



移动扫码阅读

张德飞,张庆林,张洪伟,等.超深保护层开采巷道围岩控制技术研究[J].煤炭科学技术,2021,49(2):45-51. doi:10.13199/j.cnki.est.2021.02.006

ZHANG Defei, ZHANG Qinglin, ZHANG Hongwei, et al. Study on surrounding rock control technology for mining roadway in ultra-deep protective layer [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (2) : 45-51. doi: 10.13199/j.cnki.est.2021.02.006

# 超深保护层开采巷道围岩控制技术研究

张德飞<sup>1</sup>,张庆林<sup>2</sup>,张洪伟<sup>1</sup>,卢志国<sup>3</sup>,郑仰发<sup>3</sup>,范明建<sup>3</sup>

(1.新汶矿业集团有限责任公司 华丰煤矿,山东 泰安 271413;2.新汶矿业集团有限责任公司 生产技术部,山东 泰安 271223;  
3.煤炭科学研究院 开采研究分院,北京 100013)

**摘要:**华丰煤矿1 300 m超深保护层回采巷道稳定性控制是影响矿井安全高效生产的关键问题。基于现场地质力学综合测试、围岩非均匀性破坏机理研究,提出了超高强热处理预应力锚杆-锚注联合支护方案。研发了700 MPa级超高强热处理锚杆,其破断强度达850 MPa,冲击吸收功达100 J,并首次在1 300 m埋深煤矿巷道进行了工业性试验。开展了巷道锚杆支护力、顶板四点离层与围岩钻孔应力等多参数变化在线监测,分析得出:超深巷道在爆破开挖扰动下,距离掘进工作面80 m后围岩整体变形基本稳定,但围岩深部应力仍然长期蠕变且呈现大幅值增降循环规律。试验结果表明,相比于同巷顶板全锚索支护方式,锚杆-锚注联合支护下回采超前段巷道变形量整体降低了50%,掘进支护效率提高了20%。

**关键词:**超深保护层;围岩控制;锚杆-锚注联合支护;四点离层量监测;非均匀性变形

**中图分类号:**TD353      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2021)02-0045-07

## Study on surrounding rock control technology for mining roadway in ultra-deep protective layer

ZHANG Defei<sup>1</sup>, ZHANG Qinglin<sup>2</sup>, ZHANG Hongwei<sup>1</sup>, LU Zhiguo<sup>3</sup>, ZHENG Yangfa<sup>3</sup>, FAN Mingjian<sup>3</sup>

(1.Huafeng Coal Mine, Xinwen Mining Group Co., Ltd., Tai'an 271413, China; 2. Production Technology Department, Xinwen Mining Group Co., Ltd., Tai'an 271413, China; 3. Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The stability control of the mining roadway in the 1 300 m ultra-deep protective layer of Huafeng Colliery is a bottleneck problem affecting the safe and efficient production of the mine. Based on the comprehensive testing of on-site geomechanics and the study of the specific failure mechanism of surrounding rock, a combined support plan of ultra-high-strength heat-treated pre-stressed bolt with cable-grouting is proposed. The 700 MPa grade ultra-high-strength heat-treated bolt was developed with breaking strength of 850 MPa and an impact absorption power of 100 J; underground industrial test was firstly carried out in the 1 300 m deep coal mine roadway. The monitoring of multi-parameter changes such as roadway bolt support force, four-point roof separation and surrounding rock borehole stress was carried out on site, and the analysis obtained: under the disturbance of blasting excavation, the overall surrounding rock deformation is basically stable after a distance of 80 m from the front of the ultra-deep roadway; however, the deep stress of the surrounding rock still creeps for a long time and exhibits a large-scale increase and decrease cycle. The test results show that, compared with the roof full-anchor cable support method, the overall deformation of the roadway in the super front section is reduced by 50%, and the excavation support efficiency is increased by 20%.

