

软岩巷道扩孔锚固机理及支护控制数值模拟研究

王 志^{1,2}, 尹延春^{1,2}, 赵同彬^{1,2}, 马静敏¹, 武文宾³

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

3. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039)

摘 要:针对深部煤矿巷道应力复杂、软弱围岩变形较大的问题,提出一种端部扩孔锚固方法,通过理论模型及数值计算,分析了端部扩孔锚固界面应力分布、脱锚长度扩展及端面挤压应力分布;研究了不同锚固方式巷道围岩变形、应力集中特征。结果表明:相比于常规锚固,界面剪应力在拉拔端附近先增大后减小,且在扩孔起点处附近也存在一个峰值,整体分布形态上呈现双峰值特征;在相同拉拔荷载下,扩孔锚固脱锚长度明显减小;扩锚端面可提供一定挤压抗力,沿扩锚端面径向向外逐渐降低,随扩孔直径增大,挤压抗力明显上升;扩孔锚固巷道顶板变形量比常规锚固降低了36%,巷帮应力集中系数降低了37%;在保证相同巷道稳定性控制效果前提下,扩孔锚固排距可按1.3倍进行布置,有效降低了锚固施工量。

关键词:软岩巷道;锚固支护;端部扩孔;界面应力;锚固性能

中图分类号:TD353

文献标志码:A

Numerical simulation study on bolting mechanism and support control of soft rock roadway

WANG Zhi^{1,2}, YIN Yanchun^{1,2}, ZHAO Tongbin^{1,2}, MA Jingmin¹, WU Wenbin³

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

3. China Coal Technology and Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China)

Abstract: To solve the problem of complex stress and large deformation of soft surrounding rock in deep coal mine, a method of end-reaming anchor was put forward. Through theoretical analysis and numerical simulation, the stress distribution of end-reaming anchorage interface, the extension of de-bonding length and the distribution of end-face extrusion stress were analyzed. The deformation and stress concentration characteristics of roadway surrounding rock with different anchor modes were studied. The results show that compared with traditional anchor, the interface shear stress increases first and then decreases near the pullout end, and there is also a peak value at the starting point of reaming. The overall distribution is characterized by a double peak value. Under the same pullout force, the length of bolt de-bonding decreases obviously. The start face of the reaming anchor can provide certain extrusion resistant stress, which decreases gradually along the radial direction of the start face of the reaming anchor, and increases obviously with the increase of the diameter of the reaming hole. Compared with conventional anchoring, the roof deformation and stress concentration coefficient of roadway side decreased by 36% and 37% respectively. On

收稿日期:2020-11-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51974171);山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2019ZD13);山东科技大学研究生科技创新项目(SDKDYC190349)

作者简介:王 志(1996—),男,山东济南人,硕士研究生,主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究。

尹延春(1988—),男,山东济南人,副教授,博士,主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究,本文通信作者。

E-mail:skd994544@sdu.edu.cn

the premise of ensuring the same stability control effect of roadway, the reaming anchorage row spacing can be arranged by 1.3 times, effectively reducing the amount of anchoring construction.

Key words: soft rock roadway; anchor supporting; end-reaming; interface stress; anchoring performances

煤矿开采至今,锚杆支护技术在煤矿巷道中一直占主要地位^[1-2]。锚杆的本质作用是控制围岩的不连续、不协调扩容变形,包括围岩张拉、剪切破裂,结构面离层、滑动,岩块转动等,减小围岩强度劣化,保持围岩完整性,充分发挥围岩自承能力^[3]。

随着煤矿采深逐渐增大,深部地应力增大,围岩岩性偏软,巷道变形程度加剧,在动载及开采扰动作用下,围岩应力环境更为复杂,巷道支护面临的问题逐渐增多^[4-5]。针对锚固支护面临的深部巷道围岩稳定性控制问题,众多学者进行了研究,一方面对深部特殊岩体结构环境下的锚固控制机理及其相关影响因素进行分析^[6-7],另一方面针对锚固体或锚杆受静力、冲击荷载等作用下的应力分布规律及性能影响因素进行了分析^[8-10]。在相关研究结果指导下,各种新型锚杆或特殊结构锚杆不断出现^[11-12]。何满潮等^[13]发明了一种恒阻大变形锚杆,包括杆体、托盘和螺母,直筒状恒阻装置,可保持恒定阻力。Li等^[14]设计了一种大变形吸能锚杆,主要由一根钢筋和多个组合锚固单元组成,通过杆体屈服产生较大变形。吴拥政等^[15]发明了预应力钢棒支护成套技术,提高了锚杆强度与预应力。上述技术主要通过改进锚杆结构形式、材质及锚固方式等提高锚杆锚固力。

