

文章编号: 1673-3363-(2014)06-0969-07

复杂应力作用下基岩破碎段井壁变形特征 及加固技术研究

陈晓祥, 徐仪昌, 范增哲, 刘军

(河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要 基于河南大有能源石壕煤矿副井+215~+185 m井筒的实际地质条件,通过现场调研,分析了井筒变形破坏段的破坏特征及破坏原因;借助FLAC^{3D}数值模拟软件,研究了不同锚索预紧力下井筒两侧岩柱内的应力场、位移场及塑性区的分布规律。研究表明:在对穿锚索作用下,随着锚索预紧力逐渐增加,岩柱内的垂直应力逐渐增加,塑性区范围逐渐减小,岩柱两侧井壁的水平位移也逐渐减小;对穿锚索的高预紧力作用,能有效提高井壁围岩的自承能力;对锚索进行全长注浆锚固,能有效减少锚索预紧力的后期损失,井壁围岩的稳定性得到增强。井壁围岩变形实测结果较好地验证了本文数值模拟的结果,研究结果对于类似条件下井壁的破裂治理具有重要的指导意义。

关键词 复杂应力;井壁;变形特征;数值模拟;对穿锚索

中图分类号 TD 352

文献标志码 A

Research on the deformation features and strengthening technology in auxiliary shaft lining under the complex stress

CHEN Xiaoxiang, XU Yichang, FAN Zengzhe, LIU Jun

(School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract Based on the engineering background of the auxiliary shaft of Shihao mine of Henan Da-you Energy Co Ltd, by field investigation and research, deformation and failure features and damage reasons of deformation zone in mine shaft have been analyzed, by using FLAC^{3D} numerical simulation software, the stress distribution and the plastic zone size inside of rock pillars on both sides of shaft and the displacement variation rule of shaft lining on side of two rock pillars have been studied under the different pre-tightening force of anchor rope. The research results show that under the action of the strand anchor, as the pre-tightening force of anchor cable is increasing, vertical stress within the rock pillars will increase, while the plastic zone size and the shaft displacement after reinforcement will decrease. Self-supporting ability and stability of shaft lining surrounding rock are effectively improved by the action of high pre-tightening force of the strand anchor. Full grouted anchor cable can effectively reduce the post loss of anchor pretightening force, and then the wall rock stability is enhanced. This numerical simulation results were better validated by shaft lining surrounding rock deformation measured results. The research results provide important references for treatment rupture of the shaft lining

收稿日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50874037, 51174078); 中国煤炭工业协会指导性研究计划项目(MTKJ2010-379)

作者简介: 陈晓祥(1979—), 男, 江苏省涟水县人, 博士, 副教授, 主要从事巷道围岩控制与岩土特殊施工方面的研究。

E-mail: chenxxiang@163.com

Tel: 18603917949

under similar conditions.

Key words complex stress; shaft lining; deformation features; numerical simulation; strand anchor

我国千米以下的煤炭储量约占煤炭资源总量的 53%^[1], 煤炭生产多采用地下开采, 一般采用立井开拓或斜井开拓。井筒是矿井的咽喉, 是人员上下井、煤炭提升、设备运输及通风、动力、材料等入井的通道; 因此矿井井筒的稳定与整个矿井的安全和生产密切相关, 井筒的变形破坏会给矿井安全生产带来很大的灾害和经济损失^[2]。目前, 治理破裂立井井壁通常所采用的方法有钢结构加固法、破壁注浆法、地面帷幕注浆法、套壁加固法和卸压槽法等^[3-8]。

石壕煤矿副井井筒周围巷道和硐室较多, 应力分布复杂, 加上对井底部分巷道和硐室的断面扩大和修复而进行的爆破工程, 对井筒及围岩造成扰

动, 井筒发生了严重变形, 已经威胁到罐笼的安全提升; 因此, 急需采取有效的井壁加固技术来控制井壁围岩的变形破坏, 保证井筒的正常运行。

1 工程概况

河南大有能源股份有限公司石壕煤矿位于河南省三门峡市陕县东部, 行政隶属陕县观音堂镇管辖。该矿 2007 年原煤产量约为 90 万 t/a, 采用立井分水平上下山开拓方式, 开采水平标高为+200 m。开采方法为走向长壁全部垮落法, 采煤方法以炮采为主, 金属支架支护。

