

巷道支护的自稳平衡圈理论

黄庆享, 郑 超

(西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 基于软岩巷道围岩变形破坏的自稳平衡现象, 通过数值模拟揭示了巷道顶板、两帮和底板之间的相互影响关系, 得出了巷道围岩不稳定区是以巷道为中心的椭圆形。基于普氏理论, 考虑“底板-两帮-顶板”相互影响, 提出了巷道围岩自稳平衡圈理论, 给出了自稳平衡圈的椭圆曲线方程, 明确了巷道支护对象为自稳平衡圈内的岩体, 支护的目的是控制自稳平衡圈岩体的稳定性。研究表明, “底板-两帮-顶板”共同构成巷道稳定性的整体系统, 巷道顶板自稳平衡拱的大小随着两帮塑性区的增大而增大, 两帮塑性区随底板变形而增大。加强底板和两帮的支护, 将大大缩小顶板自稳平衡拱的高度。提出了“治顶先治帮, 治帮先治底”的巷道支护理念, 得到多年实践验证, 为软岩巷道支护控制提供了新的依据。

关 键 词: 软岩巷道; 自稳平衡圈; 底板-两帮-顶板; 支护

中图分类号: TD 353

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 05-1231-06

Theory of self-stable ring in roadway support

HUANG Qing-xiang, ZHENG Chao

(School of Energy Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Based on the self-stable phenomena of surrounding rock deformation and failure in the soft rock roadway, the numerical simulation method is adopted to reveal the relationships among the roof, two ribs and floor of the roadway. It is found that the unstable zone of roadway surrounding rock is ellipse around roadway. According to the Protodyakonov's theory and the interactions among the roof, two ribs and floor, a new theory of self-stable ring is put forward and its elliptic curve equation is given. This research clearly confirms that the rock mass within the ring is the supporting subject and the main purpose of support is to control the stability of rock mass within the ring. This research shows that the “floor - two ribs - roof” constitute the overall system of roadway stability system. The size of self-stable arch in the roadway roof increases with the increase of the plastic zone of ribs, while the plastic zone of ribs increases with the deformation of floor. Hence, the height of ring in the roof will be greatly reduced by strengthening the floor and two ribs. Therefore, the roadway control principle is put forward which can be described as “control roof must control ribs first, and control ribs must control floor first”, and it has been verified in practice by years. This theory provides a new basis for soft rock roadway control.

Keywords: soft rock roadway; self-stable ring; floor-ribs-roof; support

1 引 言

在长期的地下工程实践中, 人们发现围岩具有自稳特性。科学的支护方法就是确定合理的支护对象, 最大限度利用围岩的自承能力和自稳结构。因此, 巷道围岩控制的核心是确定支护对象并促成支护-围岩稳定结构^[1-3]。

在巷道支护的发展历程中, 随着支护方式的变化, 支护理论的研究也不断深化。由最初的仅考虑冒落拱内岩石重量的普氏压力拱假说和考虑极限平

衡拱的太沙基公式, 发展到考虑处于极限平衡的破裂带围岩以外塑性区支护的卡斯特纳计算公式^[4], 上述计算理论都是基于被动式支护提出的。随着软岩巷道支护实践的发展, 提出了与支架-围岩关系相互作用观念, 出现了具有主动式支护和充分利用围岩自承能力的锚杆支护方式, 主动支护理论也得到相应的发展。锚杆支护理论由最初的悬吊理论逐渐发展到了组合梁理论和挤压加固理论^[5], 近年来, 又提出了比较实用的围岩松动圈理论^[6]、关键承载圈理论^[7]和围岩强度强化理论^[8]等。这些理论推动

收稿日期: 2014-07-26

基金项目: 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目 (No. NCET040971)。

This work was supported by the Program for New Century Excellent Talents in University of Education Ministry of China (NCET040971).

