

# 松软煤层锚固孔底扩孔锚固机理及锚固性能研究

张 辉<sup>1,2</sup> 程利兴<sup>2</sup>

(1. 煤炭科学研究院 开采设计研究分院 北京 100013; 2. 河南理工大学 能源科学与工程学院 河南 焦作 454000)

**摘要:** 针对松软煤层巷道锚杆锚固力低,制约松软煤层巷道锚杆支护技术发展的问题,采用锚固孔孔底倒楔形扩孔锚固提高锚杆的锚固性能。利用自行研发的锚固孔孔底单翼扩孔装置进行力学分析、实验室试验、相似模拟和井下现场试验,试验结果表明:松软煤层锚固孔孔底倒楔形锚固,可以使锚杆的锚固性能显著提高,尤其是锚杆达到最大锚固力后的残余锚固力提高近1倍,为松软煤层巷道锚杆支护的广泛应用提供了技术支持。

**关键词:** 松软煤层; 孔底扩孔; 倒楔形; 锚固性能

中图分类号: TD322.4 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)03-0018-04

## Study on anchoring mechanism and anchoring performances of bottom reaming for anchoring borehole in soft seam

Zhang Hui<sup>1,2</sup>, Cheng Lixing<sup>2</sup>

(1. Mining and Design Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** According to the problem that a low anchoring force of the bolt applied to the soft seam gateway, which restricted the bolt support technology development of the soft seam gateway, the anchor hole anchoring after inverted wedge reaming at the bottom of the borehole was provided to improve the anchoring performances of the bolt. The mechanics analysis, lab experiment, similar simulation and underground site experiment were conducted with the self-developed bottom single wing device of the anchoring borehole. The experiment results showed that the reversed wedge anchoring of the bottom in the anchoring borehole of soft seam could obviously improve the anchoring performances of the bolt. Especially the residual anchoring force of the bolt was increased by nearly one time after the bolt reached the max anchoring force, and could provide the technical support to wide application of the bolt support applied to the soft seam gateway.

**Key words:** soft seam; reaming at the bottom of the borehole; reversed wedge; anchoring performances

## 0 引言

松软煤层由于其抗压强度低,煤层结构不稳定,导致锚杆锚固力低,煤壁出现破碎和片帮的程度加深,巷道两帮移近量增大,增加了松软煤层巷道的支护难度,支护效果十分不理想<sup>[1-5]</sup>。提高松软煤层锚固性能成为松软煤层巷道锚杆支护技术发展的关键,目前提高锚杆锚固性能的途径主要有增加锚固长度和锚固孔孔底扩孔锚固2种方法<sup>[6-7]</sup>。增加锚

固长度在一定程度上提高了锚固力,但由于锚固孔孔壁松软使得锚固力提高效果不明显<sup>[8-10]</sup>;而锚固孔孔底扩孔在理论上可以显著提高锚杆的锚固力。目前工程实践中,孔底扩孔的方法主要有机械扩孔、爆炸扩孔、水力扩孔和压浆扩孔<sup>[11-14]</sup>。对于煤矿井下煤层巷道,由于其特殊的现场工程地质条件,锚固孔采用爆炸扩孔、水力扩孔和压浆扩孔难以实现井下煤层孔底扩孔的要求<sup>[15]</sup>。而机械扩孔由于其扩孔方向的不同可分为正楔形和倒楔形扩孔,正楔形

收稿日期: 2015-10-20; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.03.004

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(51274087); 河南理工大学博士基金资助项目(B2014-055)

作者简介: 张 辉(1983—),男,河南商丘人,讲师,硕士生导师,博士。Tel: 15239172096 E-mail: caikuangzhang@163.com

引用格式: 张 辉 程利兴.松软煤层锚固孔底扩孔锚固机理及锚固性能研究[J].煤炭科学技术,2016,44(3):18-21.

Zhang Hui, Cheng Lixing. Study on anchoring mechanism and anchoring performances of bottom reaming for anchoring borehole in soft seam [J].

Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 18-21.

