

# 深部矿井回风井冻结施工过程中管涌事故分析

杨健辉<sup>1,2</sup> 汤秀锋<sup>2</sup> 张劲松<sup>3</sup> 芮大虎<sup>2</sup> 王 利<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学 深部矿井建设重点学科开放实验室 河南 焦作 454000; 2. 河南理工大学 土木工程学院 河南 焦作 454000;  
3. 中平能化建工集团有限公司 建井一处 河南 平顶山 467021)

**摘要:** 为了探讨冻结法井筒施工发生管涌事故的原因,以平煤一矿北三回风井为例,在混凝土井壁出现大量不规则而且宽度和深度较大的裂缝后,结合现场测试数据、地质条件和施工工艺对管涌事故进行了综合分析。由分析结果可知,管涌事故的主要原因为:①施工工艺不合理,如冻结管孔偏斜较大,注浆压力过大,混凝土浇筑不连续而出现施工冷缝,爆破装药量过大而引起的震动,致使混凝土在终凝前后就已产生荷载型裂缝;②混凝土配比、生产与养护不合理,如混凝土没有达到实际设计强度等级,无生产、浇筑养护措施,从而无法避免大体积混凝土的质量通病,即收缩裂缝;③地质条件的限制,如事故段岩石破碎,高角度裂隙发育,裂隙承压水压力大,构造应力大;同时,裂隙承压水与井壁外侧呈点接触或线接触,从而造成应力集中,发生横截面失稳现象。

**关键词:** 井筒; 冻结法施工; 大体积混凝土; 裂缝; 管涌

中图分类号: TU262.5 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)03-0026-07

## Analysis on water and soil gushing accident occurred in deep mine air returning shaft during freezing construction

Yang Jianhui<sup>1,2</sup>, Tang Xiufeng<sup>2</sup>, Zhang Jinsong<sup>3</sup>, Rui Dahu<sup>2</sup>, Wang Li<sup>2</sup>

(1. Key Subject Open Lab of Deep Mine Construction, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

3. First Mine Construction Division, Zhongping Energy and Chemical Construction Engineering Group Corporation Limited, Pingdingshan 467021, China)

**Abstract:** In order to discuss the causes of water and soil gushing accident occurred in a ground freezing construction of a mine shaft, based on the North No. 3 Air Returning Shaft of Pingmei No. 1 Mine, after large abnormal and large width and depth cracks were appeared on the mine concrete liner, in combination with the site measured data, geological conditions and construction technology, a comprehensive analysis was conducted on the water and soil gushing accident. The analysis results showed that the major causes of the water and soil gushing accident were ① the construction technology was irrational, such as the freezing pipe borehole was too deflection, the grouting pressure was too high, the concrete pouring was not continuous and the construction cold joints occurred, overcharging of the explosive loaded caused vibration and the concrete before and after the final setting would cause the loading cracks, ② the concrete mixing ratio, production and curing were irrational, such as the concrete could not reach the actual designed strength grade and no production and curing measures conducted, therefore large area concrete quality could not reach the designed requirements, such the shrinkage crack, ③ the limitation of the geological condition, the rock at the accident section was broken, the high angle cracks were developed, the crack pressurized water pressure was too high and the structural stress was too high. Meanwhile the crack pressurized water were in a point connection or in a linear connection with the outside of the mine shaft and thus stress concentration occurred and the stability lost of the cross-section was occurred.

**Key words:** mine shaft; ground freezing construction; large volume concrete; cracks; water and soil gushing

收稿日期: 2015-09-27; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.03.006

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172317); 深部矿井建设省重点学科开放实验室开放基金资助项目(2011KF-01); 河南省教育厅科技攻关资助项目(2010A560010)

作者简介: 杨健辉(1969—)男,河南南阳人,教授,博士后。E-mail: yangjianhui@hpu.edu.cn

引用格式: 杨健辉, 汤秀锋, 张劲松, 等. 深部矿井回风井冻结施工过程中管涌事故分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 26-32.

Yang Jianhui, Tang Xiufeng, Zhang Jinsong, et al. Analysis on water and soil gushing accident occurred in deep mine air returning shaft during freezing construction[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 26-32.

