

矩形与圆形巷道塑性区相关性分析

——侧压系数不大于1

杨佳楠^{1,3}, 李青锋^{1,2,3*}, 邓弘哲^{1,3}, 彭跃金^{1,3}

(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 矿业工程研究院, 湖南 湘潭 411201;
3. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 基于弹塑性理论对不同侧压系数下圆形巷道围岩塑性区进行了理论分析, 给出了不同侧压系数下圆形巷道塑性区范围的计算公式及轮廓图像. 本文将矩形巷道对围岩的影响等价于其外接圆圆形巷道对围岩的影响, 并利用 FLAC^{3D} 数值模拟进一步验证了圆形巷道塑性区范围计算公式及矩形与圆形巷道塑性区的相关性, 得到: (1) 当侧压系数不大于1时, 随着侧压系数的减小, 矩形、圆形巷道塑性区均呈现圆形-椭圆形-蝶形的形态变化; (2) 在相同的侧压系数下, 将矩形巷道对围岩的影响等价于其外接圆圆形巷道对围岩的影响时, 矩形巷道塑性区范围与圆形巷道塑性区范围存在一定关系. 研究成果可作为矩形、圆形巷道支护设计及稳定性分析的理论基础.

关键词: 矩形巷道; 圆形巷道; 塑性区; 相关性; 数值模拟

中图分类号: TD322 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2019)04-0010-06

Correlation Analysis of Plastic Zone Between Rectangular and Circular Tunnel: The Lateral Pressure Coefficient Less Than 1

Yang Jianan^{1,3}, Li Qingfeng^{1,2,3}, Deng Hongzhe^{1,3}, Peng Yuejin^{1,3}

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Institute of Mineral Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
3. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Based on the elastoplastic theory, the plastic zone of surrounding rock of circular tunnel under different lateral pressure coefficients is analyzed theoretically, and the calculating formulas and contour images of the plastic zone of circular tunnel under different lateral pressure coefficients are given. The influence of rectangular tunnel on surrounding rock is equivalent to the influence of circular tunnel on surrounding rock. FLAC^{3D} numerical simulation is used to further verify the calculation formula for the plastic zone of circular tunnel and the correlation between rectangular tunnel and circular tunnel, and the following results are obtained: (1) When the lateral pressure coefficient is not more than 1, with the decrease of the lateral pressure coefficient, the plastic zone of the rectangular tunnel and the circular tunnel presents the shape changes of round, oval and butterfly; (2) Under the same lateral pressure coefficient, when the influence of rectangular tunnel on surrounding rock is equivalent to circumferential circle on surrounding rock deformation, there is a certain relationship between the plastic zone of circular tunnel and the rectangular tunnel. The research results can be used as the theoretical basis for circular tunnel and rectangular tunnel support design, tunnel stability analysis and engineering practice.

Keywords: rectangular tunnel; circular tunnel; plastic zone; correlation; numerical simulation

收稿日期: 2019-04-13

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2130)

*通信作者, E-mail: liqingfeng0712@163.com

众所周知,矿产资源是人类生存和发展的物质基础,但如今,浅部资源逐渐枯竭,对于深部矿产资源的发掘便成了能源发展的趋势.在巷道受到采动影响后,自重应力剧增,巷道产生剧烈变形,而塑性区的范围在一定程度上决定了巷道围岩的破坏程度^[1],当巷道围岩破坏程度较大时会导致顶板垮落、坍塌等事故的发生^[2],因此,深入研究巷道塑性区的分布规律对控制巷道围岩变形具有重要意义.