在岩土工程领域,锚杆锚固也是常用支护技术,其中扩孔锚固技术主要是通过增大钻孔底部直径,形成端部扩大型锚杆。此法能有效提升锚杆的锚固力,增强抗浮能力,锚杆寿命较长,并且制作方法较为简单^[16]。本研究基于岩土工程中扩孔锚固支护技术,提出适于煤或软岩巷道的端部扩孔锚固思路,通过理论模型与数值模拟方法对比分析常规锚固和端部扩孔锚固的锚固性能,研究影响端部扩孔锚固效果的因素。

1 扩孔锚固模型及力学分析

1.1 巷道端部扩孔锚固思路

土层地基锚杆通常是通过地面打孔,将锚杆或钢筋笼打入地面一定深度,并浇灌水泥砂浆,凝固后形成锚固体。扩孔锚杆在原技术基础上,通过可变直径刀具或脉冲爆破,在钻孔底部形成扩孔段,进而在底部形成锚固扩大端,从而提升锚杆锚固能力。

以土层扩孔锚杆为原型,考虑现有煤矿所用锚杆材料及技术,以及煤矿巷道围岩特性,提出一种具有实用性的煤矿用端部扩孔锚固思路:在原有锚杆钻孔的基础上,当常规尺寸钻孔到达一定深度后,深部进行扩大直径钻孔,对钻孔进行清孔后,将锚固剂填入钻孔,并将螺纹钢锚杆放入,待锚固剂凝固一定时间,拧紧端部螺母,施加预紧力,完成端部扩孔锚固,其结构示意图如图1所示。

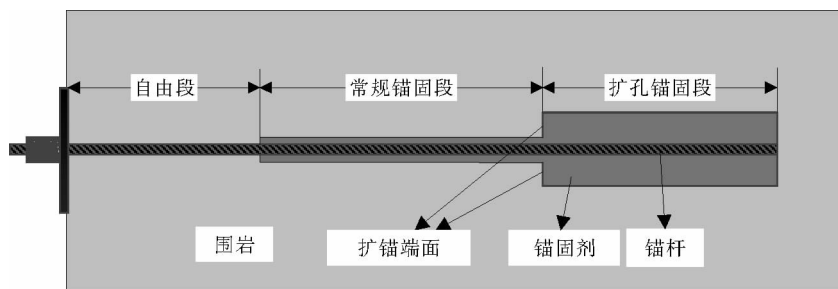


图1 扩孔锚固结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reaming anchor structure

1.2 扩孔锚固力计算

巷道常规锚固技术中锚杆对围岩提供承载力时对锚固段产生拉拔效应,锚固界面提供抗拉拔力以阻止

锚杆被拔出。该锚固力主要由界面剪切抗力提供,包括界面黏结力、机械咬合力和摩擦力^[17],假设用一个统一的函数 $\tau_{(x)}$ 表示界面剪切抗力沿锚杆锚固段长度 L 的分布,则锚杆锚固力 P 为:

$$P = 2\pi R \int_0^L \tau_{(x)} dx, \quad (1)$$

式中 R 为锚固段半径。

端部扩孔锚固力学模型如图 2 所示,当采用端部扩孔锚固时,锚杆锚固既有界面剪切抗力作用,扩锚端面同时又提供挤压抗力,假设 $\sigma_{(\rho)}$ 为扩锚端面沿径向距中心点距离 ρ 的挤压应力分布函数。则:

$$P = 2\pi R_1 \int_0^{L_1} \tau_{(x)} dx + 2\pi R_2 \int_0^{L_2} \tau_{(x)} dx + 2\pi \int_{R_1}^{R_2} \sigma_{(\rho)} \rho d\rho. \quad (2)$$

式中, R_1 为常规锚固段半径, R_2 为扩孔锚固段半径, L_1 为常规锚固段长度, L_2 为扩孔锚固段长度。

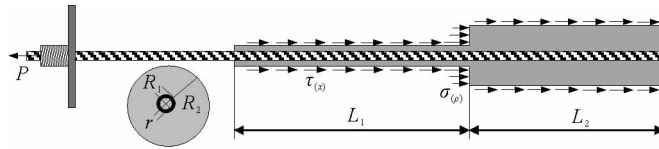


图 2 扩孔锚固结构力学模型

Fig. 2 Mechanical model of reaming anchor structure

2 扩孔锚固界面应力规律及影响因素

2.1 数值模拟方案

采用 FLAC^{3D} 软件分别建立常规锚固和端部扩孔锚固拉拔试件模型,两种数值模型示意如图 3 和图 4 所示。围岩尺寸均为 $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$,对围岩侧面及拉拔侧表面沿锚杆轴向固定位移,围岩侧面施加 20 MPa 压应力,围岩采用摩尔-库仑模型,岩性为软岩,具体力学参数见参考文献[18],如表 1 所示。

