

# 兖州矿区立井井筒破坏机制的理论分析

刘环宇<sup>1,2</sup>, 陈卫忠<sup>1</sup>, 王争鸣<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 国投新集能源股份有限公司, 安徽 淮南 232170)

**摘要:** 通过对兖州矿区的工程地质水文地质的分析可知, 立井井筒破坏的主要原因为井筒周围底部含水层的压缩, 且含水层水头的降低与立井井筒的破坏直接存在一定的规律, 底部含水层的压缩在立井井筒内产生附加应力, 此附加应力造成立井井筒的变形破坏, 通过拉格朗日法对立井井筒的破坏过程进行数值模拟, 通过计算得到立井井筒破坏过程中各个影响因素的变化规律, 从而得到立井井筒的破坏规律, 为兖州矿区立井井筒破坏的治理提供理论基础, 而且在立井井筒的破坏机制分析及防治方面发挥重要的作用。

**关键词:** 采矿工程; 失水压缩; 水头降; 数值模拟; 底部含水层

**中图分类号:** TD 32

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 1 - 2620 - 07

## THEORETICAL ANALYSIS OF SHAFT LINING DAMAGE MECHANISM OF YANZHOU MINE

LIU Huanyu<sup>1,2</sup>, CHEN Weizhong<sup>1</sup>, WANG Zhengming<sup>2</sup>

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

2. SDIC Xinji Energy Co., Ltd., Huainan, Anhui 232170, China)

**Abstract:** Through the analysis of engineering geology and hydrological geology in Yanzhou mine, it is found that the main reason for shaft damage is the compression of bottom aquifer and there is a law between head loss of bottom aquifer and shaft lining damage. The additional force in the shaft lining results from the compression of the bottom aquifer and causes deformation and failure of shaft lining. The fracturing process of shaft lining is numerically simulated by the Lagrangian element method. The result reveals the changing laws of different factors in the process of shaft lining fracturing; and the shaft damage theory is obtained. The theory provides a firm basis for harnessing of Yanzhou shaft lining damage; and it will play an important role in the fracturing mechanism analysis and prevention and harness for shaft lining.

**Key words:** mining engineering; compression of water loss; head loss; numerical simulation; bottom aquifer

## 1 引言

在煤矿开采过程中, 立井井筒非采动破坏是一种特殊的矿山工程地质灾害, 其主要表现为煤矿立井井筒在具有足够的保安矿柱的条件下, 立井井筒的部分井壁发生严重变形和破坏, 致使提升运输困

难, 一些立井井筒在破坏的同时还伴有大量的涌水冒砂, 而且立井井筒非采动破坏具有一定的周期性, 即许多治理后的立井井筒在正常使用一段时间后发生重复变形破坏, 因此立井井筒非采动破坏的工程地质灾害严重地影响着矿山的正常运营, 危及生产安全, 迫使部分矿井停产, 造成重大经济损失。

1995 年以来, 在华东地区的兖州矿区发生了立

**收稿日期:** 2006 - 06 - 06; **修回日期:** 2006 - 07 - 19

**基金项目:** 中国科学院王宽诚博士后工作奖励基金资助项目

**作者简介:** 刘环宇(1973 -), 男, 博士, 2000 年于中国矿业大采矿专业获硕士学位, 现为中国科学院武汉岩土力学研究所在职博士后, 主要从事工程地质灾害治理方面的研究工作。E-mail: liu\_huanyu@126.com

井壁破坏灾害, 破坏情况如图 1 所示。通过大量现场观测和室内试验, 广大学者提出了立井井筒变形破坏机制的多种理论, 以及相应的防治对策。已有的研究表明这类立井的变形破坏在机制上与一般岩土体失稳而触发的岩土压力问题有本质的区别, 原则上这是人类采矿活动和地质环境相互作用的结果<sup>[1, 2]</sup>。



