

大屯矿区深部软岩巷道非对称变形机理及控制对策研究

傅清国, 邹朝阳

(大屯煤电(集团)有限责任公司, 江苏徐州 221167)

[摘要] 通过对孔庄矿工程地质情况调查与分析,结合室内岩石力学实验,运用三维数值模拟方法,研究巷道非对称变形时周围岩体的位移场分布规律,分析巷道推进到上部工作面下方时的应力分布规律。理论研究结果表明,孔庄矿-785 m水平轨道大巷非对称变形主要受其上部采空区煤柱的集中压力控制,黏土矿物遇水膨胀、岩层结构及高地应力作用进一步恶化了巷道围岩结构。该研究可为孔庄矿深部巷道非对称变形控制对策提供初步的理论依据。

[关键词] 深部;软岩巷道;非对称变形;控制对策

[中图分类号] TD31 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)11-0102-05

1 前言

随着能源需求量的增加和开采强度的不断加大,浅部资源日益减少,国内外矿山都相继进入了深部资源开采阶段。随着开采深度的不断增加,工程灾害日益增多,如矿井冲击地压、瓦斯爆炸、矿压显现加剧以及巷道围岩产生大变形、流变、地温升高等,对深部资源的安全高效开采造成了巨大威胁;深部“三高一扰动”(即高地应力、高地温、高渗透压和强烈的开采扰动)的复杂地质力学环境,使得深部岩体表现出明显的非线性大变形力学特征^[1],从而严重影响了深部煤炭资源的安全、高效开采^[2]。因此,深部资源开采过程中所产生的岩石力学问题已成为研究的焦点^[3-7]。深部开采由于受到周围巷道或回采工作面的影响,往往处于复杂应力状态并呈现出非对称变形特征,但由于不清楚巷道围岩塑性区的分布范围及围岩变形的危险部位等,支护过程中往往盲目性较大,多数巷道仍采用传统的均称支护,不能适应巷道的非均衡变形^[8]。大屯矿区孔庄矿-785 m水平轨道大巷位于7339综采工作面正下方,受强烈采动和煤柱集中压力影响,自巷道开掘以来,施工巷道陆续发生破坏,其中

非对称变形特征尤为明显。文章在工程地质调查和理论分析的基础上,结合室内岩石力学实验,综合考虑巷道非对称变形的影响因素,分析了孔庄矿-785 m水平轨道大巷非对称变形的影响因素,有针对性地提出控制对策,为矿井安全生产创造条件。

2 孔庄矿非对称变形特征

2.1 工程概况

孔庄矿位于江苏省沛县和山东省境内,在大屯矿区的最南端,是第四系全掩盖区。井田南与沛县沛城矿、北与徐庄矿毗邻,东与山东枣庄矿务局接壤。-785 m水平轨道大巷位于石炭二叠山西组煤系地层中,为海陆交互相沉积。整个巷道在L1与L4灰岩之间的海相泥岩、砂质泥岩灰岩段中掘进,围岩层理发育,破碎不稳定。所掘进区域地质构造较为简单,断层不发育,仅局部发育有小断层或挤压破碎带,延伸较短。煤系地层走向N 60°E,倾角18°~32°,平均23°,水平大巷掘进方向大致与岩层走向一致。从巷道初期掘进揭露岩性和预想工程地质剖面图来看,巷道共穿越4个工程岩组,即泥岩和砂质泥岩组、煤体组、灰岩组和细砂岩组,其中大部分地段为软弱破

[收稿日期] 2011-08-31

[作者简介] 傅清国(1959—),男,重庆市人,教授级高级工程师,主要研究方向为采矿;E-mail:FQG_ZM@126.com

碎的泥岩和砂质泥岩。岩组强度:灰岩 > 砂岩 > 泥岩 > 煤,膨胀性:泥岩 > 砂岩 > 灰岩 > 煤。围岩宏观结构大多节理、裂隙较发育,局部受小断层影响,岩体更加破碎,对支护非常不利。围岩特别是泥岩微观结构上裂隙连通性好,巷道开挖后原有应力状态改变,岩体裂隙容易扩展进而变得更加破碎,强度降低。围岩中均含有膨胀性较强的 I/S 混层,水后岩体膨胀,产生较大的膨胀应力,将导致巷道产生较大的变形。巷道围岩强度普遍较低,其中泥岩的抗压强度为 43.27 MPa,抗拉强度仅有 2.726 MPa,吸水性较强,吸水后一方面强度大幅降低(软化吸水率为 1.82%),另一方面岩体膨胀产生较大应力,对巷道支护极为不利。

