



## 深部高应力软岩巷道失稳机理及补偿支护技术

李伟涛 郭志飏 何满潮 汤建泉 杨然景 贾东修 王吉凯 张科学 王晓玲 闫星辰 刘晨阳

### 引用本文:

李伟涛, 郭志飏, 何满潮, 等. 深部高应力软岩巷道失稳机理及补偿支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 1-18.  
LI Weitao, GUO Zhibiao, HE Manchao. Failure mechanisms and compensation support technology of deep high-stress soft rock roadways[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 1-18.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0767>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 软岩巷道围岩卸荷破坏力学模型及影响因素分析

Analysis on mechanical model and impact factors of unloading failure of rock surrounding in soft rock roadway  
煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/383bc01a-4834-4585-8a01-948a133ad55f>

#### 软岩巷道底板破坏特征及控制研究

Study on failure characteristics and control of soft rock roadway floor  
煤炭科学技术. 2023, 51(3): 21-28 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0968>

#### 深部高应力富水黏土软岩大巷底鼓机理及控制技术

Mechanism and control technology of floor heave in deep high-stress water-rich clay soft rock roadway  
煤炭科学技术. 2021, 49(7): 71-78 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e91bbcbd-cb44-48dd-8bcd-e8de1a03456d>

#### 深部软岩巷道围岩支护技术研究

Study on surrounding rock support technology of deep soft rock roadway  
煤炭科学技术. 2022, 50(4): 76-84 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/db8daf43-247e-4c7f-82e8-3ff6de256e0c>

#### 断层附近软岩巷道围岩破坏机理及控制研究

Study on the failure mechanism and control technology of surrounding rock of soft rock roadway near fault  
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 195-202 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/943457c2-faab-4a8b-aeee-7f61ceae49e0>

#### 采动影响下深埋软岩巷道变形特征与控制因素分析

Deformation characteristics and control factors of the surrounding rock in the deep buried soft rock roadway under the influence of mining  
煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/990fab87-266c-4958-b87f-9cd985e9c0f2>



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

李伟涛, 郭志彪, 何满潮, 等. 深部高应力软岩巷道失稳机理及补偿支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 1-18.

LI Weitao, GUO Zhibiao, HE Manchao, *et al.* Failure mechanisms and compensation support technology of deep high-stress soft rock roadways[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 1-18.

## 深部高应力软岩巷道失稳机理及补偿支护技术

李伟涛<sup>1,2</sup>, 郭志彪<sup>2</sup>, 何满潮<sup>2</sup>, 汤建泉<sup>3</sup>, 杨然景<sup>4</sup>, 贾东修<sup>4</sup>, 王吉凯<sup>4</sup>, 张科学<sup>1,2,5</sup>, 王晓玲<sup>1,5</sup>, 闫星辰<sup>1,5</sup>, 刘晨阳<sup>1,5</sup>

(1. 华北科技学院 矿山安全学院, 河北 廊坊 065201; 2. 中国矿业大学(北京) 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 北京 100083; 3. 山东科技大学 采矿工程研究院, 山东 泰安 271000; 4. 铁法煤业(集团) 有限责任公司 小康煤矿, 辽宁 调兵山 112700; 5. 河北省矿山智能化开采技术重点实验室, 河北 廊坊 065201)

**摘要:** 深部开挖岩体应力重分布是多元应力的复合力学问题。首先, 基于弹性理论叠加原理, 建立了深部高应力软岩巷道开挖瞬间的围岩力学模型, 研究了切向应力  $\sigma_1$  和径向应力  $\sigma_3$  的变化规律。其次, 构建了深部高应力软岩巷道的支护力学模型, 揭示了围岩的支护效应。通过物理模型试验, 探究了常规支护和补偿支护下围岩  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  的响应特征及相应的失稳机理。最后, 通过数值模拟和现场工程应用验证了补偿支护技术的适用性。结果表明: 深部高应力软岩巷道应力重分布呈现径向卸压和切向增压的趋势, 开挖瞬间巷道边缘  $\sigma_1$  变为原来的 2 倍, 而  $\sigma_3$  降为 0。对开挖岩体进行支护后, 巷道边缘  $\sigma_3$  为围岩的支护力,  $\sigma_1$  随支护力的增加而降低。与常规支护相比, 补偿支护围岩变形量降低 73.7%, 破裂碎胀面积降低 88.3%, 裂隙长度降低 11.0%。浅部围岩  $\sigma_3$  提高 68.3%,  $\sigma_1$  峰值下降 18.2%。常规支护补偿效应弱, 围岩  $\sigma_3$  大幅衰减且  $\sigma_1$  集中程度高, 促使裂隙持续张开并纵深延长, 易造成围岩碎胀扩容变形。补偿支护通过 NPR(Negative Poisson's Ratio) 锚索充分发挥围岩三轴强度并调动深部岩体自承力, 围岩  $\sigma_3$  补偿程度高且  $\sigma_1$  显著降低, 从而抑制裂隙的传播和穿透, 进而实现围岩自稳。软岩巷道采用补偿支护技术后, NPR 锚索实现恒阻, 围岩变形和支护破坏程度显著降低, 表明该技术对深部高应力软岩工程具有良好的控制效果。

**关键词:** 软岩巷道; 失稳机理; 补偿支护; 力学分析; 模型试验

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)10-0001-18

### Failure mechanisms and compensation support technology of deep high-stress soft rock roadways

LI Weitao<sup>1,2</sup>, GUO Zhibiao<sup>2</sup>, HE Manchao<sup>2</sup>, TANG Jianquan<sup>3</sup>, YANG Ranjing<sup>4</sup>, JIA Dongxiu<sup>4</sup>, WANG Jikai<sup>4</sup>, ZHANG Kexue<sup>1,2,5</sup>, WANG Xiaoling<sup>1,5</sup>, YAN Xingchen<sup>1,5</sup>, LIU Chenyang<sup>1,5</sup>

(1. School of Mine Safety, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China; 2. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. Institute of Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Taian 271000, China; 4. Xiaokang Coal Mine, Tiefa Coal Industry (Group) Co., Ltd., Diaobingshan 112700, China; 5. Hebei Key Laboratory of Mine Intelligent Unmanned Mining Technolog, Langfang 065201, China)

**Abstract:** Stress redistribution of deep excavation rock mass is a complex mechanical problem of multiple stresses. First, the mechanical model of surrounding rock at the moment of excavation of deep high-stress soft rock roadways was established based on the superposition principle of elastic theory, and the variation rules of tangential stress  $\sigma_1$  and radial stress  $\sigma_3$  were studied. Then, the supporting mechanical model of deep high-stress soft rock roadways was constructed, and the supporting effect of surrounding rock was revealed. Next, the response characteristics of  $\sigma_1$  and  $\sigma_3$  of surrounding rock and corresponding failure mechanisms under traditional support and compensation

收稿日期: 2024-06-12

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 刘雅清

DOI: 10.12438/cst.2024-0767

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41941018); 廊坊市科技支撑计划资助项目(2025013166)

