

# 深部高应力巷道岩体蠕变规律 数值模拟分析

秦力<sup>1</sup>, 李微<sup>1,2</sup>, 赵援<sup>3</sup>

(1. 东北电力大学 建筑工程学院, 吉林 吉林 132012 2 中国科学院力学研究所, 北京 100080

3. 湖北省自动化工程学校, 湖北 襄樊 441021)

**摘要:** 深部巷道普遍存在因蠕变难以维护的现象, 以山西寿阳县段王矿巷道为研究对象, 用 FLAC<sup>3D</sup> 建立三维巷道模型, 进行了该区域巷道蠕变的数值模拟分析, 得出了该区域巷道围岩蠕变的应力、应变、速度和塑性区的发展规律, 为段王矿地区巷道支护的设计以及巷道岩体蠕变规律研究提供了参考依据。

**关键词:** 深部巷道; 岩体蠕变; 巷道支护; FLAC<sup>3D</sup>

**中图分类号:** TD313 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2011)01-0075-03

## 1 工程背景

选取段王矿 090409 工作面尾巷, 井下标高 807.462~838.067m, 巷道为矩形净宽 4.2m, 净高 3.0m, 尾巷的锚杆采用  $\Phi 18 \times 2000$ mm 螺纹钢锚杆, 锚索采用  $\Phi 15.24 \times 6800$ mm 的钢绞线制作(张拉预应力 120kN), 其支护布置方案见表 1, 顶底板材料厚度情况见表 2。

表 1 090409 尾巷锚杆布置参数

尾巷	顶部	间距 /m	0.95	排距 /m	1.0
锚杆	两帮	间距 /m	1.0	排距 /m	1.0
尾巷锚索	顶部	间距 /m	2.0	排距 /m	3.0

表 2 090409 工作面顶底板情况

类别	分项	主要岩石	厚度 /m	岩性指述
顶板	老顶	砂质泥岩	3.45	黑灰色, 破碎、节理发育
	直接顶	泥岩	1.9	黑灰色, 上部微含砂质, 下部质均, 细腻
底板	直接底	粉砂岩	3.20	褐灰色, 质均夹深色条带, 呈水平层理, 含叶片炭屑及云母碎片

## 2 数值模拟过程

### 2.1 流变计算模拟选取

岩体蠕变按其发展进程分为稳定蠕变和不稳定蠕变,

从图 1 曲线可以看出, 稳定蠕变(图 1-曲线 b)后期变形速率几乎为零, 变形量趋于一个稳定值, 而不稳定蠕变(图 1-曲线 a)在经历等速蠕变阶段后, 蠕变不能趋于某一极限值, 变形无限增长直至破坏。一种岩体是否发生不稳定蠕变取决于岩体应力的大小, 如果岩体应力超过某临界应力(岩石长期强度), 则蠕变向不稳定蠕变发展, 小于此临界应力(岩石长期强度)则按稳定蠕变发展。深层岩体承受较大地应力, 其常见典型蠕变即为不稳定蠕变, 因此随时间蠕变产生大变形破坏成为巷道破坏的主要情况之一。

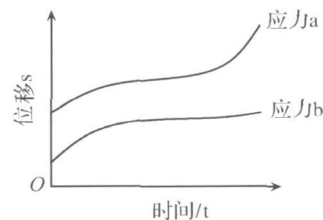


图 1 岩石蠕变曲线

FLAC<sup>3D</sup>在其版本 Version 3.0 中提供了 8 种适用于不同特性岩体材料的黏弹塑性流变模型<sup>[3]</sup>, 其中由可退化的伯格流变模型与带拉伸截止限的莫尔-库仑塑性屈服准则组合而成的复合黏弹塑性模型——Cvisc 模型比较适合模拟一般性软岩和硬岩的流变特征, 其一维应力状态下的模型示意图如图 2 所示。图 2 中,  $E_M$ ,  $E_K$ ,  $\eta_M$  和  $\eta_K$  分别为弹性模量、黏弹性模量、马克斯韦尔黏滞系数和开尔文黏滞系数;  $\varepsilon_M$ ,  $\varepsilon_K$ ,  $\varepsilon_p$  和  $\varepsilon$  分别为马克斯韦尔体应变、开尔文体应变、塑性应变以及总应变。

