

# 基于锚固串群体结构的顶板支护设计

张玉群<sup>1</sup>,朱永建<sup>1,2\*</sup>,王平<sup>1,2,3</sup>,任恒<sup>1</sup>,李鹏<sup>1</sup>,王希之<sup>1</sup>

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;

2.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;

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:**针对破碎顶板稳定性差,变形量大,支护设计不合理等问题,基于数值模拟提出锚固串群体结构,分析了锚固串群体结构及其力学机制,通过建立锚固串群体结构力学平面模型,得到相邻锚固串锚固厚度计算公式.为了研究锚固串群体结构不同锚固厚度的支护效果,设计了4种不同锚固串群体结构.本文以矩形巷道为例,由4种不同锚固串群体结构设计了1 200,1 000,800,600 mm等4种不同锚杆间距的支护方案.通过数值模拟和支护成本的综合分析,得出最优支护方案为间距800 mm,进一步得到部分相交的锚固串群体结构是最合理结构这一结论.锚杆支护设计应根据具体巷道地质特征和现场生产条件,确定部分相交的锚固串群体结构参数.

**关键词:**数值模拟;锚固串群体结构;锚固厚度;锚杆间距

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2019)04-0016-06

## Surrounding Rock Control of Deep Roadway Based on Anchorage Group Structure

Zhang Yuqun<sup>1</sup>; Zhu Yongjian<sup>1,2</sup>; Wang Ping<sup>1,2,3</sup>; Ren Heng<sup>1</sup>; Li Peng<sup>1</sup>; Wang Xizhi<sup>1</sup>

(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;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of poor stability, large deformation and unreasonable support design of broken roof, the anchorage string group structure is proposed based on numerical simulation, and the anchorage string group structure and its mechanical mechanism are analyzed. By establishing the mechanical plane model of anchorage string group structure, the calculation formula of anchorage thickness of adjacent anchorage string is obtained. In order to study the supporting effect of different anchorage thickness of anchorage string group structure, four different anchorage string group structures are designed. In this paper, taking the rectangular tunnel as an example, four support schemes with different bolt spacing of 1 200 mm, 1 000 mm, 800 mm and 600 mm are designed, corresponding to four different anchor string structures. Through the comprehensive analysis of numerical simulation and support cost, it is concluded that the spacing of 800 mm is the optimal support scheme, and the group structure of partially intersecting anchor strings is the most reasonable structure. At the same time, the design of bolt support should be based on the specific geological characteristics of the roadway and the site production conditions to determine a reasonable group structure of anchor string.

**Keywords:** numerical simulation; anchor string structure; anchorage thickness; anchor spacing

收稿日期:2019-08-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774130;51804114);南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室科研启动资助项目(969-E51770)

\*通信作者,E-mail:yjzhu@hnust.edu.cn

巷道支护是保证煤矿安全高效开采的重要手段,易受到开采及复杂地质条件等因素的影响<sup>[1,2]</sup>.其中,破碎围岩的巷道支护问题是煤矿安全高效生产的一大难题<sup>[3]</sup>.国内学者对此开展了一系列研究.张农<sup>[4]</sup>针对离层破碎顶板提出高性能预拉力锚带网索+桁架组合支护;许兴亮<sup>[5]</sup>针对破碎围岩的变形阶段提出分阶段动态支护并对关键部位加强支护;杜计平<sup>[6]</sup>提出深井破碎围岩的支护应根据锚杆破断力确定合理的锚杆构件;王卫军<sup>[7]</sup>根据承载结构原理提出高阻让压和高强度支护的破碎软岩支护技术;何富连<sup>[8]</sup>根据破碎软岩的失稳机制提出了多层次锚喷网注联合支护;孟庆彬<sup>[9]</sup>针对深部破碎软岩巷道提出“锚网索喷+U型钢支架+注浆+底板锚注”分步联合支护.但在巷道锚杆支护参数的设计上缺乏合理有效的确定方法.本文针对破碎顶板稳定性差,变形量大,支护设计不合理等问题,基于数值模拟提出锚固串群体结构模型.分析了锚固串群体结构及其力学机制,通过建立锚固串群体结构力学平面模型,得到相邻锚固串锚固厚度计算公式.研究了锚固串群体结构不同锚固厚度的支护效果,通过数值模拟和支护成本确定了最优支护方案,得到最优锚固串群体结构.

