



矿业科学学报

JOURNAL OF MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY

浅埋隧道预应力锚固体承载效应模型实验研究

王彤彤, 刘文龙, 曹立雪, 秦哲, 张润昌

Model test study on bearing effect prestressing anchors in shallow buried tunnels

引用本文:

王彤彤, 刘文龙, 曹立雪, 秦哲, 张润昌. 浅埋隧道预应力锚固体承载效应模型实验研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(3): 370–380.

WANG Tongtong, LIU Wenlong, CAO Lixue, et al. Model test study on bearing effect prestressing anchors in shallow buried tunnels[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(3): 370–380.

您可能感兴趣的其他文章

1. 深部井巷工程高预应力NPR耦合支护技术

引用本文: 孙晓明, 张勇, 何满潮, 等. 深部井巷工程高预应力NPR耦合支护技术[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(1): 50–65.

2. 管索组合结构支护新技术及其在深部大变形巷道应用研究

引用本文: 单仁亮, 仝潇, 代卫林, 等. 管索组合结构支护新技术及其在深部大变形巷道应用研究[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(1): 39–49.

3. 西南地区节理化薄层软岩隧道大变形力学机理及支护控制方法

引用本文: 陶志刚, 李梦楠, 张博, 等. 西南地区节理化薄层软岩隧道大变形力学机理及支护控制方法[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(4): 452–463.

4. 地下工程吸能锚杆研究现状与展望

引用本文: 江贝, 王琦, 魏华勇, 等. 地下工程吸能锚杆研究现状与展望[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(5): 569–580.

5. 大跨度煤巷双跨桁架锚索控制机理及应用

引用本文: 谢生荣, 潘浩. 大跨度煤巷双跨桁架锚索控制机理及应用[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(2): 148–155.

王彤彤,刘文龙,曹立雪,等. 浅埋隧道预应力锚固体承载效应模型实验研究[J]. 矿业科学学报,2024,9(3):370-380. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2024.03.006

WANG Tongtong, LIU Wenlong, CAO Lixue, et al. Model test study on bearing effect prestressing anchors in shallow buried tunnels[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(3): 370-380. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024.03.006

浅埋隧道预应力锚固体承载效应模型实验研究

王彤彤^{1,2,3}, 刘文龙¹, 曹立雪^{2,3}, 秦哲¹, 张润昌¹

1. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 山东青岛 266590;
2. 自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室, 山东青岛 266101;
3. 青岛地矿岩土工程有限公司, 山东青岛 266101

摘要: 预应力锚杆主动支护技术在隧道工程中的应用逐渐普及, 对于浅埋大跨岩质隧道, 其支护特性及作用机制尚未明确。为探究预应力锚杆支护体系下围岩的承载特性, 以青岛地铁6号线某暗挖车站为工程背景, 基于相似原理配制地层及支护结构模型实验材料, 通过液压加载试验, 探究了预应力锚杆及普通锚杆支护下锚固体的承载特性。结果表明: ① 预应力锚杆与围岩的相互作用形成了具有承载能力的锚固体, 能够有效承担大部分上覆荷载。预应力锚杆的应用使得隧道失稳破坏的预警荷载值提高了42.8%, 同时极限荷载值也提高了41.2%。② 在上覆加载过程中, 预应力锚杆经历了紧密锚固持荷阶段和脱锚卸荷阶段, 衬砌经历了应变累积、应变突增和应变释放3个阶段。③ 较普通锚杆, 主动支护下预应力锚杆与岩体间的受力协同性好, 无轴力突变现象, 锚杆的支护性能得到充分的利用, 有效抑制了裂隙的发育, 提高了隧道的整体稳定性。

关键词: 浅埋大跨隧道; 预应力锚杆; 主动支护; 锚固体; 模型实验

中图分类号: TU91/TD354

文献标志码: A

文章编号: 2096-2193(2024)03-0370-11

Model test study on bearing effect prestressing anchors in shallow buried tunnels

WANG Tongtong^{1,2,3}, LIU Wenlong¹, CAO Lixue^{2,3}, QIN Zhe¹, ZHANG Runchang¹

1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266590, China;
2. Key Laboratory of Geological Safety of Coastal Urban Underground Space, Ministry of Natural Resources, Qingdao Shandong 266101, China;
3. Qingdao Geology and Geotechnical Engineering Co., Ltd., Qingdao Shandong 266101, China

Abstract: The use of prestressing anchor active support technology in tunnel engineering is becoming more common. However, the support characteristics and mechanism of action have not been fully understood for shallow, large-span rocky tunnels. In order to investigate the bearing characteristics of the surrounding rock under the prestressed anchor support system, a concealed excavation station of Qingdao Metro Line 6 was used as the engineering background, and based on the similarity principle of formulating experimental materials for stratum and support structure modelling, the bearing characteristics of the anchors under the prestressed anchor and ordinary anchor support were investigated by hydraulic loading tests. The results indicate that: ① The interaction between prestressed anchors and the surrounding rock creates a load-bearing anchor solid that can effectively support most of the overlying

收稿日期: 2024-02-23 修回日期: 2024-04-11

基金项目: 自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室基金(BHKF2022Y03)

作者简介: 王彤彤(1996—), 男, 山东诸城人, 硕士研究生, 主要从事地下岩土工程方面的研究工作。E-mail: 1905636366@qq.com

loads. The application of prestressed anchors during the overburden loading process increased the warning load value of tunnel instability damage by 42.8% and the ultimate load value by 41.2%. ② The overburden loading process involved the prestressing anchors going through the tight anchorage load holding stage and the de-anchorage unloading stage. Simultaneously, the lining underwent the strain accumulation stage, strain surge stage, and strain release stage during the overlay loading process. ③ The prestressed anchor under active support has better force synergy with the rock body than an ordinary anchor, without the axial force mutation phenomenon. This allows the support performance of the anchor to be fully utilized. Additionally, the prestressed active support effectively inhibits the development of fissures and significantly improves the overall stability of the tunnel.

