

空巷影响下回采巷道围岩稳定性及支护设计研究

武越超^{1,2},韦志远^{1,2},谭英明^{1,2},牛钦环^{1,2}

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院 江苏 徐州 221116)

摘要:为研究因小煤矿开采形成的空巷对于工作面回采巷道稳定性的影响,并选取合理的支护方式及参数,采用FLAC^{3D}软件对工作面不断推进时不同支护条件下,对受空巷影响的工作面运输平巷围岩稳定性进行了数值分析,且对优化支护后的巷道顶板围岩结构实施钻孔窥视。结果表明:空巷影响下工作面应力重分布使空巷煤柱边缘应力集中,造成附近运输平巷垂直应力骤增且塑性区范围扩大;合理支护方式可使巷道围岩塑性区范围及围岩变形得到明显改善,当空巷进入工作面超前应力影响范围内,巷道顶底板变形量急剧增加;在优化支护方案作用下空巷附近运输平巷顶板岩层裂隙发育少、完整性较好。

关键词:空巷;运输平巷;围岩稳定性;支护设计;钻孔窥视

中图分类号:TD323 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2016)05-0128-05

Study on surrounding rock stability and support design of mining gateway under influences of abandoned roadways

Wu Yuechao^{1,2},Wei Zhiyuan^{1,2},Tan Yingming^{1,2},Niu Qinhuan^{1,2}

(1. State Key Lab of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to study abandoned roadways formed by the mining in the former small mines affected to the stability of the mining gateway in the coal mining face, and select rational support method and parameters, FLAC^{3D} software was applied to the numerical analysis on the surrounding rock stability of the transportation gateway in a coal mining face affected by the abandoned roadways under different support conditions when the coal mining was continuously pushed forward. A panoramic borehole peeping survey was conducted on the roof and surrounding rock of the gateway after the optimized support. The results showed that under the influences of the abandoned roadways, the re-distribution of the stresses in the coal mining face would cause the stress concentration at the borderline of the coal pillar along the abandoned roadway and would cause the vertical stresses rapidly increased in the nearby mine transportation roadway and the plastic zone scope expanded. Under the function of support, the plastic zone scope of the surrounding rock and the surrounding rock deformation condition in the mine roadway could be obviously improved. When the abandoned roadway was in the advance stress influence scope of the coal mining face, the roof and floor deformation values of the gateway would be seriously increased. Under the function of the optimized support plan, the transportation roadway near the abandoned roadway would have less developed cracking and well integration of the roof strata.

Key words: abandoned roadway; transportation gateway; surrounding rock stability; support design; panoramic borehole survey

0 引言

目前,在煤矿资源整合的趋势下,井田受小煤矿严重破坏所形成的空巷是影响综采工作面布置

及开采的重要因素之一^[1-4]。研究空巷影响下工作面顶板来压情况及工作面过空巷的方法对于工作面的安全高效开采具有重要意义。文献[5-10]通过对支架、空巷、煤柱及基本顶的相互关系进行

收稿日期:2015-11-16;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.est.2016.05.025

基金项目:煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题资助项目(12KF01)

作者简介:武越超(1990—),男,山西阳泉人,硕士研究生。Tel:15695162962,E-mail:465538407@qq.com

引用格式:武越超,韦志远,谭英明,等.空巷影响下回采巷道围岩稳定性及支护设计研究[J].煤炭科学技术,2016,44(5):128-132,139.

Wu Yuechao,Wei Zhiyuan,Tan Yingming,et al.Study on surrounding rock stability and support design of mining gateway under influences of abandoned roadways[J].Coal Science and Technology,2016,44(5):128-132,139.