**Key words:** ultra-deep protective layer; surrounding rock control; combined anchor and grouting support; four-point separation meter; non-uniform deformation

## 0 引言

随着我国煤炭开采规模的提升以及经济发展需

求的快速增长,浅部资源逐渐枯竭,深部开采成为必然发展趋势,习近平总书记提出“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”。我国已探明

收稿日期:2020-09-12;责任编辑:李金松

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51704156);国家重点研发计划资助项目(2017YFC0603006)

作者简介:张德飞(1986—),男,云南宣威人,高级工程师,现任新汶矿业集团有限责任公司华丰煤矿总工程师。E-mail:15753865616@163.com

1 000 m 以深煤炭资源探明储量占我国煤炭资源总量 49%, 超千米深井煤层开采过程中, 回采巷道受强烈采动持续大变形、岩层巷道安全高效支护控制等系列难题亟待解决<sup>[1-2]</sup>。

张农等<sup>[3]</sup>研究认为巷道受采动影响时围岩应力可达到数倍、甚至近 10 倍于原岩应力, 深部巷道原岩应力大, 开挖引起集中应力对巷道围岩破坏更剧烈, 并且表现出与浅部巷道不同的特征, 形成其独特理论。高应力作用下, 巷道围岩强烈扩容、持续大变形、严重破坏等非线性特征明显<sup>[4]</sup>。深部巷道围岩分区破坏现象突出<sup>[5-7]</sup>, 陈昊祥等<sup>[8]</sup>建立深部巷道围岩分区破裂非线性模型。高富强等<sup>[9]</sup>采用 FLAC 对巷道分区破裂进行数值模拟, 并分析巷道形状对分区破裂的影响。李术才等<sup>[10]</sup>研究了深部巷道围岩分区破裂现象的现场检测技术。黄炳香等<sup>[11]</sup>指出深部巷道围岩变形由脆性向塑性转变, 围岩流变、扩容不断增加, 并对巷道围岩流变及结构失稳大变形理论进行了研究。在深部巷道围岩控制方面, 康红普<sup>[12]</sup>提出了高预应力锚杆一次支护理论, 研发高压劈裂注浆改性技术, 开发水力压裂技术, 形成高预应力锚杆-注浆改性-水力压裂卸压“三主动”协同支护理念。马念杰等<sup>[13]</sup>提出了蝶形塑性区理论, 及深部大变形控制理论。刘泉声等<sup>[14]</sup>认为深部岩石工程稳定性受高地应力、渗透压力及温度梯度影响, 并提出了超高压锚杆支护-注浆固结-能量释放等控制方法。柏建彪等<sup>[15]</sup>认为深部巷道控制的基本方法为提高围岩自承能力, 转移围岩高应力。勾攀峰等<sup>[16]</sup>提出了基于强力支护原理的巷道锚杆-锚索协调支护技术。姜耀东等<sup>[17]</sup>分析高预应力锚杆、强力锚索、金属网和喷浆加固以及 U 型支架对软岩控制的互补作用, 提出了互补综合治理方案。文献[18-21]针对深部不同功能类型的巷道研究了动压大变形破坏及防冲条件的围岩控制技术。

笔者以新汶矿业集团有限责任公司华丰煤矿埋深 1 300 m 的回采巷道为工程背景, 基于现场地质力学综合测试和围岩非均匀性破坏机理研究, 提出预应力超高压锚杆-锚注锚索联合支护方案; 并实施了现场井下工业性试验, 通过锚杆支护力、围岩应力与顶板多点离层等综合监测分析, 验证了巷道支护安全稳定性。可为类似超深巷道围岩控制提供借鉴。

## 1 工程地质概况

华丰煤矿已有百年开采历史, 采深超过千米之后, 4 号主采厚煤层冲击地压显现愈加强烈。保护

层开采可降低被保护层的冲击危险性, 是经济有效的卸压防冲方法。为从矿井“区域防冲”上治理冲击地压灾害, 矿井布局为先开采底部 6 号煤层作为保护层(无煤柱开采), 充分卸压后再开采上部 4 号厚煤层。

2613 回采工作面下平巷位于井下五水平下山二采区-1 180 m 水平, 埋深 1 300 m 左右, 目前是华丰煤矿采深最大的煤层巷道, 直墙半圆拱断面, 掘进宽度 4 300 mm, 高度 3 350 mm。6 号煤层为结构简单薄煤层, 平均厚度 1.1 m, 厚度稳定, 黑色, 光泽较暗, 为亮-半暗型煤, 煤层平均倾角 32°, 周围无工作面掘进采动影响。煤层综合柱状图如图 1 所示, 顶板为粉砂岩(灰黑色, I b 级, 水平层理发育, 夹白色细条纹, 斜向节理, 易冒落)、中砂岩(厚层状, 多层理结构), 底板为粉砂岩。