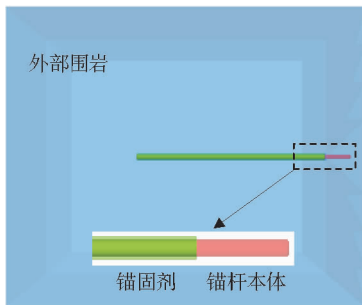


图 3 常规锚固数值模型

Fig. 3 Numerical model for conventional anchor

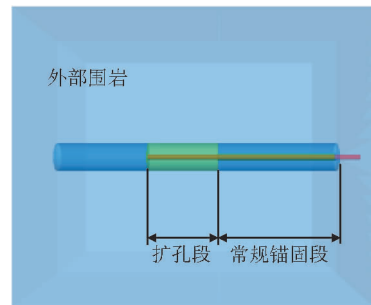


图 4 扩孔锚固数值模型

Fig. 4 Numerical model for reaming anchor

表 1 锚固拉拔数值模型主要力学参数^[18]

Tab. 1 Main mechanical parameters of the numerical model of anchor pullout

材料	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
锚杆	143.0	81.7	—	—	—
锚固剂	5.0	3.0	8.0	38	5.0
围岩	2.8	1.6	2.2	22	1.6

由于FLAC^{3D}软件内置Cable单元无法得出界面剪力及滑移脱锚情况,故锚杆及锚固剂采用实体单元建模,锚杆采用线弹性模型,锚固剂采用摩尔-库仑模型;针对锚固界面,使用FLAC^{3D}内置Interface结构单元,该单元可以显示接触面法向、剪切脱锚情况,可对滑移脱锚长度、界面剪力等进行分析。常规锚固锚杆直径20 mm,锚固剂厚度5 mm,锚固长度为0.8 m;扩孔锚固总长不变,其中常规锚固段0.5 m,扩孔锚固段0.3 m,扩孔直径为120 mm。

为对比常规锚固及端部扩孔锚固抗拉拔能力,对锚杆外伸端端头施加不同大小的拉拔荷载,分别为60、90、120和150 kN,并针对界面剪应力和扩锚端面挤压应力进行分析。

为分析不同端部扩孔直径条件下锚杆抗拉拔能力,设计不同扩孔直径的锚杆拉拔数值模拟方案:扩孔段长度维持不变,扩孔直径设计为60、80、100、120和140 mm 5种工况;轴向拉拔荷载保持为90 kN。

2.2 界面剪应力分布规律

常规锚固模型不同拉拔荷载下界面剪应力分布规律如图5所示,锚固段直径为30 mm。当拉拔荷载为60 kN时,锚固段最大剪应力位于拉拔端附近,剪应力整体呈现先上升后下降趋势,与文献[18]计算结果相似;随拉拔荷载的增加,锚固段最大剪应力数值不断升高,当达到界面极限强度时,界面开始脱锚,最大剪应力位置不断向锚杆尾部移动;当拉拔荷载到达150 kN时,锚杆剪应力全段无明显峰值,锚杆已全部脱锚,界面剪应力主要由摩擦抗力提供。

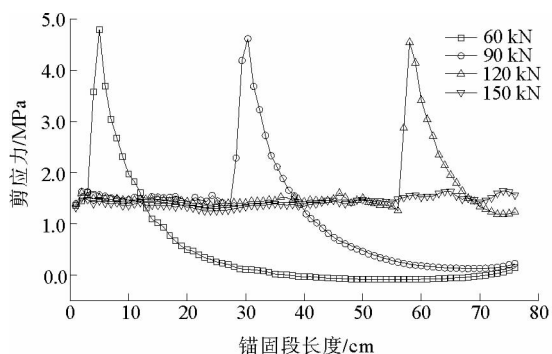


图5 常规锚固不同拉拔荷载界面剪应力分布

Fig. 5 Conventional anchor interface shear stress distribution with different force