分析,建立了力学模型,计算出复采工作面与空巷间煤柱失稳的临界宽度、复采工作面基本顶必然产生超前断裂空巷的临界宽度以及复采工作面过空巷期间的支架最小支护强度,并提出了关于工作面过空巷期间顶板岩层的控制手段;此外,利用超高水材料等充填体对空巷进行充填,并确定了充填的支护阻力及其他参数对于充填效果的影响^[11-12]。文献[13-15]结合数值模拟、相似模拟等方法,详细研究了复采工作面过空巷群的围岩应力特征及变形规律,且得到空巷间煤柱应力变化趋势以确定空巷稳定性。文献[16-18]根据现场实际情况提出了相对应的支护措施以保证工作面的安全生产。然而,这些空巷除对工作面回采产生不利影响外,空巷附近的回采巷道受应力重分布及后期工作面推进的影响,其围岩稳定性也是亟需关注的问题。

阳泉煤业集团华泓煤业有限公司9103综采工作面运输平巷于2012年10月掘进施工,随后停止掘进并于2015年重新开掘。9103运输平巷初期掘进段虽历经2年,但其巷道维护较好,支护效果良好;综合考虑巷道围岩特征、支护效果及支护成本等因素,决定改进9103运输平巷剩余段支护方式;但工作面中部存在大量因小煤矿开采形成的空巷,且分布杂乱无章。为保证工作面回采期间受空巷影响处回采巷道的稳定性,且不大幅度增加成本,笔者对空巷附近回采巷道围岩的稳定性特征进行详细分析,为空巷影响下回采巷道支护优化设计提供了理论依据。

1 工程地质条件及空巷分布

阳泉煤业集团翼城华泓煤业有限公司,井田地层总体上呈现为一单斜构造。目前矿井主采煤层为太原组下段9+10号煤层,平均厚度2.64 m,结构简单;其直接顶为泥岩,深灰色,层状,性脆,裂隙不发育;基本顶为灰色泥质石灰岩,厚层状,质坚硬,性脆,裂隙较发育,组成了稳定性好的顶板,易管理;底板为铝质泥岩,致密,性脆,裂隙较不发育,遇水易软化,易发生底鼓现象,但隔水性能好,较易管理。

9103综采工作面位于矿井西北部一采区,长700 m,宽120 m,地质构造简单,为S1向斜西南部次一级褶皱(背斜)的北翼,煤层倾角平均4°,埋深约280 m。工作面中因小煤矿对本煤层开采形成的

空巷分布如图1所示,空巷分布范围较大,遍布整个工作面的倾斜方向,且方向不规则,错综复杂。因此需对回采巷道(主要为运输平巷)在空巷影响下的围岩稳定性做进一步的研究。



图1 9103工作面空巷分布

Fig. 1 Distribution of abandoned roadway in No. 9103 fully-mechanized working face

2 巷道围岩稳定性分析

考虑到9103工作面空巷的复杂性,笔者重点通过数值计算来分析空巷影响下运输平巷的围岩稳定性。结合该工作面工程地质特征,对空巷分布及形状进行适当简化,利用FLAC^{3D}软件实现工作面及空巷模型的建立,对巷道围岩垂直应力及塑性区分布进行了详细研究。

2.1 模型建立

综合工作面大小、应力影响范围及FLAC^{3D}运算速度,最终确定模型尺寸为300 m×450 m×80 m(长×宽×高)。上覆简化的岩层通过对岩层上边界施加2 MPa的垂直应力体现,且应力与埋深的变化梯度为 2.5×10^{-2} MPa/m。考虑到空巷的影响,大多学者^[8-9,13-14]在建立计算模型时均围绕空巷进行。但该方法仅适用于空巷数量较少且分布规则的情况。结合9103工作面空巷分布实际情况,对空巷进行了适当的简化,FLAC^{3D}中空巷开挖情况如图2所示,数值计算中各岩层岩石物理力学参数见表1。

