

深井高地应力巷道围岩弱化规律及控制技术

朱永建¹,朱二磊¹,陈鑫源¹,王平²,闫帅奇¹

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院,煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭,411201;

2. 中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙,410083)

摘要:深井高地应力围岩控制是深井支护的难点,应用FLAC^{3D}软件对深井半圆拱巷道在高地应力作用下围岩的弱化规律进行研究,发现深井高地应力围岩塑性区出现不连续分布的现象,随着时间的推移,塑性区逐渐增大,表明深井围岩属于非线性力学系统.同时,分析了不同侧压系数下的巷道围岩应力和位移,得到了在巷道纵向上和横向上两者的变化情况,以及不同地应力对深井锚喷网加锚索协同支护效果的影响.提出深井高地应力围岩高强度、高刚度以及大范围的围岩控制技术,并对不同地应力情况下的支护效果进行监测,取得了较好的支护效果.

关键词:深井巷道围岩;叠加拱;地应力;数值分析

中图分类号:TD32

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2015)01-0015-07

Weakening rules and its control technology of deep & high stress roadway surrounding rock

Zhu Yongjian¹, Zhu Erlei¹, Chen Xinyuan¹, Wang Pin², Yan Shuaiqi¹

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The high ground stress surrounding rock control is difficulty of deep mine support, FLAC^{3D} software was applied for the study of deep mine semicircle roadway surrounding rock weakening law under high ground stress, is found that the deep mine high ground stress surrounding rock appears discontinuous distribution of plastic zone, with time, the plastic zone increases, that deep mine surrounding rock belongs to nonlinear mechanical system. Meanwhile, the surrounding rock stress and displacement that under different side pressure coefficients were simulated, and got the change of the situation in the roadway on both horizontal and vertical direction, and the different ground stress impact on deep shotcrete rockbolt mesh plus cable support were analyzed. The technology was put forward for high strength, high stiffness and a wide range for deep mine with high stress surrounding rock control, and the supporting effect was monitored under different ground stress situations, and good support effect was obtained.

Keywords: deep mine roadway surrounding rock; overlap arch; ground stress; numerical analysis

深井巷道围岩受高地应力、高地热、高岩溶水压以及强烈开采扰动的影响,巷道围岩显现出难以控制的特点,例如:变形量大、变形速率快以及流变性强等.深井巷道围岩变形机理以应力扩容为主,高地应力

改变了围岩的力学特性,通常表现为围岩弱化,围岩弱化程度直接影响着巷道围岩承载结构的形成及其变化规律.方祖烈^[1]、朱建明^[2]等人将巷道围岩中受压部分围岩称为主承载结构,将支护加固的受拉部分围岩称为次承载结构,通过主次承载结构的协同承载控制巷道围岩稳定;钟世航^[3]将隧道围岩中压密区、松弛区围岩等看作是隧道的自承体系,指出支护结构对自成体系的形成和发展的影响是围岩稳定的关键;康红普教授^[4-5]提出了巷道围岩关键岩石圈承载理论,并以此作为巷道支护设计的依据;王卫军^[6]等人将巷道围岩应力峰值点附近的岩体成为“内结构”,将锚固体等支护围岩共同体称为“外结构”从而提出了“内外承载结构”的概念.宋宏伟等人^[7]认为在预紧力锚杆作用下,在岩体中形成一个“组合拱”来承载巷道围岩应力.余伟健^[8]根据一次锚喷支护和二次锚索支护在巷道围岩中形成的承载结构的特点提出了叠加拱承载体强度理论;杨超,李树清^[9-10]等人通过数值模拟等手段分析了不同支护阻力对软岩巷道围岩稳定性的影响;这些研究主要集中于一般巷道围岩的承载体系,针对于高地应力条件下深井巷道围岩的承载结构及围岩的弱化规律还研究的不多.因此,本文利用FLAC^{3D}软件,对深井巷道围岩在不同高地应力作用下的弱化规律以及高地应力对锚固支护的影响进行深入分析.

