

文章编号:0253-9993(2013)02-0204-05

冻结法成井井壁在深厚表土段附加应力研究

孟志强^{1,2}, 纪洪广¹, 彭 飞¹

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 河北工程大学 河北省资源勘探重点实验室, 河北 邯郸 056038)

摘 要:为研究深厚表土段井壁的破坏机理,提高井筒的使用寿命,指导已破坏井筒维修和为新设计井筒提供依据,采用数值模拟和理论计算相结合的方法,对淮北煤田深厚表土段井壁附加应力的产生原因及大小进行了探讨。结果表明:附加应力由井壁和裹挟土体重量产生,与地下水埋藏深度、土的容重、地下水层数有关,地下水埋藏越深,产生的附加应力越大,在基岩表面处的附加应力为89.91 MPa,远远超过了混凝土井壁的抗压强度。为避免井筒破坏,应采用方法是:增加井壁强度、保持原有水压、设法减少锥体的重量、井壁在应力集中处采用伸缩装置。

关键词:深厚表土;附加应力;井壁破坏;冻结法

中图分类号:TD265.3 **文献标志码:**A

Additional stress of shaft linings in thick alluvium constructed by freezing process

MENG Zhi-qiang^{1,2}, JI Hong-guang¹, PENG Fei¹

(1. State Key Laboratory of High-efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Resource Exploration Research of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: To analyze the failure mechanism of shaft lining in thick alluvium and improve its service life, direct reparation for broken shaft lining, and provide evidence for new shaft lining design, this paper researched the reasons of shaft lining additional stress in Huaibei coalfield, combined numerical simulation and theoretical calculations. The results show that the additional stress is generated by weight of shaft liner and incidental conical soil, which is related to the groundwater depths, soil bulk density, and groundwater layer number. The deeper the groundwater is, the larger the additional stress is. The additional stress in bedrock surface reaches 89.91 MPa, which is far more than concrete compressive strength. In order to avoid shaft lining breakage, some measures are taken, for example, increasing shaft lining thickness, maintaining original hydraulic pressure, reducing the weight of incidental conical soil and using expansion device in stress concentration area.

Key words: thick alluvium; additional stress; shaft lining breakage; freezing method

冻结法施工是特殊凿井的重要方法,主要在含水量大的地层中应用,特别是井筒需要穿过流砂地层、深厚表土地层。冻结法凿井是通过人为制冷的方法,将土层(岩层)中的水冻结,形成有一定强度和厚度的冻结体(临时防护结构),在其保护下进行岩土开挖的特殊施工方法^[1]。

冻结法施工成井的井壁,一般都采用钢筋混凝土

双层井壁,外层井壁的厚度为400~600 mm,随着掘进砌筑;内层井壁一般厚600 mm,它是在通过冻土段后自下而上一次砌筑成井^[2]。

实践证明,处于富水的厚表土段,尤其是承压水段的井壁,往往会出现井壁破坏现象,如淮北矿区,自1987年以来先后有十几个井筒发生破坏事故^[3],造成了重大的经济损失。破坏形式以混凝土剥落、掉

收稿日期:2012-02-10 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2008AA062104);国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB226803);国家科技支撑计划资助项目(2008BAB33B03)

作者简介:孟志强(1972—),男,内蒙古包头人,副教授。E-mail:mengzq168@126.com

块、纵筋外露和向井内弯曲为主^[3-4],破坏位置在表土和基岩交界面或地下承压水含水层处。

破裂井壁均呈现受压破裂状态,有的井壁破裂时伴有响声,井壁内缘混凝土呈楔形剥落、掉块,严重时,混凝土掉块砸坏设备和井筒装备,破裂带呈近似水平环状,高度0.5~10.0 m;破裂弧长由1/2至整个周圈;破裂深度大多在50~200 mm;破裂时带有渗水或淋水现象,甚至水中带砂,井壁内侧纵向钢筋向井内外凸弯曲、环向钢筋间距减小,此外,罐梁向上弯曲,罐道、排水管、压风管等发生纵向弯曲,严重时会造成扭曲变形,造成卡罐事故^[3,5]。