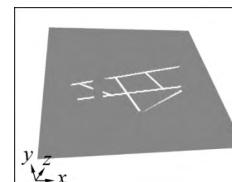


图2 空巷开挖情况

Fig. 2 Abandoned roadways excavation conditions

2.2 运输平巷围岩稳定性分析

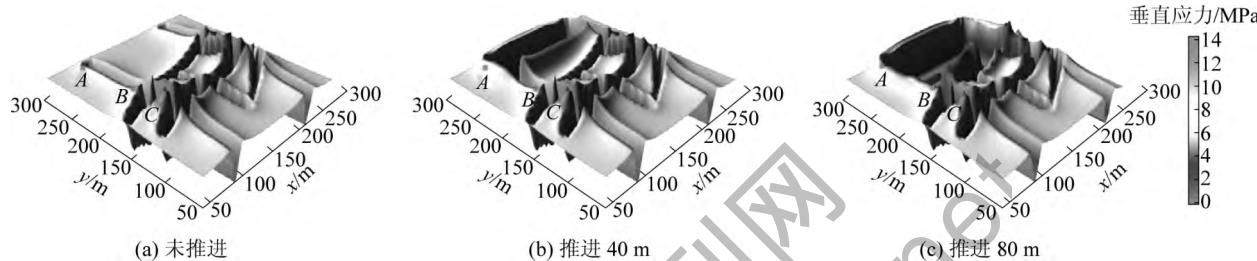
1) 巷道垂直应力分布。空巷影响下工作面不同推进度采场应力分布特征如图3所示,在运输平巷距空巷不同距离处布置不同测点。由图3可知,巷影响下工作面出现显著的应力重分布,其中在空

表1 模型各岩层岩石物理力学参数

Table1 Rock physical and mechanical parameters of each layer in model

岩性	密度/ (kg·m ⁻³)	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)
灰岩	2 670	25.5	16.2	18.3	40
中粒砂岩	2 770	32.0	25.5	20.5	38
细粒砂岩	2 440	28.6	21.0	14.1	36
砂质页岩	2 300	18.8	18.0	5.3	29
煤	1 421	3.7	1.5	4.0	20
砂质泥岩	2 200	20.4	7.4	3.5	25

空巷煤柱边缘出现应力集中; 工作面未推进时 A 点在运输巷尾端, 几乎不受空巷影响; B 点受空巷影响较大, 垂直应力明显增大, 应力集中系数为 1.83; 在运输平巷与空巷相交处, 即 C 点, 受空巷附近煤柱应力集中效应影响, 其应力达到峰值 14 MPa, 应力集中系数为 2.00。当工作面不断推进, 尤其工作面推进至其超前应力影响范围达到 C 点时, 该处的垂直应力会进一步增加; 由此可见, C 点在空巷影响下其应力分布特征发生显著变化。

图3 工作面不同推进过程中围岩垂直应力分布($z=0$)Fig.3 Distribution of vertical stress in surrounding rock with different advancement of working face($z=0$)

2) 巷道围岩塑性区分布。基于运输平巷各处围岩的垂直应力分布, 对塑性区进行研究可了解巷道围岩的破坏情况: A、B 两测点塑性区形态基本一致, 但受到空巷影响 B 测点塑性区范围略微增大, 其顶板塑性区深度与 A 测点相同, 同深度的塑性区宽度均比 A 测点大 3 m 左右; 两帮塑性区较 A 测点在巷道中部拓宽; 底板塑性区范围大致相同。C 测点受空巷影响显著, 运输巷与空巷围岩塑性区联接在一起且相互影响: 顶板塑性区深度增大约 4 m, 煤壁帮略微拓宽, 而煤柱帮破坏程度加深; 底板塑性区范围也因空巷影响而拓宽, 如图 4 所示。

