



移动扫码阅读

王襄禹,张卫东,王广辉,等.张拉预紧式锚杆支护系统高能强化锚固机理研究[J].煤炭科学技术,2021,49(2):38-44. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.02.005
 WANG Xiangyu, ZHANG Weidong, WANG Guanghui, et al. Study on high-energy strengthening anchor mechanism of tension pre-tightening bolt support system [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 38-44. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.02.005

张拉预紧式锚杆支护系统高能强化锚固机理研究

王襄禹¹,张卫东²,王广辉¹,吴博文¹,李军臣¹,郑哲¹

(1.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116;2.徐州矿务集团有限公司,江苏 徐州 221018)

摘要:目前传统转矩式锚杆预紧力损失大、锚杆主动性利用率较低,难以满足深部复杂困难巷道的支护要求,因此提出了张拉式高预紧锚杆支护技术,开发了张拉预紧式锚杆锁具及相关构件,并对系统在实验室进行了锚杆拉伸试验,结果表明:在锚具锥度为6°时,整个锚杆拉伸过程直至锚杆破断后锁具都可实现自锁,锚杆破断时,锚索总后退距离平均为3.3 mm,验证了锁具系统的安全性、匹配性及稳定性。而后采用数值模拟的方法建立了巷道锚固分离体模型,对比了低、高预紧力下锚固体的变形破坏特征与能量演化机制,最终得出高预紧力锚杆比低预紧力锚杆更能提高锚固体强度,减小锚固体受载变形的破坏程度,高预紧力产生的高储能可有效提高锚固体破坏峰值,减小破坏时的总耗散能,有效提高锚固体峰后残余能量。基于理论分析结果,在王庄煤矿91采区运输大巷进行了张拉预紧式锚杆与普通转矩式锚杆的对比试验,据矿压监测结果显示采用张拉预紧式锚杆的巷道段两帮最大移近量减少了32.6%,证明了提高预紧力构建高储能锚支护体系可以有效减小巷道变形。

关键词:锚杆;高储能;高预紧力;锚固体

中图分类号:TD353 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2021)02-0038-07

Study on high-energy strengthening anchor mechanism of tension pre-tightening bolt support system

WANG Xiangyu¹, ZHANG Weidong², WANG Guanghui¹, WU Bowen¹, LI Junchen¹, ZHENG Zhe¹

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Xuzhou Coal Mining Group, Xuzhou 221018, China)

Abstract: At present, traditional torque anchor bolts have large loss of preload and low utilization rate of bolts, which is difficult to meet the support requirements of deep complex and difficult roadways. Therefore, the tension pre-tightening bolt support technology is proposed, the tension pre-tightening bolt lock and related components are developed, and the system has been subjected to a laboratory anchor rod tensile test. The results show that when the anchor taper is 6°, the bolt is locked after the bolt is broken during the whole stretching process. When the anchor rod is broken, the total distance of the anchor cable is 3.3 mm on average, which verifies the safety, matching and stability of the lock system. A numerical simulation method was used to establish a roadway anchorage separation model, and the deformation and failure characteristics and energy storage mechanism of the anchor under high and low preload anchor were compared. Finally, it was concluded that the high preload bolt was compared with the low preload bolt and the high preload bolt can improve the strength of the anchor body and reduce the damage degree of the anchor body under load. The high energy storage achieved by the high preload can effectively improve the peak value of the anchor body failure and reduce the damage degree of the anchor body. The total dissipated energy during failure can effectively improve the residual energy of anchorage body after peak. Based on the results of theoretical analysis, a comparative test of tensioned pre-tightening bolts and ordinary torque bolts was carried out in the main roadway of rubber-tyred vehicles in No.91 mining area of Wangzhuang Coal Mine. The maximum moving distance of the two sides of the roadway section of the roadway section has been reduced by 32.6%, which proves that the deformation of roadway can be effectively reduced by increasing the preload to construct high energy storage anchor.