作者简介: 李伟涛(1994—), 男, 山东青岛人, 讲师, 博士。E-mail: lwtcumtb@163.com

通讯作者: 郭志彪(1976—), 男, 吉林长春人, 教授, 博士。E-mail: guozhibiao@126.com

support were investigated through physical model tests. Finally, the applicability of compensation support technology was verified by numerical simulation and field engineering application. Mechanical analysis results indicated that the stress redistribution in deep high-stress soft rock roadways shows the trend of radial pressure relief and tangential pressure increase,  $\sigma_1$  becomes twice of the original and  $\sigma_3$  decreases to 0 at the moment of excavation. After supported the excavated rock mass, the  $\sigma_3$  of roadway edge is the support resistance of surrounding rock, and  $\sigma_1$  decreases with the increase of support resistance. The model test results showed that surrounding rock deformation of compensation support reduces by 73.7%, the destroyed area reduces by 88.3%, the crack length reduces by 11.0%. The  $\sigma_3$  of the shallow surrounding rock increases by 68.3%, and the peak value of  $\sigma_1$  decreases by 18.2%. The compensation effect of traditional support is weak, the  $\sigma_3$  attenuates greatly and the  $\sigma_1$  concentrates highly, which causes the crack to continue to open and extend in depth, resulting in the surrounding rock expansion deformation. Compensation support gives full play to the three-axis strength of the surrounding rock and mobilizes the self-bearing capacity of the deep rock mass by NPR cable. The compensation degree of  $\sigma_3$  is high and  $\sigma_1$  is significantly reduced, thus restraining the propagation and penetration of crack and realizing the self-stability of surrounding rock. After the compensation support technology is used in soft rock roadways, the NPR cables achieve constant resistance, the deformation of surrounding rock and the damage degree of support are significantly reduced, which indicates that this technology has a good control effect on deep soft rock engineering with high in situ stress.

**Key words:** soft rock roadways; failure mechanisms; compensation support; mechanical analysis; model test

## 0 引言

深部开采已成为我国煤炭资源开发的新常态<sup>[1-2]</sup>。深部开挖岩体面临复杂的地质力学条件而极易发生大变形灾害,主要表现为变形剧烈、变形量大、支护失效、长时蠕变等典型特征<sup>[3]</sup>。深部地下工程的复杂性和多样性,导致目前对软岩巷道失稳机理的认识仍不深刻。

国内外学者对深部高地应力软岩巷道的失稳机理进行了大量研究。靖洪文等<sup>[4]</sup>通过大尺度物理模型试验发现支护岩体压力拱效应弱化了岩块沿结构面的剪切滑移,从而限制围岩结构大变形。邓鹏海等<sup>[5]</sup>认为破裂岩块的滑移剪胀和碎胀效应造成软岩失稳破坏。刘泉声等<sup>[6]</sup>发现深部软岩巷道大变形过程是由浅部张拉破坏向深部剪切破坏演化。HOEK<sup>[7]</sup>认为围岩剪胀扩容是造成深部软岩大变形的要因。李术才等<sup>[8]</sup>研究了深部巷道围岩分区破裂化现象,发现靠近巷道第1个分区围岩的碎裂程度最严重,对围岩变形影响最明显。黄炳香等<sup>[9]</sup>、康红普等<sup>[10]</sup>认为偏应力和梯度应力引起围岩张拉劈裂和剪切滑动,导致锚固体出现结构性流变大变形。蔡美峰<sup>[11]</sup>、侯朝炯等<sup>[12]</sup>认为深部围岩失稳破坏主要与岩体强度和应力状态有关。何满潮<sup>[13]</sup>将软岩变形力学机制总结为物化膨胀型、应力扩容型及结构变形型。孙钧等<sup>[14]</sup>重点强调软岩大变形的非线性流变属性。

当前软岩巷道失稳机理的研究聚焦于大变形岩体的运动破坏模式,其主要考虑单一应力条件下裂隙岩体沿薄弱面的运动。实际上,受高地压和强扰动叠加影响,深部开挖岩体应力重分布是多元应力

的复合力学问题<sup>[15]</sup>。同时,上述研究支护围岩采用常规泊松材料 PR(Poisson's Ratio)锚杆(索),其延伸率较低,软岩巷道出现大变形时,材料受力接近或达到其屈服强度会发生颈缩而产生破断,从而导致支护失效。因此,支护材料在对围岩施加高强支护的同时需适应围岩的大变形运动。

基于恒阻高预应力 NPR(Negative Poisson's Ratio)锚索高强高韧的力学特性,为充分发挥岩体三轴强度并调动深部围岩自承力,郭志彪等<sup>[16]</sup>、HE等<sup>[17]</sup>提出了适用于深部大变形岩体的开挖补偿法。该方法考虑了开挖岩体切向应力  $\sigma_1$  和径向应力  $\sigma_3$  的演变,通过对围岩进行高应力补偿,使之达到近似未开挖状态,实现围岩自稳。目前,针对补偿支护基本思想、主要内涵和现场应用的研究多集中在隧道工程,在采矿领域的研究相对较少。郭志彪等<sup>[16]</sup>提出了控制深部软岩动压巷道的补偿技术体系。HE等<sup>[17]</sup>阐述了补偿支护的基本思想,介绍了该方法的关键技术和支护原理,最终在木寨岭和昌宁软岩隧道成功应用。HE等<sup>[18]</sup>分析了开挖效应和补偿效应,现场应用效果表明,补偿支护在控制深部隧道硬岩瞬时变形和软岩缓慢变形都具有良好适用性。陶志刚等<sup>[19]</sup>研究了软岩隧道开挖过程中补偿支护对围岩的控制效果。上述研究表明,补偿支护能有效控制深部高应力软岩大变形灾害,但目前针对补偿支护机理的研究多从定性角度出发,未建立相应的力学模型进行理论分析,并且上述研究主要从数值模拟和工程应用方面阐述该技术,相关结果缺乏模型试验的验证。

因此,综合采用理论分析、物理模型试验、数值模拟和现场工程应用的研究方法,建立了深部高应力软岩巷道的围岩力学模型和支护力学模型,研究

了开挖岩体  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  的变化规律并揭示了围岩的支护效应。同时,考虑了开挖岩体  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  演变对裂隙扩展的双重影响,探究补偿支护和常规支护围岩的裂隙场、位移场和应力场的时空演化规律和相应的失稳机理,并通过数值模拟和工程实践分析了补偿支护技术在深部高应力软岩巷道稳定性控制中的应用效果。

## 1 工程地质背景

小康煤矿 S2N7 工作面埋深 600 m,煤层厚度

6.5 m,顶板油页岩厚度 36.5 m,底板粉砂岩厚度 10 m,水平地应力 22.76 MPa,垂直地应力 18.07 MPa,各岩层物理力学参数见表 1。常规支护巷道采用“锚喷网索+钢拱架+木样”的联合支护形式。锚索为常规高强度钢绞线,实测预紧力 100 kN。锚杆为等强螺纹钢锚杆。钢拱架采用 36U 型钢制作,通过木样紧密接触围岩。外喷混凝土强度等级为 C20,厚度 300 mm。补偿支护巷道为马蹄形,采用恒阻高预应力 NPR 锚索支护顶板,预紧力 300 kN。支护设计如图 1 所示。

表 1 岩石物理力学参数

Table 1 Physical mechanical parameters of rock strata

岩性	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
煤体	1 363	11.6	0.48	5.8	2.41	46.8	0.11
油页岩	2 433	16.8	0.95	6.3	1.58	33.7	0.13
粉砂岩	2 242	23.2	2.72	8.8	1.53	47.3	0.18