收稿日期: 2010-07-06

作者简介: 秦力(1970-), 男, 辽宁葫芦岛人, 教授, 大连理工大学博士, 现在东北电力大学从事结构稳定性研究。

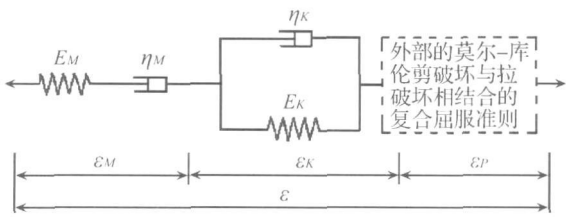


图2 FLAC 3D中 Cvisc流变模型示意图

2.2 数值模拟参数确定

依据现场勘测工作面综合柱状图, 采用 ANSYS 建立几何模型后导入 FLAC<sup>3D</sup>。模型尺寸 50m × 50m × 10m, 由上至下模型分为六层, 材料参数见表 3 Maxwell 体的切向模量及 Kelvin 体的切向模量均取原岩模量 (Maxwell 体的粘性只有在单元出现塑性破坏时起作用)。

表 3 岩体材料参数

组号	密度 / (kg · m <sup>-3</sup> )	泊松比	杨氏模量 / GPa	抗拉强度 / MPa	粘聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)	剪胀角 / (°)
1	2200	0.3	7.5	1.0	5.0	35	10
2	2500	0.3	16.6	2.0	10.0	42	10
3	2000	0.3	2.92	0.3	1.0	30	10
4	2200	0.3	7.5	0.6	2.0	35	12
5	2200	0.3	7.5	0.6	2.0	40	15
6	2500	0.3	16.6	2.0	10.0	42	10

地应力按以下公式 (1) 计算, 巷道深度 H 取 800m,

$$\begin{cases} \sigma_{hmax} = 0.72 + 0.0055H \\ \sigma_{hmin} = 0.80 + 0.0234H \\ \sigma_v = 0.32 + 0.0280H \end{cases} \quad (1)$$

3 模拟结果分析

蠕变计算 200d (1.728e7s), 对结果从应变、应力、速度和塑性区, 四个方面进行分析描述。

3.1 位移

取巷道顶板中点、底板中点、侧帮中点三个监测点, 编号依次为 1、2、3, 1号点 200d 最大蠕变量 0.98m, 2号点为 0.79m, 3号点为 0.94m, 即 200d 该巷道 Y (垂直) 方向缩进 1.77m, 水平方向侧帮缩进 1.98m, 该数据与现场监测情况相吻合。

图 3、图 4 显示 200d 时 X、Y 方向位移等值线及锚杆变形图, 由图可以看出巷道四边中部位移量最大, 向两端递减至接近 0m, 巷道表面位移量最大, 向深部递减 0m; 原来的四个直角被挤压, 严重缩小。锚杆随岩石产生变形, 根据模拟蠕变结果和现象监测资料, 现有锚杆支护并未有效限制岩石蠕变。

3.2 应力

图 5、图 6、图 7 为蠕变 200d 时, X、Y 方向的应力图

及 XY 剪应力图。由图中可看出, 巷道四边均是中部应力较小, 所施加地应力 (垂直向 22MPa 水平向 32MPa) 在巷道表面产生应力水平向约 3~10MPa, 垂直向约为 5~10MPa, XY 向剪应力仅为 4~5MPa, 角部产生一定应力集中, 约为 15~25MPa, 且应力由巷道表面向深部递增, 说明巷道表面已产生松动圈。

