

# 煤矿巷道正楔形锚固孔锚固性能与参数优化研究

刘少伟<sup>1,2</sup>, 李文彬<sup>1</sup>, 张 辉<sup>1,2</sup>

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000)

**摘要:**针对锚固力低下及衰减速度快是松软破碎围岩巷道锚杆支护的瓶颈问题, 锚固剂黏结失效是其重要原因及关键影响因素。采用正楔形锚固孔提高锚固系统锚固效果明显, 但单一的端部扩孔由于锚固范围小, 容易受采动环境影响导致锚固系统失效, 可通过对不同锚固方式情况下正楔形与普通圆柱形锚固孔组合方案进行研究。研究表明: 端锚情况下孔底扩孔锚固效果最佳; 加长锚和全长锚的情况下, 孔底扩孔提高锚杆锚固力不显著; 综合考虑施工工艺、经济安全多方面因素, 扩孔段长度与锚固段长度比值为 1:2 为最佳, 随着扩孔长度与扩孔半径增加, 锚固系统的稳定性和锚固能力增强。但扩孔半径的大小取决于施工机具、施工工艺和围岩条件, 应根据现场情况而定。

**关键词:**松软破碎围岩; 锚杆支护; 正楔形孔; 锚固性能

中图分类号: TD323

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2018)01-0053-08

## Study on anchorage performance and parameters optimization of positive wedge anchorage hole in roadway

LIU Shaowei<sup>1,2</sup>, LI Wenbin<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Coal Mine Safety Production Collaborative Innovation Center, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** For the bolt support of weak surrounding rock roadway, the bottleneck problem is the low force and the fast attenuation of the anchoring force, and failure of the anchor agent is the important reason and key influencing factor. The anchoring effect of the anchorage system can be improved obviously with positive wedge anchorage hole. But due to the small anchorage range of the single end reaming, the anchorage system can be easily affected to failure under the mining environment. This paper studies the combination schemes of the positive wedge and the ordinary cylindrical anchorage hole under different anchoring types. Research results show that in the case of end bolt anchorage effect with the bottom reaming of the hole is best, in the case of long bolt and all bolt, bolt anchorage force is improved by reaming the bottom of the hole, but not significantly. On the basis of fully consideration of multiple factors such as the construction technology and economic security, 1:2 is the best length ratio of the reaming and the anchoring. As the length and the radius of the reaming hole become larger, the stability of the anchorage system and anchoring ability becomes stronger. But the radius of the reaming hole depends on the construction machinery, construction technology and conditions of surrounding rock, and should be determined according to the field situation.

**Key words:** weak surrounding rock; bolt support; positive wedge anchorage hole; anchorage properties

## 0 引 言

多年来, 国内外相关专家对煤矿巷道锚杆支护理论及设计方法进行了大量研究, 研发了一系列新的支护材料、施工机具<sup>[1-8]</sup>。但随着开采深度的不

断增加, 巷道围岩应力不断加大, 部分巷道围岩松软、破碎, 锚固系统锚固力低下, 支护效果不理想<sup>[9-10]</sup>。我国大多数煤矿煤层结构复杂多变, 围岩松动破碎, 治理困难<sup>[11]</sup>。锚网支护是松软、破碎围岩巷道最主要的控制方式<sup>[12-13]</sup>。锚固系统中锚固

收稿日期: 2017-10-25; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2018.01.007

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51674098, 51274087); 国家自然科学基金资助项目(51104055)

作者简介: 刘少伟(1977—), 男, 辽宁锦州人, 博士, 教授, 博士生导师。Tel: 0391-3987948, E-mail: lswxl@126.com

引用格式: 刘少伟, 李文彬, 张 辉. 煤矿巷道正楔形锚固孔锚固性能与参数优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 53-60.

LIU Shaowei, LI Wenbin, ZHANG Hui. Study on anchorage performance and parameters optimization of positive wedge anchorage hole in roadway [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 53-60.

段破坏和失效方式主要存在3种:①锚杆与锚固剂界面发生破坏;②锚固剂拉破坏;③锚固剂与锚固孔壁界面发生破坏。由于锚固剂的强度远远大于松散破碎围岩的强度,所以对于松软破碎围岩锚固系统失效一般是第3种方式,破坏界面上会出现部分破碎煤岩黏结到锚固剂环形外表面,锚固孔壁围岩出现“脱皮”现象。因此,松软破碎围岩锚固系统完整性及锚固性能是保证支护质量的关键,扩孔锚固和增加锚固长度是提高锚固系统性能的有效途径<sup>[14-18]</sup>。

正楔形孔在一定程度上能够扩大锚固剂与锚固孔壁的黏结面积,防止锚固力衰减,增加最大锚固力,提高锚固系统的稳定性<sup>[19]</sup>。但单一端锚扩孔由于锚固范围小,容易受采动环境影响导致锚固系统失效。通过适当增加锚固长度不仅能增加与围岩的黏结面积,还有利于预应力在围岩中扩散,形成有效的锚固体承载结构,提高围岩的整体稳定性,充分发挥锚固构件的支护潜力<sup>[20]</sup>。