图 1 立井井筒破坏状态

Fig.1 Damage condition of shaft lining

本文通过兖州矿区发生立井井筒非采动破裂煤矿的工程地质与水文地质现场调查, 对比立井井筒破坏的相关理论, 对兖州矿区立井井筒非采动破裂的发生机制进行分析, 且通过数值模拟计算得到立井井筒破坏机制以及破坏规律, 从而为立井井筒破裂的支护提供理论基础。

## 2 兖州矿区工程地质与水文地质分析

兖州矿区第四系土层分为上、中、下 3 组, 其中组透水性弱, 为相对隔水层组, 下组可分为上、下两个含水段, 下段含水层即为三含(底部含水层), 底部含水层总体组成结构复杂, 且厚度变化较大, 为承压含水层。

在煤矿生产过程中, 鲍店井田开采 3 层煤直接充水含水层为侏罗系砂岩、山西组砂岩和三层灰岩, 富水性较强。间接充水含水层为第四系下组砂及砂砾层, 厚度大, 含水较丰富, 水位下降缓慢, 为矿井涌水重要的长期补给源。矿井涌水量大, 水文地质条件属中等型, 充水条件复杂。杨村井田为第四系覆盖下的隐蔽式井田。开采下组煤时的直接充水含水层为十下层石灰岩, 补给源来自奥灰、十四灰和第四系下组含水层水。上组煤的直接充水含水层为第四系下组、3 层煤顶部砂岩和三层灰。表 1 所示为鲍店矿井历年煤炭产量及涌水量。

表 1 鲍店矿井历年煤炭产量及涌水量

Table 1 Output of coal and water in past years of Baodian mine

年度	产量/(10 <sup>4</sup> t)	涌水量/(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )
1991	250.32	515.24
1992	242.97	513.73
1993	273.01	532.84
1994	327.50	575.13
1995	361.09	625.15
1996	408.17	603.08
1997	396.99	595.53
1998	428.89	601.05
1999	466.00	531.19
2000	531.69	540.97

据现场实测资料表明, 鲍店煤矿立井井筒破坏的位置处于第四系表土层中, 下距风化基岩约为 4.69 m, 破坏处对应的岩性主要是中砂、黏土质粗砂等层位, 立井井筒破坏时鲍店矿投产近 10 a, 由于向地面抽水供工业与民用使用, 井下开采范围扩大, 采动疏水加快, 造成第四系水位大幅度下降。据观测, 第四系下组底部含水层水位在勘探时期的水位标高为+40 m 左右, 至 1995 年 6 月 28 日水位标高下降到-43.9 m, 下降约 84 m, 由于水位下降, 第四系松散层因孔隙水压力的降低而密实, 从而引起了立井井筒周围地面沉降。图 2 为立井井筒破裂过程中杨村煤矿立井周围土层水位变化情况, 在立井井筒发生破裂情况下上组含水层历年水位基本变化不大, 下组上段含水层水位有一定的变化, 从 1989~2000 年 11 a 间水头损失接近 10 m, 而下组下段含水层(底部含水层)的水位变化较大, 从 1996~2000 年 4 a 期间内水头的损失量达到 20 m 对比以上立井井筒破裂煤矿水文地质情况调查, 兖州矿区发生非采动破裂的立井井筒第四系土层的水位变化具有一些共同的特征: 在第四系土层中, 中组透水性弱, 为相对隔水层组, 鲍店煤矿底部含水层水头损失在 1986~2001 年 15 a 内达到 40 m 左右, 兴隆庄煤矿在 1996~2000 年 4 a 时间里底部含水层水头降有 15 m, 杨村煤矿底部含水层 1995~2000 年 5 a 时间里水头降也达到了 20 m 左右。从以上分析可以得出结论, 在立井井筒发生非采动破裂期间, 底部含水层水头发生了较大的变化, 因此在立井井筒破裂与底部含水层水头之间可能存在一定的内在规律。