Key words: anchor; high energy storage; high pre-tightening force; anchorage

收稿日期:2020-09-12;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(52074239)

作者简介:王襄禹(1979—),男,河南平顶山人,博士生导师,博士。E-mail: wangxiangyu79@126.com

0 引言

随着煤矿地下开采深度不断增加,地下巷道硐室的围岩条件逐渐变差,尤其是开采深度达到千米以下,围岩应力升高,对于多重采动影响巷道、孤岛工作面巷道等大量复杂困难巷道,对围岩控制技术提出了更高要求,必须不断改进与探索新的支护技术^[1-4]。

预紧力作为巷道锚杆支护的关键参数,在支护参数对围岩应力状态影响的敏感性分析中,预紧力的敏感性尤为重要^[5-6]。众多学者近年来的研究都积极肯定了锚杆预紧力的作用,及时给锚杆施加较大预紧力并实现有效扩散,可以有效提高锚杆支护系统的刚度,可实现真正的主动及时支护,改善围岩应力状态,提高围岩完整性,实现围岩的高阻让压^[7-8],但目前对于实现高预紧力的技术方面,前人多在锚杆预紧转矩与预紧力的转化关系方面进行了研究,主要有2种方法:①提高预紧转矩;②减小转矩与预紧力的转化损失^[9-12]。上述方法虽然在一定程度上提高了预紧力,但仍采用螺母的方式紧固,存在较大的局限性。

因此,笔者创新性地提出采用锁具紧固锚杆,并配合千斤顶张拉完成高预紧力的施加,经实验室安全稳定性测试及高能锚固体储能机制分析后,在王庄煤矿开展了工业性试验,并取得了较好的应用效果。

1 传统转矩式锚杆的预紧力现状

1.1 锚杆合理预紧力取值

实现锚杆高预紧力的施加既可以保证巷道的支护效果,又可充分提高锚杆利用率。锚杆预应力与锚杆屈服强度之比大于0.5时属于高主动支护^[13],此时锚杆的强度利用率高,能够真正充分发挥锚杆的作用。以直径22 mm的BHRB335锚杆为例,锚杆极限拉断力约为186 kN,因此若采用高主动支护,需施加93 kN以上的预紧力,但现场施工中采用转矩式锚杆一般获得的预紧力只有30~45 kN,难以满足深部复杂巷道的需求^[14]。

1.2 传统转矩式锚杆的不足

1)预紧力施工要求与预紧方式不匹配,转矩转化为预紧力的效率普遍较低。

2)锚杆加工缺陷及锚杆复合受力破断。由于锚杆尾部螺纹、螺母和垫片的材质以及加工缺陷等问题,若采用过度提高转矩以实现高预应力的方式,会造成锚杆杆体服务期间受较大的侧向扭转载荷、

轴向拉伸载荷和横向剪切载荷的复合作用,导致锚杆破断^[15-16]。

3)锚杆预紧范围有限,失效锚杆无法重复预紧。巷道扩帮、岩层松软、振动等原因引起锚杆预紧失效时,受尾部细螺纹长度局限,锚杆无法再次预紧,造成了支护材料的浪费。

2 新型张拉预紧式锚杆支护系统

2.1 系统构成

为了有效解决传统转矩式锚杆施加高预紧力困难的缺点,提出采用千斤顶张拉施加锚杆预紧力的方法,基于摩擦自锁原理开发了锚杆锁具,同时配套开发了张拉千斤顶与锚杆搅拌器,具体系统构成如图1所示。

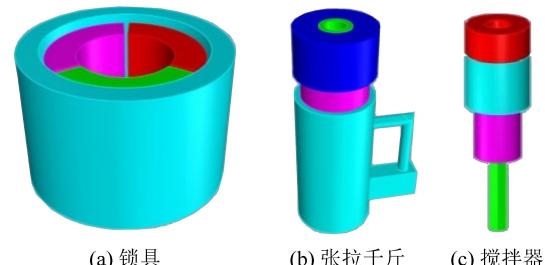


图1 张拉预紧式锚杆支护系统

Fig.1 Tension-preload anchor support system

张拉预紧式锚杆支护系统相比传统转矩式锚杆具有以下3点优势:①利用张拉千斤顶可实现任意数值预紧力的施加,提高锚杆的主动支护系数与强度利用系数;②能有效改善预紧力施加过程中锚杆有害受力状态,实现围岩的高阻让压,大幅抑制不协调变形;③细螺纹段失效锚杆可重复预紧。