## 0 引言

目前,我国的能源结构仍然以煤炭为主,而且随着国民经济的良性发展,对煤炭的需求量仍将日益增加,而与其相伴的则是矿难事故频繁发生。其中,井筒事故是煤矿各类重大事故中最为典型的一种,轻者将影响正常生产并因此导致生产成本大幅度增加,重者将造成人员伤亡,或者淹井甚至报废<sup>[1]</sup>。这不仅给施工企业造成了直接的重大经济损失,而且还可能给附近的重大基础设施或企业带来间接的重大经济损失。如2013年郑煤集团某矿井施工过程中,因井壁破裂而快速涌水,导致井筒周围建筑物很快发生沉降、开裂、倾斜,以及附近地面断裂、沉降,并对邻近的高速铁路路基的稳定性带来重大安全隐患,最终导致该井筒马上填埋而报废。

其次,由于我国目前煤矿开采深度越来越深,对穿越巨厚冲积层采用冻结法施工越来越普遍,而这一地层所蕴含的丰富且承压的地下水,是造成井壁破裂、管涌、淹井事故的潜在因素。而工程因素则包括诸如冻结管因偏斜过大而造成井壁应力分布不均匀;先天性地质条件差而导致冻结壁强度降低;井筒周边地下水流量猛增和井筒周边生活取水致使地下水循环过快而造成的冻结壁融化等<sup>[2-3]</sup>。对此,文献[4]开发了冻结孔定向钻进关键装备,以防止冻结管偏斜过大;文献[5]开发了JS-1型高效复合缓凝剂,以有效实施壁后注浆防水等专门技术。但由于井筒所处的位置是一个复杂的多场相互作用场所,如温度场、应力场和渗流场的多场耦合,以及井筒所处的复杂应力状态,导致该问题研究的极端复杂化。而目前关于井筒的安全施工研究,主要限于温度场和应力场,如文献[6-7]研究发现,冻结壁温度场具有一定的先后性,而冻结压力的变化趋势则在一定范围内受冻结壁温度影响;不同深度处的冻结压力在井壁混凝土浇筑后的最初15 d内增长速度较快,且具有明显的方向性;而且黏土层的埋藏深度是冻结压力大小的主要决定因素,其埋藏越深,冻结压力则越大。但目前的研究也多限于对其变化规律的研究,很少结合现场温度与应力测试、具体施工工艺、地质条件等与井筒可能发生事故的综因素进行预测与反馈。

因此,笔者以平煤一矿北三回风井所发生的典型管涌事故为例,结合现场测试数据、混凝土与壁后注浆施工工艺,以及地质条件等,对该事故的发生征

兆及发生原因进行综合分析,以期对相关工程施工并避免再次发生类似事故提供借鉴依据。

## 1 工程概况

平煤一矿北三回风井位于平顶山市李口镇境内,与平郑东路相接,进、回风立井布置在同一工业广场内。其中,回风井筒净直径为6 500 mm;井口中心坐标 $(X, Y) = (3\ 744\ 335, 38\ 437\ 412)$ ,永久锁口标高为+125 m,落底水平标高根据初步设计暂定为-950 m(设计深度1 075 m)。采用冻结法施工的设计冻结深度为667 m,其中,383.6 m以上区段为双层冻结井壁,双层钢筋混凝土(外壁厚450 mm、内壁厚600 mm);383.6—393.6 m区段为整体井壁(壁厚1 050 mm,双层钢筋混凝土);393.6—676.0 m区段为双层冻结井壁(外壁厚450 mm、内壁厚850—1 150 mm);676—1 075 m区段为正常基岩段(壁厚500 mm);420 m以上区段混凝土强度等级为C50,其他区段为C70,目前井筒已施工至726.5 m处。

该回风井筒所处位置地层正常稳定,没有大的构造存在。根据井检孔揭露情况,井筒地层自上而下有:褐黄色黄土层,乱石层,泥岩层,砂质泥岩层,长石石英砂岩层,砂质泥岩层等。本井田正好位于平顶山矿区的地表分水岭附近,分水岭主要出露地层为二叠系的石千峰组砂岩和三叠系的刘家沟组砂岩。这2段地层出露面积较大,且主要受大气降水补给,从而导致这2段含水层富水性较强。

冻结法施工方案设计采用三圈管冻结方案,即外圈辅助冻结孔+中圈主冻结孔+内圈防片帮冻结孔。为了及时掌握施工过程中井壁所受的冻结压力和冻结壁冻结温度,对井壁安全性及时进行评估,采取了对冻结壁温度以及井筒冻结压力进行现场监测的措施,以确保井筒掘砌安全和快速施工;同时,也为后续二次护壁、壁间和壁后注浆、井筒评测等工作提供分析依据。

由于该回风井在施工过程中采用了新的施工工艺,即在二次护壁前,逐步提高井帮温度至0℃,这样既有利于混凝土养护,又有利于二次护壁混凝土的浇筑,以及壁间注浆的施工。在施工至726.5 m位置时,在570—600 m段双层井壁西北方向出现大量不规则的裂缝并伴有渗水现象,随后在局部出现管涌,最终导致井筒被淹。该工程于2012年9月4日被迫停工至今仍未恢复生产,给企业造成了巨大