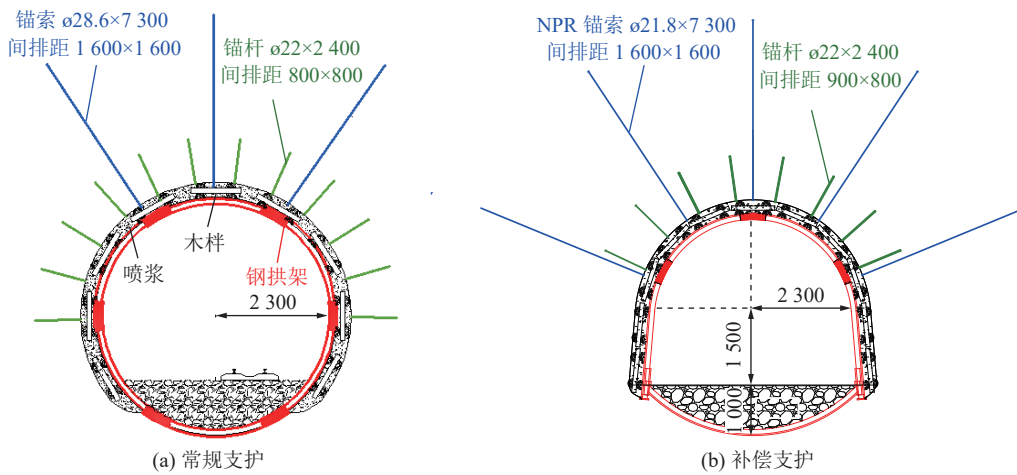


图 1 巷道支护设计

Fig.1 Roadway support design

## 2 围岩开挖力学分析

### 2.1 围岩力学模型

巷道开挖瞬间,围岩仍处于弹性状态,基于弹性力学的平面应变假设和叠加原理,将开挖瞬间围岩力学模型分解为垂直应力围岩力学模型和水平应力围岩力学模型,则围岩内任一点  $M$  的受力可确定,如图 2 所示。

由文献 [20] 可知,  $P_v$  作用下围岩  $M$  点的  $\sigma_3^a$  和  $\sigma_1^a$  分别为

$$\sigma_3^a = \frac{P_v}{2} \left[ \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right) - \left( 1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right] \quad (1)$$

$$\sigma_1^a = \frac{P_v}{2} \left[ \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) + \left( 1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (2)$$

$P_h$  作用下围岩  $M$  点的  $\sigma_3^b$  和  $\sigma_1^b$  为

$$\sigma_3^b = \frac{P_h}{2} \left[ \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + \left( 1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right] \quad (3)$$

$$\sigma_1^b = \frac{P_h}{2} \left[ \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \left( 1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (4)$$

则开挖瞬间原岩应力作用下围岩  $M$  点的  $\sigma_3$  和  $\sigma_1$  分别为

$$\sigma_3 = \frac{P_h + P_v}{2} \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{P_h - P_v}{2} \left( 1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \quad (5)$$

$$\sigma_1 = \frac{P_h + P_v}{2} \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{P_h - P_v}{2} \left( 1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (6)$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_1^a$ 、 $\sigma_1^b$  分别为状态 I、II、III 条件下围岩

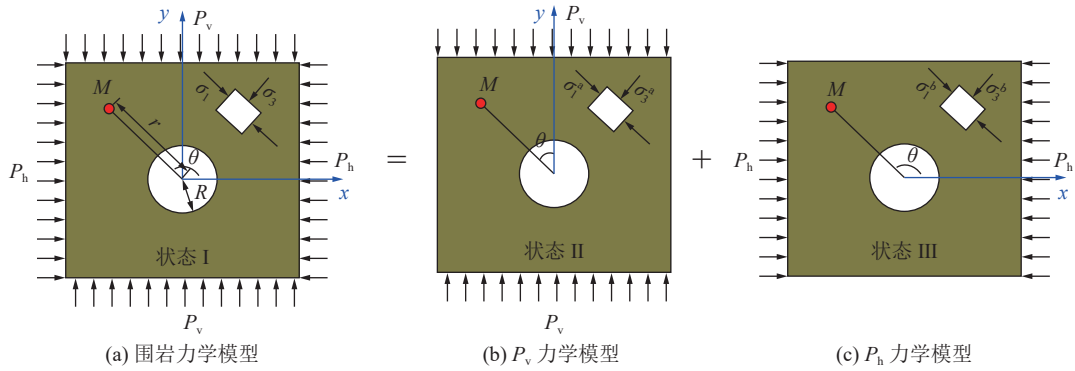


图 2 开挖瞬间围岩力学模型  
Fig.2 Mechanical model of surrounding rock excavation

的切向应力, MPa;  $\sigma_3$ 、 $\sigma_3^a$ 、 $\sigma_3^b$ 分别为状态 I、II、III 条件下围岩的径向应力, MPa;  $r$ 为  $M$ 点距巷道中心的距离, m;  $\theta$ 为  $M$ 点的坐标角, ( $^\circ$ );  $R$ 为巷道半径, m;  $P_v$ 为围岩垂直应力, MPa;  $P_h$ 为围岩水平应力, MPa。

已知围岩侧压系数  $\lambda=P_h/P_v$ , 则式(5)、式(6)可简化为

$$\sigma_3 = P_v \left[ \frac{1+\lambda}{2} \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{1-\lambda}{2} \left( 1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right] \quad (7)$$

$$\sigma_1 = P_v \left[ \frac{1+\lambda}{2} \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{1-\lambda}{2} \left( 1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (8)$$

假设围岩处于静水压力条件( $\lambda=1$ ), 则式(7)、式(8)可进一步简化为

$$\sigma_3 = P_v \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \quad (9)$$

$$\sigma_1 = P_v \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \quad (10)$$

则巷道边缘( $r=R$ )静水压力下围岩的  $\sigma_3$  和  $\sigma_1$  为

$$\sigma_3 = 0 \quad (11)$$

$$\sigma_1 = 2P_v \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可知, 静水压力条件下, 开挖瞬间巷道边缘  $\sigma_3$  降为 0,  $\sigma_1$  变为原岩应力的 2 倍。因此, 其应力重分布是多元应力的复合作用问题。

### 2.2 支护力学模型

在上述分析的基础上, 建立了弹性状态下围岩支护力学模型, 如图 3 所示。将围岩支护力学模型分解为支护力学模型和围岩力学模型。

对开挖岩体进行支护后, 原岩应力作用下围岩  $M$ 点的  $\sigma_r$  和  $\sigma_\theta$  分别为

$$\sigma_r = P_v \left[ \frac{1+\lambda}{2} \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{1-\lambda}{2} \left( 1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right] + P \frac{R^2}{r^2} \quad (13)$$

$$\sigma_\theta = P_v \left[ \frac{1+\lambda}{2} \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{1-\lambda}{2} \left( 1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] - P \frac{R^2}{r^2} \quad (14)$$

式中:  $\sigma_\theta^b$ 、 $\sigma_\theta^a$ 、 $\sigma_\theta$ 分别为状态 IV、V、VI 条件下围岩的切向应力, MPa;  $\sigma_r^b$ 、 $\sigma_r^a$ 、 $\sigma_r$ 分别为状态 IV、V、VI 条件下围岩的径向应力, MPa;  $P$ 为支护对巷道表面的作用力, MPa。