## 1 锚固串群体结构及其力学机制

当巷道顶板发生破碎变形时,由于顶板上部岩层的作用,对破碎顶板起到了一定的压实作用,使压应力区受到竖向的挤压作用和横向的扩容碎胀作用.通过对不同间距全长锚杆的数值模拟发现(图1),单根锚杆在顶板上形成了一个类似椭圆的锚固结构体.当锚杆间距过大时,各锚固体处于分离状态,并没有形成有效的锚固整体,导致巷道顶板易垮落.反之,当锚杆间距设计合理时,各锚固体相互绞接形成一个有效的锚固整体,这实质上提高了各锚固体间的切向抗挤压能力,使各锚固体在围岩中形成了类似梁或拱的承载体(见图2).我们把全长锚杆在纵向(或径向)上将浅部松散破碎的围岩黏结串紧,形成的锚固结构称为锚固串结构,把多个锚固串相互绞接形成的结构,称为锚固串群体结构<sup>[10]</sup>.

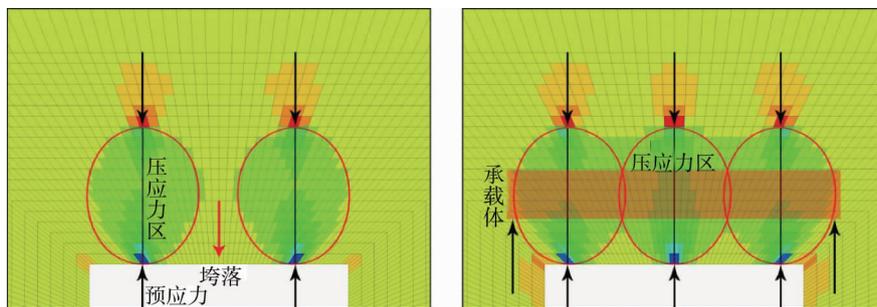


图1 不同间距全长锚杆数值模拟结果

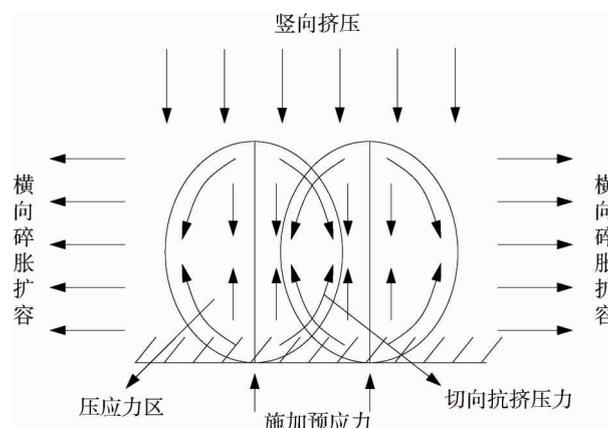


图2 锚固串群体受力模型

假设岩体是弹塑性、均质、连续和各向同性的,建立以锚杆锚固段尾部为坐标原点的锚固串群体力学平面模型(见图3), $\rho$ 为锚杆锚固段中点半径, $l$ 为锚杆锚固段长度.

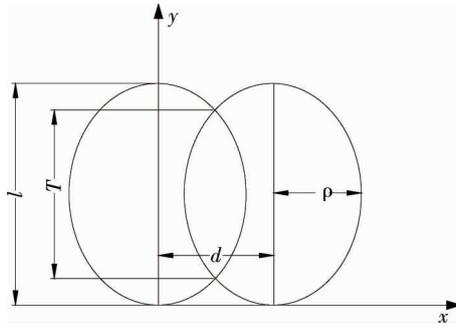


图3 锚固串群体结构力学平面模型

设相邻锚固串的锚固厚度为  $T$ , 锚杆间距为  $d$ . 通过锚杆锚固段长度  $l$  和锚杆锚固段中点半径  $\rho$  可确定锚固串平面边界方程为

$$\frac{x^2}{\rho^2} + \frac{\left(y - \frac{l}{2}\right)^2}{\left(\frac{l}{2}\right)^2} = 1; \quad (1)$$

$$\frac{(x - d)^2}{\rho^2} + \frac{\left(y - \frac{l}{2}\right)^2}{\left(\frac{l}{2}\right)^2} = 1. \quad (2)$$