Key words: Shallow buried large span tunnel; prestressing anchors; active support; anchor solid; model test

浅埋隧道工程在施工期间常常面临围岩大变形、支护失效等问题,这是困扰隧道安全的重要难题之一,严重威胁着工程建设的安全性。近年来,随着锚固技术的不断发展,预应力锚杆主动支护在众多工程实践中得到广泛应用。预应力锚杆能够更有效地控制围岩变形,从而改善围岩的力学性能,最大程度发挥围岩的自承能力^[1-4]。锚杆与围岩相互作用机理一直是国内外学者研究的热点问题。陶志刚等^[5]通过现场监测,验证了双梯度注浆及高预应力长短 NPR 锚索支护体系的可靠性,研究结果可为类似富水断层带隧道的大变形灾害控制提供参考。罗春雨等^[6]建立了预应力锚杆与围岩的力学耦合模型,通过弹塑性力学理论推导出隧道开挖后围岩应力分布及径向位移解析表达式,并利用 FLAC^{3D} 分析了预应力锚杆参数对围岩状态的影响。王洪涛等^[7]研究了不同锚固长度对巷道围岩的控制效果,推导了锚杆应力分布规律,并建立了不同锚固长度下的围岩力学分析模型。余涛等^[8]分析了锚固结构承载特性,建立了承载强度表达式,并结合数值模拟进行了算例验证,得到的应力、位移分布基本一致。于远祥等^[9]通过建立预应力锚杆与隧洞围岩相互作用的力学模型,推导出多因素耦合作用下围岩位移计算公式,对工程方案进行了优化。

除了对锚杆与围岩的力学特性进行研究外,许多学者还研究了锚杆支护方式和参数对围岩稳定性的影响。LI 等^[10-11]采用理论和数值模拟的方法确定了高地应力节理岩体隧道和大跨度隧道中预应力、长度、锚间距等锚杆施工参数对其稳定性的影响。WU 等^[12]对半圆弧深埋软煤岩巷道的不同支护参数进行了数值模拟分析,探究了锚杆间距、预紧力和锚杆长度对压缩拱的厚

度和强度的影响。GUO 等^[13]通过锚杆拉拔锚固界面的力学关系模型,得到了锚杆锚固段的轴向力方程和剪应力分布,以及锚杆锚固段的减载传递规律。杨仁树等^[14]提出了地下荷载作用下锚杆支护设计理论,讨论了不同支护参数对隧道围岩应力场和位移场的影响。BOBET 和 EINSTEIN^[15]通过力学耦合分析推导了不同锚杆支护下圆形隧道的解析表达式。

相似模型加载实验可直观地反映锚固体的承载特性。勾攀峰等^[16]利用自研的 YDM-E 型模型实验系统,研究了不同水平应力作用下有无锚杆支护条件下巷道围岩的变形特征,更加直观地体现了锚杆的支护效果。韦四江等^[17]研究了加载作用下巷道围岩锚固体的破坏形态及裂隙演化规律,结果表明,随着侧向压力的增加,锚固区外侧区域出现楔形裂纹,侧压力系数对锚固体的破坏形态影响较大;预应力的施加对锚固体残余强度的作用效果优于其峰值强度。张明建等^[18]通过相似模型实验,研究了“锚喷支护+U 型钢”支护方案在不同水平应力作用下巷道围岩的变形和破坏特征,结果表明,随着水平应力的增加,裂隙经历了产生—延伸—贯通的变化形态。

尽管众多学者对锚杆与围岩的作用机理进行了广泛研究,在浅埋隧道中,对于预应力锚杆支护设计,仍然采用普通锚杆的设计方法,存在安全系数过大、支护成本较高等问题。鉴于此,以青岛地铁 6 号线某暗挖车站为工程背景,基于预应力锚杆主动支护机理,考虑锚杆与围岩相互作用形成的锚固体,通过相似模型实验探究上覆加载过程中锚固体的承载特性,对比分析预应力锚杆和普通锚杆在浅埋大跨隧道的支护效果,以期预应力锚杆在类似工程中的设计与施工提供借鉴和参考。

1 预应力锚固体承载机制

隧道洞室的开挖破坏了围岩的初始应力平衡状态,隧道洞壁的切向应力 σ_t 急剧增大,而径向应力 σ_r 急剧减小为0,此时,围岩由三维受力状态转变为二维受力状态。根据岩石的基本物理试验可知,随着围压的减小甚至消失(单轴压缩状态),岩石的物理力学参数逐渐降低,进而导致围岩的承载能力降低,隧道洞室变形过大甚至发生破坏。因此,为解决由岩体应力状态转变进而导致围岩承载能力降低的工程问题,HE等^[19]、孙晓明等^[20]提出了应力补偿机理,即在隧洞开挖之后及时进行预应力锚杆支护,使围岩由二维应力状态及时恢复为三维应力状态,进而提高围岩的承载能力。下面将从围岩的应力状态(莫尔应力圆)简要地说明应力补偿机理(图1)。

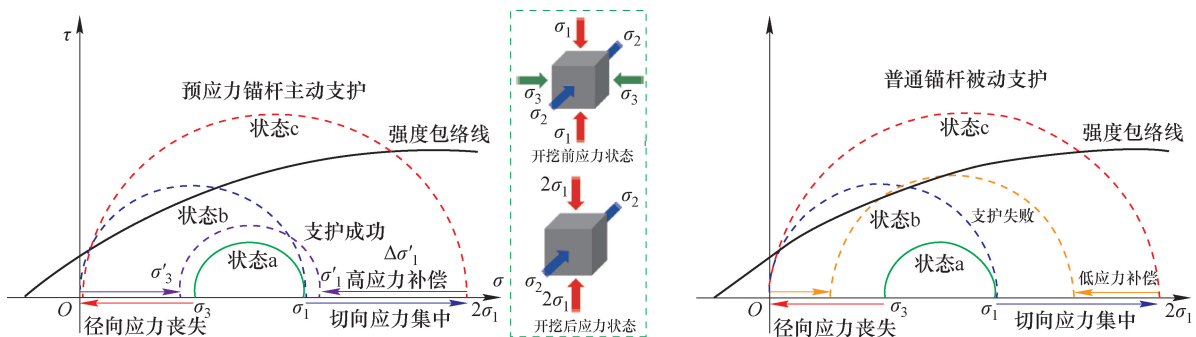


图1 应力补偿机理

Fig. 1 Stress compensation mechanism

在一定的支护密度下,预应力锚杆与围岩相互作用形成了具有承载能力的锚固体,锚固体几何模型如图2所示,锚固体力学模型如图3所示。在预应力作用下,应力沿着锚杆自由端进行传递,锚固体的形成不仅在隧道内表面提供一定的支护强度,同时锚固体能够形成一个整体抵抗外部围岩压力的结构,使得围岩的弹性模量、内摩擦角、黏聚力等力学参数得到提升。根据其作用机理,定义预应力锚杆自由端的长度为锚固体厚度。

假设锚固体在外荷载 q 的作用下达到了极限平衡状态,根据Mohr—Coulomb准则,锚固体在沿隧道截面垂直方向上受到的荷载为

$$F_n = \int_{r_0}^{r_0+b} p_c dr \quad (1)$$

$$p_c = p_i \frac{1 + \sin \varphi^*}{1 - \sin \varphi^*} + \frac{2c^* \cos \varphi^*}{1 - \sin \varphi^*} \quad (2)$$