扩孔由于在锚杆锚固时很难实现孔底锚固剂被压实,致使锚固效果不明显。因此,笔者采用自行研发的倒楔形扩孔装置,针对赵家寨矿松软煤层巷道锚固孔进行扩孔锚固试验研究,进一步检验松软煤层锚固孔孔底倒楔形锚固性能。

## 1 松软煤层锚固孔孔底扩孔锚固原理

### 1.1 锚固孔孔底倒楔形扩孔原理

采用自行研制的锚固孔孔底单翼扩孔装置进行锚固孔孔底扩孔,如图1所示。由于锚固孔直径小,空间范围受到限制,双翼刀具很难满足小孔径的需要。因此,设计采用单翼刀片,以充分利用锚固孔有限空间。

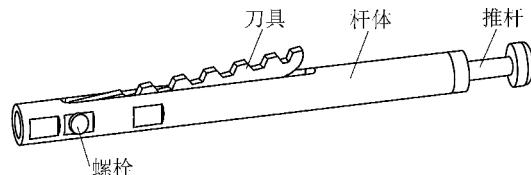


图1 锚固孔孔底扩孔装置

Fig. 1 Device of anchor hole reaming at the bottom of the borehole

扩孔时为方便该装置插入孔底,设计装置总长度300 mm,刀具长度170 mm,轴向推杆伸缩长度50 mm。推杆推动道具伸出刀槽,环绕螺栓在0°~6°内移动。当刀具伸出6°时,刀具最外端扩孔直径达到42 mm,扩孔段由孔底向外呈长度为100 mm的倒楔形,如图2所示。



图2 锚固孔孔底扩孔前后

Fig. 2 Anchor hole before and after hole bottom reaming

锚固孔钻进到设计深度后,退出钻头,将安装有单翼扩孔装置的钻杆推入孔底,连接钻机进行扩孔。在钻进旋转推进过程中,扩孔装置内的推杆将刀具逐渐推开,刀具将进行有效切削孔底煤岩,直至推杆完全被推入;钻机停止钻进,推杆在内部弹簧作用下被弹出,刀具进入刀具槽内退出孔外,完成孔底扩孔任务。

### 1.2 锚固孔孔底扩孔锚固原理

锚固剂作为锚杆与围岩的黏结材料,是连接锚杆与周围煤岩体的介质,其作用是使锚杆发挥支护作用,锚固剂锚固效果的好坏直接关系到巷道的支护效果。影响锚固剂锚固效果的因素很多,主要包括围岩性质,钻孔直径与孔壁的粗糙程度、锚杆的直

径等。锚杆在松软煤层锚固中,其锚固失效的主要原因是受松软煤层的性质影响。锚固孔孔底扩孔后的锚固如图3所示。

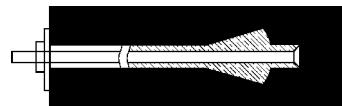


图3 锚固孔孔底扩孔后锚固示意

Fig. 3 Anchor schematic of anchor hole bottom after reaming

锚固孔孔底扩孔完成后,向钻孔中装入锚固剂,启动锚杆钻机将锚杆钻入孔底并将锚固剂搅拌均匀,锚固剂会完全充满楔形体。待锚固剂完全凝固后,会形成一个倒楔形结构,这种结构在很大程度上增大了锚固体与扩孔处钻孔壁的剪切阻力,起到了良好的锚固效果。

## 2 锚固孔孔底扩孔锚固性能力学分析

锚杆不同锚固状态如图4所示,锚固力计算的简化方法就是假设锚固剂与杆体、锚固剂与锚固孔壁之间的黏聚力在锚固长度内均匀分布。

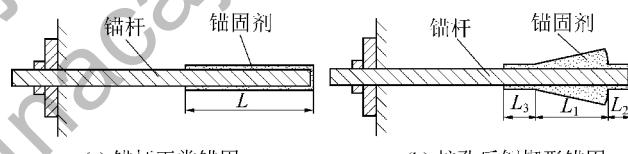


图4 锚杆不同锚固状态示意

Fig. 4 Different anchor state schematic of bolt

### 2.1 锚杆正常锚固时锚固力计算

目前锚杆的锚固材料主要为树脂锚固剂,在正常钻孔中,锚杆与锚固剂的黏聚力很容易得到满足,因此在这种情况下,计算锚杆锚固力主要考虑锚固剂与钻孔壁的黏聚力,此时锚固力计算公式为

$$F = \pi d \tau L \quad (1)$$

式中:  $F$  为正常钻孔中锚固力, kN;  $d$  为锚杆钻孔直径, mm;  $\tau$  为树脂锚固剂与钻孔壁间的极限粘结强度, MPa;  $L$  为正常钻孔锚固长度, m。

### 2.2 锚杆钻孔倒楔形锚固时锚固力计算

锚杆钻孔扩孔后,由于钻孔的局部断面的扩大,使得锚杆钻孔孔壁受力状态与正常状态不同,树脂锚固剂与孔壁之间的粘结强度还与锚杆钻孔岩石的抗拉强度有关,此时锚杆锚固力  $F'$  计算公式为

$$F' = \pi \tau [DL_1 + \beta_c (D^2 - d^2) / 4 + d(L_2 + L_3)] \quad (2)$$

式中:  $D$  为扩孔处的直径, mm;  $L_1$  为扩孔段长度, m;  $\beta_c$  为松软煤岩体的承载力系数;  $L_2$  为未扩孔锚固段

