

淮南深部巷道挤压变形及其控制对策

张大庆¹, 黄 兴², 张国龙³, 李中彬³

(1. 淮南矿业(集团)有限责任公司 潘北煤矿, 安徽 淮南 232087; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 陕西华雁工程设计咨询有限责任公司, 陕西 西安 710054)

摘 要: 为了研究高地应力软岩巷道挤压变形及其控制对策, 根据实测地应力值和围岩力学参数, 分别从基于 Hoek - Brown 准则的解析计算和有限元数值计算进行了围岩稳定性分析, 计算结果显示巷道变形失稳严重, 拱顶位移和底臃量大, 与现场情况吻合; 此外, 根据 Hoek 挤压变形等级曲线判定该巷道围岩变形为非常严重的挤压变形。基于深部巷道围岩稳定性控制理论和“分步联合支护”理论制定了控制围岩挤压变形的支护方案, 通过有限元数值软件计算和现场监测验证了该支护方案的效果, 结果表明所提出的支护方案能够有效的控制围岩挤压变形。

关键词: 深部巷道; 高地应力软岩; 挤压变形; 控制对策

中图分类号: TD322

文献标志码: A

文章编号: 1003 - 496X(2013) 02 - 0046 - 04

Huainan Deep Roadway Squeezing Deformation and Its Control Countermeasures

ZHANG Da - qing¹, HUANG Xing², ZHANG Guo - long³, LI Zhong - bin³

(1. Panbei Coal Mine, Huainan Mining Industry (Group) Co., Ltd., Huainan 232001, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Shaanxi Huayan Engineering Design Consulting Limited Liability Company, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to study the squeezing deformation and control measures of soft roadway with high ground stress, according to the measured stress value and surrounding rock mechanical parameters, the stability of surrounding rock is analyzed based on the analytical calculation of Hoek - Brown and finite element numerical calculation, the results show that the deformation and failure is very serious after excavation, the crown displacement and the floor heave amount is very large, which is consistent with the site situation. The deformation of roadway surrounding rock is determined as very serious squeezing deformation according to Hoek squeezing deformation level curve. Based on the stability control theory of deep roadway surrounding rock and the theory of "step by step combined supporting", the control methods of are carried out. Through the finite element numerical calculation analysis and site monitoring, the evaluation of the supporting effect is verified, the results show that the proposed scheme of supporting achieves good effect and can control the squeezing deformation effectively.

Key words: deep roadway; soft rock with high ground stress; squeezing deformation; control countermeasures

当前, 国内外许多矿井相继进入深部开采阶段, 国有大型煤矿开采深度达 1 000 m 深的有数十处,

最大采深已超过 1 300 m^[1-2]。然而, 千米深部巷道与浅部巷道不同, 围岩所处高应力环境与其低强度

- [3] 屈庆栋. 采动上覆瓦斯卸压运移的“三带”理论及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
- [4] 涂敏, 黄乃斌, 刘宝安. 远距离下保护层开采上覆煤岩体卸压效应研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 418 - 421, 424.
- [5] 刘宝安. 下保护层开采上覆煤岩变形与卸压瓦斯抽采研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2006.
- [6] 吴仁伦, 许家林, 孔翔, 等. 长综放面采动上覆煤层的瓦斯卸压规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010,

27(1): 8 - 12, 18.

- [7] 钱鸣高, 缪协兴. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(3): 225 - 230.

作者简介: 梁海汀(1987 -), 男, 河南许昌人, 安徽理工大学在读硕士研究生, 现从事矿山压力与岩层控制方面的研究。

(收稿日期: 2012 - 06 - 12; 责任编辑: 梁绍权)

间的矛盾异常突出,极易产生强烈的挤压大变形,严重影响矿井安全生产和运营。

1 工程概况

淮南矿业集团朱集煤矿一水平 - 906 轨道大巷围岩主要为花斑泥岩,埋深 1 020 m,为典型的千米深井高地应力软岩巷道。巷道断面净宽 × 净高达到 5 400 mm × 4 700 mm^[3]。该巷道是连接采区和井底车场的永久性巷道,其稳定性是矿井正常生产和安全运营的保障,因此对其变形控制极为严格。

轨道大巷受巷道群——近距离胶带机大巷和回风大巷开挖二次应力场扰动叠加影响^[4],使得轨道大巷开挖后失稳严重,产生强烈的挤压大变形,顶板下沉、底臃量大,围岩变形速率大,且变形时效特性明显,开挖和支护较长时间后仍未稳定;多处 U 型钢支架倾斜、向巷道临空方向挤出,轨道偏斜,底板多处破裂等。