正楔形孔与普通圆柱形孔组合工作时,由于锚固方式及两类型孔尺度比例不同,对锚固系统性能影响较大。因此,深入系统的研究松软破碎围岩巷道正楔形孔与普通圆柱形孔组合工作原理,明晰不同组合方式下锚固性能特征,确定扩孔锚固段与普通圆柱形锚固段长度比例关系,优化相关参数,对于提高锚固系统锚固力,保证松软破碎围岩巷道锚网支护安全具有一定的理论与工程实用价值。

## 1 正楔形与普通圆柱形锚固孔组合锚固原理

### 1.1 扩孔后端锚锚固力计算

锚固剂在锚固系统中发挥的主要作用是将孔壁围岩与锚杆黏结成为一个整体,使锚杆发挥支护作用。锚固长度相同时,孔底扩孔比普通圆柱形孔黏结面积大,可提高锚固系统的锚固力。由于扩孔后局部断面的扩大,锚固孔壁受力与扩孔前差别较大。这不仅与锚杆、锚固剂和孔壁围岩体有关,也与锚固剂与孔壁围岩体间的相互作用关系有关<sup>[21]</sup>。当锚固系统为端锚时,假设锚固剂不发生破坏,锚杆与锚固剂间不滑脱。扩孔后锚固力理论分析如图1所示<sup>[19-22]</sup>,锚固剂与围岩形成的锚固力为

$$P = P_1 + P_2 \quad (1)$$

式中:  $P_1$  为锚固剂与孔壁间的黏结力, kN;  $P_2$  为围岩体对锚固剂的支撑力, kN。

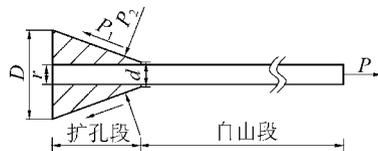


图1 扩孔后端锚锚固力计算简图  
D—正楔形孔大圆台直径; r—锚杆直径

Fig. 1 Stress distribution of anchorage after bottom reaming

### 1.2 扩孔后加长锚或全长锚锚固力计算

当加长锚固或全长锚时,由于在扩孔锚固范围的基础上增加了普通圆柱形锚固段,锚固系统承载力由扩孔段变截面处围岩体的支承力和锚固剂与围岩接触界面上的黏结阻力构成。扩孔部位围岩体对锚固剂的阻抗作用起主导作用。为了分析加长锚或全长锚时锚固剂与围岩间的锚固力,计算简图如图2所示。

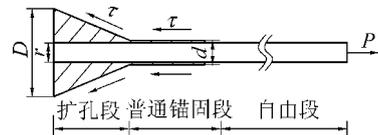


图2 扩孔与普通孔组合工作锚固力计算示意

Fig. 2 Stress distribution of long bolt and all bolt after bottom reaming

锚固剂与围岩形成的锚固力为<sup>[21]</sup>

$$P = \pi(d + D)L_2\tau\cos 20^\circ + \pi dL_1\tau + \pi(D^2 - d^2)N_c c_u / 4 \quad (2)$$

其中:  $d$  为正楔形孔小圆台直径, m;  $L_1$ 、 $L_2$  分别为普通孔和扩孔锚固长度, m;  $\tau$  为锚固剂与围岩间黏结阻力强度(由实验室测定), MPa;  $N_c$  为承载力因子, 在软岩巷道中可取 9.0;  $c_u$  为围岩干燥状态下抗剪强度, MPa。式(2)分析基于扩底孔情况, 由公式可知, 由于端部锚固、加长锚固和全长锚范围不同, 扩孔锚固效果影响存在区别。求得锚固力  $P$  的值所需的变量参数  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $\tau$  和  $c_u$  由现场测定, 并且所求得理论值与数值模拟结果比较取定。

## 2 正楔形扩孔位置与锚固性能关系

### 2.1 计算模型

模型中假设锚杆与锚固剂、锚固剂与围岩体是完全理想黏结, 围岩体表面上施加一定围压, 并在锚杆自由端施加拉力, 其正楔形扩孔端锚模型如图3所示。

数值模型中锚杆采用线弹模型, 锚固剂与围岩

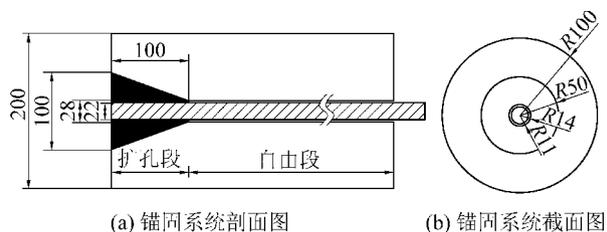


图3 正楔形孔端锚模型

Fig. 3 Positive wedge-shaped reaming model

体均采用 Drucker-Prager 本构模型。锚杆、锚固剂和围岩体的力学参数见表 1。

表 1 材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of materials

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)	抗拉强 度/MPa
锚杆	177.00	0.26	—	—	335.0
锚固剂	8.50	0.25	8.0	38	5.0
围岩体	3.33	0.26	2.2	25	1.7