的长度,  $m$ ;  $L_3$  为孔底未扩孔部分锚固长度,  $m$ 。

在式(1)、式(2)中, 锚杆正常锚固长度与孔底扩孔后的锚固长度相等, 即  $L = L_1 + L_2 + L_3$ , 在这种情况下, 倒楔形扩孔锚固比正常钻孔锚固多考虑了松软煤岩体在扩孔处的承载力, 且在扩孔处锚固段的直径明显增大, 该段的锚固阻力也随之增大, 所以扩孔后锚固体的整体锚固性能要明显优于正常情况下锚固体的锚固性能。因此倒楔形锚固体结构能够在很大程度上增大锚杆的极限锚固力以及最大可承载力, 起到了良好的支护效果。

### 3 锚杆钻孔孔底扩孔锚固效果试验

#### 3.1 实验室相似模拟试验

为进一步验证锚固孔孔底扩孔增强锚杆锚固性能的科学性, 在实验室采用相似模拟的方法, 搭建相似模拟试验台, 试验台尺寸为: 长×宽×高为  $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ , 模型材料的单轴抗压强度为  $0.8\text{ MPa}$ , 近似为赵家寨煤矿井下煤体的强度。实验室试验如图 5 所示。



图 5 孔底扩孔实验室试验

Fig. 5 Reaming test of anchor hole bottom in laboratory

在试验台上完全模拟井下现场钻打锚固孔的情况, 分别施工 6 个正常的锚固孔, 锚固孔直径为  $32\text{ mm}$ , 深度为  $1\ 000\text{ mm}$ , 任选其中 3 个锚固孔, 利用自行开发的孔底扩孔装置进行孔底扩孔(图 4)。所采用的锚杆为等强右旋螺纹钢锚杆, 杆体直径为  $20\text{ mm}$ , 长度为  $1\ 200\text{ mm}$ ; 锚固剂为快速树脂锚固剂 MSK2335, 见表 1。

表 1 试验材料参数

Table 1 Parameters of test materials

项目	长度/mm	直径/mm
锚杆	1 200	20
锚固剂	350	23
钻孔	1 000	32

分别对未扩孔锚固孔 3 个、扩孔锚固孔 3 个进行锚杆锚固试验, 每个钻孔 1 根树脂锚固剂,  $1\text{ d}$  后进行锚固力性能拉拔试验, 如图 6 所示。

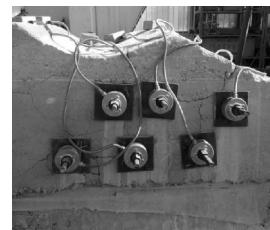


图 6 锚固孔扩孔锚固性能试验

Fig. 6 Anchorage performance test after anchor hole bottom reaming

锚杆锚固  $1\text{ h}$  后进行锚固力拉拔试验, 锚固性能试验结果见表 2。

表 2 扩孔前后锚固性能试验结果

Table 2 Anchorage performance results before and after reaming

钻孔类型	树脂锚固剂数量	压力/MPa	锚固力/kN	平均锚固力/kN
孔底扩孔	每孔 1 根	10.6	38.2	45.1
	MSK2335	15.2	54.7	
		11.8	42.5	
未扩孔钻孔	每孔 1 根	4.6	16.6	17.5
	MSK2335	5.2	18.7	
		4.8	17.3	

从表 2 可以看出, 孔底扩孔锚杆的锚固力明显大于正常状态下的锚固力, 这是由于扩孔锚杆锚固端呈倒楔形, 是正常锚固状态下的 2.5 倍左右。在锚杆受力过程中, 倒楔形的锥体与锚固孔形成较高的剪切应力。表明锚固孔孔底扩孔锚固显著提高其锚固性能, 为松软煤体巷道锚杆支护奠定了基础。

#### 3.2 井下工业性试验

将制作的锚固孔孔底扩孔装置在赵家寨矿 12211 切巷帮部进行锚固孔孔底扩孔锚固试验, 如图 7 所示。



(a) 锚固孔正常钻进

(b) 孔底进行扩孔

图 7 井下现场试验

Fig. 7 Field test in coal mine

采用锚杆钻机先钻正常锚固孔(图 7a)后, 进行孔底扩孔试验, 锚固孔深度为  $2.0\text{ m}$ 。然后换取扩孔钻头进行孔底扩孔钻进(图 7b)。试验共进行 3 个锚固孔扩孔试验, 成孔效果均良好, 未出现扩孔装置被卡和难以拔出的现象, 表明锚固孔孔底扩宽装置设计的科学性和可行性。