2.2 非对称变形特征

2001 年施工以来,由于上部 7#层 7339 综采工作面跨大巷开采,经受了强烈的采动影响,施工巷道陆续发生了变形破坏。主要破坏形式为非对称破坏,其表现形式为下肩顶板开裂、帮部臌出、上帮底板臌出变形。图 1 为 -785 m 水平轨道大巷非对称变形形式^[9]。

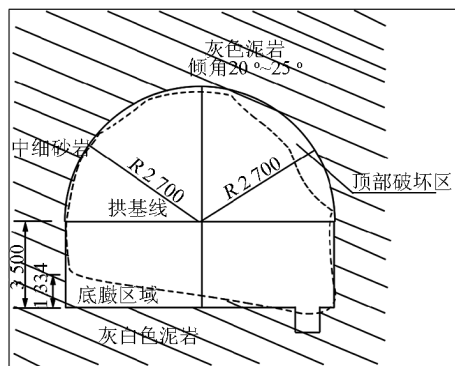


图 1 -785 m 水平轨道大巷非对称变形形式(单位:mm)

Fig. 1 Asymmetric deformations of -785 m roadways (unit:mm)

3 孔庄矿非对称变形的影响因素

通过现场工程地质调查和分析,总结出如下几种影响非对称变形的因素。

3.1 底板岩性及支护方式

从现场监测结果分析,巷道的非对称变形随底板岩性的软弱程度而加剧。底板岩性对巷道的非对称变形起关键作用。泥岩底板的非对称性表现最为剧烈,其次为砂泥岩互层性底板,具有砂岩或灰岩底板的巷道非对称变形破坏现象较弱。

在深部高应力环境下,由于底板无支护,导致巷道底板成为能量释放的通道,一般最初由于泥底板岩层向上帮的塑性滑移,表现为非对称底臌,在上帮

一侧臌出较为明显。之后,由于下帮处的底板岩层向临空区的挤出,导致巷道在下帮发生帮部整体下沉,下帮的向下位移导致肩角部出现差异性变形,出现巷道的块状掉落或塑性铰。破坏模式为“底臌→下帮收缩→肩部内挤变形→不对称变形扩大”^[10]。

3.2 构造应力

巷道稳定性直接由围岩应力特征决定,但根本上还是决定于原岩初始应力状态。地应力作为工程岩体的赋存环境,其量级、方向以及空间分布规律将在很大程度上影响着围岩的力学属性、应力的分布和演化规律、变形特征和破坏机制,进而影响着深部地下工程稳定性。深部岩石大巷的围岩应力具有较高甚至很高的量值;在以自重应力为主的应力场中,巷道变形破坏的典型形式是因拉应力和剪应力集中而导致拱顶形成塌落区;如果处于构造应力为主的应力场区域,由于较高的初始应力,重分布应力相应较高,此时,相对结构完整的巷道围岩的典型破坏模式是沿巷道轮廓发生层层剥落(片剥),然后才是沿结构面产生断裂滑移,在巷帮则由于挤压应力集中引起塑性挤压破坏;对于软弱层状岩体,其破坏形式是沿层状岩体结构面发生剪切滑移,并发生不同程度的底臌变形。围岩的应力差对巷道围岩的扩容也有一定的影响,一般情况下,在构造应力显著情况下,巷道两帮和底板的破坏较为显著。随着水平应力系数的增大,巷道两帮变形和底臌量均呈上升趋势。

3.3 岩层产状

对于深部高应力软岩巷道,其扩容变形破坏除与巷道所受的应力状态相关外,同时与岩体结构面的展布和性质有关。煤矿巷道一般为复合层状岩层,岩层结构面的展布具有一定的方向性,岩层结构的非对称往往导致巷道变形的非对称。

3.4 回采动压影响

深部煤矿巷道与浅部隧道不同,深部开采受周围巷道与工作面影响,往往造成巷道受到复杂应力。对于孔庄矿 -785 m 水平轨道大巷,其正上方有 7339 工作面正在回采,斜上方受 7339 与 7431 工作面之间煤柱的集中压力影响,处于复杂应力状态。