的经济损失。

## 2 井筒温度及冻结压力监测方案

本项目监测重点是冻结壁、井筒外壁的温度以及井筒外壁的冻结压力,传感器布设如图1所示。所用监测仪器设备均为长沙亿拓土木工程监测仪器有限公司生产的温度传感器(YT-BD-0102A 自动化温度计)和土压力盒(YT-ZX-0340A 双膜土压力盒),以及配套使用的YT-ZD-0301A型数据处理器、YT-ZD-01型自动采集箱、YT-ZD-02型无线传输模块和YT-ZD-04220V型电源适配器等器材。

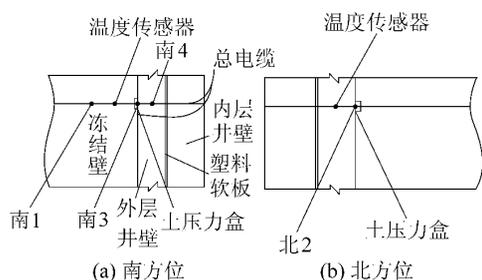


图1 井筒传感器布设示意

Fig. 1 Sensors layout in shaft

本项目共设置5个监测水平面,而每个测平面又分别布设了6个温度传感器和2个土压力盒,且温度传感器和土压力盒分别设置于南方向和北方向。其中,在南方向所示布设4个温度传感器和1个土压力盒(图1a),间距依次为30、30、20 cm;在北方向布设2个温度传感器和1个土压力盒(图1b),间距为20 cm。为了尽可能准确地反映传感器所在测点的温度,传感器之间用混凝土浇筑固定。笔者选取了-250 m监测水平面作为研究分析对象。

## 3 井筒冻结温度及压力监测结果及分析

为了掌握井筒外壁温度场的特征及井筒外壁所受冻结压力的变化动态,自2011年11月24日起,通过采集器每间隔2 h对-250 m监测水平面采集一次数据,并据此对井筒外壁冻结压力变化及温度场变化进行分析。

### 3.1 温度监测分析

在-250 m监测水平面上6个温度传感器在不同时间内的变化曲线如图2所示。由于在二次护壁施工过程中信号电缆被破坏,又限于施工的紧迫性未能及时修复,导致数据采集在2月12日被迫中断,并一直持续到3月14日。在信号中断的31 d内,井壁进行了二次护壁。

28

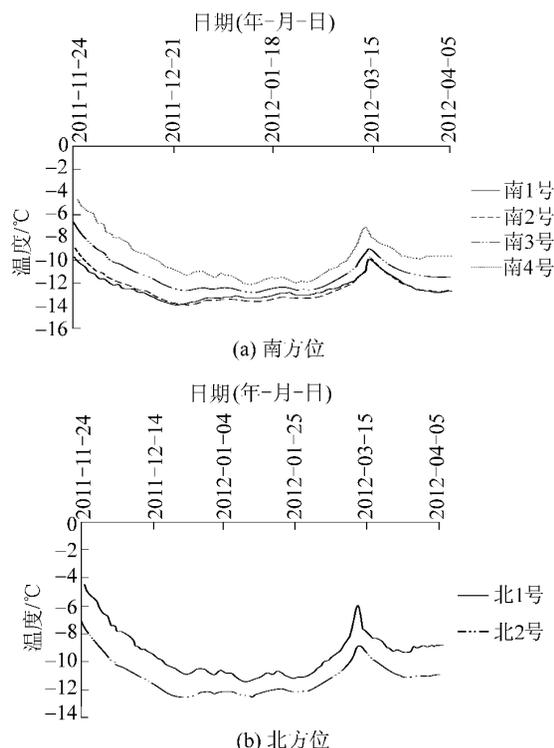


图2 -250 m处南、北方位温度监测曲线

Fig. 2 Temperature monitoring curves in shaft at -250 m for the south and the north

南1号、南2号温度传感器布置在冻结壁内部,南3号在冻结壁与井筒外壁交界处,南4号在井筒外壁内部(图1)。结合图2a可知,南1—南4号传感器所处位置的温度逐渐降低,且离冻结管距离越远,温度越高,温度变化近似线性分布。图2b与图2a也有相同的变化特征。当井筒外壁混凝土浇筑完成后,通过工程间歇才将损坏的电缆接通。自2011年11月24日到2011年12月22日各个测点温度持续降低,其原因是井筒外壁浇筑混凝土的水化热反应逐渐结束和冻结管盐水持续保持低温状态。当混凝土水化热反应完全结束后,冻结壁、井筒温度达到相对稳定状态。