第一作者简介: 黄庆享, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事采矿岩层控制方面的研究工作。E-mail: huangqx@xust.sn.cn

了巷道支护技术的进步,然而对于如何确定合理的支护范围和支护参数,尚需进一步探索。

本文研究始于 2002 年攀枝花太平煤矿破碎带软岩巷道支护,基于复修支护提出了自稳隐形平衡拱的概念和支护对策^[9],研究成果获得 2004 年四川省科技进步二等奖。2003 年在澄合三软煤层巷道支护中,发展了考虑巷道两帮作用的自稳平衡拱理论,并于 2005—2007 年分别在宁煤集团金能二矿软煤复合顶板支护和靖远大水头煤矿运输大巷复修支护中得到成功应用。2008—2011 年,在芙蓉矿区和石屏矿区底鼓型软岩巷道支护研究中,考虑了底板对两帮和顶板的重要影响,逐步形成了破碎型软岩巷道围岩自稳平衡圈的认识。本文对此进行总结,供相关研究与实践参考。

2 围岩的自稳平衡圈

2.1 自稳平衡现象

在原岩中开挖巷道后,不进行支护可能出现以下两种情况^[9]:①巷道围岩变形较小并能长期稳定;②巷道围岩变形过程中伴随着底鼓、片帮和冒顶,然后达到相对稳定。实践证明,巷道围岩在一定状态下是可以自稳的。巷道自稳状态能抵抗正常地应力的作用,这种现象被称为岩石的自稳平衡现象。

2.2 巷道围岩自稳平衡圈

在煤矿回采巷道支护中,往往只关注顶板的冒落,而忽略了底板对两帮和两帮对顶板的作用,没有将“底板-两帮-顶板”看作一个系统。对于煤层及其顶底板较软的巷道,底板和两帮破坏对顶板自稳平衡拱具有显著影响,“底-帮-顶”是一个相互作用的整体,巷道围岩自稳系统应该是一个“圈”。

利用数值计算可以揭示巷道自稳平衡圈的形态。取巷道断面宽为 5 m,高为 3.5 m,巷道两侧为实体煤,建立 FLAC 数值计算模型。模拟岩层力学参数见表 1,模型采用先加载后开挖的加载方式。按照不同的底-帮-顶围岩强度组合,利用正交方法分析巷道的稳定性,如表 2 所示。

表 1 煤岩层物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of rock

岩层名称	厚度 /m	内摩角 /(°)	凝聚力 /MPa	抗拉 强度 /MPa	密度 /(kg/m ³)	弹性 模量 /GPa	泊松比
细砂岩	5	35	3.8	2.0	2 780	2.8	0.23
泥质砂岩	4	32	1.6	1.4	2 600	2.1	0.32
煤层	4	30	1.4	1.2	1 500	1.8	0.30
砂质泥岩	5	30	1.8	1.6	2 500	2.3	0.28
粉砂岩	8	26	2.0	1.6	2 580	2.0	0.26

表 2 巷道围岩强度组合方案

Table 2 Surrounding rock strength combination scheme

方案	顶板		两帮		底板	
	凝聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa	凝聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa	凝聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa
1	2.0	1.6	1.4	1.2	1.8	1.6
2	2.0	1.6	1.4	1.2	0.4	0.2
3	2.0	1.6	0.5	0.3	1.8	1.6
4	0.6	0.4	0.5	0.3	0.4	0.2

2.2.1 两帮对顶板的影响

根据表 2,方案 3 比方案 1 的两帮岩体凝聚力减弱 64%,计算得出方案 3 的顶板垂直应力比方案 1 降低了 45.3%,拉应力范围明显增大(见图 1),顶板下沉位移也增加了 42.9%(见图 2)。