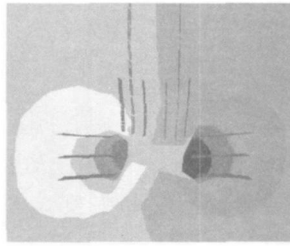


图3 X方向位移等值线及锚杆变形图

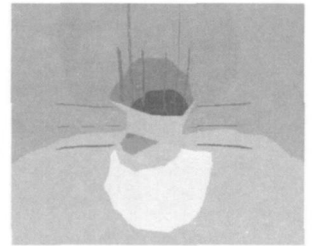


图4 Y方向位移等值线及锚杆变形图

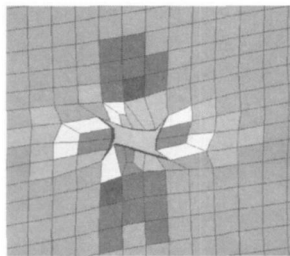


图5 蠕变 200d X方向应力

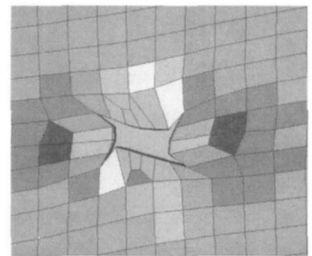


图6 蠕变 200d Y方向应力

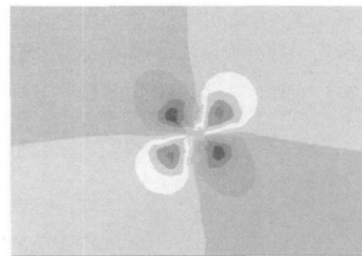


图7 蠕变 200d XY向剪应力

蠕变开始 30d 内, 不平衡力波动很大, 30~70d 不平衡力趋近于稳定, 70d 后趋近于 0。

3.3 蠕变速度

1号、2号与 3号三个点蠕变速度约在 60~70d 后都趋于稳定, 1号点稳定于 2.4e-8m/s, 2号点稳定于 5.8e-8m/s, 3号点 2.6e-8m/s, 可见底板鼓起速度稍快。

图 8、图 9 为 200d 时 X、Y 方向蠕变速度等值线图, 可看出中间部位蠕变速度最快, 水平向约为 3e-8m/s, 垂直向约为 5e-8m/s, 且从巷道表面到深部蠕变速度逐渐减小。

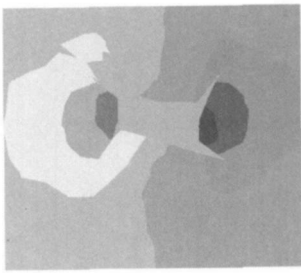


图 8 X 向蠕变速度  
等值线图

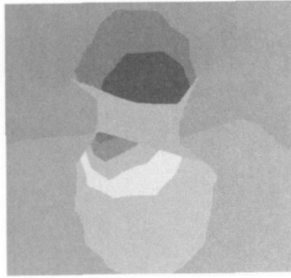


图 9 Y 向蠕变速度  
等值线图

### 3.4 塑性区

图 10 图 11 为 30d 和 200d 时的巷道周围塑性区分布。对比二者可发现随着蠕变的发展, 变形速度趋于稳定, 塑性区范围逐渐减小, 较深部岩体逐渐恢复到弹性区, 仅剩巷道表面附近岩体处于塑性流动状态。