根据同类相关测试结论,在井筒外壁混凝土浇筑完成40 d后,冻结壁内部温度场才能基本恢复到浇筑前的状态。由于二次护壁的需要,从2012年2月6日开始,又逐渐提高冻结管道盐水的温度,直至外井壁达到0℃附近时进行二次护壁。当二次护壁结束后,虽然冻结管已重新进入原工作状态,但由于二次护壁混凝土水化热反应所释放的大量热量,影响了冻结壁的温度,且其影响程度远大于外壁浇筑混凝土时的影响。数据采集自3月14日又重新恢复,在接下来的15 d内由于冻结管盐水温度降低、水化

热反应接近尾声,井帮以及外壁温度逐步下降,而后趋于相对稳定状态。

由图1可知,南3号温度传感器与北2号温度传感器为对称布设、南4号温度传感器与北1号温度传感器为对称布设,将对称布设的温度传感器在相同时刻所采集到的温度进行对比,发现相同时刻不同点采集到的温度不尽相同(表1),其原因可能是冻结孔偏斜(这与下文事故综合分析结论相吻合)、盐水流量分配不均匀<sup>[8]</sup>、传感器所处岩土性质的差异<sup>[9]</sup>等。虽然表1反映了对称布设情况下相同时刻温度的差异,结合图2中各测点温度随时间变化情况,总体来说,各个测点温度变化趋势是一致的,且变化趋势具有时间同步性,这说明监测结果是准确、可靠的。

表1 传感器在同测面对称布设条件下的不同日期温度比较

Table 1 Temperature contrasts at different dates under same test plane and symmetrical layout for sensors

传感器	不同日期的温度/°C					
	2011-11-24	2011-12-23	2012-01-19	2012-02-12	2012-03-14	2012-04-04
南3号	-6.8	-12.5	-12.5	-9.5	-9.1	-11.3
北2号	-6.9	-12.5	-12.0	-8.8	-9.2	-11.0
南4号	-4.3	-11.1	-11.5	-7.1	-7.9	-9.6
北1号	-3.9	-10.8	-10.8	-6.0	-7.8	-8.9

### 3.2 冻结压力监测

根据两淮矿区和永夏矿区的冻结压力实测数据(深度<330 m)和近几年在400~500 m冲积层中的冻结压力实测数据分析,可以得出冲积层的冻结压力与埋藏深度成正比,但黏性土层比砂性土层的冻结压力大,且冻结压力随深度变化的比例系数呈下降趋势,其变化规律如式(1)所示<sup>[10]</sup>。

$$P_d = 0.01\varphi_d H \quad (1)$$

式中:  $P_d$ 为不同深度的冻结压力,MPa;  $H$ 为计算深度,m;  $\varphi_d$ 为随深度变化的比例系数( $H$ 为100、150、200、250、300、400 m时, $\varphi_d$ 分别为1.200、1.100、1.000、0.960、0.900、0.885)。

由式(1)可知,在250 m深度处,冻结土压力  $P_d = 2.40$  MPa。由于条件限制,在仪器安装过程中,是先掘进到相应深度后再安装温度传感器和土压力盒。正是由于掘进过程就等同于一个冻结压力释放的过程<sup>[11]</sup>,因此在冻结壁外侧冻胀应力释放后,残余冻胀应力仍然约为最大冻胀应力的0.5倍<sup>[12]</sup>,即

在250 m深度处冻结土压力为1.2 MPa。井筒土压力盒现场实测曲线如图3所示,南方位土压力盒所采集到的数据在经验数据变化范围内,而北方位土压力盒采集到的数据与经验数据有很大差异。但从图中数据的变化来推测,北方位土压力盒在安放结束后的施工过程中发生了位置变化,从而导致采集到的压力数据与实际不符。但南方位土压力盒所采集到的数据,通过公式验证可判断为准确可靠的。