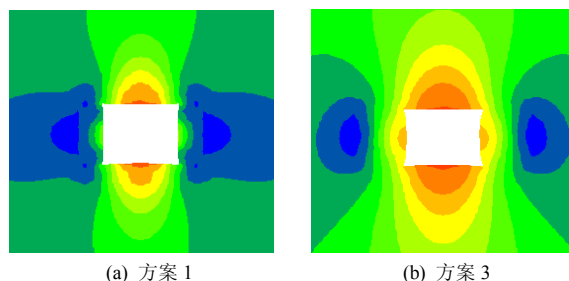


图 1 巷道垂直应力分布

Fig.1 Vertical stress distribution of roadway

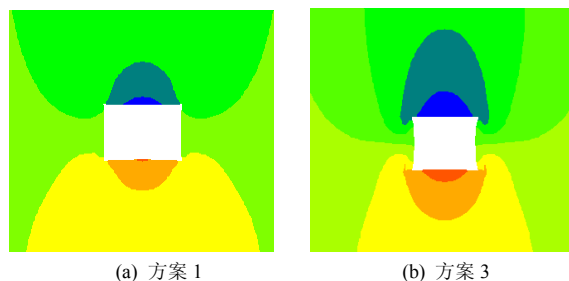


图 2 巷道垂直位移分布

Fig.2 Vertical displacement distribution of roadway

2.2.2 底板对两帮的影响

方案 1 比方案 2 底板凝聚力减弱 78%(见表 2),计算得出两帮水平应力降低了 28.7%(见图 3),水平位移增加了 16.4%(见图 4)。

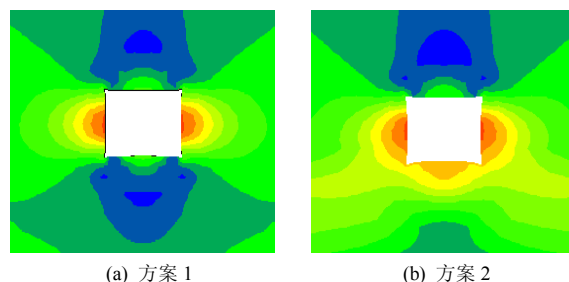


图 3 巷道水平应力分布

Fig.3 Horizontal stress distribution of roadway

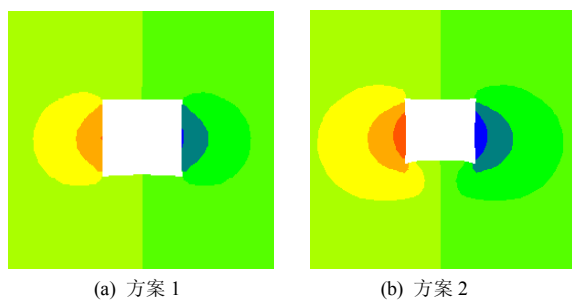


图4 巷道水平位移分布

Fig.4 Horizontal displacement distribution of roadway

2.2.3 巷道围岩的自稳圈

若巷道围岩顶板、两帮和底板强度均较低, 如方案 4, 那么巷道围岩的塑性区将演变为一个近似椭圆的形状 (极限平衡圈), 如图 5 所示。

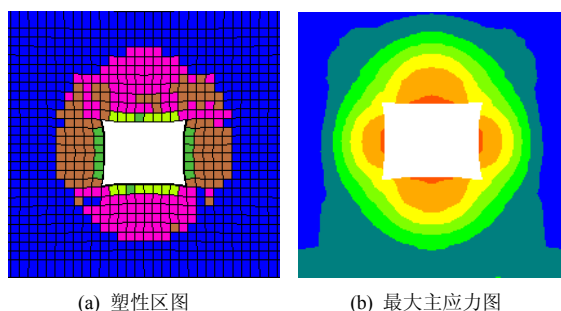


图5 巷道围岩自稳平衡圈

Fig.5 Self-stable ring of roadway surrounding rock

3 巷道围岩自稳平衡圈理论

巷道围岩所受的力除了竖直地应力外, 还有水平地应力, 垂直应力和水平应力对巷道围岩稳定性都有较大的影响, 以前的一些理论忽略了水平应力的存在, 不能准确地反映巷道应力环境。以下为考虑水平原始应力时的自然平衡圈理论。

3.1 巷道顶板自稳平衡拱

设巷道埋深为 H , 原岩垂直应力为 q , 侧压系数为 λ , 巷道宽度为 $2a$, 巷道高度为 h_w , 岩石坚固性系数为 f 。根据普氏理论^[10-11], 顶板岩层内存在处于极限平衡状态的拱, 基本假设如下:

(1) 平衡拱受均布竖向载荷 $q = \gamma H$ (H 为巷道距地表的深度, γ 为岩石重度) 及均布水平载荷 λq 的作用;

(2) 拱脚的移动, 决定了拱的破坏;