1 深井高应力围岩弱化规律

深井巷道围岩在高地应力作用下多表现出工程软岩的性质,岩体由脆性向延性转化,流变特性明显,既有延性变形,又有脆性破坏.巷道开挖后,深部岩体应力由三向变为两向,岩体快速释放大量的变形能,巷道围岩表现出变形量大、变形速度快、变形范围大以及变形持续时间长的特点.在围岩的变形过程中,应力不断的调整直到产生新的平衡.在高地应力作用下表现为围岩应变随时间逐渐趋于稳定流变的过程.因此,深井巷道围岩不能像一般浅部巷道那样采用预留断面的方法,通过围岩自身的调整达到围岩的稳定.此外,深井巷道围岩应力方向性明显,不同大小和方向的地应力对于巷道围岩的变形破坏及应力的重分布都有很大影响.因此,研究深井巷道围岩在不同地应力作用下的围岩弱化规律对于深井巷道围岩控制有着积极的意义.

1.1 建立数值计算模型

巷道埋深取800 m,对不同的地应力条件下的巷道围岩状况进行模拟.数值模型的几何尺寸为60 m×2 m×60 m,垂直方向的原岩应力采用上覆岩层的自重应力,水平方向原岩应力分别采用侧压系数 $\lambda = 0.5, 1, 1.5, 2, 3$ 来考虑.上覆岩体的平均容重取25 kN/m³则竖直方向应力等于20 MPa.采用平面应变模型,边界条件为前后、左右边界均水平约束,铅垂自由,上部边界为应力边界,承受20 MPa的垂直应力;底面边界取位移边界,铅垂、水平均约束.巷道断面为半圆拱形,宽5 m,墙高3 m,巷道围岩的力学计算参数见表1所示.

表1 巷道计算参数

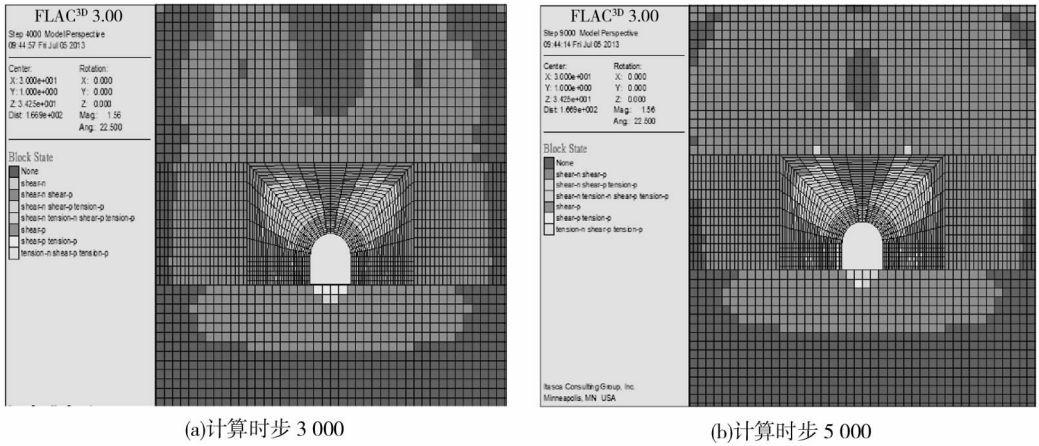
岩性	厚度 h/m	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	内聚力 C/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa	抗压强度 σ_c/MPa
细砂岩	10.12	14.17	6.54	2.90	1.50	47.3
砂质泥岩	0.80	7.82	4.67	2.20	0.20	44.5
页岩	6.13	8.90	5.60	2.90	1.02	24.9

1.2 深井巷道围岩塑性区特征

如图1所示,深井高地应力巷道开挖后,迅速出现较大范围的塑性区,随着时间的延长,塑性区不断增大.同时,在高地应力作用下深井巷道围岩塑性区与非塑性区交替出现,与粘聚力强、弱软化区交替出现的结论^[10]以及分区破裂化现象^[11]相似.这说明深井高地应力围岩已属于非线性力学范畴,要控制其围岩稳定,必须要加大支护范围,控制围岩软化和塑性区的无限扩展.