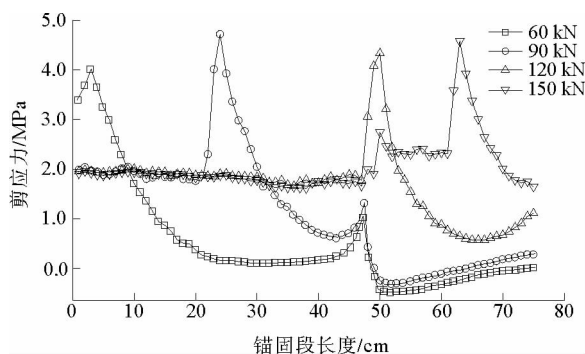


图6 扩孔锚固不同拉拔荷载界面剪应力分布

Fig. 6 Reaming anchor shear stress distribution with different force

扩孔锚固不同拉拔荷载条件下界面剪应力分布如图6所示,扩孔锚固段直径为120 mm。拉拔荷载为60和90 kN时,锚固段靠近锚杆拉拔端处产生最大剪应力,沿锚杆轴向向锚杆尾部逐渐降低,但在扩孔段起点处,剪应力急速升高,出现第二峰值,与常规锚固曲线相比,剪应力分布呈现“双峰”现象;当拉拔荷载增加至120 kN时,锚固段最大剪应力值超过界面强度,发生部分脱锚,锚杆剪应力峰值出现在扩孔段起始点;当拉拔荷载进一步增大至150 kN,锚杆脱锚段长度扩展至扩孔段,剪应力峰值点内移至扩孔起点,即靠近锚杆尾部,此时相比于常规锚固,端部扩孔锚固仍具有锚固支护能力。

2.3 扩锚端面挤压应力分布

拉拔荷载为90 kN,扩锚端面挤压应力分布如图7所示,扩锚端面明显受挤压应力作用,扩锚端面内边界处产生挤压应力峰值,峰值为5.29 MPa,沿径向向外侧挤压应力逐渐减小,至扩锚端面外边界,挤压应力降低至1.42 MPa。不同拉拔荷载端面挤压应力分布如图8所示,端面挤压应力分布规律基本相同,拉拔荷载为60和90 kN时,挤压应力总体相差较小;随着拉拔荷载增加,挤压应力分布规律保持不变,但数值明显增大。

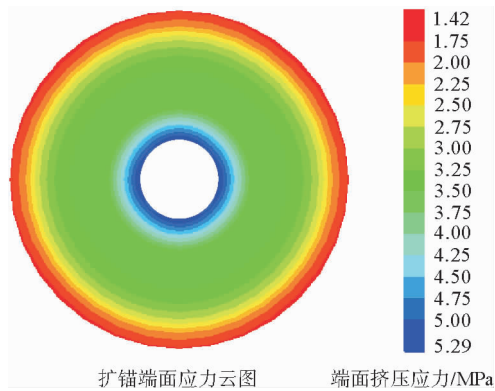


图 7 扩锚端面挤压应力分布规律

Fig. 7 Distribution of extrusion stress on the start face of reaming anchor

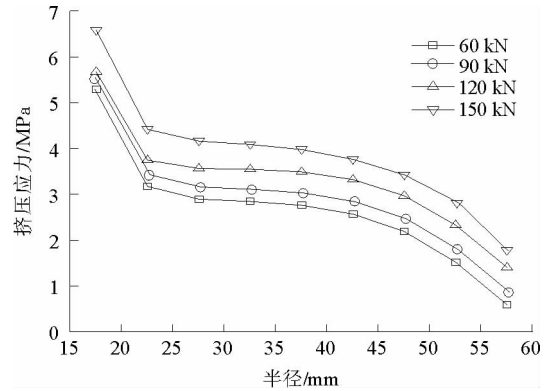


图 8 不同拉拔荷载端面挤压应力分布

Fig. 8 Distribution of extrusion stress on the start face with different force

2.4 脱锚长度对比分析

不同拉拔荷载下常规锚固与扩孔锚固脱锚长度对比如图 9, 在 60 kN 拉拔荷载情况下, 扩孔锚固并未发生脱锚, 而常规锚固靠近拉拔端小范围内已发生脱锚; 拉拔荷载逐渐增加时, 脱锚长度逐渐增加, 当拉拔荷载为 150 kN 时, 常规锚固面全部脱锚, 即整根锚杆脱锚失效, 锚固剂与锚杆的黏结状态完全破坏, 剩余剪切力只来源于摩擦阻力, 而扩孔锚固仍有部分长度保持黏结状态, 仍能发挥锚固作用。

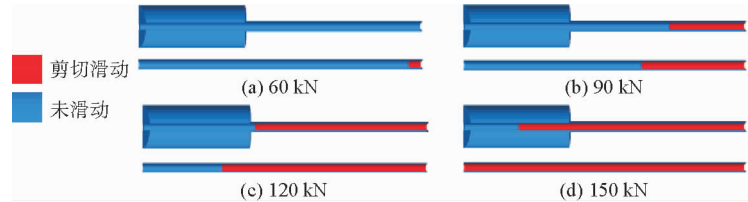


图 9 不同拉拔荷载脱锚长度对比

Fig. 9 Bolt de-bonding length with different force

2.5 扩孔直径影响

拉拔荷载为 90 kN, 对扩锚端面挤压应力进行积分, 得到不同扩孔直径下端面挤压抗力如图 10 所示, 扩孔直径为 60 和 80 mm 时, 端面挤压力分别约为 2.7 和 5.2 kN, 在拉拔荷载相同的情况下, 随着扩孔直径的增加, 扩锚端面挤压抗力不断增大, 直径为 140 mm 时, 端面挤压力为 20.9 kN, 即扩锚端面面积越大, 端面所能提供的挤压抗力越大。