该矿副井穿过的地层较多, 但地层岩性主要以砂岩和泥岩为主, 见副井检查孔地质柱状图(图 1)。

井筒检查孔					
柱状 1:500	累深/ m	层厚/ m	采长/ m	岩石 名称	岩性描述
	442.70	8.34	6.10	中砂岩	铁黄色胶结粗糙,下部为黄色,片状云母,层理发育
	444.05	1.35	0.80	砂泥岩	灰褐色,性脆,易风化,下部夹薄层泥岩
	452.10	8.05	4.58	中砂岩	灰绿色,上部胶结粗糙,下部致密,泥质胶结
	458.99	6.89	5.85	砂泥岩	紫灰花斑色,较致密,性脆
	467.80	8.81	5.60	中砂岩	灰白色,致密,层理发育,具黑色炭质层理石
	476.40	8.60	6.85	砂泥岩	黑灰色,致密,性脆,含少许植物化石

图 1 副井地质柱状图(部分)

Fig.1 Geologic histogram of auxiliary shaft (partial)

副井采用单层双车罐笼提升, 井口标高+656 m, 井底标高+200 m, 井筒深 500 m。副井井筒净直径 6 m, 采用素混凝土浇筑, 混凝土强度等级为 C50, 井壁厚度为 600 mm。标高+215~+185 m(埋深 445~475 m)范围内的井壁在高应力和爆破振动共同作用下发生了严重变形, 向井内鼓起, 两帮内移量最小 300 mm、最大 750 mm, 平均内移量 500 mm, 已威胁到罐笼的安全提升; 如不进行加固, 井筒的变形将会挤压罐道, 造成卡罐事故。

2 井壁围岩破坏特征及破坏原因分析

通过现场观察及围岩内部结构窥视, 结合石壕煤矿副井地质资料及石壕煤矿副井井筒现场变形破坏情况, 研究得到石壕煤矿副井井筒变形破坏的主要原因有以下几点:

1) 复杂围岩应力。在副井井筒破坏段周围分布的巷道和硐室较多, 受到围岩应力重新分布的影响, 在井壁两侧的岩柱上方产生应力叠加, 高应力

使得围岩稳定性下降, 控制围岩变形破坏难度进一步增加^[9]。

2) 围岩性质不一致, 变形不均匀。石壕煤矿副井破坏段围岩为泥岩与砂质泥岩互交, 并夹杂着部分层理发育的中砂岩等, 围岩性质差别较大, 在高应力作用下易引起围岩变形不一致。

3) 多次极近距离巷道掘进及扩修扰动。由于矿井多次改造, 副井邻近巷道和硐室在扩修过程中对井壁围岩造成动压影响, 加剧了井壁围岩变形^[9]。

4) 构造应力的影响。矿区位于华北板内褶皱-逆冲断裂带, 区域内派生构造形式有褶曲、断裂及滑动构造等, 主体构造主要为 EW 向的滹池向斜和硖石-义马断裂。矿井地质构造复杂, 已揭露的大小断层上百余条。

5) 井壁淋水的影响。矿井正常涌水量平均 310 m³/h, 矿井水文地质条件属复杂类型, 井壁一直有淋水现象, 加之岩性复杂, 易加速围岩的变形。

6) 服务年限的影响。由于岩石具有弱化和蠕变

等特性，在一定的应力条件下，围岩蠕变变形和膨胀变形会随时间增长而增加，达到一定的程度后，井筒围岩则由稳定状态进入加速变形状态，直至破坏。副井服务年限较长，围岩发生岩石弱化等，降低了抗破坏能力和自承能力。