## 2 现场围岩地质力学综合测试

### 2.1 地应力测试

采用小孔径水压致裂法在华丰煤矿井下巷道顶板进行 2 个测点的地应力测量。结果表明, -1 180 m 水平回风大巷地应力场为超高地应力区域, 最大水平主应力最大值为 31.19 MPa, 最小值为 29.34 MPa; 最小水平主应力最大值为 18.82 MPa, 最小值为 14.74 MPa; 垂直主应力最大值为 31.85 MPa, 最小值为 31.78 MPa。最大水平主应力方向 N (46.8°—67.7°) W, 以 NWW 方向为主。原岩应力场为自重应力场类型, 自重应力场中巷道开挖后侧帮受应力重分布影响显著, 造成其变形破坏大。

### 2.2 顶板围岩窥视

通过 2613 回采工作面下平巷掘进工作面顶板锚索钻孔进行围岩结构窥视, 孔壁平面展开如图 2 所示。钻孔浅部 0.2~0.5 m、1.1~1.3 m 范围内局部存在明显张开裂隙、破碎情况, 顶板砂岩自然赋存结构完整性一般。

巷道掘进过程短时期内, 受超高地压卸压扰动影响, 常规锚杆支护范围内、围岩表面浅部出现破碎变形情况, 层理间出现逐渐滑移错动现象。

## 3 巷道非均匀性变形破坏机理

### 3.1 现场勘查

通过巷道现场勘查发现, 2613 回采工作面下平巷(一段)巷道掘进后下帮破碎鼓包, 最大变形量 1 000 mm, 回采过程超前支护段两帮移近量、底鼓量均超过 1.5 m, 巷道回缩率超过 50%。严重影响矿井安全高效生产。

煤岩名称	厚度/m	累厚/m	岩性描述
黏土岩	1.3	1.3	灰色,上部夹粉砂岩条带,泥质结构,疏松,易碎,具滑面
煤1	0.7	2.0	以块状及粒状为主,亮一半暗型煤
粉砂岩	9.5	11.5	顶部0.3 m黏土岩,下部粉砂岩,断口平整,含大量透镜体
粉细砂岩互层	2.2	13.7	灰色,以粉砂岩主,下部以粉砂岩主纯净,层理发育
中砂岩	9.7	23.4	灰白色,以石英为主要成分,纯净,斜斜层理发育,钙质胶结,厚层状、致密、坚硬、坚固性系数5.0
粉细砂岩互层	1.9	25.3	以深灰色粉砂岩为主,夹浅灰色细砂岩条带,互层状
细砂岩	9.2	34.5	灰色,斜层理发育,具条带状菱铁矿砾粒,层面发育硫铁矿晶体,钙质胶结,坚固性系数3.5
粉砂岩	2.5	37.0	深灰色、层理发育,含植物叶化石及片状硫化铁晶体
4号煤	6.5	43.5	半暗-亮煤,以末状及粒状为主
粉砂岩	1.7	45.2	灰黑色,层理发育,夹细砂岩条带泥质胶结,坚固性系数3.5
中砂岩	4.2	49.4	灰白色,层理发育,泥钙质胶结,厚层状,坚固性系数5.0
粉砂岩	4.8	54.2	灰黑色,层理发育,夹细砂岩条带,泥质胶结,坚固性系数3.5
粗砂岩	3.5	57.7	灰白色,泥钙质胶结,厚层状,坚固性系数5.0
细砂岩	4.8	62.5	灰色,层理发育,泥质胶结,坚固性系数5.5
中砂岩	5.2	67.7	灰白色,层理发育,泥质胶结,厚层状,坚固性系数5.0
粉砂岩	3.8	71.5	灰黑色,厚层状,泥质胶结,坚固性系数3.0
黏土岩	1.0	72.5	灰白色,遇水膨胀
粉砂岩	8.2	80.7	灰白-灰黑色,夹细砂岩条带,钙泥质胶结
中砂岩	1.6	82.3	灰白色,层理发育,泥质胶结,厚层状,坚固性系数5.0
粉砂岩	1.9	84.2	灰黑色,层理发育,夹细砂岩条带,钙质胶结,坚固性系数3.0
6号煤	1.1	85.3	半暗-亮煤
粉砂岩	2.4	87.7	灰黑色,层理发育,钙质胶结,坚固性系数3.0