1.3 深井巷道围岩应力分布特征

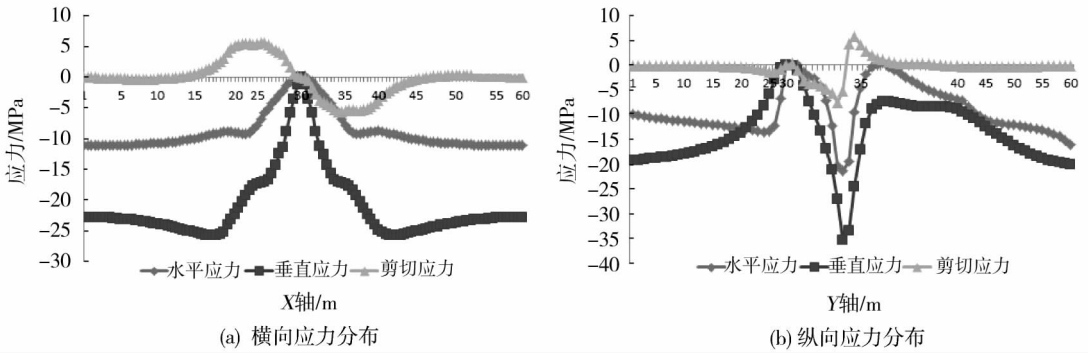
通过对巷道纵向和横向应力的监测得到巷道围岩在纵向和横向上的应力分布曲线,如图2所示.



(a)计算时步 3 000

(b)计算时步 5 000

图 1 压系数 $\lambda = 0.5$ 塑性区



(a) 横向应力分布

(b) 纵向应力分布

图 2 巷道围岩应力分布

如 2(a)所示,在巷道横向上 22.5 ~ 37.5 m 即巷道周围 5 m 范围内,水平方向应力得以卸载,且越靠近巷道,应力逐渐趋于零,超过 5 m 时巷道水平方向应力随距离的增大,应力值在逐渐增大,直至增大到原岩应力.在横向上,26 ~ 33.5 m,即距离巷道临空面 1.5 m 左右范围内的围岩垂直应力卸载较多,距离在 1.5 m 时垂直应力有出现一个峰值,但这个峰值低于原岩应力,接着逐渐增大到另一个更大的峰值,这个峰值超过了原岩应力,该峰值附近的岩体是围岩的主要承载结构,然后再逐渐减小直至接近原岩应力.

由图 2(b)可知巷道开挖后,在巷道顶、底板岩体内,纵向上从岩体深部向巷道靠近约 2.5 m 左右时,水平应力出现应力集中逐渐增大到一个峰值,然后再减小到零,垂直应力则逐渐减小到零.根据图 2(a),图 2(b)中应力的极值点可以推知巷道四周起主要承载作用的围岩区域.巷道顶、底板围岩中起主要承载的围岩距离巷道临空面 2.5 m 左右,两帮其主要承载作用的围岩距离巷道临空面 5.5 m 左右.以上分析中巷道横向上的水平应力和垂直应力围岩应力均出现了多个极值,这些极值区域是巷道承载的主要区域,也是巷道支护需要控制的中点区域.此外,通过对应力的分析验证了分区塑性化的现象.

1.4 深井巷道围岩移动规律

通过模拟,得到深井高地应力巷道围岩的运移情况如图 3 所示.

深井巷道围岩在高地应力作用下,围岩变形量大,其变形围岩的来源范围广,甚至底鼓围岩有部分是来源于顶板^[12].如图 3 所示,在巷道的顶、底板中,围岩都是向巷道临空面流动,而两帮围岩在向临空面流动过程中受到两帮与顶、底围岩相对刚度的影响出现不同的移动规律,详见文献[12].

通过对巷道横向和纵向围岩位移的监测得到图 4 所示位移曲线.

从横向上,巷道两帮位移呈对称分布.从巷道表面到两帮围岩内部,围岩向巷道自由面内的水平移动量在逐渐减小,在 12.5 ~ 47.5 m 范围内,也就是巷道两帮 15 m 范围内是巷道围岩水平移动的主要区域,

可见深井巷道围岩的破碎区和塑性区的范围是很大的. 巷道两帮的垂直位移, 在 20 ~ 40 m (距巷道中心 10 m) 范围内表现为正, 也就是围岩是向上移动的, 超过了 10 m 的围岩则表现为下沉位移, 且随着距离的增加, 围岩下沉位移值在逐渐减小. 根据围岩几何条件, 巷道两帮的位移总体上是向巷道临空面斜向上内挤的.