(3) 拱脚处的水平切力 $F = fqa$ 。

当巷道顶板软弱, 两帮、底板围岩坚硬且支护良好, 平衡拱拱脚处的水平切力方向指向拱对称轴线时, 水平巷道顶板极限平衡拱的受力如图 6 所示。

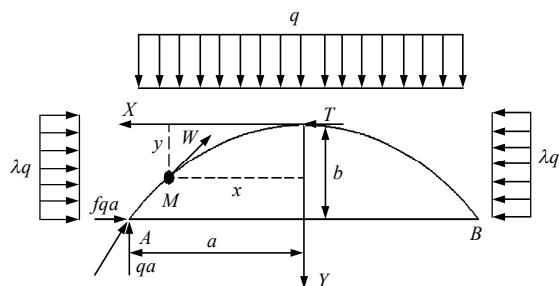


图6 巷道顶板的极限平衡拱

Fig.6 Equilibrium arch in roadway roof

根据对称性, 取左半拱进行分析。由于普氏拱的边缘处于极限平衡状态, 是拉压力区和压应力区的边界, 极限平衡拱任意横截面上只有轴向压力而无剪力 and 弯矩。以拱顶为原点, 水平方向坐标为 X 轴, 垂直方向坐标为 Y 轴, 拱顶原点的轴力为 T , 则拱上任一点 $M(x, y)$ 取力矩的平衡方程为

$$Ty - \frac{q}{2}x^2 - \frac{\lambda q}{2}y^2 = 0 \quad (1)$$

考虑左半拱沿 x 轴投影的极限平衡方程可得

$$T - \lambda qb - fqa = 0 \quad (2)$$

即

$$T = \lambda qb + fqa \quad (3)$$

将式 (3) 代入到式 (1), 有

$$x^2 + \lambda y^2 - 2(\lambda b + fa)y = 0 \quad (4)$$

经简单变换, 即得极限平衡拱的方程:

$$\frac{x^2}{(C\sqrt{\lambda})^2} + \frac{(y-C)^2}{C^2} = 1, \quad C = b + \frac{fa}{\lambda} \quad (5)$$

由式 (5) 可见, 极限平衡拱的形状为椭圆曲线的一部分。此椭圆的水平半轴为 $C\sqrt{\lambda}$, 竖直半轴长为 C , 椭圆中心点的坐标为 $(0, C)$ 。椭圆中心点在顶板水平线 AB 的下方的巷帮, 椭圆中心至顶板的距离为

$$d = C - b = \frac{fa}{\lambda} \quad (6)$$

将 $x = a$ 、 $y = b$ 代入式 (5) 可得

$$\lambda b^2 + 2fab - a^2 = 0 \quad (7)$$

解方程 (7), 可得顶板极限平衡拱的高度为

$$b = \frac{a}{\lambda}(\sqrt{f^2 + \lambda} - f) \quad (8)$$

根据普氏理论^[1], 稳定平衡拱的高度为极限平衡拱高度的2倍, 则自稳平衡拱的高度为

$$b_z = 2b = \frac{2a}{\lambda}(\sqrt{f^2 + \lambda} - f) \quad (9)$$

3.2 考虑巷帮失稳的自稳平衡拱

设巷帮高度为 h_w ，巷帮垮落角为 α ，巷帮最大破坏深度为 $L_1 = h_w / (2f)$ ，此时巷道有效跨度增大为 $a_1 = a + L_1$ ，自稳平衡拱也增大为 b_{z1} ，如图 7 所示。

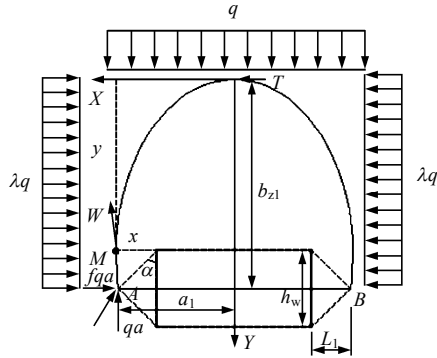


图 7 巷帮失稳后的顶板自稳平衡拱
Fig.7 Roof self-stable arch when ribs failure

对点 M 取力矩平衡方程，可得平衡拱方程为

$$\frac{x^2}{(C_1\sqrt{\lambda})^2} + \frac{(y - C_1)^2}{C_1^2} = 1 \quad (10)$$

令其中：

$$C_1 = \frac{b_{z1}}{2} - \frac{fa_1}{\lambda} \quad (11)$$

可见，平衡拱的形状为椭圆曲线，椭圆的水平半轴为 $C_1\sqrt{\lambda}$ ，竖直半轴长为 C_1 ，椭圆中心点得坐标为 $(0, C_1)$ 。椭圆中心点在巷道极限跨度线 AB 上方，椭圆中心至 AB 线的距离为