## 2.2 正楔形扩孔位置分析

研究表明<sup>[19]</sup>,扩孔对于提高锚固系统锚固力明显,但扩孔位置对于锚固系统的工作状态影响尚需研究。假定锚固长度为 200 mm 时,扩孔长度 100 mm。建立孔底扩孔、中部扩孔和前部扩孔 3 种模型。由实验室测定,锚固剂与围岩间黏结阻力强度  $\tau = 0.38$  MPa,围岩干燥状态下抗剪强度  $c_u = 1.6$  MPa,得出锚固力为 123.9 kN,换算成应力为 326 MPa。因此,锚杆自由端均选取施加 300 MPa 拉拔载荷。为确定端锚时扩孔的最佳位置,分析与孔壁围岩直接接触的锚固剂信息。不同扩孔位置锚固剂应力特征如图 4 所示,分别为孔底扩孔、中部扩孔、前部扩孔。以孔底为原点,孔口方向为正方向,不同扩孔位置下锚固剂与锚杆黏结面应力如图 5 所示。

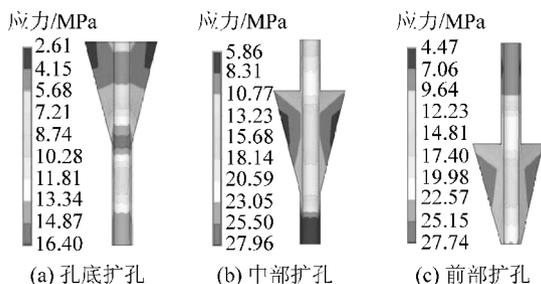


图4 不同扩孔位置锚固剂应力特征

Fig. 4 Stress characteristics of anchoring agent in different reaming position

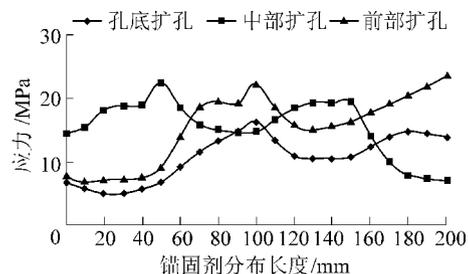


图5 不同扩孔位置对锚固剂节点应力曲线

Fig. 5 Anchoring agent node stress curves in different reaming position

由图 4 和图 5 可知,施加相同载荷时,尽管扩孔位置不同,但扩孔段锚固剂应力均较大。孔底扩孔时,靠近孔壁附近锚固剂受力主要集中于扩孔与普通孔交界位置,锚固剂受力相对较均匀,锚固剂受力较小,最大应力为中部扩孔的 58.68%、前部扩孔的 59.15%。锚固剂位移分布规律如图 6 所示,3 种扩孔情况锚固剂位移较小,曲线较平稳,说明扩孔均起到了较好的锚固效果。孔底扩孔锚固剂位移较明显,但应力分布均匀,说明孔底扩孔与普通圆柱形段均较好发挥了锚固作用,达到了协同工作。另外,从施工工艺和经济角度考虑,孔底扩孔较其他两种形式具有施工方便、经济、可操作性强等优点。因此,采用孔底扩孔锚固具有最佳的工作性能。

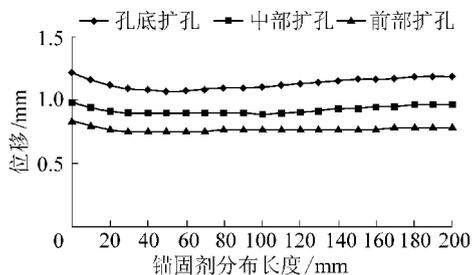


图6 锚固剂位移曲线

Fig. 6 Displacement curves of anchoring agent

## 3 孔底扩孔锚固系统工作状态

### 3.1 扩孔长度与锚固长度关系

#### 3.1.1 研究方案

为探讨锚固长度对正楔形孔锚固性能的影响,假设扩孔角度及长度一定(图 3),研究不同锚固长度时正楔形孔锚固系统工作状态。分 3 种情况研究:端部锚固、加长锚固和全长锚。在端部锚固情况下建立 5 组模型,长度分别为 200、300、400、500、600 mm,加长锚固和全长锚固长度分别为 1 200、1 850

mm,见表2。每组锚杆拉拔载荷为300 MPa。

表2 扩孔长度和锚固长度关系试验方案

Table 2 Test schemes of reaming length and anchor length relationship

模拟分类	锚固长度/mm	扩孔段长度/mm	扩孔段与普通段比值	锚杆直径/mm	锚杆长度/mm
端部锚固	200	100	1:1	22	2 000
	300	100	1:2	22	2 000
	400	100	1:3	22	2 000
	500	100	1:4	22	2 000
	600	100	1:5	22	2 000
加长锚固	1 200	100	1:11	22	2 000
全长锚固	1 850	100	1:17.5	22	2 000