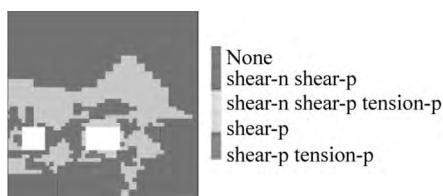


图4 C 测点塑性区分布

Fig.4 Distribution of plastic zone in C site

3 9103 运输平巷支护优化设计

支护设计对于充分发挥锚杆支护的优越性和保证巷道安全具有重要意义, 合理的支护形式和参数不仅能够有效控制围岩变形, 还能避免支护强度过剩, 浪费支护材料^[19]。9103 运输平巷采用“锚杆+

锚索+钢筋钢带+塑编网”支护方式, 详细支护参数优化叙述如下。

1) 支护方案 1——巷道原支护方案。顶板支护采用 12 号钢筋钢带配 $\varnothing 18 \text{ mm} \times 2 400 \text{ mm}$ 普通圆钢树脂锚杆支护, 每排打注 6 根, 锚杆间距 800 mm、排距 800 mm, 每 3 排锚杆打 1 排 $\varnothing 15.24 \text{ mm} \times 5 200 \text{ mm}$ 锚索, 锚索打在 2 排锚杆中间, 每排布置 2 根, 排距 2 400 mm。

2) 支护方案 2——优化支护方案。顶板支护钢带上打注 5 根锚杆, 锚杆间距 1 000 mm、排距 1 050 mm, 每 3 排锚杆打 1 根锚索, 锚索布置在巷中, 排距 3 150 mm, 优化支护方案如图 5 所示。

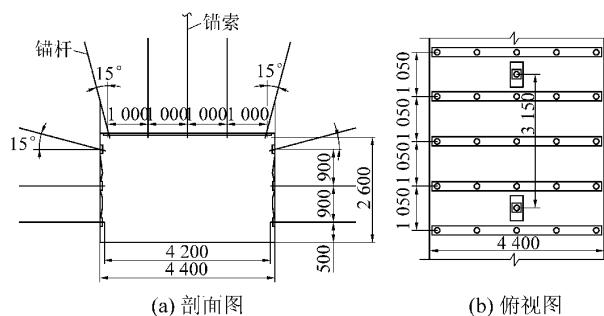


图5 巷道优化支护方案断面

Fig.5 Sectional drawing of optimized support method for roadways

2 种支护方案两帮支护方式相同: 煤柱帮采用 $\varnothing 16 \text{ mm} \times 1 800 \text{ mm}$ 的普通圆钢锚杆支护; 采帮采用

$\phi 18\text{ mm} \times 1800\text{ mm}$ 的玻璃钢锚杆支护, 锚杆间距 900 mm、排距 1 050 mm。

此外, 顶板锚杆锚杆预紧力矩为 $150\text{ N} \cdot \text{m}$, 帮部锚杆预紧力矩为 $120\text{ N} \cdot \text{m}$ 。

3.1 不同支护方案巷道围岩塑性区分布特征

前文分析得出空巷与回采巷道相交处巷道围岩稳定性最差, 因此选取 C 点进行主要研究。在工作面未推进时不同支护条件下的巷道围岩塑性区分布如图 6 所示。

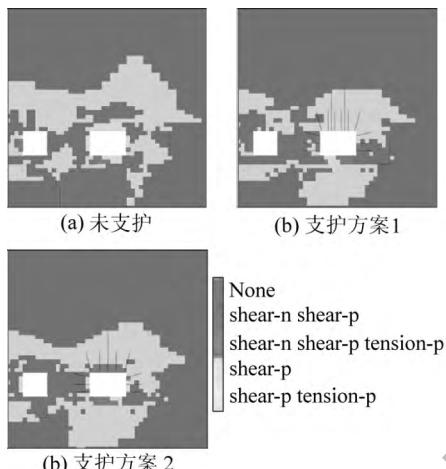


图 6 不同支护条件下 C 测点塑性区分布

Fig. 6 Distribution of plastic zone in C site with different support conditions

支护后的巷道围岩塑性区范围显著减小: 顶板塑性区深度减少 $3\sim 4\text{ m}$, 煤壁帮塑性区深度减少 $1\sim 2\text{ m}$, 底板塑性区也明显缩小。支护后, 在运输巷及空巷的煤柱帮上方, 即巷道煤柱帮的肩角处, 塑性区形成典型的下凹区域, 说明在支护条件下巷道围岩受到支护措施的约束, 围岩条件得到明显改善。支护方案 1 的支护效果优于方案 2, 但两方案差别较小。