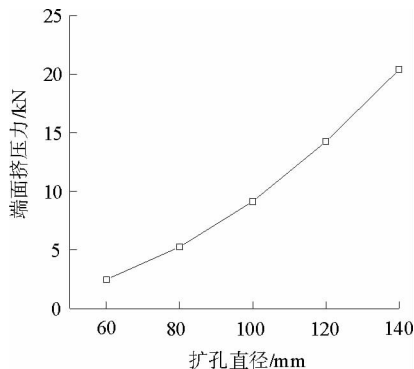


图 10 不同扩孔直径扩锚端面挤压抗力

Fig. 10 Extrusion force of start face with different reaming diameters

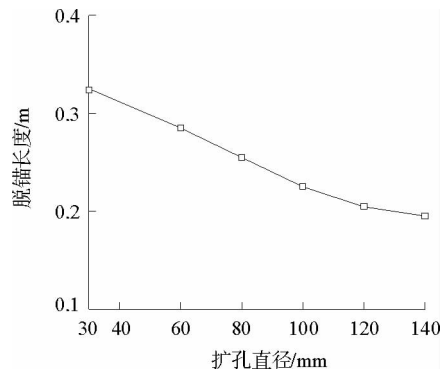


图 11 不同扩孔直径脱锚长度

Fig. 11 Bolt de-bonding length with different reaming diameters

不同扩孔直径脱锚的长度数据曲线如图 11 所示。常规锚固方式,脱锚长度为 0.32 m,扩孔直径增大至 60 mm,脱锚长度产生了明显的减小,降低至 0.29 m;当扩孔直径继续增加时,脱锚长度继续减小,扩孔直径为 140 mm 时,脱锚长度降低至 0.20 m。

从以上结果及工程应用角度考虑,过大的钻孔会增加锚固剂等使用成本,同时会大幅度破坏锚固段处围岩完整性,过度降低围岩强度,背离锚杆设计目的,起到反作用。因此,应根据工程围岩条件设计合理的扩孔直径。

3 扩孔锚固巷道围岩变形控制效果

3.1 不同锚固支护方式数值模拟方案

为进一步完善端部扩孔锚固的分析,对不同锚固方式下巷道围岩变形情况及垂直应力分布进行计算分析。模拟计算建立围岩尺寸为 $40\text{ m} \times 5\text{ m} \times 40\text{ m}$,对模型底部及左右两侧施加位移约束条件,顶部为应力约束条件,施加垂直应力 25 MPa。巷道形状为矩形,尺寸为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 。数值模型示意如图 12 所示。在施加垂直应力进行初始平衡后,对位移、变形等清零,开挖巷道,同时施加锚杆单元进行计算。围岩由上至下各岩层及具体参数参见表 2,其中,煤层及顶板为软岩岩层。

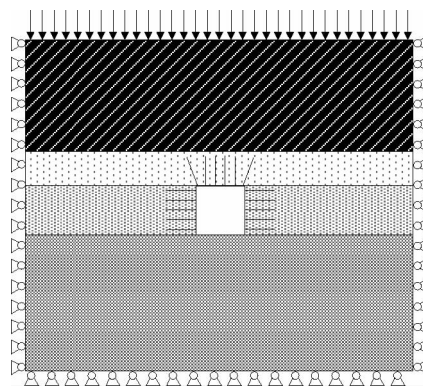


图 12 巷道支护数值模型示意图

Fig. 12 Schematic diagram of numerical model of roadway support

表 2 各岩层力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of each rock formation

岩层	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
细砂岩	4.9	1.9	5.5	26	2.3
砂质泥岩	1.1	0.9	0.6	26	1.2
煤	1.4	0.8	1.0	22	0.8
粉砂岩	7.6	4.3	8.1	27	4.8