### 3.1.2 锚杆力学特征分析

数据分析以孔底为原点,孔口为正方向。3类模型在给定拉拔载荷时锚杆应力分布特征如图7所示。

沿锚杆轴向应力和位移分布规律如图8和9所示,当锚固系统工作时,随着锚固段长度的增加,锚固段锚杆应力的增速逐渐减小,其中端锚200 mm情况下,锚固段锚杆应力增长最快,全长锚固1 850 mm情况下应力增速最慢。当端锚为200~600 mm时,锚固段锚杆应力增速是呈先增大后减小的趋势,增速有明显的拐点,拐点处为扩孔段与普通圆柱形段的交点处,说明端锚时扩孔对于迅速提高锚固系统锚固力发挥主导作用。

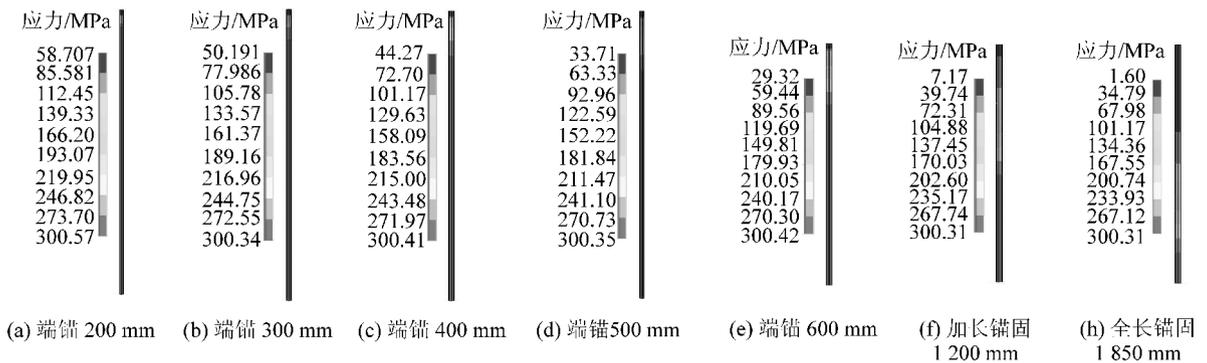


图7 锚杆应力特征

Fig. 7 Bolt stress characteristics

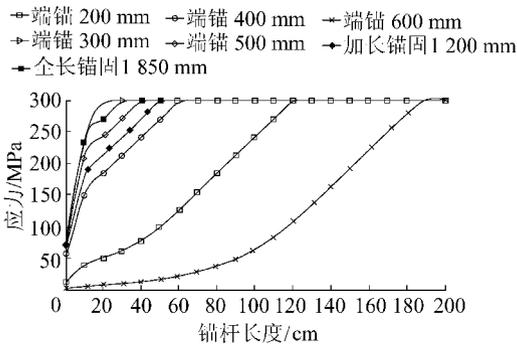


图8 锚杆节点应力分布

Fig. 8 Bolt node stress distribution

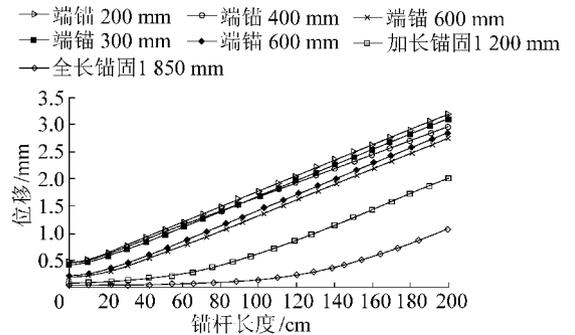


图9 锚杆节点位移分布

Fig. 9 Bolt node displacement distribution

在加长锚固1 200 mm和全长锚固1 800 mm的情况下,锚固段锚杆轴向应力增速是呈逐渐增大的趋势,扩孔段仅为100 mm,锚固段与扩孔段长度比值分别为12:1和18.5:1.0,扩孔段作用不明显。所以,普通孔锚固效果较好围岩采用加长锚或全长锚时不需要进行扩孔锚固。

由图9可知,端锚200 mm时锚杆轴向位移最大,全长锚固1 850 mm时锚杆位移最小。端锚时锚

杆轴向位移自原点至100 mm处均匀增大,即在扩孔段锚杆位移较小,在普通圆柱形段和自由段锚杆位移均匀增大。在加长锚和全长锚情况下,锚杆位移也逐渐增大,但位移较小,这是由于锚固长度限制了锚杆的位移。