3.2 工作面推进中巷道围岩变形规律

通过数值模拟获取工作面不同推进度时各支护条件下 C 测点的围岩移近量, 如图 7 所示。支护前后, 巷道顶底板及两帮移近量变化较大且两帮移近量大于顶底板移近量; 工作面推进初期, 采动应力对该处巷道影响小, 巷道围岩几乎不变; 当工作面推进至测点前方 30 m 处, 巷道顶底板移近量开始增加, 随工作面继续推进, 变形急剧上升; 两支护方案下巷道顶底板移近量差距较小, 最大为 5 mm ; 采动影响下两方案顶底板移近量及变化规律几乎一致。

两帮移近量随工作面推进变化不明显。工作面

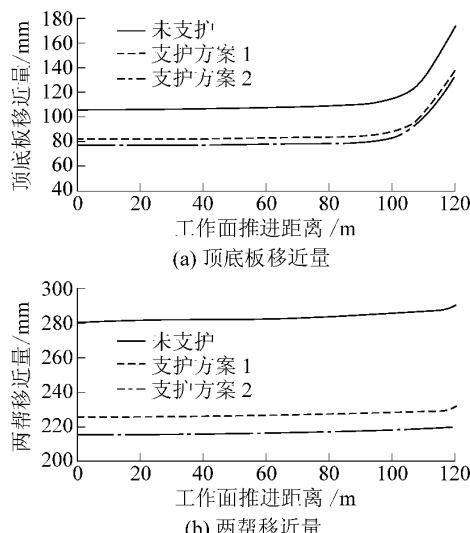


图 7 不同支护条件下巷道围岩移近量

随工作面推进变化曲线

Fig. 7 Deformation curves of roadway surrounding rock in process of mining with different support conditions

开挖初期, 两帮变形已处在较高水平, 随工作面不断推进, 两帮变形略有提高。支护方案 1 下的两帮变形比支护方案 2 低约 12 mm 。

综上所述, 巷道在支护作用下其围岩稳定性得到提升。支护方案 1 对于巷道围岩的支护效果优于方案 2, 但支护效果提升不显著。因此, 在保证工作面开采过程中巷道围岩稳定性的前提下, 考虑到矿井的生产效率和经济效益, 建议采用支护方案 2 对工作面回采巷道进行支护。

4 现场巷道围岩结构观测

钻孔窥视观测结果对于巷道围岩变形与破坏机理研究, 巷道支护与加固设计, 工程质量检测与支护加固效果评价等方面具有重要意义^[20-21]。利用钻孔窥视仪, 可获取巷道围岩煤岩岩性、厚度、结构特征及变形破坏等相关内容。目前, 9103 运输平巷空巷影响段采用支护方案 2 进行加固, 分析可知: 顶板岩性以泥岩、灰岩为主; 顶板 4 m 处发育 2 条垂直裂隙, 裂隙延伸长度约 30 cm ; 顶板 2 m 处存在原生裂隙, 且被方解石充填, 因该矿物强度较低, 故该处为岩体弱结构面, 易发生破裂; 顶板岩层中的该弱结构面均状态良好, 未发生破坏。因此, 在优化支护作用下, 空巷附近运输平巷顶板岩层裂隙发育少, 完整性较好。

5 结 论

1) 空巷影响下工作面出现显著的应力重分布,

空巷煤柱边缘出现应力集中;附近回采巷道垂直应力明显增大;当工作面推进且其超前应力影响范围达到该处,垂直应力会进一步增加。空巷与运输巷相交处,运输巷与空巷围岩塑性区联接在一起且相互影响:顶板塑性区深度增大,底板及两帮塑性区范围拓宽。