则巷道边缘( $r=R$ )静水压力下围岩的  $\sigma_r$  和  $\sigma_\theta$  分别为

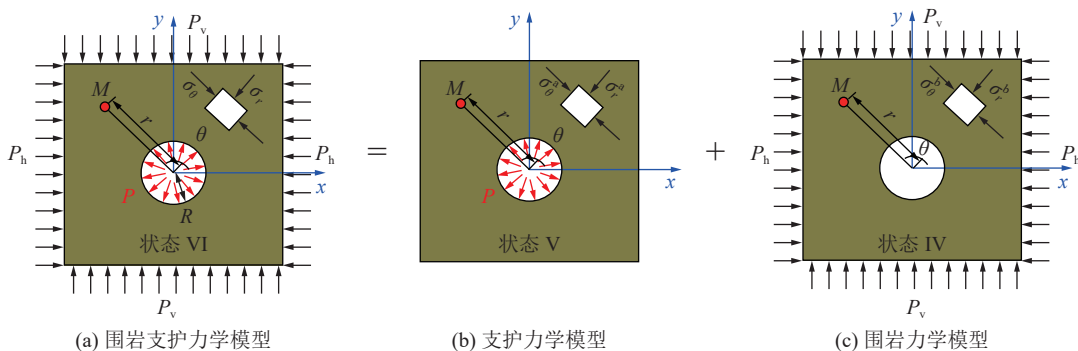


图 3 围岩支护力学模型  
Fig.3 Mechanical model of surrounding rock support

$$\sigma_r = P \quad (15)$$

$$\sigma_\theta = 2P_v - P \quad (16)$$

由此可知,静水压力条件下,对开挖岩体进行支护后,巷道边缘 $\sigma_3$ 为围岩的支护阻力, $\sigma_1$ 随支护阻力的增加而降低。因此,为实现深部高应力软岩巷道稳定,应及时对开挖岩体施加高预紧力支护,从而提高岩体 $\sigma_3$ 并降低 $\sigma_1$ ,进而补偿开挖后围岩损失的应力。

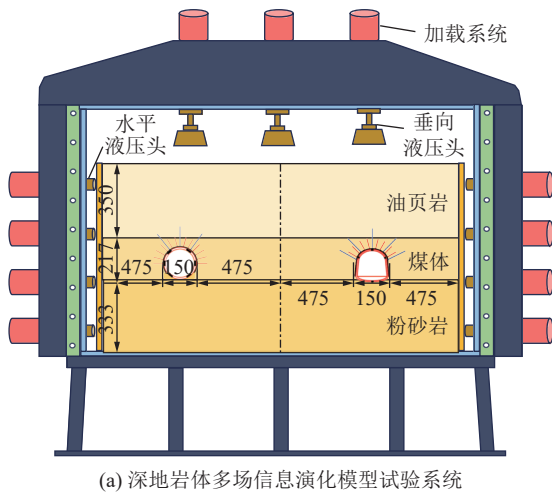
### 3 物理模型试验分析

#### 3.1 模型试验方案

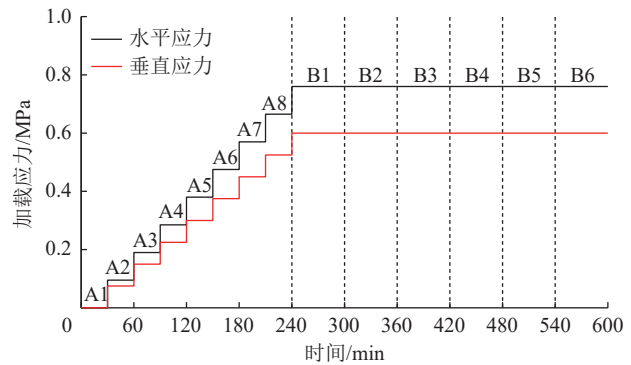
1) 模型试验装置及加载方案。模型试验采用中国矿业大学(北京)自主研发的深地岩体多场信息演化装置,主要用于模拟深部高地应力下巷道围岩破裂演化过程,通过分析围岩应力演变过程中的多场

信息,获得深部围岩致灾的演化规律和内在机制。如图4a所示,其规格(长×宽×高)为2 200 mm×1 200 mm×400 mm,主要由液压加载系统、伺服系统及控制系统组成。试验台最大载荷可达1 000 kN,通过11个加载头对模型施加作用力,最大行程达260 mm(垂直)和200 mm(水平),垂直和水平方向均可经伺服系统实现单向或双向分级加载。

根据试验设备尺寸与边界效应,确定几何相似比和应力相似比均为30,设置容重、泊松比、应变、内摩擦角及密度相似比为1。选取河砂、石灰、石膏和水为相似材料,通过调整不同材料的配比制作强度符合要求的各岩层材料。最终确定油页岩的砂、灰、膏、水的质量比为100:8:6:10,煤层的砂、灰、膏、水的质量比为100:7:7:10,粉砂岩的砂、灰、膏、水的质量比为100:9:9:10。



(a) 深地岩体多场信息演化模型试验系统



(b) 模型加载过程

图4 模型装置及加载过程

Fig.4 Model device and loading process

根据相似理论的基本原理<sup>[21]</sup>,模型水平边界应力为0.76 MPa,垂直边界应力为0.6 MPa。基于试验装置的加载精度,伺服系统按设定比例逐级加载直至形成与工程原型相似的应力场<sup>[22-23]</sup>。其中,水平加载梯度0.095 MPa,垂直加载梯度0.075 MPa。加载阶段共进行8次(A1~A8),为保证模型内部拥有充分的反应时间,每次加载完毕后稳压30 min。模型加载到预定压力后保持恒定,稳压状态共划分6个阶段(B1~B6),每阶段60 min,加载过程如图4b所示。

2) 模型支护方案。常规支护和补偿支护的结构如图5所示。NPR锚索具有高预紧力、大伸长量和高恒阻力等优点,已广泛应用于深部软岩工程<sup>[24-26]</sup>。NPR锚索和钢拱架均使用聚四氟乙烯材料,通过3D

打印技术制成。模型钢拱架与原型钢拱架均分为6段,每段模型钢梁通过铁片配合螺丝螺母组装成完整拱架。模型钢拱架钢梁之间可相互错动,能随围岩共同变形而实现可缩。模型NPR锚索通过旋转螺母施加预紧力,通过调节套筒与锥体尺寸以达到设计恒阻力(二者之间摩擦力)。采用 $\phi 2.0$  mm×80 mm铝棒模拟PR锚杆。使用柔性钢丝绳模拟钢绞线,PR锚索钢丝绳规格为 $\phi 1.0$  mm×243 mm,NPR锚索钢丝绳规格为 $\phi 0.8$  mm×243 mm。

通过拉力试验机对各支护构件的力学性能进行测试和验证,以确保其在强度及变形特性上与工程原型相符,如图6所示。拉伸试验表明,模型NPR锚索恒阻力为25.1~27.3 N,伸长量60 mm。模型钢梁抗拉强度为44 MPa,伸长率为8%。原型NPR锚