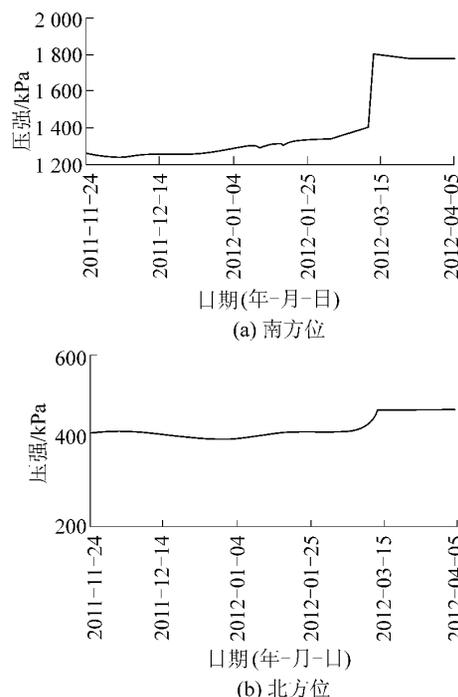


图3 井筒土压力盒现场实测曲线  
Fig. 3 Field test curves by earth pressure cells in shaft

当井筒掘砌工作面超过测试深度后,外壁逐渐发挥支护作用,冻结壁变形因此受到抑制,从而导致冻结壁内部径向水平应力小幅度上升<sup>[13]</sup>,这就是图3中土压力随时间缓慢增加的原因。另外,考虑土性及冻土壁温度的影响,煤炭科学研究总院给出了经验公式(2)<sup>[12]</sup>。

$$P_d = K_t K_D (1.38 \lg H - 1.26) \quad (2)$$

式中:  $K_t$ 为温度影响系数(井帮温度  $t > -5$  °C时,  $K_t = 0.9 \sim 1.0$ ; 井帮温度  $-8$  °C  $< t < 7$  °C时,  $K_t = 1.00 \sim 1.15$ );  $K_D$ 为土性影响系数(普通黏土  $K_D = 1.0$ ; 砂质黏土  $K_D = 0.9 \sim 1.1$ ; 钙质黏土  $K_D = 1.05 \sim 1.15$ )。

由式(2)可知,当井帮温度达到一个相对平稳状态后,井帮温度在一定范围内变化对冻胀力变化影响很小。这就是2月6日开始逐渐提高盐水温度后,井帮对外壁的冻胀力并没有显著增加,只是随着

温度的升高略有增加的原因,这也再次验证了南方位土压力盒所采集到的数据为准确可靠的。

在正常监测中断前,冻结压力变化稳定。但由于在中断期间进行了二次护壁,因此在恢复监测后,冻结压力一直处于一个基本稳定的平直线状态。这是由于外层井壁水平侧压力中有很大大一部分是冻土壁冻融过程所引起的冻胀应力,但却在实际监测中并不能分离出来<sup>[14]</sup>。在二次护壁中,混凝土在浇筑后短时间内所散发的水化热,导致冻土壁的解冻期温度变化梯度较大,而回冻期的混凝土温度变化相对较小,亦即回冻至0℃所需时间比解冻时间长<sup>[15-16]</sup>。2012年2月21日后的相对稳定状态,明显与正常状态下的情况不符合。造成这种现象的原因,综合现场施工情况进行分析,发现冻结管断裂和井壁产生裂缝是其主要诱因。这是因为井壁裂缝一旦出现,在一定程度上会释放井帮的冻结压力,再经应力重新分布后形又成了一个新的相对稳定状态。

## 4 井壁破裂分析

### 4.1 事故发生过程描述

本工程于2012年8月15日冻结段施工结束后,冷冻机组停止运转。但在9月24日16:00班施工至726.5 m位置时,在570~600 m单层井壁段西北方向出现渗水现象。因当时无排水系统,为了确保下一步施工安全,按照施工组织设计,开始进行壁后注浆堵水,并于10月13日0:00班注浆结束。

10月13日6:30,发现596.0—600.5 m区段井壁西北向被压裂、外鼓200 mm(上宽5 m、下宽4 m,高度4.5 m);同时,其上下相邻两段西北侧接茬部位局部有裂纹,并测定出水量为20 m<sup>3</sup>/h。在进行壁后注浆封堵涌水的同时,安装潜水泵作为临时排水系统(排量50 m<sup>3</sup>/h),随后将596.0—600.5 m区段压裂井壁全部破除,重新绑扎钢筋并浇筑C70混凝土,于10月31日0:00班处理完毕等待凝固。

11月1日,开始起盘改装排水管路。11月12日0:00班管路安装到600 m位置,随后将591.5—596.0 m区段有裂纹井壁厚度为500 mm凿掉。11月14日16:00班18:30发现上段井壁有掉皮现象,11月15日0:00班开始绑扎钢筋,7:10发现上段井壁(587.0—591.5 m)裂纹增加,随即在井筒589 m处北偏西23°方位压出直径0.6 m的孔洞,测定出水量为200 m<sup>3</sup>/h。起初水中伴有少量碎石及黄泥浆。但于16日14:40,出水量逐渐增大至304 m<sup>3</sup>/h,

水面上升至360 m位置处。17日6:40,水面上涨至225 m位置处,出水量衰减到180 m<sup>3</sup>/h。截至12月21日,水面上涨至15.8 m位置处,水量衰减到0.18 m<sup>3</sup>/h。经水下摄像资料显示,591.4 m位置井筒钢筋被冲出,偏入井筒1.5~2.0 m,充填碎石及黄泥约27 m厚(700.7~727.5 m,1 000 m<sup>3</sup>)。