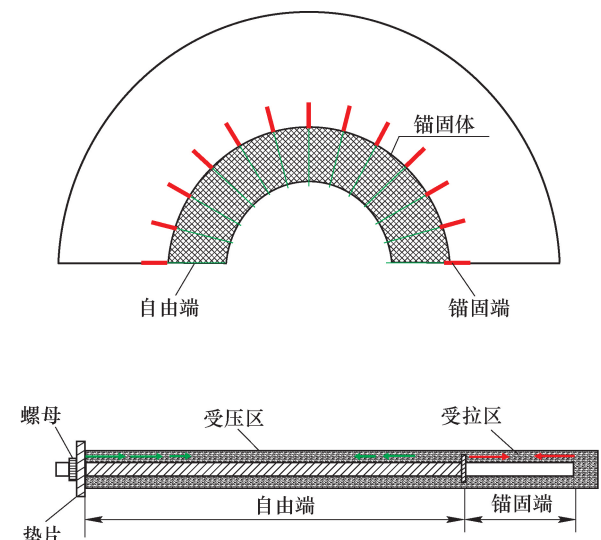
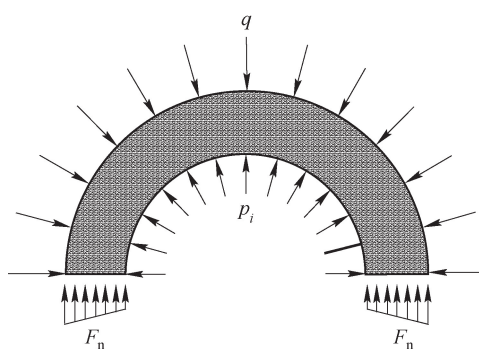


图2 锚固体几何模型

Fig. 2 Geometric model of an anchor solid



F_n —锚固体受到的垂直荷载; p_i —锚杆的支护强度

图3 锚固体力学模型

Fig. 3 Mechanical model of an anchor solid

式中, p_c 为锚固体内表面的切向应力; r_0 为隧道半径; b 为锚固体厚度; c^* 、 φ^* 为预应力锚杆主动支护后锚固体的 c 、 φ 等效值(为提高安全系数,在计算时仍采用初始数值)。

应用微分的方法,取锚固体外表面圆弧段进行分析:

$$ds = (r_0 + b) d\alpha \quad (3)$$

$$F_q = \int q \sin \alpha ds = \int_0^\pi q(r_0 + b) \sin \alpha d\alpha \quad (4)$$

式中, q 为锚固体的承载强度; F_q 为锚固体外表面受到的均布荷载的垂直分量。

同理,取锚固体内表面圆弧段进行分析:

$$ds' = r d\alpha \quad (5)$$

$$F_p = \int p_i \sin \alpha ds' = \int_0^\pi p_i r_0 \sin \alpha d\alpha \quad (6)$$

式中, F_p 为锚固体内表面受到的均布荷载的垂直分量。

由锚固体在垂直方向上的静力平衡条件可得

$$2F_n = F_q - F_p \quad (7)$$

最终可得锚固体的承载强度为

$$q = \frac{b}{r_0 + b} \left(p_i \frac{1 + \sin \varphi^*}{1 - \sin \varphi^*} + \frac{2c^* \cos \varphi^*}{1 - \sin \varphi^*} \right) + \frac{b}{r_0 + b} p_i \quad (8)$$

$$p_i = \frac{Q_s}{D_a D_b} \quad (9)$$

式中, Q_s 为锚杆的预应力; D_a 、 D_b 为锚杆的间排距。

预应力锚杆支护参数是锚固体强度的重要影响因素,因此可以利用这些参数对预应力锚杆支护设计进行定量评价。

为确保锚固体在隧道服务期限内的稳定性,必

须计算其上覆岩体的重量,确定锚固体的承载能力,从而判断锚固体和隧道的稳定性。采用太沙基浅埋隧道围岩压力的方法计算锚固体发生破坏时的极限上覆荷载,计算简图如图4所示。由于篇幅有限,不再详细阐述公式推导过程。

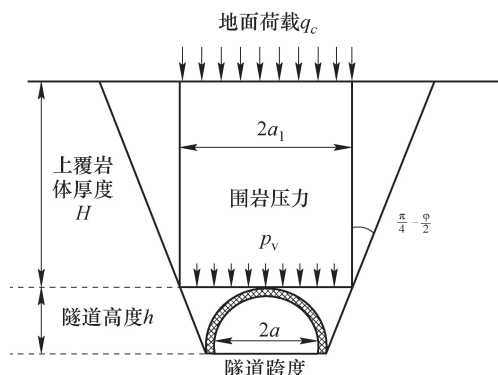


图4 太沙基浅埋隧道围岩压力计算示意图

Fig. 4 Schematic of rock pressure calculation for shallow buried tunnels at Terzaghi base

$$p_v = \frac{a_1 \gamma - c}{\tan \varphi} \left[1 - e^{-\frac{\tan \varphi H}{a_1}} \right] + q_c e^{-\frac{\tan \varphi H}{a_1}} \quad (10)$$

式中, p_v 为锚固体所受的围岩压力; $2a_1$ 为地面荷载作用范围; $2a$ 为隧道跨度; γ 为岩体重度; c 为岩体黏聚力; φ 为岩体内摩擦角。

为保证隧道的稳定性,锚固体的承载强度 q 应大于围岩压力 p_v ,即

$$q \geq p_v \quad (11)$$

由此可计算出锚固体发生极限破坏时的上覆荷载。

2 锚固体承载特性相似模型实验

为探究预应力锚固体的承载特性并验证解析模型的正确性,基于实际工程,通过相似理论设计了预应力锚杆支护和普通锚杆支护的室内相似模型实验。

2.1 工程概况

青岛地铁6号线青医西院区站为暗挖车站,采用初支拱盖法施工,主体拱顶埋深为25.7~28.6 m,覆岩厚度19.5~24.2 m,主体车站跨度为20.0 m。该车站场地属于剥蚀残丘地貌单元,地形整体上平缓,第四系厚度0.9~7.0 m,主要是第四系全新统人工填土层组成,下伏基岩为中生代燕山晚期花岗岩和印支闪长岩,以煌斑岩和花岗斑岩岩脉为主。硐身基本位于微风化岩中,以花岗岩为主,强度为76.40 MPa。车站属于浅埋硬岩大

跨型隧道,车站地质剖面如图 5 所示,地质参数列于表 1。隧道采用 NPR 预应力锚杆进行支护。支护体系为预应力锚杆、钢拱架、混凝土衬砌,其中预

应力锚杆间距为 1.5 m×1.0 m,施加 100 kN 的预应力,锚杆长度为 3.0 m,锚固端长度为 1.0 m。

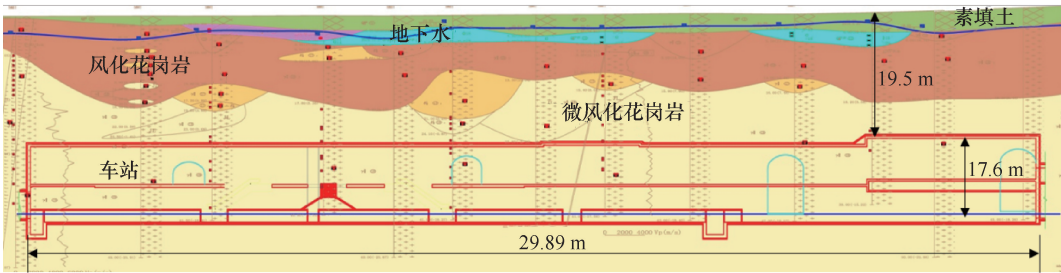


图 5 工程地质纵剖面

Fig. 5 Geological longitudinal section

表 1 车站地质参数

Table 1 Geological parameters of the station

地层	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
微风化花岗岩	2 000	0.34	0.40	47	2 400

2.2 相似模型实验

2.2.1 相似材料

相似材料的确定是模型实验的关键。根据相似定理以及考虑现场及试验条件,确定几何相似比为 1 : 40。经文献调研及大量初步试验,确定石膏和水泥为胶结材料,石英砂和重晶石粉为骨料。考虑砂胶比、水膏比和含水率对试样力学性质的影响,设计一个三因素三水平的正交试验(表 2)。

表 2 相似材料正交试验

Table 2 Orthogonal test of similar materials

方案	砂胶比 (骨料/胶结材料)	水膏比 (水泥/石膏)	含水率/%
1	5 : 1	2 : 1	8
2	5 : 1	1 : 1	10
3	5 : 1	1 : 2	12
4	6 : 1	2 : 1	8
5	6 : 1	1 : 1	10
6	6 : 1	1 : 2	12
7	7 : 1	2 : 1	8
8	7 : 1	1 : 1	10
9	7 : 1	1 : 2	12

根据表 2 中各材料的配比,制作 $\phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 圆饼形试样和 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 圆柱形试样,岩块试样制备流程如图 6 所示。对养护好的试样进行单轴压缩试验、三轴试验和巴西劈裂,试验结果见表 3 至表 5。

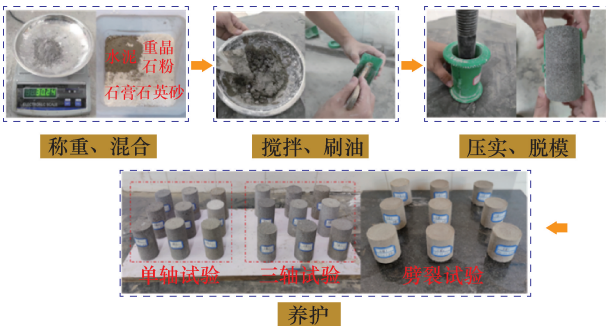


图 6 试样制备流程

Fig. 6 Sample preparation process

表 3 抗压强度敏感性分析

Table 3 Sensitivity analysis of compressive strength

因素	比例	抗压强度/MPa	强度极差/MPa
砂胶比	5 : 1	2.372	0.649
	6 : 1	1.938	
	7 : 1	1.723	
水膏比	1 : 2	2.287	0.487
	1 : 1	2.008	
	2 : 1	1.800	
含水率/%	8	2.149	0.336
	10	1.813	
	12	2.071	

由表 3 可知,砂胶比对相似材料的抗压强度的影响最大,其次是水膏比,而含水率的影响最小。

表4 单轴抗拉强度敏感性分析
Table 4 Sensitivity analysis of uniaxial tensile strength

因素	比例	抗拉强度/MPa	强度极差/MPa
砂胶比	5 : 1	0.272	0.122
	6 : 1	0.195	
	7 : 1	0.150	
石膏比	1 : 2	0.221	0.02
	1 : 1	0.201	
	2 : 1	0.202	
含水率/%	8	0.203	0.004
	10	0.207	
	12	0.206	

由表4可知,各因素对抗拉强度的影响与抗压强度相同,即砂胶比>石膏比>含水率。同时,单轴抗压强度与抗拉强度之间的协同较好,单轴抗压强度约为抗拉强度的10倍。

表5 三轴抗压强度敏感性分析
Table 5 Sensitivity analysis of triaxial compressive strength

因素	比例	抗压强度 /MPa (围压 0.2 MPa)	强度 极差 /MPa	抗压强度 /MPa (围压 0.4 MPa)	强度 极差/MPa
砂胶比	5 : 1	3.057	0.414	3.863	0.486
	6 : 1	2.647		3.543	
	7 : 1	2.643		3.377	
石膏比	1 : 2	3.153	0.560	3.880	0.460
	1 : 1	2.700		3.637	
	2 : 1	2.593		3.420	
含水率/%	8	2.753	0.180	3.610	0.313
	10	2.707		3.430	
	12	2.887		3.743	

由表5可知,各因素对三轴抗压强度的影响程度与单轴抗压强度和抗拉强度的影响程度相同,即砂胶比>石膏比>含水率。

根据各因素对单轴抗压强度、抗拉强度和三轴抗压强度的影响程度,对各因素与各物理量进行多元线性回归分析:

$$Y_1 = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4$$
$$Y_2 = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4$$
$$Y_3 = c_1X_1 + c_2X_2 + c_3X_3 + c_4 \quad (12)$$

式中, X_1 为砂胶比; X_2 为石膏比; X_3 为含水率; a 、 b 、 c 为待定系数。

根据试验结果对各物理量的试验值进行拟合,结果如下:

$$\begin{cases} \sigma_c = 4.92 - 0.325X_1 - 0.381X_2 - 5.128X_3 \\ \sigma_t = 0.649 - 0.074X_1 - 0.016X_2 - 0.055X_3 \\ \varphi = 34.6^\circ + 2.31^\circ X_1 - 8.45^\circ X_2 - 46.25^\circ X_3 \end{cases} \quad (13)$$

式中, σ_c 为抗压强度; σ_t 为抗拉强度; φ 为内摩擦角, ($^\circ$)。

将 σ_c 、 σ_t 、 φ 的设计值代入式(13)中,得到 $X_1=5.02$ 、 $X_2=1.155$ 、 $X_3=18\%$ 。即砂胶比为5.02:1、石膏比为1.155:1、含水率为18%。按照此配比制作试样并进行单轴试验、劈裂试验、三轴试验,获得其各力学参数见表6。

表6 相似材料力学参数
Table 6 Mechanical parameters of similar materials

	容重/ ($N \cdot m^{-3}$)	抗压强度/ MPa	抗拉强度	内摩擦角
设计参数	23	1.91	0.229 MPa	47°
试验参数	23	1.91	0.223 MPa	47.4°
相对误差	—	—	2.6%	0.8%

根据相似理论及式(9)等效支护计算公式,锚杆托盘采用边长10 mm、厚0.7 mm的铝合金片,锚杆采用1.0 mm的锡丝。根据力的相似比,模拟施加的预应力为4.0 N,通过旋转螺母压缩弹簧实现预应力的施加,原型隧道的锚杆间排距为1 500 mm×1 000 mm,模拟隧道的锚杆间排距为37.5 mm×25 mm,锚杆长度75 mm,锚杆模型如图7所示。

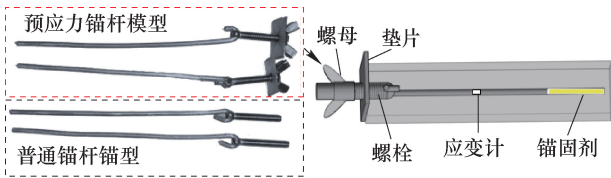


图7 锚杆相似模型
Fig. 7 Analogous anchor model

2.2.2 模型尺寸及加载方案

模型试验箱尺寸为3 m×0.6 m×1.8 m(长×宽×高),整体采用工字型钢搭建,硐口前后采用便于观察试验宏观现象的亚克力板,硐口尺寸为0.56 m×0.6 m×0.44 m(长×宽×高),模型试验台如图8所示。根据现场工况模型采用七步开挖法,本文主要研究锚固体的承载特性,对隧硐在开挖过程中的受力特性将不进行描述。试验加载系统采用四柱式下横梁反力架加载系统,采用电液伺服加

载系统。试验加载采用逐级加载,为保证加载后期能够详细观察试验的宏观现象,前三级每级加载 100 kN,之后每级加载 50 kN,加载速率为 10 kN/min。每级加载完毕后进入持荷阶段,待监测数据稳定后进入下一级加载。

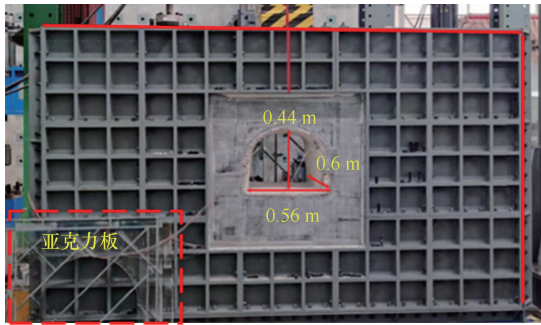


图8 模型试验台

Fig. 8 Model test bench

2.2.3 监测系统

为研究锚固体在加载过程中的承载特性,对围岩压力、锚杆轴力、衬砌应变进行监测,所用监测元件有压力盒、应变砖、应变片、锚杆微型应变砖。除监测围岩内部受力情况外,为获取隧道宏观应力场,进而提高试验的有效性,本文采用全场应变测量与仿真优化分析系统(MatchID-2D/Stereo),对硐

口及周边围岩进行实时监测,采用高频摄像机对隧道裂隙产生及扩展进行实时捕捉,同时利用千分表进行拱顶沉降及净空收敛的测量。监测仪器及测点布置如图9所示。

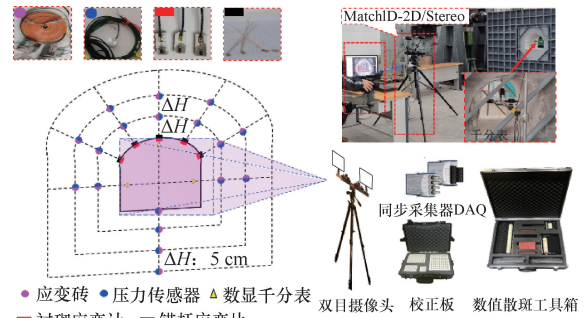


图9 监测仪器及测点布置

Fig. 9 Layout of monitoring equipment and measurement points

2.3 试验数据分析

通过对比分析两工况在加载过程中的近端测点(锚杆支护范围内)的围岩压力、锚杆轴力、衬砌应变及拱顶沉降变化规律,探究预应力锚杆和普通锚杆在浅埋硬岩大跨隧道中的支护效果。

2.3.1 围岩压力

不同上覆荷载作用下两工况近端测点围岩压力变化规律如图10所示。

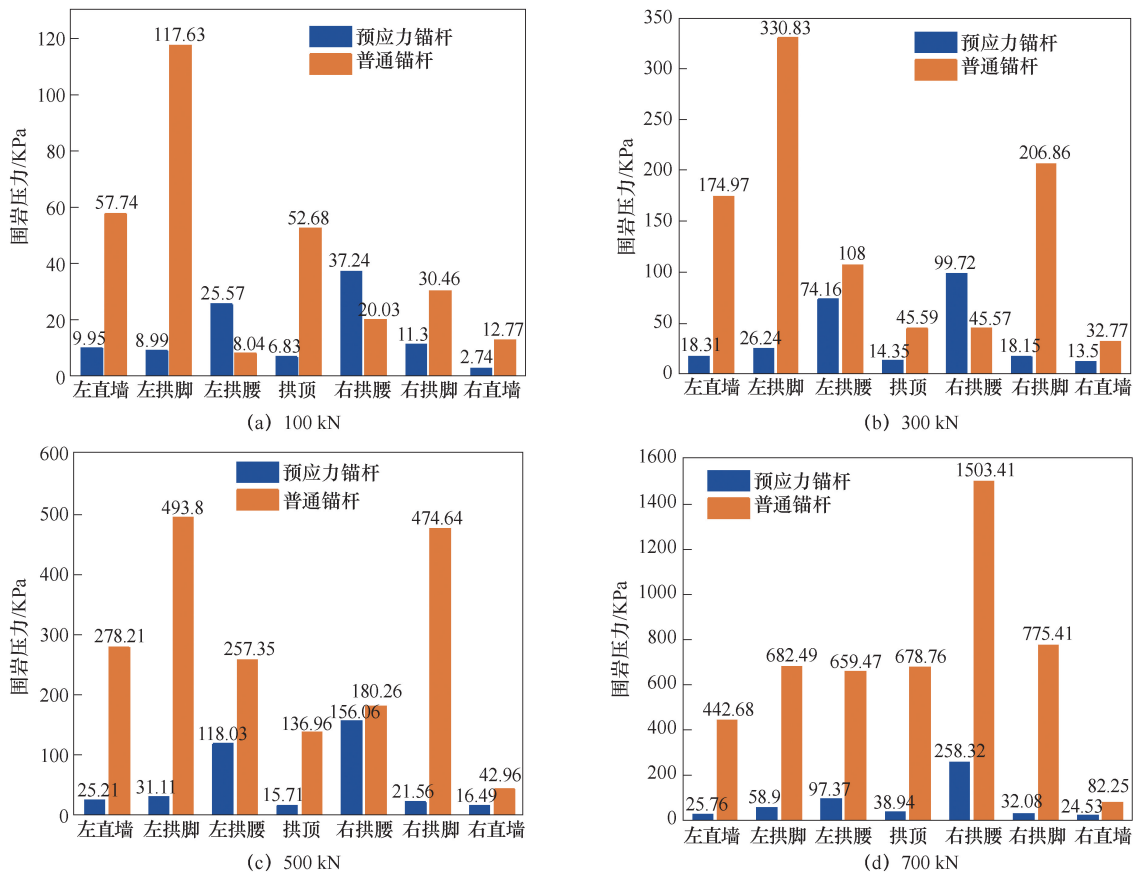


图10 不同上覆加载作用下围岩压力变化

Fig. 10 Pressure variation of surrounding rock under diverse overburden loads

由图 10 可知,两工况下各测点的围岩压力随着上覆荷载的增加而增大,但是预应力锚杆工况下的围岩压力值明显小于普通锚杆工况,这说明预应力的施加有效提高了围岩的应力状态,增强了围岩的力学参数,从而使围岩的承载能力得到提高。预应力锚杆支护作用下围岩应力平稳增加,增长率在 65.5% 以内,无围岩应力激增现象。相比之下,在普通锚杆支护作用下,围岩应力增幅较大,尤其是在加载后期围岩应力急剧增加,增长率高达 133.9%。由

此可见,在上覆加载过程中主要是围岩承载,普通锚杆并没有充分发挥其支护性能。相反,预应力锚杆支护改善了岩体的宏观力学性质。在预应力主动支护下,围岩与锚杆相互作用形成锚固体,在上覆加载过程中锚固体受力更加均匀,且承担了大部分的上覆荷载,从而极大地提高了隧道的稳定性。

2.3.2 锚杆轴力

不同上覆荷载作用下两工况锚杆轴力变化曲线如图 11 所示。

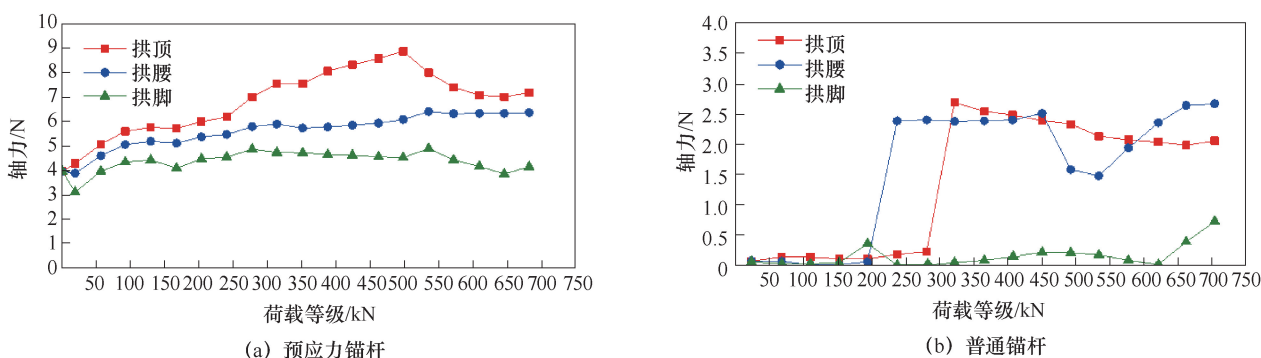


图 11 不同上覆荷载作用下锚杆轴力变化曲线

Fig. 11 Anchor shaft force variation under different overburden load

由图 11 可知,普通锚杆最大轴力为 2.7 N,而预应力锚杆的最大轴力为 9 N。在上覆加载过程中预应力锚杆轴力变化较为平稳,而普通锚杆轴力出现突增现象。这说明在预应力主动支护下所形成的锚固体使锚杆更能发挥其支护性能,预应力锚杆可以

得到充分的利用;而普通锚杆支护下,上覆荷载主要由围岩承担,普通锚杆不能充分发挥其支护性能。

2.3.3 衬砌应变

不同上覆荷载作用下两工况衬砌应变变化曲线如图 12 所示。

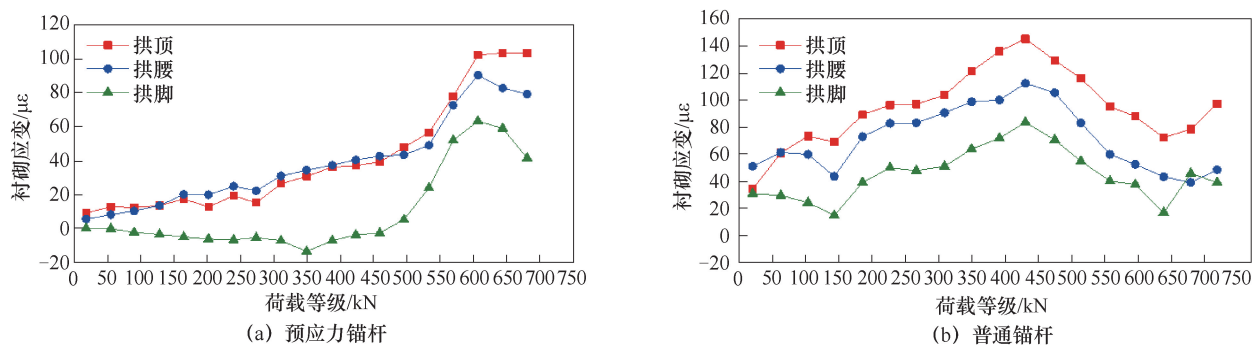


图 12 上覆荷载作用下衬砌应变变化曲线

Fig. 12 Variation of lining strain under overburden loads

由图 12 可知,在预应力锚杆工况下,衬砌的最大应变为 1.01×10^{-4} ,较普通锚杆工况下减少了 30%,这表明在预应力锚杆支护作用下,形成的锚固体承担了大部分的上覆荷载,而衬砌等被动支护构件仅承受锚固体的变形压力。由此可见,在预应力作用下形成的锚固体使衬砌整体破坏时间滞后于普通锚杆工况。

2.3.4 锚固体失效判据

由图 11、12 可知,在上覆加载中,两个工况下的锚杆轴力和衬砌应变都呈现先上升后下降趋势,支护构件经历了承载和失效的受力特性。衬砌的受力特性及位移变化是衡量隧道安全稳定性的指标^[21]。根据锚杆和衬砌在上覆加载中受力特性,以预应力锚杆工况下拱顶测点为

例,提出支护结构失效判据(图 13),并确定不同支护形式下影响隧道稳定性的极限上覆荷载。

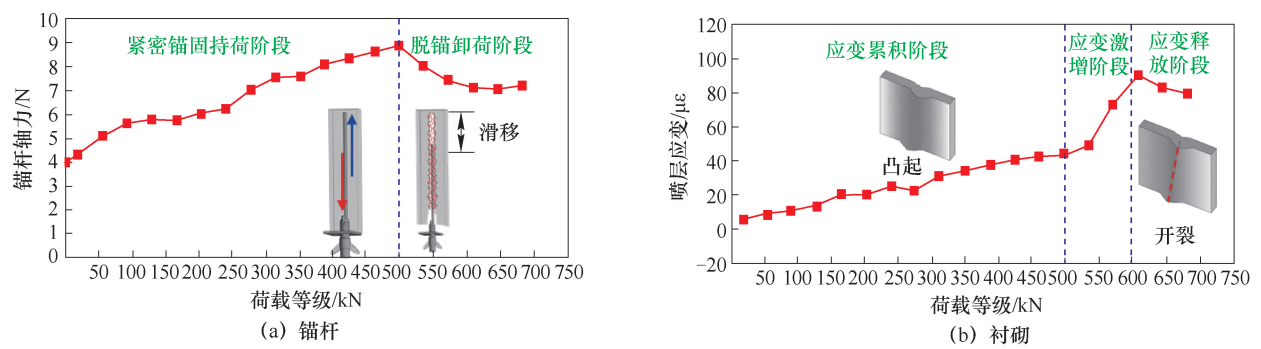


图 13 上覆荷载作用下锚固体失效判据
Fig. 13 Overburden load failure criteria for anchor solids

由图 13 可知,预应力锚杆在上覆加载过程中经历了紧密锚固持荷阶段和脱锚卸荷阶段。在紧密锚固持荷阶段锚固体受力稳定,锚固体承担了大部分的上覆荷载。然而,当上覆荷载达到 500 kN 时,锚固体进入脱锚卸荷阶段,此时围岩与锚杆之间产生滑移,导致锚固体承载能力下降。同样,衬砌在上覆加载过程中经历了应变累积、应变突增和应变释放 3 个阶段。在应变累积阶段,衬砌应变增长稳定,此时主要承担锚固体的变形压力。然而,当上覆荷载达到 500 kN 时,由于锚固体承载能力下降,衬砌进入应变突增阶段,主要由衬砌承担上覆荷载。当上覆荷载达到 600 kN 时,衬砌进入应变释放阶段,出现局部的开裂,最终导致衬砌支护失效。由此可知,在上覆加载过程中,锚固体先承载大部分上覆荷载,当达到一定荷载时,锚固体承载能力下降,上覆荷载由衬砌继续承担,直至衬砌破坏失效。因此,可以将锚固体承载能力下降时的上覆荷载作为隧道失稳的预警荷载,而衬砌破坏时的上覆荷载作为隧道失稳破坏的极限荷载。

预应力锚杆和普通锚杆两工况下隧道失稳破坏的预警荷载和极限上覆荷载见表 7。可见,预应力的施加使预警荷载值提高了 42.8%,极限荷载值提高了 41.2%。

表 7 上覆荷载作用下隧道失稳预警值、极限值
Table 7 Warning value and limit value of tunnel instability under overlying loading

工况	预警荷载值	极限荷载值
预应力锚杆主动支护	500	600
普通锚杆被动支护	350	425

通过围岩应变散斑云图(图 14)和宏观试验现象(图 15)的观察,发现锚杆轴力、衬砌应变和拱顶

沉降的变化规律与隧道失稳破坏的现象相吻合。预应力锚杆工况下,在极限荷载作用下隧道拱部出现 2 条主裂隙,且细微裂隙发育不明显。而普通锚

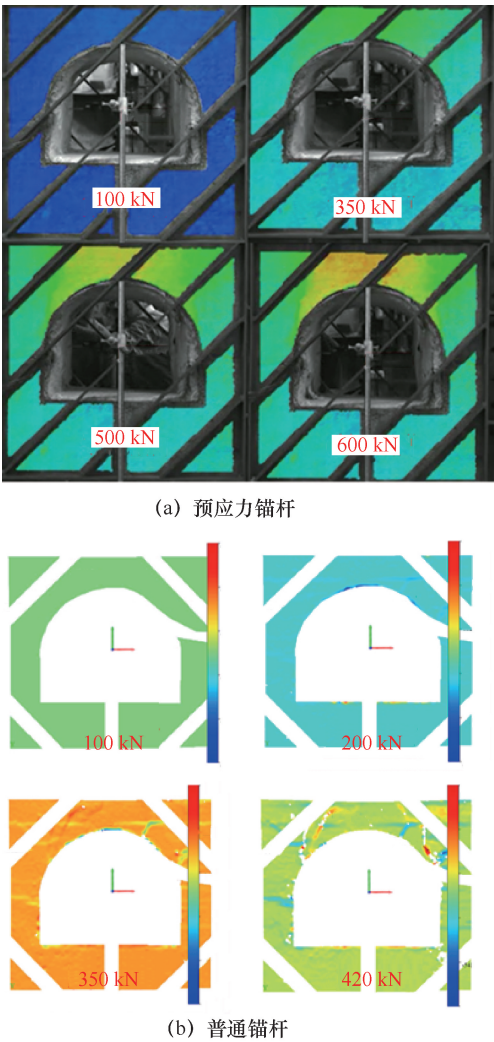


图 14 不同上覆荷载作用下数值散斑云图
Fig. 14 Numerical scatter cloud influenced by overburden load

杆工况下,隧道拱部出现了一系列正“八”和倒“八”字形裂隙,同时在拱脚处出现了细微裂隙密集区。预应力主动支护显著抑制了裂隙的发育,极大地提高了隧道的稳定性。在极限荷载作用下,两种工况均表现为大面积的衬砌剥落。这一结果验证了试验数据的准确性,并证实了隧道失稳破坏判据的科学性。



(a) 预应力锚杆



(b) 普通锚杆

图 15 上覆加载作用下隧道围岩宏观破坏特征

Fig. 15 Macroscopic damage characteristics of tunnel's surrounding rock under overburden loading

基于以上的隧道失稳破坏判据,得到预应力锚杆支护工况下的极限上覆荷载为 1.79 MPa,与式(8)计算得出的 1.72 MPa 相吻合。而普通锚杆工况下的极限上覆荷载为 1.26 MPa。这表明,预应力锚杆支护下所形成的锚固体极大地提高了隧道的稳定性。

3 结 论

(1)主动支护下预应力锚杆较普通锚杆更能与围岩相互作用形成具有承载能力的锚固体。主动支护使得隧道失稳破坏的预警荷载值提高了 42.8%,同时极限荷载值也增加了 41.2%。

(2)预应力锚杆相较于普通锚杆在与岩体之间的受力协同性更佳,无轴力突变现象,充分发挥了锚杆的支护性能,同时抑制了裂隙的发育,显著提高了隧道的稳定性。

(3)在上覆加载过程中,预应力锚杆经历了紧密锚固持荷阶段和脱锚卸荷阶段。在紧密锚固持荷阶段,锚固体主要承担了大部分上覆荷载,发挥了主要承载作用。同时,衬砌在上覆加载过程中经历了应变累积、应变突增和应变释放 3 个阶段。在应变累积阶段,衬砌的应变增长趋于稳定,此时衬砌主要承担锚固体的变形压力,起到辅助承载的作用。

参考文献

- [1] 汪波,喻伟,訾信,等. 基于统一强度理论的围岩-锚杆(索)弹塑性耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(11): 2613-2627.
WANG Bo, YU Wei, ZI Xin, et al. Elastoplastic coupling analysis of surrounding rock-anchor bolt (cable) based on unified strength theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(11): 2613-2627.
- [2] 朱珍德,舒晓云,陈卫忠,等. 一种改进的中空注浆锚杆连接段螺纹参数优化分析[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2300-2310.
ZHU Zhende, SHU Xiaoyun, CHEN Weizhong, et al. Optimization analysis on thread connection parameters of an improved hollow grouting bolt[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2300-2310.
- [3] 陈昌富,朱世民,高傑,等. 考虑注浆压力影响锚-土界面剪切蠕变 Kriging 模型[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 125-128.
CHEN Changfu, ZHU Shimin, GAO Jie, et al. Kriging model of shear creep of anchor-soil interface considering grouting pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 125-128.
- [4] 叶新宇,彭锐,马新岩,等. 压密效应对新型压密注浆土钉的强化研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(9): 1649-1656, 1738.
YE Xinyu, PENG Rui, MA Xinyan, et al. Enhancement of compaction grouting on a compaction-grouted soil nail in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(9): 1649-1656, 1738.
- [5] 陶志刚,周子琮,杨晓杰,等. 富水断层带隧道变形力学机制及双梯度注浆 NPR 补偿对策[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(6): 768-779.
TAO Zhigang, ZHOU Zicong, YANG Xiaojie, et al. Mechanics of tunnel deformation in water-rich fault zone

- and double-gradient grouting NPR compensation countermeasures[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(6): 768–779.
- [6] 罗春雨, 廖杭, 余涛, 等. 考虑锚杆预应力作用下隧道围岩力学分析及参数设计[J/OL]. *铁道标准设计*, 1–9[2024-01-18].
LUO Chunyu, LIAO Hang, YU Tao, et al. Mechanical analysis and parameter design of tunnel surrounding rock considering prestress of bolt[J/OL]. *Railway Standard Design*, 1–9[2024-01-18].
- [7] 王洪涛, 高广龙, 张红军, 等. 全长预应力锚注支护下深部巷道控制效果对比研究[J]. *矿业科学学报*, 2024, 9(1): 53–65.
WANG Hongtao, GAO Guanglong, ZHANG Hongjun, et al. Comparative study on control effect of deep roadway under full-length prestressed bolt-grouting support[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(1): 53–65.
- [8] 余涛, 方勇, 姚志刚, 等. 隧道预应力锚杆锚固结构承载效应及围岩力学分析[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(6): 1069–1077.
YU Tao, FANG Yong, YAO Zhigang, et al. Bearing effect of prestressed bolt-anchored structures and mechanical analysis of surrounding rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(6): 1069–1077.
- [9] 于远祥, 姚尧, 王京滨, 等. 杆岩耦合作用下深埋隧道围岩稳定性主控因素及支护优化研究[J]. *现代隧道技术*, 2021, 58(1): 19–26.
YU Yuanxiang, YAO Yao, WANG Jingbin, et al. Study on main controlling factors of surrounding rock stability and support optimization of deep-buried tunnels under the coupling action of anchor bolts and rocks[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2021, 58(1): 19–26.
- [10] LI P F, CHEN Y, HUANG J L, et al. Design principles of prestressed anchors for tunnels considering bearing arch effect[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 156: 105307.
- [11] LI G, HU Y, TIAN S M, et al. Analysis of deformation control mechanism of prestressed anchor on jointed soft rock in large cross-section tunnel[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(12): 9089–9103.
- [12] WU D Y, LI N Y, HU M H, et al. Study on formation mechanism of pre-stressed anchor pressure arch based on safe co-mining of deep coal and gas[J]. *Sustainability*, 2023, 15(4): 3004.
- [13] GUO X W, ZHENG X G, LI P, et al. Full-stress anchoring technology and application of bolts in the coal roadway[J]. *Energies*, 2021, 14(22): 7475.
- [14] 杨仁树, 李永亮, 王茂盛, 等. 预应力锚索剪切力学特性试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(6): 1166–1174.
YANG Renshu, LI Yongliang, WANG Maosheng, et al. Experimental study of shear mechanical properties of prestressed cable bolts[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(6): 1166–1174.
- [15] BOBET A, EINSTEIN H H. Tunnel reinforcement with rockbolts[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(1): 100–123.
- [16] 勾攀峰, 张振普, 韦四江. 不同水平应力作用下巷道围岩破坏特征的物理模拟试验[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(10): 1328–1332.
GOU Panfeng, ZHANG Zhenpu, WEI Sijiang. Physical simulation test of damage character of surrounding rock under different levels of the horizontal stress[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(10): 1328–1332.
- [17] 韦四江, 勾攀峰. 巷道围岩锚固体变形破坏特征的试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(2): 199–204.
WEI Sijiang, GOU Panfeng. Experimental study on deformation and failure characteristics of anchored body in roadway surrounding rock[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(2): 199–204.
- [18] 张明建, 镐振, 郜进海, 等. 不同水平应力作用下巷道围岩破坏特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(3): 4–7.
ZHANG Mingjian, HAO Zhen, GAO Jinhai, et al. Study on failure features of surrounding rock in mine gateway under different horizontal stress[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(3): 4–7.
- [19] HE M C, WANG Q. Excavation compensation method and key technology for surrounding rock control[J]. *Engineering Geology*, 2022, 307: 106784.
- [20] 孙晓明, 张勇, 何满潮, 等. 深部井巷工程高预应力NPR耦合支护技术[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(1): 50–65.
SUN Xiaoming, ZHANG Yong, HE Manchao, et al. Research of high pre-stress NPR support technology in deep shaft roadway engineering[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(1): 50–65.
- [21] HOU L L, ZHANG Q, DU Y L. Width estimation of hidden cracks in tunnel lining based on time-frequency analysis of GPR data and back propagation neural network optimized by genetic algorithm[J]. *Automation in Construction*, 2024, 162: 105394.

(责任编辑: 陈骏)