2) 支护作用下巷道围岩塑性区范围及围岩变形明显减小,当工作面推进至距测点30 m处时,巷道顶底板移近量急剧增加。支护方案1对于巷道围岩的支护效果优于方案2,但支护效果提升不显著。

3) 对空巷附近回采巷道进行钻孔窥视探测,获得巷道顶板围岩特征:顶板以泥岩、灰岩和细砂岩为主,顶板岩层中仅2条较短的垂直裂隙,其他部分较为完整。在优化支护方案下空巷附近运输平巷顶板岩层裂隙发育少,完整性较好。

参考文献(References):

- [1] 郭金刚.综采放顶煤工作面高冒空巷充填技术[J].中国矿业学院学报,2002,31(6):626-629.
Guo Jingang.Technique of filling roof-collapsed roadway with material with high water content in fully-mechanized top-coal caving faces[J].Journal of China University of Mining & Technology,2002,31(6):626-629.
- [2] 段春生.综采工作面过空巷支护实践研究[J].煤炭工程,2010,(5):37-39.
Duan Chunsheng.Technique of filling roof-collapsed roadway with material with high water content in fully-mechanized top-coal caving faces[J].Journal of China University of Mining & Technology,2010,(5):37-39.
- [3] 温庆华,周海丰.大采高综采工作面过空巷关键技术研究[J].煤炭工程,2009,(1):54-56.
Wen Qinghua Zhou Haifeng.Research on principle of roof stability of abandoned workings and supporting technology in fully-mechanized working face[J].Coal Engineering,2009,(1):54-56.
- [4] Wang Jinhua.Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines[J].International Journal of Coal Science & Technology,2014,1(3):253-260.
- [5] 刘畅,弓培林,王开,等.复采工作面过空巷顶板稳定性[J].煤炭学报,2015,40(2):314-322.
Liu Chang,Gong Peilin,Wang Kai et al.Roof stability for repeated mining workspace passing through abandoned parallel gateway [J].Journal of China Coal Society,2015,40(2):314-322.
- [6] 柏建彪,侯朝炯.空巷顶板稳定性原理及支护技术研究[J].煤炭学报,2005,30(1):8-11.
Bai Jianbiao,Hou Chaojiong.Research on principle of roof stability of abandoned workings and supporting technology [J].Journal of China Coal Society,2005,30(1):8-11.
- [7] 张自政,柏建彪,韩志婷,等.空巷顶板稳定性力学分析及充填技术研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(2):194-198.
Zhang Zizheng,Bai Jianbiao,Han Zhiting et al.Roof mechanics analysis and backfill technology for abandoned roadway [J].Journal of Mining & Safety Engineering,2013,30(2):194-198.
- [8] 谢生荣,李世俊,魏臻,等.综放工作面过空巷时支架-围岩稳定性控制[J].煤炭学报,2015,40(3):502-508.
Xie Shengrong,Li Shijun,Wei Zhen et al.Stability control of support-surrounding rock system during fully mechanized caving face crossing abandoned roadway period [J].Journal of China Coal Society,2015,40(3):502-508.
- [9] 周海丰.神东矿区大采高综采工作面过空巷期间的岩层控制研究[J].神华科技,2009,7(4):22-25.
Zhou Haifeng.The research of strata control for fully-mechanized coal face with large mining height while passing through the empty drift [J].Shenhua Science and Technology,2009,7(4):22-25.
- [10] 郑文翔.长壁工作面过空巷顶板稳定性动态特征研究[J].煤矿安全,2014,45(4):51-57.
Zheng Wenxiang.Study on stability and dynamic characteristics of roof in mining face crossing abandoned roadways [J].Safety in Coal Mines,2014,45(4):51-57.
- [11] 冯来荣,梁志俊.注浆加固技术在综采面过空巷中的应用[J].煤矿开采,2009,14(1):67-69.
Feng Lairong,Liang Zhijun.Application of reinforcement technology with grouting in full-mechanized mining through empty roadway [J].Coal Mining Technology,2009,14(1):67-69.
- [12] 罗武贤,任海兵,王琳.多位态空巷超高水材料充填技术与实践[J].矿业工程研究,2014,29(1):58-62.
Luo Wuxian,Ren Haibing,Wang Lin.The technology and practice of filling diverse position abandoned laneaway with super-high water materials [J].Mineral Engineering Research,2014,29(1):58-62.
- [13] 唐海波.条带式残煤工作面过空巷顶板应力和围岩变形规律研究[D].太原:太原理工大学,2015:40-42.
- [14] 郭晓彦.望田煤业旧采区内遗留空巷稳定性的数值分析[J].山西煤炭,2014,34(7):45-49.
Guo Xiaoyan.Numerical analysis on stability of left-over abandoned roadways in old mining areas in Wangtian Coal Co.,Ltd. [J].Shanxi Coal,2014,34(7):45-49.
- [15] 李颂奇,江东海,刘畅.综放残煤复采过空巷群时围岩应力相似模拟[J].煤炭技术,2014,33(10):150-152.
Li Songqi,Jiang Donghai,Liu Chang.Similar simulation of surrounding rock stress when residual coal mining attached to abandoned roadway in full-mechanized caving [J].Coal Technology,2014,33(10):150-152.
- [16] 杜科科,吴士良,初艳鹏.大采高综采工作面过空巷支护设计研究[J].山东煤炭科技,2010,(7):127-128.
Du Keke,Wu Shiliang,Chu Yanpeng.Study on support design of fully mechanized coal mining face through the abandoned roadway [J].Shandong Coal Technology,2010,(7):127-128.
- [17] 李卫彬.王庄煤矿首个煤柱工作面空巷加固技术探讨[J].科