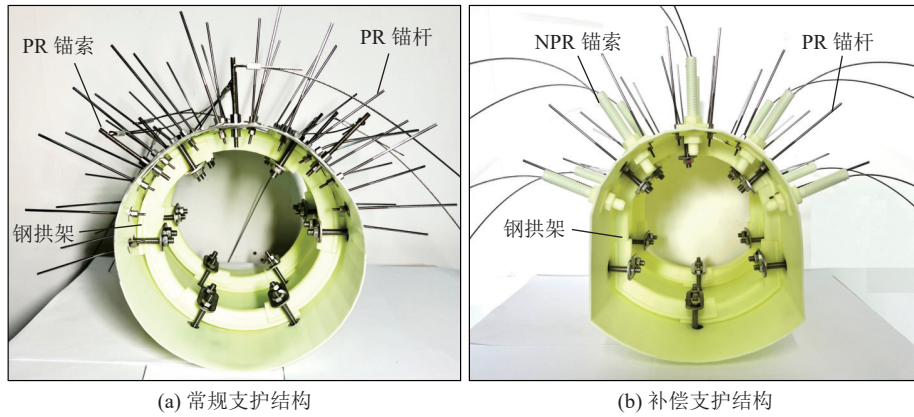
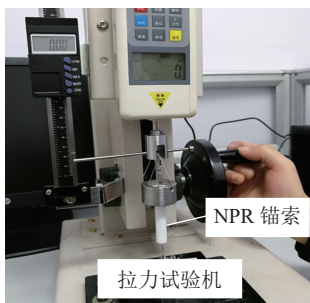


图 5 模型支护结构

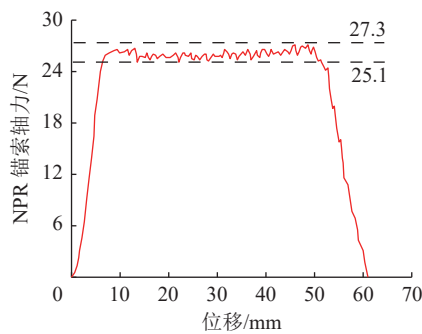
Fig.5 Model supporting structure

索恒阻力是 350 kN, 则模型 NPR 锚索恒阻力理论值为 13 N。基于等效原则<sup>[27]</sup>, 模型试验中 1 根 NPR 锚索约代替 2 根原型 NPR 锚索。因此, 补偿支护设置 4 排模型 NPR 锚索代替 8 排原型 NPR 锚索。同理,

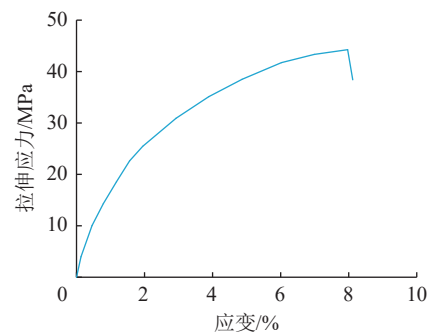
常规支护设置 6 排模型 PR 锚索代替 8 排原型 PR 锚索。采用 6 排 PR 锚杆代替 15 排原型 PR 锚杆。基于抗弯刚度相似准则<sup>[28]</sup>, 模型试验中均匀设置 4 个钢拱架。支护结构采用预埋法提前布置在模型中。



(a) 拉力试验机



(b) NPR 锚索拉伸



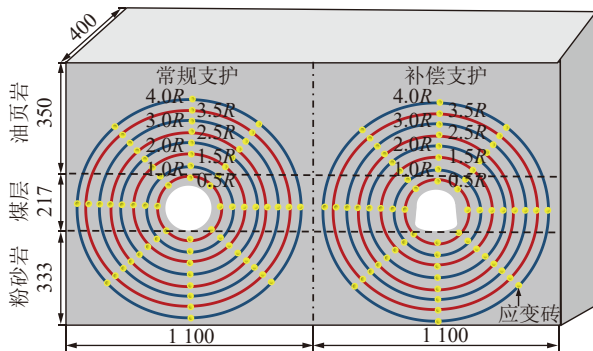
(c) 模型钢拱架拉伸曲线

图 6 静力拉伸测试

Fig.6 Static tensile test

3) 模型监测方案。模型监测方案及系统如图 7 所示。模型试验的数据采集系统可实现围岩应力、锚杆/索轴力、模型表面位移场及高速摄像等多源信息的同步收集, 进而表征围岩内部损伤及各物理场的变化特征。不同支护模式的巷道围岩内均布置 8

条测线, 呈放射状排列, 每条测线上布置 8 个测点, 间距为 0.5 倍的巷道半径, 模型内共有 128 个围岩应力测点。通过监测锚杆/索轴力以分析常规支护和补偿支护的支护效果, 采用数字散斑技术进行非接触式位移测量。



(a) 围岩应力监测



(b) 监测系统

图 7 物理模型应力位移监测

Fig.7 Stress and displacement monitoring of physical model

### 3.2 围岩裂隙场分析

为实现对围岩裂隙长度和碎胀破裂区域的定量统计,从而进一步深化裂隙结构特征分析,对拍摄的特定时刻围岩变形照片进行计算机视觉处理。图 8 中破坏区是指在模型内部应力场驱动下,破裂岩块沿裂隙面以错动、滑移和翻转等形式运动造成围岩大变形且承载力几乎丧失的区域。常规支护围岩裂隙扩展如图 8 所示。模型加载到设计应力时,软岩巷道的底角和肩部率先萌生微观裂隙(B1)。之后,底角裂隙除向深部传播外,开始向帮部延伸,而肩部裂隙则开始向拱顶和帮部发展和传递(B2)。底角和肩部的裂隙在模型内部应力场作用下逐渐贯通,围

岩内形成一个封闭不规则的椭圆裂隙带(B3)。随试验的进行,围岩内产生众多新裂隙,同时贯通的微观裂隙张开度增加而发育成宏观裂隙。此时,浅部围岩强度衰减,且位移进一步增加,肩部和底角围岩出现小范围破坏(B4)。之后,裂隙在载荷作用下持续张开、纵深延长,深部围岩开始出现损伤。同时,浅部宏观裂隙发生滑移和错动而造成围岩开裂,开裂岩块沿破裂面运动形成更深更广范围的破坏(B5)。当浅部围岩进入峰后破坏状态,岩体承载力几乎丧失,围岩破碎程度加剧而产生碎胀变形,深部围岩出现微观裂隙而产生扩容变形(B6)。

补偿支护围岩裂隙扩展如图 9 所示。模型加载

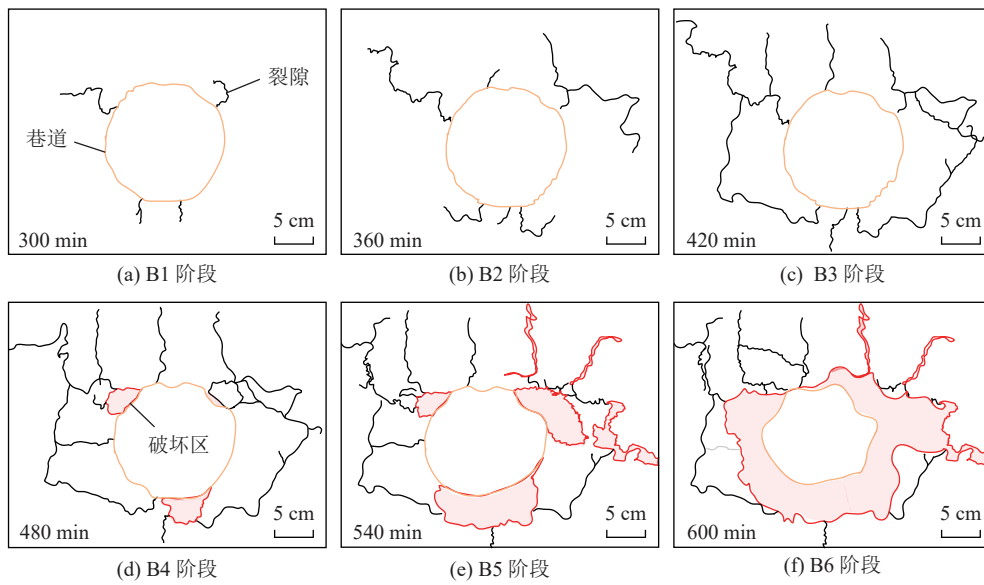


图 8 稳压状态常规支护围岩裂隙扩展

Fig.8 Fissures propagation of surrounding rock in conventional support under stable pressure