2.2 锚杆锁具内部结构及工作原理

锚杆锁具作为整套系统的核心,主要由锚环和夹片等2个部分组成。锚环为筒形结构,中间通孔为倒圆台形。夹片外壁与锚环内壁贴合,夹片共有3片,曲率半径为120°,其结构如图2所示。



图2 锚杆锁具结构

Fig.2 Lock structure of bolt

以φ22 mm的HRB335 MPa左旋螺纹钢锚杆为研究对象,经过金相显微试验、落锤冲击韧性试验确

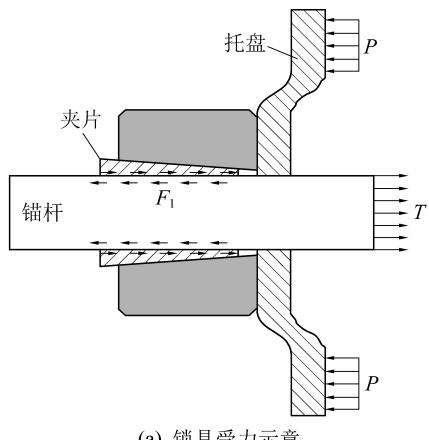
定了锚环和夹片的物理参数:锚环选用40Cr钢,夹片选用20CrMnTi钢。

锁具工作原理如图3所示,在锚杆服务期间,托盘受围岩作用力P传递至锚环,在锚环内锥面的作用下,将P转化为沿斜面的正压力N₀,将N₀分解成水平推力与铅锤压力,则有

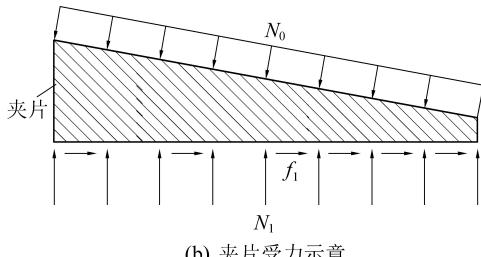
$$\mu N_0 \cdot \cos \theta = N_0 \cdot \sin \theta$$

式中: μ 为锚杆与夹片之间的摩擦因数; θ 为夹片的锥度。

当锚环内锥的角度 θ 达到临界值时,夹片与锚杆间实现摩擦自锁,此时锚环受力再增大,夹片与锚杆间也不会产生相对位移。而且锚环内壁的倒锥形设计使锚环相对运动时在锥形夹片支撑力下实现静止,最终锚环、夹片和锚杆杆体之间相互卡牢达到锁定。



(a) 锁具受力示意



(b) 夹片受力示意

T—锚杆所受轴力;P—围岩作用于托盘的反力;F₁—锚杆所受切向力;
N₀—锚环锥面作用于夹片的正应力;N₁—锚杆作用于夹片的反力;
f₁—夹片阻止锚杆相对滑动摩擦力

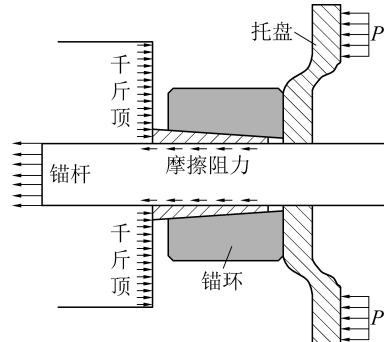
图3 锁具工作原理

Fig.3 Working principle of bolt lock

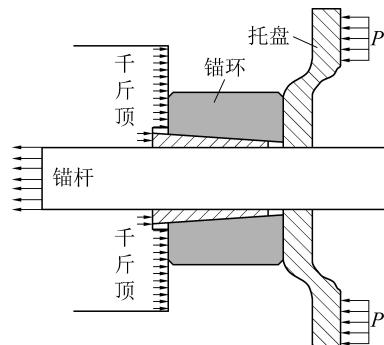
2.3 张拉系统配件

采用张拉方式提高预紧力时,很多张拉千斤顶存在缺陷,即不具备“台阶加载装置”,容易造成张拉过程中千斤顶前端面直接作用在夹片端面上,如图4所示,此时夹片与锚杆间“摩擦自锁”效应不仅造成了千斤顶张拉功率的最大损失,而且还会使锚杆杆体遭受夹片刻蚀而受损。即有缺陷的千斤顶在