(下转第139页)

- Zhou Xiaomin ,Chen Jianhua ,Luo Xiaoqing.Research on the preliminary thickness design of shaft lining in porous rock aquifer [J]. Journal of China Coal Society 2009 ,34(9) : 1174–1178.
- [5] 陈祥恩 杜长龙.马泰壕煤矿斜井冻结施工技术 [J].煤炭科学技术 2009 ,37(11) : 21–23.
- Chen Xiangen ,Du Changlong.Freeze construction technology of mine inclined shaft in Mataihao mine [J].Coal Science and Technology 2009 ,37(11) : 21–23.
- [6] 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) : 21–23.
- 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) : 21–23.
- [7] 陈章庆 ,张步俊.斜井冻结壁厚度计算方法 [J].建井技术 ,2013 ,34(2) : 39–42.
- Chen Zhangqing ,Zhang Bujun.Calculation method on thickness of frozen wall of inclined shaft [J].Mine Construction Technology ,2013 ,34(2) : 39–42.
- [8] 袁 辉 邓 纶 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 Jun ,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.
- [9] 陈志宇 张 勇 陆 路.沿轴线冻结的斜井冻结温度场分布规律模拟研究 [J].煤炭科学技术 2013 ,41(6) : 46–49.
- Chen Zhiyu ,Zhang Yong ,Lu Lu.Simulation experiment study on freezing temperature field of mine axial freezing inclined shaft [J].Coal Science and Technology 2013 ,41(6) : 46–49.
- [10] GB 50415—2007 煤矿斜井井筒及硐室设计规范 [S].
- [11] 王千星.斜井冻结法凿井过程中冻结壁与井壁的受力与变形规律研究 [D].徐州: 中国矿业大学 ,2014.
- Wang Qianxing.Study on the stress and deformation law of inclined shaft frozen wall and shaft lining during freezing sinking [J].Xuzhou: China University of Mining and Technology 2014.
- [12] 杜子博.斜井冻结井壁内壁力学特性与设计方法研究 [D].徐州: 中国矿业大学 2013.
- Du Zibo.Study on the mechanical property and design method of the freezing inner wall in inclined shaft [J].Xuzhou: China University of Mining and Technology 2013.
- [13] 杨仁树 王千星.斜井冻结凿井数值模拟方法 [J].科技导报 ,2015 ,33(12) : 38–43.
- Yang Renshu ,Wang Qianxing.Method of numerical simulations for inclined shaft freezing sinking [J].Science & Technology Review 2015 ,33(12) : 38–43.
- [14] GB50384—2007 煤矿立井井筒及硐室设计规范 [S].
- [15] 李 围.隧道与地下工程 ANSYS 实例分析 [M].北京: 中国水利水电出版社 2008: 161–163.
- [16] 张 驰.富水岩层中新型单层冻结井壁关键施工技术与工艺研究 [D].徐州: 中国矿业大学 2012.