通过对式(1)和式(2)的数学推导, 得到相邻锚固串的锚固厚度  $T$  为

$$T = l \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2\rho}\right)^2}. \quad (3)$$

在进行巷道顶板锚杆支护设计时, 应根据具体巷道地质特征和现场生产条件, 合理确定相邻锚固串的锚固厚度.

## 2 支护方案设计

为了研究锚固串群体结构不同锚固厚度的支护效果, 设计了4种锚固串群体结构(见图4): (1) 相邻锚固串不相交且有一定距离; (2) 相邻锚固串正好相切; (3) 相邻锚固串部分相交; (4) 相邻锚固串大部分相交. 在进行支护设计时, 以顶板岩层中强度最弱岩层作为支护依据, 在保证最弱岩层稳定的基础上, 可以认为其他岩层在支护方案上也能达到稳定.

本研究以矩形巷道为例, 宽3.40 m, 高2.80 m, 净断面面积为9.52 m<sup>2</sup>. 采用直径20 mm树脂螺纹锚杆, 锚杆锚固段长度  $l$  为1.8 m, 锚杆预应力为20 kN, 锚杆锚固段中点半径  $\rho$  为500 mm. 根据4种锚固串群体结构设计4种支护方案(见图5): (1) 锚杆间距  $d$  为1 200 mm, 锚杆等间距布置, 计算得到锚固厚度  $T=0$ , 相邻锚固串不相交且有一定距离; (2) 锚杆间距  $d$  为1 000 mm, 锚杆等间距布置, 计算得到锚固厚度  $T=0$ , 相邻锚固串正好相切; (3) 锚杆间距  $d$  为800 mm, 锚杆等间距布置, 计算得到锚固厚度  $T=1\ 080$  mm, 相邻锚固串部分相交; (4) 锚杆间距  $d$  为600 mm, 锚杆等间距布置, 计算得到锚固厚度  $T=1\ 440$  mm, 相邻锚固串大部分相交.