$$d_1 = \frac{b_{z1}}{2} - C_1 = \frac{fa_1}{\lambda} \quad (12)$$

将 $x = a_1$ 、 $y = b_{z1}$ ，代入式 (10) 可得

$$\frac{\lambda b_{z1}^2}{4} + fa_1 b_{z1} - a_1^2 = 0 \quad (13)$$

解方程 (13)，可得考虑两帮破坏的顶板自稳平衡拱高度为

$$b_{z1} = \frac{2a_1}{\lambda}(\sqrt{f^2 + \lambda} - f) \quad (14)$$

3.3 考虑底板和巷帮破坏的自稳平衡圈

当底板岩层软弱出现底鼓时，将促使两帮破坏区的发展，进而影响顶板的稳定。此时，巷道周围将出现自稳平衡圈，巷道加固的对象和范围就是自稳平衡圈内的岩体。

当巷道底板出现松弛或底鼓，将引起巷帮进一

步破坏，相当于巷道等效高度增大。设巷道底板在巷帮下部的松弛深度为 h_d ，按照断裂力学裂纹端部塑性区宽度的一般折算等效裂纹长度的原理，则于巷帮等效高度增大了 $0.5h_d$ 。按照普氏理论，巷帮最大破坏深度为

$$L_2 = (h_w + 0.5h_d) / (2f) \quad (15)$$

则等效巷道半宽为

$$a_2 = a + L_2 \quad (16)$$

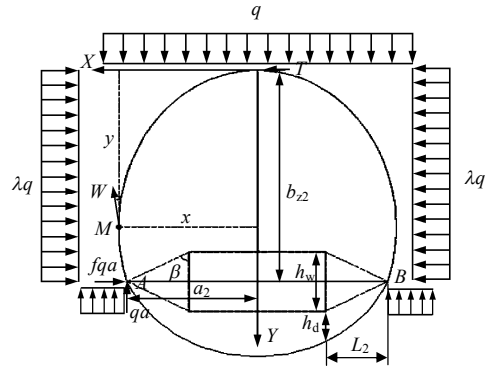


图 8 考虑底板破坏的极限自稳平衡圈
Fig.8 Roadway self-stable ring when floor failure

同理，可得考虑底板影响的平衡拱方程：

$$\frac{x^2}{(C_2\sqrt{\lambda})^2} + \frac{(y - C_2)^2}{C_2^2} = 1 \quad (17)$$

其中：

$$C_2 = \frac{b_{z2}}{2} - \frac{fa_2}{\lambda} \quad (18)$$

椭圆中心点得坐标为 $(0, C_2)$ 。椭圆中心点在巷道极限跨度线 AB 的上方，椭圆中心至 AB 线的距离为

$$d_2 = \frac{b_{z2}}{2} - C_2 = \frac{fa_2}{\lambda} \quad (19)$$

将 $x = a_2$ ， $y = b_{z2}$ 代入到式 (17)，可得

$$\frac{\lambda b_{z2}^2}{4} + fa_2 b_{z2} - a_2^2 = 0 \quad (20)$$

解方程 (20)，可得考虑底板和两帮破坏的顶板自稳平衡拱高度为

$$b_{z2} = \frac{2a_2}{\lambda}(\sqrt{f^2 + \lambda} - f) \quad (21)$$

4 巷道围岩稳定性控制机制

大部分软岩巷道都存在底鼓现象，底鼓将造成两帮不稳，进一步引起顶板不稳定范围增大，巷道顶板、两帮和底板的变形相互影响，是一个整体。

根据自稳平衡圈理论,控制好底板和两帮,可减小顶板垮塌区和不稳定区高度,降低顶板支护难度。实践中,巷道支护必须重视底板和两帮支护对顶板控制的影响,即“治顶先治帮,治帮先治底”。

此外,现场支护往往忽视帮-底和顶-帮结合部(见图9中阴影区)的支护,而这些区域是巷道形成底板-两帮-顶板整环控制的关键区。

对于顶板小自稳平衡拱,锚杆长度以深入挤压承载岩体区为宜。对于大自稳平衡圈,锚杆支护按照组合拱设计,并配合锚索支护。锚索支护的作用是为锚杆控制区以外的自稳平衡区提供挤压应力,锚索长度应按照自稳平衡拱高度确定。