为着重分析锚固支护下围岩控制情况,并防止因尺寸差距过大而导致建模计算出现问题,锚杆单元采用 FLAC^{3D} 内置 Cable 单元,通过改变 Cable 单元中锚固剂外圈周长参数实现扩孔锚固。锚杆全长为 3 m,其中,锚固段共 1.5 m,扩孔段长 0.5 m,直径为 120 mm,扩孔段锚固剂厚度为 50 mm,常规锚固段锚固剂厚度 5 mm,直径为 30 mm。锚杆布置在巷帮及顶板,间排距为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,锚杆及锚固剂参数参考文献[19],锚杆各参数设置:横截面面积为 3.8 cm^2 ,屈服轴力 266 kN,弹性模量为 210 GPa,锚固剂体积模量 20 MPa,内聚力为 2 MPa,内摩擦角设置为 45° ,并对锚杆施加 50 kN 预紧力。为了研究锚杆间距对巷道稳定性控制影响,对沿巷道轴向扩孔锚固锚杆布置排距进行调整,在原 1 m 排距基础上,设置 1.1、1.2、1.3、1.4 m 4 种工况,并对巷道顶板最大沉降量、应力集中系数进行对比分析。

3.2 数值计算结果分析

无锚固、常规锚固及扩孔锚固支护情况下的巷道垂直变形如图 13 所示。在无支护方式下,巷道垂直变形较为明显,尤其顶板变形达到 0.91 m;在常规锚固支护下,变形明显减小,顶板沉降变形为 0.51 m;而在扩孔锚固支护下垂直变形为 0.32 m,相比于常规锚固降低了 36%,巷道变形情况得到进一步控制。

不同锚固支护方式下巷道围岩垂直应力分布如图 14 所示,无支护方式下,巷帮应力集中较为明显,应力集中系数为 3.3;在常规锚固支护方式下,应力集中程度明显降低,应力集中系数为 1.9;在端部扩孔锚固方式下,巷帮深部应力集中现象进一步降低,巷帮垂直应力集中系数为 1.2,相比于常规锚固降低了 37%。

不同锚固支护方式下巷道围岩塑性区分布如图 15,围岩塑性区主要集中在煤层及较软弱顶板,无支护方式下,塑性区范围较大,沿巷帮向内最深可达 6.5 m;在传统锚固支护方式下,塑性区范围明显减小,巷帮向内最深至 5 m;扩孔锚固进一步减小了塑性区范围,尤其巷道顶板肩角方向,塑性区深度进一步降低至 4 m。

沿巷道轴向锚杆不同排距情况下顶板最大变形量及应力集中数据如图 16~17 所示,随着扩孔锚固锚杆布置排距的增大,顶板最大变形量及应力集中系数逐渐增大,锚固支护效果降低。在排距为 1.3 m 时,顶板变形量与应力集中系数接近常规锚固 1 m 排距效果,即扩孔锚固沿巷道轴向排距 1.3 m 布置锚杆,与常规锚固排距 1 m 布置支护效果相近,可在一定程度上减少锚杆使用数量和工程量。

4 结论

1) 相比于常规锚固方式,端部扩孔锚固的锚固力由界面剪切抗力和扩锚端面挤压抗力组成;拉拔荷载较小时,扩孔界面剪应力在拉拔端附近和扩锚端面附近存在峰值,呈现“双峰”形态,第二峰值也随拉拔力增加而增大;扩锚端面挤压应力沿径向由内向外逐渐减小。

2) 与传统锚固方式相比,端部扩孔锚固界面脱锚长度明显减小;并且随扩孔直径增大,扩孔锚固脱锚段长度明显减小,扩锚端面挤压抗力不断增大,锚杆抗拉拔能力明显加强。

3) 在巷道支护中,扩孔锚固方式的巷道顶板变形量比常规锚固降低了 36%,巷帮应力集中系数降低了 37%,减少了塑性破坏范围,围岩稳定性控制效果更好,并且相同控制效果情况下,扩孔锚固排距可增加为常规锚固的 1.3 倍。

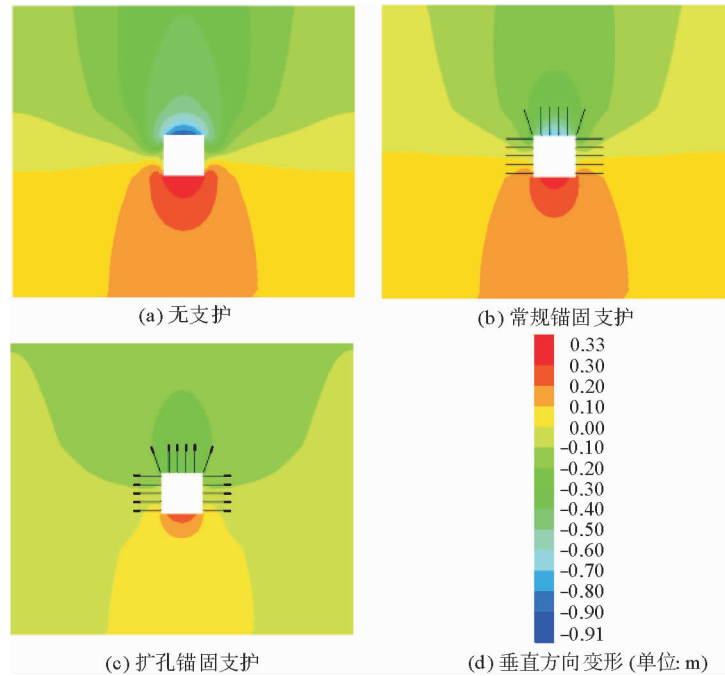


图 13 不同锚固支护方式巷道变形分布

Fig. 13 Roadway deformation distribution with different anchoring support modes

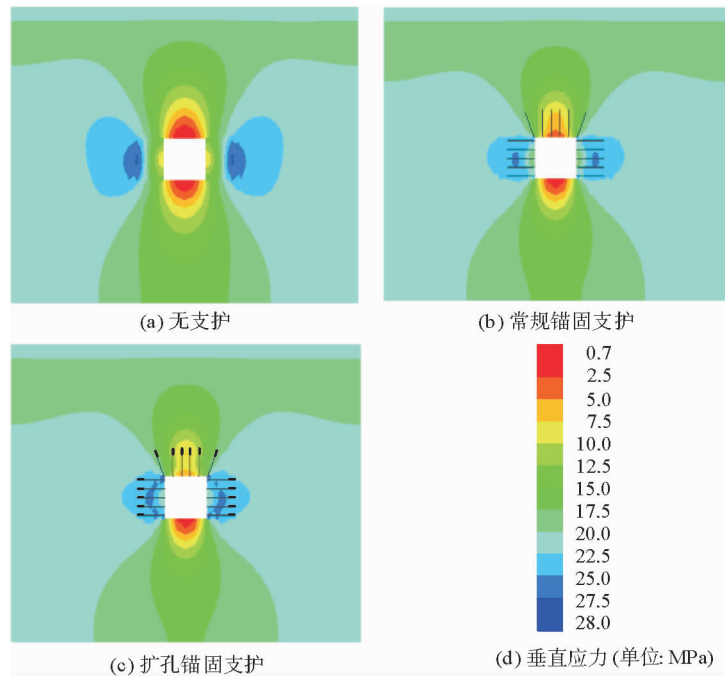


图 14 不同锚固支护方式围岩垂直应力分布

Fig. 14 Vertical stress distribution of surrounding rock with different anchoring support modes

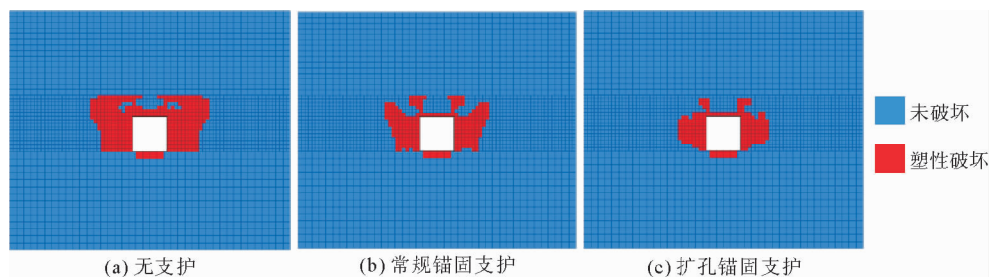


图 15 不同锚固支护方式围岩塑性区分布

Fig. 15 Plastic zone distribution of surrounding rock with different anchoring support modes