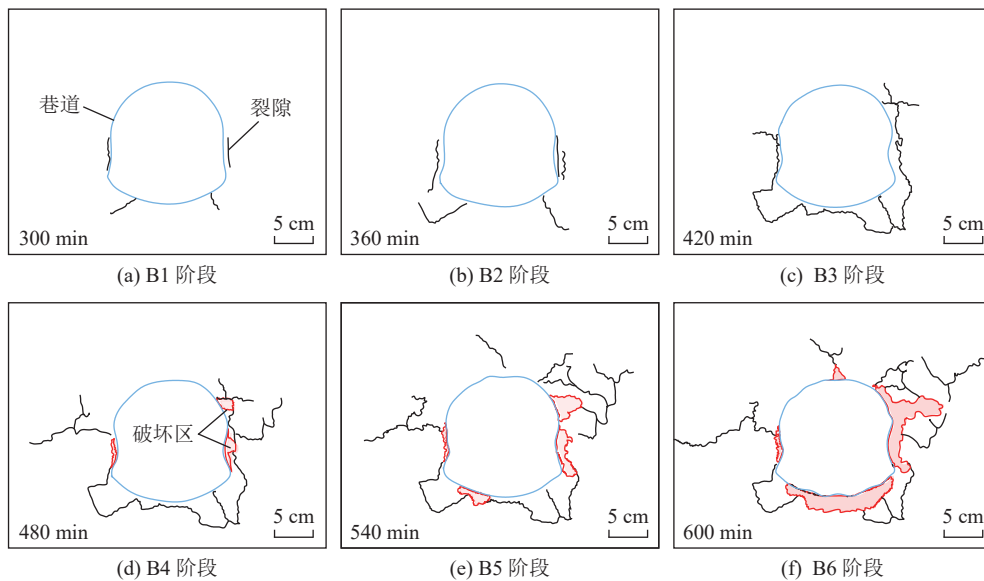


图 9 稳压状态补偿支护围岩裂隙扩展

Fig.9 Fissures propagation of surrounding rock in compensated support under stable pressure

到原岩应力初期,软岩巷道两帮和底角的微观裂隙首先被激活,而顶板在高预应力 NPR 锚索支护下暂未出现裂隙(B1)。随载荷持续作用,微观裂隙逐渐向纵深扩展(B2)。在 B3 阶段,肩部开始出现裂隙,此阶段肩部、帮部和底板的裂隙随围岩形变逐渐贯通,但此时拱顶仍保持完整。模型加载到 B4 状态时,围岩内裂隙的迹长和张开度持续增加,浅部岩体劣化,帮部和肩部出现张拉破坏。破坏区随模型加载不断扩大,同时,裂隙也向深部拓展,此阶段拱顶开始出现裂隙(B5)。在 B6 阶段,拱顶出现轻微破坏,帮部和底板岩体小范围破裂膨胀。

深部高应力软岩巷道围岩裂隙场时空演化可划分成 6 个阶段:裂隙萌生阶段(B1)、裂隙扩展阶段(B2)、裂隙贯通阶段(B3)、浅部围岩破坏阶段(B4)、深部围岩扩容变形阶段(B5)、围岩碎胀扩容阶段(B6)。常规支护围岩裂隙首先在底角和肩角萌生,补偿支护则在帮部和底角率先产生裂隙。同时,补偿支护围岩破坏范围和裂隙发育程度显著低于常规支护,表明补偿支护能提高岩体承载力,抑制裂隙产生和发展,从而降低围岩损伤和破坏。围岩变形相

关统计见表 2。与常规支护相比,补偿支护围岩破裂碎胀面积减少 88.3%,巷道面积增加 36.8%,裂隙长度减少 11.0%。

表 2 不同支护围岩变形统计

Table 2 Deformation statistics of different supporting surrounding rock

支护模式	裂隙长度/ mm	碎胀面积/ mm <sup>2</sup>	碎胀周长/ mm	巷道面积/ mm <sup>2</sup>
常规支护	1 167	38 860	1 824	12 980
补偿支护	1 039	4 550	883	17 760

### 3.3 围岩位移场分析

常规支护围岩位移场如图 10 所示。围岩在 B1 阶段出现轻微变形,位移 0.6 mm,主要发生在肩部和底角。在 B2~B3 阶段,围岩位移随载荷持续输出而增加,变形范围扩大到整个顶底板。该阶段顶底板变形活跃,相对位移 27 mm,围岩整体性较好。围岩顶底板位移在 B4 阶段出现激增,约为 B3 的 2.1 倍。围岩在 B5~B6 阶段变形量较大,顶底板移近量 76 mm,帮部缩量 62 mm。

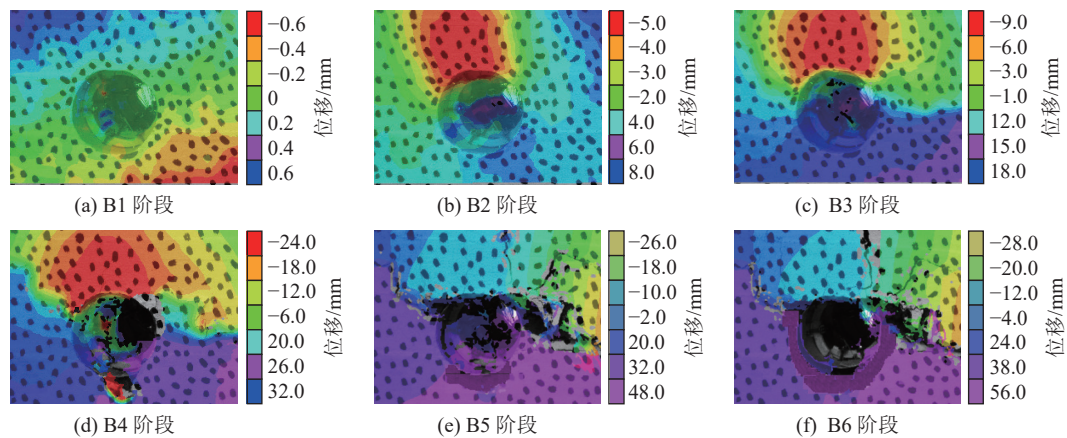


图 10 稳压状态常规支护围岩位移

Fig.10 Displacement of surrounding rock in conventional support under stable pressure