### 4.2 事故分析

二次护壁结束后,井筒内壁出现不规则裂缝,缝隙宽度和深度较大、数量较多,最终导致井壁多处出现涌水现象。管涌口直径0.6 m左右,左侧为一直径为22 mm的螺纹钢筋被冲断,且被销成钉状,由此可见涌水量和压力之大。因为这次事故,到目前为止,向下掘进工作仍处于停顿状态。

根据测温孔温度曲线显示,各冻结孔在580~600 m处均出现高温异常区,孔内最高温度为24.4℃,出水附近水温明显偏高,而-360 m以上孔内温度也上升到-2~0℃。由此可以判定,冻结壁局部解冻后,涌水突破冻结壁涌入井筒。这也从另一个侧面说明,优化排列冻结管的布置,尽可能降低冻结管的偏斜度,以及根据不同施工阶段的工艺要求,合理调整盐溶液的浓度与温度,是降低类似工程事故的人为控制因素。

经过监测结果和现场实地勘察综合分析,造成井壁裂缝的直接原因是混凝土配合比和施工工艺不合理。譬如,关于冻结方面,根据冻结单位提供的钻孔偏斜资料,出水点附近600 m处1号冻结孔向井筒内偏斜过大(设计距井壁2.7 m,实际仅有1.5 m),致使该段冻结壁交圈薄弱,冻结壁提前局部解冻开“天窗”,造成高压水流直接作用于井壁,致使井壁受压不均匀,局部受压过大,并超过井壁极限承载能力。混凝土方面,由于井壁浇筑属于大体积混凝土施工,而施工环境又为低温环境(井壁温度-17℃),因此,低温冻胀是主要影响因素;其次是由于首次壁后注浆压力影响,即注浆压力过大(11.0 MPa)是造成裂缝进一步开展的主要原因;再次是由于混凝土配合比的影响,即原配合比不仅未达到设计标号,而且更不能体现高性能混凝土的性能;而且还由于施工工艺的影响,即没有采取相应的措施避免混凝土早期受冻,且混凝土浇筑不连续,出现施工冷缝,从而影响混凝土的早期质量,最终为后期的安全事故埋下隐患<sup>[17]</sup>。

其次,在井壁混凝土浇筑后的养护初期,围岩对井壁的压力及新鲜混凝土的自身承载能力不足,是

造成事故的外在原因。根据弹塑性力学理论,当考虑冻土壁与井筒联合作用时,井壁混凝土一般处于三向受力状态,其上、下方向受井壁、岩层以及冻结壁约束,环向受围岩约束,内壁不受约束。当进行二次护壁后,由于冻结管断裂导致冻结壁温度上升,致使部分冻结壁强度降低,井壁发生变形,逐渐释放能量并向井筒中心位移,使地层原始应力和冻胀应力重新分布,但变形却受阻于井壁而产生附加的“形变力”。当圆环或圆筒受均布压力,亦即浇筑初期的井壁受均布压力时,由于随后温度变化不均匀,造成变形不均匀,进而形成应力集中导致裂缝产生。特别是在三面约束作用和冻胀条件下,易在中间部位形成环向裂缝。

地质条件方面,由于井筒处于李口向斜轴附近,岩石破碎,高角度裂隙极发育,构造应力大。其次,平顶山砂岩段含水层主要为裂隙承压水,而且裂隙承压水与单层井壁外侧呈点接触或线接触,从而使井壁受力不均,集中受力现象明显,发生横截面失稳现象。而双层井壁水压经外壁缓冲后压力降低,作用到内壁后水压趋于均匀,集中受力现象相对减弱,能够充分发挥筒状井壁的整体抗压优势。

掘进施工方面,由于在单层井壁短段掘砌下行施工过程,所遇砂岩坚硬,因而装药量大,致使工作面受爆破震动影响,诱使混凝土在终凝前后就产生震动裂缝,而裂缝则是造成管涌的直接原因。其中,管涌原本是土体结构或地基内部的不连续性而导致土颗粒在渗流作用下迁移流失的一种现象,颗粒的流失先出现于土体表面,接着向上游逐渐扩展而形成不规则的“管道”<sup>[18]</sup>。而管涌破坏被认为是地下腐蚀所引起的一种破坏<sup>[19]</sup>,这里则是由于冻结壁强度降低和井壁裂缝的产生,其联合抗力不足以抵抗高压地下水的冲击,最终造成管涌发生。由式(3)<sup>[20]</sup>可知,冻结壁的破坏和井壁的裂缝就等同于 $r_s$ 减小和 $k$ 增大,因而降低了冻结壁和井壁所形成的整体临界水力梯度。

$$i_n = (r_s - r_w) (1 - k) / r_w \quad (3)$$

式中: $i_n$ 为临界水力梯度; $r_s$ 为土的容重,即为冻结壁和井壁组成的整体容重; $r_w$ 为水的容重; $k$ 为土的孔隙率,即为冻结壁和井壁组成的整体孔隙率。