### 3.1.3 锚固剂力学特征分析

三类模型中锚固剂的应力分布特征如图10和

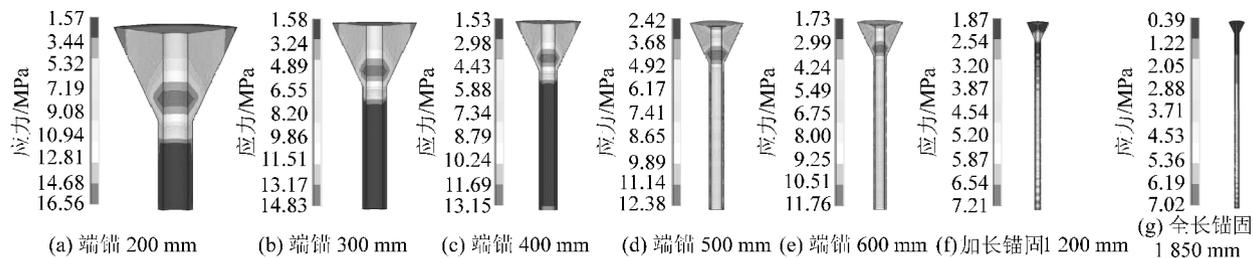


图 10 锚固剂应力特征

Fig. 10 Anchoring agent stress characteristics

11 所示,端锚时锚固剂与锚杆黏结面最大应力均在扩孔段与普通圆柱形段连接处附近,锚固剂与锚杆黏结面应力有明显的提高,扩孔段锚固剂与锚杆黏结面平均应力要高于普通圆柱形段,说明扩孔使得锚固剂更好的发挥了锚固效果。随着普通圆柱形段长度的增加,锚固剂与锚杆黏结面最大应力逐渐向普通圆柱形段转移。

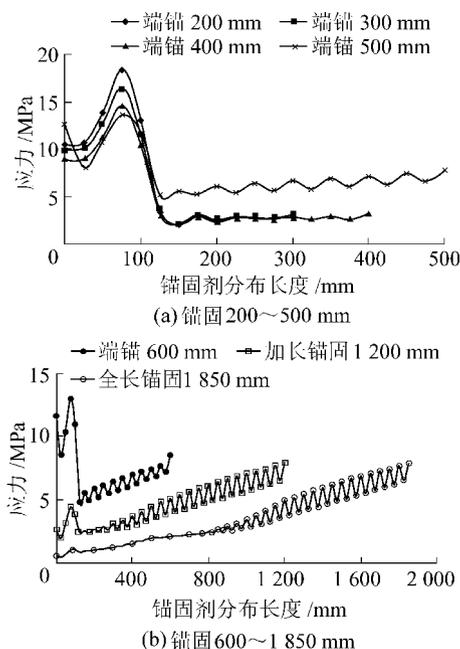


图 11 锚固剂节点应力分布

Fig. 11 Stress distribution curves of anchoring agent

当锚固长度为 1 200 mm 时,锚固剂与锚杆黏结面应力由扩孔段与普通圆柱形段连接处向普通圆柱形段末端逐渐增大,此时扩孔段仍然发挥着提高锚固力的作用,但其影响力有限,普通圆柱形段代替其成为主导区域。

在全长锚固 1 850 mm 情况下,锚固剂与锚杆黏结面最大应力已经完全转移到普通圆柱形段,且扩孔段锚固剂与锚杆黏结面应力为整个锚固段的最小

值,即在全长锚固情况下扩孔段发挥作用较小,锚固剂发挥作用的部分集中在普通圆柱形段,且锚固剂与锚杆黏结面的应力随着锚固剂分布长度的增加不断增加,在普通圆柱形段末端达到最大值。

锚固剂位移分布规律如图 12 所示,各种锚固方式中锚固剂与锚杆黏结面位移均从孔底向锚固剂末端逐渐增大,扩孔段部分锚固剂与锚杆黏结面位移小于普通圆柱形段。因此,扩孔对于锚固剂的位移有一定的限制作用。端锚 200 mm 时扩孔段锚固剂的位移最大,全长锚固 1 850 mm 时扩孔段锚固剂位移最小。

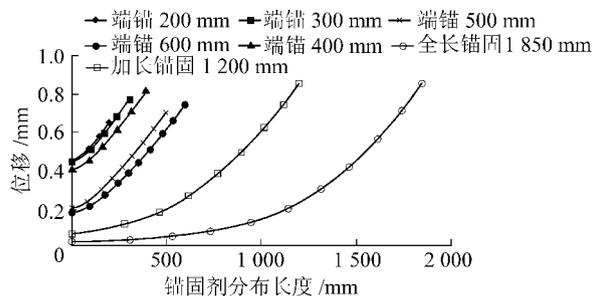


图 12 锚固剂位移曲线

Fig. 12 Displacement curves of anchoring agent

### 3.1.4 扩孔长度与锚固长度比例确定

前已论述,扩孔锚固适合于破碎、锚固力低下煤岩体。研究表明<sup>[19]</sup>,单一的 100 mm 正楔形孔底扩孔锚固,其极限拉拔载荷为 312 MPa。在 400 MPa 的拉拔载荷作用下,扩孔段与普通圆柱形段各 100 mm 的组合锚固形式,锚固系统未发生破坏。由图 8 可知,随着普通锚固长度的增加,锚杆应力增速逐渐降低,而在 200~600 mm 端锚的情况下,锚杆能够较好的提高锚固系统的锚固能力,但端锚 200 mm 时锚杆节点应力增速最大,能迅速提高锚杆的锚固力,满足及时支护的需求。