补偿支护巷道的位移场如图 11 所示。在 B1~B2 阶段,顶板未出现变形,帮部和底板出现轻微变形。围岩位移在 B3~B5 阶段变化较为均匀,底板和帮部位移明显高于顶板。随载荷的持续作用,顶板位移也发生变化,肩部位移开始高于拱顶。围岩在 B6 阶段出现显著变形,顶底板移近 24 mm,两帮缩近 16 mm,分别较常规支护降低 68.4%、78.9%,平均降低 73.7%。

### 3.4 围岩应力场分析

1) 径向应力时空演化规律。选取代表性的顶板、帮部和底板数据以分析不同支护围岩  $\sigma_3$  演化,如

图 12 所示。常规支护围岩  $\sigma_3$  在浅部(0.5R~1.0R)发生衰减,在深部(1.5R~4.0R)则保持稳定。以帮部围岩  $\sigma_3$  进行分析,其在 0.5R 处由 0.28 MPa 降低为 0.16 MPa,在 1.0R 处由 0.63 MPa 降低为 0.54 MPa,在 1.5R~4.0R 稳定在 0.66 MPa。顶板 0.5R 处  $\sigma_3$  衰减 57.6%,帮部衰减 75.8%,底板衰减 100%。补偿支护围岩  $\sigma_3$  在 0.5R 处发生衰减,1.0R~4.0R 保持稳定。帮部围岩  $\sigma_3$  在 0.5R 处由 0.42 MPa 降低为 0.31 MPa,在 1.0R~4.0R 稳定在 0.66 MPa。顶板、帮部和底板 0.5R 处  $\sigma_3$  分别衰减 21.2%、53.0%、87.9%。 $\sigma_3$  呈先衰减后稳定的趋势,但衰减程度与支护模式有关,补

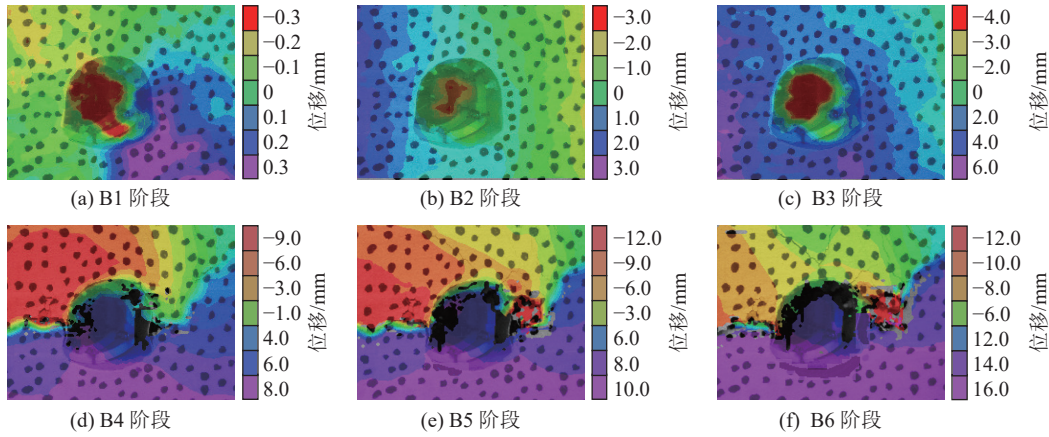


图 11 稳压状态补偿支护围岩位移

Fig.11 Displacement of surrounding rock in compensated support under stable pressure

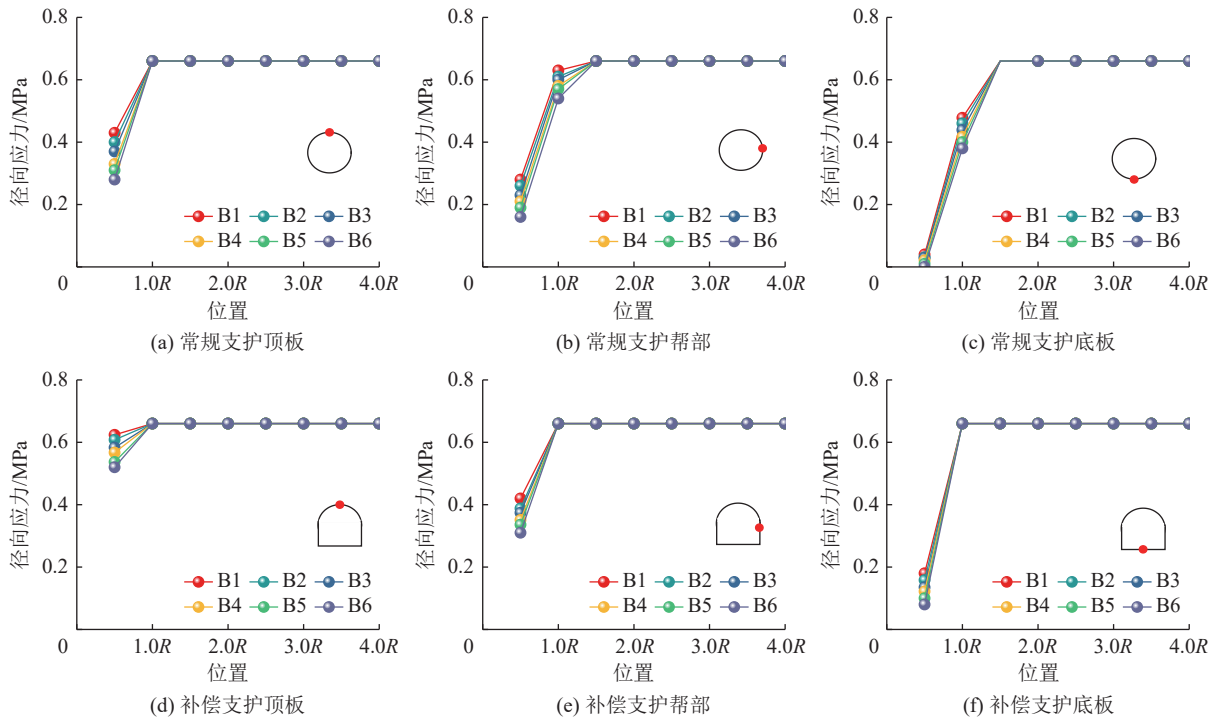


图 12 不同时刻围岩径向应力

Fig.12 Radial stress of surrounding rock at different time

偿支护 0.5R 处  $\sigma_3$  衰减程度较常规支护降低 35.0%，应力值提高 68.3%。开挖围岩  $\sigma_3$  损失导致浅部围岩向临空面运动而产生微观裂隙。随裂隙的传播，浅部岩体承载力降低， $\sigma_3$  发生衰减。深部岩体承载力受裂隙影响较小， $\sigma_3$  保持稳定。

如图 13 所示，不同支护软岩巷道  $\sigma_3$  重分布存在差异。常规支护巷道纵深 0.5R 处，底角和底板的  $\sigma_3$  为 0，表明该范围内岩体裂隙发育，已发生应力松弛。由于锚杆/索的应力补偿作用，该处顶板、肩部和帮部  $\sigma_3$  平均恢复到原始状态的 32.4%。巷道越深处围岩受裂隙影响越小，其自承能力越高。因此，巷道 1R 处  $\sigma_3$  得到强化，肩部和顶板的  $\sigma_3$  已基本恢复原岩