将孔底扩孔后的锚固孔进行锚杆安装,均采用1根MSK2335和1根MSZ2335锚固剂进行锚固试验,1h后分别进行拉拔试验。

然后随机在试验地点随机抽取3根正常锚固状态下锚杆进行拉拔试验,试验结果表明:扩孔后锚杆锚固力平均达到75.6kN,与未扩孔时的锚固力40.8kN相比显著提高。在使用相同树脂锚固剂数量的情况下,锚固力提高了近1倍,从而可以看出锚固孔孔底扩孔显著改善了锚杆的锚固性能。

## 4 结论

1) 分析了松软煤层锚固性能是制约松软煤层巷道锚杆支护技术发展的瓶颈,提出锚固孔孔底倒楔形扩孔显著提高锚杆锚固性能的理念。

2) 研发了锚固孔孔底扩孔装置,并进行了实验室和井下现场试验,结果表明单翼锚固孔孔底扩孔装置设计的科学性和可行性。

3) 通过力学分析、实验室试验及井下试验得出,采用锚固孔孔底倒楔形锚固,锚杆的锚固性能(残余锚固力)提高近1倍,为松软煤层巷道锚杆支护的应用奠定了基础。

## 参考文献(References):

- [1] 胡建军,王金安.松软破碎煤层巷道锚网支护关键因素[J].采矿与安全工程学报,2008,25(2):139-143.  
Hu Jianjun,Wang Jinan.Key factors affecting bolt-mesh supporting for roadway in soft-broken coal seam[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2008,25(2):139-143.
- [2] 郝凤山,齐有军.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 on reaming in anchor hole and experimental of anchoring force[J].Journal of China Coal Society,2008,33(12):1358-1361.
- [3] 马植侃,汪滨.钻探工程学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2013.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 赵一鸣.煤矿巷道树脂锚固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.
- [7] 孙森,唐少安.三软煤层采场围岩控制原则与实践[J].煤炭科学技术,2014,42(12):37-40,44.  
Sun Sen,Tang Shaoan.Principle and practices on surrounding rock control of three soft seam[J].Coal Science and Technology,2014,42(12):37-40,44.
- [8] 魏东,李前,杨世杰等.松软煤层锚杆支护技术研究与应用[J].中国煤炭,2005,31(1):45-47.  
Wei Dong,Li Qian,Yang Shijie *et al*.Research and application of bolt support technology in soft coal seam[J].China Coal,2005,31(1):45-47.
- [9] 康红普,姜铁明,高富强.预应力在锚杆支护中的作用[J].煤炭学报,2007,32(7):680-685.  
Kang Hongpu,Jiang Tieming,Gao Fuqiang.Effect of pretensioned stress to rock bolting[J].Journal of China Coal Society,2007,32(7):680-685.
- [10] 崔千里,康红普.锚杆支护锚固力传递机理研究[J].煤矿开采,2010,15(2):56-58,99.  
Cui Qianli,Kang Hongpu.Research on transmission mechanism of anchorage force of anchored bolt supporting[J].Coal Mining Technology,2010,15(2):56-58,99.
- [11] 马骏.扩孔型锚固技术在西安地铁工程中的应用[J].中国安全生产科学技术,2011,7(9):195-198.  
Ma Jun.Application of enlarged anchor hole technology in Xi'an subway project[J].Journal of Safety Science and Technology,2011,7(9):195-198.
- [12] 陆观宏,曾庆军,潘艳珠等.锚杆扩孔技术及其应用研究[J].公路交通科技:应用技术版,2012(2):26-30.  
Lu Guanhong,Zeng Qingjun,Pan Yanzhu *et al*.Study on anchor technique and its application[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development: Application Technology Edition,2012(2):26-30.
- [13] 贾尚华,赵春风,赵程.砂土中柱孔扩张问题的扩孔压力与扩孔半径分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(1):182-188.  
Jia Shanghua,Zhao Chunfeng,Zhao Cheng.Analysis of expanded radius and internal expanding pressure of cylindrical hole[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(1):182-188.
- [14] 陆观宏,曾庆军,黄敏等.锚杆扩孔技术应用于某高层建筑基础加固[J].土工基础,2011(5):20-22,26.  
Lu Guanhong,Zeng Qingjun,Huang Min *et al*.The application of anchor technology for reinforcement of high-rise building foundation[J].Soil Engineering and Foundation,2011(5):20-22,26.
- [15] 侯朝炯,郭励生.煤巷锚杆支护[M].徐州:中国矿业大学出版社,1999.