3 不同围压下井壁围岩应力场、位移场的数值模拟

3.1 数值模拟模型及岩体参数

经过分析，将数值计算模型进行简化，只考虑井筒、副井车线巷道、行人绕道及泵房，如图 2a。为了尽可能地减小模型边界对模拟结果的影响，根据弹性力学分析^[10]，模型左右边界取巷道或井筒跨度的 5~6 倍，确定数值模拟计算的模型范围为 120 m×100 m×100 m，上边界取副井车线巷道顶板上方 51 m，下边界取副井车线巷道下方 45 m。模型中井筒为圆形，直径 6 m，其余巷道硐室均为半圆拱形；副井车线巷道拱高 2 m，墙高 2 m；水泵房拱高 2.5 m，墙高 2 m；行人绕道拱高 1.5 m，墙高 1 m；通道拱高 1 m，墙高 1 m。建立的数值模拟模型见图 2b，岩体力学参数见表 1。

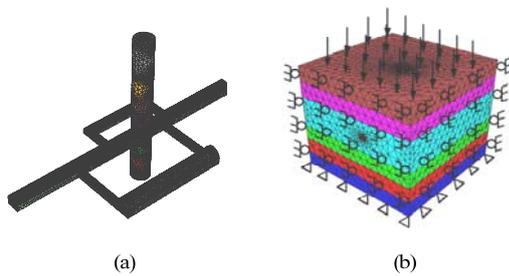


图 2 数值计算模型

Fig.2 Numerical calculation model

表 1 岩体力学参数

Table 1 Mechanic parameters of rock mass

岩体名称	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	内聚力/ MPa	内摩擦角/(°)	密度/ (kg·m ⁻³)
细粒砂岩	8.15	6.92	0.71	2.9	25	2 628
粗砂岩	5.58	3.98	0.59	2.2	20	2 618
中粒砂岩	5.16	2.29	0.61	2.8	24	2 597
炭质泥岩	1.27	0.86	0.21	1.1	18	2 451
泥岩	4.49	3.33	0.32	1.8	22	2 505
铝土质泥岩	2.15	0.71	0.11	1.2	18	2 620
砂质泥岩	3.66	2.43	0.47	2.18	23	2 492
中粒砂岩	4.82	3.59	0.62	2.3	22	2 549

确定数值计算模型边界条件时，模型的左、右边界采用单约束边界，即边界水平位移为零、竖直位移不为零；下部边界均采用固定约束边界，水平、竖直位移均为零；而模型的上部边界条件采用应力边界条件，在模型上部边界施加 10.3 MPa 垂直应力，水平应力按侧压系数 $\mu=1.5$ 计算。

3.2 数值模拟方案

针对类似井筒变形破坏问题，据文献[11-12]可知，均在采用预注浆加锚杆锚索联合支护下取得成功。根据石壕煤矿副井井筒地质条件及变形情况，拟采用预注浆+强力锚杆+强力锚索(部分对穿，全长锚固)联合支护技术进行井筒破坏段围岩加固。由于锚索贯穿岩柱体，对锚索施加预紧力就相当于给岩柱两侧加一定的围压，改变对穿锚索的预紧力，也就改变了岩柱两侧围压，围压增加，围岩的稳定性亦增强。通过采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件对对穿锚索在 4 种不同预紧力下的井壁围岩应力和位移进行对比分析，对穿锚索预紧力取 150, 200, 250, 300 kN 分别进行计算。根据锚杆锚索支护理论及以往的经验，将锚杆锚固长度定为 1 m，预紧力 40 kN，锚杆间排距 1 m，锚杆直径 22 mm，锚杆长度 2.4 m，锚索间排距 2 m。

3.3 模拟结果

为了清楚地了解井筒两侧岩柱在不同预紧力下的围岩应力和变形特征，取应力、位移和塑性区切片图进行对比。图 3~6 为不同预紧力下的井壁围岩应力、位移和塑性区分布图，图 7 为两侧岩柱内部监测线上的垂直应力分布。

从图 3a~6a 可看出：泵房侧岩柱内应力主要集中在远离井筒一端，距井筒较近一端的应力集中较小，随着对穿锚索预紧力的增加，岩体高应力集中区开始向另一端扩展，岩体内部集中应力区的范围在扩大，而井筒周围低应力区范围在缓慢缩小；绕道岩柱内的高应力区主要集中在岩柱体两端，岩柱体纵向中部为低应力区，随着对穿锚索预紧力的增加，绕道岩柱两端的集中应力逐渐增加，范围也逐渐扩大。