4 孔庄矿非对称变形机理研究

根据现场工程地质调查与分析,结合室内岩石力学实验,主要对上部采空区回采动压影响进行数值分析,采用国际通用的有限差分法分析程序 FLAC^{3D} 进行数值分析。FLAC^{3D} 采用的是快速拉格

朗日方法,它基于显式差分法来求解运动方程和动力方程,利用显式有限差分方法为岩土工程提供精确有效的分析^[11]。围岩采用 Mohr - Coulomb 模型,该模型能够反映岩土材料抗压强度不同的 S - D 效应以及对正应力的敏感性。

4.1 上部采空区与巷道的位置关系

孔庄矿 -785 m 水平轨道大巷位于 7339 工作面正下方,垂直距离为 76 m;7339 工作面与 7431 工

作面形成的煤柱产生集中压力作用于 -785 m 水平轨道大巷,煤柱位于岩石大巷斜上方,垂直距离为 76 m,水平距离为 72 m。在掘出后,受到上覆 7339 工作面(见图 2)的开采扰动影响,发生了较为剧烈的变形。2003 年以来,巷道陆续发生了较大的变形和破坏,其非对称变形特征尤为明显。-785 m 水平轨道布置及受采动应力影响状况见图 2。

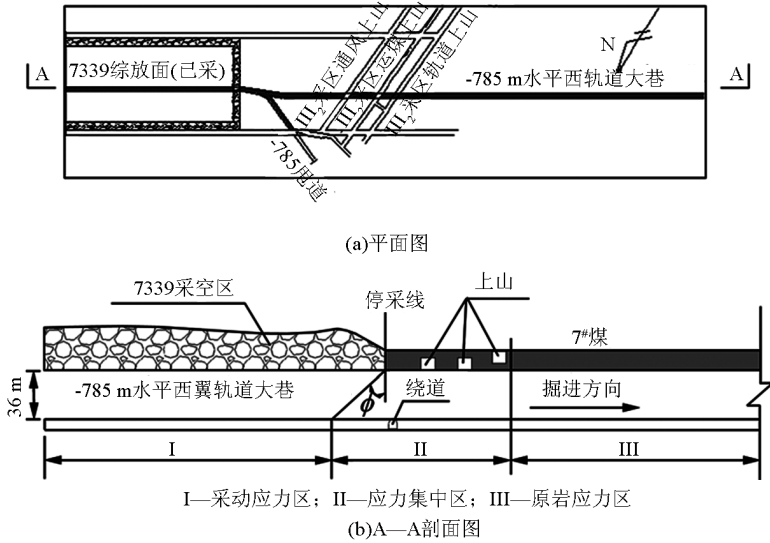


图 2 -785 m 水平轨道布置及受采动应力影响状况

Fig. 2 Layout of -785 m level rail and the influence of mine-induced stress

4.2 地质模型的建立

在建模过程中,一般要针对分析的问题将实体模型进行合理地简化,目的是使得网格划分相对简单,交界网格过渡平滑,可大大缩短计算时步。遵循以上原则,并根据工程经验选取合理的影响深度及宽度,确定模型尺寸为 300 m × 200 m × 100 m(长 × 宽 × 高)。根据地质模型进行网格划分,生成 FLAC^{3D} 数值模型,然后设定边界初始约束条件,并施加初始地应力场。在岩层之间设置软弱夹层模拟层面之间的相互影响,网格四周为水平链杆,底部为铰支座,顶部取为荷载已知的自由边界,初始地应力场巷道以实测地应力为主,最大水平应力为 26 MPa,垂直应力为 22 MPa。地质力学模型见图 3。

4.3 模拟结果分析

图 4 为采高($h = 6$ m)平面上工作面围岩应力分布图(回采 72 m)。在集中支承煤柱下掘巷,应力集中程度约为采空区下的 1.5 倍,在采空区边缘后大约 50 m 以后,由于开采的卸压作用,巷道承受的

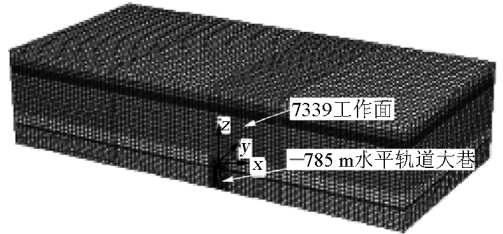


图 3 地质力学模型

Fig. 3 Engineering geological model

垂直应力减弱。图 5 为 -785 m 水平轨道大巷受工作面开采影响的垂向应力分布,从图中可以看出,由于开采支承压力的影响,巷道出现了一定程度的底臃变形。在采动影响下,由于高应力作用,产生的应力和变形分布具有不对称性。