综合锚杆、锚固剂力学特征分析结果,考虑围岩情况、施工工艺、经济安全等因素,采用孔底扩孔时,扩孔段长度与锚固段长度比值为 1:2 最佳。

### 3.2 正楔形扩孔长度与锚固系统工作状态关系

#### 3.2.1 研究方案

在扩孔段与锚固段长度比值为1:2的前提下,探讨正楔形扩孔长度对锚固性能影响。

假设扩孔角度一定,研究不同正楔形扩孔长度时锚固系统的工作状态。研究方案分4组分别计为I、II、III和IV。锚固长度分别为200、300、400、500 mm,见表3。载荷施加与前述方案相同。

表3 锚固系统工作状态试验方案

模拟分组	锚固长度/mm	扩孔段长度/mm	扩孔段与锚固段比值	锚杆直径/mm	锚杆长度/mm
I	200	100	1:2	22	1 500
II	300	150	1:2	22	1 500
III	400	200	1:2	22	1 500
IV	500	1:2	22	1 500	

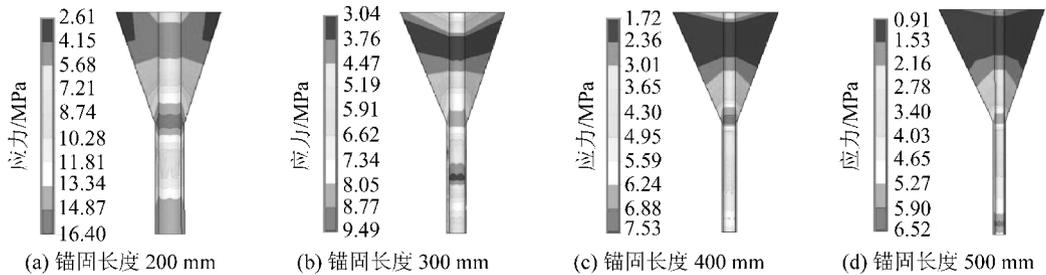


图13 给定拉拔载荷时锚固剂应力特征

Fig. 13 Anchoring agent stress characteristics under fixed pull-out load

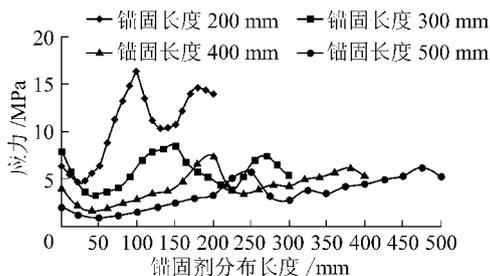


图14 锚固剂节点应力分布规律

Fig. 14 Stress curves of resin

由图14可以看出,扩孔半径增大后锚固剂受力较小,锚固系统的锚固力还有较大的提升空间,能有效的解决部分巷道锚固力低下等问题,但较大的扩孔半径,给现场施工造成困难,因此应结合现场巷道围岩特征合理采用不同规格的扩孔机具。

## 4 扩孔机具设计与试验

根据理论研究成果,课题组研发了一种煤矿巷

### 4.2.2 研究结果分析

模拟数据处理以孔底为原点,孔口为正方向。4组模型给定拉拔载荷时锚固剂应力分布特征如图13所示,锚固剂轴向应力分布特征曲线如图14所示。由图13和图14可以看出,当扩孔段与锚固段长度比值为1:2时,随着扩孔半径和锚固长度的增加,普通圆柱锚固段锚固剂所受应力不大且较平缓,无明显应力集中现象,说明扩孔段对锚固力的提升有较大的作用。但随着扩孔半径的增大,发现扩孔段存在较大的低应力区,且低应力区范围与扩孔半径成正比关系,这与自由端拉拔力有关,间接说明扩孔半径的增大,增强了锚固系统的锚固效果,使锚固系统具有更好的稳定性和锚固能力,但由于三径匹配关系(锚杆直径、锚固剂直径及钻孔直径)的限制,扩孔半径不能过大,否则对于施工和锚固质量造成一定的影响。

道锚固孔孔底单翼扩孔机具<sup>[19,24]</sup>,主要由壳体、刀具、弹簧和推刀杆组成。其工作流程为:将单翼扩孔机具与钻杆连接,推入正常钻孔底部,钻杆另一端与钻机连接,扩孔装置随钻机一起转动,切削钻孔围岩,逐渐在锚固孔孔底扩出一个正楔形的空腔体,如图15和图16所示。

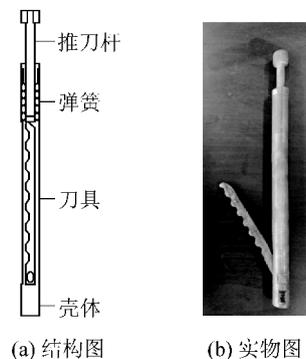
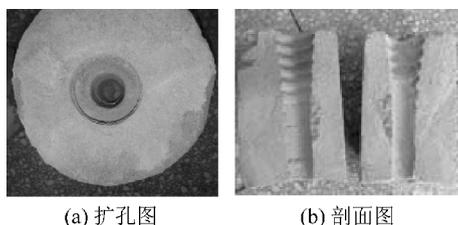


图15 正楔形扩孔机具

Fig. 15 Positive wedge-shaped reaming device



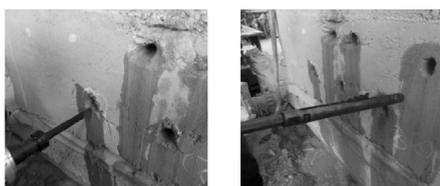
(a) 扩孔图 (b) 剖面图

图 16 实验室扩孔实际效果图

Fig. 16 Actual effect of reaming experiments

基于相同锚固长度的情况下,在实验室对普通圆柱形锚固、扩孔+普通圆柱形组合锚固两组试验进行锚固效果对比,每组各选用3根锚杆,分别进行编号为: I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub>、I<sub>3</sub>和 II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub>、II<sub>3</sub>。I组进行200 mm普通圆柱形锚固试验,II组进行100 mm扩孔+100 mm普通圆柱形锚固试验,其中试验锚杆长度为1 000 mm,锚杆直径为22 mm,钻孔直径为28 mm,锚固剂直径为23 mm。

待锚固剂固化充分后,对两组试验锚杆进行锚固效果拉拔试验,试验过程如图17所示,6根锚杆的极限拉拔应力试验结果为: I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub>、I<sub>3</sub>组的拉拔载荷分别为52.6、56.1、53.8 MPa,平均为54.17 MPa; II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub>、II<sub>3</sub>组的拉拔载荷分别为105.8、103.1、112.5 MPa,平均为107.13 MPa,II组扩孔+普通圆柱形锚固方案极限拉拔载荷比I组普通圆柱形锚固方案平均提高了49.4%,说明扩孔对于锚固系统锚固力提高有较大的贡献,但试验过程中由于围岩为相似材料,试验结果低于模拟结果也是合理的。



(a) 普通圆柱形锚固 (b) 扩孔+普通圆柱形组合锚固

图 17 锚固试验过程

Fig. 17 Process of anchoring experiments

## 5 结 论

1) 研究发现,在端锚的情况下,由于扩孔的作用,提高了锚杆锚固力的起始值,使得普通圆柱形段的锚杆承受了更大的拉拔载荷,有效地提高了锚杆锚固力,孔底扩孔相对于中部和前部扩孔更有利于提高锚固系统性能。

2) 对不同锚固长度下锚固性能研究发现,在孔底扩孔锚固情况下,综合分析锚杆、锚固剂受力情况,兼顾施工工艺、经济安全多方面因素,扩孔段长

度与锚固段长度比值为1:2为最佳。

3) 当扩孔段长度与锚固段长度比值为1:2时,随着扩孔长度与半径增大,锚固剂与围岩、锚杆的黏结面积增大,锚固系统的稳定性、锚固能力增强,但扩孔半径的大小取决于施工机具、施工工艺和围岩条件,应根据现场情况而定。

4) 设计加工了单翼扩孔机具,并进行了实验室极限拉拔试验,试验数据表明:扩孔+普通圆柱形锚固能够有效提高锚固系统的锚固力。

## 参考文献 (References):

- [1] 吴拥政,康红普,丁吉,等.超高热强处理锚杆开发与实践[J].煤炭学报,2015,40(2):308-313.  
WU Yongzheng, KANG Hongpu, DING Ji, et al. Development and application of ultrahigh-heat processed rock bolts [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 308-313.
- [2] 侯朝炯,郭励生,勾攀峰.煤巷锚杆支护[M].徐州:中国矿业大学出版社,1999,10-13.
- [3] 康红普,王金华.煤巷锚杆支护理论与成套技术[M].北京:煤炭工业出版社,2007.
- [4] 康红普.回采巷道锚杆支护影响因素的FLAC分析[J].岩石力学与工程学报,1999,18(5):534-537.  
KANG Hongpu. FLAC analysis of influencing factors of bolting in roadway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 534-537.
- [5] 康红普,吴拥政,李建波.锚杆支护组合构件的力学性能与支护效果分析[J].煤炭学报,2010,35(7):1057-1065.  
KANG Hongpu, WU Yongzheng, LI Jianbo. Analysis on mechanical performances and supporting function of combination components for rock bolting [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1057-1065.
- [6] 康红普.煤巷锚杆支护成套技术研究与实践[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21):3959-3964.  
KANG Hongpu. Study and application of complete rock bolting technology to coal roadway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3959-3964.
- [7] 张农,侯朝炯,王培荣.深井“三软”煤巷锚杆支护技术研究[J].岩石力学与工程学报,1999,18(4):437-440.  
ZHANG Nong, HOU Chaojiong, WANG Peirong. Study on bolt supporting technology of "Three Soft" coal roadway in deep mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4): 437-440.
- [8] 林健,任硕,杨景贺.树脂全长锚固锚杆外形尺寸优化实验室研究[J].煤炭学报,2014,39(6):1009-1015.  
LIN Jian, REN Shuo, YANG Jinghe. Laboratory research of resin full-length anchoring bolts dimension optimization [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1009-1015.
- [9] 马植侃,汪滨.钻探工程学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2013.