从图 7 可看出：随着对穿锚索预紧力的增加，泵房侧岩柱体内应力增高区在变宽，预紧力 150 kN 时高于 10 MPa 的应力区宽度约 6 m，而预紧力为 200, 250, 300 kN 时高于 10 MPa 的应力区宽度分别为 6.3, 6.5, 6.6 m；随着预紧力的增加，泵房侧岩柱的应力峰值位置有向岩柱中心(坐标为 7.5 m)

移动的趋势，预紧力 150 kN 时垂直应力峰值坐标约为 9 m 位置，而预紧力为 200, 250, 300 kN 时垂直应力峰值坐标分别约为 8.6, 8.4, 8.3 m，岩柱内垂直应力的峰值也在逐渐增加。对穿锚索预紧力 150 kN 时绕道侧岩柱体内的垂直应力峰值约 8

MPa，预紧力为 200, 250, 300 kN 时的垂直应力峰值分别为 9.5, 10.6, 11.3 MPa。随着对穿锚索预紧力的增加，岩柱内的垂直应力峰值在增加，高应力区范围在扩大，围岩破坏区的力学性质得到改善，围岩的自承能力得到提高。

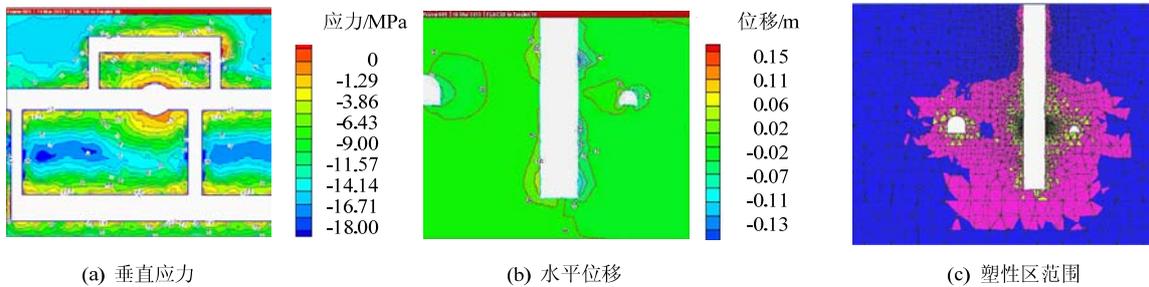


图 3 预紧力 150 kN 时井壁围岩应力、位移和塑性区分布图

Fig.3 Distribution maps of shaft surrounding rock stress, displacement and plastic district under 150 kN pre-tightening force

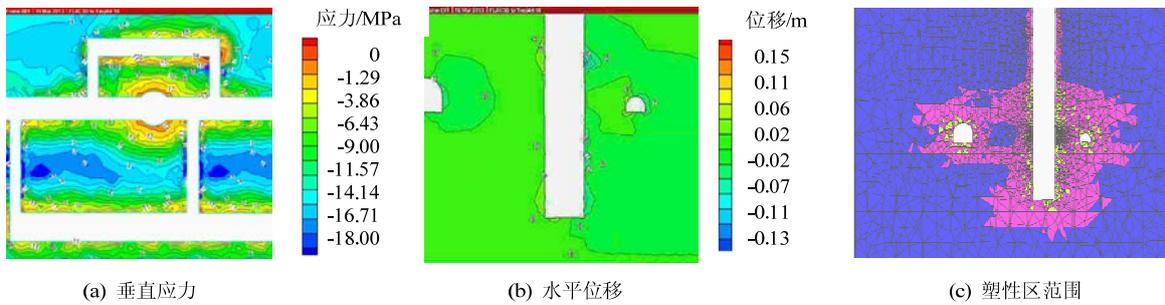


图 4 预紧力 200 kN 时井壁围岩应力、位移和塑性区分布图

Fig.4 Distribution maps of shaft surrounding rock stress, displacement and plastic district under 200 kN pre-tightening force