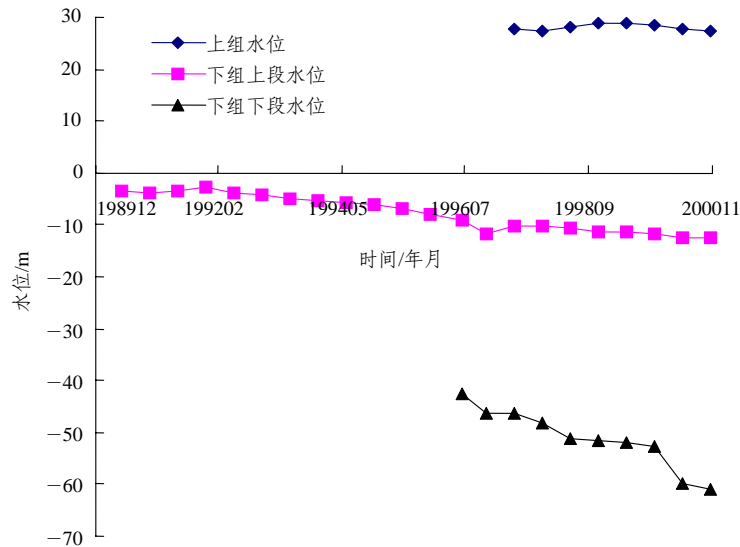


图2 杨村煤矿历年底部含水层水位  
Fig.2 Water table of Yangcun mine in past years

通过对兖州矿区立井井筒周围第四系工程地质与水文地质调查结果比较表明，发生破裂立井井筒之间的工程地质与水文地质条件存在一些共同点，鲍店、杨村、兴隆庄煤矿之间立井井筒周围第四系地层工程地质条件与水文地质条件的共同点主要有：

(1) 立井井筒都穿过第四系深厚表土，其厚度大都为 200 m。厚度变化总体趋势是由东向西、由南至北逐渐增厚，且地层的组成差别较小。

(2) 第四系土层分为上、中、下 3 组，其下则为煤系岩层。其中上组为含水层，中组透水性弱，为相对隔水层组，下组可分为上、下两个含水段，下段含水层即为三含(底部含水层)，底部含水层总体组成结构复杂，且厚度变化较大，为承压含水层。

(3) 在立井井筒破裂的过程中，井筒周围土层的底部含水层的水头都有较大的降低，且地表具有较大的沉降<sup>[3, 4]</sup>。

### 3 立井井筒非采动破裂过程及发生机制分析

根据发生非采动破裂工程地质灾害的立井井筒工程地质与水文地质分析表明，第四系下组含水层，主要是底部含水层孔隙水压力的降低是立井井筒破裂的主要原因，立井井筒破裂是立井井筒周围土层、立井井筒、土中水相互作用的结果，因此立井井筒破裂包含水、土相互作用及土与立井井筒相互作用