张拉时,输出的张力很大部分消耗在了锁具与锚杆间的摩擦与刻蚀上,而杆体实际获得的预紧力较小。因此,在克服上述缺陷后,自主研发了适用于锚杆锁具的张拉千斤顶。由于采用锁具锁定锚杆的方式杆体尾部无需车细螺纹,因此也配套开发了无尾纹抱锁式搅拌器,其工作原理是利用夹片与锚杆之间的摩擦进行锚杆锁定,具体实物如图5所示。



(a) 设计缺陷张拉千斤顶



(b) 合理设计千斤顶

图4 张拉千斤顶的设计

Fig.4 Design of tensioning jack



(a) 千斤顶



(b) 搅拌器

图5 张拉系统配件

Fig.5 Accessories of tensioning system

2.4 张拉预紧式锚杆支护系统匹配性试验

为了试验锚杆锁具在张拉过程中与锚杆的摩擦自锁匹配性,根据文献[17]的匹配性试验方法,以直径22 mm的HRB335MPa锚杆为研究对象,初步制造了与锚杆配套的锥度为5°、6°、7°、8°、9°共5种锚具(为保证试验正常进行,此试验材质选用锚索

锁具材质),利用 LW-1000 型锚杆(索)卧式拉拔试验装置(图 6)进行了拉力试验,试验结果显示,当锚杆锁具锥度大于 8°时,锁具无法形成摩擦自锁而与锚杆杆体发生相对位移,只在锚杆杆体处产生轻微划痕,如图 7 所示。当锥度不大于 7°时,在整个锚杆拉伸过程及锚杆破断后锁具都没有发生较大相对位移,即使在锚杆破断之后,锁具后退量仍较小。考虑足够的安全备用量,因此选定锚杆锁具合理锥度为 6°,退锚量试验结果如图 8 所示。



图 6 LW-1000 型锚杆索卧式拉拔装置

Fig.6 LW-1000 anchor cable horizontal drawing device



图 7 锁具与锚杆拉伸断试验结果

Fig.7 Tensile breaking test results of lock and bolt

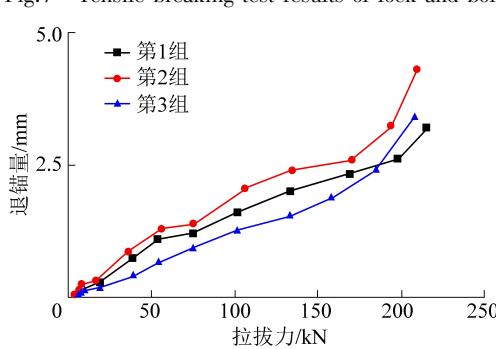


图 8 退锚量测试结果

Fig.8 Test results of lock retraction distance

此时在锚杆受拉伸变形直至破坏期间,即平均拉拔力达 215 kN 时锁具能一直保持锁定状态,直至锚杆发生破断时,锁具后退量仅为 3.3 mm,足以满足锚杆服务期间的使用。

3 张拉预紧式锚固体高能强化锚固机理分析

3.1 巷道锚固分离体数值模型

基于研制的张拉式高预紧力支护系统,从能量与裂隙演化的角度研究高预紧力下锚杆对锚固体强度强化作用,分别建立无预紧力、普通预紧力和张拉

式高预紧力锚杆的锚固分离体模型,如图 9 所示。设计模型尺寸为:高×宽=2 m×1 m,模型下部固定,在模型顶部每次迭代施加垂直荷载为 0.01 kN,围岩网格采用 Trigon 划分,根据实际,取锚杆直径为 22 mm,长度为 2 000 mm,设计普通锚杆预紧力为 40 kN,张拉式预紧力为 90 kN。主要对比不同预紧力锚固体受载破坏期间的能量与裂隙演化规律,评价张拉式高预紧力锚杆对锚固体的高能强化机理。