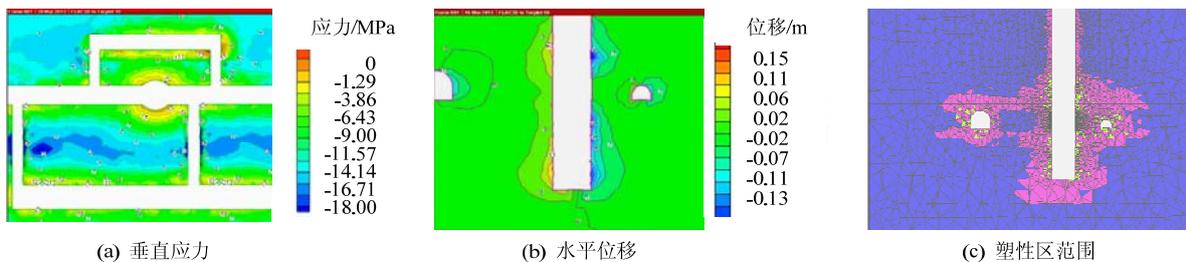


图 5 预紧力 250 kN 时井壁围岩应力、位移和塑性区分布图

Fig.5 Distribution maps of shaft surrounding rock stress, displacement and plastic district under 250 kN pre-tightening force

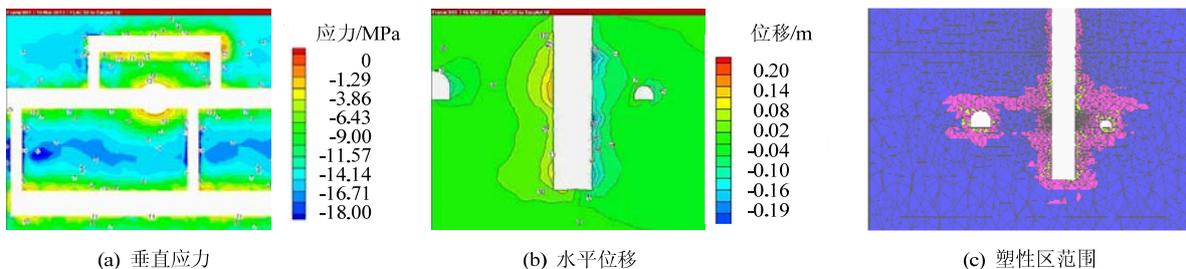


图 6 预紧力 300 kN 时井壁围岩应力、位移和塑性区分布图

Fig.6 Distribution maps of shaft surrounding rock stress, displacement and plastic district under 300 kN pre-tightening force

从图 3b~6b 可看出：在泵房侧岩柱体内位移等值线较为稀疏，泵房周围及井壁附近位移等值线较

多；而绕道侧岩柱体内位移等值线较泵房侧密，井壁周围及绕道周围位移等值线较多，尤其是绕道侧

井壁周围。随着锚索预紧力的增加，两侧岩柱体内的位移量小的等值线圈在慢慢增大，位移量大的等值线圈在逐渐缩小，说明随着锚索预紧力的加大，锚索支护强度加大，岩柱体内的水平位移在逐渐减小，岩柱体变形控制效果也在提高。

从图 8 可看出：锚索预紧力 150 kN 时泵房侧井壁的最大位移约 197 mm，而锚索预紧力 200, 250, 300 kN 时的井壁最大位移分别约 140, 105, 85 mm，以 150 kN 时的最大位移为基准，随锚索预紧力的增加，泵房侧井壁最大位移降低值分别为 57, 35, 20 mm。而锚索预紧力 150 kN 时绕道侧井壁的最大位移约 200 mm，而锚索预紧力 200, 250, 300 kN 时的绕道侧井壁最大位移分别约 150, 115, 90 mm，以 150 kN 时的最大位移为基准，随锚索预紧力的增加，井壁最大位移降低值分别为 50, 45, 25 mm。随着锚索预紧力的增加，井壁加固段内的井壁最大水平位移在逐渐减小，但减小幅度也在逐渐减小。