两个主要过程。

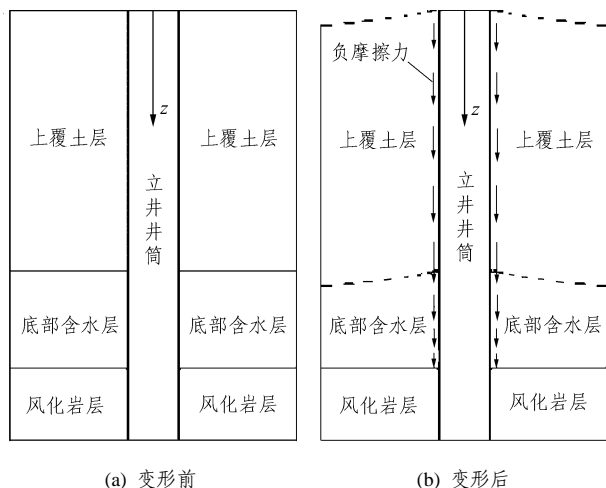
#### (1) 水、土相互作用过程分析

在立井井筒破裂过程中，第四系下组底部含水层内的承压水随着矿山生产向采空区发生渗流，从而下组底部含水层中的孔隙水压力降低，造成底部含水层发生压缩变形，上覆土层在底部含水层的变形影响下发生沉降，其变形量与底部含水层的压缩量有直接的关系，底部含水层与上覆土层的变形情况具有一定的区别，底部含水层变形是由于土层孔隙水压力降低产生的，在变形过程中土层受到压缩，而上覆土层变形是由于底部含水层变形引起，基本无压缩变形产生。

#### (2) 第四系土层变形过程中土与立井井筒的相互作用

第四系土层在变形过程中与立井井筒的外壁有摩擦力的产生，对于立井井筒，该摩擦力属于负摩擦力，由于在第四系土层与立井井筒的交界处相对位移较小，作用过程时间较长，因此第四系土层与立井井筒应视为相对静止的两个物体，则两者之间的摩擦力属于静摩擦力，其大小应与立井井筒周围土层的变形量及土层的工程性质有关，根据土层变形的特点摩擦力的产生分为两部份，一部分是由底部含水层压缩变形产生，另一部分是由上覆土层的变形产生，如图 3 所示。

从以上的底部含水层的渗流压缩过程分析可知，底部含水层的压缩变形产生的负摩阻力改变了立井井筒的受力状态，使得立井井筒所受到的在 z



(a) 变形前 (b) 变形后  
图 3 立井井筒周围第四系土层变形

Fig.3 Deformation of quaternary soil around shaft

方向应力增大, 与立井井筒周围土层的侧压力共同作用使得立井井筒发生破裂。

因此通过以上分析可以基本确定, 兖州矿区立井井筒非采动破裂发生机制为: 具有深厚表土层的煤矿立井井筒, 深厚表土层底部与基岩交界处发育有一层较厚的底部承压含水层, 厚度一般在十几米至几十米, 立井井筒周围留有足够安全保安矿柱的情况下, 在立井井筒的生产过程中, 底部承压含水层由于向采空区渗流从而水头产生降低, 由此底部承压含水层中的有效应力增大, 底部含水层发生压缩变形, 底部含水层上覆土层随之发生变形, 土层变形的过程中与立井井筒发生相互作用, 在立井井筒外壁产生负摩擦力, 负摩擦力随着土层变形的增大而加大, 立井井筒在负摩阻力作用下达到井壁的破坏强度时立井井筒发生破裂。其具体表现为立井井筒内壁混凝土剥落, 内侧纵向钢筋均向井内弯曲, 均为横向或近似水平的裂缝, 破裂带高度为 1~10 m。由于立井井筒破裂的直接原因为底部含水层的变形, 因此底部含水层的水头高度是一个较容易测量, 且能够反映立井井筒状态的物理指标, 所以底部含水层水头高度的监测对立井井筒破裂的预防与治理具有重要的意义<sup>[5~7]</sup>。

## 4 立井井筒破裂过程的数值模拟分析

### 4.1 立井井筒破裂理论计算模型的建立

根据兖州矿区的工程地质资料和立井井筒施工资料建立了立井井筒破裂的几何计算模型(以鲍店煤矿为例), 模型共 19 008 个六面体、21 600 个节

点, 主要包括 3 个部分:

- (1) 立井周围土层单元;
- (2) 立井井筒单元;
- (3) 土与井筒之间的接触面单元。

整个模型的宽为 200 m, 高 220 m, 其中土层根据实际工程地质资料分为 4 层, 包括 2 个含水层与 1 个隔水层及风化岩层, 具体模型如图 4 所示, 数值模拟中所需参数如表 2, 3 所示, 在土层单元中, 仅考虑第三土层的渗流压缩, 第二土层为隔水层, 水从第三土层的底面溜出。初始水头压力为 1.2 MPa, 渗透系数为  $1 \times 10^{-4}$  m/s。

