

主应力方向变化对巷道围岩塑性区 形态特征的影响

黄聪¹, 王卫军^{1,2*}, 袁超¹, 肖宇¹

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2.湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为了研究深部巷道围岩塑性区在不同方向垂直主应力作用下的扩展规律, 结合江西曲江煤矿实际条件, 采用现场调查、数值分析等方法, 对不同方向主应力影响下深部巷道塑性区形成及扩展规律进行分析, 研究表明: (1) 垂直主应力方向的改变会影响巷道围岩蝶形塑性区蝶叶的扩展方向, 蝶形塑性区总会朝向垂直主应力偏转方向转动相近的角度; (2) 巷道围岩的变形量与巷道临空面纵向塑性区深度成正相关, 巷道临空面塑性区深度越深, 巷道断面向内部收缩越严重。

关键词: 塑性区; 主应力方向; 巷道变形; 围岩稳定性

中图分类号: TD322 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2020)01-0007-05

Study on the Influence of the Change of Principal Stress Direction on the Morphological Characteristics of Plastic Zone in Surrounding Rock of Roadway

Huang Cong¹, Wang Weijun^{1,2}, Yuan Chao¹, Xiao Yu¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the expansion and change law of plastic zone of deep roadway surrounding rock under the action of vertical principal stress in different directions, based on the actual conditions of Qujiang Coal Mine in Jiangxi Province, the formation and expansion law of plastic zone of deep roadway under the influence of principal stress in different directions are analyzed by field investigation and numerical analysis methods. Results show that: (1) the change of the direction of the principal principal stress affects the expansion direction of the butterfly-shaped plastic zone in the surrounding rock of the roadway, and the butterfly-shaped plastic zone always rotates close to the vertical principal stress deflection direction. (2) the deformation of the surrounding rock of the roadway is positively correlated with the depth of the longitudinal plastic zone of the roadway. The deeper the plastic zone of the roadway surface is, the more serious the roadway section shrinks toward the interior will be.

Keywords: plastic zone; principal stress direction; roadway deformation; stability of surrounding rock

收稿日期: 2019-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51804109; 51434006; 51874130); 湖南省教育厅科研资助项目(18C0333); 湖南科技大学博士启动基金资助项目(E51851)

*通信作者, E-mail: wjwang@hnust.cn

随着浅部煤炭资源日益减少,国内外矿山开采向深部进行已成为必然趋势^[1].相较于浅部岩体,深部岩体所处的力学环境更为恶劣,岩体的组织结构、力学行为特征也更为复杂.围岩非线性大变形力学现象愈加突出,给巷道的支护与维护造成了巨大困难^[2-4].为了对围岩应力状态不同的巷道进行合理有效的支护,深部巷道围岩塑性区的形成与扩展及其控制问题是目前亟需解决的难题.近年来,对深部巷道围岩控制的研究日渐增多,如王卫军^[5]等通过分析深部高应力巷道大变形的原因,提出了预留“给定变形”的新型支护方式.赵志强,马念杰^[6]认为当深部巷道侧压系数 λ ($0 < \lambda < 1$) 较小时,围岩的塑性区会出现蝶形分布的特征,当蝶叶处于巷道正上方时易发生冒顶事故,提出了可接长锚杆支护技术,并阐明了其技术优势与控制作用.余伟建^[7]等根据深部高应力复合顶板煤巷的特征,将顶板的控制作为关键部位,提出了“预应力桁架锚索”为主体的综合控制技术,取得了很好效果.袁超^[8]基于岩石力学、弹塑性力学、Kastner 理论,对塑性区的形成演化过程、几何分布形态进行了深入研究,揭示了深部高应力巷道围岩变形难以控制的力学本质,提出了几种行之有效的围岩稳定性控制技术和方法.

但现有的研究很少考虑主应力方向的改变对于深部巷道塑性区形态变化的影响.本文从深部塑性区巷道围岩变形机理着手,研究垂直主应力方向的变化对于巷道围岩塑性区形态变化的影响,总结深部巷道围岩塑性区的变化规律.