从图 3c~6c 可看出：随着锚索预紧力的增加，泵房侧岩柱体内开始产生弹性区，泵房底部、井筒底部周围和绕道周围塑性区在逐渐减小，而绕道侧岩柱由于岩柱过窄，受井筒、副井车线巷道及绕道开挖影响严重，其体内塑性区的减小并不明显。预紧力 150 kN 时岩柱体内的塑性区范围最大，而产生的弹性区最小，形成约 9.02 m² 的弹塑性区或弹性区，控制岩柱体变形能力较差，而预紧力为 300 kN 时形成约 50.63 m² 的弹塑性区或弹性区，支护效果最好。

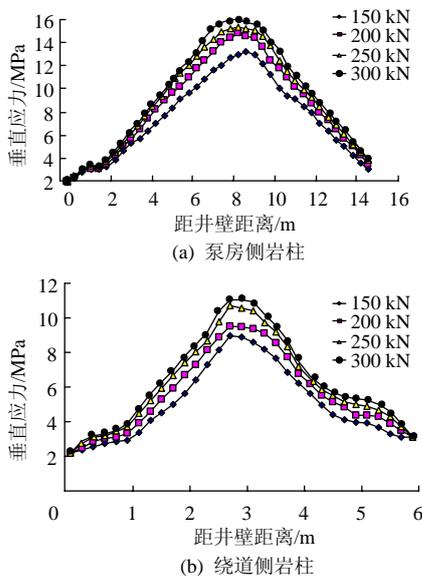


图 7 岩柱内垂直应力变化曲线

Fig.7 The vertical stress curve of the rock pillars

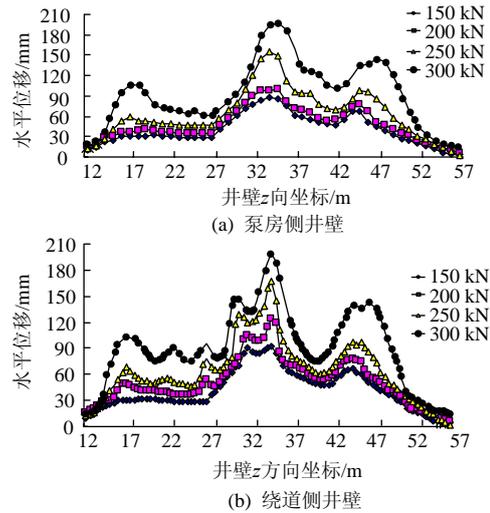


图 8 两岩柱侧井壁水平位移变化曲线

Fig.8 The horizontal displacement curve of shaft lining on side of two rock pillars

分析认为：随着预紧力的提高，锚索支护强度增加，改善了岩体内部的受力情况，有效限制了岩柱体围岩的位移。

3.4 支护方案

通过对几种不同锚索预紧力作用下的岩柱围岩应力、位移及塑性区进行对比分析，考虑施加预紧力器具、实际锚索屈服强度等因素，锚索预紧力应不低于 250 kN，确定石壕煤矿副井井壁破坏段的支护参数为：锚杆为左旋无纵筋高强度螺纹钢锚杆，屈服强度不小于 600 MPa，极限强度不小于 750 MPa，锚固长度 1 m，直径 22 mm，预紧力 40 kN，锚杆间排距 1 m，锚杆长度 2.4 m；强力锚索与对穿锚索材料均为 1×19 股高强度低松弛预应力钢绞线，极限强度 1 860 MPa，极限破断力 550 kN，锚索间排距 2 m，直径 22 mm，强力锚索长度 6 m，锚固长度 1 m，井壁围岩锚杆、锚索布置见图 9, 10。

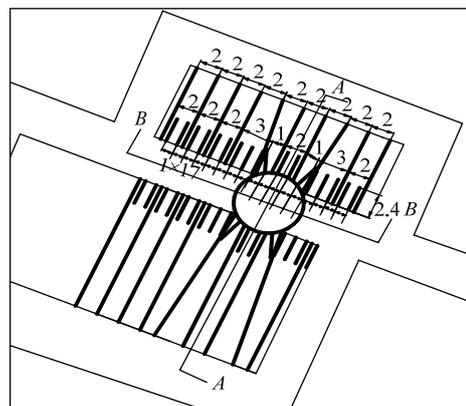


图 9 井壁围岩锚杆、锚索布置平面图 (m)

Fig.9 Shaft surrounding rock bolt and anchor layout plan

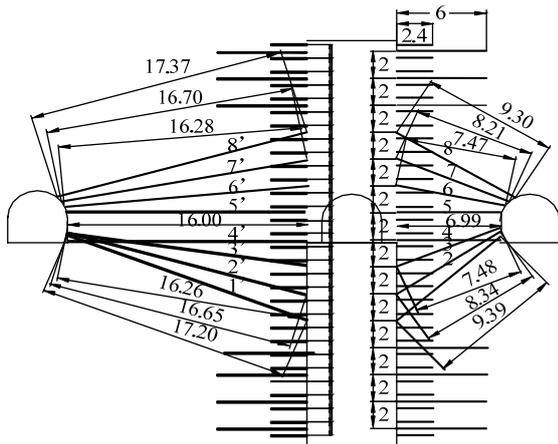


图 10 井壁围岩锚杆、锚索布置剖面图 (m)

Fig.10 Shaft surrounding rock bolt and anchor layout profile

由于锚索预紧力比锚杆预紧力大很多，在锚索张拉后必须对锚杆进行二次紧固。为减少锚索预紧力的后期损失，在强力锚索和对穿锚索张拉后，对锚索进行灌浆全长锚固。

4 工程实测分析

为了考察石壕煤矿副井井壁破坏段的支护效果，在该井筒加固段变形较大处布设 5 个观测点，即在副井车线巷道与井筒交叉位置及上、下 5、10 m 位置处各布置 1 个观测点，从下往上依次为测点 1~5，对支护加固后井筒的变形量进行观测记录。井筒变形量曲线见图 11，井壁位移实测值见表 2。

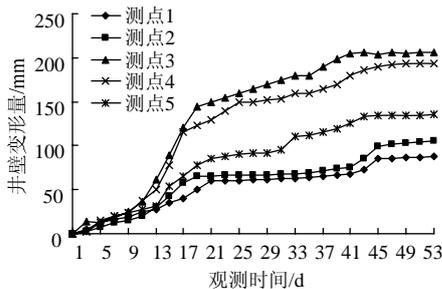


图 11 井壁变形量曲线图

Fig.11 Shaft lining deformation curve

表 2 测点井壁位移实测值

Table 2 Measured values of shaft displacement

测点	井壁位移/mm		
	泵房侧	绕道侧	两侧
1	33	55	88
2	41	64	105
3	91	115	206
4	84	110	194
5	58	78	136

从图 11 可看出：在采用预注浆+强力锚杆+强力锚索(部分对穿，全长锚固)联合支护后，5 个测点的井壁位移量在支护后前 20 d 增加较快，30 d 左右后变形量增加明显减缓，到 40 d 左右后基本稳定，位移量已不再增加。5 个测点中，测点 3 的井壁变形量最大，达 206 mm，满足井筒正常使用，说明所采用的支护方案是合理的、有效的。

5 结论

1) 围岩性质变化较大，变形不均匀，围岩应力条件复杂，受多次爆破动压扰动、淋水、构造应力、岩石风化的影响，是石壕煤矿副井井筒围岩发生严重变形破坏的主要原因。

2) 随着锚索预紧力逐渐增加，岩柱内的垂直应力逐渐增加，塑性区范围逐渐减小，岩柱两侧井壁的水平位移也逐渐减小；对穿锚索的高预紧力作用，能有效提高井壁围岩的自承能力；对锚索进行全长注浆锚固，能有效减少锚索预紧力的后期损失，井壁围岩的稳定性得到增强。

3) 在对穿锚索预紧力的作用下，受到挤压作用，岩柱体横向上受到约束，岩柱体的抗压强度随着围岩的增加也在增加，能有效提高岩体的自我承载能力，减小岩柱体的塑性区范围，岩柱体围岩的稳定性增强。

4) 井壁围岩变形实测结果较好地说明采用的预注浆+强力锚杆+强力锚索(部分对穿，全长锚固)加固技术方案能有效控制井壁围压的变形，提高井壁围岩的稳定性，保证副井井筒的正常运行。

参考文献:

[1] 何满潮. 深部开采工程岩石力学的现状及其展望[C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 88-94.