有的研究者认为,开采泄水引起土层固结压缩,上覆地层沉降^[6]。与此同时,井壁外表面与土体的裹挟土体产生竖直向下的附加力(负摩擦力),该竖直附加力是以往井壁结构形式和强度设计所未考虑的外载,成为井壁破坏的主要因素^[2]。

此外研究人员还根据井壁破坏的形态特征及有关监测数据资料分析,认为基岩段井壁破坏^[2],并非表土段井壁所受附加力传递所致,结晶性侵蚀才是造成井筒基岩段混凝土井壁破坏的主要原因,温度应力^[7]加剧了混凝土井壁的侵蚀作用,这些作用使基岩段井壁破坏^[8-9]。

也就是说表土段井壁破坏是由于地下水下降引起的附加应力施加在井壁上造成的,而基岩段井壁破坏是结晶性侵蚀、温度应力造成的。

本文只讨论表土段井壁破坏问题,因此搞清附加应力的产生原因和计算方法尤其重要。

1 附加应力的产生原因

井筒穿过深厚表土及基岩层到达目的矿层或以下,表土层中含水层有的是承压水,表土和基岩交界面一般也是含水层,这是因为基岩顶面一般是风化壳,可以作为地下水的容器^[10]。冻结法成井的井壁在施工时,对地下承压水破坏较少,原承压水层土体固结度不高;但在煤矿开采时,或多或少破坏了地下承压水层的封水结构,造成承压水下泄,承压水层在上覆地层的压力作用下压缩固结,产生沉降与破坏^[11-13]。但是井壁周围的土层,由于裹挟在井壁上,而井壁压缩性较小,故井壁承担裹挟土体和井壁及配件重量,这一现象相当于孤岛工作面压力(图1),两侧煤体采出后,上覆岩层呈一个倒梯形,压在煤体上,煤体承担上部倒梯形重量,这一点已得到普遍认可。

如图2所示,假设井筒穿过了3个承压水含水层,其中第3含水层是表土与基岩的交界面^[6]。

泄水和采矿均产生地表下降,但采矿对井壁附加

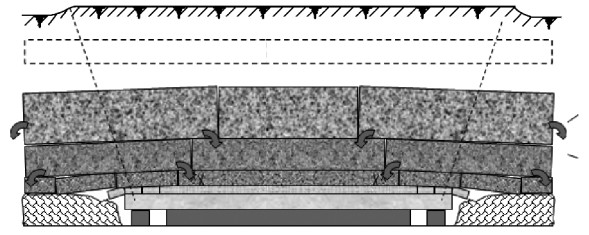


图1 孤岛工作面承压示意

Fig. 1 Schematic diagram island working face confined pressure

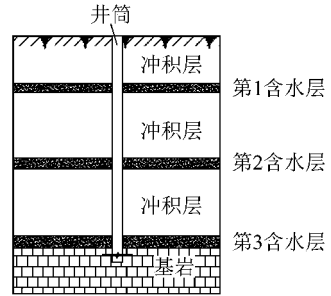


图2 井筒穿层示意

Fig. 2 Throughout shaft

应力的改变影响比较小,这是因为采矿时会为井筒和地面建筑留下足够的保护煤柱;在采矿过程中,各种因素会使承压水层隔水层破坏,造成水压降低,随着水压降低,含水层变“松”,承压水盖层及以上地层在上部地压作用下会压实原承压水层,引起上部地层的广泛下降。井壁和地层结合较好,这样地层下降时需要井壁一起下降,而井壁是混凝土整体,在承压水层,这部分井壁不会受水压下降而收缩,于是沿移动角面处错开,形成一个倒锥形体。这个倒锥体的重量全部压在外层井壁上,在锥体顶角处受到最大的压力^[14-16]。图3(a)为第3含水层泄压后,地层下移变化示意图,井壁受到的附加力由以井筒为中心的三角锥体的重量产生,锥体高度基本就是地表到基岩顶部的距离;图3(b)为第2含水层泄压后地层下移变化示意,三角锥体的高度为地表到原第2含水层顶面的距离。