图 6 为煤柱下方位移等值线和位移矢量场图。从位移矢量场分布的方向来看,煤柱下方岩体发生了类似条形基础下方土体变形的应力和位移扩散,并且距离煤柱越远,受其集中压力的影响越小,但位

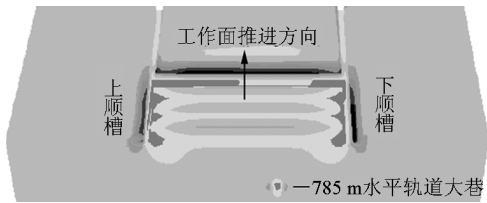


图4 采高($h = 6\text{ m}$)平面上工作面围岩应力分布图

Fig. 4 Surrounding rock stress distribution of face on mining height plane ($h = 6\text{ m}$)

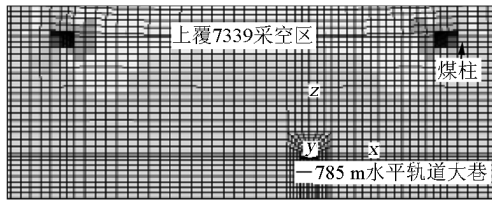


图5 -785 m 水平轨道大巷受工作面开采影响的垂向应力分布

Fig. 5 Vertical stress distribution of -785 m level railway laneway influenced by working face

移矢量场的方向大致呈 45° 向斜下方扩散,当这种集中压力的影响扩散到 -785 m 水平轨道岩石大巷时,使巷道承受非对称的附加压力并导致巷道产生非对称变形(见图7)。

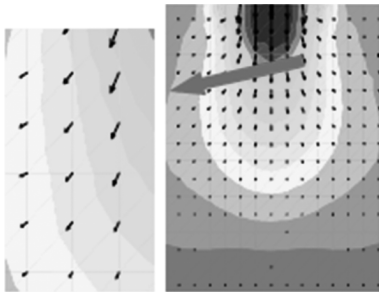


图6 煤柱下方位移等值线和位移矢量场图

Fig. 6 Displacement isoline and displacement vector field under the coal pillar

5 非对称变形控制对策与应用效果

5.1 非对称变形控制对策

非对称变形控制就是对巷道围岩中的关键部位进行加强支护或局部弱化,改善巷道围岩结构的力学性能与局部围岩应力状态,减小关键部位剧烈变形,使其能够随巷道围岩一起协调变形^[8],使巷道

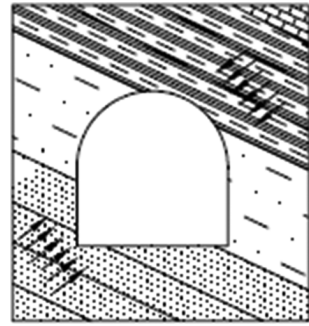


图7 -785 m 水平轨道巷道承受非对称附加压力示意图

Fig. 7 Asymmetric additional pressure on -785 m level railway laneway

围岩、支护结构形成共同承载的力学体系,充分发挥支护结构和围岩自身的承载能力,显著改善支护结构的工作特性或围岩应力状态,大幅提高支护结构的承载能力或降低巷道周边围岩的应力,有效控制关键部位位移和围岩松动圈的扩大或使塑性区内移,从而避免巷道围岩局部过早破坏和失稳,以及由此而引起巷道围岩的非对称破坏与失稳。

针对巷道围岩稳定状态的结构特征以及巷道围岩的变形破坏特征,巷道围岩非对称变形控制^[8]从以下3个方面考虑:

1) 合理布置巷道层位,优选结构巷道围岩结构。

2) 加强围岩中关键部位的控制,包括加强围岩关键部位的支护、改善其力学参数与提高强度等措施,以实现巷道围岩控制效果的改善。

3) 针对巷道变形特点进行支护控制,改善支护体系的受载状况,提高围岩结构的承载能力。

5.2 非对称支护设计方案

根据现场调查及理论分析结果,对巷道支护设计参数进行优化。在锚网索耦合支护的基础上,针对非对称变形,采取非对称支护形式:在巷道右肩窝关键部位增设一排锚索,同时底脚剧烈部位布置双排底角锚杆^[12],有效控制巷道变形。