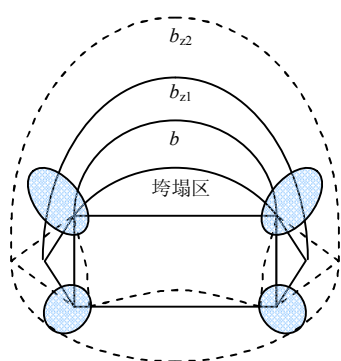


图9 巷道支护的自稳平衡圈演化

Fig.9 Evolution of roadway self-stable ring

5 工程应用举例

运用巷道围岩自稳平衡拱理论,在四川攀枝花太平煤矿破碎带大行复修支护和煤巷软岩支护、陕西澄合王村三软煤层巷道支护、靖远大水头煤矿运输大巷复修支护等工程得到成功应用,取得良好效果。下面以太平煤矿软岩回采巷道支护为例^[12],说明该理论的应用方法。

5.1 巷道基本条件和变形特征

四川攀枝花煤业集团太平煤矿+700 m 南一运输大巷布置在 23-2[#]煤层,巷道埋深为 530 m,地层倾角为 42°,大巷沿煤层底板掘进,煤层厚度为 0.93 m,煤层松软易碎;煤层直接顶较破碎,为 0.91 m 的砂质泥岩,老顶为厚度 16 m 的粗粉砂岩;煤层底板为 1.78 m 泥质粉砂岩。巷道形状为三心拱形,下宽为 4.8 m,中高为 3.8 m。

5.2 自稳平衡圈参数确定

垂直应力 $\sigma_v = \gamma H = 0.025 \times 530 = 13.2$ MPa, 水平应力 $\sigma_h = \lambda \gamma H = 0.5 \times 0.025 \times 530 = 6.6$ MPa, 顶板岩层和煤体的坚固性系数 $f = 1.0$, 煤层内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$, 巷帮高度 $h_w = 2.2$ m, 宽度 $2a = 4.8$ m。

实测巷道底板松弛深度 $h_d = 0.8$ m, 巷帮等效高度为 $h_w + 0.5h_d$, 巷帮破坏深度由式(15)可得 $L_2 = 1.3$ m, 则巷道等效半宽由式(16)可得 $a_2 = a + L_2 = 3.7$ m。

由式(21)可得顶板自稳平衡拱高度 $b_{z2} = 3.32$ m。

根据上述计算,考虑锚固段的长度,顶板采用 4 m 锚索即可,两帮采用 2 m 锚杆即可。

工程实践表明,巷道围岩收敛变形量小于 10%,巷道在使用期间安全稳定,取得良好的支护效果。

6 结 论

(1) 巷道围岩垮落存在自稳平衡现象,其机制是围岩内部存在挤压应力而形成自稳平衡拱。

(2) 软岩巷道底板的破坏增加了巷帮有效高度,使两帮破坏区扩大;两帮破坏区增加了巷道有效跨度,增大顶板自稳平衡拱的范围。软岩巷道围岩自稳区是一个近似椭圆的自稳平衡圈。

(3) 对于有底鼓的软岩巷道,顶板的破坏与两帮和底鼓密切相关。巷道支护必须重视底板和两帮的支护,即“治顶先治帮,治帮先治底”。

(4) 巷道支护的对象是控制自稳平衡圈内岩体的稳定性,锚索和锚杆长度可以按照自稳平衡圈范围确定。

参 考 文 献

- [1] 贾宏俊,王辉. 软岩巷道可缓冲渐变式双强壳体支护原理及实践[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 1119—1126.
JIA Hong-jun, WANG Hui. Principle and application of the double cacheable and gradually deformable supporting shells for soft rock tunneling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(4): 1119—1126.
- [2] 何富连,张广超. 深部破碎软岩巷道围岩稳定性分析及控制[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1397—1406.
HE FU-lian, ZHANG Guang-chao. Analysis and control of stability of the fractured soft rock surrounding a deep roadway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(5): 1397—1406.
- [3] 周辉,卢景景,徐荣超,等. 深埋硬岩隧洞围岩板裂化破坏研究的关键问题及研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2737—2749.
ZHOU Hui, LU Jing-jing, XU Rong-chao, et al. Critical problems of study of slabbing failure of surrounding rock in deep hard rock tunnel and research progress[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(10): 2737—2749.
- [4] 李世平. 岩石力学简明教程[M]. 徐州: 中国矿业学院