- [10] 康红普,崔千里,胡滨,等.树脂锚杆锚固性能及影响因素分析[J].煤炭学报,2014,39(1):1-10.  
KANG Hongpu, CUI Qianli, HU Bin, *et al.* Analysis on anchorage performances and affecting factors of resin bolts [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 1-10.
- [11] 何满潮.煤矿软岩工程技术现状及展望[J].中国煤炭,1999,30(8):11-16.  
HE Manchao. The present status and future prospects of coal mine soft rock engineering [J]. China Coal, 1999, 30(8): 11-16.
- [12] 王卫军,李树清,欧阳广斌.深井煤层巷道围岩控制技术及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(10):2102-2107.  
WANG Weijun, LI Shuqing, OUYANG Guangbin. Study on technique and test of surrounding rock control of deep shaft coal roadway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2102-2107.
- [13] 康红普,王金华,林健.煤矿巷道支护技术的研究与应用[J].煤炭学报,2010,35(11):1809-1814.  
KANG Hongpu, WANG Jinhua, LIN Jian. Study and applications of roadway support techniques for coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1809-1814.
- [14] 李青锋,周泽,朱川曲.采动压力对锚杆支护结构渐进损伤的数值模拟和实验研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(6):950-954.  
LI Qingfeng, ZHOU Ze, ZHU Chuanqu. Experimental and numerical simulation study on the progressive damage on the anchorage by the dynamic pressure in mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(6): 950-954.
- [15] 江贝,李术才,王琦,等.三软煤层巷道破坏机制及锚注对比试验[J].煤炭学报,2015,40(10):2336-2346.  
JIANG Bei, LI Shucai, WANG Qi, *et al.* Failure mechanism of three soft coal seam roadway and comparison study on bolt and grouting [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2336-2346.
- [16] 赵一鸣.煤矿巷道树脂锚固体力学行为及锚杆杆体承载特性研究[J].煤炭学报,2012,37(8):1423-1424.  
ZHAO Yiming. Study on mechanical behavior of epoxy bonded bolt system and bolt bearing characteristic in coal mine roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1423-1424.
- [17] 郝凤山,齐友军.锚杆扩孔技术及锚固力试验研究[J].煤炭学报,2008,33(12):1358-1361.  
HAO Fengshan, QI Youjun. Research of embrasure reaming and anchoring force experimentation [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1358-1361.
- [18] 陆观宏,曾庆军.锚杆扩孔技术及其应用研究[J].道路工程,2012(2):26-30.  
LU Hongguan, ZENG Qingjun. Blot hole reaming technology and its application research [J]. Road Engineering, 2012(2): 26-30.
- [19] 刘少伟,尚鹏翔,张辉,等.煤矿软弱围岩巷道锚杆扩孔机理与试验[J].煤炭学报,2015,40(8):1753-1760.  
LIU Shaowei, SHANG Pengxiang, ZHANG Hui, *et al.* Reaming mechanism of bolt hole in entry within weak surrounding rock [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1753-1760.
- [20] 王洪涛,王琦,王富奇,等.不同锚固长度下巷道锚杆力学效应分析及应用[J].煤炭学报,2015,40(3):509-515.  
WANG Hongtao, WANG Qi, WANG Fuqi, *et al.* Mechanical effect analysis of bolts in roadway under different anchoring lengths and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 509-515.
- [21] 王增辉.扩孔锚杆在基坑支护中的应用[J].地基基础工程,2010(4):20-21.  
WANG Zenghui. Application of reaming anchor bar in the foundation pit [J]. Ground Foundation Engineering, 2010(4): 20-21.
- [22] 程良奎,范景伦,韩军,等.岩土锚固工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [23] 程良奎,范景伦,张培文,等.提高岩土锚杆抗拔承载力的途径、方法及其效果[J].工业建筑,2015(6):103-109.  
CHENG Liangkui, FAN Jinglun, ZHANG Peiwen, *et al.* The ways and methods for improving the pull-out bearing capacities of ground anchors and reinforcement effect [J]. Industrial Construction, 2015(6): 103-109.
- [24] 刘少伟,宋勤法,张辉,等.一种锚固孔孔底单翼扩孔机具[P].中国:CN 204024476U,2014-12-17.