

基于突变理论的矿山转采隔离顶柱稳定性分析*

杜逢彬, 郭微

(重庆市勘测院, 重庆 400020)

摘 要:以高陡边坡下露天转地下开采过程中隔离顶柱安全厚度的留设为背景,建立了基于突变理论的隔离顶柱稳定性强度折减法,通过FLAC^{3D}有限差分软件不断折减隔离顶柱强度参数,得到不同折减系数下隔离顶柱的最大竖向位移,建立其竖向位移与折减系数的尖点突变模型,并以此作为隔离顶柱是否失稳的判据,得到了隔离顶柱安全系数与其厚度之间的对数拟合函数,发现隔离顶柱的安全系数随厚度的减小而降低,且在顶柱厚度较小时,隔离顶柱的安全系数劣化加剧。

关键词:露天转地下开采;隔离顶柱;尖点突变理论;强度折减法;数值模拟

中图分类号:TD853 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2018)02-0552-06

Stability Analysis on Boundary Pillar during Open-pit to Underground Mining Based on Catastrophe Theory

Du Fengbin, Guo Wei

(Chongqing Survey Institute, Chongqing 400020, P.R. China)

Abstract: In order to design the thickness of boundary pillar in the progress of open-pit to underground mining with high and steep slope, strength reduction method is established based on catastrophe theory. With the reduction of strength parameters by FLAC^{3D}, a cusp catastrophe model of the max vertical displacement of the boundary pillar and reduction coefficient is built. The progress of boundary pillar can be reflected when this model is employed as the failure criterion. The results show that the relationship of thickness and safety factor of boundary pillar shows logarithmic function significantly, and the safety factor reduces as the thickness decreases. In particular, the degradation of safety factor is increased when the thickness of boundary pillar is thin.

Keywords: open-pit to underground mining; boundary pillar; cusp catastrophe theory; strength reduction method; numerical simulation

0 引言

隔离顶柱是设置在露天采场和地下采场之间,用以保证地上、地下同时开采安全的保护岩层。如果隔离顶柱厚度留设不足,极易引起顶柱及采空区围岩的跨落,从而影响露天和地下采场的安全,造成重大人员伤亡和财产损失;隔离顶柱过厚,又会造成资源的浪费。

目前,关于露天转地下开采隔离顶柱厚度的计算方法主要有经验类比法、厚跨比法、荷载传递线交汇法、结构力学简化梁法、普氏拱理论估算法、K. B.鲁佩涅依特理论估算法及三维数值模拟计算法^[1-4]。其中,经验类比法受限于国内外可供参考的露天转地下开采的高陡边坡实例太少,其他传统计算露天转地下开采隔离顶柱厚度的方法基本采用半定量分析,考虑因素简单、片面,应用范围受到

* 收稿日期:2017-10-26(修改稿)
作者简介:杜逢彬(1976-),男,四川隆昌人,高级工程师,全国一级注册土木工程师(岩土),主要从事岩土工程勘察、地质灾害防治方面的研究。E-mail:674998477@qq.com

一定限制^[5]。

20 世纪 70 年代以来,作为非线性理论之一的突变论被引入岩石力学^[6-7]。目前,国内外很多研究者将突变理论引入到了岩体结构稳定性分析中:Qin 等^[8]建立了滑坡的尖点突变模型,解释了滑坡发生的全过程;付成华等^[9]、许传华等^[10]基于耗散结构理论、熵及突变理论等非线性科学理论,提出了岩体破坏的失稳判据;娄一青等^[7]采用有限元强度折减法建立了边坡内最大水平位移与折减系数的尖点突变模型,用以分析边坡稳定性。

本文以我国东南某特大金铜矿山为背景,利用数值分析方法模拟高陡边坡下露天转地下开采过程中隔离顶柱向极限平衡状态的演化过程,应用尖点突变理论建立了隔离顶柱稳定性强度折减法,分析了露天转地下开采过程中不同厚度隔离顶柱的稳定性变化规律,为计算高陡边坡下露天转地下开采过程中隔离顶柱厚度的安全系数提供了一个新的方法。