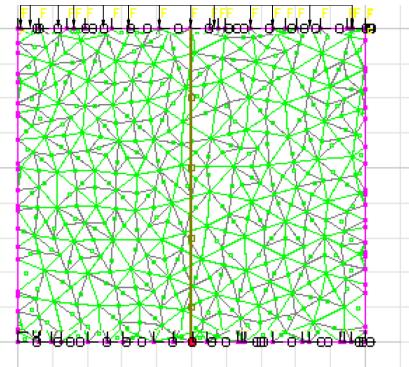


图 9 数值模型

Fig.9 Numerical model

围岩块体力学参数如下:

密度/(kg·m ⁻³)	1 400
体积模量/GPa	0.73
剪切模量/GPa	0.3
内摩擦角/(°)	27
黏聚力/MPa	1.6
抗拉强度/MPa	0.9

围岩节理力学参数如下:

法向刚度/GPa	113
切向刚度/GPa	45.2
黏聚力/MPa	27
内摩擦角/(°)	0.4
抗拉强度/MPa	1.3

锚杆力学参数如下:

密度/(kg·m ⁻³)	7.5
极限破断力/kN	186
拉伸屈服力/kN	127
弹性模量/GPa	2×10^2

3.2 锚固体变形破坏特征分析

塑性区模拟结果如图 10 所示。由图 10 可知,无预紧力锚杆岩体塑性区分布范围最大,且基本遍布整体;拉伸破坏区分布较少,位于模型侧边。普通低预紧力锚杆岩体塑性区主要分布在模型下半区,上半区域较少分布,主要是因为锚杆的主动预紧力

提高了锚固体强度,有效减少了岩体的破坏;屈服区主要沿锚杆轴向分布,分布面积相较于无预紧力锚杆岩体略有增加,主要是因为岩体压缩变形时,由于锚固剂的粘结作用,约束锚杆附近岩体位移,从而造成了周围岩体发生屈服;张拉破坏区相对不明显。对于张拉式预紧力锚杆,塑性区与屈服区主要分布在模型远离锚杆的岩体两侧,塑性区范围相较普通锚杆更小,说明张拉式高预紧力锚杆很大程度上提高了锚固体的承载能力,有效减少了岩体的破坏;张拉破坏区仅在锚杆沿轴向附近少量出现。

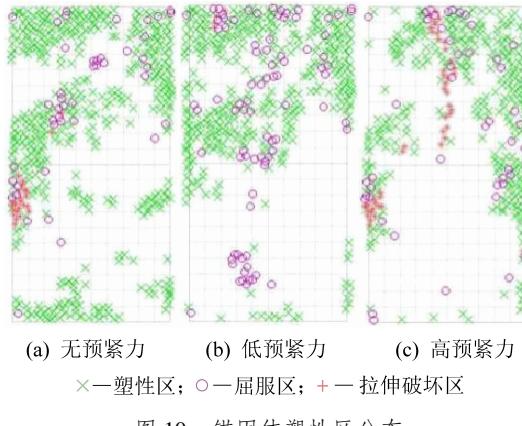


Fig.10 Distribution of plastic zone of anchor

3.3 锚固体高储能机制

通过监测无预紧力、低预紧力、高预紧力锚固体受载变形破坏期间的能量变化,监测结果如图11所示,由图11可得,3个模型的应变能储存可以分为3个阶段:峰值前的稳定线性增长阶段(岩体受载储能应变能增加,少有能量耗散)、峰值阶段(受载能量输入与岩体损伤破坏的耗散能平衡)、峰后速损阶段(岩体损伤破坏的能量耗散加快)。

3种锚固体的能量变化具有相同的3个阶段,但无预紧力锚固体能量峰值为2.98 kJ,最终岩体内储存的应变能为0.66 J,普通锚杆锚固体能量峰值为3.31 kJ,最终储存的应变能为0.95 J,相比无预紧力锚固体能量峰值提高了0.11倍,峰后能量提高了0.45倍;张拉预紧式锚杆锚固体能量峰值为3.50 kJ,最终储存的应变能为1.32 J,相比无预紧力锚固体能量峰值提高了0.17倍,峰后能量提高了1.0倍,相比低预紧力锚杆峰值提高了0.06倍,峰后能量提高了0.39倍。由此说明预紧力越高,锚固体受载时储存的应变能峰值越高,即抵抗外界破坏的能力越强,且最终锚固体发生破坏时,能量速损阶段岩体发生破坏的程度越低,锚固体峰后的完整性越高。