- Zhang Chi.Study on key construction technologies of the new monolayer freezing shaft lining in deep water-rich bed rock [J].Xuzhou: China University of Mining and Technology ,2012.
- [17] 刘爱华 杨 清 吴均平.ANSYS 三维地应力场数值模拟方法应用研究 [J].地质力学学报 2013 ,19(2) : 133–142.
- Liu Aihua ,Yang Qing ,Wu Junping.A practical ANSYS 3-D numerical simulation method for in-situ stress field [J].Journal of Geomechanics 2013 ,19(2) : 133–142.
- [18] 王衍森 文 凯.深厚表土中冻结壁与井壁相互作用的数值分析 [J].岩土工程学报 2014 ,36(6) : 1142–1146.
- Wang Yansen ,Wen Kai.Numerical analysis of interaction between freezing wall and shaft lining in deep alluvia [J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2014 ,36(6) : 1142–1146.
- [19] 王烨晟.斜井冻结壁解冻温度场研究 [D].徐州: 中国矿业大学 2011.
- Wang Yeseng.Study on thawing temperature field in frozen wall of inclined shaft [J].Xuzhou: China University of Mining and Technology 2011.
- [20] TB10003—2005.铁路隧道设计规范 [S].

(上接第 132 页)

- 技情报开发与经济 2011 ,21(16) : 220–221.
- Li Weibing.Probe into the Reinforcement Technique for the Abandoned Roadway in the First Pillar Mining Face of Wangzhuang Coal Mine [J].Sci-Tech Information Development & Economy ,2012 ,40(11) : 45–49.
- [18] 刘民强.综采工作面过空巷的支护效果浅析 [J].山西煤炭 ,2010 ,30(3) : 68–71.
- Liu Minqiang.The Support of Fully-mechanized Face Crossing Gob [J].Shanxi Coal ,2010 ,30(3) : 68–71.
- [19] Kang Hongpu.Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: a review [J].International Jour-
- nal of Coal Science & Technology 2014 ,1(3) : 261–277.
- [20] 康红普 司林坡 苏 波.煤岩体钻孔结构观测方法及应用 [J].煤炭学报 2010 ,35(12) : 1949–1956.
- Kang Hongpu ,Si Linpo ,Su Bo.Borehole Observation Methods in Coal and Rock Mass and Their Applications [J].Journal of China Coal Society 2010 ,35(12) : 1949–1956.
- [21] 孙 辉 李桂臣 魏英豪 等.物探法结合钻孔窥视在岩体结构探测中的应用 [J].煤炭安全 2014 ,45(4) : 141–144.
- Sun Hui ,Li Guichen ,Wei Yinghao ,et al.Application of Physical Exploration Method Combined Borehole Observation in Detecting Rock Mass Structure [J].Safety in Coal Mines ,2014 ,45(4) : 141–144.