2 围岩挤压变形力学机制

2.1 围岩力学性质与地应力场

2.1.1 围岩力学性质

围岩主要为花斑泥岩,对采自该巷道的岩石试样进行单轴和常规三轴压缩试验,获得了围岩基本力学参数,见表 1。

表 1 围岩基本力学参数

力学参数	取值范围	平均值
抗压强度 / MPa	41 ~ 47.7	44.6
弹模 / GPa	28.59 ~ 35.51	31.68
泊松比	0.15 ~ 0.3	0.22
黏聚力 / MPa	0.45 ~ 0.73	0.62
内摩擦角 / (°)	28.7 ~ 33.4	31.8

2.1.2 地应力

现场地应力测试及有限元反演分析获取了该矿区的地应力场分布形态,可据此进行围岩稳定性分析。轨道大巷地应力值见表 2。

表 2 轨道大巷地应力分量 / MPa

σ_x	σ_y	σ_z
27.48	17.35	21.29

计算得地应力的各主应力大小和方向,见表 3。

令巷道走向为 x 轴,竖向为 z 轴,三维地应力如图 1。

表 3 朱集矿轨道大巷地应力的主应力及其方向

地应力主应力	σ_1	σ_2	σ_3
量值 / MPa	31.66	19.32	16.13
倾角 / (°)	37.2	-56.6	3.7
方位角 / (°)	32.4	206.6	101.5

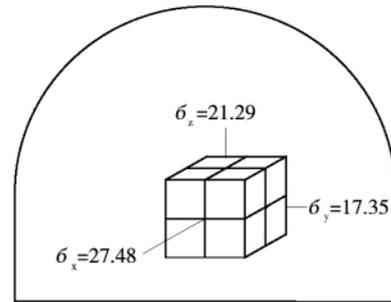


图 1 地应力分布图

- 906 轨道大巷埋深大、地应力高,围岩软弱,构成了围岩挤压大变形的基本条件^[5]。

2.2 围岩稳定性分析

2.2.1 基于 Hoek - Brown 准则的解析解

对深部巷道围岩稳定性分析采用非线性的 Hoek - Brown 强度准则^[5]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_3 为屈服时的主应力, σ_c 为单轴抗压强度, m 、 s 是 Hoek - Brown 准则常数。

基于 Hoek - Brown 准则进行巷道围岩位移场弹塑性分析,解得巷道开挖轮廓 $r = a$ 处的径向位移 u_0 为:

$$u_0 = \frac{1+\nu}{E} r^{-\beta} [C(1-2\nu)(R^{\beta+1} - a^{\beta+1}) - D(R^{\beta-1} - a^{\beta-1})] + u_R \left(\frac{R}{a}\right)^\beta \quad (2)$$

其中,

$$C = \frac{(\sigma_R - p_0)R^2 - (p_i - p_0)a^2}{R^2 - a^2} \quad (3)$$

$$D = \frac{R^2 a^2 (p_i - \sigma_R)}{R^2 - a^2} \quad (4)$$

$$\sigma_R = \frac{m_r \sigma_c}{4} \ln^2 \left(\frac{R}{a}\right) + \ln \left(\frac{R}{a}\right) \sqrt{m_r \sigma_c p_i + s_r \sigma_c^2} + p_i \quad (5)$$

式中: E 为弹性模量; ν 为泊松比; σ_c 为单轴抗压强度; a 为巷道半径; r 为与巷道中心的距离; R 为塑性区范围; σ_R 为弹性区、塑性区交界面处的应力;

U_R 为弹性区、塑性区交界处的径向位移; m_r 、 S_r 为与巷道中心的距离 r 处围岩的 Hoek - Brown 常数; p_0 为原岩应力; p_i 为支护反力。

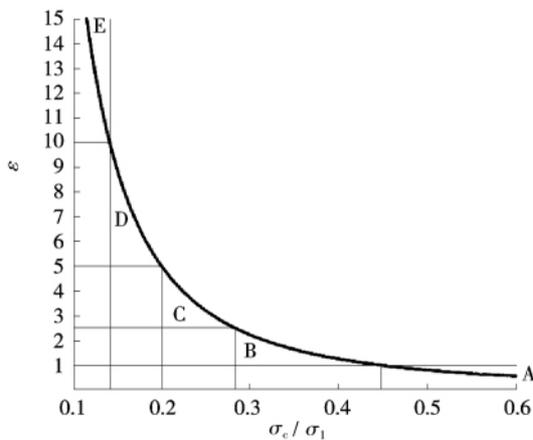
将地应力值、围岩力学参数和巷道尺寸代入式 (2)、式 (3)、式 (4) 和式 (5) 中解得巷道表面位移 u_0 约为 410 mm。