1 工程概况

我国东南某特大型金铜矿山,上部金矿采用露天开采方法已基本开采完毕,形成了长 1 870 m、宽 1 630 m,最大边坡深度达 310 m 的露天采场。矿山下部是分布更为广泛、储量更为丰富的铜矿床。综合考虑到露天开采的经济性和安全性,本矿山在露天开采深度达到 400 m^[11]之后,下部铜矿拟采用地下开采方式。在露天转地下开采时,由于露天境界凹陷深度达 310 m,境界东南面边坡坡脚达到 49°,西北面边坡坡脚最大有 50°,势必对隔离顶柱的稳定性产生重要影响,也直接关系到整座矿山能否安全、经济地持续开采。

2 基于尖点突变模型的强度折减法

如图 1 所示,强度折减法的基本原理就是利用强度折减公式不断增加折减系数,降低材料破坏强度,直至分析对象到达临界破坏状态。其中强度折减公式为:

$$c' = c/F \tag{1}$$

$$\varphi' = \arctan(\tan \varphi/F) \tag{2}$$

式中: c' 为折减后的凝聚力; c 为凝聚力,MPa; F 为折减系数; φ' 为折减后的内摩擦角; φ 为内摩

擦角。

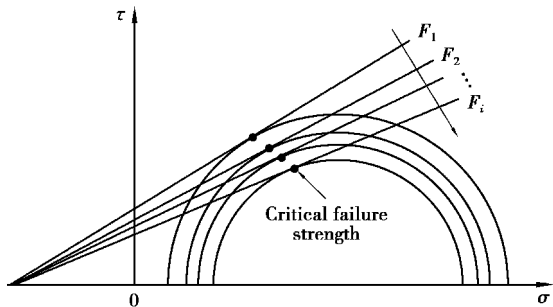


图 1 强度折减计算过程中计算点破坏强度变化示意图

Fig. 1 Critical failure strength of strength reduction

隔离顶柱的失稳过程是随着开采范围的增大,顶柱位移扰动并不断增大,直至顶柱岩体屈服断裂,引发位移突变。因此,在用强度折减法对露天转地下开采隔离顶柱进行稳定性分析时,可以建立隔离顶柱竖向最大位移 D 与强度折减系数 F 的突变模型函数 $D(F)$,然后再利用突变模型函数 $D(F)$ 和顶柱塑性区体积来判别隔离顶柱是否失稳。根据尖点位移突变标准势函数^[12],可以构建出以下多项式:

$$D = a_0 + a_1F + a_2F^2 + a_3F^3 + a_4F^4 \tag{3}$$

式中: D 为矿柱最大水平位移; a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 为待定系数。

利用 Tschirnhaus 变换原理对式(3)进行变形,具体过程如下:

$F = r - Q$,其中 $Q = a_3/4a_4$,则式(3)变为

$$f = b_0 + b_1r + b_2r^2 + b_3r^3 + b_4r^4 \tag{4}$$

其中:

$$\begin{Bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q^4 & -Q^3 & Q^2 & -Q & 1 \\ -4Q^3 & 3Q^2 & -2Q & 1 & 0 \\ 6Q^2 & -3Q & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} a_4 \\ a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{Bmatrix} \tag{5}$$

令 $V = D/4b_4, u = b_2/4b_4, v = b_1/4b_4, c = b_0/4b_4$,则式(4)变为:

$$V = \frac{1}{4}r^4 + \frac{1}{2}ur^2 + vr + c \tag{6}$$

式中: u, v 为控制变量因子(多因素影响下综合指标无量纲); r 为状态因子; c 为剪切项,对突变分析无意义,省略去。

图 2 为 zeeman 突变曲面^[13], 它的平衡曲面 M 为:

$$r^3 + ur + v = 0 \tag{7}$$

它的分歧点集为:

$$\Delta = 4u^3 + 27v^2 = 0 \tag{8}$$

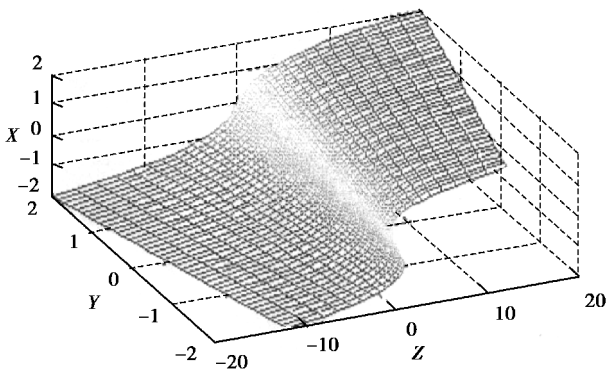


图 2 Zeeman 突变曲面^[13]

Fig. 2 Zeeman catastrophe surface^[14]

根据突变理论, $\Delta = 0$ 时, V 处于稳定平衡与不稳定平衡的临界状态; $\Delta > 0$ 时, V 为稳定平衡; $\Delta < 0$ 时, V 为不稳定平衡。 V 的稳定性与 D 的稳定性一致, 因此, 可知隔离顶柱稳定性判据如下:

- (1) $\Delta > 0$, 隔离顶柱位移稳定;
- (2) $\Delta < 0$, 隔离顶柱位移不稳定;
- (3) $\Delta = 0$, 隔离顶柱位移处于临界状态。

3 基于突变理论的隔离顶柱稳定性强度折减法的实现过程

这里利用 FLAC^{3D} 数值模拟分析软件, 采用 Mohr-Coulomb 准则对隔离顶柱的稳定性进行计算分析。

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} = 0 \tag{9}$$

式中: $N_\varphi = \frac{1+\sin \varphi}{1-\sin \varphi}$; c 为黏聚力; φ 为摩擦角。

拉伸破坏判据为:

$$f^t = \sigma_t - \sigma_3 = 0 \tag{10}$$

式中: σ_t 为抗拉强度。

具体实现过程如图 3 所示:

4 隔离顶柱安全系数分析

4.1 模型建立

该矿山预计地下采场采用分段空场法, 根据矿

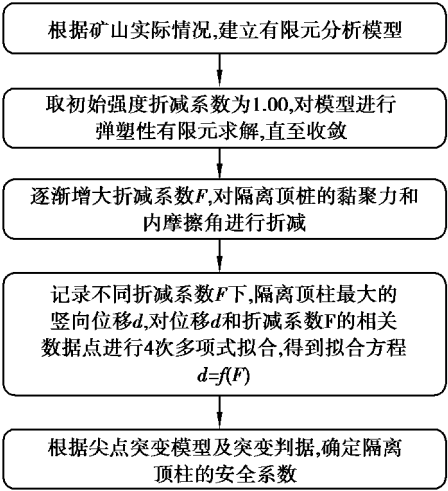


图 3 数值模拟过程

Fig. 3 Flow chart of numerical simulation

场实际情况, 典型剖面处露天边坡高度分别为 310 m 和 160 m, 边坡角分别为 49° 和 50°, 阶段高度为 60 m, 矿房长度为 80 m, 矿床平均厚度为 75 m。模型长 1 500 m, 高 710 m。图 4 是隔离顶柱为 50 m 时的典型剖面间的计算模型, 该模型四周及下底面采用固定法向约束。模型计算参数如表 1。

