



## 高预紧力均布承载型锚杆力学响应及应用

侯俊领 李垂宇 赵能 杜承航 张敦喜 李培

### 引用本文:

侯俊领, 李垂宇, 赵能, 等. 高预紧力均布承载型锚杆力学响应及应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 92–101.

HOU Junling, LI Chuiyu, ZHAO Neng. Key technology and application of pre-stressed anchor to improve pre-tightening force[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 92–101.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1573>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 高预紧力锚杆破断及其控制的宏观力学机制研究

Research on macro-mechanics mechanism of bolt fracturing and its control with high pre-tensioned force

煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4342cc2b-ddf1-4208-b8fc-3b2f59fb2922>

#### 张拉预紧式锚杆支护系统高能强化锚固机理研究

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

煤炭科学技术. 2021, 49(2): 38–44 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.005>

#### 锚杆附件力学性能匹配性研究

Study on mechanical properties and compatibility of bolt components

煤炭科学技术. 2021, 49(4): 95–102 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.012>

#### 全长锚固锚杆支护软岩巷道围岩承载结构力学响应解析

Mechanical response analysis of surrounding rock bearing structure of soft rock roadway based on full-length anchorage

煤炭科学技术. 2023, 51(10): 24–34 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1863>

#### 基于锚杆拉拔试验优化锚固承载特性研究

Experimental research on optimization of anchorage bearing characteristics based on bolt pull-out test

煤炭科学技术. 2022, 50(9): 10–19 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/dc34a879-896b-4aea-9b02-e972220d006d>

#### 矿用预应力钢棒力学性能试验研究

Laboratory study on mechanical properties of mine pre-stressed steel bars

煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e4ecf6fc-6d12-4a40-94ae-befdcc5f2bb3>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

## 采矿科学与工程



移动扫码阅读

侯俊领, 李垂宇, 赵能, 等. 高预紧力均布承载型锚杆力学响应及应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 92-101.

HOU Junling, LI Chuiyu, ZHAO Neng, *et al.* Key technology and application of pre-stressed anchor to improve pre-tightening force[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 92-101.

## 高预紧力均布承载型锚杆力学响应及应用

侯俊领<sup>1</sup>, 李垂宇<sup>2</sup>, 赵能<sup>2</sup>, 杜承航<sup>3</sup>, 张敦喜<sup>4</sup>, 李培<sup>4</sup>

(1. 攀枝花学院 钒钛学院, 四川 攀枝花 617000; 2. 安徽理工大学 土木工程学院, 安徽 淮南 232000; 3. 四川钛星工程科技有限责任公司, 四川 攀枝花 617000; 4. 淮南矿业(集团)有限责任公司, 安徽 淮南 232000)

**摘要:** 预紧力作为锚杆支护的关键参数之一, 对主动支护起着决定性作用, 国内外研究表明提高锚杆预紧力可降低冒顶事故的发生, 为有效提高锚杆预紧力、降低断锚、失锚的现象发生。研发了滚动式减摩垫片和拉压分离型螺母, 综合采用实验室试验、理论分析、数值计算, 研究了滚动式减摩垫片、拉压分离型螺母转矩-预紧力转化关系, 研究了普通螺母、拉压分离型螺母预紧过程中力学响应特征。研究表明: 普通锚杆预紧过程中, 约有 60% 转矩被锚杆螺母与托盘之间的摩擦所消耗, 使用滚动式减摩垫片可将摩擦消耗的转矩降低至 25%, 转矩-预紧力转化率提高 2 倍左右; 普通锚杆螺母内螺纹副应力沿着远离挤压面轴向呈指数衰减, 螺母内前 3 圈应力值较大, 该范围发生明显的应力集中, 为锚杆杆体断裂的危险面, 使用拉压分离型螺母后螺纹副应力呈均匀分布, 消除了应力集中现象, 螺纹变形协调; 集成滚动式减摩垫片、拉压分离型螺母等发明了高预紧力均布承载型锚杆, 可将预紧力提升至 2.5 倍, 杜绝锚杆易从螺纹段断裂的现象, 在淮南矿区朱集矿取得良好的应用效果。

**关键词:** 预紧力; 滚动式减摩垫片; 拉压分离型螺母; 高预紧力均布承载型锚杆

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2022)12-0092-10

## Key technology and application of pre-stressed anchor to improve pre-tightening force

HOU Junling<sup>1</sup>, LI Chuiyu<sup>2</sup>, ZHAO Neng<sup>2</sup>, DU Chenghang<sup>3</sup>, ZHANG Dunxi<sup>4</sup>, LI Pei<sup>4</sup>

(1. Vanadium and Titanium College, Panzhihua College, Panzhihua 617000, China; 2. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China; 3. Sichuan Tixing Engineering Technology Co., Ltd., Panzhihua 617000, China; 4. Huainan Mining (Group) Co., Ltd., Huainan 232000, China)

**Abstract:** As one of the key parameters of bolt support, pre-tightening force plays a decisive role in active support. Domestic and foreign research shows that increasing the pre-tightening force of bolt can reduce the occurrence of roof fall accidents, so as to effectively improve the pre-tightening force of bolt and reduce the occurrence of broken anchor and lost anchor. The rolling anti-friction washer and tension-compression separation nut were developed. The torque-preload conversion relationship of the rolling anti-friction washer and tension-compression separation nut was studied by laboratory experiment, theoretical analysis and numerical calculation. The mechanical response characteristics of the common nut and tension-compression separation nut during pre-tightening process were studied. The research shows that about 60% of the torque is consumed by the friction between the bolt nut and the tray during the pre-tightening process of the ordinary bolt. The torque consumed by the friction can be reduced to 25% by using the rolling anti-friction gasket, and the torque-pretightening force conversion rate is increased by about 2 times. The stress of the internal thread pair of the ordinary bolt nut decreases exponentially along the axial direction away from the extrusion surface. The stress value of the first three rings in the nut is larger, and the stress concentration occurs obviously in this range, which is the dangerous surface of the bolt body fracture. The stress of the thread pair is evenly distributed after using the tension-compression separation nut, which eliminates the stress concentration phenomenon and the thread deformation.

收稿日期: 2022-08-28

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1573

基金项目: 四川省科技计划重点研发资助项目(2020YFS0512); 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室开放基金资助项目(SKLMRDPC19KF03)

作者简介: 侯俊领(1979—), 男, 江苏徐州人, 博士, 教授, 硕士生导师。E-mail: 13956408171@139.com

tion is coordinated. The high pre-tightening force uniform bearing bolt was invented by integrating rolling friction reducing gasket, tension-compression separation nut, etc., which can increase the pre-tightening force to 2.5 times, eliminate the phenomenon that the bolt is easy to break from the thread section, and achieve good application effect in Zhuji Mine of Huainan Mining Area.

**Key words:** pretightening force; rolling anti-friction gasket; tension-compression separation nut; high pre-tightening uniform bearing anchor bolt

## 0 引言

预紧力作为锚杆支护的关键参数之一,对主动支护起着决定性作用,施加锚杆预紧力越高,锚固体的极限承载能力越强,越能充分发挥锚杆的支护作用,提高整体的支护刚度,高预紧力锚固支护技术对深井巷道具有及时控制、抗剪能力强等优势,可以极大地提高巷道的稳定性<sup>[1]</sup>。国内外研究表明提高锚杆预紧力可降低冒顶事故的发生<sup>[2]</sup>,美国、澳大利亚煤矿其巷道支护的锚杆预紧力一般不低于 100 kN,可以达到锚杆杆体屈服载荷的 50%~75%<sup>[3-4]</sup>,目前我国锚杆预紧力普遍较低,对于围岩变形剧烈,开采环境日趋严峻<sup>[5-6]</sup>的现状,预紧力难以满足锚杆支护技术规范的要求;我国锚杆高预紧力技术亟待提高。

为有效提高锚杆预紧力、降低锚杆断锚、失锚现象,吴拥政等<sup>[7]</sup>通过研究锚杆尾部螺纹和杆体的断裂进行了试验研究和机理分析,得出锚杆复杂受力状态是导致锚杆断裂、预紧力难以施加的主要原因,改善锚杆材质和加工工艺取得了一定的成果。康红普等<sup>[8-13]</sup>通过分析锚杆支护作用机制,提出高预应力、强力支理论,强调锚杆预应力及其扩散的决定性作用;将高预应力、强力锚杆支理论与技术成功应用于千米深井巷道、软岩巷道、强烈动压影响巷道、大断面矩形巷道、深部沿空掘巷与留巷、采空区留巷等复杂困难条件,围岩的强烈变形得到有效控制,取得良好的支护效果。王强等<sup>[14]</sup>发现仅通过加大转矩提高预紧力的方法当达到一定转矩的情况时即使再增大转矩预紧力也难以提升。吴拥政等<sup>[15]</sup>通过研究得出锚杆预紧力低是由于锚杆本身材质和强度制约了锚杆预紧力的提升,王宏伟等<sup>[16]</sup>、徐刚<sup>[17]</sup>提高预紧力方式主要采用高强度锚杆配合大转矩钻机、转矩倍增器共同使用,以增大转矩的方式提高锚杆预紧力,但这种方法并未提升转矩-预紧力转化率,过高转矩会对锚杆螺纹副造成破坏;薛刚等<sup>[18]</sup>采用润滑油润滑减少摩擦来提高预紧力,但此类方法对预紧力提升效果并不明显。

笔者以锚杆工作过程中力学响应特征为切入点,开展锚杆转矩-预紧力转化试验研究,研发滚动式减摩垫片;运用数值模拟得出传统锚杆螺纹副的应力

场和应变场分布规律,研发拉压分离型螺母,集成上述成果研发了高预紧力均布承载型锚杆,可有效提高锚杆预紧力,消除螺纹副的应力集中,实现螺纹副协调变形。研究成果在淮南矿区朱集矿 1171(1)轨道巷应用,取得较好的效果,对解决目前锚杆预紧力低,易断锚、失锚等问题具有一定研究意义。

## 1 锚杆力学响应特征分析

### 1.1 锚杆预紧力现场实测

通过对淮南等矿区锚杆预紧力进行现场实测,预紧力普遍在 20~36 kN,预紧力较低。依据 GB/T 35056—2018《煤矿巷道锚杆支护技术规范》<sup>[19]</sup>的要求,锚杆预紧力应其屈服强度 30%~60%,对于目前常用的 MG400、MG500 锚杆其预紧力至少达到 46、57 kN。

可见现有锚杆预紧力与锚杆支护技术规范要求差距较大,锚杆强度利用率低,难以发挥锚杆主动支护的作用<sup>[20]</sup>。

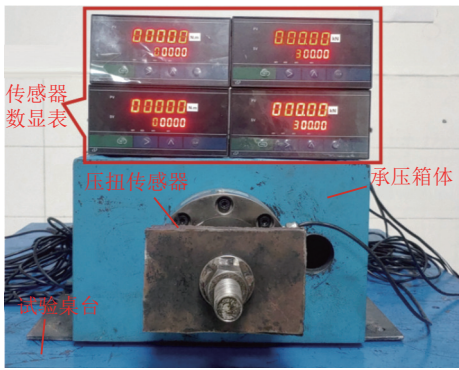
### 1.2 锚杆力学响应特征实验室实测

团队研发了锚杆转矩-预紧力试验工装,如图 1 所示,该工装由框架部分与检测部分构成,框架部分由试验桌台,承压箱体组成;检测部分由 2 个精度为 0.05% 压扭轮辐传感器构成(压力测量范围为 0~300 kN,转矩测量范围为 0~1 000 N·m),分别布置工装的前后两端面。在工装的前端面施加转矩,传感器数显表可显示锚杆的轴力、托盘支承面转矩及螺纹转矩的大小,得出锚杆托盘支撑面转矩和螺纹副转矩的占比以及转矩-预紧力转化关系。工装的前端面如图 1a 所示,工装的后端面如图 1b 所示。试验采用  $\phi 22$  mm、M24、长度为 800 mm 的 MG400 和 MG500 型试验锚杆段及配套螺母,如图 2 所示。

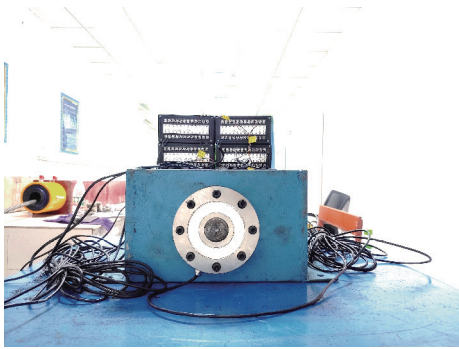
通过对普通锚杆转矩-预紧力转化的实验室试验并结合前人的研究成果,发现以下 3 个有关锚杆力学响应特征的科学问题。

1)如图 3 所示,在锚杆施加转矩预紧过程中,施加转矩=支承面转矩+螺纹副转矩,其中支承面转矩为摩擦损耗转矩,该转矩约占总转矩的 60%,螺纹段转矩占据总转矩的 40%,大部分总转矩被托盘支承面摩擦所消耗,是转矩-预紧力转化效率低的本质原因。





(a) 正面



(b) 反面

图1 锚杆扭矩-预紧力试验工装

Fig.1 Anchor torque-preload experimental tooling

2)在一定转矩范围内,转矩和预紧力呈正相关,但随着转矩的持续增大,预紧力增加缓慢,转矩-预紧力转化效率下降(表1)。

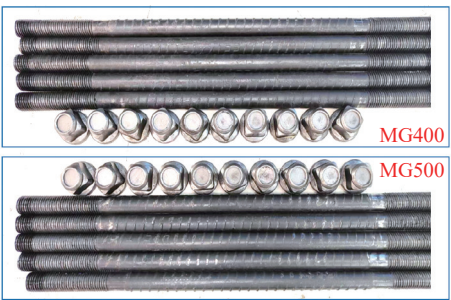


图2 试验锚杆段

Fig.2 Experimental anchor section

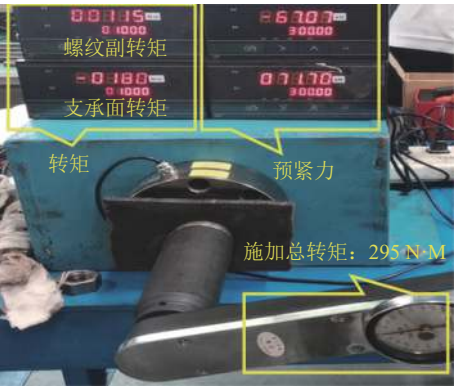


图3 输出扭矩分配试验

Fig.3 Output torque distribution experiment

3)现场工程实践发现,锚杆极易从锚头附近螺纹段断裂,应加强对锚头附近的力学响应规律研究。

表1 扭矩-预紧力转化试验

Table 1 Torque-preload conversion test

转矩/(N·m)	100	200	300	400	500	600	700
MG400锚杆试验段预紧力/kN	19.7	39.5	58.6	78.4	96.6	102.6	106.8
MG500锚杆试验段预紧力/kN	20.3	39.1	59.1	79.2	97.9	104.7	108.9

## 2 滚动式减摩垫片的研发

### 2.1 滚动式减摩垫片的技术原理

传统锚杆的螺母与托盘之间主要采用橡胶、尼龙减摩垫圈,其主要作用是降低螺母与托盘之间直接接触产生较大的摩擦力矩,但减摩垫圈与螺母和托盘之间仍然处于滑动摩擦的状态,减摩效果不理想,同时在大转矩下垫圈会发生剧烈变形,甚至影响预紧力的提高。

和传统锚杆螺母和托盘之间的滑动摩擦相比,滚动摩擦力远小于滑动摩擦力,其原理是由于物体在滚动时,接触面为几个点或若干条直线,物体所受的摩擦实则为静摩擦,相比于滑动摩擦,此时的摩擦阻力更小,滑动、滚动摩擦原理如图4所示。

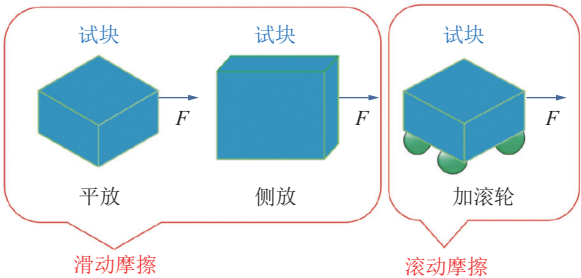


图4 滑动、滚动摩擦原理

Fig.4 Sliding and rolling friction principle diagram

参考表2数据易得相同材料滚动摩擦因数仅为滑动摩擦因数的1%~5%,减摩效果显著。通过上述理论分析,团队开展锚杆滚动式减摩垫片研发,将螺

母与托盘之间的滑动摩擦转化为滚动摩擦,并代替现有的滑动式减摩垫圈,图 5 为团队研发的滚动式减摩垫片 TX1。

表 2 常用材料的滚动、滑动摩擦的摩擦因数

Table 2 Friction coefficient of rolling and sliding friction of common materials

材料	滚动摩擦因数	滑动摩擦因数
淬火钢与淬火钢	0.001	0.10
铸铁与铸铁	0.005	0.15
软钢与铸铁	0.010	0.20

锚杆滚动式减摩垫片,主要由推力片、外壳包圈、止推片、滚动体构成;整个外壳包圈和推力片均通过特殊热处理工艺,内部圆柱滚子通过合理布置,其内部止推片采用经热处理的轴承钢,以此提高其的轴向承压能力。

通过 WDW-300E 万能试验机对滚动式减摩

垫片进行承压试验,力-变形曲线如图 6a 所示,减摩垫片试验前后对比如图 6b 所示,当压应力达到 305.64 kN 垫片并未发生较大变形,仍然能够发挥减摩的效果。



图 5 滚动式减摩垫片 TX1

Fig.5 Rolling anti-friction gasket TX1

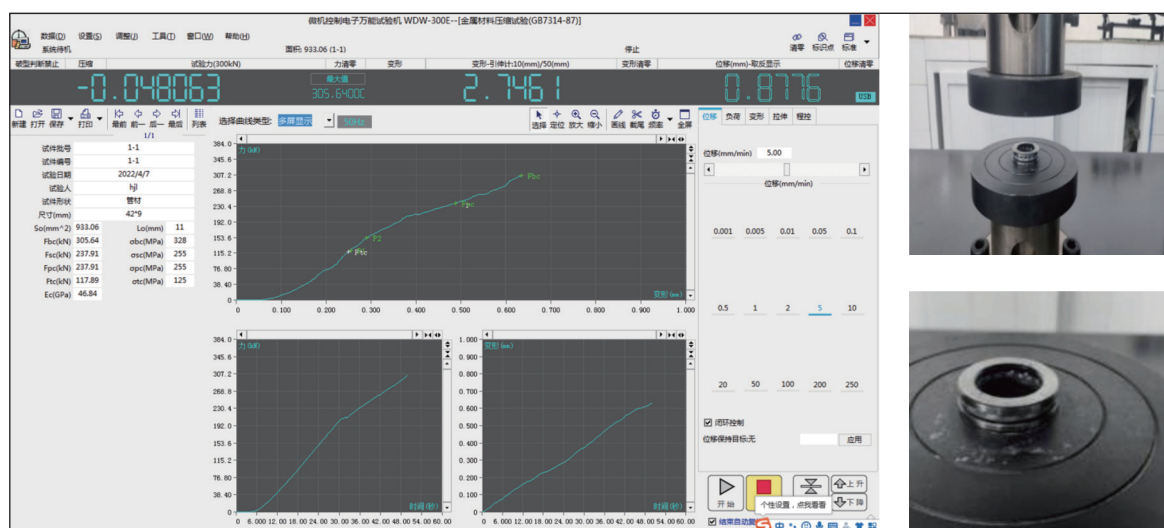


图 6 承压试验

Fig.6 Pressure bearing testing

## 2.2 滚动式减摩垫片效果实测

于 2021 年滚动式减摩擦垫片 TX2(为 TX1 的早期科研成果)曾在淮河源谢桥矿<sup>[21]</sup>运用,通过现场实测得出预紧力提高至两倍左右,减摩效果显著。TX1 经实验室实测预紧力转化效果如图 7 所示。

为比较滚动式垫片对预紧力转化效率提升能力,通过查询机械手册,得出转矩和预紧力转化计算公式为:

$$T = T_1 + T_2 = KF_0d \quad (1)$$

式中:  $T$  为锚杆总转矩,  $N \cdot m$ ;  $T_1$  为螺纹副摩擦力矩,  $N \cdot m$ ;  $T_2$  为螺母与托盘之间的摩擦力矩,  $N \cdot m$ ;  $K$  为转

矩系数;  $F_0$  为预紧力,  $kN$ ;  $d$  为螺纹公称直径,  $mm$ 。

对于矿井常用的 MG500、 $\phi 22$  mm、M24 mm 的锚杆,当总转矩约为  $300 N \cdot m$  时,普通螺母+滑动垫片预紧力约为  $60 kN$ ,普通螺母+滚动式减摩垫片预紧力约为  $110 kN$ ,由式(1)得普通螺母+滑动垫片转矩系数约为  $0.21$ ,普通螺母+滚动式垫片转矩系数约  $0.11$ 。即滚动式垫片转矩转化效率和滑动垫片相比提高两倍左右。

图 8 为普通螺母+滑动垫片、普通螺母+滚动式减摩垫片转矩分配。

1)由图 8a 可知,对于普通螺母+滑动垫片,支撑

面的消耗的转矩大于螺纹副的转矩,施加转矩小于425 N·m时转矩-预紧力曲线呈现线性正相关,当转矩大于425 N·m后,预紧力达到105.4 kN几乎不再增加,远未达到杆体的屈服荷载,可以看出增加的转矩被支撑面的摩擦消耗,因为转矩占比发生变化,托盘支撑面转矩损耗提高,导致转矩-预紧力的转化率下降。

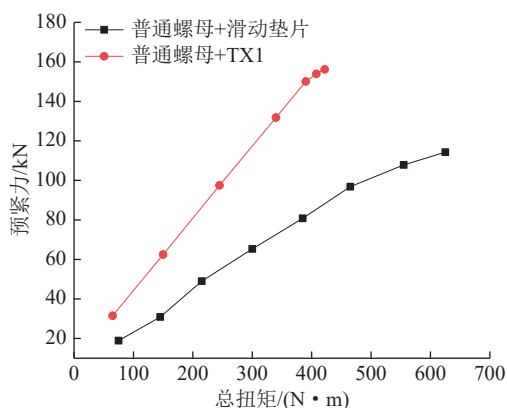
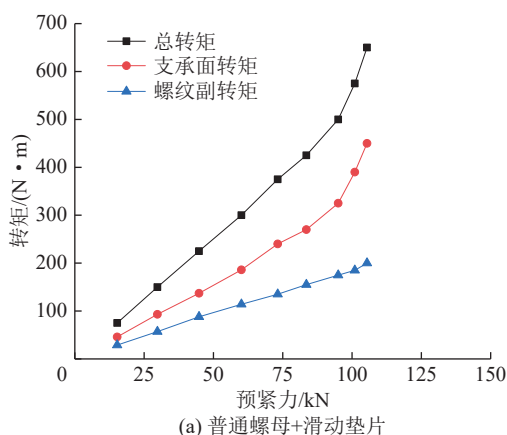
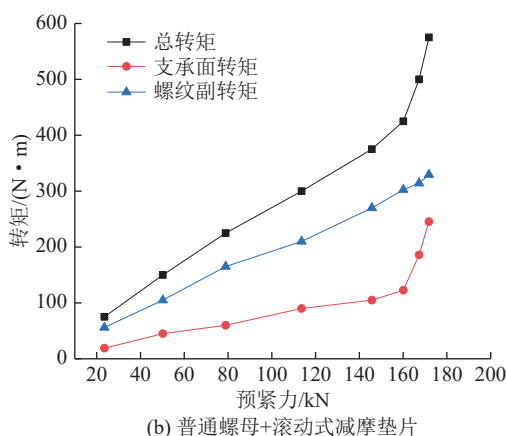


图7 TX1 预紧力转化效果

Fig.7 Effect of TX1 preload conversion



(a) 普通螺母+滑动垫片



(b) 普通螺母+滚动式减摩垫片

图8 转矩分配

Fig.8 Torque distribution

2)由图8b可知,对于普通螺母+滚动式减摩垫片,支撑面的消耗的转矩小于螺纹副的转矩,施加转

矩小于425 N·m时转矩-预紧力曲线同样呈现线性正相关,当转矩大于425 N·m,支撑面转矩占比大幅增加。此后随着转矩继续增大,预紧力达到170 kN几乎不再增加,虽然预紧力并未达到MG500锚杆杆体屈服强度,但差距并不大,此时影响转矩-预紧力的转化率下降的原因为托盘支撑面转矩损耗提高以及转矩、荷载较大造成螺纹副过早屈服,导致转矩-预紧力的转化率下降。

### 3 均布承载型锚杆螺母的研发

#### 3.1 普通螺母承载过程中的力学响应

当转矩、轴向荷载过大时,螺纹发生屈服锚杆预紧力难以提升;锚杆预紧的过程实际就是螺母的内螺纹不断挤进锚杆的外螺纹的过程<sup>[22]</sup>;这种情况导致锚杆螺纹段与螺母螺纹段变形状态不同。

为掌握锚杆工作过程中的力学响应特征,采用ANSYS软件建立有限元实体模型进行计算分析。模型由螺母、垫片和锚杆组成,锚杆的 $\phi 22$  mm,材质为MG500,螺母内螺纹圈数为10圈,螺纹外径为24 mm螺距为3 mm,弹性模量200 GPa,泊松比0.3,在锚杆自由端施加50 kN轴向荷载,垫片下方设置固定支撑边界条件,普通锚杆螺母力学模型划分了22 932个网格单元。

图9为普通锚杆应力分布图,锚杆轴向为坐标系X轴,云图中的 $n$ 为螺纹编号,旋入螺母中的螺纹从挤压面往上编号依次为1~10,未旋入螺母中的螺纹从挤压面向下编号依次为-1~10。图9中红色区域应力值为负,表示压应力区,其他区域为拉应力区,在挤压面以上螺母内前3圈( $n=1\sim 3$ )存在明显的应力集中,可知螺母中存在拉应力区和压应力区,锚杆杆体中存在拉应力区。

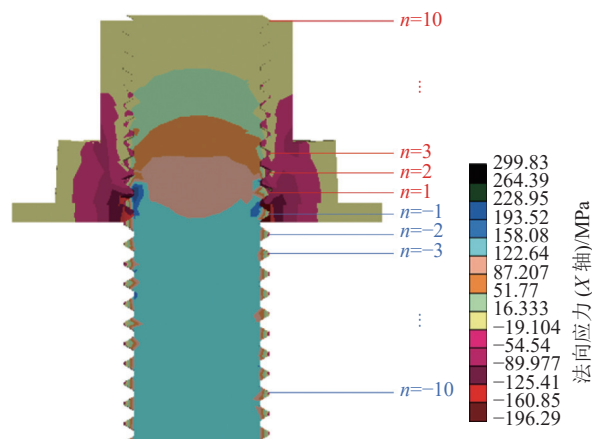


图9 普通螺母应力

Fig.9 Stress nephogram of common nut



图 10 为普通锚杆应变分布图,图中红色和紫色区域应变为负,表示压应变区,其他区域为拉应变区,在挤压面以上螺母内前 3 圈( $n=1\sim3$ )应变较大,可知锚杆杆体中只存在拉应变区,螺母中存在拉应变区和压应变区。

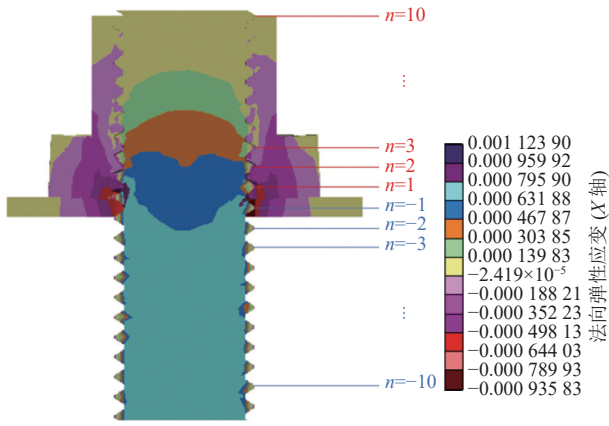


图 10 普通螺母应变

Fig.10 Strain nephogram of common nut

由上述分析可知,普通锚杆螺纹副在螺母内前 3 圈( $n=1\sim3$ )会发生应力集中,锚杆杆体易从该处断裂。螺母负应变区内螺纹牙距变小,锚杆杆体中为拉应变区,杆体螺纹牙距变大,产生了螺纹副牙距变形不协调的现象,会影响转矩和预紧力转换效率,导致锚杆预紧力施加到一定阶段无法提升。

图 11 为普通螺母沿轴向不同位置处螺纹应力分布图,可知螺母内的前 3 圈( $n=1\sim3$ )应力分别为 113.5、93.2、70.4 MPa,沿着远离挤压面轴向应力呈指数衰减趋势,第 10 圈螺纹应力仅为 4.7 MPa,承受荷载极小,螺母内的前 3 圈( $n=1\sim3$ )螺纹应力集中,主要承载由前 3 圈承担,螺纹的承载效能利用率低。

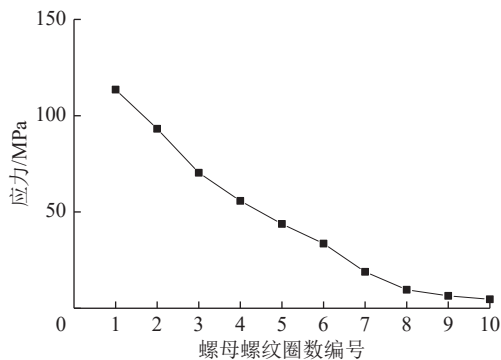


图 11 普通螺母沿轴向不同位置处螺纹应力分布

Fig.11 Thread stress distribution of ordinary nut at different axial positions

图 12 为普通螺母沿轴向不同位置处螺纹应变分布图,可知与应力分布趋势类似,螺母内的前 3 圈

( $n=1\sim3$ )应变较大,分别为 0.000 63、0.000 58、0.000 46,沿着远离挤压面轴向应变呈指数衰减趋势,第 10 圈的螺纹应变仅为 0.000 018,沿轴向螺纹变形不协调。

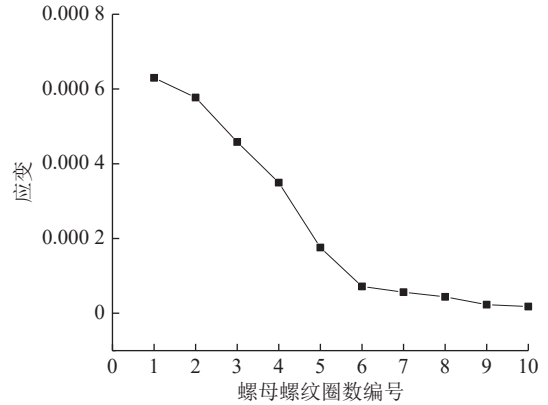


图 12 普通螺母沿轴向不同位置处螺纹应变分布

Fig.12 Thread strain distribution map of ordinary nuts at different positions along axial direction

### 3.2 拉压分离型锚杆螺母力学响应特征

通过对普通锚杆承载过程中的力学响应特征分析,针对普通锚杆螺母中应力集中、螺纹副变形不协调的现象,团队研发了拉压分离型螺母,图 13a 为拉压分离型螺母设计图,图 13b 拉压分离型螺母实物,图 13c 为装配图,螺母总长 60 mm,螺母六角对边为 46 mm,法兰面直径为 58 mm,距离内螺纹 6 mm 处的法兰面内部有刻有环槽,槽宽 3 mm 深 30 mm(槽内的环形螺母的直径与相应 M24 普通六角螺母内接圆直径相当,二者的强度相近),环槽尾部的法兰面均为通孔,法兰面的内径与环槽外径相同。

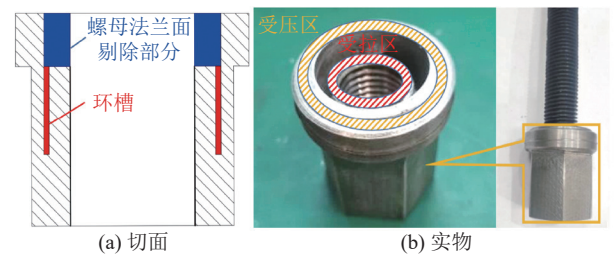


图 13 拉压分离型螺母

Fig.13 Tension pressure separation nut

在预紧过程中法兰面挤压支承面,前端的法兰面受压,由于槽的作用压应力无法传递到螺母的螺纹上,使得螺母支承面承受压力,螺纹段承受拉力,此时螺母螺纹段和锚杆螺纹段均承受拉力,整个螺母呈现拉压分离型的效果。

针对拉压分离型螺母,团队也进行数值模拟计算,其建模条件与普通螺母完全相同,因此不加以赘述,

拉压分离型螺母力学模型划分了 25 484 个网格单元。

图 14 为拉压分离型螺母应力分布图, 锚杆轴向为坐标系 Z 轴, 图中红色区域应力值为负, 表示压应力区, 分布在环槽的外部, 环槽内部螺纹副区域均为拉应力区, 没有应力集中现象, 螺母中拉应力区和压应力区被完全隔离。

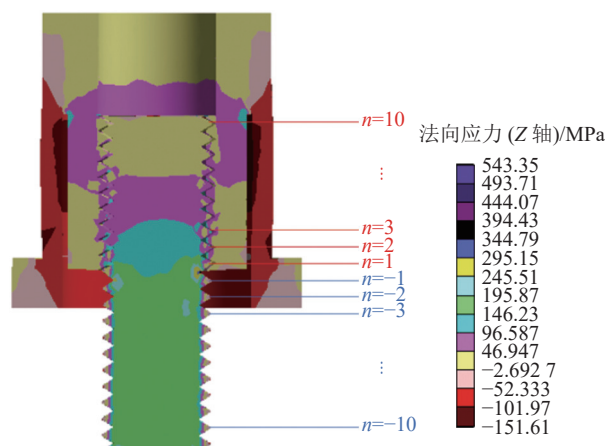


图 14 拉压分离型螺母应力

Fig.14 Stress nephogram of tension-pressure separation nut

图 15 为拉压分离型螺母应变分布, 图中红色区域应变为负, 表示压应变区, 分布在环槽的外部, 环槽内部螺纹副区域均为拉应变区, 没有应力集中现象, 螺母中拉应变区和压应变区被完全隔离。可知螺母与锚杆同时受拉, 其应变状态较为协调。

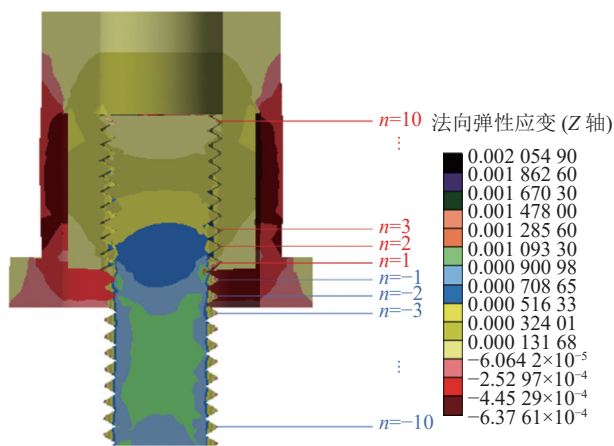


图 15 拉压分离型螺母应变

Fig.15 Strain nephogram of tension-pressure separation nut

由上述分析可知, 拉压分离型螺母以环槽为界, 将拉应力与压应力分离, 没有应力集中现象, 各螺纹应力分布均匀; 由于螺纹副所在区域为拉应力区, 杆体螺纹的变形和螺母螺纹变形协调。

图 16 为拉压分离型螺母沿轴向不同位置处螺纹应力分布图, 螺母螺纹应力在 62.3~73.1 MPa, 应力均匀分布。

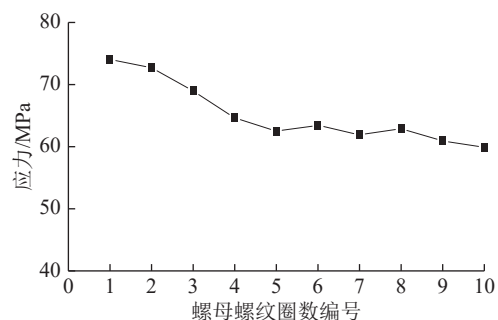


图 16 拉压分离型螺母沿轴向不同位置处螺纹应力分布

Fig.16 Thread stress distribution diagram of tension-compression separation nut at different positions along the axial direction

图 17 为拉压分离型螺母沿轴向不同位置处螺纹应变分布图, 可知与应力分布趋势类似, 螺母螺纹应变呈均匀分布, 应变大小在 0.000 3~0.000 4。

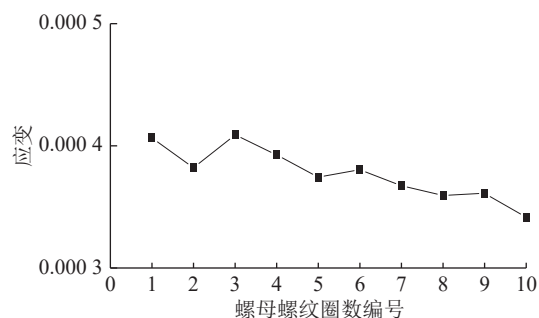


图 17 拉压分离型螺母沿轴向不同位置处螺纹应变分布

Fig.17 Thread strain distribution map of tension-compression separation nut at different positions along the axial direction

图 18 为普通螺母、拉压分离型螺母沿轴向不同位置螺纹应力分布对比图, 图 19 为普通螺母、拉压分离型螺母沿轴向不同位置螺纹应变分布对比图, 综合分析可知:

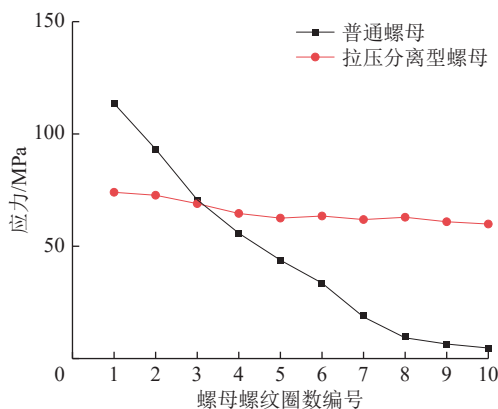


图 18 普通螺母、拉压分离型螺母沿轴向不同位置螺纹应力分布对比

Fig.18 Comparison of thread stress distribution along different axial positions of ordinary nut and tension-compression separation nut



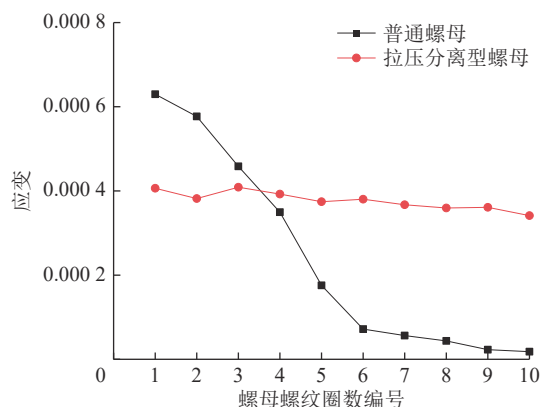


图 19 普通螺母、拉压分离型螺母沿轴向不同位置螺纹应变分布对比

Fig.19 Comparison of thread strain distribution along different axial positions of ordinary nut and tension-compression separation nut

1)普通螺母内的前3圈( $n=1\sim3$ )螺纹应力较大,有应力集中现象,第一圈应力最大,为113.5 MPa,沿着远离挤压面轴向应力呈指数衰减趋势,应变分布与应力分布趋势类似,变形不协调,可知前3圈为锚杆断裂危险面。

2)拉压分离型螺母螺纹应力在62.3~73.1 MPa左右,应力均匀分布,可知与普通螺母相比,应力最大值下降了35%,消除了应力集中,锚杆的安全性和可靠性大幅提高。螺母螺纹应变分布与应力分布趋势类似,呈均匀分布,杆体螺纹的变形和螺母螺纹变形协调。

#### 4 高预紧力均布承载型锚杆研发

图20为团队研发的高预紧力均布承载型锚杆示意图,其构件为滚动式减摩垫片、拉压分离型螺母,杆体和托盘,其安装工艺与普通锚杆完全一致。

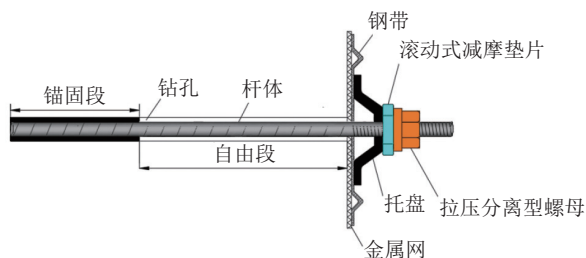


图 20 高预紧力均布承载型锚杆结构

Fig.20 High pre-tightening force uniform load-bearing bolt structure diagram

图21为不同锚杆转矩-预紧力转化试验结果,试验分成3种方案:方案1为普通锚杆,选用滑动式垫片;方案2为普通锚杆,选用滚动式减摩垫片;方案3选用高预紧力均布承载型锚杆。3种方案锚杆

杆体直径均为22 mm,材质MG500,杆体屈服荷载约为200 kN。测试3种方案转矩-预紧力转化效果。

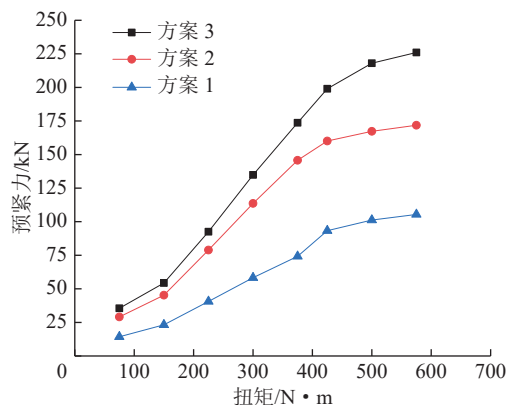


图 21 不同锚杆转矩-预紧力转化结果分析

Fig.21 Analysis of different anchor torque - preload transformation Results

分析图21得:

1)方案1在转矩小于425 N·m范围内,转矩和预紧力呈较好的正相关,随着转矩的增加,预紧力线性增加;转矩在大于425 N·m后,随着转矩的增加,预紧力达到105.4 kN后几乎不再增加,远未达到杆体的屈服荷载,预紧力不再增加的原因为托盘支承面转矩损耗较大,导致转矩-预紧力的转化率下降。

2)方案2在转矩小于425 N·m范围内,转矩和预紧力呈较好的正相关,随着转矩的增加,预紧力线性增加,预紧力的大小是方案1的2倍,表示方案2转矩和预紧力的转化效果优于方案1;转矩在大于425 N·m后,随着转矩的增加,预紧力达到170 kN后几乎不再增加,未达到杆体的屈服荷载,由普通螺母的力学响应特征研究可知,普通螺母前3圈螺纹处应力集中造成螺纹的损坏以及变形不协调,是导致转矩-预紧力的转化率下降的本质原因。

3)方案3在转矩0~450 N·m,转矩和预紧力呈较好的正相关,随着转矩的增加,预紧力线性增加,预紧力的大小是方案1的2.5倍。由于试验锚杆屈服强度约为200 kN,当转矩为450 N·m,预紧力近200 kN时,曲线出现拐点,表明已达到锚杆屈服强度,转矩-预紧力的转化率下降。方案3可有效杜绝锚杆过早屈服现象,与方案1、2相比方案3转矩-预紧力的转化效果最好。

#### 5 工业性试验

将高预紧力均布承载型锚杆,运用于淮南矿业集团朱集矿1171(1)运输巷支护。1171(1)运输巷埋深908.2 m,1171(1)工作面位于东二北盘区,西侧为

1161(1)工作面,南起东二盘区生根大巷,北至F33断层。该工作面轨道巷为沿空掘进(西侧与1161(1)运输巷留7.5 m煤柱),目前运输巷顶板巷正在施工。该工作面西侧1161(1)工作面目前正在回采。对应上覆13-1煤层无采掘活动。

1171(1)运输巷所属煤层为11-2煤,煤层厚度0~1.5 m,煤层倾角 $1^{\circ}\sim 5^{\circ}$ ,直接顶为泥岩均厚13.4 m,基本顶为细砂岩均厚12.2 m,直接底为泥岩均厚1.8 m,基本底为细砂岩均厚22.5 m。

原支护方案:巷道顶板每排采用MG400锚杆7根,锚杆间排距:800 mm $\times$ 800 mm,锚索间排距:1 000 mm $\times$ 1 600 mm、1 200 mm $\times$ 1 600 mm及走向间距1 600 mm,采用“4-5-4”布置;其中2根6.3 m锚索间距1 600 mm配合14号槽钢长2 m沿巷道顶板两侧交替走向布置。帮部每排采用MG335锚杆5根,锚杆间排距:750 mm $\times$ 800 mm。

为了对比得出高预紧力均布承载型锚杆与普通锚杆支护对围岩控制的能力,考察其支护的效果将巷道支护分为2段进行对比试验,在其他参数不变情况下,第1段采用巷道原有支护方案,第2段采用高预紧力均布承载型锚杆支护。

通过现场实测对锚杆施加相同转矩,普通锚杆的轴力较小,仅为40 kN左右,而高预紧力均布承载型锚杆的轴力为100 kN左右,为普通锚杆轴力的2.5倍左右,支护效果良好。

矿压监测表明:巷道两帮移近量为245 mm,底鼓量为126 mm;顶板浅部离层23 mm,深部离层7 mm;锚杆平均受力115 kN,锚索受力248 kN,巷道支护状态良好,在现场应用中可有效控制锚杆断锚、失锚现象发生。

通过现场实测,数据如图22所示,原支护方案在巷道开挖锚杆安装后前10 d巷道顶板下沉速度较快,当锚杆安装31 d后,顶板下沉速度缓和并趋于稳定;巷道采用高预紧力均布承载型锚杆可以有效控

制顶板围岩下沉变形,下沉量仅为原来的1/5,对围岩控制效果较好。

## 6 结 论

1)研发锚杆滚动式减摩垫片,将托盘(支承面)转矩损耗由原有的60%降低至25%,螺纹副的转矩显著增高,提高锚杆转矩-预紧力转化效率达2倍左右。

2)普通锚杆螺母内螺纹副应力沿着远离挤压面轴向呈指数衰减,螺母内前3圈应力值较大,该范围发生明显的应力集中,为锚杆杆体断裂的危险面。螺母在挤压面附近处于受压状态,导致螺母螺纹牙距有变小趋势,而锚杆杆体整体处于受拉状态,杆体螺纹牙距有变大趋势,产生了螺纹副牙距变形不协调的现象,影响了转矩-预紧力转化效率。

3)拉压分离型螺母以环槽为界,将拉应力与压应力分离,环槽以外区域应力值为负,表示压应力区,环槽内部螺纹副区域均为拉应力区,没有应力集中现象,应力最大值下降了35%左右,可提高锚杆的安全性和可靠性。由于螺纹副所在区域为拉应力区,杆体螺纹的变形和螺母螺纹变形协调。

4)发明了高预紧力均布承载型锚杆,构件为滚动式减摩垫片、拉压分离型螺母,杆体和托盘,可将预紧力提升至2.5倍,提高了转矩-预紧力转化效率,消除了螺母内螺纹应力集中,有效杜绝了锚杆易从螺纹段断裂的现象。研究成果在朱集矿1171(1)轨道巷应用,断锚现象得到有效控制,巷道变形量仅为原有支护方案的20%。

### 参考文献(References):

- [1] 赵晓举,杨战标,张波,等.深部破碎围岩高预紧力加长锚固支护技术研究[J].煤炭技术,2022,41(1):8-12.  
ZHAO Xiaojun, YANG Zhanbiao, ZHANG Bo, et al. Research on high pretension lengthened anchorage support technology for deep broken surrounding rock[J]. Coal Technology, 2022, 41(1): 8-12.
- [2] 王同旭,麻洪蕊,郑文海.预紧力锚杆支护防止巷道冒顶的机理与措施[J].煤矿安全,2009,40(S1):119-121.  
WANG Tongxu, MA Hongrui, ZHENG Wenhui. Mechanism and measures of pre-stressed bolt support to prevent roadway roof fall[J]. Safety in Coal Mines, 2009, 40(S1): 119-121.
- [3] 王子越,姜鹏飞,孟宪志,等.预紧力锚杆支护效果及机理数值对比研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2022,4(4):52-62.  
WANG Ziyue, JIANG Pengfei, MENG Xianzhi, et al. Numerical study of support effectiveness and mechanism of pre-stressed bolts[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(4): 52-62.
- [4] 康红普,姜铁明,高富强.预紧力在锚杆支护中的作用[J].煤炭

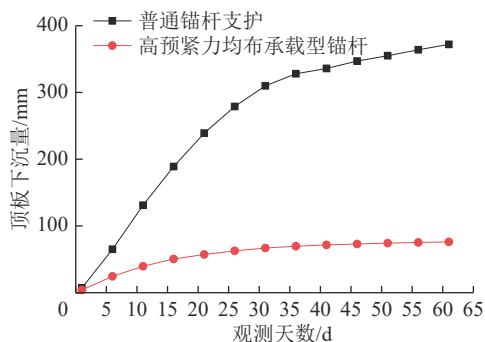


图22 巷道顶板下沉量变化曲线

Fig.22 Roadway roof displacement distribution

- 学报, 2007(7): 680–685.
- KANG Hongpu, JIANG Tieming, GAO Fuqiang. Effect of pre-tensioned stress to rock bolting[J]. Journal of China Coal Society, 2007(7): 680–685.
- [5] 康红普, 徐刚, 王彪谋, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展40 a及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(2): 7–39.
- KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, *et al.* Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(2): 7–39.
- [6] 袁亮. 我国煤矿安全发展战略研究[J]. 中国煤炭, 2021, 47(6): 1–6.
- YUAN Liang. Study on the development strategy of coal mine safety in China[J]. China Coal, 2021, 47(6): 1–6.
- [7] 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.
- [8] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 649–664.
- KANG Hongpu, WANG Jinhua, LIN Jian. Case studies of rock bolting in coal mine roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 649–664.
- [9] 康红普, 吴拥政, 何杰, 等. 深部冲击地压巷道锚杆支护作用研究与实践[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2225–2233.
- KANG Hongpu, WU Yongzheng, HE Jie, *et al.* Rock bolting performance and field practice in deep roadway with rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2225–2233.
- [10] 康红普, 林健, 吴拥政. 全断面高预紧力强力锚索支护技术及其在动压巷道中的应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1153–1159.
- KANG Hongpu, LIN Jian, WU Yongzheng. High pretensioned stress and intensive cable bolting technology set in full section and application in entry affected by dynamic pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1153–1159.
- [11] 范子儀, 李永亮, 孙昊, 等. 采动影响下弱胶结软岩巷道非对称变形特征与控制对策[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(2): 44–53.
- FAN Ziyi, LI Yongliang, SUN Hao, *et al.* Characteristics and control measures of unsymmetric deformation of roadways within weakly-cemented soft rock[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(2): 44–53.
- [12] 董合祥. 特厚煤层综放开采沿空掘巷窄煤柱围岩控制[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(3): 32–42.
- DONG Hexiang. Ground control of narrow coal pillar in gob side entry driving with fully mechanized top coal caving mining in extra-thick coal seam[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(3): 32–42.
- [13] 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 support with high pre-tension post-tensioning method[J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2020, 50(2): 631–640.
- [14] 王强, 吴拥政. 煤矿井下锚杆预紧力控制研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 29–32.
- WANG Qiang, WU Yongzheng. Study on bolt pre-tension control in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1): 29–32.
- [15] 吴拥政, 康红普, 丁吉, 等. 超高热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 practice of ultra-high strength heat treatment bolt[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 308–313.
- [16] 王宏伟, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 软弱破碎围岩高强高预紧力支护技术与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 474–480.
- WANG Hongwei, JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, *et al.* Application of support technology with high strength and high pretension stress for weak-broken rocks[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(4): 474–480.
- [17] 徐刚. 锚杆支护预紧力研究与应用[J]. 煤炭技术, 2020, 39(10): 22–23.
- XU Gang. Research and application of pre-tightening force of bolt support[J]. Coal Technology, 2020, 39(10): 22–23.
- [18] 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.
- [19] GB/T 35056—2018, 煤矿巷道锚杆支护技术规范[S].
- [20] 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.
- 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.
- [21] 张五一. 深井软岩高应力区锚杆(索)支护系统新型安全高效预紧技术[J]. 建井技术, 2022, 43(1): 10–14.
- ZHANG Wuyi. New safety high efficient pretension technology-bolt (anchor) support system applied in high stress zone of soft rock in deep underground mine[J]. Mine Construction Technology, 2022, 43(1): 10–14.
- [22] 张振祥. 螺纹前三扣受力及防松能力探讨[J]. 金属世界, 2014(1): 44–46.
- ZHANG Zhenxiang. Discussion on threaded force of the first three buckle and thread locking capability[J]. Metal World, 2014(1): 44–46.