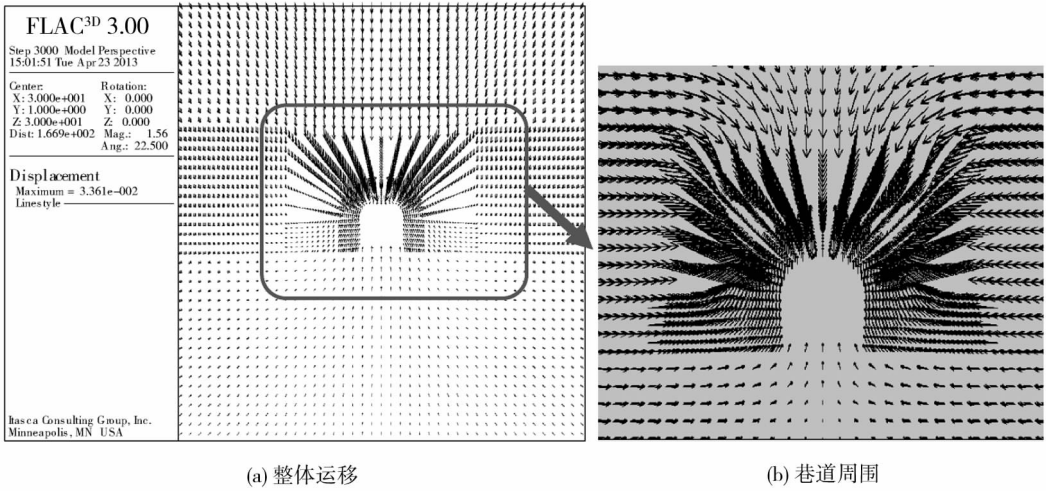


图3 巷道围岩移动规律

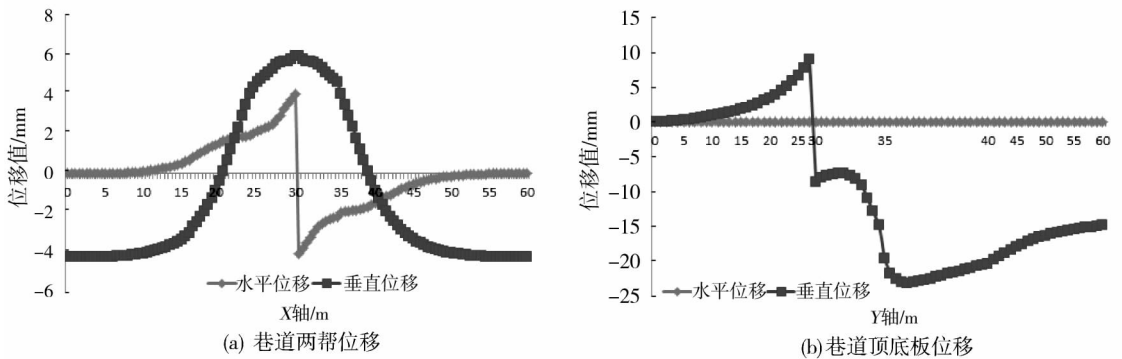


图4 巷道围岩位移分布

从巷道顶底板围岩位移可以看出, 巷道竖向中心线上的围岩水平位移基本为零, 而垂直方向上的围岩位移在顶底板上表现出不同的特点. 在巷道底板上, 垂直方向位移均为正, 表现为巷道底臃, 且距离巷道越近, 底臃量越大. 在巷道顶板上, 垂直方向位移均为负, 表现为巷道顶板围岩的冒落、内挤. 而且顶板围岩位移存在一个峰值, 该峰值距离拱顶约 3.5 m. 从拱顶到峰值点之间的围岩下沉量随着距离的增大而增大, 过了峰值之后随着距离的增大, 巷道围岩下沉量减小, 表示顶板围岩在向巷道两帮下沉转移, 最终表现出两帮和底板的鼓出.

1.5 地应力对主应力的影响

不同的地应力对深井巷道围岩中最大主应力的分布的影响, 如图 5 所示.