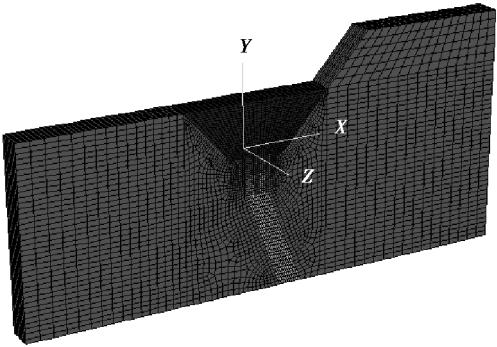


图 4 典型剖面计算模型与网格划分

Fig. 4 Calculation model and meshes of typical sections

表 1 弹塑性计算参数

Table 1 Elastic-plastic parameters for calculation

岩组	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性 模量 /GPa	泊松 比	黏聚力 /MPa	内摩 擦角 /($^\circ$)	抗拉 强度 /MPa
中细粒 花岗岩	26.6	50.0	0.25	3.0	37	3.0
英安芬岩	26.4	37.9	0.26	2.26	33	2.26
铜矿体	27.5	94.3	0.23	4.88	35.6	4.88

4.2 不同厚度的隔离顶柱安全系数分析

分别建立隔离顶柱的厚度为 10、20、30、40、50 m 的计算模型,以研究高陡边坡下露天转地下开采过程中不同隔离顶柱厚度的安全系数。这里以厚度为 50 m 时的算例来说明求解隔离顶柱安全系数过程。

图 5 为顶柱厚度为 50 m 时,隔离顶柱最大竖向位移 d 和折减系数 F 的泰勒级数拟合曲线。由图可知:隔离顶柱的最大竖向位移随折减系数 F 的增大而增大。当 $F<2.6$ 时,位移增长缓慢,反之,隔离顶柱的下沉量急剧增加。根据第 3 节的计算方法可得到不同折减系数 F 下的隔离顶柱最大竖向位移突变特征值 Δ 随折减系数 F 的演化曲线(见图 6)。由式(8)可知,当折减系 $F=2.6$ 时, $u=-0.081\ 674$, $v=0.009\ 724\ 9$, $\Delta=0.000\ 374\ 2>0$,而当 $F=2.7$ 时, $\Delta=-0.008\ 878\ 4<0$,隔离顶柱失稳。因此,可认为 $F=2.6$ 为隔离顶柱的临界折减系数,即隔离顶柱厚度为 50 m 时的安全系数。

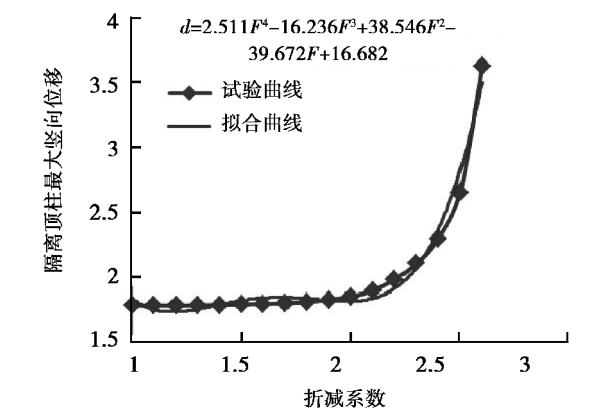


图 5 $d(F)$ 拟合曲线

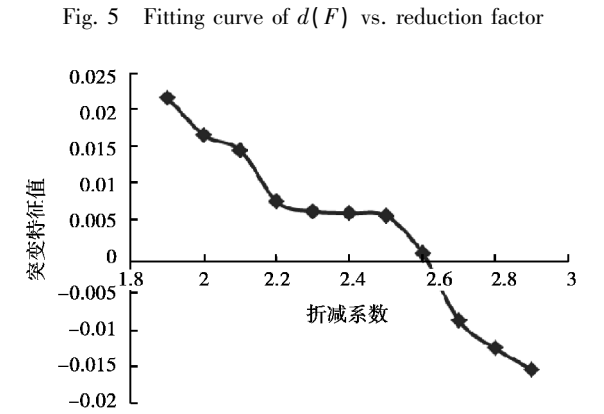
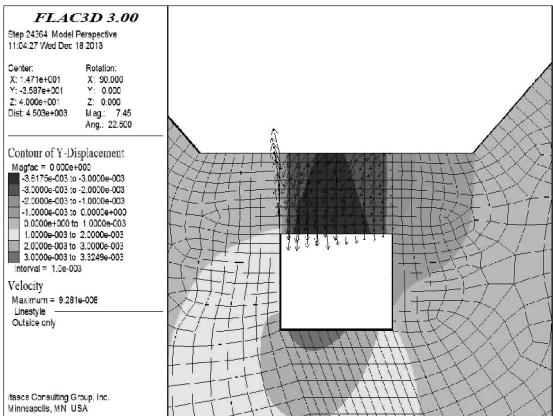