[2] 曹晨明. 松软破碎硐室群围岩应力分布及加固技术研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院开采设计研究分院, 2009.

[3] 刘占明. 立井井壁破裂的原因和预防[J]. 煤炭科学技术, 1993, 21(1): 20-21.

LIU Zhanming. The reason and prevention of shaft lining rupture[J]. Coal Science and Technology, 1993, 21(1): 20-21.

[4] 鲁兼泉, 刘百臣. 立井井壁断裂综合治理[J]. 煤炭科学技术, 1995, 23(7): 9-12.

LU Jianquan, LIU Baichen. Comprehensive treatment of shaft wall fracture[J]. Coal Science and Technology, 1995, 23(7): 9-12.

- [5] 汪仁和, 吴祥. 祁南矿副井井壁破裂原因分析与卸压槽结构设计[J]. 东北煤炭技术, 1997(6): 17-19.
WANG Renhe, WU Xiang. The reason rupture analysis of auxiliary shaft wall and structural design of the relief groove in Qinan coal mine[J]. Coal Technology of Northeast China, 1997(6): 17-19.
- [6] 吕恒林, 杨维好. 特殊地层条件下井壁破裂机理与防治技术的研究(之二)[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(2): 1-4.
LYU Henglin, YANG Weihao. Study of special stratum shaft wall rupture mechanism and prevention technologies (Part Two) [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997, 26(2): 1-4.
- [7] 黄家会, 杨维好. 加固地层防治井壁破裂技术可行性的模拟试验研究[J]. 建井技术, 1997(18): 53-55.
HUANG Jiahui, YANG Weihao. Experimental study on the technical feasibility of strengthening simulated well-bore formation fracture prevention[J]. Mine Construction Technology, 1997(18): 53-55.
- [8] 黄家会, 杨维好. 特殊地层条件竖井井壁破坏机理及防治技术[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(3): 10-13.
HUANG Jiahui, YANG Weihao. Special stratum shaft wall failure mechanism and control technology[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997, 26(3): 10-13.
- [9] 张春光, 陈晓祥, 张万辉, 等. 石壕煤矿副井井壁加固技术应用研究[J]. 中州煤炭, 2012(1): 3-5.
ZHANG Chunguang, CHEN Xiaoxiang, ZHANG Wanhui, et al. Application research of auxiliary shaft wall reinforce technology in Shihao coal mine[J]. Zhongzhou Coal, 2012(1): 3-5.
- [10] 陈晓祥, 韦四江. 采矿工程数值模拟模型左右边界位置的探讨[J]. 河南理工大学学报, 2008, 27(2): 153-158.
CHEN Xiaoxiang, WEI Sijiang. The discussion about numerical simulation model's left-right boundary position of mining engineering[J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2008, 27(2): 153-158.
- [11] 康红普, 林健, 杨景贺, 等. 松软破碎井筒综合加固技术研究与实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 447-452.
KANG Hongpu, LIN Jian, YANG Jinghe, et al. Study and practice on combined technology for reinforcing soft and fractured shaft[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 447-452.
- [12] 王连海, 贾利平, 车承斌, 等. 注浆、预应力锚索加固硐室与马头门[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(4): 31-33.
WANG Lianhai, JIA Liping, CHE Chengbin, et al. Grouting and pre-stressed anchor applied to repair and reinforcement of central pumping station, substation and ingate in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2000, 28(4): 31-33.

《采矿与安全工程学报》2014年第5期 Ei 收录情况

根据 Ei 中国信息部发布的最新收录结果, 本刊 2014 年第 5 期共发表论文 26 篇, 其中 Ei Compendex 收录论文 26 篇, 收录率为 100%。