图1 华丰煤矿各煤层综合柱状图

Fig.1 Comprehensive histogram of each coal seam in Huafeng Colliery

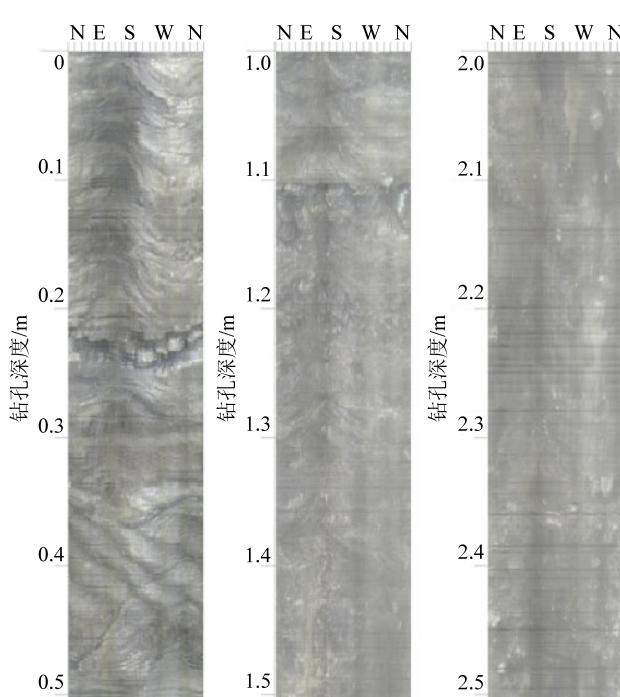


图2 顶板岩层结构钻孔窥视展开

Fig.2 Expanded view in roof strata structure of drilling holes

巷道大变形影响因素包括以下2个方面:

1) 地质条件方面。首先,超高地应力岩层开挖后,水平主应力差值大,最大差值达18.1 MPa。由于高偏应力的作用,导致巷道开挖后煤岩体内部节理、裂隙、裂纹张开,出现新裂纹,加快了巷道围岩破坏速度。巷道埋深大,地应力水平、偏应力高是导致巷道变形破坏严重、维护难度大的根本原因;其次,岩层32°大倾角在深部高地应力的作用下易造成围岩层理间移动或滑动现象的发生,为巷道支护带来困难。井下现场调查发现,一般新掘拱形巷道的拱顶下拱部最先发生破坏,出现网兜鼓包、岩体破碎,该部位的锚杆剪切破断概率高。巷道围岩首先从顶板的下拱部及下帮垂直岩层方向开始出现破坏,同时在顶板很大范围内出现离层现象,造成巷道出现非均匀性破坏。

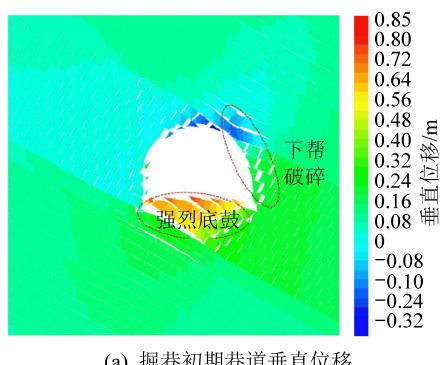
2) 支护技术方面。支护材料主要为600号热轧细牙全螺纹锚杆,钢材冲击吸收功平均32.3 J,受深部冲击能量频繁释放影响,孔内岩层错动容易将杆体无明显颈缩下剪断。顶板注浆锚索出现在锚具与托板间发生破断问题,主要原因是缺少调心球垫,安装预紧时造成钢丝受偏斜张拉,围岩变形时分股破断。

此外,顶板局部补强锚杆采用 MG400 号热轧全螺纹锚杆,破断力较低。锚索安装预紧力设计值 100 kN 偏低,不能充分发挥钢绞线材料主动支护力性能。以上支护材料的破坏失效进一步造成围岩大变形加剧。