1 数值计算模型及参数

以曲江煤矿 212 风巷为数值计算对象,212 风巷为延工作面穿脉巷道,巷道两帮为 B4 煤,煤层平均厚度为 2.8 m,为半暗半亮型煤.B4 煤直接顶为复合顶板,岩性为炭质泥岩或砂质泥岩,呈黑色、薄层状,并间夹少量镜煤煤线,厚度 8.0~10.0 m.老顶岩性为细~粗砂岩,浅灰色,中厚层水平层理,质地较硬.

本文采用 FLAC^{3D} 有限差分软件,根据 212 风巷的工程地质条件,建立了大小为 100 m(x) \times 20 m(y) \times 80 m(z)的数值模型(图 1),模型共有节点 132 641 个,单元 124 000 个,模型边界条件为除上表面的其余 5 面采用法相约束,上表面施加覆盖岩层的重力边界,其大小为 20 MPa.

模型计算时围岩体本构模型选用摩尔库伦模型,各岩层力学参数如表 1 所示.

表 1 围岩力学参数

岩性	重度/(kN/m ³)	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	体积模量/MPa	剪切模量/MPa
砂岩	27.5	13.2	32	14.06	11.42
砂质泥岩	23.5	4.2	31	5.35	3.65
泥岩	20.5	1.5	25	1.50	0.50
B4 煤	14.0	1.1	29	2.10	0.80
砂质泥岩	23.5	4.2	31	5.35	3.65

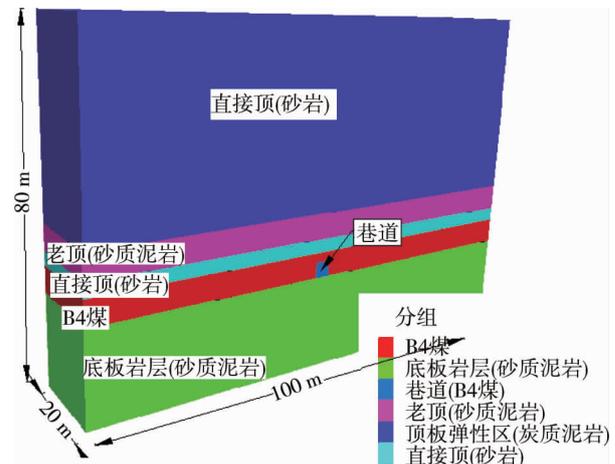


图 1 数值计算模型

2 模拟方案

现场实测表明,工作面采动会使垂直应力在工作面采空区泄压,邻近巷道围岩应力状态发生 2 次改变,巷道顶板整体受到的垂直应力增大,主应力向工作面空区方向偏转,进而使得巷道围岩发生大变形.

为研究深部高应力条件下,不同方向的主应力对巷道围岩塑性区几何形态分布的影响,将侧压系数 λ 设置为 2.5,在原数值计算模型的基础上,保持边界条件、岩层参数、本构模型、主应力大小不变,每次将垂直主应力方向顺时针变化 1° ,对垂直主应力顺时针变化 $0^\circ \sim 45^\circ$ (包括 0°) 在内的 46 种情况进行数值模

拟,垂直主应力角度变化顺序示意图如图 2 所示.同时在巷道模型顶板、底板、帮部布置监测点,布置位置如图 3 所示,记录在不同方向垂直主应力作用下巷道变形量.并将垂直主应力偏转过程中的巷道围岩塑性区扩展情况进行比较分析.为确保每次模拟时巷道围岩塑性区能够充分发生的扩展,每次数值模拟计算 5 000 步后再停止运行.