5.3 支护效果

优化后的支护方案在 -785 m 水平轨道大巷进行实施,根据近 100 d 的矿压监测数据分析,两帮最大收缩量为 120 mm,顶板最大下沉量为 39 mm,而最大底脚量仅为 10 mm,巷道肩部的变形仅以混凝土喷层局部剥蚀为主,巷道变形得到了有效控制,巷道表面位移监测曲线见图8。

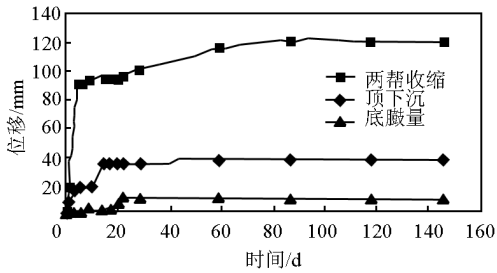


图8 巷道表面位移监测曲线

Fig. 8 $D-t$ curve of roadway surrounding rock

6 结语

通过现场工程调查和分析,总结了深部巷道非对称变形的主要特征,分析了孔庄矿-785 m 水平轨道大巷非对称变形的主要影响因素和变形机理,并提出了相应的控制对策,主要结论如下:

1) 孔庄矿巷道产生非对称变形的主要因素为:岩性及产状产生的非对称结构、构造应力、动压影响和对称的支护形式。

2) 提出了孔庄矿-785 m 大巷非对称支护对策和设计方案,现场应用效果良好。

参考文献

[1] 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.

[2] Russo B, Murphy S K. Longwalling at great depth in a geologically disturbed environment; the way forward[J]. The Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, 2000, 100(2): 91-100.

[3] 何满潮. 深部开采工程岩石力学的现状及其展望[C]//中国岩石力学与工程学会. 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.

[4] 何满潮. 中国煤矿软岩巷道支护理论与实践[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1996.

[5] 谢和平. 深部高应力下的资源开采——现状、基础科学问题与展望[M]//科学前沿与未来(第六集). 北京:中国环境科学出版社,2002:179-191.

[6] 谢和平,彭苏萍,何满潮. 深部开采基础理论与工程实践[M]. 北京:科学出版社,2006.

[7] 何满潮,陈新,梁国平,等. 深部软岩工程大变形力学分析设计系统[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(5):934-943.

[8] 樊克恭,蒋金泉. 弱结构巷道围岩变形破坏与非均称控制机制[J]. 中国矿业大学学报,2007,36(1):54-59.

[9] 刘文涛,何满潮,杨生彬,等. 深部岩巷非对称变形机制及支护对策研究[C]//第九届岩石力学与工程学术大会论文集. 北京:科学出版社,2006:661-669.

[10] 刘文涛. 大屯矿区深部岩巷非对称变形机制及支护对策研究[D]. 北京:中国地质大学,2007.

[11] 刘波,韩彦辉. FLAC原理、实例与应用指南[M]. 北京:人民交通出版社,2005:3-15.

[12] 杨生彬,何满潮,王晓义,等. 孔庄矿深部软岩大巷底臃机制及控制对策研究[J]. 中国矿业,2007,16(4):77-80.

Asymmetric deformation mechanism in deep soft rock tunnel and controlling countermeasures in Datun Mine area

Fu Qingguo, Zou Chaoyang

(Datun Coal Mining and Power Generation Company, Xuzhou, Jiangsu 221167, China)

[Abstract] According to the investigation and analysis of the engineering geology in Kongzhuang Mine and the laboratory experiments of rock mechanics, we use three-dimensional numerical simulation to study the distribution of ground displacement field in surrounding rocks when the roadway shows the asymmetric deformation characteristics of surrounding rock significantly, analysis stress distribution law when the roadway promotes to the inferior of the upper face. The results of theoretical study show that the asymmetric deformation is controlled by centralized stress from coal pillar in upper goaf. This research provides a preliminary theoretical basis for the controlling countermeasures of asymmetric deformation characteristics of surrounding rock in Kongzhuang Mine.

[Key words] deep; soft rock tunnel; asymmetric deformation; controlling countermeasures