从图3可以看出,第3含水层泄压后,井壁所受的压力比第2含水层泄压后的大,这是因为两者产生的锥体体积不同,图3(a)所示的锥体因为深度大,体积大,重量也大。

实际上这个锥体不可能一直按一固定角度向上发展,到一定高度后,上部不再扩大,即上部柱体,下部为锥体。经数值模拟后发现这个锥体的断面如图4所示,为简化计算,把它当作上柱下锥的空间形状,上柱取3倍井筒直径,下部锥体母线与水平夹角 55° 。

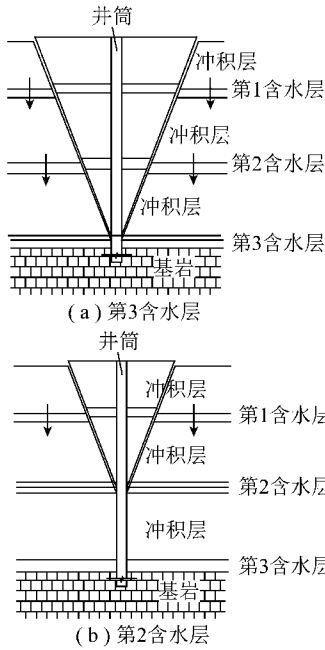


图3 含水层释放形成的锥体

Fig. 3 Pyramid shaped by aquifer release

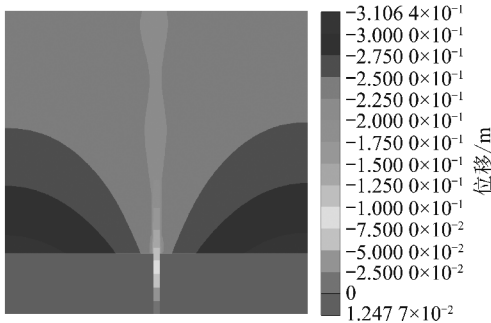


图4 数值模拟结果

Fig. 4 Numerical simulation results

2 数值模拟

承压水水位下降,原承压水层由于上部压力作用进行压缩变形,进而引起地表下沉,相当于开挖一层矿体后产生的效果^[17-18]。因此在数值模拟时,用挖掉一层土体来表示承压水流失,表土层压缩下沉,开挖厚度使用地表下沉量实践值,即30~50 cm,本文开挖厚度选用50 cm;为提高运算速度,把上覆地层厚度折算成压力;井筒两侧均开挖,但其变形及应力左右对称,故只开挖一侧即可。单侧竖向应力云图如图5(a)所示,单侧y方向应力云图如图5(b)所示,可见承压水卸压后,在原承压水层附近井壁竖向应力最大,横向应力最小,最容易发生破坏。