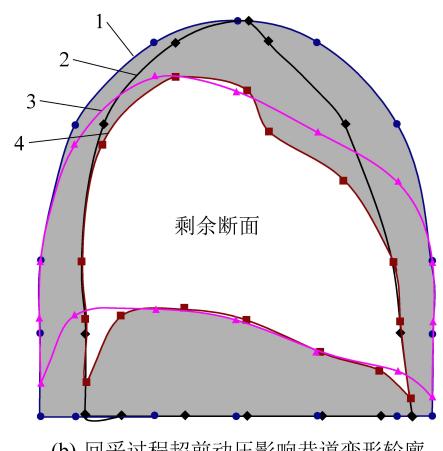
### 3.2 巷道破坏数值模拟分析

依据现场地质力学测量,采用 3DEC 离散元模拟软件研究 2613 回采工作面下平巷在掘进和回采全阶段的围岩应力重新分布与变形破坏情况。1 300 m 埋深垂直地应力为 32.5 MPa,第一、第二水平主应力分别为 30.3、16.8 MPa。巷道破坏模拟结果如图 3a 所示,巷道开挖后围岩表面受卸载差应力作用发生快速破坏,断面呈现非均匀性变形破坏特征,超深煤层巷道中,受岩层大倾角地质特征的影响,巷道下拱部及下帮位移量和底鼓量较大。

受工作面回采超前动压影响过程的巷道变形如图 3b 所示,巷道断面回缩率大于 50%。通过监测不同测点的垂直位移、水平位移及总位移绘制巷道变形轮廓线,直观清晰地反映出巷道围岩不同位置变形破坏形态,为巷道锚杆支护设计提供依据。



(a) 掘巷初期巷道垂直位移



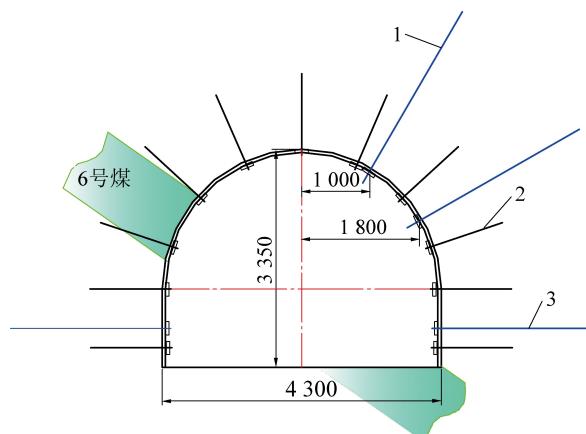
(b) 回采过程超前动压影响巷道变形轮廓

图 3 超深巷道掘进回采变形破坏模拟结果  
Fig.3 Simulation results of deformation and failure in ultra-deep roadway excavation

## 4 工程试验与监测分析

### 4.1 巷道支护方案

基于上述现场地质力学测试、巷道变形机理研究,提出了超高强热处理预应力锚杆-锚注锚索联合支护方案(图 4),对应力集中区进行锚索补强、注浆加固,并在 2613 回采工作面下平巷(二段)开展了巷道支护现场试验。



1—顶板注浆锚索;2—CRMG700 锚杆;3—帮注浆锚索

图 4 试验巷道新型支护布置

Fig.4 Layout drawing of new support for test roadway

1) 超高强锚杆材料: CRMG700 屈服强度 700 MPa, 屈服力不低于 266 kN, 极限拉断力不低于 323 kN, 断后延伸率不低于 18%, 冲击吸收功不低于 100 J。杆体直径 22 mm, 长度为 2.4 m, 杆尾螺纹规格为 M24, 螺纹长度 150 mm, 采用滚丝加工工艺成型。

锚杆间排距 900 mm×900 mm, 每排 11 根; 安装预紧转矩  $\geq 450 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 转化轴向预紧力 80~100 kN。

2) 先锚固后注浆锚索材料:  $\phi 22 \text{ mm}$ , 1×9 股高强度低松弛中空预应力钢绞线, 破断拉力不低于 480 kN, 最大力延伸率不小于 5%, 配套封堵胶塞; 顶板用锚索长度 6 300 mm, 巷帮用锚索长度 4 300 mm, 钻孔直径 30 mm。锚索排距 1 800 mm, 每排 4 根, 顶板下拱部布置 2 根, 两帮各 1 根。锚索初始预紧力要求安装张拉损失后不低于 250 kN。注浆材料为 42.5 等级普通硅酸盐水泥, 混水搅拌时添加 ACZ-1 注浆剂(添加比例 8%)。距掘进工作面 50 m 后使用气动泵进行一次集中注浆, 终止压力不大于 3 MPa。