翟所业^[3]运用德鲁克-普拉格准则推导出了圆形巷道塑性区半径的表达式;袁越^[4]通过建立深部动压环境下圆形巷道的力学模型,得出巷道塑性区边界的隐形方程;郭晓菲等^[5]以塑性区边界隐形方程为基础对圆形巷道围岩塑性区形态的一般变化规律进行了研究,认为不同围压状态下均质围岩圆形巷道塑性区一般为圆形、椭圆形、蝶形3种形态;赵志强^[6]以平面应变模型为基础提出了地下硐室周边岩体蝶形破坏理论,并给出了圆形、椭圆形、蝶形3种地下硐室周边岩体破坏形态的数学界定标准和围岩应力判定准则;于远祥^[7]综合运用了理论分析、数值模拟和现场实测,对矩形巷道的破坏机理进行了深入分析,得出侧压力对矩形巷道的塑性区范围及形态有很大影响;陈成^[8]基于复变函数理论和极限平衡理论,利用FLAC^{3D}模拟软件对矩形巷道围岩的变形特征进行了探究,认为矩形巷道的变形破坏与侧压系数的变化密切相关;孙波^[9]应用弹塑性理论分析了巷道围岩塑性区的影响因素,指出侧压系数是塑性区范围扩展大小的重要影响因素.

本文在弹塑性力学的基础上,将矩形巷道对围岩的影响等价于其外接圆圆形巷道对围岩的影响,对理论和数值模拟进行综合分析后给出了在相同侧压系数下矩形巷道塑性区范围与圆形巷道塑性区范围之间的关系,在能够准确得到矩形巷道塑性区范围的同时也为工程实践中圆形巷道、矩形巷道的稳定性分析提供了一定的理论基础.

1 巷道围岩塑性区分布的理论基础

目前圆形巷道围岩塑性区范围已经有较为成熟的分析方法可以得到,但对于矩形巷道大多采用数值模拟的方法,该方法能够直观地得到其围岩应力及变形情况,但在反映矩形巷道塑性区范围的影响因素时缺乏较为完善的理论依据.王树理^[10]采用“几何等代法”进行应力计算,几何等代法是通过将非圆形断面等价于圆形断面进行应力计算^[11],在文献[12],[13]中也采用了非圆形断面的外接圆来代表实际断面的特征尺寸,因此在前人的基础上,将矩形巷道对围岩变形的影响等价于其外接圆圆形巷道对围岩变形的影响,进而研究矩形巷道围岩塑性区的扩展规律.

对于远场应力场为双向不等压状态的围岩,令矩形巷道宽度为 B ,巷道埋深为 H ,侧压系数为 λ ,外接圆的半径关系式为 $r_1 = 0.5\sqrt{B^2 + H^2}$,由弹塑性力学理论可知,巷道围岩应力在塑性区边界 R 处满足式(1)和式(2);而满足Mohr-Coulomb屈服准则的极限平衡条件为式(3).

$$\sigma_1 + \sigma_3 = \sigma_r + \sigma_t = (1 + \lambda)\gamma H + 2(1 - \lambda)\gamma H \frac{r_1^2}{R^2} \cos 2\theta; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = & \gamma^2 H^2 \left\{ (1 + \lambda)^2 \frac{r_1^4}{R^4} - [(\lambda^2 - 1) \cos 2\theta (2 \frac{r_1^2}{R^2} - 4 \frac{r_1^4}{R^4} + 6 \frac{r_1^6}{R^6})] + \right. \\ & \left. (\lambda - 1)^2 (1 + 9 \frac{r_1^8}{R^8} - 12 \frac{r_1^6}{R^6} - 2 \frac{r_1^4}{R^4} + 4 \frac{r_1^2}{R^2}) + (\lambda - 1)^2 \cos^2 2\theta (12 \frac{r_1^4}{R^4} - 8 \frac{r_1^2}{R^2}) \right\}; \quad (2) \end{aligned}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi + 2c \cdot \cos \varphi. \quad (3)$$

式中: σ_1, σ_3 为任意一点的最大、最小主应力; σ_r, σ_t 为任一点的径向应力、环向应力; γ 为岩石的容重; R, θ 为任一点的极坐标; φ 为内摩擦角; c 为围岩粘聚力.

对于回采巷道,在采动支承压力影响下,侧压系数 λ 一般不大于1.故先取 $r_1 = 1$,铅直应力为20 MPa,侧压系数 λ 分别取0.3,0.5,0.7,1.0时,将式(1)和式(2)代入式(3)可得式(4)~式(7).

$$\frac{1764}{R^8} + \frac{2184 \cos 2\theta - 2352}{R^6} + \frac{2912 \sin^2 \theta - 2156 \sin^2 2\theta + 984}{R^4} + \frac{121.52 \cos 2\theta + 1568 \sin^2 2\theta - 784}{R^2} = 273.1; \quad (4)$$

$$\frac{900}{R^8} + \frac{1\ 800\cos 2\theta - 1\ 200}{R^6} + \frac{1\ 800 - 1\ 100\sin^2 2\theta - 1\ 200\cos 2\theta}{R^4} + \frac{126.8\cos 2\theta + 800\sin^2 2\theta - 400}{R^2} = 459.8; \tag{5}$$

$$\frac{324}{R^8} + \frac{1\ 224\cos 2\theta - 432}{R^6} + \frac{1\ 632\sin^2 \theta - 396\sin^2 2\theta + 664}{R^4} + \frac{100.08\cos 2\theta + 288\sin^2 2\theta - 144}{R^2} = 639.76; \tag{6}$$

$$R^4 = 2.143\ 6. \tag{7}$$

取外接圆的不同极角 θ , 可求得侧压系数 λ 分别取 0.3, 0.5, 0.7 时圆形巷道围岩塑性区边界分布如表 1 所示.

表 1 λ 取 0.3, 0.5, 0.7 时巷道围岩塑性区分布

θ	$\lambda=0.3$	$\lambda=0.5$	$\lambda=0.7$	θ	$\lambda=0.3$	$\lambda=0.5$	$\lambda=0.7$
0	1.23	1.22	1.20	50	2.01	1.14	1.14
5	1.36	1.22	1.20	55	1.94	1.10	1.13
10	1.37	1.22	1.20	60	1.83	1.05	1.12
15	1.40	1.22	1.19	65	1.71	1.00	1.10
20	1.47	1.22	1.19	70	1.59	0.93	1.09
25	1.55	1.21	1.19	75	1.50	0.86	1.08
30	1.70	1.21	1.18	80	1.43	0.82	1.07
35	1.86	1.20	1.17	85	1.40	0.79	1.06
40	1.98	1.19	1.16	90	1.54	0.79	1.06
45	2.03	1.17	1.15				

由式(7)可得, 当 λ 取 1.0 时, 巷道围岩塑性区分布为半径 1.21 的圆.

将以上侧压系数 λ 分别为 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 时所得的圆形巷道围岩塑性区边界分布进行曲线拟合, 得到圆形巷道围岩塑性区边界理论轮廓如图 1.

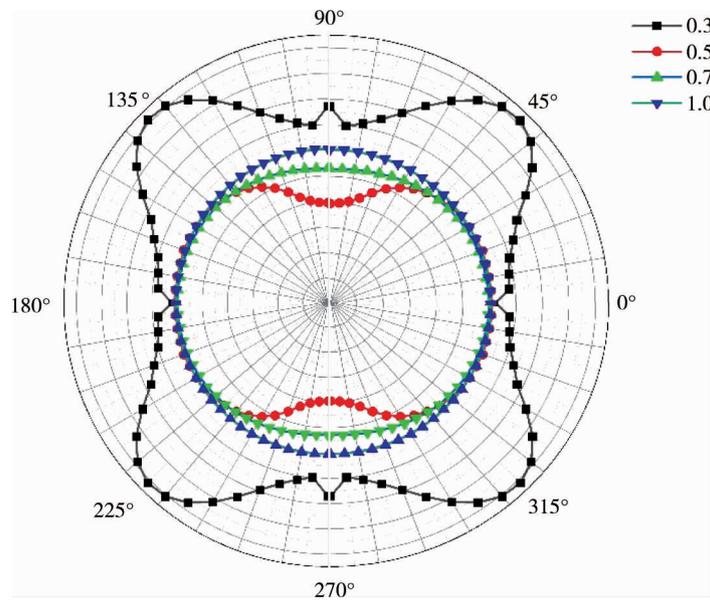


图 1 不同 λ 下圆形巷道塑性区分布轮廓

2 巷道围岩塑性区分布的数值模拟

2.1 模型的建立以及参数的选择

为便于分析不同侧压系数下巷道围岩塑性区的形态特征, 同时验证上述理论推导的准确性, 本文采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件进行模拟. 为了在数值模拟过程中简便计算, 假设围岩连续、均质、符合摩尔-库伦强

度准则.在进行建模计算时,通常认为将计算模型的尺寸取大于所研究对象局部大小的4到5倍时满足要求^[14],故整体计算模型尺寸均取60 m×10 m×30 m.为使本文的理论方法适用于巷道围岩的稳定性分析,根据某矿实际断面情况,分别取不同高宽比的3个矩形巷道尺寸5.0 m×4.0 m,5.0 m×3.6 m,4.3 m×3.6 m,所对应的外接圆形巷道半径分别为3.20,3.08,2.80 m.由于岩石的破坏形式主要是剪切破坏,而摩尔-库伦准则能够较为全面地反映岩石的特点,故模拟中均采用摩尔-库伦本构模型^[15].等效岩体岩石力学参数见表2.

表2 等效岩体岩石力学参数

名称	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	密度/(kg/m ³)
等效岩体	6.3	3.8	5	30	2.0	2.65

2.2 数值模拟的结果及分析

以巷道尺寸 $B \times H$ 为5.0 m×4.0 m的矩形巷道及半径为3.2 m的圆形巷道为例,5.0 m×4.0 m的矩形巷道数值模拟计算结果如图2所示,其相对应半径为3.2 m的外接圆圆形巷道数值模拟计算结果如图3所示.

图2 5.0 m×4.0 m的矩形巷道不同 λ 时的模拟结果图3 半径为3.2 m的圆形巷道不同 λ 时的模拟结果

从5.0 m×4.0 m的矩形巷道和半径为3.2 m的外接圆圆形巷道在不同侧压系数下的数值模拟得到的矩形巷道、圆形巷道塑性区分布图可以看出,侧压系数 λ 的变化对巷道塑性区分布有较大影响.

经过对图3和图2的对比可以看出,侧压系数越小,塑性区发展越不规则;而数值模拟所得圆形巷道塑性区形态与理论计算所得塑性区形态基本一致,能体现圆形巷道塑性区的一般形态变化规律.但当侧压系数 λ 取0.3时,外接圆极角为0°和90°时的理论结果与模拟结果不尽相同,表明理论计算在一定程度上存在误差.

经过分析图2和图3以及图2和图1可以看出,圆形巷道、矩形巷道在相同侧压系数下塑性区的形态大体一致,当侧压系数不大于1时,随着侧压系数的减小,矩形巷道、圆形巷道塑性区形态变化趋势为圆形-椭圆形-蝶形,因而本文将矩形巷道对围岩变形的影响等价于其外接圆圆形巷道对围岩变形的影响观点可行,但存在一定误差.因此把矩形巷道对围岩变形的影响等价于其外接圆圆形巷道对围岩变形的影响时,存在比例系数 k ,使得圆形巷道塑性区面积= $k \times$ 矩形巷道塑性区面积.

3 矩形巷道与圆形巷道塑性区相关性分析

对于前文中模拟得到的各尺寸矩形巷道、圆形巷道塑性区图像,通过AutoCAD绘图软件绘制矩形巷道、圆形巷道塑性区图像并进行进一步的计算得到其面积.其计算结果分别见表3~表5.以下均简称相同侧压系数 λ 下圆形巷道塑性区面积与矩形巷道塑性区面积的比值为比例系数.

从表3~表5可以看出,不同尺寸的矩形巷道及其外接圆圆形巷道塑性区面积在侧压系数为0.19时取到最大值;在侧压系数为0.19~0.70时,圆形巷道塑性区面积与矩形巷道塑性区面积随侧压系数的增大而减小;在侧压系数大于0.7时,塑性区面积逐渐趋于稳定,表明在侧压系数大于0.7时圆形巷道、矩形巷道塑性区发展受侧压系数影响不大.

表3 半径3.2 m圆形,5.0 m×4.0 m矩形巷道塑性区面积及比例系数

侧压系数 (λ)	圆形巷道塑性 区面积/m ²	矩形巷道塑性 区面积/m ²	比例系数 (k)	侧压系数 (λ)	圆形巷道塑性 区面积/m ²	矩形巷道塑性 区面积/m ²	比例系数 (k)
0.19	171.57	111.10	1.54	0.45	11.97	21.33	0.56
0.20	153.01	100.43	1.52	0.50	10.87	21.33	0.51
0.23	105.91	68.44	1.55	0.60	11.66	17.78	0.66
0.25	84.99	60.44	1.41	0.70	12.40	16.00	0.78
0.27	71.75	42.66	1.68	0.73	16.52	16.00	1.03
0.30	39.97	33.77	1.18	0.75	16.52	16.00	1.03
0.33	25.91	28.44	0.91	0.77	16.52	16.00	1.03
0.35	18.94	28.44	0.67	0.80	16.52	16.00	1.03
0.37	13.00	24.89	0.52	0.90	16.52	16.00	1.03
0.40	11.97	24.89	0.48	1.00	21.67	21.33	1.02
0.43	11.97	21.33	0.56				

表4 半径3.08 m圆形,5.0 m×3.6 m矩形巷道塑性区面积及比例系数

侧压系数 (λ)	圆形巷道塑性 区面积/m ²	矩形巷道塑性 区面积/m ²	比例系数 (k)	侧压系数 (λ)	圆形巷道塑性 区面积/m ²	矩形巷道塑性 区面积/m ²	比例系数 (k)
0.19	161.56	94.50	1.71	0.50	10.87	16.88	0.64
0.20	145.03	85.50	1.70	0.60	9.73	14.63	0.67
0.23	91.65	61.88	1.48	0.70	10.21	14.63	0.70
0.25	79.03	52.88	1.50	0.73	14.22	14.63	0.97
0.27	67.83	43.88	1.55	0.75	16.52	14.63	1.13
0.30	49.55	34.88	1.42	0.77	16.52	14.63	1.13
0.33	22.23	28.13	0.79	0.80	16.52	12.38	1.34
0.35	13.80	28.13	0.49	0.85	16.52	12.38	1.34
0.37	11.97	23.63	0.51	0.90	16.52	12.38	1.34
0.40	11.97	16.88	0.71	0.95	16.52	12.38	1.34
0.45	10.87	16.88	0.64	1.00	16.52	12.38	1.34

表5 半径2.8 m圆形,4.3 m×3.6 m矩形巷道塑性区面积及比例系数

侧压系数 (λ)	圆形巷道塑性 区面积/m ²	矩形巷道塑性 区面积/m ²	比例系数 (k)	侧压系数 (λ)	圆形巷道塑性 区面积/m ²	矩形巷道塑性 区面积/m ²	比例系数 (k)
0.19	125.54	65.25	1.92	0.50	6.29	15.75	0.40
0.20	106.52	63.00	1.69	0.60	6.29	13.50	0.47
0.23	76.27	45.00	1.70	0.70	7.83	13.50	0.58
0.25	64.90	36.00	1.80	0.73	6.29	11.25	0.56
0.27	49.74	33.75	1.47	0.75	16.52	11.25	1.47
0.30	37.08	27.00	1.37	0.77	16.52	11.25	1.47
0.33	12.27	18.00	0.68	0.80	16.52	11.25	1.47
0.35	8.77	18.00	0.49	0.85	16.52	11.25	1.47
0.37	8.57	18.00	0.48	0.90	16.52	11.25	1.47
0.40	6.29	15.75	0.40	0.95	16.52	11.25	1.47
0.45	6.29	15.75	0.40	1.00	16.52	11.25	1.47

根据表3~表5,得到侧压系数 λ 与不同巷道尺寸下圆形巷道塑性区面积与矩形巷道塑性区面积之间比例系数 k 的关系,如图4所示.通过对图4进行分析,可以看出:

1)各尺寸不同比例系数发展趋势相似,当侧压系数为0.27~0.35时,比例系数随着侧压系数的增大而减小;当侧压系数为0.35~0.75时,比例系数大体上随着侧压系数的增大而增大;当侧压系数为0.75~1.0时,侧压系数对比例系数影响不大,比例系数趋于稳定值;侧压系数在0.19~0.27之间时,比例系数与侧压

系数的变化之间的关系不太明显。

2) 当侧压系数均取 0.19~0.27 范围内的值时,矩形巷道断面的高宽比越大,比例系数越大;当侧压系数均取 0.35~0.75 范围内的值时,矩形巷道断面的高宽比越大,比例系数则越小;表明矩形巷道断面的高宽比对比例系数有一定影响。

3) 当侧压系数为 0.27~0.35 时,由于各不同尺寸的比例系数曲线基本重合,故对此阶段各曲线进行拟合,得到了在该阶段侧压系数 λ 与比例系数 k 之间的函数关系式为 $k = -12.34 + 4.97\lambda$ ($0.27 \leq \lambda \leq 0.35$)。其中,拟合度为 97.5%。在此阶段,能够通过运用该函数关系式较为准确地得到矩形巷道塑性区范围。

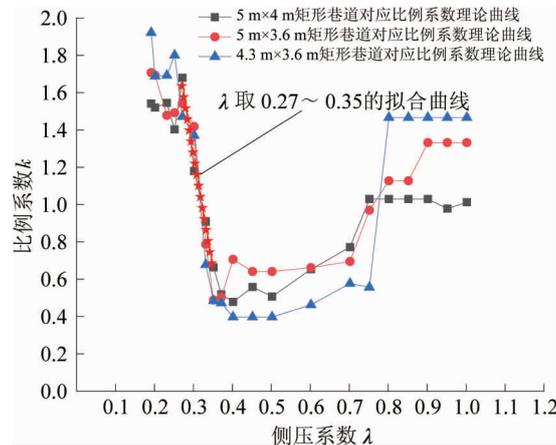


图4 圆形与矩形巷道塑性区面积的比例系数

4 结论

1) 数值模拟得到的圆形巷道塑性区分布规律与理论计算基本一致,且当侧压系数不大于 1 时,随着侧压系数的减小,矩形巷道、圆形巷道塑性区形态变化趋势均为圆形-椭圆形-蝶形。

2) 侧压系数的变化直接导致了圆形巷道以及矩形巷道塑性区形态的变化,而矩形巷道的高宽比也是矩形巷道围岩塑性区发展的重要影响因素。

3) 将矩形巷道对围岩变形的影响等价于其外接圆形巷道对围岩变形的影响,得出了比例系数与侧压系数、矩形巷道高宽比之间的关系,通过该关系可以进一步确定矩形巷道塑性区范围。

参考文献:

- [1] 马念杰,赵希栋,赵志强,等.深部采动巷道顶板稳定性分析与控制[J].煤炭学报,2015,40(10):2287-2295.
- [2] 马念杰,李季,赵志强.圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):206-213.
- [3] 翟所业,贺宪国.巷道围岩塑性区的德鲁克-普拉格准则解[J].地下空间与工程学报,2005(2):223-226.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 赵志强,马念杰,刘洪涛,等.巷道蝶形破坏理论及其应用前景[J].中国矿业大学学报,2018,47(5):969-978.
- [7] 于远祥.矩形巷道围岩变形破坏机理及在王村矿的应用研究[D].西安:西安科技大学,2013.
- [8] 陈成.矩形巷道围岩受力与变形破坏特征研究[D].淮南:安徽理工大学,2018.
- [9] 孙波.基于塑性区分布的深部巷道支护技术研究[J].煤炭工程,2015,47(9):43-45.
- [10] 王树理,王树仁,孙世国.地下建筑结构[M].北京:清华大学出版社,2009.
- [11] 纪维伟,楼晓明,陈鹏辉.非圆形断面围岩应力计算的几何等代法[J].现代矿业,2013,29(11):25-33.
- [12] 华安增.矿山岩石力学基础[M].北京:煤炭工业出版社,2002.
- [13] 刘长武,曹磊,刘树新.深埋非圆形地下洞室围岩应力解析分析的“当量半径”法[J].铜业工程,2010(1):1-5.
- [14] 茅晓辉,魏乃栋,付厚利.FLAC^{3D}在模拟巷道围岩变形规律中的应用[J].煤炭工程,2009(11):63-65.
- [15] 张磊.矿山巷道围岩松动范围演化规律研究[D].西安:西安科技大学,2012.