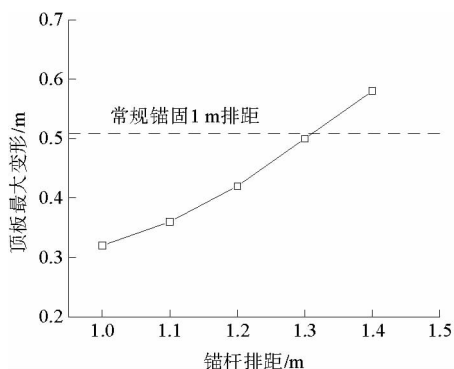


图 16 不同排距顶板最大变形

Fig. 16 Maximum deformation of roof with different space

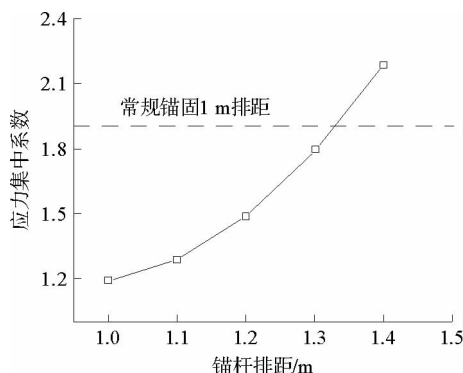


图 17 不同排距应力集中系数

Fig. 17 Stress concentration coefficients with different space

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.
KANG Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1071-1081.
- [2] 耿伟乐,董子文,郭胜利,等.深部高应力巷道变形特性与支护时机[J].煤田地质与勘探,2019,47(6):126-134.
GENG Weile, DONG Ziwen, GUO Shengli, et al. Deformation characteristic and support timing of deep high stress roadway [J]. Coal Geology and Exploration, 2019, 47(6): 126-134.
- [3] 康红普,王金华,林健.高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用[J].煤炭学报,2007,32(12):1233-1238.
KANG Hongpu, WANG Jinghua, LIN Jian. High pretensioned stress and intensive bolting system and its application in deep roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1233-1238.
- [4] 谷雪斌,郭伟耀,赵同彬,等.侧压影响下圆形洞室岩爆双轴物理模拟试验研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(1):46-52.
GU Xuebin, GUO Weiyao, ZHAO Tongbin, et al. Biaxial physical simulation test of rock burst in circular tunnel under influence of lateral pressure[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(1): 46-52.
- [5] 谭云亮,郭伟耀,辛恒奇,等.煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究[J].煤炭学报,2019,44(1):160-172.
TAN Yunliang, GUO Weiyao, XIN Hengqi, et al. Key technology of rock burst monitoring and control in deep coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 160-172.
- [6] 赵同彬,邹建超,傅知勇,等.双节理贯通岩石锚固机理试验研究[J].煤炭学报,2020,45(9):3065-3072.
ZHAO Tongbin, ZOU Jianchao, FU Zhiyong, et al. Experimental study on anchoring mechanism of double persistent jointed rock[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3065-3072.
- [7] 谭云亮,郭伟耀,赵同彬,等.深部煤巷帮部失稳诱冲机理及“卸-固”协同控制研究[J].煤炭学报,2020,45(1):66-81.

- TAN Yunliang, GUO Weiyao, ZHAO Tongbin, et al. Coal rib burst mechanism in deep roadway and “stress relief-support reinforcement” synergetic control and prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 66-81.
- [8] 尹延春, 赵同彬, 谭云亮, 等. 锚固体应力分布演化规律及其影响因素研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5): 712-716.
- YIN Yanchun, ZHAO Tongbin, TAN Yunliang, et al. Research of stress distribution evolution law and influencing factors [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(5): 712-716.
- [9] 张玉宝, 赵晨, 张子健. 冲击载荷作用下端锚锚杆动态力学性能模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 46-54.
- ZHANG Yubao, ZHAO Chen, ZHANG Zijian. Simulation study on dynamic mechanical property of end-grouted rockbolt under impact loading condition[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(4): 46-54.
- [10] 魏明尧, 张守文. 动力灾害过程中锚杆支护的极限承载能力数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 37-45.
- WEI Mingyao, ZHANG Shouwen. Simulation study of maximum bolt supporting capacity during dynamic disaster[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(4): 37-45.
- [11] 刘少伟, 尚鹏翔, 张辉, 等. 煤岩软弱围岩巷道锚杆孔扩孔机理与试验[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.
- [12] 程利兴, 张辉, 姜鹏飞, 等. 软弱煤岩体扩孔锚固力学特性与试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1153-1160.
- CHENG Lixing, ZHANG Hui, JIANG Pengfei, et al. Mechanical properties and experimental study on reaming anchor in soft coal and rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1153-1160.
- [13] 何满潮, 李晨, 宫伟力. 恒阻大变形锚杆冲击拉伸实验及其有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2179-2187.
- HE Manchao, LI Chen, GONG Weili. Elongation and impacting experimental system for bolts with constant resistance and large deformation and finite element analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2179-2187.
- [14] LI C C. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(3): 396-404.
- [15] 吴拥政, 康红普, 吴建星, 等. 矿用预应力钢棒支护成套技术开发及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增1): 3230-3237.
- WU Yongzheng, KANG Hongpu, WU Jianxing, et al. Development and application of mine prestressed steel bars supporting technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3230-3237.
- [16] 张慧乐, 刘钟, 徐斐鑫, 等. 扩体锚杆尺寸效应模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增1): 468-472.
- ZHANG Huile, LIU Zhong, XU Yanxin, et al. Model tests on size effect of underreamed ground anchors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 468-472.
- [17] LI C, STILLBORG B. Analytical models for rock bolts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(8): 1013-1029.
- [18] 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.
- [19] 杨宁, 李为腾, 玄超, 等. FLAC^{3D}可破断锚杆单元完善及深部煤巷应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 251-258.
- YANG Ning, LI Weiteng, XUAN Chao, et al. Improvement of breakable anchor bolt element in FLAC^{3D} and its application in deep coal roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(2): 251-258.

(责任编辑:吕海亮)