顶板护表构件采用六孔拱形 W 钢带, 规格尺寸为 4 300 mm×280 mm×4 mm, 巷帮采用 W 型四肋钢护板护表, 规格尺寸为 450 mm×280 mm×6 mm, 围

岩表面铺设8号菱形铁丝网。

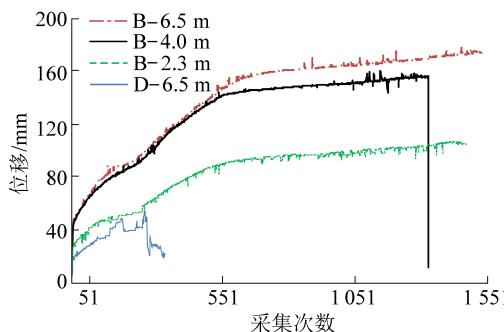
## 4.2 综合监测

1)锚杆支护力监测。在试验巷道距掘进工作面20 m处安装了全断面锚杆测力计,距掘进工作面24 m后锚杆所受稳定轴力比预紧载荷普遍增加1倍以上,全断面锚杆最大轴向拉力为261 kN(下帮拱肩4号锚杆)。

高预紧力锚杆增阻较快且容易达到稳定值,1号下帮中部锚杆在安装2 d后迅速增阻达到稳定值,4号锚杆在安装5 d后迅速增阻达到稳定值(超过杆体屈服力),受掘巷扰动时间空间效应均较短,距掘进工作面30 m左右时已基本达到承载稳定状态。对阻止围岩变形作用显著。低预紧力锚杆增阻缓慢,且受掘巷扰动时间空间效应均较长,距掘进工作面80 m后才基本达到稳定承载状态。稳定后承载值仍然较高,对阻止围岩变形作用较迟缓。

2)四点离层量监测。在巷道围岩内设计4个深度点进行相对离层监测,紧跟掘进工作面顶板、下帮拱脚各安装1套在线四点离层实时监测系统,钻孔内监测深度分别为2.3、4、5、6.5 m。

监测系统安装24 d后,巷帮监测钻孔内浅部0~2.3 m深度内(锚杆支护范围)围岩离层变形量104 mm,0~4 m深度范围内离层变形量155 mm,2.3~4.0 m深度范围围岩离层变形量51 mm。0~6.5 m深度范围内总离层变形量175 mm(仪器安装第4周内变形量未增加)。因此,分析可知,巷帮锚索支护范围的4 m深度内围岩离层变形量相对监测孔0~6.5 m深度范围的占比超过88.6%,说明围岩主要膨胀变形发生于距巷表4 m深度内。下帮各点深度围岩位移已基本稳定,顶板离层传感器的锚固点钢丝因孔内岩层破碎错动被剪断(图5)。



B-6.5 m、B-4 m、B-2.3 m—下帮钻孔6.5、4、2.3 m处监测点;

D-6.5 m—顶板钻孔6.5 m处监测点

图5 四点离层仪在线监测曲线

Fig.5 Online monitoring curve of four-point separator

3)钻孔应力监测。2613回采工作面下平巷(二段)安装了KJ649煤矿冲击地压监测系统,每隔25

m在上帮煤层内安装1组(2个)钻孔应力监测计,深度分别为5、10 m,初始预载压应力4.5 MPa,掘巷初期3个月内煤层应力变化曲线如图6所示。

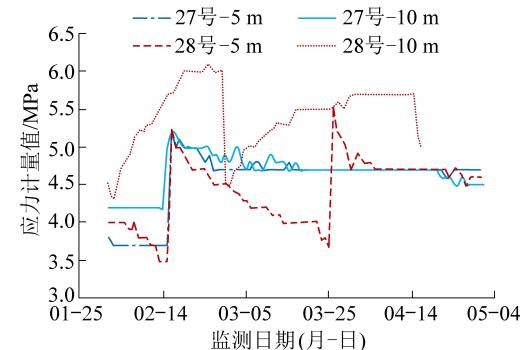


图6 钻孔应力计监测数据

Fig.6 Monitoring data of drilling stress gauge

连续监测分析可得:安装初期受巷道开挖扰动影响均出现钻孔应力迅速增大的现象,最大应力6.1 MPa,增阻比例35%。受超深部冲击能量多次作用后,钻孔应力呈现缓慢或较快降低的过程。之后出现应力重复增加-降低现象。钻孔应力在巷道开挖后至长期蠕变阶段呈现大幅值增降循环规律。