结合现场施工情况和事故原因分析,对造成井壁破裂和管涌的主要原因如下:

1) 井筒所处的复杂环境因素。二次护壁前井帮温度的快速升高,致使井壁受力缓慢增加;而凝

土养护过程中水化热的释放,又提高了环境温度,且其对井帮的影响远远大于外壁的影响,而其具体表现则是前者的冻结压力变化幅度更大;并且在同一水平面不同方向上存在较大差异,从而造成井壁产生应力集中现象。

2) 井壁混凝土的强度不仅没有达到设计要求,而且施工工艺不合理。如井壁混凝土设计强度为C70,在实际环境中测试时只达到了C40级;混凝土浇筑后没有采取相应的养护措施;而且在生产中也并没有采取措施以保证出机温度和浇筑温度,以及浇筑的连续性。

3) 冻结管在冻结后期由于剪切力增加,导致冻结管破损或断裂。正是由于冻结管的破裂,导致盐水外泄,致使原本呈冻结状态的井帮开始逐渐融化,造成井帮强度降低,并相应地加大了井壁压力。

4) 井壁裂缝出现后没有及时采取有效补救措施,最终导致冻结壁和井壁所形成的局部抗力低于高压地下水压力,因而形成管涌。

## 5 结 论

1) 冻结站提前关闭,造成冻结壁提前解冻,致使井筒与冻结壁的联合抗力降低,是导致事故发生的直接原因。但冻结管偏斜、破裂以及盐水浓度和温度不合理,则是事故发生的间接原因。

2) 混凝土配合比设计和施工工艺不合理,造成井壁早期即产生裂缝;而爆破时过大的装药量,又引起的震动裂缝;以及壁后注浆压力过大所引起的附加裂缝,这些裂缝又进一步降低了井壁和冻结壁的联合抗力,是事故发生的诱因。

3) 在冻结岩层解冻后,在丰富且承压的地下水作用下,又恰逢地质条件的特殊性,即裂隙承压水与单层井壁外侧呈点接触或线接触,造成井筒发生横截面失稳现象,是事故发生的内在因素。

4) 由于为了赶工期,各工序衔接不太合理,而且对现场监测没有引起足够的重视,如线缆中断不能及时修复等;以及对反常数据不能做出正确判断,并采取合理的及时补救措施,是事故发生的人为因素。

### 参考文献(References):

[1] 张向东,张俊俊.深立井突水淹井治理及恢复技术研究[J].煤炭学报,2013,38(12):2189-2195.

Zhang Xiangdong, Zhang Jianjun. Techniques applied to water-in-

- rush control and side-wall restoration in deep vertical shaft [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(12): 2189-2195.
- [2] 经来旺,王皓.冻结壁融化阶段井壁破裂因素分析及防破裂措施研究[J].*工程力学*, 2003, 20(1): 121-126.  
Jing Laiwang, Wang Hao. Fracture analysis and prevention measures of fraction initiation in the melting stage of frozen shaft wall [J]. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(1): 121-126.
- [3] 王爱.矿井防治水工作中的基础与重点[J].*内蒙古煤炭经济*, 2013(5): 164-165.  
Wang Ai. Foundation and key works in mine water prevention and control [J]. *Inner Mongolia Coal Economy*, 2013(5): 164-165.
- [4] 袁辉,邓昀,蒲朝阳等.煤矿斜井冻结孔定向钻进关键装备研发[J].*煤炭科学技术*, 2015, 43(10): 98-102.  
Yuan Hui, Deng Yun, Pu Chaoyang, et al. Research and development on directional drilling key equipment applied to in freezing holes of coal mine inclined shaft [J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(10): 98-102.
- [5] 陈新年,奚家米,张琨.井筒超深冻结孔封孔缓凝水泥浆性能研究[J].*煤炭科学技术*, 2015, 43(3): 6-9.  
Chen Xinnian, Xi Jiami, Zhang Kun. Study on performance of hole sealing retarded cement slurry in ultra-deep freezing holes [J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(3): 6-9.
- [6] 李运来,汪仁和,姚兆明.深厚表土层冻结法凿井井壁冻结压力特征分析[J].*煤炭工程*, 2006(10): 35-37.  
Li Yunlai, Wang Renhe, Yao Zhaoming. Analysis on freezing pressure characteristic of shaft lining used freezing shaft-sinking method in deep and thick alluvium [J]. *Coal Engineering*, 2006(10): 35-37.
- [7] 闫超,马乾坤.深厚表土层冻结壁温度实测分析[J].*山东煤炭科技*, 2010(6): 107-108.  
Yan Chao, Ma Qiankun. Analysis on temperature measurement of freezing wall in deep alluvium [J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2010(6): 107-108.
- [8] 姚直书,程焯,张国勇等.特厚冲积层冻结法凿井外层井壁受力实测研究[J].*煤炭科技*, 2004, 32(6): 49-52.  
Yao Zhishu, Cheng Hua, Zhang Guoyong, et al. Study on force measurement for outer layer of shaft used freezing shaft-sinking method in deep and thick alluvium [J]. *Coal Science and Technology*, 2004, 32(6): 49-52.
- [9] 朱月琴,张召千.厚黄土冲积层冻结壁温度场变化规律分析[J].*山西煤炭*, 2010, 32(6): 49-52.  
Zhu Yueqin, Zhang Zhaoqian. Analysis on temperature field variation of freezing shaft lining in thick loess alluvium [J]. *Shanxi Coal*, 2010, 32(6): 49-52.
- [10] 盛天宝,陈文豹,贾明魁等.赵固矿区500米以上冲击层冻结法凿井技术[M].北京:煤炭工业出版社, 2011: 90-91.
- [11] 汪仁和,张瑞,李东伟.多圈管冻结壁形成和融化过程冻胀力实测研究[J].*冰川冻土*, 2010, 32(3): 538-542.  
Wang Renhe, Zhang Rui, Li Dongwei. Formation and thawing processes of a multicoil pipe frozen wall [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(3): 538-542.
- [12] 汪衍深,薛利兵,程建平等.特厚冲积层竖井井壁冻结压力的实测与分析[J].*岩土工程学报*, 2009, 31(2): 207-212.  
Wang Yanshen, Xue Libing, Cheng Jianping, et al. In-situ measurement and analysis of freezing pressure of vertical shaft lining in deep alluvium [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(2): 207-212.
- [13] 李金华,和锋刚,张弛.郓城矿副井井筒外壁冻结压力检测结果分析[J].*山东煤炭科技*, 2008(6): 207-212.  
Li Jinhua, He Fenggang, Zhang Chi. Measured results analysis on freezing pressure on outer shaft wall in Yuncheng mine Auxiliary shaft [J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2008(6): 207-212.
- [14] 杨俊杰.深厚表土层条件下的立井井壁结构[M].北京:科学出版社, 2010: 22-27.
- [15] 刘劲松,唐锦春,杨俊杰.混凝土水化热条件下人工冻土墙与内衬结构共同作用研究[J].*煤炭学报*, 2004, 29(1): 36-40.  
Liu Jinsong, Tang Jinchun, Yang Junjie. Re-distribution of temperature field of artificial ice wall affected by heat of concrete hydration [J]. *Journal of China Coal Society*, 2004, 29(1): 36-40.
- [16] 刘劲松,杨俊杰,唐锦春.混凝土水化热对人工冻土墙温度场分布的影响[J].*煤炭学报*, 2002, 27(5): 517-520.  
Liu Jingsong, Yang Junjie, Tang Jinchun. Re-distribution of temperature field of artificial ice wall affected by heat of concrete hydration [J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(5): 517-520.
- [17] 樊九林,万援朝,王渭明.斜井表土冻结凿井法施工技术[J].*煤炭科学技术*, 2013, 41(9): 143-150.  
Fan Jiulin, Wan Yuanchao, Wang Weiming. Construction Technology of Freeze Sinking Method in Inclined Shaft Soil Layer [J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(9): 143-150.
- [18] Li Xungui, Wei Xia. Soil erosion analysis of human influence on the controlled basin system of check dams in small watersheds of the loess Plateau, China [J]. *Expert Systems With Applications*, 2010, 38(4): 4228-4233.
- [19] Adichai Pornprommin, Norihiro Izumi. Experimental study of channelization by seepage erosion [J]. *Experimental Study of Channelization by Seepage Erosion*, 2008, 11(6): 709-717.
- [20] Jitae Kim, Woncheol Cho, Il-Moon Chung, et al. On the stochastic simulation procedure of estimating critical hydraulic gradient for gas storage in unlined rock caverns [J]. *Geosciences Journal*, 2007, 11(3): 249-258.