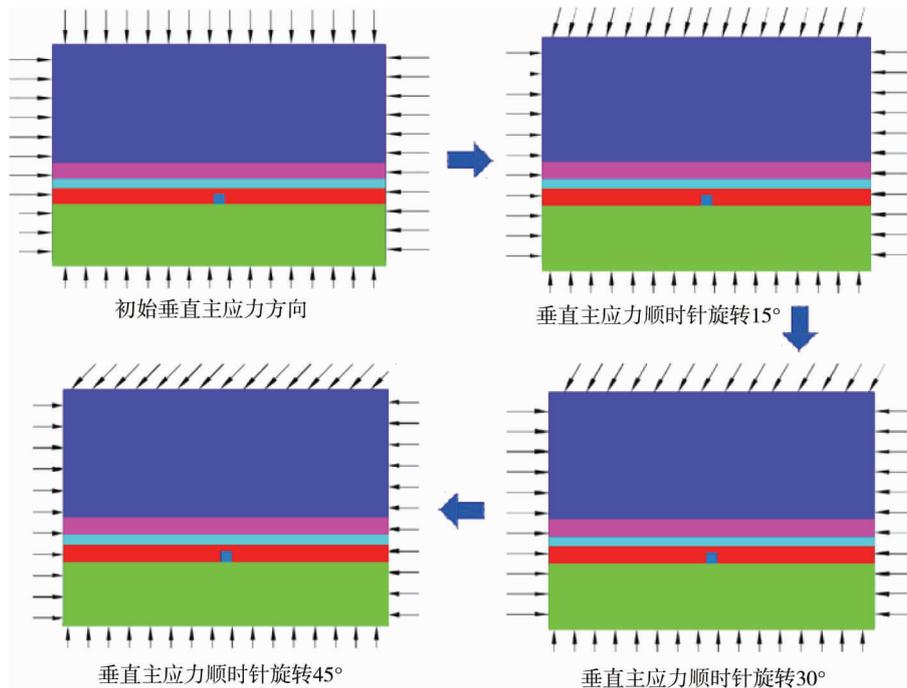


图 2 垂直主应力变化

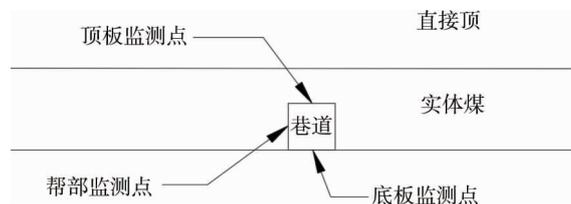


图 3 监测点布置

3 垂直主应力方向变化对巷道围岩塑性区影响

图 4 为侧压系数 $\lambda = 2.5$ 的情况下,垂直主应力顺时针偏转 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 时塑性区几何形态分布情况.图 4a 中,巷道围岩塑性区呈对称分布,塑性区最大半径出现在巷道围岩尖角,围岩塑性区最大半径为 5.4 m,巷道顶板、底板中心正方向塑性区半径为 3.3 m,帮部中心正方向塑性区半径为 1.8 m.图 4b 为垂直主应力顺时针偏转 15° 时巷道围岩塑性区的几何形态,围岩塑性区最大半径为 6.1 m,巷道顶板中心正方向塑性区半径为 4.2 m,帮部中心正方向塑性区半径为 2.3 m.如图 4c 所示,围岩塑性区最大半径为 6.2 m,巷道顶板中心正方向塑性区半径为 5.2 m,帮部中心正方向塑性区半径为 5.9 m.由图 4d 可知,塑性区蝶叶恰好与巷道两帮、顶底板垂直,塑性区最大半径出现在两帮、顶底板垂直的垂直方向,最大塑性区半径为 6.1 m.

比较图 4a~图 4d 这 4 张图可以看出,垂直主应力方向的改变并未对巷道塑性区形状产生很大影响,塑性区形状基本保持一致,均呈现出“蝶形”不规则塑性区,不同在于随着主应力的偏转,蝶形塑性区会随着主应力方向同步旋转.图 4b 和图 4c 分别为垂直主应力顺时针转动 15° 与 30° 时巷道塑性区的形态,可以看出随着垂直主应力方向的改变,塑性区形态也在图 4a 的基础上顺时针旋转了相近角度.观察图 4d 可知当垂直主应力顺时针旋转 45° 后,巷道塑性区向顺时针方向发生了 45° 左右的旋转,原本处于巷道四角倾

斜方向的蝶叶,此时旋转到了巷道顶板、底板、两帮的正方向,导致巷道四面均存在大范围的塑性区,此时的巷道处于易发生大变形的不稳定状态.

