩量均为零, 即在环形巷道及耳硐施工过程中, 井筒内壁保持稳定。

#### b. 环形巷道变形监测

J8 监测断面于开挖耳硐后布置测点开始监测, 共监测 23 d。从图 11 可以看出, 此断面顶板累计下

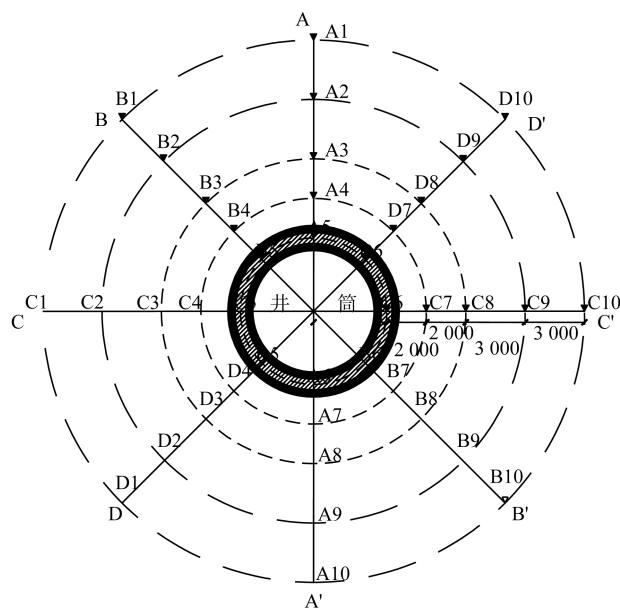


图 10 地面竖向位移监测平面布置图(单位：mm)

Fig.10 Monitoring plane of vertical displacement of ground

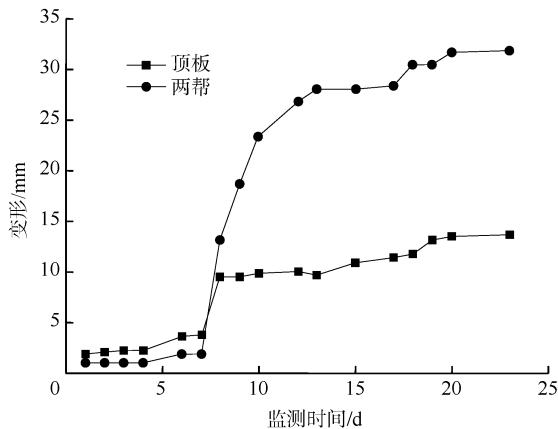


图 11 J8 围岩表面位移变化图

Fig.11 Displacement of rock at J8

沉 13.63 mm，两帮累计收敛 35.07 mm，基本稳定。在第 7~12 天时，顶板下沉及两帮收敛有一次比较大的变形，这是因为在 N7 耳硐未回填的情况下，平行开挖 N9 耳硐，造成空顶面积增大，引起围岩表面位移增大。在及时回填 N7 耳硐后，围岩表面位移恢复正常。

J10 监测断面也于开挖耳硐后开始布置测点监测，共监测 26 d。从图 12 可以看出，此断面顶板累计下沉 9.84 mm，两帮累计收敛 15.45 mm，后期变形停止，保持稳定。

在整个环形巷道开挖、耳洞开挖、冻结管处理、注浆及耳洞和巷道回填过程中，对环形巷道的变形监测显示，其收敛变形最大为 35 mm，在开挖施工完成后，变形不再增加，保持稳定。

### c. 地表竖向位移监测

由地面井筒周围布置各条监测线长期监测发现，在开挖环形巷道和耳硐，以及地层注浆和巷道

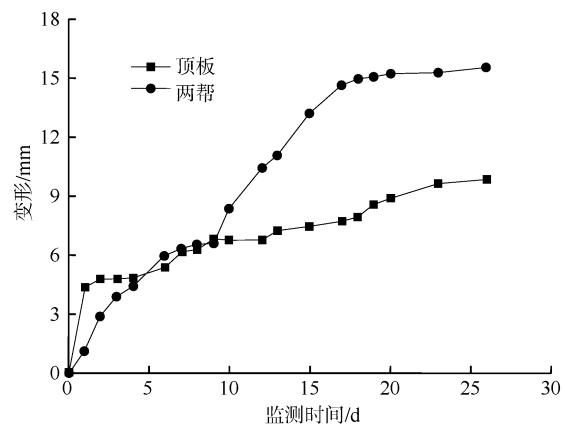


图 12 J10 围岩表面位移变化图

Fig.12 Displacement of rock at J10

回填过程中，地面竖向位移一直保持为零。

综合上述监测结果可得，在环形巷道及耳硐施工过程中，巷道和耳硐变形随工程措施进度而发生变化，但总体稳定可控，井筒及地面无变形。且工程结束后，保留的少量对井筒及地面监测点监测数据显示，井筒及地面长期保持稳定。综上说明该技术方法处理井筒涌水对井筒稳定性影响甚微，能够保证井筒安全。