3 附加应力的计算

附加应力是由井壁裹携的锥形土体产生,根据相关规范,淮北矿区基岩段边界角为69°~73°(此角度

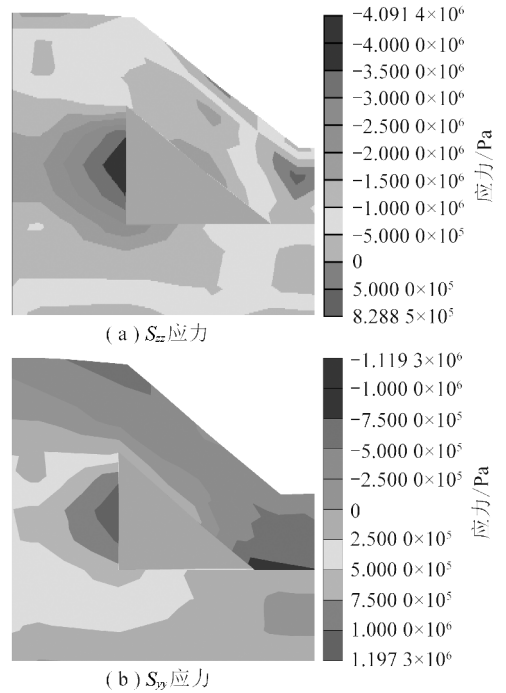


图5 应力云图

Fig. 5 Stress contour

越小,锥体体积越大,规范建议是松散层大于60 m时,淮北移动角在无水时取60°,有水取55°,多水有流砂取40°。本文仅做计算^[17,19-21],参考以上数值,故取55°),则井筒附加应力为锥体重量,如图5(b)所示,阴影部分面积回转形成的体积与密度的乘积。为简化计算,井壁密度和土体密度均按 $1.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 计,井壁厚为600 mm时,截面面积约为 12.43 m^2 ,即计算直径为6 m和7.2 m的两圆面积相减得到的井壁截面面积。取计算公式有

$$F = \gamma V$$

$$V = V_B + V_A - V_C$$

$$V_B = \frac{\pi d^2}{4} \frac{1}{3} h = \frac{\pi}{4} \times 18^2 \times \frac{1}{3} \times 12.85 = 1\,089.4$$

$$V_A = \frac{\pi}{4} d^2 h_z = \frac{\pi}{4} \times 18^2 \times 227.15 = 57\,773.3$$

$$V_C = \frac{\pi}{4} d^2 \frac{1}{3} h' = \frac{\pi}{4} \times 6^2 \times \frac{1}{3} \times 4.28 = 40.32$$

$$V_B + V_A - V_C = 58\,822.38$$

式中, F 为上柱下锥形体的重量; γ 为土层容重; V 为上柱下锥形体体积, m^3 ; V_A 为柱体A的体积; V_B 为锥体B体积; V_C 为锥体C的体积。

$$A = \pi(D^2 - d^2)/4 = 12.43$$

式中, A 为井壁截面面积; D 为井壁外径; d 为井壁内径。

土密度取 $1\,800 \text{ kg/m}^3$, $\sigma = F/A = 89.91 \text{ MPa}$,如果考虑内外井壁共同受力,则井壁截面面积为

19.5 m²,则 $\sigma=55.6$ MPa,远远大于C₃₀混凝土的抗压强度(图6)。

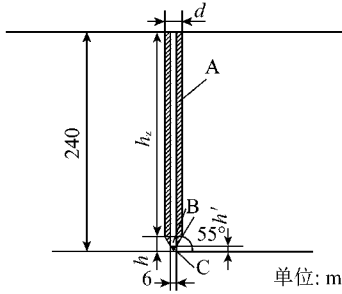


图6 锥体剖面示意

Fig. 6 Section of pyramid

4 结果与分析

附加应力是表土层井壁破坏的一个重要因素,以直径6 m、冲积层厚240 m计算,在基岩表面处的附加应力为89.91 MPa,远远超过了混凝土井壁的抗压强度。从以上计算可知,附加应力与埋深、土的容重等有关。

现实中,并不是所有厚表土层井壁都破坏,这是因为未破坏的井壁,所处的未固结土层比较薄,局部压缩固结作用比较小,而且井壁总是有一定的压缩性,能够适应上部压力,或者井壁和土体摩擦角较小,土体在自重作用下顺着井壁下沉,即柱形土体的重量没有本文考虑的这么大^[12],有部分被下伏岩层承担,对井筒造成的压力较小。

为了保证井壁在使用时不被压坏,应该考虑以下4个方法:①增加井壁强度^[14],如果能够使井壁有足够厚度和强度,能够承担锥体的重量,那么井壁不会破坏,但是根据以上计算,想实现这一点并不容易,而且在计算时还没有考虑井壁装备的重量;②保持原有水压,这要求在采矿时,尽量减少对井筒附近承压水的破坏,保持井壁附近土层原有水压,有条件时可对井壁附近一定范围的承压水采取帷幕保护,使它们共同承担上覆地层压力,也就是说这个区域内,不会因采矿引起地表下沉,上部土压力由下部地层承担和传递;③设法减少井壁裹携体的重量,从以上分析可见,锥体的重量主要由井壁携带土层形成,那么减小井壁与地层的磨擦,使裹携体尽可能小,或者把井壁与围岩的摩擦力去掉,就可以减小井壁压力。但是这样一来,井壁与土层耦合性降低,其实不利于井壁整体稳定;④井壁在应力集中处可以收缩^[12,21],使井壁和裹携体能够下移并接触到下伏地层,这样上部压力仍由下伏地层承担,减少井壁负担^[22]。如果进行这种设计,需要在每个承压水层处均设置,使井壁在这