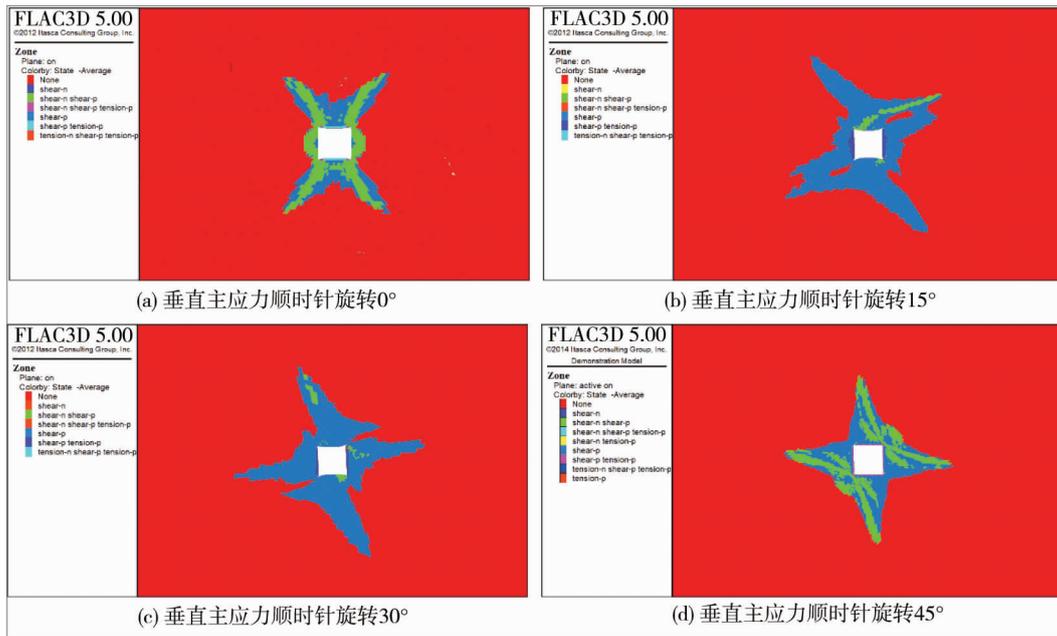


图 4 垂直主应力方向与塑性区分布数值模拟

4 垂直主应力方向变化对巷道围岩位移影响

图 5 为垂直主应力从 0°转动到 45°过程中,巷道顶板、底板、帮部的位移数据图.从图 5 可以看出,当垂直主应力未偏转时,巷道各处位移均较小,随着垂直主应力角度从 0°偏转至 15°过程中,巷道顶板的位移迅速增大,而巷道底板与帮部的位移也有所增加,但位移增加幅度不大.当垂直主应力偏转至 15°~30°的阶段时,巷道顶底板位移对于垂直主应力偏转角度的敏感性明显增强,主应力偏转很小的角度却能引起巷道顶板位移大幅增加.而垂直主应力偏转超过 30°后,巷道顶板底板及帮部的位移接近峰值,继续增大垂直主应力的偏转角度巷道位移量也只有小幅度的增加.

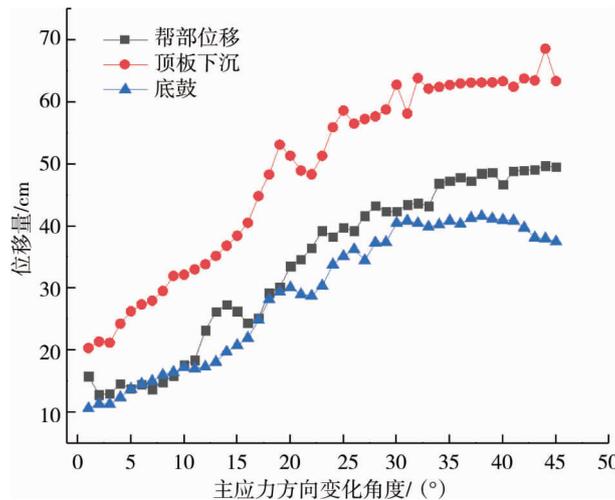


图 5 不同垂直主应力方向监测点位移数据

结合巷道塑性区在垂直主应力偏转过程中发生的变化不难发现,巷道蝶形塑性区蝶叶最初沿着巷道四角倾斜分布,此时,巷道顶底板、两帮方向塑性区范围较小,故而巷道内部变形量较小.随着垂直主应力偏转,蝶形塑性区也随之发生转动,蝶叶方向从巷道四角慢慢向巷道垂向和水平方向偏移,此时蝶叶大部分范围位于巷道四角倾斜方向,所以巷道位移也增加较小.垂直主应力偏转 30°左右时,蝶形塑性区蝶叶已