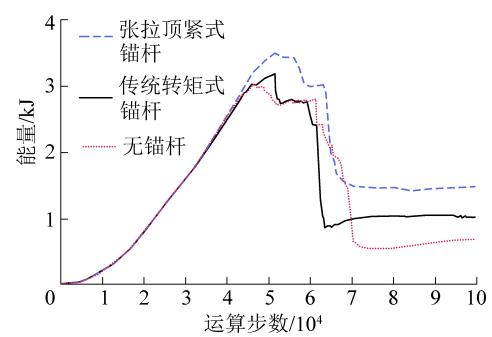


图11 能量变化结果
Fig.11 Results of energy change

4 工业性试验

4.1 工程地质条件

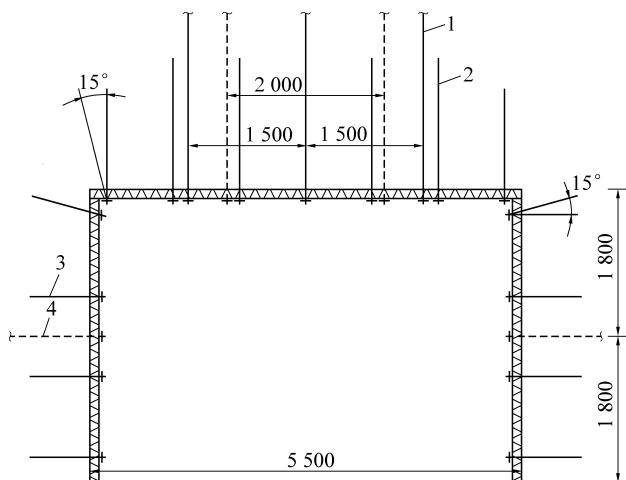
为进一步检验张拉式高预紧力锚杆控制巷道围岩变形的效果,选取试验地点为王庄煤矿91采区运输大巷2的延伸段,所属煤层为3号煤层,埋深约为450 m,煤层厚度为7.0 m,煤层倾角为1°~10°,直接顶厚度3.4 m泥岩,基本顶厚度15.5 m的砂岩与砂质泥岩,直接底厚度1.2 m泥岩,基本底厚度2.6 m粉砂岩。

原支护方案(图12):顶板每排采用φ22 mm×3 000 mm高强度螺纹钢锚杆7根,锚杆间排距为850 mm×800 mm,(CK+Z)2360、Z2360型药卷各1支加长锚固,铺设金属网和双筋双梁钢筋梯子梁。加强支护采用φ22 mm×8 300 mm锚索,“3-2-3”布置方式,排距800 mm,使用双筋双梁钢筋梯子梁联锁。两帮各打设4根φ22 mm×2 400 mm高强度螺纹钢锚杆,锚杆间距为1 000 mm,排距为800 mm,Z2335、Z2360型药卷各1支加长锚固,φ22 mm×5 300 mm锚索加强支护,采用“1-0-1”的布置方式,排距1 600 mm。

为对比分析张拉式预紧力锚杆与传统锚杆的支护效果,考察张拉式预紧力锚杆支护的合理性,试验方案设置为保持原支护的锚杆(索)间排距等参数不变,只将原两帮锚杆更换为张拉预紧式锚杆,张拉预紧时使用张拉千斤顶施加95 kN预紧力(考虑一定的预紧力损失,设置超张拉系数为1.05)进行支护,试验长度为100 m。在试验效果较好的情况下,将张拉预紧式锚杆的排距放大到1 000 mm,并对3种支护参数下的矿压数据进行对比分析。

4.2 矿压监测结果分析

1)锚杆轴力监测。在现场对施加预紧力的锚杆进行轴力监测,结果如图13所示,普通锚杆轴力



1— $\varnothing 22\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 大孔径预应力锚索;2— $\varnothing 22\text{ mm} \times 3000\text{ mm}$ 高强螺纹钢顶锚杆;3— $\varnothing 22\text{ mm} \times 2400\text{ mm}$ 高强螺纹钢帮锚杆;
4— $\varnothing 22\text{ mm} \times 5300\text{ mm}$ 帮锚索