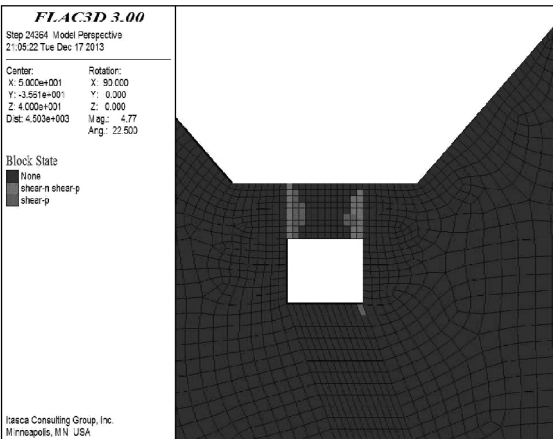
图 6 $\Delta(F)$ 变化曲线

Fig. 6 Curve of $\Delta(F)$ vs. reduction factor

图 7 是折减系数为 2.6 时隔离顶柱的数值计算结果。图 7(a)显示了 $F=2.6$ 时, $z=0$ 截面上竖向位移云图。从图中可以看出,隔离顶柱的的竖向位移远大于其他部位的围岩,且顶柱中部下沉量最大,顶板表现为整体向下的塑性流动,但在靠近较低边坡的顶柱边缘有向上运动的趋势。这是由于隔离顶柱两侧边坡高度不一,对隔离顶柱产生的水平作用力大小不同,高边坡对隔离顶柱的水平作用力大于低边坡,使得靠近低边坡的隔离顶柱边缘在自身重力及不均衡水平应力共同作用下出现上移趋势。从图 7(b)中明显可看出在顶柱与围岩交界处为剪切破坏集中区域。



(a) 竖向位移云图(单位:m)



(b) 塑性破坏区图

图 7 折减系数为 2.6 时隔离顶柱的计算结果
Fig. 7 Calculation results of boundary pillar when $F=2.6$

图 8 为顶柱塑性区体积随折减系数的变化曲线。可以看出,顶柱塑性区体积随折减系数的增大呈非线性增长。当 $F>2.6$ 时,顶柱塑性区体积陡增,此时,处于塑性区的采空区顶板发生剪切破坏,顶板处于失稳状态。而后顶柱塑性区体积保持不变,但最终完全破坏。

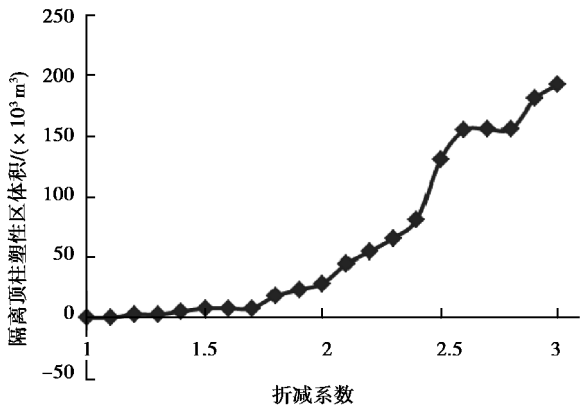


图 8 隔离顶柱塑性区体积随折减系数的变化曲线
Fig. 8 Curve of plastic zone volume vs. reduction factor

通过上述方法计算得到不同厚度的隔离顶柱的安全系数如表 2 和图 9。从图 9 中可看出,隔离顶柱的安全系数随其厚度增大而增加,当隔离顶柱厚度过低时,其安全系数随厚度降低而快速下降。对隔离顶柱安全系数与厚度与的关系曲线进行拟合,得到如下拟合方程:

$$F_s = 0.662 \ln(h) - 0.018 6 \quad (11)$$

式中: F_s 为隔离顶柱的安全系数; h 为隔离顶柱厚度, m。

表 2 隔离顶柱不同厚度下的安全系数表
Table 2 Safety factors of boundary pillar with different thicknesses