由图 5 可知 $\lambda = 0.5$ 时, 最大主应力出现拱顶向上 45° 角区域, 同时, 还形成了一个以巷道为中心点的“X 形”主应力区域, 这是造成巷道围岩出现剪切破坏的主要原因. $\lambda = 1$ 时, 最大主应力较为均匀地分布在巷道四周岩体中. $\lambda = 2$ 时, 巷道围岩中的最大主应力又出现局部集中现象. $\lambda = 3$ 时, 巷道围岩中的最大主应力集中程度增大. 此外, 对于深井半圆拱巷道, 在不同地应力下, 应力最集中的区域在拱顶向上 45° 角区域, 即深井围岩弱化的主要区域.

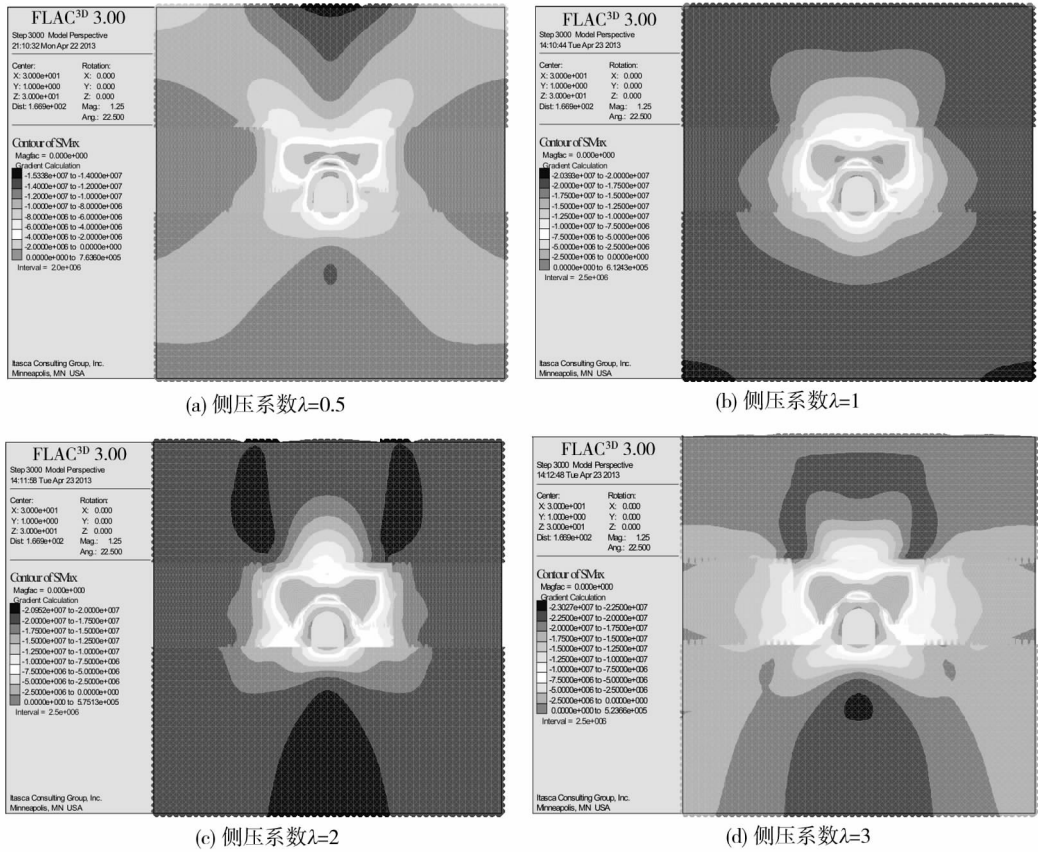


图 5 最大主应力的变化情况

2 深井巷道围岩控制

目前,深井巷道围岩多采用锚喷网加锚索支护为主,根据锚杆、锚索支护的工程特性,可知锚杆-锚索在半圆拱形巷道中通过合理的间排距以及预紧力等条件下能够形成组合拱(叠加拱)锚固结构,以此来控制围岩塑性区的发展和承载部分围岩应力,控制围岩初期和后期的持续变形.锚杆、锚索给巷道顶板和两帮围岩沿巷道径向提供支护力,同时又调动深部围岩承载,形成岩巷道周围的压缩作用区,改变了围岩应力状态,同时减少围岩局部应力集中.但是,深井高地应力巷道围岩塑性区发展较快,且围岩松动范围较大,必须加强支护强度、支护刚度以及扩大支护范围,在围岩中形成高强锚杆锚固体和高强锚索锚固体,2种锚固体的相互协调共同控制巷道围岩的稳定.具体通过增大锚杆和锚索直径、采用加长锚固提高锚固体强度;增大支护密度和预紧力提高支护刚度;延长锚杆和锚索的长度以及两者的协同来扩大支护范围.

根据锚杆-锚索协同支护叠加拱(图6)的结构特征及承载特点^[1]进行数值模拟分析,锚杆、锚索计算参数见表2所示,其中, P 为锚杆和锚索等支护结构的约束合力; P_0 为帮部岩体对承载拱的支承合力.

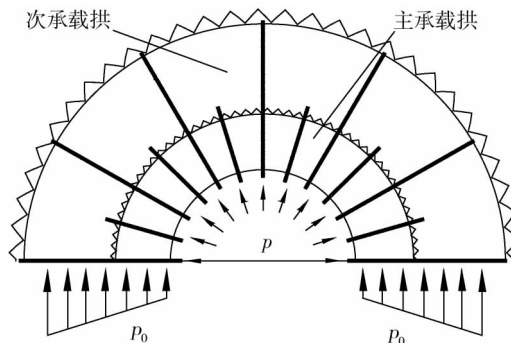


图 6 叠加拱承载结构

表2 锚杆和锚索的计算参数

支护结构	直径 Φ /mm	截面积/(10^{-4}m^2)	长度/m	数量/(根/面)	预应力/(10^3N)
锚杆	22	3.799 4	2.4	11	100
锚索	22	3.799 4	8.3	3	200

对不同地应力情况下的巷道顶底板以及两帮位移进行监测,结果见表3所示。

表3 2种方案的巷道变形量

支护状态	侧压系数 λ	顶板/mm	底板/mm	左帮/mm	右帮/mm	顶底移近量/mm	两帮移近量/mm
未支护时	0.5	-86.270	89.635	50.207	-60.245	175.905	110.452
	1.0	-48.981	82.237	120.690	-120.930	131.218	241.620
	1.5	-41.237	102.290	219.420	-218.760	143.527	438.180
	2.0	-45.737	137.330	338.550	-339.390	183.067	677.940
	3.0	-59.484	238.890	636.940	-636.430	298.374	1 273.370
锚固支护	0.5	-45.915	48.936	39.971	-40.153	94.851	80.124
	1.0	-28.963	40.370	80.820	81.190	69.333	162.010
	1.5	-21.449	49.297	169.980	169.600	70.746	319.580
	2.0	-26.159	82.790	240.090	-240.900	108.949	480.990
	3.0	-27.028	153.420	338.760	338.300	180.448	628.748

监测结果表明巷道在锚固支护后顶底移近量和两帮移近量均有所减小,尤其是底板下沉量和两帮的移近量减少明显,底臃量也有所减小,说明锚杆-锚索协同支护能有效控制巷道围岩变形。

图7是地应力对巷道变形的影响,由图7可知,巷道支护后无论是顶底板还是两帮的围岩变形量都有所减小,地应力对巷道支护前后围岩变形移动规律的影响基本一致,随着侧压系数的增大,巷道顶底板移近量均是先有所减小然后逐渐增大,而巷道两帮位移则是一直在增大,且支护前呈非稳定增长,支护后呈线性稳定增长.说明巷道围岩位移与对应方向的地应力成正相关性,但是深井高地应力巷道若不支护,围岩呈非稳定变形,在锚喷网加锚索支护后呈稳定增长的趋势,能有效控制巷道围岩。

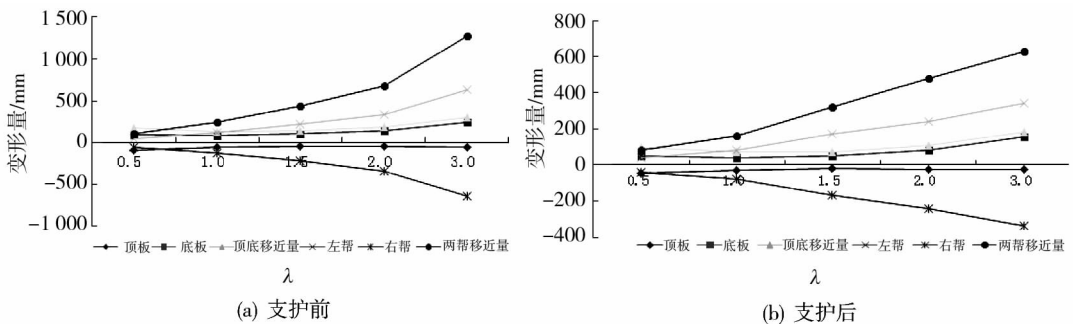


图7 地应力对巷道变形的影响

3 结论

本文对深井半圆拱形巷道围岩在锚杆-锚索支护前后的围岩应力及位移进行了模拟,并结合锚固承载体进行了分析得出如下结论:

1)通过对深井半圆形巷道横向和纵向上围岩应力的监测发现:在巷道围岩纵向和横向上的水平和垂直应力均出现了多个极值,这些极值点附近的围岩便是巷道围岩主要的承载区域,这是深井巷道围岩塑性区的间断分布的内在因素,同时,表明深井巷道围岩已进入非线性力学系统。

2)通过对深井半圆形巷道横向和纵向上围岩位移的监测和最大主应力的分布情况可以推知巷道顶、

底板以及两帮围岩的移动规律,即巷道周边浅部围岩直接向巷道内挤出,但是巷道深部围岩在足够的时间和空间条件下,会向巷道两帮中下部和底板转移并鼓出。

3) 巷道两帮围岩的位移值与水平方向的地应力成正相关性,且垂直方向的地应力与水平方向的地应力的接近程度也有影响,2个方向的应力越接近,巷道围岩的位移相对较小,但随着地应力的增大,巷道围岩位移仍呈增的趋势。

4) 在无支护情况下深井巷道围岩位移随着侧压系数的增大而呈非稳定增长,在高强度、高刚度和大范围的锚杆喷网加锚索的协同支护下,巷道围岩位移呈稳增长趋势,有效地控制了巷道围岩的稳定。

参考文献:

- [1] 方祖烈. 拉压域特征及主次承载区的维护理论[C]//世纪之交软岩工程技术现状与展望. 北京:煤炭工业出版社,1999: 48-51.
- [2] 朱建明,徐秉业,任天贵,等. 巷道围岩主次承载协调作用[J]. 中国矿业,2000,9(2): 41-44.
- [3] 钟世航,刘艳情. 隧道围岩的自承体系[C]//1994年度学术报告会论文集. 北京:铁道部科学研究院铁道建设研究所,1994.
- [4] 康红普. 巷道围岩的承载圈分析[J]. 岩土力学,1996,17(4): 84-89.
- [5] 康红普. 巷道围岩的关键圈理论[J]. 力学与实践,1997,19(1): 34-36.
- [6] 王卫军,李树清,欧阳广斌. 深井煤层巷道围岩控制技术及其试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(10): 2102-2107.
- [7] 宋宏伟,牟彬善. 破裂岩石锚固组合拱承载能力及其合理厚度探讨[J]. 中国矿业大学学报,1997,26(2): 33-36.
- [8] 余伟健,高谦,朱川曲. 深部软弱围岩叠加拱承载体强度理论及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(10): 2134-2142.
- [9] 杨超,陆士良,姜耀东. 支护阻力对不同岩性围岩变形的控制作用[J]. 中国矿业大学学报,2000,29(2): 170-173.
- [10] 李树清,王卫军,潘长良. 深部巷道围岩承载结构的数值分析[J]. 岩土工程学报,2006,28(3): 377-381.
- [11] 戚承志,钱七虎. 岩体动力变形与破坏的基本问题[M]. 北京:科学出版社,2009: 23-24.
- [12] 王卫军,侯朝炯,冯涛. 动压巷道底鼓[M]. 北京:煤炭工业出版社,2003.