FLAC<sup>3D</sup> 对于土体的渗流压缩变形计算采用了独立于力学计算模型的渗流模型, 其计算过程是与应力计算平行进行的, 主要分为两个过程, 首先是根据渗流模型计算孔隙水压力的变化, 然后由孔隙水压力的变化计算土体有效应力的变化及计算土体的变形, 这两个过程是循环进行的, 直到孔隙水压力达到预先确定的计算值, 土层与井筒之间通过接触面单元进行力的传递<sup>[8~10]</sup>。

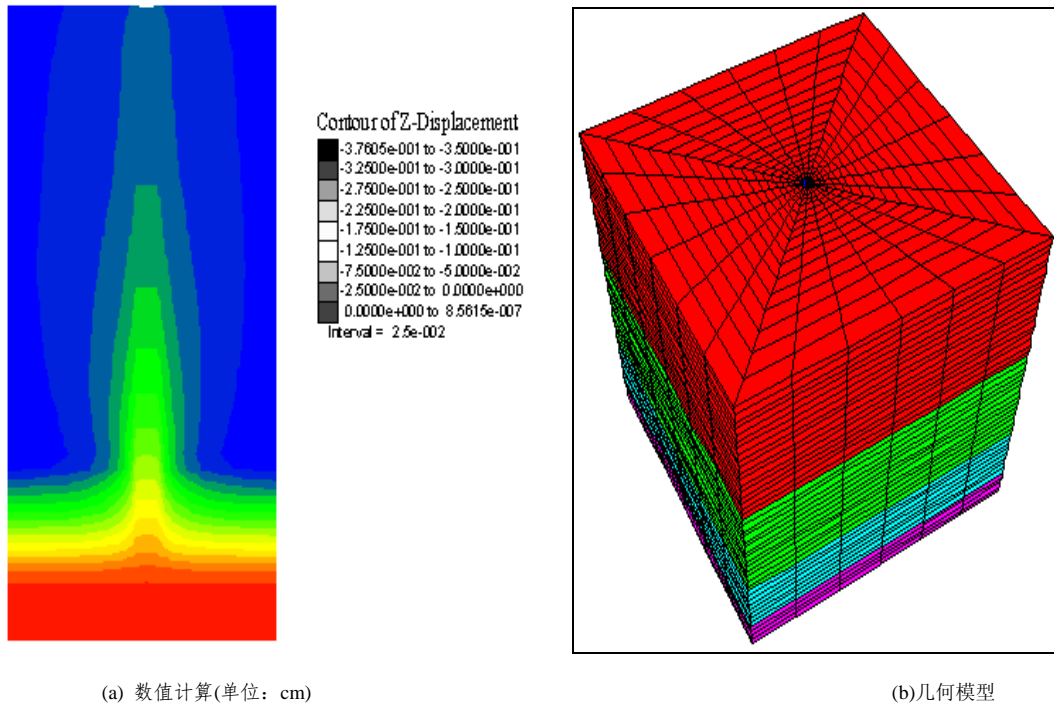
### 4.2 数值模拟计算过程与结果分析

立井井筒破裂的数值模拟计算分为两个步骤:

第一步为不排水时初始应力作用下土与井壁在达到应力平衡状态, 数值模拟模型的初始应力为土体自重情况下所产生的重力及土的侧压力。第二步为在初始平衡状态情况下进行排水, 使得土体在自重应力作用下产生压缩变形, 且与井壁相互作用产生附加应力, 改变井壁的受力状态。

立井井筒周围的土体的压缩变形及立井井筒在附加应力作用下的变形如图 4 所示, 可以看出在土层与井壁的相互作用过程中, 同一水平面上土层的位移由于受到立井井筒影响其分布规律为以立井井筒为中心沿径向逐渐增大, 最后趋于稳定, 在土层附加应力的作用下, 立井井筒的变形规律为沿立井轴向随深度逐渐变小, 在底部含水层水头降为 0.8 MPa, 立井井筒发生破裂, 此数值与在破裂井筒现场实测的水头降基本相同。