隔离顶柱厚度/m	10	20	30	40	50
安全系数	1.5	2.0	2.2.	2.4	2.6

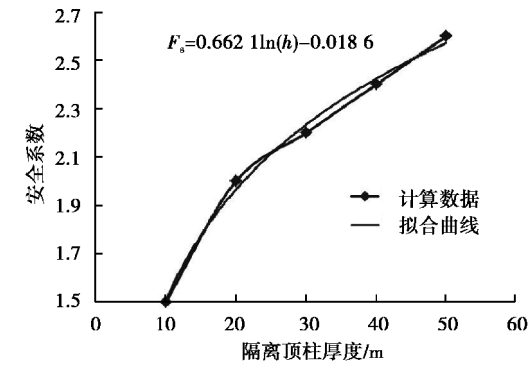


图 9 采空区重叠顶板安全系数和顶板厚度的关系曲线
Fig. 9 Fitting curve of safety factor vs. thickness of boundary pillar

该拟合方程的 R^2 为 0.994 7, 拟合度很高, 可以为该金铜矿山在高陡边坡下的露天转地下开采过程中的隔离顶柱厚度设计提供参考依据。

5 结论

- (1) 利用 FLAC^{3D} 数值模拟软件, 结合基于突变理论的隔离顶柱稳定性强度折减法, 为研究隔离顶柱稳定性提供了一种新的定量研究方法。
- (2) 隔离顶柱的安全系数随隔离顶柱厚度的减小而降低, 在隔离顶柱厚度较小时, 其安全系数劣化速率增加。
- (3) 得到了高陡边坡下露天转地下开采过程中隔离顶柱安全系数与其厚度函数关系, 为设计相似地质情况下的隔离顶柱厚度提供了参考。

参考文献 (References)

[1] 林超, 胡福祥. 高陡边坡下露天地下联合开采隔离顶柱合理厚度的研究[J]. 金属矿山, 2012(1): 51-54. (Lin Chao, Hu Fuxiang. Suitable thickness of boundary roof of open-pit underground combined minging under high and steep slope[J]. Metal mine, 2012(1): 51-54. (in Chinese))

[2] Nomikos P P, Sofianos A I, Tsoutrelis C E. Structural response of vertically multi-jointed roof rock beams[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, 39(1): 79-94.

[3] 刘辉, 陈文胜, 冯夏庭, 等. 大冶铁矿露天转地下开采的离散元数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1413-1417. (Liu Hui, Chen Wensheng, Feng Xiating, et al. Numerical modeling of Daye iron open-pit-mine transferring to underground mining by discrete element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1413-1417. (in Chinese))

[4] Swift G M, Reddish D J. Stability problems associated with an abandoned ironstone mine [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2002, 61(3): 227-239.

[5] 林杭, 曹平, 李江腾, 等. 采空区临界安全顶板预测的厚度折减法[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 53-57. (Lin Hang, Cao Ping, Li Jiangteng, et al. The thickness reduction method in forecasting the critical safety roof thickness of gob area[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 53-57. (in Chinese))

[6] 李乔贤. 盐岩储库建腔期稳定性评价体系研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012. (Li Qiaoxian. Study on stability