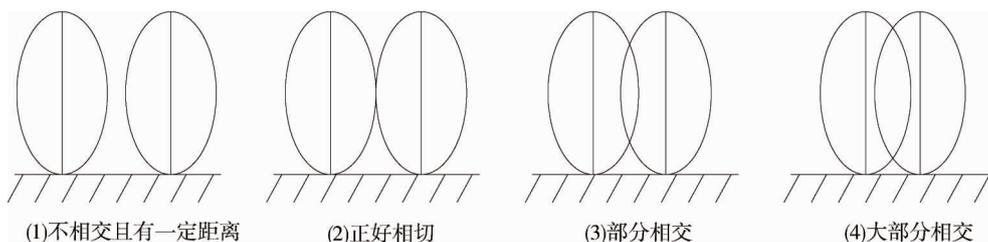


图4 4种锚固串群体结构

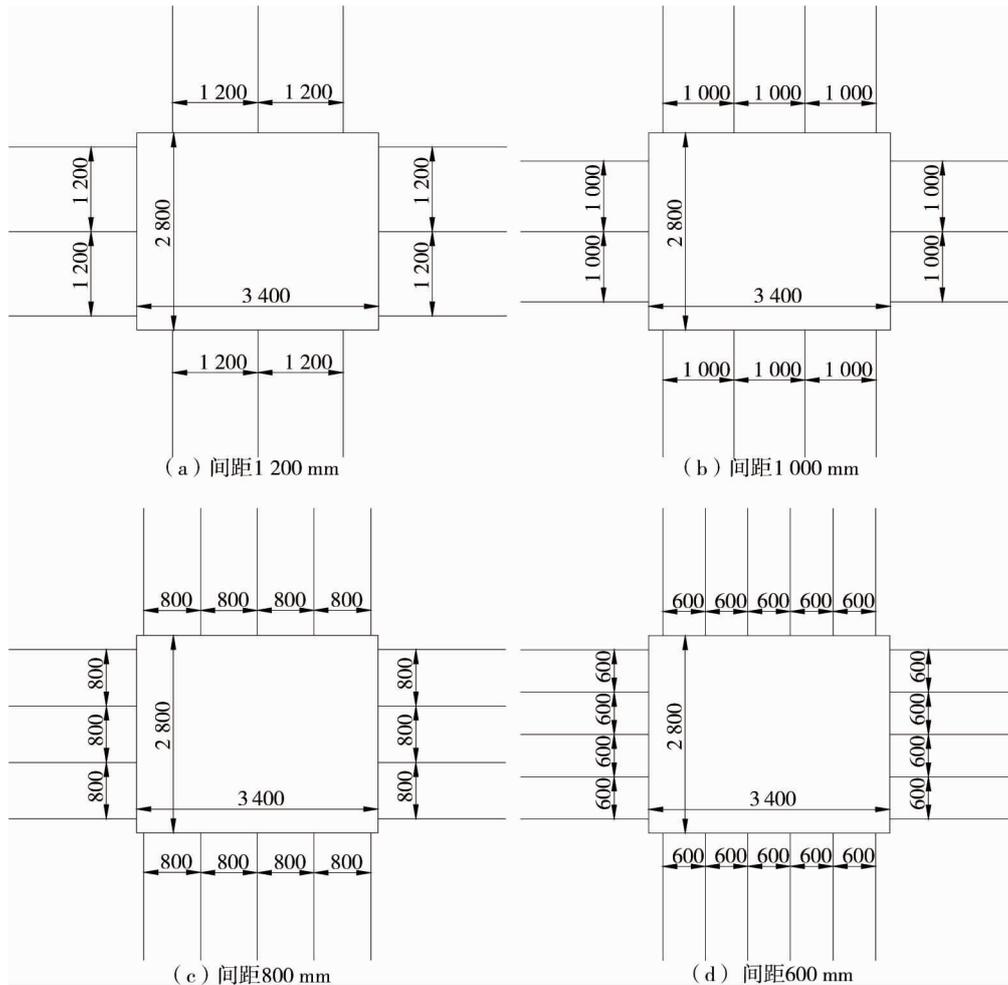


图5 支护方案设计

### 3 数值模拟分析

#### 3.1 模型建立

采用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件对4种支护方案进行模拟分析.模拟时围岩取均质岩体,巷道埋深取 $H=500\text{ m}$ ,地应力 $\sigma$ 为12.5 MPa.现建立 $30\text{ m}\times 10\text{ m}\times 30\text{ m}$ 的数值计算模型,模型底部采用固定位移边界,前后左右采用应力边界,模型上部地应力简化为均布面力施加到模型上表面(见图6).

#### 3.2 模拟结果分析

为了比较分析4种支护方案的支护效果,通过对比巷道顶底板变形量来表征支护方案的优劣.由图7~图8可知,锚杆间距1200 mm的巷道顶底板最大位移量为1049.2 mm,锚杆间距1000 mm的巷道顶底板最大位移量为683.85 mm,锚杆间距800 mm的巷道顶底板最大位移量为384.15 mm,锚杆间距600 mm的巷道顶底板最大位移量为371.32 mm.通过对比顶底板变形量发现:间距1200 mm的顶底板变形量过大,支护效果差,显然满足不了巷道的正常使用要求;间距1000 mm比间距1200 mm的变形略有减少,但顶底板变形量仍比较