- 出版社, 1986: 139—150.
- LI Shi-ping. A brief tutorial of rock mechanics[M]. Xuzhou: China Mining University Press, 1986: 139—150.
- [5] 中国矿业学院. 井巷工程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 178—180.
- China Institute of Mining & Technology. Sinking and driving engineering[M]. Beijing: Publishing House of Coal Industry, 1984: 178—180.
- [6] 董方庭, 宋宏伟, 郭志宏, 等. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 22—32.
- DONG Fang-ting, SONG Hong-wei, GUO Zhi-hong, et al. Roadway support theory based on broken rock zone[J]. **Journal of China Coal Society**, 1994, 19(1): 22—32.
- [7] 康红普. 巷道围岩的关键圈理论[J]. 力学与实践, 1997, 19(1): 34—36.
- KANG Hong-pu. The theory of key circle of roadway surrounding rock[J]. **Mechanics and Practice**, 1997, 19(1): 34—36.
- [8] 侯朝炯, 勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 342—345.
- HOU Chao-jiong, GOU Pan-feng. Mechanism study on strength enhancement for the rocks surrounding roadway supported by bolt[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(3): 342—345.
- [9] 黄庆享. 构造破碎带大巷复修的支护理论与实践[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(6): 15—18.
- HUANG Qing-xiang. Support theory and practices to repair of mine roadway in tectonic broken zone[J]. **Coal Science and Technology**, 2008, 36(6): 15—18.
- [10] 赵彭年. 考虑水平方向原始应力时巷道顶板上自然平衡拱的形态[J]. 中国矿业学院学报, 1978, 7(1): 51—58.
- ZHAO Peng-nian. The shape of natural equilibrium arch of roadway roof by considering the initial stress in horizontal direction[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 1978, 7(1): 51—58.
- [11] 黄庆享, 张沛, 董爱菊. 浅埋煤层地表厚砂土层“拱梁”结构模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2722—2726.
- HUANG Qing-xiang, ZHANG Pei, DONG Ai-ju. Mathematical model of “arch beam” of thick sandy soil layer movement in shallow seam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(9): 2722—2726.
- [12] 黄庆享, 董伯林, 陈国红, 等. 急倾斜软煤巷道破坏机制及锚网支护设计[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(3): 333—336.
- HUANG Qing-xiang, DONG Bo-lin, CHEN Guo-hong, et al. Failure mechanism of entry in steep soft seam and bolting design[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2006, 23(3): 333—336.
- tiny-particle clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3043—3050.
- [21] LEBEDEV A F. Soil and groundwaters[M]. Moscow: The Academy of Sciences of the USSR, 1936.
- [22] MESRI G. Mechanisms controlling the permeability of clays[J]. **Clays and Clay Minerals**, 1971, 19(3): 151—158.
- [23] SRIDHARAN A, RAO S M, MURTHY N S. Compressibility behavior of homogenized bentonite[J]. **Geotechnique**, 1986, 36(4): 551—564.
- [24] 袁建滨. 土中结合水特性及其测试方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- YUAN Jian-bin. The study of properties of bound water in clayey soils and their quantitative methods[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [25] 谷任国, 房莹光. 极细颗粒黏土渗流效应的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1595—1598.
- GU Ren-guo, FANG Ying-guang. Experimental research on ion effects of ultrafine granular clay seepage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1595—1598.

上接第 1230 页

- [16] ZHU W, WANG R, ZUO J, et al. Improved isotropically consolidated undrained triaxial test method for non-self-supporting materials[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2014, 37(4): 1—11.
- [17] ASTM. D5084 Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter[S]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2010.
- [18] ZHU W, ZHANG C L, CHIU A C. Soil-water transfer mechanism for solidified dredged materials[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(5): 588—598.
- [19] YANFUL E K, SHIKATANI K S, QUIRT D H. Hydraulic conductivity of natural soils permeated with acid mine drainage[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1995, 32(4): 624—646.
- [20] 梁健伟, 房莹光, 谷任国. 极细颗粒黏土渗流的微电场效应分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3043—3050.
- LIANG Jian-wei, FANG Ying-guang, GU Ren-guo. Analysis of microelectric field effect of seepage in