图 5 所示为底部含水层水头降与立井井筒破裂过程中最大  $z$  方向应力之间的关系, 其基本规律为在立井井筒破裂过程中,  $z$  方向应力随着底部含水层水头降的增加而增大, 具体为当底部含水层水头压力达到 0.8 MPa 时, 井壁最大  $z$  方向应力为 30 MPa 左右, 此时立井井筒从内壁开始发生破裂。图 6 所示为立井井筒破裂时井壁附加应力随立井井筒深度



(a) 数值计算(单位: cm)

(b)几何模型

图 4 立井井筒的几何模型与数值计算结果

Fig.4 Geometry model and numerical calculation result of shaft lining

表 2 土层和井筒的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of soil and shaft lining

土层和井筒	干密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	剪切模量/MPa	体积模量/MPa	内摩擦角/( $^\circ$ )	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
上组	1 650	12	20	20	0.030	0.060
中组	1 650	20	35	20	0.035	0.070
下组	1 700	20	35	20	0.040	0.075
井筒	2 500	1 200	1 500	25	2.000	2.000

表 3 接触面单元的力学参数

Table 3 Mechanical parameters of interface

法向刚度 /( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ )	切向刚度 /( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ )	内摩擦角/( $^\circ$ )	黏聚力/MPa
100	100	20	0.03

分布曲线, 从其分布规律可看出井壁附加应力沿立井井筒深度逐渐增大, 在底部含水层与上覆土层的交界出达到最大, 然后逐渐降低, 这与其他学者用试验方法得到的结论相似, 这说明采用界面元能够很好的对土与立井井筒间相互作用进行耦合分析。

通过以上的底部含水层失水压缩、土与立井井筒的相互作用和立井井筒的破裂 3 种力学过程进行的数值模拟分析计算, 主要结论有:

(1) 底部含水层失水压缩过程中, 在土层与井

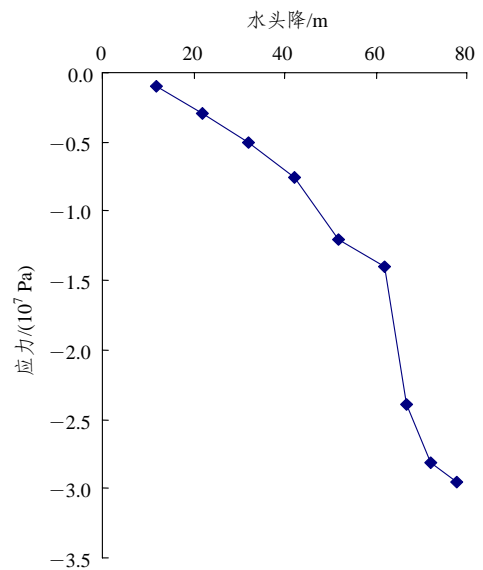


图 5 井壁最大 z 方向应力随底部含水层水头降变化  
Fig.5 Curve of maximum z-direction stress alteration with head loss of bottom aquifer