2.2.2 有限元数值计算

选用有限元数值计算程序 Phase2, 采用平面应变弹塑性计算模型, 根据实测地应力和围岩力学参数计算开挖后无支护状态下围岩位移场可知, 在实测地应力和围岩强度条件下, 顶板最大下沉量达 260 mm, 底臃量高达 360 mm, 与理论解析解和现场巷道围岩变形破坏情况基本吻合, 均表明巷道开挖后产生非常严重的挤压大变形。

2.3 挤压大变形等级评定

-906 轨道大巷围岩产生了强烈的挤压变形, 因此必须对其变形等级进行评定。Hoek、Marinos (2000) [7] 通过巷道轮廓收敛位移与开挖跨度的百分比——岩体强度应力比关系图分析判定围岩挤压变形, 并据此划分挤压变形等级, 如图 2。



σ_c / σ_1 - 岩石单轴抗压强度与最大初始地应力之比
收敛应变 ε = 围岩收敛位移 / 开挖跨度 $\times 100$

图 2 挤压变形等级判断图

轨道大巷巷道宽 5 400 mm, 巷道表面位移为 285 ~ 435 mm, 则收敛应变 ε 值为 5% ~ 10%, 围岩强度与最大地应力比值小于 0.2, 对应图 2 的 D 区, 由此可见轨道大巷围岩变形为非常严重的挤压变形。

3 支护对策研究

根据轨道大巷围岩挤压变形特征及上述围岩稳定性分析, 基于深部围岩稳定性控制理论和“分步

联合支护”理论 [6], 提出下列控制围岩挤压变形的支护对策。

3.1 控制轨道大巷挤压变形的思想

控制挤压变形的主导思想是增强围岩自身抗压强度和um提高支护体系的抗变形能力。通过一次支护恢复围岩三向应力状态, 增强围岩承载能力, 初步控制巷道稳定; 通过注浆修复破损围岩, 进一步提高围岩强度; 通过锚索实现应力转移, 扩大承载圈, 进一步改善围岩应力状态, 实现围岩稳定的根本控制。

3.2 支护方案

按照以下支护方案实现围岩挤压变形的控制: U 型钢支架 + 钢筋笆片 + 初喷 + 高强预应力锚杆 + 浅孔注浆一次支护; 深孔注浆 + 预应力锚索 + 复喷二次支护; 最后进行底板支护 (底板注浆 + 底板锚索)。

具体的实施方案为: ①架设 36# U 型钢支架及在其后挂钢筋笆片; ②初喷 C20 喷层; ③浅孔注浆; ④施作预应力锚杆; ⑤滞后深孔注浆; ⑥施作预应力锚索; ⑦施作锚索锚梁; ⑧复喷 C20 喷层; ⑨底板支护。

3.3 支护参数

各支护形式的主要支护参数为: 36# U 型钢支架, 排距 700 mm。钢筋笆片为 800 mm \times 900 mm, 网片的规格为 $\phi 8$ 100 mm \times 100 mm。架设 U 型钢支架及钢筋笆片后初喷 C20 喷层, 厚 100 mm; 施作锚索和锚梁后复喷 C20 喷层, 厚 50 mm。浅孔注浆孔深 1 500 mm, 注浆管长 800 mm, 间排距 2 500 mm \times 2 100 mm, 每断面均匀布置 5 根, 注浆压力 1.5 MPa, 浅孔注浆滞后喷浆 15 m。高强预应力锚杆 $\phi 22$ mm \times 2 500 mm, 预应力 50 ~ 70 kN。间排距 800 mm \times 700 mm, 矩形布置。锚杆滞后初喷 15 m。深孔注浆孔深 5 000 mm, 注浆管长 3 200 mm, 间排距为 2 200 mm \times 2 100 mm, 每断面均匀布置 6 根, 注浆压力 5.0 MPa, 深孔注浆滞后浅孔注浆 15 m。锚索规格: $\phi 22$ mm \times 7 500 mm, 预应力 150 kN。间排距为 1 600 mm \times 1 400 mm。施作锚索滞后深孔注浆 15 m。锚梁采用 20# 槽钢, 长 2 600 mm, 每断面 4 根, 沿巷道走向布置。底板注浆孔深 2 000 mm, 排距 2 000 mm, 每断面 3 根, 注浆压力 1.5 MPa。底板锚索规格为 $\phi 22$ mm \times 7 500 mm, 排距 1 400 mm。