## 4.3 支护效果对比分析

1)采用700 MPa超高强热处理锚杆支护后,相比较于600号普通热轧全螺纹锚杆杆体,基本解决了其因冲击载荷而发生无颈缩破断的问题,巷帮锚杆承载屈服后被拉断的数量明显减少。

2)相比较于顶板全锚索支护方案,巷道两帮宽度最大回缩量1 600 mm以上,全巷需要刷帮扩修才能正常回采;新型700号锚杆新支护方案掘巷稳定后两帮平均收缩量478 mm;回采超前段巷帮最大回缩量800 mm,整体变形量减少50%,超高强锚杆试验巷段控制效果较好。

3)原支护方案掘进日进尺3 m(排距1 m),新支护方案掘进日进尺3.6 m(排距0.9 m),掘进速度提高了20%。顶板全锚索支护方案每米材料成本4 343.48元,700号锚杆方案后每米材料成本降低1 026.6元,减少材料成本比例23.6%。

## 5 结 论

1)1 300 m埋深回采巷道处于30 MPa以上超高高地应力场状态,受超高地压、煤岩层大倾角构造及层理发育影响,巷道掘进扰动后体现出非均匀性大变形特征。

2)综合现场地质力学测试与巷道变形破坏机理研究提出了超高强热处理预应力锚杆-锚注锚索联合支护方案。研发的CRMG700号热处理锚杆破

断强度达到850 MPa,冲击吸收功达100 J;首次在1 300 m埋深煤矿巷道进行了现场支护试验。700 MPa超高强热处理锚杆基本解决了热轧锚杆因冲击载荷下发生无颈缩破断情况,巷帮锚杆承载屈服后被拉断根数明显减少。

3)通过试验巷道掘进、回采多参数综合监测表明:1 300 m超深巷道在爆破开挖扰动下,整体围岩变形距离掘进工作面80 m后基本稳定;但围岩深部应力仍然长期蠕变且呈现大幅值增降循环规律。

4)相比顶板全锚索支护方案,新型超高强锚杆-注浆锚索联合支护巷道在回采阶段变形量整体降低50%,掘进支护效率提高20%,节省支护材料成本比例23.6%。为矿区超深部复杂巷道支护提供了新技术支撑。