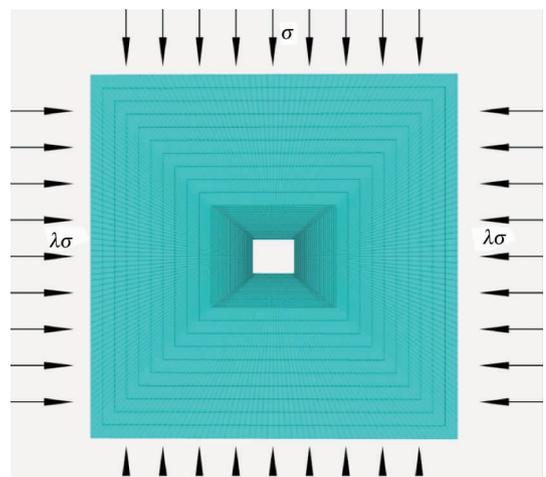


图6 数值计算模型

大,不适合巷道的长期使用;间距 800 mm 和 600 mm 的顶底板变形小,能够保证矿井的正常生产需要,但 2 种方案变形量相差较小,从综合支护成本的考虑,间距 800 mm 比间距 600 mm 支护方案更佳.因此,间距 800 mm 是最优支护方案.进一步通过对应锚固串群体结构,认为部分相交的锚固串群体结构是 4 种结构中最优结构.在进行具体巷道的锚杆支护设计时,应根据巷道地质特征和现场生产条件,确定部分相交的锚固串群体结构参数.