些范围内均可收缩,降低附加应力对井壁的影响。

5 结论

(1)附加应力与地下水埋藏深度、土的容重、地下水层数有关,地下水埋藏越深,产生的附加应力越大,以240 m厚表土层为例,计算附加应力为89.91 MPa。

(2)为使井壁能够正常使用,应该考虑增加井壁强度、保持原有水压、减小锥体重量或增设可缩井圈等方法。

参考文献:

- [1] 王涛,岳丰田,姜耀东,等.井筒冻结壁强制解冻技术的研究与实践[J].煤炭学报,2010,35(6):918-922.
Wang Tao, Yue Fengtian, Jiang Yaodong, et al. Research and practice on forced thaw technology applied to frozen wall of mine shaft [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 918-922.
- [2] 姚直书,程桦,荣传新.西部地区深基岩冻结井筒井壁结构设计优化[J].煤炭学报,2010,35(5):760-764.
Yao Zhishu, Cheng Hua, Rong Chuanxin. Shaft structural design and optimization of deep freezing bedrock shaft in west area [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5): 760-764.
- [3] 倪兴华.煤矿立井井壁破裂防治技术研究[M].徐州:中国矿业大学出版社,2005:2-13.
Ni Xinghua. The research of sidewall cracking prevention countermeasures in vertical well of coal mine [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2005: 2-13.
- [4] 吴怀俊.立井井壁破坏应力研究[J].中国安全科学学报,2003,13(7):21-24.
Wu Huaijun. Study on failure stress of shaft wall [J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(7): 21-24.
- [5] 刘伟.孙疃煤矿复合破碎软岩大断面巷道破坏机理与支护对策[J].中国矿业,2010,19(10):81-84.
Liu Wei. Damage mechanism and supporting methods of soft broken roadway in Suntuan Coal Mine [J]. China Mining Magazine, 2010, 19(10): 81-84.
- [6] 屈平,申瑞臣,付利,等.煤层井壁稳定的时间延迟效应探讨[J].煤炭学报,2011,36(2):255-260.
Qu Ping, Shen Ruichen, Fu Li, et al. Time delay effect on wellbore stability in coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 255-260.
- [7] 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.
Yang Gengshe, Xi Jiami, Wang Zongjin, et al. Study on rock mechanical properties of frozen wall of main shaft in Hujiahe Coal Mine [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 565-570.
- [8] 杨华,江向阳.立井井壁破坏机理的力学模型与分析[J].济南大学学报,2003,17(4):383-385.
Yang Hua, Jiang Xiangyang. Mechanical model and analysis of shaft wall fracture mechanism [J]. Journal of Shandong Institute of Building Materials, 2003, 17(4): 383-385.