图 12 张拉预紧式锚杆试验方案

Fig.12 Test scheme of pretensioned anchor

普遍较小,一般只有 45 kN 左右,张拉式预紧锚杆轴力普遍达到 85 kN 左右。对比分析张拉式预紧力锚杆的轴力情况,结果显示,张拉式预紧力锚杆在自由段预紧力下降比转矩式预紧力锚杆要平缓,可以保持较高的预紧力。

2) 表面位移监测。对不同试验巷道锚杆支护效果监测,该巷道表面位移监测如图 14 所示。

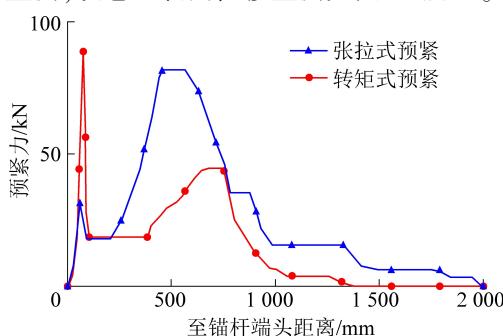


图 13 轴力监测结果

Fig.13 Monitoring results of bolt axial force

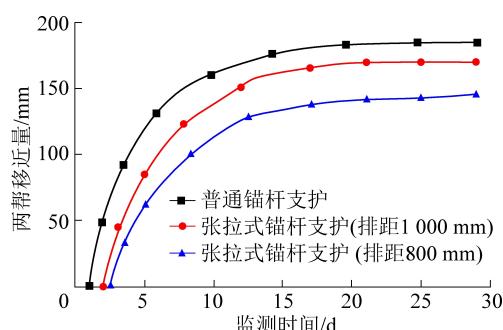


图 14 挖进期间两帮变形量与变形速度

Fig.14 Deformation amount and deformation velocity of two sides during roadway excavation

由图 14 可知,排距为 800 mm 的普通锚杆支护段,巷道两帮变形量大约为 190 mm,而排距为 800 mm 的张拉式锚杆支护段,其巷道两帮的变形量明显大幅减小,约为 130 mm。在排距放大为 1 000 mm 的张拉式锚杆支护段,两帮的变形量与 800 mm 的普通锚杆支护相差不大,证明其仍然对围岩有较好的控制效果。经现场实际矿压观测结果,张拉式预紧力锚杆系统的支护效果明显高于普通锚杆支护,在适当放大间排距后,仍然具有良好的围岩控制能力。

5 结 论

1) 提出采用张拉方式提高锚杆预紧力,开发了整套张拉预紧式锚杆成套技术,经实验室锚杆拉伸试验得出当锚环锥度为 6° 时,直至锚杆破断过程中,锁具未发生明显变形破坏,且全程锁具退锚量约为 3 mm,成功验证了锁具的可靠性与稳定性。

2) 数值模拟研究表明,高预紧力锚杆相比低预紧力锚杆更能提高锚固体强度,减小锚固体受载变形破坏程度;从能量角度来看,高预紧力锚杆实现了高储能,有效提高了锚固体发生破坏的应变能峰值,减小了锚固体破坏耗散能,最终实现峰后高能。

3) 在王庄煤矿 91 采区运输大巷 2 的延伸段进行了现场试验,监测数据显示转矩式锚杆最大两帮移近量为 196 mm,张拉式锚杆最大两帮移近量为 132 mm,最大两帮移近量减少了 32.6%,从而证明通过提高预紧力构建高储能锚固体可以有效地减小围岩表面位移。

参考文献(References) :

- [1] 单仁亮,彭杨皓,孔祥松,等.国内外煤巷支护技术研究进展 [J].岩石力学与工程学报,2019,38(12):2377-2403.
SHAN Renliang, PENG Yanghao, KONG Xiangsong, et al. Research progress of coal roadway support technology at home and abroad [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(12):2377-2403.
- [2] 侯朝炯.深部巷道围岩控制的有效途径 [J].中国矿业大学学报,2017,46(3):467-473.
HOU Chaojiong. Effective approach for surrounding rock control in deep roadway [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(3):467-473.
- [3] 肖同强,柏建彪,杨 峰.高预紧力锚杆支护理论与技术发展现状 [J].煤炭技术,2011,30(2):79-81.
XIAO Tongqiang, BAI Jianbiao, YANG Feng. Development status of high pre-stress bolt support theory and technology [J]. Coal Technology, 2011, 30(2):79-81.
- [4] KANG H, WU Y, GAO F, et al. Mechanical performances and stress states of rock bolts under varying loading conditions [J].

- Tunneling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2016, 52:138-146.
- [5] 王洪涛. 岩体锚固失效机理及预应力锚固围岩承载性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [6] 孙振宇, 张顶立, 房 倩. 隧道锚固系统的协同作用及设计方法 [J]. 工程力学, 2019, 36(5):53-66, 75.
- SUN Zhenyu, ZHANG Dingli, FANG Qian. The synergistic effect and design method of tunnel anchorage system [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(5):53-66, 75.
- [7] 刘金海, 孙 浩, 张治高, 等. 高预紧力锚杆破断及其控制的宏观力学机制研究 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1):91-96.
- LIU Jinhai, SUN Hao, ZHANG Zhigao, et al. Research on macro-mechanics mechanism of bolt fracturing and its control with high pre-tensioned force [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1):91-96.
- [8] 陶文斌, 侯俊领, 陈铁林, 等. 高预紧力后张法全长锚固支护力学分析 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(2):631-640.
- TAO Wenbin, HOU Junling, CHEN Tielin, et al. Mechanical analysis of full-length anchorage with high pretension post-tensioning method [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(2):631-640.
- [9] 薛 刚, 杨发兵, 王 飞. 高强锚杆预紧力影响因素分析研究 [J]. 能源与环保, 2017, 39(12):282-285.
- XUE Gang, YANG Fabing, WANG Fei. Analysis and study on influencing factors of pre-tightening force of high strength bolt [J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(12):282-285.
- [10] 张广云. 锚杆预紧转矩与预紧力关系研究 [J]. 科技情报开发与经济, 2011, 21(1):195-198.
- ZHANG Guangyun. Study on the relationship between bolt's pre-tightening torque and pre-tightening force [J]. SCI-TECH Information Development and Economy, 2011, 21(1):195-198.
- [11] YI L, YU Z, BIN J, et al. Study of prestress loss of prestressed BFRP reinforcing steel pipe [J]. Industrial Construction, 2015.
- [12] 李志兵, 张 农, 韩昌良, 等. 锚固预紧力与预紧力矩相互关系的研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(2):189-193.
- LI Zhibing, ZHANG Nong, HAN Changliang, et al. Relationship between pre-tightening force and tightening torque [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, 41(2):189-193.
- [13] 林 健, 石 壳, 孙志勇, 等. 端部锚固锚杆预应力场分布特征的大型模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11):2237-2247.
- LIN Jian, SHI Yao, SUN Zhiyong, et al. Large scale model test on the distribution characteristics of the prestressed field of end-anchored bolts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11):2237-2247.
- [14] PAN R, WANG Q, JIANG B, et al. Failure of bolt support and experimental study on the parameters of bolt-grouting for supporting the roadways in deep coal seam [J]. Eng Fail Anal, 2017, 80:218-233.
- [15] 吴拥政, 褚晓威, 吴建星, 等. 强力锚杆杆体断裂失效的微观试验研究 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(3):574-581.
- WU Yongzheng, CHU Xiaowei, WU Jianxing, et al. Micro-mesoscopic test on fracture failure of intensive rock bolts [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3):574-581.
- [16] 程 蓬, 鞠文君. 高强度锚杆尾部螺纹断裂受力分析 [J]. 煤矿开采, 2011, 16(2):20-22, 90.
- CHENG Peng, JU Wenjun. Force analysis of worm breakage of anchored bolt with high strength [J]. Coal Mining Technology, 2011, 16(2):20-22, 90.
- [17] 康红普, 林 健, 吴拥政, 等. 锚杆构件力学性能及匹配性 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(1):11-23.
- KANG Hongpu, LIN Jian, WU Yongzheng, et al. Mechanical performances and compatibility of rock bolt components [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1):11-23.