- evaluation system of storage of salt rock in construction period [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese))
- [7] 娄一青,顾冲时,李君. 基于突变理论的有限元强度折减法边坡失稳判据探讨[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2008,40(3):361-366.(Lou Yiqing, Gu Chongshi, Li Jun. Study of the slope failure criterion in strength reduction finite element method based on catastrophe theory[J]. Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2008, 40(3):361-366.(in Chinese))
- [8] Qin S, Jiao J J, Wang S. A cusp catastrophe model of instability of slip-buckling slope[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, 34(2):119-134.
- [9] 付成华,陈胜宏. 基于突变理论的地下工程洞室围岩失稳判据研究[J]. 岩土力学,2008,29(1):167-172.(Fu Chenghua, Chen Shenghong. Study of instability criteria of surrounding rock of underground engineering cavern based on catastrophe theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1):167-172.(in Chinese))
- [10] 许传华,任青文. 围岩稳定分析的熵突变准则研究[J]. 岩土力学,2004,25(3):437-440.(Xu Chuanhua, Ren Qingwen. Criterion of entropy catastrophe of stability of surrounding rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3):437-440.(in Chinese))
- [11] 禹朝群,甘德清,顾乃满. 露天转地下覆盖层研究进展[J]. 现代矿业,2010,3(3):29-32.(Yu Chaoqun, Gan Deqing, Gu Naiman. Progress on research of overburden from open pit to underground [J]. Modern Mining, 2010, 3(3):29-32.(in Chinese))
- [12] 赵延林,吴启红,王卫军,等. 基于突变理论的采空区重叠顶板稳定性强度折减法及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(7):1424-1434.(Zhao Yanlin, Wu Qihong, Wang Wenjun, et al. Strength reduction method to study stability of goaf overlapping roof based on catastrophe theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7):1424-1434.(in Chinese))
- [13] Zeeman E C. Catastrophe theory [A] // Zeeman E C. Selected Papers 1972-1977 [C]. London: Addison-Wesley, 1977:78-96.
- [14] Rene. Thom. Structural stability and morphogenesis [M]. New York: Benjamin-Addison Wealer, 1975.
- (上接第 529 页)
- [8] 铁道部. 铁路隧道风险评估与管理暂行规定[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008. (Ministry of Railway. Provisional regulations of railways tunnels risks assessment and management[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.(in Chinese))
- [9] Guidelines for Tunneling Risk Management. ITA Working Group No. 2. Tunneling and Underground Space Technology[R]. 2004.
- [10] 中华人民共和国国家标准. 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范(GB 50652-2011)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (National Code of the People's Republic of China. Code for risk management of underground works in urban rail transit (GB 50652-2011) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [11] 国际隧道工程保险集团与慕尼黑再保险公司联合编纂. 隧道工程风险管理作业守则[Z]. 2003. (The International Tunnel Insurance Groups and Munich Reinsurance Company. Operation law of tunnel engineering risk management[Z]. 2003. (in Chinese))
- [12] 王岩, 黄宏伟. 地铁区间隧道安全评估的层次-模糊综合评判法[J]. 地下空间, 2004, 24(3): 301-305. (Wang Yyan, Huang Hongwei. Hierarchy-fuzzy comprehensive judgment for safety evaluation of metro running tunnel[J]. Underground Space, 2004, 24(3): 301-305. (in Chinese))
- [13] 李俊松, 仇文革. 基于网络层次模糊综合评价的铁路隧道岩溶风险分析研究[J]. 铁道建筑, 2011(10): 22-25. (Li Junsong, Qiu Wenge. Risk analysis of railway tunnel in karst region by comprehensive evaluation based on network level fuzzy method [J]. Railway Engineering, 2011(10): 22-25. (in Chinese))
- [14] 王刚, 李俊松, 张兴刚. 地铁区间暗挖隧道下穿既有铁路站场安全风险管理研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(9): 93-98. (Wang Gang, Li Junsong, Zhang Xinggang. Study on safety risk management of metro tunnel with hidden-digging method under-passing existing railway station [J]. Railway Standard Design, 2014, 58(9): 93-98. (in Chinese))
- [15] 郑余朝. 三孔并行盾构隧道近接施工的影响度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006. (Zheng Yuchao. Study on the influence degree of adjacent construction of three parallel shield tunnels [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese))