

高应力隧道预应力梯度增阻让压锚杆(索) 支护性能试验研究

何廷全^{1,2}, 郭鸿雁³, 江星宏¹, 刘雪峰⁴, 张进鹏⁵, 贺敬平⁴

(1. 广西新发展交通集团有限公司, 广西 南宁 530029; 2. 西南交通大学 计算机与人工智能学院, 四川 成都 611756;

3. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067; 4. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018;

5. 山东科技大学 资源学院, 山东 泰安 271002)

摘要:随着地下工程建设深度增大,地应力逐渐增加,由深部不良地质区域围岩应力集中和能量快速积聚等原因引发的围岩大变形和工程失稳越来越多。普通让压锚杆(索)让压量有限,难以适应高应力大变形围岩的让压吸能要求,极易发生破断;而高位恒阻让压支护结构虽然能实现大变形让压,但其初始让压敏感性较低,变形响应迟缓。本研究提出锚杆(索)协同的预应力梯度增阻让压支护方法,利用多级让压启动载荷构件组合,实现“低位-中位-高位”梯度增阻的高效让压。通过理论分析、数值模拟和工程应用,对比不同让压构件的让压效果和应力变化趋势,研究梯度增阻让压构件的力学特性。结果表明,不同尺寸的单泡让压构件在启动载荷和终止载荷上存在显著差异。在正交试验中各影响因素对让压构件性能的敏感性排序为:厚度>内径>高度>外径与中鼓直径比。对比发现,梯度增阻让压构件比恒阻让压构件具有更显著的让压效果和更均匀的应力变化趋势,展现出多级动态响应特性,避免了应力集中和构件响应迟滞的问题。该方法在塘达屯隧道试验段的应用效果显著,改善了围岩支护效果。

关键词:梯度增阻让压;高应力围岩;预应力;让压启动载荷;动态力学性能

中图分类号:TD353;U451

文献标志码:A

Experimental investigation on support performance of prestressed gradient resistance-increasing yielding anchor bolts/cables in high-stress tunnels

HE Tingquan^{1,2}, GUO Hongyan³, JIANG Xinghong¹, LIU Xuefeng⁴, ZHANG Jinpeng⁵, HE Jingping⁴

(1. Guangxi New Development Transportation Group Co., Ltd., Nanning 530029, China;

2. College of Computer and Artificial Intelligence, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

3. China Merchants Chongqing Communications Research and Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China;

4. College of Water Resources and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

5. College of Resources, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271002, China)

Abstract: As the depth of underground engineering construction increases, the geostress increases gradually. Large deformation and instability of surrounding rock due to stress concentration and rapid energy accumulation in deep geological areas have become increasingly prevalent. With limited yielding capacity, conventional yielding anchor bolts/cables fail to meet the pressure-relief and energy-absorption requirements of high-stress large-deformation surrounding rock, leading to frequent fracture failures. Although high-position constant-resistance yielding support structures can accommodate large deformations, they have low initial yielding sensitivity and delayed deformation

收稿日期:2025-02-02

基金项目:广西科技计划项目(桂科 AB20238036);广东省科技计划项目(2021B1111610002)

作者简介:何廷全(1977—),男,广西岑溪人,正高级工程师,博士研究生,研究方向为岩土工程、公路建设与运营管理。

张进鹏(1992—),男,山东济宁人,副教授,博士,主要从事地下工程围岩控制和注浆材料研发方面的工作,本文通信作者。E-mail: zjpsdust@126.com

responses. To address these issues, this paper proposed a prestressed gradient resistance-increasing yielding anchor bolt/cable support method. By combining multi-level yielding startup load components, this method achieves efficient pressure relief through “low-medium-high” gradient resistance enhancement. Through theoretical analysis, numerical simulation, and engineering applications, the mechanical characteristics of gradient resistance-increasing yielding components were investigated by comparing the yielding effects and stress evolution trends of different yielding components. The results demonstrated significant differences in startup and termination load among single-bubble yielding components with varying dimensions. The orthogonal test revealed the following sensitivity ranking of influencing factors on component performance: thickness > inner diameter > height > outer-to-middle drum diameter ratio. Comparative analysis shows that gradient resistance-increasing yielding components outperform constant-resistance counterparts in yielding effect and stress distribution uniformity and exhibits the characteristic of multi-level dynamic response, effectively avoiding the stress concentration and response lag. The successful application of this method in the Tangdatun Tunnel test section significantly improved surrounding rock support efficacy.

Key words: gradient resistance-increasing yielding; high-stress surrounding rock; prestress; yielding startup load; dynamic mechanical property

在隧道、巷道等地下工程中,有效控制围岩变形是保证施工和使用安全的关键^[1-2]。近年来,随着地下工程建设深度增加,地应力显著增大,地质条件越来越复杂。在开挖过程中随着时间推移,围岩结构的整体强度逐渐弱化,力学参数逐渐下降,在局部应力集中条件下经常出现支护结构快速增阻现象,导致支护结构破断,甚至引发冒顶、坍塌等安全事故^[3-6]。

为满足高应力复杂地质条件围岩的控制要求,锚杆、锚索等主动支护结构应具有高强度、弹性阶段高延伸以及能够施加高预紧力等特性^[7-8]。现阶段的高强锚杆(索)虽然有较高的强度,但大延伸变形都在塑性阶段和颈缩变形阶段,弹性阶段变形量很小。随着围岩运动,地下工程中的锚杆(索)破断多为达到屈服强度之前的拉剪破断,即锚杆(索)尚且处于弹性变形阶段即被剪断。通过分析现场破断的锚杆(索)发现,锚杆(索)断口多为光滑斜面,未出现明显颈缩变细。所以,仅提高锚杆(索)的塑性延伸率意义不大。欲提高支护结构的让压吸能效果,需从让压构件角度进行研究^[9-10]。普通让压锚杆结构简单,通过让压构件释放初期围岩高应力,一定程度上提高了锚杆的抗变形能力,减少了动载对锚杆的冲击破断。但普通让压构件的让压量较小,只能实现围岩应力的一次释放,不能满足大变形要求。为提高锚杆(索)的变形性能,通过恒阻柔性让压支护结构对围岩变形进行有效控制较为常见^[11-12]。陶志刚等^[13-14]基于负泊松比材料及结构的特殊力学属性研发了恒阻大变形锚杆(索),实现了支护结构的恒阻吸能让压;孙钧等^[15]提出一种新型大尺度让压锚杆/预应力长让压锚索,通过挤压头与让压套筒内的凸棱相对滑动时产生的挤压力和动摩擦阻力来提供恒定的让压支护力;张志强等^[16]提出以高强让压锚杆与带肋锚索为核心的新型“高阻-让压”支护体系,通过让压构件与加强管受竖向力时发生横向膨胀来释放一部分不可控制的围岩变形,对围岩变形实现让阻;张传庆等^[12]提出新型恒阻让压支护系统-拉压转换恒阻让压装置,在中空顶板设置锥孔,使锚杆克服锥孔的阻力,为围岩提供恒定的支护;吴学震等^[17]提出新型缩管式恒阻大变形锚索,充分利用金属材料塑性挤压变形特性,压缩管塑性变形受约束环约束产生恒定阻力,实现让压。上述成果推动了地下工程大变形支护结构让压吸能效果的提升,为地下工程稳定性控制作出了杰出贡献,但是上述研究均为恒阻大变形理念,尚未涉及梯度增阻大变形结构。恒阻让压锚杆(索)可实现大变形让压,但让压载荷恒定。恒阻让压因其低位让压不能充分发挥锚杆(索)的高强约束支护作用,故均为高位让压。而高位恒阻让压初始敏感性较低,变形响应相对迟缓,在低应力高冲击载荷作用下可能无法启动让压而导致杆体破断。所以,基于恒阻大变形让压,研发能够同时实现高位和低位让压的锚杆(索)构件尤其必要。

本研究提出一种适用于高应力复杂地质条件围岩的梯度增阻让压锚杆(索)结构,能够同时实现锚杆(索)低位、中位和高位的梯度让压。在低位载荷能够启动一级让压,提高了传统高位让压的初始敏感性和响应灵活性;在中位载荷能够启动二级让压,增大了一级让压的可变形量;在高位载荷能够启动三级让压,进一步缓解杆体/索体的载荷,保护杆体/索体不破断。该结构通过让压构件参数的调整和组合设计,实现了分级

让压启动,在围岩变形期间为能量释放提供分级支护阻力,提高了支护系统的动态响应特性。通过理论分析、数值模拟和工程实践,验证梯度增阻让压结构的可行性。

1 预应力梯度增阻让压锚杆结构与加固机理

1.1 高强预应力让压锚杆结构

图1为普通高强预应力让压锚杆结构,让压构件保护杆体在围岩快速应力释放和受到冲击载荷时不破坏,实现支护结构与围岩之间的刚柔相济。

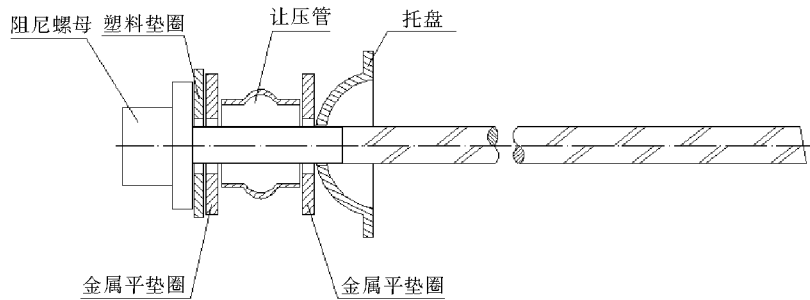
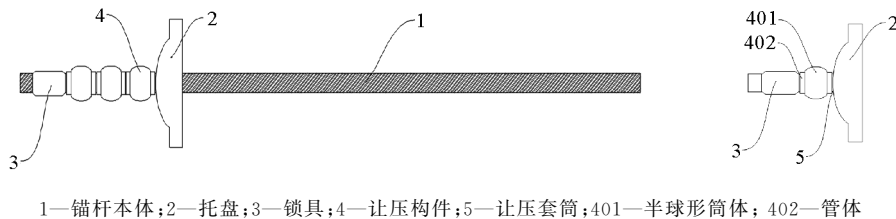


图1 高强预应力让压锚杆结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of high-strength prestressed yielding anchor bolt

1.2 梯度增阻让压支护结构

普通单泡和双泡让压构件存在让压量较小或初始敏感性较低等问题,无法满足大变形围岩的应力释放要求,常出现锚杆(索)破断或支护系统受力不均等现象^[18]。本研究提出一种大变形围岩梯度增阻式让压支护结构,如图2所示。其让压结构由多个让压构件构成,让压载荷呈均匀梯度增阻变化,为杆体屈服强度的40%~70%。通过梯度增阻让压构件实现大变形围岩的低位(低载荷)、中位(中载荷)和高位(高载荷)让压。



1—锚杆本体;2—托盘;3—锁具;4—让压构件;5—让压套筒;401—半球形筒体;402—管体

图2 梯度增阻让压支护结构

Fig. 2 Gradient resistance-increasing yielding bolt support structure

1.3 预应力梯度增阻让压锚杆(索)支护机理

图3为预应力让压锚杆梯度增阻让压构件的应力-应变曲线。OA为弹性变形阶段,在该阶段,锚杆结构发生弹性变形,弹性模量为 $\hat{E}$,A为让压构件的让压点,让压构件的让压应力为 σ_A 。AB为让压阶段,该阶段锚杆应力略微降低,应变较大,B为让压终止点。应变用 ϵ 表示,让压应变为 $\epsilon_B - \epsilon_A$,让压构件的弹性模量为 $\hat{E}'$ 。AB、CD、EF三个让压阶段的让压应变分别为 $\epsilon_A - \epsilon_B$ 、 $\epsilon_C - \epsilon_D$ 、 $\epsilon_E - \epsilon_F$ 。让压构件的弹性模量分别为 E' 。FG为弹性变形阶段,该阶段让压构件让压终止,锚杆结构继续发生弹

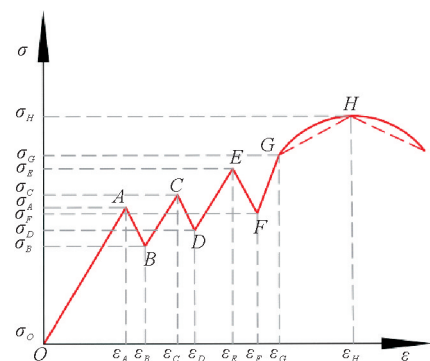


图3 预应力梯度增阻让压锚杆应力-应变关系

Fig. 3 Stress-strain relationship of prestressed gradient resistance-increasing yielding anchor bolt

性变形, G 为锚杆结构的屈服点, σ_G 为锚杆屈服应力, ϵ_G 为杆体屈服应变。 GH 为锚杆塑性强化阶段, H 为锚杆的峰值点, 锚杆的峰值强度和峰值应变分别为 σ_H 和 ϵ_H 。

为了简化表示, 将 GH 段用线性表示, GH 段弹性模量为 $\hat{E}_S$ 。 H 点以后为锚杆径缩破坏阶段(脆性破坏), 将此阶段用线性表示, 其弹性模量为 $\hat{E}'_S$ 。 预应力让压锚杆的本构关系分阶段表示如下, 其中 σ 代表让压锚杆的应力。

1) 梯度增阻让压锚杆低位让压阶段的应力-应变关系:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_0 + \hat{E} \cdot \epsilon, & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_A; \\ \sigma_A + (\epsilon - \epsilon_A) \cdot \hat{E}', & \epsilon_A < \epsilon \leq \epsilon_B; \\ \sigma_B + (\epsilon - \epsilon_B) \cdot \hat{E}, & \epsilon_B < \epsilon \leq \epsilon_C. \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_0 为原点, σ_A 和 ϵ_A 为梯度增阻让压锚杆启动低位让压时的应力和应变, σ_B 和 ϵ_B 为低位让压结束时的应力和应变, ϵ_C 为中位让压启动时的应变。

2) 梯度增阻让压锚杆中位让压阶段的应力-应变关系:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_C + (\epsilon - \epsilon_C) \cdot \hat{E}', & \epsilon_C < \epsilon \leq \epsilon_D; \\ \sigma_D + (\epsilon - \epsilon_D) \cdot \hat{E}, & \epsilon_D < \epsilon \leq \epsilon_E; \\ \sigma_E + (\epsilon - \epsilon_E) \cdot \hat{E}', & \epsilon_E < \epsilon \leq \epsilon_F. \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_C 为中位让压启动时的应力, σ_D 和 ϵ_D 为中位让压结束时的应力和应变, σ_E 和 ϵ_E 为高位让压启动时的应力和应变, ϵ_F 为高位让压结束时的应变。

3) 梯度增阻让压锚杆高位让压阶段的应力-应变关系:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_F + (\epsilon - \epsilon_F) \cdot \hat{E}, & \epsilon_F < \epsilon \leq \epsilon_G; \\ \sigma_G + (\epsilon - \epsilon_G) \cdot \hat{E}_S, & \epsilon_G < \epsilon \leq \epsilon_H; \\ \sigma_H + (\epsilon - \epsilon_H) \cdot \hat{E}'_S, & \epsilon_H < \epsilon. \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ_F 为高位让压启动时的应力, ϵ_F 为高位让压结束时的应变。

梯度增阻式让压构件关键在于协调锚杆(索)支护强度和围岩变形之间的关系, 确保围岩整体稳定。 预应力梯度增阻让压锚杆在保证高预应力主动加固的条件下, 使硐室围岩弹性变形能得到释放, 增强锚杆的抗变形能力, 减少动载荷对锚杆杆体的冲击, 避免锚杆早期过载破断; 另外, 梯度增阻让压支护系统可以协调多个支护单元受力, 避免出现单一支护结构应力集中, 实现锚杆、锚索的受力协同^[19]。 高敏感性让压结构对动载荷响应更及时, 能够平衡局部动载荷对锚杆和围岩的破坏。

合理的让压量是确保围岩应力有效释放的关键, 应对不同地应力和围岩环境进行针对性设计。 特别指出, 上述梯度增阻让压机制同时适用于锚杆与锚索^[11, 19-20]。 对于锚索结构, 通过将让压构件集成于索体锁具与托盘之间, 可保持相同分级让压特性。 二者的核心差异在于: 锚杆通过杆体塑性变形吸收能量, 而锚索依赖钢绞线滑移与让压构件协同耗能。 因此, 本研究数值模拟以锚杆为对象进行精细化分析, 工程应用则选择锚索验证现场可行性。

2 基于正交试验的构件参数对让压性能影响

2.1 单泡让压构件基本力学特征试验

2.1.1 试验方案

选取 3 种常见单泡让压构件, 测量不同让压构件的厚度、外径、中鼓外径、高度。 其中, 壁厚直接影响截面的惯性矩(I)和回转半径(r), 因此壁厚增加会显著提高稳定性; 内径与外径共同决定截面面积和惯性矩。 外径(D_o)固定时, 内径增大(壁厚减小)会降低惯性矩和抗弯刚度, 进而削弱稳定性; 高度(L)直接影响长细比($\lambda = L/r$)。 根据欧拉公式, 临界载荷与高度的平方成反比, 高度增加可能使失效模式从材料屈服(短柱)转变为弹性屈曲(长柱); 中鼓直径(D_m)通常指屈曲变形后的最大直径。 D_o 与 D_m 的比值反映几何非线性

效应和屈曲后行为:若 D_o/D_m 较小(即 D_m 较大),表明屈曲变形显著,可能导致失稳后承载力骤降。根据上述参数特性说明选取 3 种常见单泡让压构件,分别通过万能试验机进行让压构件压缩试验,采用位移加载方式,加载速率为 0.01 mm/s。测量结果如表 1 所示。

2.1.2 试验结果与分析

表 1 让压构件参数测量结果

Table 1 Measurement results of yielding component parameters mm				
编号	厚度	直管外径	中鼓外径	高度
a	4	32	40	39
b	5	34	41	41
c	6	35	42	40

由于让压构件的中鼓截面相对较大,在相同压力作用下,中鼓部位首先发生变形。图 4 中子图(a)、(b)、(c)分别对应让压构件编号 a、b、c,分析图 4 可知,让压构件均呈现出明显的三段式变化:弹性变形阶段、让压阶段、硬化阶段。在弹性变形阶段,让压构件位移随着载荷的增大而增加;当让压构件受力达到启动让压荷载时,受力随着位移增大出现下降趋势,直至让压构件充分变形,让压距离为让压启动至结束的位移;最后,充分变形的让压构件荷载继续增大,上下端发生变形,在变形初期,荷载-位移呈现出线性关系^[20]。

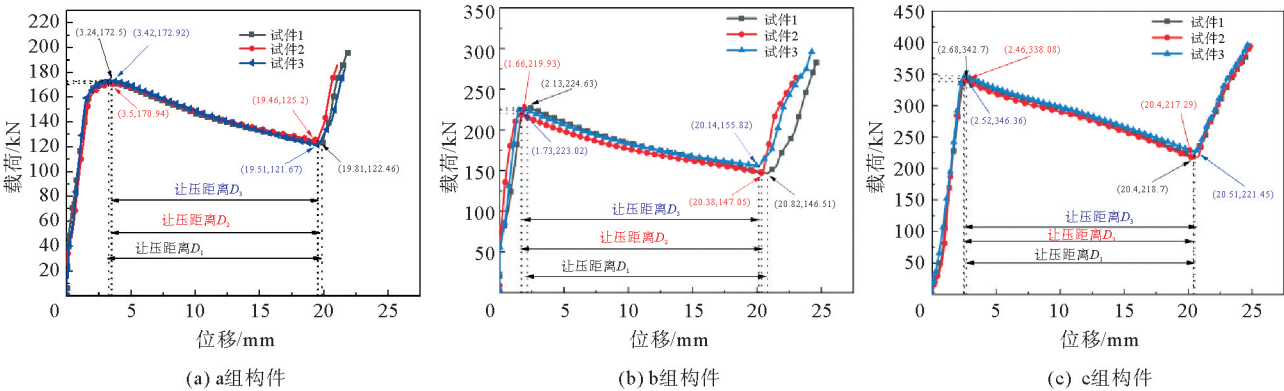


图 4 单泡让压构件荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curve of single-bubble yielding components

对比发现,三组让压构件在让压启动点附近存在明显差异,a 组曲线圆滑,b 组曲线较圆滑,c 组曲线出现明显的折角。在让压构件试验过程中,a 组启动让压时变形平稳,塑性变形量大,而 c 组启动让压时变形存在明显加速,塑性变形量小,即由 a~c 组,构件让压响应由“柔”逐渐到“刚”,响应敏感性逐渐降低。将各组试验数据分别求和,取平均处理,结果如图 5 所示。a、b、c 组平均让压启动荷载分别为 172.12、222.53 和 342.38 kN,让压结束荷载分别为 123.11、149.79 和 219.15 kN,平均让压距离分别为 16.21、18.61 和 17.88 mm。不同尺寸让压构件的让压启动荷载及让压终止荷载呈现明显的差异性,但让压距离未出现较大变化。让压构件厚度、直径、高度等参数均对其让压性能影响显著,但各参数的影响程度尚无法确定。

2.2 不同参数对让压构件力学性能影响

采用有限元软件模拟锚杆拉伸破断过程,通过建立与试验试件尺寸相同的让压构件模型,并设定相应的

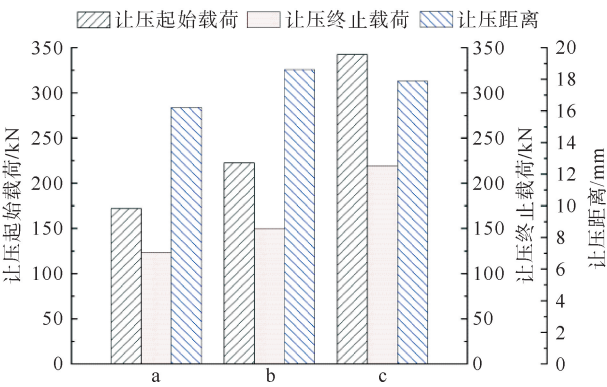


图 5 不同尺寸让压构件试验结果汇总表

Fig. 5 Summary of test results of different types of yielding components

材料属性,采用延性金属损伤模型进行计算模拟。在有限元软件中,首先创建材料模型,其次明确截面特性和材料参数,让压构件使用 Q235 型碳素钢,弹性模量为 208 GPa,泊松比 0.27,密度为 7 840 kg/m³。在模拟中,限制让压构件的横向变形。

2.2.1 试验方案

基于正交试验方法,探究让压构件参数对让压启动荷载、让压距离、让压终止荷载等目标参数的影响程度,以明确各因素对让压构件变形性能的影响敏感程度,为梯度增阻让压结构提供单泡让压构件合理参数。以让压稳定系数为评价指标,通过有限元数值模拟软件对让压构件参数进行敏感性分析,让压构件数值模型如图 6 所示。

选取让压构件高度、厚度、内径、外径-中鼓直径比共 4 个因素为研究目标,每个因素取 4 个水平,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别代表让压构件的内径、外径-中鼓直径比、厚度、高度。设计 4 因素 4 水平的正交试验表 L16(4⁴),如表 2 所示。

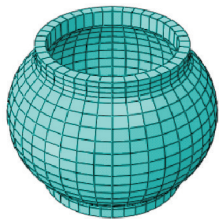


图 6 让压构件数值模型
Fig. 6 Numerical model of yielding component

表 2 正交试验设计与模拟结果

Table 2 Design and simulation results of the orthogonal test

编号	X_1 /mm	X_2	X_3 /mm	X_4 /mm	让压起始荷载 R_B /kN	让压终点荷载 R_E /kN	最大让压距离 D /mm	让压稳定 系数 ϕ
1	24	1 : 1.5	2	30	28.53	16.25	19.18	0.64
2	24	1 : 1.6	3	40	67.91	39.61	26.54	1.07
3	24	1 : 1.7	4	50	116.75	65.30	30.85	1.67
4	24	1 : 1.8	5	60	161.32	94.70	38.83	1.72
5	28	1 : 1.5	3	50	94.46	55.83	31.48	1.23
6	28	1 : 1.6	2	60	46.87	30.44	29.87	0.55
7	28	1 : 1.7	5	30	—	—	—	—
8	28	1 : 1.8	4	40	53.01	44.18	21.25	0.42
9	32	1 : 1.5	4	60	156.74	110.43	40.00	1.16
10	32	1 : 1.6	5	50	153.92	92.39	30.20	2.04
11	32	1 : 1.7	2	40	20.43	14.72	26.85	0.21
12	32	1 : 1.8	3	30	47.25	33.65	19.29	0.71
13	36	1 : 1.5	5	40	132.91	104.96	23.56	1.19
14	36	1 : 1.6	4	30	—	—	—	—
15	36	1 : 1.7	3	60	55.12	36.52	41.89	0.44
16	36	1 : 1.8	2	50	23.37	14.93	37.56	0.22

2.2.2 让压构件性能评价参数

让压构件在支护系统工作过程中能够吸收围岩释放的部分变形能,所以杆体受力在让压构件启动后出现下降趋势。但杆体受力下降过大会导致对围岩的轴向约束力降低过大,支护效果变差,影响围岩整体稳定。因此,提出采用让压稳定系数来评定让压构件的稳定性能,计算式如下:

$$\phi = \frac{R_B - R_E}{D} \quad (4)$$

式中: R_B 为让压启动荷载, kN; R_E 为让压终止荷载, kN。

由式(4)可知, 让压稳定系数表征让压构件在让压过程中轴力与变形量之间的比例关系, 该系数越小代表外力变化越平滑, 让压性能发挥的越充分。

2.2.3 结果与分析

图 7 所示为让压构件正交试验模拟结果曲线。模拟试验中, 除了编号 1 与编号 14 中的让压构件由于高度过低或厚度过大, 在达到让压点后继续压缩, 未出现载荷下降趋势, 不符合让压构件的典型应力-应变特征外, 其余模拟结果均与单泡让压构件室内试验结果一致, 均表现出明显的三段式变化。因此, 这两组未纳入后续数据分析。表 3 为正交试验各因素的极差值, 用 R 表示。通过比较极差值判断各因素对让压构件稳定性能的影响。图 8 为各因素不同水平的让压稳定系数变化曲线。

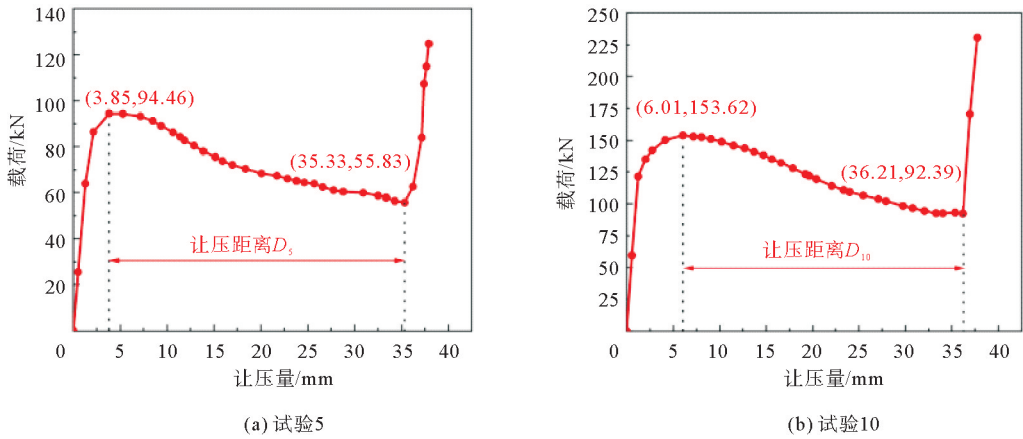


图 7 让压构件正交试验模拟结果代表性曲线

Fig. 7 Representative curves of simulation results of the orthogonal test of yielding components

由表 3 可知, 让压稳定性能敏感性为: X_3 (壁厚) $> X_1$ (内径) $> X_4$ (高度) $> X_2$ (比例), 表明壁厚为最主要因素, 其次为内径和高度, 而外径-中鼓直径比影响相对较小。随着内径增大, 让压稳定系数呈现先下降、后上升再下降的趋势。随着壁厚增大, 让压稳定系数逐渐增大; 壁厚过小会降低让压点荷载, 进而导致变形过快; 壁厚过大则使让压启动荷载增大, 控制难度加大。随着高度增大, 让压稳定系数呈现先增大后减小的趋势, 超过 50 mm 后, 稳定系数下降, 让压效果增强。因此, 合理设计应首先考虑壁厚, 其次为内径和高度, 以实现稳定、高效的让压性能。

表 3 四因素四水平正交试验结果

Table 3 Results of the four-factor and four-level orthogonal test

因素	内径	比例	壁厚	高度
极差 R	0.67	0.45	1.24	0.61

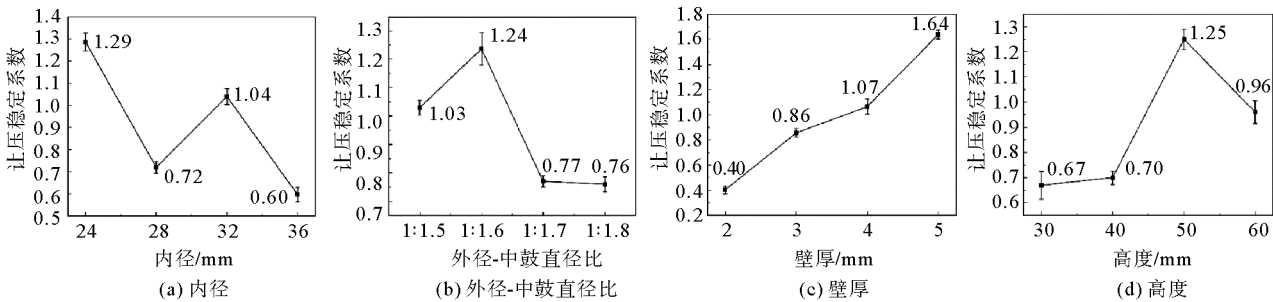


图 8 各因素不同水平的让压稳定系数变化曲线

Fig. 8 Variation curves of influencing factors at different levels on the yielding stability coefficient

3 梯度增阻与恒阻让压锚杆力学性能对比

3.1 试验方案

基于上述单泡让压构件的正交试验,选出合适的单泡让压构件参数,组合装配形成让压性能较好的恒阻让压锚杆和梯度增阻让压锚杆。为探究梯度增阻让压构件与恒阻让压构件力学性能的差异,选择三维可变形实体模块分别对锚杆杆体、让压构件、托盘和阻尼螺母等部件进行建模,锚杆杆体和托盘分别使用 Q500、Q345 型钢材,让压构件和阻尼螺母使用 Q235 型碳素钢,组装后建立三级组合让压锚杆模型,如图 9 所示。具体模拟方案见表 4。

3.2 结果与分析

图 10 为多级让压构件应力云图(图中应力单位为 Pa),图 11 为多级让压锚杆载荷-位移曲线。如图 11 所示,两种多级让压锚杆的载荷-位移曲线均呈明显的波动性变化,让压结束后,锚杆杆体持续受力直至锚杆破断。而恒阻让压锚杆的让压构件峰值基本恒定,梯度增阻让压锚杆的让压构件载荷峰值存在明显差异,

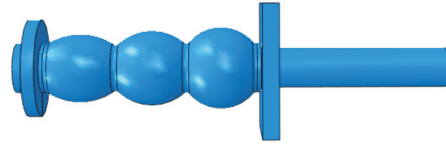


图 9 梯度增阻让压锚杆模型图

Fig. 9 Model diagram of gradient resistance-increasing yielding anchor bolt

表 4 试验方案

Table 4 Experimental scheme t

方案	低位让压荷载	中位让压荷载	高位让压荷载
恒阻组让压	14	14	14
梯度增阻让压	12	14	16

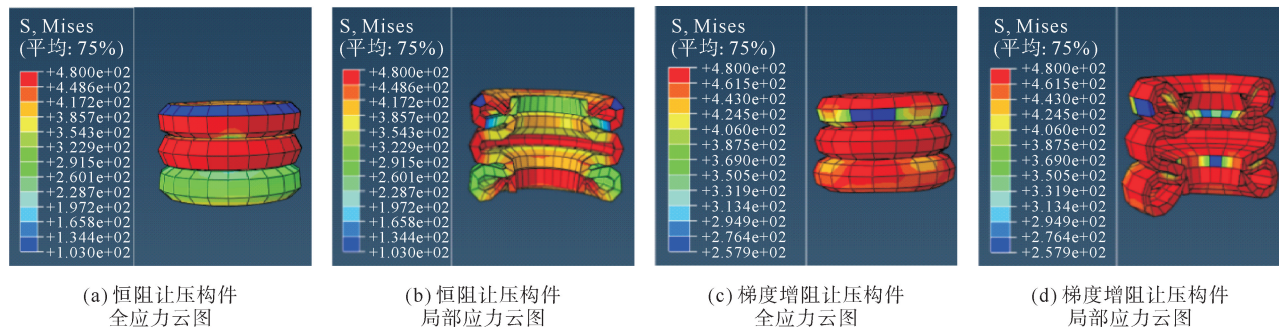


图 10 多级让压构件应力云图

Fig. 10 Stress cloud map of multi-level yielding components

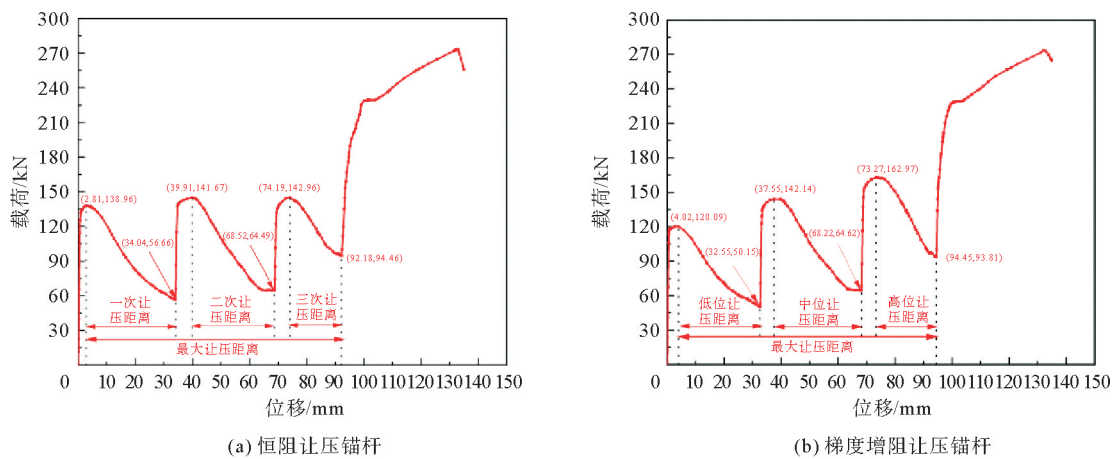


图 11 多级让压锚杆载荷-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of multi-level yielding anchor bolts

存在多个极大值和极小值。与普通让压锚杆相比,恒阻让压锚杆的让压距离虽有明显提升,但起始荷载较大、初始敏感性较低,无法实现低应力环境下高敏启动,且不能在高应力环境下提供更高的支护强度。而梯度增阻让压锚杆不仅提升了让压距离,且优化了让压起始荷载,实现了“低位-中位-高位”分级让压功能,显著提高了低应力和高应力环境下的响应性能与约束反力,对杆体保护效果得到明显改善。

4 工程实践与应用

4.1 锚杆(索)支护设计

塘达屯隧道位于河池市大化瑶族自治县塘达屯西侧,隧道区地层主要为第四系覆盖层及中三叠统百逢组。隧道开挖后锚杆(索)增阻迅速,经常发生锚杆(索)破断,围岩出现大变形。根据上述梯度增阻让压支护结构研究结果,预期梯度增阻让压构件能够保护支护结构不破断,对围岩提供稳定的支护约束反力。因此,为验证梯度增阻让压技术在不同支护结构中的普适性,选择与锚杆具有相同让压机制的锚索作为试验对象。基于隧道现场锚索支护需求,选取塘达屯隧道新开挖段开展梯度增阻让压锚索现场试验。设计梯度增阻让压载荷为 200、260 和 320 kN。

4.2 现场监测方案

1) 围岩变形监测

在试验段内进行锚索应力监测与围岩变形监测,围岩变形采用全站仪进行监测,实时了解围岩的收敛变形,各测点布置情况如图 12 所示。

2) 锚索应力监测

采用锚索测力计对梯度增阻让压锚索进行受力监测,测点布置情况如图 13 所示。

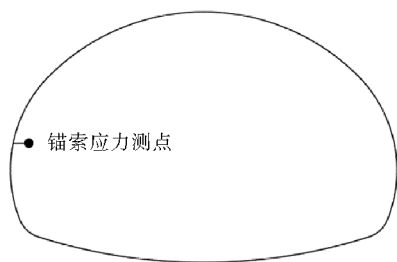


图 12 围岩变形监测横断面测点布置

Fig. 12 Cross-section measuring point layout of surrounding rock deformation monitoring

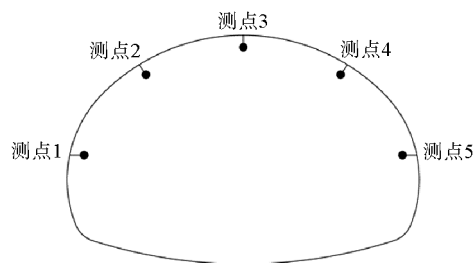


图 13 锚索应力监测横断面测点布置

Fig. 13 Cross-section measuring point arrangement of anchor cable stress monitoring

4.3 试验效果分析

图 14 为梯度增阻让压支护结构现场应用情况,图 15 为典型锚索受力监测结果。图 16 为选取的两个监测断面(ZK32+430 断面和 YK32+320 断面)中测点 1~5 的监测数据。

由图 15 可知,5# 和 7# 典型锚索在短时间内均发生明显增阻,锚索在第 2 天和第 5 天的受力均超过 200 kN,随即发生了一级让压,让压后锚索受力明显降低,有效释放了围岩的应力,避免了索体因快速增阻而破断。由于监测时间较短,仅为 12 天,后续随着隧道施工的推进,围岩应力逐渐释放,锚索将有序启动中位和高位让压。

由图 16 可知,YK32+320 断面中除测点 1 外,另



图 14 梯度增阻让压支护结构现场应用

Fig. 14 Field application of gradient resistance-increasing yielding support structures

外4个测点的围岩最终变形量均大于ZK32+430断面;ZK32+430断面中各测点的变形量均位于5~9 mm。在所有监测点中,围岩最大变形位置为YK32+320断面的测点2,位于隧道左肩窝,最大值仅为12 mm。因此,塘达屯隧道本次试验段通过梯度增阻让压支护方式后,隧道围岩未发生明显变形,保证了隧道围岩稳定。

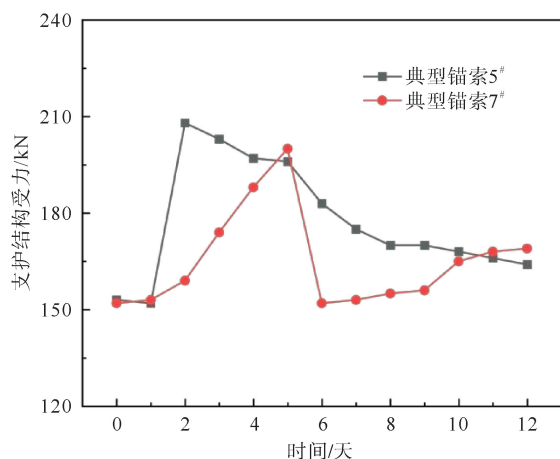


图 15 典型锚索受力监测结果

Fig. 15 Monitoring results of typical anchor cable forces

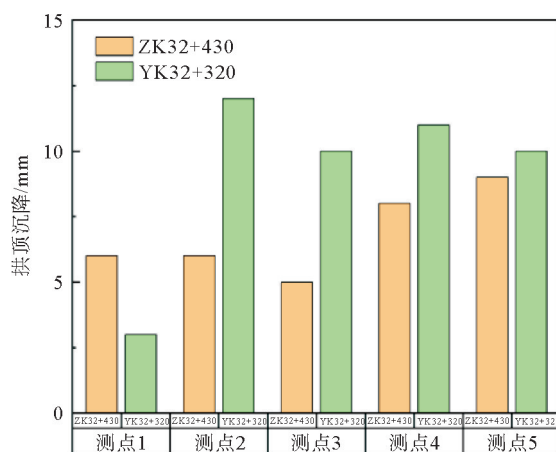


图 16 隧道围岩拱顶最终变形量监测结果

Fig. 16 Monitoring results of deformation of tunnel surrounding rock arch crown

5 讨论与结论

5.1 讨论

本研究仅分析了梯度增阻让压锚杆的力学性能,阐明了其相较恒阻让压的优势,尚未深入定量分析梯度增阻让压锚杆与工程围岩的适配方法,梯度增阻让压与围岩应力释放机理也需探究,下一步将定量研究锚杆力学参数与梯度让压载荷的匹配性以及围岩变形梯度增阻让压的基本原理。另外,梯度增阻让压锚杆力学特征模拟采用的是简化结构模型,尚未严格按照高应力硐室环境仿真模拟围岩与新型让压锚杆之间的相互作用,后续将进一步建立更相近的仿真模拟试验模型,以动态分析锚杆与围岩的受力演化关系及梯度增阻让压功能的实现过程。

提出的梯度增阻让压锚杆(索)支护结构与已有研究存在显著区别与继承关系。恒阻让压技术通过恒定阻力实现围岩大变形控制,但其初始敏感性低、应力响应迟滞,而本研究通过多级梯度增阻设计(低-中-高位让压)提高了敏感性与支护强度,解决了恒阻结构在高/低应力环境下适应性不足的问题。梯度增阻让压结构的核心优势在于其动态调控作用,通过低位、中位、高位让压构件的依次启动,系统可根据围岩应力释放速率动态调整支护阻力。这种时变特性解决了恒阻结构“一刀切”的响应模式,实现了支护强度与围岩变形的动态匹配。对比张传庆等^[12]的恒阻让压装置,本研究梯度增阻结构避免了应力集中,载荷-位移曲线波动更均匀,验证了分级让压的力学优势。此外,正交试验揭示的“壁厚>内径>高度>外径-中鼓直径比”参数敏感性,与吴学震等^[17]对缩管式锚索力学特性的研究形成互补,强调了几何参数对让压性能的差异化影响。在工程应用方面,通过塘达屯隧道实测数据验证了梯度增阻让压的现场有效性,与孙钧等^[15]提出的让压支护理念一致,但进一步结合动态响应与分级释放机制,提升了围岩变形控制的协同性。综上,本研究在恒阻让压技术基础上实现了分级让压的突破,兼具理论创新与工程实用性。

锚杆支护可应用于多种工程环境,本研究仅将梯度增阻让压锚杆在塘达屯隧道为代表的高应力隧道工程进行了现场试验,对深部矿山巷道、软岩硐室等工程效果尚未进行应用和监测,因此该新型让压锚杆能否承担多种工程环境下的支护作用、其支护效果又有何区别,后续将开展对此类问题的试验研究。

5.2 结论

1) 提出了大变形围岩梯度增阻式让压支护结构,该结构由让压载荷呈梯度增阻变化的多个让压构件组成。该结构实现了大变形围岩的低位(低载荷)、中位(中载荷)和高位(高载荷)让压,既能提供高敏启动又能实现高地应力环境下的高位让压卸载,有利于高应力大变形围岩的控制。梯度增阻让压结构通过多级让压构件的动态分级启动,实现了对围岩变形的渐进式响应,显著提高了支护系统在高低应力交替环境下的适应性。

2) 提出采用让压稳定系数来评定让压构件的稳定性能,让压构件主要参数的让压稳定性能敏感排序为:壁厚>内径>高度>外径-中鼓直径比,表明壁厚为最主要因素,其次为内径和高度,而外径-中鼓直径比影响相对较小。

3) 恒组让压锚杆的让压构件载荷峰值基本恒定,梯度增阻让压锚杆的让压构件载荷峰值存在明显差异,存在多个极大值和极小值。恒阻让压锚杆起始荷载较大、初始敏感性较低,无法实现低应力环境下高敏启动和在高应力环境下提供更高的支护强度;梯度增阻让压锚杆不仅提升了让压距离,且优化了让压起始荷载,实现了“低位-中位-高位”分级让压功能。

4) 梯度增阻让压技术具有支护结构普适性,通过调整让压构件参数可适配锚杆与锚索的力学特性差异。在塘达屯隧道现场监测中,锚索通过梯度增阻让压结构低位让压的快速响应,避免了索体因快速增阻而破断。在所有监测点中,围岩最大变形量为 12 mm,位于 YK32+320 断面左肩窝测点 2。通过梯度增阻让压支护结构保证了试验隧道围岩稳定,避免了支护结构破断。

参考文献:

- [1] ZHANG J P, LIU L M, LI Y. Mechanism and experiment of self-stress grouting reinforcement for fractured rock mass of underground engineering[J/OL]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 131. DOI: 10. 1016/j. tust. 2022. 104826.
- [2] YOKOTA Y, ZHAO Z Y, NIE W, et al. Development of a new deformation-controlled rock bolt: Numerical modelling and laboratory verification[J/OL]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 98. DOI: 10. 1016/j. tust. 2020. 103305.
- [3] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [4] 李冲, 台连海. 基于能量释放特征的强动压巷道高强柔性支护机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(5): 930-939.
LI Chong, TAI Lianhai. Research on high intensity flexible support mechanism of roadway with strong dynamic pressure based on energy release characteristics[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(5): 930-939.
- [5] 刘杰, 陈志峰, 高红星, 等. 滕县煤田下组煤地应力特征与灰岩夹层顶板稳定性控制研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2024, 43(6): 10-23.
LIU Jie, CHEN Zhifeng, GAO Hongxing, et al. Research on ground stress characteristics of lower formation coal in Teng-xian coalfield and stability control of limestone interlayer roof[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2024, 43(6): 10-23.
- [6] 宋代福, 马志涛, 崔永强, 等. 高应力巷帮阶梯型卸压孔合理参数研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 56-64.
SONG Daifu, MA Zhitao, CUI Yongqiang, et al. Research on reasonable parameters of stepped pressure relief holes in high stress roadway[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(4): 56-64.
- [7] 付玉凯, 吴拥政, 周鹏赫, 等. 高延伸率锚索动态力学特性及工程应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 49-62.
FU Yukai, WU Yongzheng, ZHOU Penghe, et al. Dynamic mechanical characteristics and engineering application of high elongation anchor cable[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 49-62.
- [8] 王鼎, 何满潮, 周辉, 等. 高强高韧锚杆钢能量吸收特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增 1): 3204-3216.
WANG Ding, HE Manchao, ZHOU Hui, et al. Study on energy absorption characteristics of high-strength and high-tough-

- ness steels used for rock bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(S1): 3204-3216.
- [9] 赵明珠, 吴学震, 叶青, 等. 缩管式恒阻大变形锚杆抗冲击特性及其治理岩爆潜力研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(11): 3355-3365.
- ZHAO Mingzhu, WU Xuezheng, YE Qing, et al. Impact resistance characteristics of steel pipe shrinkable energy-absorbing bolt and its potential for rockburst mitigation and control[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(11): 3355-3365.
- [10] 殷齐浩, 王洪闪, 李廷春, 等. 全长黏结大变形让压锚杆波纹套筒阻力计算及试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(1): 27-32.
- YIN Qihao, WANG Hongshan, LI Tingchun, et al. Calculation and experimental study on the resistance of corrugated sleeve of full-length bonded and large deformation yielding bolt[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2021, 40(1): 27-32.
- [11] 王琦, 何满潮, 许硕, 等. 恒阻吸能锚杆力学特性与工程应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1490-1500.
- WANG Qi, HE Manchao, XU Shuo, et al. Mechanical properties and engineering application of constant resistance energy absorbing bolt[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1490-1500.
- [12] 张传庆, 吕浩安, 刘小岩, 等. 隧道新型恒阻让压装置的工作机制研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 4045-4053.
- ZHANG Chuanqing, LÜ Haoan, LIU Xiaoyan, et al. Mechanism research of a new constant resistance yielding device for tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 4045-4053.
- [13] 陶志刚, 郭爱鹏, 何满潮, 等. 微观负泊松比锚杆静力学特性及其工程应用研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(3): 808-818.
- TAO Zhigang, GUO Aipeng, HE Manchao, et al. Static characteristics and engineering applications of micro negative Poisson's ratio bolt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(3): 808-818.
- [14] HE M C, SUI Q R, LI M N, et al. Compensation excavation method control for large deformation disaster of mountain soft rock tunnel[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(5): 951-963.
- [15] 孙钧, 江宇, 汪波, 等. 高地应力软岩隧洞挤压型大变形的非线性流变属性及采用让压支护的工程整治研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(10): 1627-1633.
- SUN Jun, JIANG Yu, WANG Bo, et al. Nonlinear rheological properties and yielding support technology for large squeezing deformation of soft rock tunnel with high ground stress[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(10): 1627-1633.
- [16] 张志康, 王连国, 单仁亮, 等. 深部动压巷道高阻让压支护技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(1): 33-37.
- ZHANG Zhikang, WANG Lianguo, SHAN Renliang, et al. Support technology of high resistant and yielding property for deep roadway under dynamic pressure[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 29(1): 33-37.
- [17] 吴学震, 叶青, 邓涛, 等. 新型缩管式恒阻大变形锚索动静力学特性及工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(12): 2888-2897.
- WU Xuezheng, YE Qing, DENG Tao, et al. Dynamic and static mechanical characteristics and engineering application of a novel steel pipe shrinkable energy-absorbing cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(12): 2888-2897.
- [18] 陈新年, 王云青, 樊佳伟, 等. 锚杆(索)支护体让压减震技术研究[J]. 金属矿山, 2019(9): 65-70.
- CHEN Xinnian, WANG Yunqing, FAN Jiawei, et al. Research on yield-damping technology of bolt(cable) support body[J]. Metal Mine, 2019(9): 65-70.
- [19] 单仁亮, 宋威, 张书鹏, 等. 巷道支护管索组合结构剪切力学响应精细有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(7): 1561-1579.
- SHAN Renliang, SONG Wei, ZHANG Shupeng, et al. Precise finite element analysis of shear mechanical responses of anchor cables with C-shaped tube in roadway support[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(7): 1561-1579.
- [20] JAFARPOUR P, MOAYED R Z, KORDNAEIJ A. Yield stress for zeolite-cement grouted sand[J/OL]. Construction and Building Materials, 2020, 247. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.118639.

(责任编辑:吕海亮)