#### 参考文献(References):

- [1] 谢和平,高 峰,鞠 杨,等.深部开采的定量界定与分析[J].煤炭学报,2015,40(1):1-10.  
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1):1-10.
- [2] 康红普,王国法,姜鹏飞,等.煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J].煤炭学报,2018,43(7):1789-1800.  
KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1 000 m [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7):1789-1800.
- [3] 张 农,李希勇,郑西贵,等.深部煤炭资源开采现状与技术挑战[C].泰安:全国煤矿千米深井开采技术座谈会,2013.  
ZHANG Nong, LI Xiyong, ZHENG Xigui, et al. Current situation and technical challenge of deep coal resources mining [C]// Taian: National Symposium on Mining Technology of 1 000 m Deep Mine in Coal Mines, 2013.
- [4] 牛双建,靖洪文,杨大方.深井巷道围岩主应力差演化规律物理模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S2):3811-3820.  
NIU Shuangjian, JING Hongwen, YANG Dafang. Physical simulation study of principal stress difference evolution law of surrounding rock of deep mine roadways [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2):3811-3820.
- [5] CLOETE D R, JAGER A J. The nature of the fracture zone in gold mines as revealed by diamond core drilling [J]. Association of Mine Managers, 1972, 11(5):103-104.
- [6] SHEMYAKIN E I, FISENKO G L, KURLENYA M V. Zonal disintegration of around underground workings, Part I-date of in situ observations[J]. Journal of Mining Science, 1986, 22(3):157-168.
- [7] 钱七虎,李树忱.深部岩体工程围岩分区破裂化现象研究综述[J].岩石力学与工程学报,2008,27(6):1278-1284.  
QIAN Qihu, LI Shuchen. A review of research on zonal
- disintegration phenomenon in deep rock mass engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1278-1284.
- [8] 陈昊祥,戚承志,李凯锐,等.深部巷道围岩分区破裂的非线性连续相变模型[J].岩土力学,2017,38(4):1032-1040.  
CHEN Haoxiang, QI Chengzhi, LI Kairui, et al. Nonlinear continuous phase transition model for zonal disintegration of rock masses around deep tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (4):1032-1040.
- [9] 高富强,康红普,林 健.深部巷道围岩分区破裂化数值模拟[J].煤炭学报,2010,35(1):21-25.  
GAO Fuqiang, KANG Hongpu, LIN Jian. Numerical simulation of zonal distriagation of surrounding rock mass in deep mine roadways [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1):21-25.
- [10] 李术才,王汉鹏,钱七虎,等.深部巷道围岩分区破裂化现象现场监测研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(8):1545-1553.  
LI Shucui, WANG Hanpeng, QIAN Qihu, et al. In-situ monitoring research on zonal disintegration of surrounding rock mass in deep mine roadways [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8):1545-1553.
- [11] 黄炳香,张 农,靖洪文,等.深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J].煤炭学报,2020,45(3):911-926.  
HUANG Bingxiang, ZHANG Nong, JING Hongwen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3):911-926
- [12] 康红普.我国煤矿巷道锚杆支护技术发展60年及展望[J].中国矿业大学学报,2016,45(6):1071-1081.  
KANG Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadway in China [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6):1071-1081.
- [13] 马念杰,李 季,赵志强.圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):206-213.  
MA Nianjie, LI Ji, ZHAO Zhiqiang. Study on the distribution law of partial stress field and plastic zone in surrounding rock of circular roadway [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2015, 44(2):206-213.
- [14] 刘泉声,卢超波,刘 滨,等.深部巷道注浆加固浆液扩散机理与应用研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(3):333-339.  
LIU Quansheng, LU Chaobo, LIU Bin, et al. Study on seriflux diffusion mechanism and application of grouting reinforcement in deep roadway [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(3):333-339.
- [15] 柏建彪,侯朝润.深部巷道围岩控制原理与应用研究[J].中国矿业大学学报,2006,35(2):145-148.  
BAI Jianbiao, HOU Chaojiong. Study on control principle and application of surrounding rock in deep roadway [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 35 (2): 145-148.
- [16] 勾攀峰,辛亚军,申艳梅,等.深井巷道两帮锚固体作用机理及

- 稳定性分析[J].采矿与安全工程学报,2013,30(1):7-13.  
GOU Panfeng,XIN Yajun,SHEN Yanmei,*et al.* Stability analysis and mechanism of two-side anchorage body in deep mine gateway [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30 (1) : 7-13.
- [17] 姜耀东,王宏伟,赵毅鑫.极软岩回采巷道互补控制支护技术研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12):2383-2390.  
JIANG Yaodong,WANG Hongwei,ZHAO Yixin.Study on complementary control support technology of mining roadway in extremely soft rock[J].Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(12):2383-2390.
- [18] 张博,田素川.沿空巷道顶板结构演化过程及围岩控制技术研究[J].煤炭科学技术,2019, 47(12) : 68-75.  
ZHANG Bo, TIAN Suchuan. Study on roof structure evolution process and surrounding rock control technology of gob-side roadway[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12) : 68-75.
- [19] 耿继业,王方田,张洋,等.高应力煤巷围岩控制关键技术研  
究[J].煤炭科学技术,2019,47(9):189-196.  
GENG Jiye,WANGFangtian,ZHANGYang,*et al.* Research on key control technology of surrounding rock in high stress roadway[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9) : 189-196.
- [20] 杨永刚,李世辉,李琰庆,等.深部一巷多用巷道围岩重构及大变形控制关键技术[J].煤炭科学技术, 2020, 48 (8) : 37-43.  
YANG Yonggang,LI Shihui,LI Yanqing,*et al.* Key techniques for surrounding rock reconstruction and large deformation control under deep and multi-purpose roadway conditions[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8) : 37-43.
- [21] 杨永刚,李世辉,李琰庆,等.深部一巷多用巷道围岩重构及大变形控制关键技术[J].煤炭科学技术,2020,48(8):37-43.  
YANG Yonggang,LI Shihui,LI Yanqing,*et al.* Key techniques for surrounding rock reconstruction and large deformation control under deep and multi-purpose roadway conditions[J] .Coal Science and Technology, 2020,48(8):37-43.