大部分处于巷道四面,巷道顶底板、两帮存在大范围塑性区,巷道变形大幅增加.继续偏转垂直主应力方向,巷道蝶形塑性区蝶叶继续旋转,直至巷道四面正方向,但由于围岩塑性区范围增加很小,巷道内部变形量较垂直主应力偏转 30° 的位移量增大也很有限.

采动在原岩应力的基础上,引起巷道周边围岩主应力方向发生改变,围岩蝶形塑性区随之发生旋转,当蝶叶位于巷道顶板正上方时,此时的顶板稳定性最差,如果不及时支护或者支护不合理,在受到强烈采动时,巷道顶板部位的破裂围岩体在自重的作用下极易冒落.故而对于受到采动应力影响的巷道要重点监测其变形,遏制巷道围岩破裂区破裂围岩剪胀滑移等非连续性变形,固定围岩松动破碎岩块,确保巷道围岩均匀、协调变形,消除冒顶与片帮等安全隐患,增强巷道围岩的整体性与稳定性,确保巷道在服务年限内正常使用.

5 结论

1)垂直主应力方向的改变对于塑性区形状影响较小,但会使得蝶形塑性区向垂直主应力偏转方向转动,且蝶形塑性区的转动角度与垂直主应力偏转角度有着高度的相对一致性,转动近似的角度.

2)巷道围岩的变形量与巷道临空面纵向塑性区深度成正相关.当围岩蝶形塑性区发生旋转后,使得蝶叶转向巷道四面正方向,巷道临空面塑性区深度加深,巷道的稳定性越来越差,临空面塑性区范围即为潜在的大变形区域.

参考文献:

- [1] 侯朝炯.深部巷道围岩控制的关键技术研究[J].中国矿业大学学报,2017,46(5):970-978.
- [2] 张农,侯朝炯,杨米加,等.巷道围岩强度弱化规律及其应用[J].中国矿业大学学报,1999(2):35-37.
- [3] 柏建彪,王襄禹,贾明魁,等.深部软岩巷道支护原理及应用[J].岩土工程学报,2008(5):632-635.
- [4] 李大伟,侯朝炯.围岩应变软化巷道锚杆支护作用的计算[J].采矿与安全工程学报,2008(1):123-126.
- [5] 王卫军,袁超,余伟健,等.深部大变形巷道围岩稳定性控制方法研究[J].煤炭学报,2016,41(12):2921-2931.
- [6] 马念杰.软化岩体中巷道围岩塑性区分析[J].阜新矿业学院学报(自然科学版),1995(4):18-21.
- [7] 余伟健,王卫军.深井煤巷厚层复合顶板整体变形机制及控制[J].中国矿业大学学报,2012,41(5):725-732.
- [8] 袁超.深部巷道围岩变形破坏机理与稳定性控制原理研究[D].湘潭:湖南科技大学,2017.
- [9] 袁越,王卫军,袁超,等.深部矿井动压回采巷道围岩大变形破坏机理[J].煤炭学报,2016,41(12):2940-2950.
- [10] 郭晓菲,马念杰,赵希栋,等.圆形巷道围岩塑性区的一般形态及其判定准则[J].煤炭学报,2016,41(8):1871-1877.
- [11] 贾后省,马念杰,朱乾坤.巷道顶板蝶叶塑性区穿透致冒机理与控制方法[J].煤炭学报,2016,41(6):1384-1392.
- [12] 刘迅,王卫军.深部巷道变形与塑性区几何形态特征分析[J].矿业工程研究,2017,32(2):60-67.