### 4.2 涌水量变化

通过开挖环形巷道和耳硐对冻结管及周围地层进行处理，且形成人工隔水层后，井筒的总涌水量骤降，最终稳定在 2 m<sup>3</sup>/h(图 13)。根据矿井的排水能力和防水措施，矿井后续施工可正常进行。施工结束后对井筒涌水量进行跟踪监测，截止 2013 年 3 月 10 日，井筒没有发生新的涌水现象，且涌水量没有增加，保证了其他作业的正常进行。

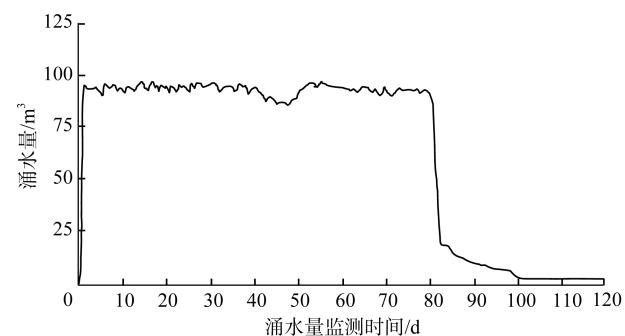


图 13 井筒涌水量变化曲线

Fig.13 Change of water yield of the shaft

## 5 结 论

a. 冻结法成井在冻结和解冻过程中，导致一定范围内地层介质渗透性增大，以及两相介质粘结界面粘结强度降低而逐渐产生缝隙，贯通了冻结孔全深范围内所有的含水层和隔水层，形成以冻结孔为

中心的环形导水通道，使冻结过程中的阻水构造转变成解冻后的良好通道，孔内高压水头将井筒较薄弱部位压裂而发生涌水灾害。

b. 处理冻结法成井后解冻造成的涌水，通过在含水层下主要工程结构上特定地层开挖环形巷道，揭露并切断冻结管，向环形导水通道内注浆，混凝土回填环形巷道形成人工隔水层的措施，控制与预防井筒涌水灾害。

c. 本文所述在建煤矿主井，通过注浆和形成人工隔水层后，井筒的涌水量由  $90 \text{ m}^3/\text{h}$  降低至  $2 \text{ m}^3/\text{h}$ ，且施工对其他作业干扰小，方法简单高效且防治效果好，有效解决了深井冻结法施工解冻后水害治理问题。

d. 环形巷道结合耳碉措施，揭露并截断冻结管，利用注浆改善地层条件并形成局部人工隔水层的方法治理矿井水害，在国内尚属首例，对于深井冻结法施工的完善和深化研究具有重要的意义。

## 参考文献

- [1] BOWMAN I. Well-drilling methods[M]. Washington : United States Government Printing Office , 1911.
- [2] YANG Chunlai , WANG Zongmin. Surface pre-grouting and freezing for shaft sinking in aquifer formations[J]. Mine Water and the Environment , 2005 , 24 (4) : 209–212.
- [3] 余力 , 马英明. 特殊凿井法在矿井建设中的应用和发展[J]. 岩土工程学报 , 1984 , 6(3) : 1–10.
- [4] 周志利. 大断面立井井筒综合治水技术研究[J]. 中国煤炭 , 2011 , 37(2) : 56–58.
- [5] HUANG Shuxun , WANG Ling , CHEN Qinshu. Application of grouting technique to restore submerged shafts in China[J]. Mine Water and the Environment , 1984 , 3(3) : 19–34.
- [6] 王树常 , 葛洪章. 兖州矿区立井井壁破裂的原因分析及防治[J]. 中国矿业大学学报 , 1999 , 28(5) : 494–498.
- [7] 袁海峰 , 陈惠苏. 冻融破坏下水泥基材料中裂缝连通行为的模拟[J]. 东南大学学报 :自然科学版 ,2010 ,40(增刊 2) :126–132.
- [8] PIGEON M , PLEAU R. Durability of concrete in cold climates[M]. London : E&FN Spon , 1995.
- [9] 叶建雄 , 陈越 , 张靖 , 等. 水泥基材料超低温冻融循环试验研究[J]. 土木建筑与环境工程 , 2010 , 32(5) : 125–129.
- [10] BASHEER L , CLELAND D J. Freeze-thaw resistance of concretes treated with pore liners[J]. Construction and Building Materials , 2006 , 20(10) : 990–998.
- [11] 赵娟 , 巴恒静 , 邹超英 , 等. 冻融环境下钢筋混凝土间粘结界面的显微结构[J]. 武汉理工大学学报 , 2009 , 31(19) : 78–81.
- [12] SUBRAMANIAM K V , ALI-AHMAD M , GHOSN M. Freeze-thaw degradation of FRP-concrete interface : impact on cohesive fracture response[J]. Engineering Fracture Mechanics , 2008 , 75 (13) : 3924–3940.
- [13] 冀晓东 , 宋玉普. 冻融循环后光圆钢筋与混凝土粘结性能退化机理研究[J]. 建筑结构学报 , 2011 , 32(1) : 70–74.
- [14] BEHFARNIA K. Studying the effect of freeze and thaw cycles on bond strength of concrete repair materials[J]. Asian Journal of Civil Engineering(Building and Housing) 2010 ,11 (2) :165–172.
- [15] 肖长来 , 梁秀娟 , 王彪. 水文地质学[M]. 北京 : 清华大学出版社 , 2010.
- [16] 邵红旗. 综合注浆封堵全深冻结井筒井壁渗漏(涌)水技术[J]. 煤炭工程 , 2011(9) : 40–42.