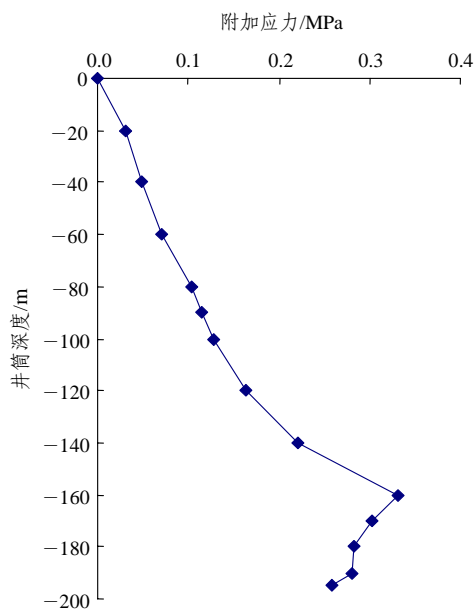


图 6 井壁附加应力随井筒深度变化

Fig.6 Curve of shaft lining additional stress with shaft depth

壁之间的相互作用下, 外井壁会受到附加应力的作用, 且随着附加应力的增加, 井壁逐渐进入塑性状态, 直至破坏。因此, 底部含水层失水压缩产生的附加应力是使井壁产生破坏的主要原因。

(2) 井壁附加应力在底部含水层与岩层接触面附近达到最大, 因此井壁的破坏多发生在接触面的附近, 井壁附加应力随着底部含水层水头降的变化而变化, 在井壁破裂时达到最大值。

(3) 从立井井筒的受力情况分析可知, 井筒是在轴向力与土层侧压力作用下破坏的, 此时井筒内壁处于二向应力状态, 因此井壁的破裂是从立井井筒内壁开始的, 且逐渐扩展到外壁。

(4) 根据数值模拟结果可以根据现场底部含水层水头降对立井井筒因失水而产生的变形、破裂情况进行估计、预测。

#### 4.3 兖州矿区立井井筒重复破裂的现象分析

鲍店矿区主井、副井、杨村主井在立井井筒第一次破裂治理 4 a 后均发生了重复破裂, 较立井井筒初次破裂时的使用时间缩短 6 a 左右, 从破裂现象比较来看, 立井井筒的井壁重复破裂的发生具有一定的周期性。

立井井筒一次破裂后立井井筒内部残余应力的影响, 在立井井筒的初次破裂发生后, 井壁内部应力并未得到完全释放, 因此立井井筒在残余应力的作用及底部含水层进一步压缩的情况下发生了重复破裂。

立井井筒重复破裂受到立井井筒强度降低的影响, 由于在立井井筒初次破裂发生后, 构成立井井筒的混凝土材料在应力的作用下强度有所降低, 因此立井井筒重复破裂发生时的井壁内部应力小于初次破裂。

立井井筒的重复破裂的发生也证明了底部含水层水头的降低是立井井筒破裂的直接原因, 且在底部含水层的水头的不断降低过程中, 立井井筒破裂具有一定的周期性。

## 5 结 论

通过兖州矿区发生立井井筒非采动破裂煤矿的工程地质与水文地质现场调查, 对比立井井筒破坏的相关理论, 得到兖州矿区立井井筒非采动破裂的发生机制, 且通过数值模拟计算对立井井筒破坏机制进行了验证, 主要结论有:

(1) 底部含水层水头降低而产生压缩变形是立井井筒发生破裂的根本原因; 具体为在底部含水层失水压缩的过程中, 土层与立井井壁之间的发生相互作用, 外井壁会受到土层的附加应力作用, 且随着附加应力的增加, 在其他合力的共同作用下井壁逐渐进入塑性状态, 直至破坏。

(2) 根据立井井筒非采动破裂机制, 立井井筒破裂主要包括两个相互作用过程: ① 立井井筒周围底部含水层压缩变形过程中的水、土相互作用过程; ② 第四系土层变形过程中土与立井井筒的相互作用。

(3) 立井井筒破裂的发生具有周期性, 二次破裂是发生在一次破裂的基础上, 在一次破坏的残余应力及土层附加应力的共同作用下发生破坏, 由于在一次破裂后立井井筒强度降低及立井井筒一次破裂残余应力的作用, 二次破裂的间隔时间较一次破裂时间短。

(4) 立井井壁附加应力在底部含水层与岩层接触面附近达到最大, 因此井壁的破坏多发生在接触面的附近, 井壁附加应力随着底部含水层水头降的变化而变化, 在井壁破裂时达到最大值。