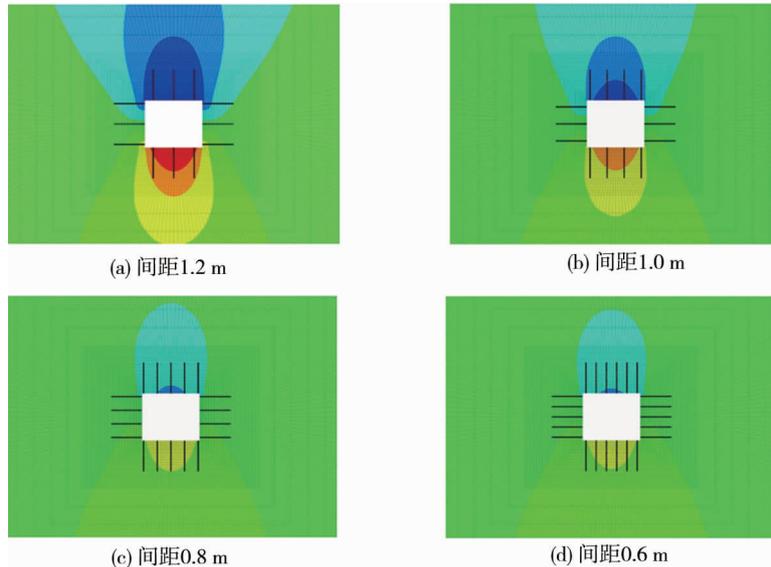


图 7 顶底板位移云图

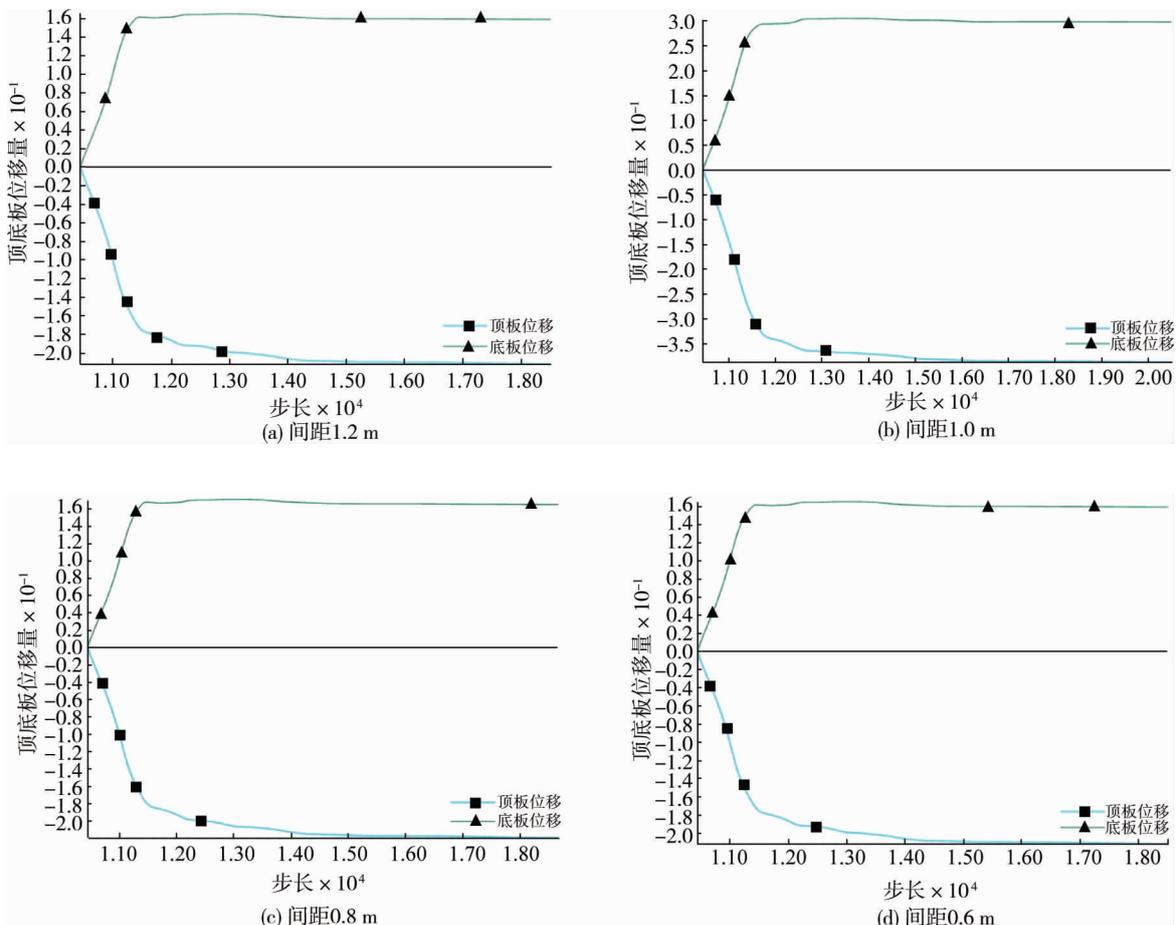


图 8 顶底板位移曲线

## 4 结论

1) 基于数值模拟结果提出锚固串群体结构,分析了锚固串群体结构及其力学机制,通过建立锚固串结构力学平面模型,得到了相邻锚固串的锚固厚度计算公式。

2) 设计了4种不同锚固串群体结构,以矩形巷道为例,通过对应4种锚固串群体结构,得出4种不同间距的支护方案。

3) 综合数值模拟结果和支护成本的考虑,得出最优方案为间距800 mm,认为部分相交的锚固串群体结构是最合理的结构.在进行具体巷道的锚杆支护设计时,应根据巷道地质特征和现场生产条件,确定部分相交的锚固串群体结构参数。

### 参考文献:

- [1] 康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展60年及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1071-1081.
- [2] 康红普, 徐刚, 王彪谋, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展40a及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(2): 7-39.
- [3] 方新秋, 赵俊杰, 洪木银. 深井破碎围岩巷道变形机理及控制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(1): 1-7.
- [4] 张农, 袁亮. 离层破碎型煤巷顶板的控制原理[J]. 采矿与安全工程学报, 2006(1): 34-38.
- [5] 许兴亮, 张农, 徐基根, 等. 高地应力破碎软岩巷道过程控制原理与实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2007(1): 51-55.
- [6] 杜计平, 侯朝炯, 朱亚平, 等. 深井破碎围岩条件下煤巷锚杆构件合理配套[J]. 采矿与安全工程学报, 2007(4): 401-404.
- [7] 王卫军, 彭刚, 黄俊. 高应力极软破碎岩层巷道高强度耦合支护技术研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 223-228.
- [8] 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.
- [9] 孟庆彬, 韩立军, 张建, 等. 深部高应力破碎软岩巷道支护技术研究及其应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(11): 3861-3872.
- [10] 刘洪涛. 基于锚固串群体围岩的煤巷锚杆支护参数研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2007.