4 支护效果

4.1 数值模拟验证支护效果

由支护方案对应的有限元数值计算模型及其计

算结果可知,采用支护方案后,肩顶最大位移为 50 mm,最大底臃量为 70 mm,该支护体系能够有效控制围岩挤压变形。

4.2 监测反馈

在巷道中设置了 2 个测站验证支护方案的支护效果和支护强度。在新奥法思想的指导下,根据现场监测结果及时调整支护方案及其支护参数。监测结果如图 3、图 4。

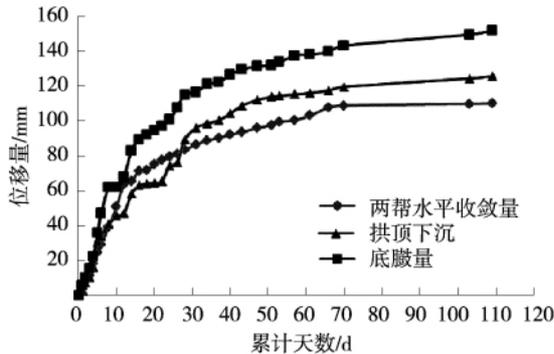


图 3 1[#]测站表面位移收敛趋势图

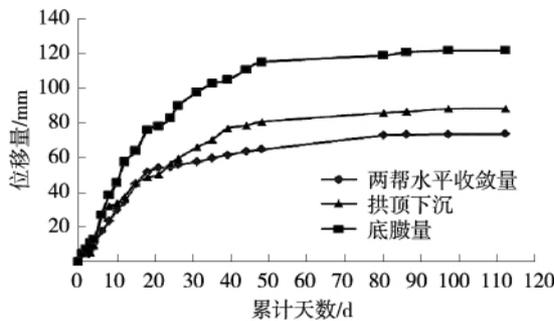


图 4 2[#]测站表面位移收敛趋势图

从图 3、图 4 表面位移监测结果表明,在采取支护方案后围岩变形速率显著减小,并趋于收敛稳定,与数值模拟结果基本吻合,所提出的支护方案取得了良好的效果,能够有效的控制围岩挤压变形,实现巷道稳定。

5 结论

1) 朱集矿轨道大巷为典型的千米深井高地应力软岩巷道,开挖后围岩产生了强烈的挤压变形,变形量大、变形速率高、变形时效特性明显。

2) 根据实测地应力值和围岩力学参数,分别从基于 Hoek - Brown 准则的解析计算和有限元数值计算进行了围岩稳定性分析;此外,根据 Hoek 挤压变形等级曲线判定该巷道围岩变形为非常严重的挤压变形。

3) 基于深部巷道围岩稳定控制理论与“分步联合支护”思想,制定了控制轨道大巷挤压变形的支护方案:U 型钢支架 + 钢筋笆片 + 初喷 + 预应力锚杆 + 浅孔注浆一次支护,滞后深孔注浆 + 预应力锚索 + 复喷二次支护,最后进行底板支护。

4) 有限元数值计算和现场监测均表明采取支护方案后显著减小了围岩变形速率,并在较短时间内围岩变形趋于收敛,支护方案取得了良好的效果,能够有效的控制围岩挤压变形,对类似巷道具有一定的指导和借鉴意义。

参考文献:

- [1] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2853 - 2858.
- [2] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803 - 2813.
- [3] 黄兴, 刘泉声, 乔正. 朱集矿深井软岩巷道大变形机制及其控制研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 827 - 834.
- [4] 刘泉声, 时凯, 黄兴. 邻近巷道掘进扰动效应下巷道变形监测分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(6): 897 - 902.
- [5] SHARAN S K. Exact and approximate solutions for displacements around circular openings in elastic - brittle - plastic Hoek - Brown rock [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2005, 42(4): 542 - 549.
- [6] 刘泉声, 高玮, 袁亮. 煤矿深部岩巷稳定控制理论与支护技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [7] Evert Hoek, Paul Marinos. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses [J]. Tunnels and Tunnelling International, 2000(11/12).

作者简介: 张大庆(1986 -), 男, 安徽阜阳人, 助理工程师, 本科, 2008 年毕业于西安科技大学, 现工作于淮南矿业集团潘北煤矿, 从事采矿技术与管理工作。

(收稿日期: 2012 - 05 - 30; 责任编辑: 梁绍权)