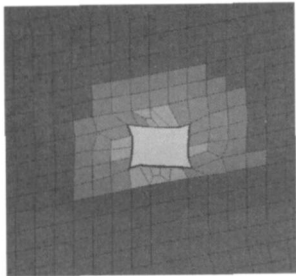


图 10 蠕变 30d 时  
塑性区分布图

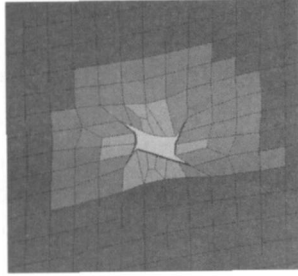


图 11 蠕变 200d 时  
塑性区分布图

## 4 计算结果应用

依据对深部巷道岩体蠕变规律的总结, 现有段王矿支护系统未能在使用期内有效抑制蠕变的原因主要在于锚杆长度不够、间距过大、直径过细。

巷道岩体的蠕变速度是从巷道表面到深部逐渐减小, 原有设计锚杆长度不够, 未能到达深部蠕变速度足够小的区域, 而锚杆直径太小也使得锚杆提供的拉力不够, 使得表层蠕变速度大的岩体未能与深部蠕变速度接近零的岩体形成整体, 因此表层的蠕变速度抑制不明显。此外每根锚杆作用的范围有限, 若锚杆间距过大则两根锚杆中间区域的岩体蠕变将得不到有效抑制。

现有的巷道设计理论悬吊理论、自然平衡拱理论、组合梁理论等重点在于防止岩体的垮塌, 维持巷道整体性, 没有考虑高地应力作用下岩体蠕变造成巷道缩小的情况, 而蠕变是时间因素的量, 因此用现场地质资料建立模型进行数值模拟, 将对巷道设计起到很好的辅助作用。

## 5 结论

1) 从位移分析可知, 巷道四个边中部变形量最大; 水

平方向位移量要比垂直方向大, 所以从现有锚杆支护参数可以看出, 水平方向仅能布置三排锚杆, 无锚索加固, 间距偏大, 影响了锚杆支护的整体作用; 同时顶部支护也应加强。

2) 蠕变产生的最大不平衡力在初期波动很大, 但约 2 个月后可以趋于稳定; 巷道四个边上均是中部应力较小; 且应力由表面向深部递增; 垂直和水平方向施加的大地应力在巷道表面形成的应力并不大, 属于原岩应力区, 仅在角部产生一定应力集中。

3) 由蠕变速度分析可知, 巷道四个边中部蠕变速度比两端要快; 由于侧帮的内缩引起的底板起鼓速度明显偏快; 巷道岩体的蠕变速度在两个月后可趋于稳定。

4) 岩体蠕变速度由巷道表面向深部递减, 因此可以延长锚杆(索), 使其到达蠕变速度更小区域, 以取得更好的限制巷道表面蠕变的效果。

5) 随着蠕变发展趋于稳定, 巷道周围的塑性区域会逐渐减小, 深部岩体会逐渐恢复到弹性区, 仅剩巷道表面附近岩体处于塑性流动。

6) 巷道蠕变对深部巷道使用影响很大, 在进行支护设计时必须予以充分考虑, 否则支护将不能有效抑制蠕变, 大大缩短巷道维护周期, 影响生产降低经济效益。

### 参考文献:

- [1] 王永岩, 等. 深部岩体非线性蠕变变形预测的研究 [J]. 煤炭学报, 2005, 30(4): 409~413
- [2] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [3] Itasca Consulting Group Inc. FLAC<sup>3D</sup> (Version 2.1) users manual [R]. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group Inc., 2002
- [4] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展 [J]. 力学进展, 2005, 35(1): 91~99
- [5] Hou Z. Mechanical and hydraulic behavior of rock salt in the excavation disturbed zone around underground facilities. Int J Rock Mech Min Sci, 2003, 40: 725~738
- [6] 孙强, 秦四清. 岩石蠕变的应力—应变比分析 [J]. 工程地质学报, 2007, 15(1): 66~70
- [7] 康红普, 王金华, 等. 煤巷锚杆支护理论与成套技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007
- [8] 李连崇, 等. 单轴压缩下岩石蠕变失稳破坏过程数值模拟 [J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1978~1981, 1986
- [9] 赵先刚. 锚注联合支护技术在高应力松软围岩巷道中的应用 [J]. 煤炭工程, 2007, 83(2): 94~95
- [10] 何满潮. 深部开采工程岩石力学的现状及其展望. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集 [C]. 北京: 科学出版社, 2004

(责任编辑 郭继圣)