(5) 根据数值模拟结果可知, 底部含水层水头降决定了立井井筒的附加应力的产生及大小, 因此根据现场底部含水层水头降对立井井筒因失水而产生的变形、破裂情况进行计算、预测, 从而可对类似工程地质条件下立井井筒破坏的治理工作指导。

**参考文献(References):**

- [1] 刘环宇, 王思敬, 曾钱帮, 等. 基于模糊神经网络兖州矿区立井井筒非采动破裂的判别[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1 237 - 1 240.(LIU Huanyu, WANG Sijing, ZENG Qianbang, et al. Judgment for non-mining fracture of shaft-lining in Yanzhou mine based on fuzzy neural network[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1 237 - 1 240.(in Chinese))
- [2] 李文平, 于双忠. 深厚表土层中煤矿立井非采动破裂的研究[J]. 工程地质学报, 1995, 3(1): 45 - 55.(LI Wenping, YU Shuangzhong. Study on the non-mining rupture of coal mine shaft in thick surface soils[J]. Journal of Engineering Geology, 1995, 3(1): 45 - 55.(in Chinese))
- [3] 李文平. 深厚表土中煤矿立井破裂工程地质研究[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2000.(LI Wenping. Engineering geology research to coal mine shaft fracture in thick surface soils[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2000.(in Chinese))
- [4] 王同福, 胡中信, 曹丁涛. 兖州矿区井筒破裂原因分析及防治[J]. 矿业世界, 1997, (4): 27 - 30.(WANG Tongfu, HU Zhongxin, CAO Dingtao. The analysis and harnessing of shaft lining fracture of Yanzhou Mine[J]. Mining World, 1997, (4): 27 - 30.(in Chinese))
- [5] 王渭明. 千米立井井壁应力分析及设计问题的探讨[J]. 煤炭学报, 1993, 18(5): 63 - 72.(WANG Weiming. Stress analysis of shaft lining and design of the shaft with depth 1 000 meters[J]. Journal of China Coal Society, 1993, 18(5): 63 - 72.(in Chinese))
- [6] 崔广心. 特殊地层条件竖井井壁破坏机制及防治技术[J]. 建井技术, 1998, 19(1): 28 - 32.(CUI Guangxin. Mechanism and the prevention and cure of the failure for shaft lining in special stratum[J]. Mine Construction Technology, 1998, 19(1): 28 - 32.(in Chinese))
- [7] 蒋斌松, 张平, 柏雪云. 立井井壁的计算理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 1): 2 183 - 2 186.(JIANG Binsong, ZHANG Ping, BAI Xueyun. Calculating theory of shaft lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.1): 2 183 - 2 186.(in Chinese))
- [8] 李定龙, 周治安. 深厚表土层建井的渗透稳定性模型模拟研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(6): 607 - 612.(LI Dinglong, ZHOU Zhi'an. Stimulation model for studying infiltration stability of shaft foundation in thick and deep surface soil[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(6): 607 - 612.(in Chinese))
- [9] 毕思文, 王思敬, 杨志法. 煤矿竖井变形破坏三维数值模拟分析[J]. 建井技术, 1997, 18(4): 35 - 37.(BI Siwen, WANG Sijing, YANG Zhifa. Three dimensional model analysis of deformation failure for the shaft in coal mine[J]. Mine Construction Technology, 1997, 18(4): 35 - 37.(in Chinese))
- [10] 刘环宇, 李晓, 王思敬, 等. 厚冲积层立井井筒非采动破裂过程的三维耦合数值模拟[J]. 工程地质学报, 2004, 12(增 1): 529 - 532.(LIU Huanyu, LI Xiao, WANG Sijing, et al. Three-dimensional coupling, non-mining fracturing process numerical simulation for shaft in thick alluvium[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(Supp.1): 529 - 532.(in Chinese))