- [9] 郭涛,任晓东. 软岩巷道变形破坏原因的分析[A]. 矿山建设新进展[C]. 2005;202-207.
Guo Tao, Ren Xiaodong. Research on the deformation and failure of soft rock roadways[A]. 2005 National Mine Construction Conference [C]. 2005;202-207.
- [10] 盛天宝. 特厚黏土层冻结压力研究与应用[J]. 煤炭学报, 2010,35(4):571-574.
Sheng Tianbao. Research and application on freezing pressure of extra-thick clay layer[J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(4):571-574.
- [11] 梁恒昌,周国庆,赵光思,等. 井壁破裂过程的应变实测特征分析[J]. 煤炭学报,2010,35(2):198-202.
Liang Hengchang, Zhou Guoqing, Zhao Guangsi, et al. Strain characters of shaft lining crack [J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(2):198-202.
- [12] 徐晓峰,经来旺,杨仁树,等. 疏水沉降下井壁次生地压及附加力分布规律[J]. 煤炭学报,2010,35(2):203-207.
Xu Xiaofeng, Jing Laiwang, Yang Renshu, et al. Distribution rules of additional force and secondary ground pressure stress of shaft wall in seepage sedimentation[J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(2):203-207.
- [13] 侯玮,姜福兴,王存文,等. 三面采空综放采场“C”型覆岩空间结构及其矿压控制[J]. 煤炭学报,2009,34(3):310-314.
Hou Wei, Jiang Fuxing, Wang Cunwen, et al. Pressure control in sub-level long face surrounded by three sides mined areas of C-shaped strata spatial structure[J]. Journal of China Coal Society, 2009,34(3):310-314.
- [14] 蔡海兵,姚直书,荣传新. 钢纤维混凝土弧板井壁结构的力学特性[J]. 煤炭学报,2010,35(1):46-50.
Cai Haibing, Yao Zhishu, Rong Chuanxin. Mechanical characteristic of steel fibre concrete arc shaft wall structure[J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(1):46-50.
- [15] 程桦,周晖. 冻结井预制弧板井壁接头刚度模型[J]. 煤炭学报,2007,32(1):29-32.
Cheng Hua, Zhou Hui. Joint rigidity model of prefabricated arc board of freezing shaft wall [J]. Journal of China Coal Society, 2007,32(1):29-32.
- [16] 经来盛. 表土沉降对井壁破裂的影响及防破裂措施的研究[J]. 煤炭学报,2001,26(1):49-53.
Jing Laisheng. The effect of surface soils subsidence on the strength of shaft wall and research of the prevention measures [J]. Journal of China Coal Society, 2001,26(1):49-53.
- [17] 陈祥福,申明亮,张勇,等. 厚表土立井井壁破坏数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(5):926-931.
Chen Xiangfu, Shen Mingliang, Zhang Yong, et al. Numerical model research of super deep shaft sidewall destruction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010,6(5):926-931.
- [18] 高杰. 水位下降诱发深厚表土层井壁破裂机理及治理效果模拟研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2009:42-45.
Gao Jie. The simulation research on the mechanism and treatment of shaft wall fracture in thick alluvium induced by dewatering [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2009:42-45.
- [19] 蔡东红,董昌伟,彭龙超,等. 煤层覆岩圆拱结构下底板破坏深度的解析估算[J]. 山东科技大学学报,2005,24(2):13-16.
Cai Donghong, Dong Changwei, Peng Longchao, et al. The analytic estimation of floor failure depth under the arch structure of overlying strata of coal seam [J]. Journal of Shandong Inst. of Min. & Tech., 2005,24(2):13-16.
- [20] 姚直书,蔡海兵,程桦. 特厚表土层钻井井壁底结构分析与设计优化[J]. 煤炭学报,2009,34(6):747-751.
Yao Zhishu, Cai Haibing, Cheng Hua. Structure analysis and design optimization of drilling shaft lining bottom in super-deep alluvium [J]. Journal of China Coal Society, 2009,34(6):747-751.
- [21] 葛晓光. 底部含水层疏水时表土层的流变作用及井壁受力模型[J]. 煤炭学报,2001,26(2):137-140.
Ge Xiaoguang. Rheidity phenomena and shaft-lining mechanics model of drainage and compression in upper soil-mass [J]. Journal of China Coal Society, 2001,26(2):137-140.
- [22] 杨志江,韩涛,杨维好,等. 管板组合式井壁可缩装置的竖向临界荷载[J]. 煤炭学报,2011,36(8):1276-1280.
Yang Zhijiang, Han Tao, Yang Weihao, et al. Vertical critical pressure of a new shaft lining compressive device consisting of pipes and shells [J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(8):1276-1280.