(责任编辑 张宏)

(上接第 34 页)

- [8] 王兆丰. 空气、水和泥浆介质中煤层气解吸规律与应用研究[D]. 徐州 : 中国矿业大学安全学院 , 2001.
- [9] 张新民 , 韩保山 , 李建武. 褐煤煤层气储集特征及气含量确定方法[J]. 煤田地质与勘探 , 2006 , 34(3) : 28–30.
- [10] 张国华. 外液侵入对含瓦斯煤体瓦斯解吸影响实验研究[D]. 阜新 : 辽宁工程技术大学 , 2011.
- [11] 孙锐. 泥浆介质非等压条件下煤心瓦斯解吸规律研究[D]. 焦作 : 河南理工大学 , 2010.
- [12] 张遂安 , 霍永忠 , 叶建平 , 等. 煤层气的置换解吸实验及机理探索[J]. 科学通报 , 2005 , 50(增刊 1) : 143–146.
- [13] 贺承祖 , 华明琪. 水锁效应研究[J]. 钻井液与完井液 , 1996 , 13(6) : 13–15.
- [14] 谢晓永 , 郭新江 , 蒋祖军 , 等. 基于孔隙结构分形特征的水锁损害预测新方法[J]. 天然气工业 , 2012 , 32(11) : 68–71.
- [15] 李云波 , 张玉贵 , 张子敏 , 等. 构造煤瓦斯解吸初期特征实验研究[J]. 煤炭学报 , 2013 , 38(1) : 15–20.
- [16] 李小彦 , 司胜利. 我国煤储层煤层气解吸特征[J]. 煤田地质与勘探 , 2004 , 32(3) : 27–29.
- [17] 汤达祯 , 王维. 煤储层物性控制机理及有利储层预测方法[M]. 北京 : 科学出版社 , 2010.
- [18] BUSTIN R M , CLARKSON C R. Free gas storage in matrixporosity : a potentially significant coal bed resource in low rank coals[C]//Proceedings of the 1999 International Coal bed Methane Symposium. Tuscaloosa :The University of Alabama ,1999 :197–214.
- [19] 聂百胜 , 何雪秋 , 王恩元. 煤的表面自由能及应用探讨[J]. 太原理工大学学报 , 2000 , 31(4) : 346–348.
- [20] 周来 , 冯启言 , 秦勇.  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  在煤基质表面竞争吸附的热力学分析[J]. 煤炭学报 , 2011 , 36(8) : 1307–1311.
- [21] 张时音 , 桑树勋 , 杨志刚. 液态水对煤吸附甲烷影响的机理分析[J]. 中国矿业大学学报 , 2009 , 38(5) : 707–712.
- [22] 杨兆彪 , 秦勇 , 王兆丰 , 等. 钻井液条件下煤心煤层气解吸扩散行为及其影响[J]. 中国矿业大学学报 , 2009 ,38(5) :624–628.
- [23] 王佑安 , 杨思敬. 煤和瓦斯突出危险煤层的某些特征[J]. 煤矿安全 , 1980(1) : 47–53.
- [24] 张玉贵 , 张子敏 , 曹运兴. 构造煤结构与瓦斯突出[J]. 煤炭学报 , 2007 , 32(3) : 281–284.
- [25] 杨起 , 韩德馨. 中国煤田地质学[M]. 北京 : 煤炭工业出版社 ,1979.
- [26] 霍永忠. 煤储层的气体解吸特性研究[J]. 天然气工业 , 2004 , 24(5) : 24–26.

(责任编辑 张爱香)