状态，帮部、底角和底板处  $\sigma_3$  平均恢复了 69.1%。 $\sigma_3$  在 1.5R 处完全恢复原岩状态。

补偿支护巷道各区域  $\sigma_3$  快速响应。底板和底角  $\sigma_3$  在 0.5R 处均得到一定补偿，平均恢复 23.2%。该处顶板、肩部和帮部平均恢复 61.5%， $\sigma_3$  恢复程度较常规支护提高约 2 倍。 $\sigma_3$  在 1R 处完全恢复原岩状态，扰动范围较常规支护缩小约 33%。补偿支护对围岩  $\sigma_3$  补偿强度高，能及时恢复岩体  $\sigma_3$ ，降低其扰动范围，进而限制浅部微观裂隙的萌生激活。

2) 切向应力时空演化规律。 $\sigma_1$  演化如图 14 所示。常规支护围岩  $\sigma_1$  峰值逐渐降低且向深部迁移，顶板、帮部和底板 B1 阶段  $\sigma_1$  峰值平均为原岩应力

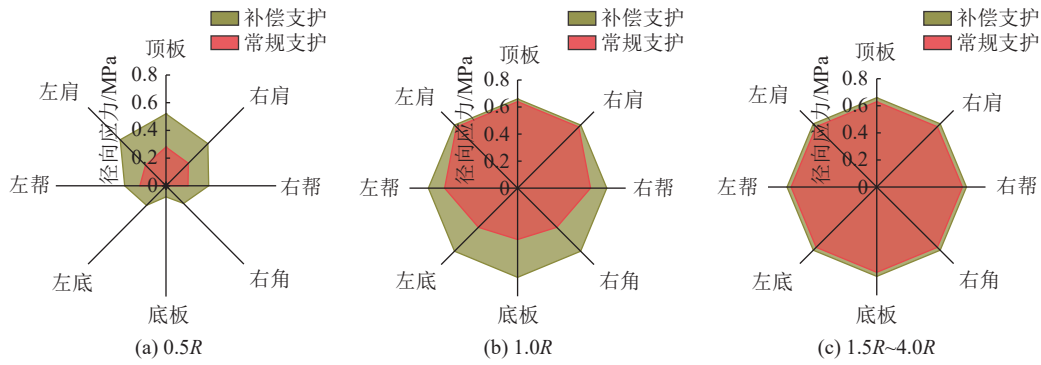


图 13 不同深度围岩径向应力

Fig.13 Radial stress of surrounding rock at different depth

的 2.2 倍。补偿支护围岩  $\sigma_1$  峰值逐渐降低但未发生迁移,表明围岩劣化程度低,其强度始终高于  $\sigma_1$ 。其顶板、帮部和底板 B<sub>1</sub> 阶段  $\sigma_1$  峰值平均为原岩应力的 1.8 倍,较常规支护下降 18.2%。开挖岩体  $\sigma_1$  集中,

促使裂隙拓宽且延伸,导致岩体强度进一步降低。当  $\sigma_1$  峰值高于围岩屈服强度时,其为寻求新的应力平衡不断向深处迁移。在转移过程中岩体的残余强度可抵抗一部分  $\sigma_1$ ,因此,峰值应力逐渐降低。

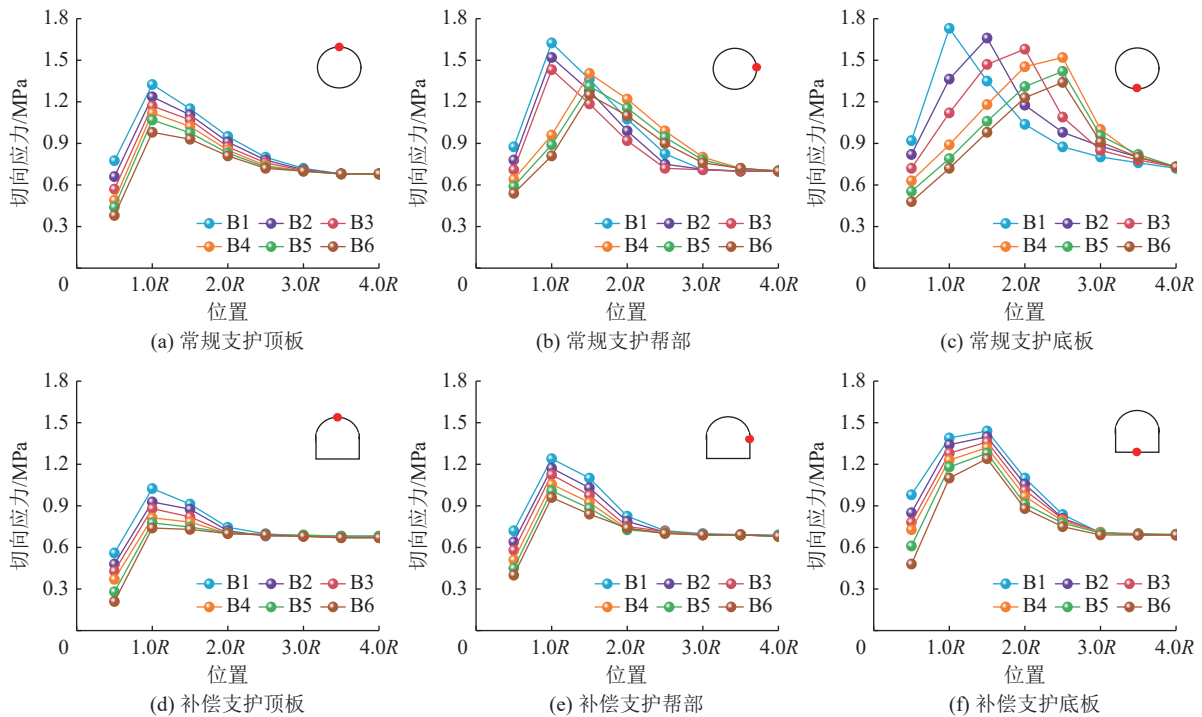


图 14 不同时刻围岩切向应力

Fig.14 Tangential stress of surrounding rock at different time

如图 15 所示,软岩巷道  $\sigma_1$  演化具有时空特性。常规支护顶板  $\sigma_1$  在 1.0R 达到峰值,而帮部、肩部、底角及底板分别在 1.5R、2.0R、2.0R 及 2.5R 达到峰值。补偿支护顶板、肩部及帮部  $\sigma_1$  分别在 1.0R 达到峰值,其底板和底角则在 1.5R 达到峰值。因此,补偿支护能限制  $\sigma_1$  向深部扩展,降低裂隙发育范围。

不同支护软岩巷道  $\sigma_1$  集中程度不同。常规支护围岩整体  $\sigma_1$  峰值位于 2.0R 处,为原岩应力的 1.68 倍。补偿支护围岩整体  $\sigma_1$  在 1.0R 处达到峰值,为原岩应

力的 1.36 倍,较常规支护降低 19%。补偿支护围岩整体  $\sigma_1$  在 3.0R 处基本稳定,而常规支护围岩在 4.0R 处才能实现基本稳定, $\sigma_1$  扰动范围降低约 25%。补偿支护削弱了围岩  $\sigma_1$ ,能显著降低  $\sigma_1$  集中,从而抑制裂隙持续张开,进而缩短围岩破坏区。

### 3.5 锚杆(索)轴力分析

如图 16a、图 16b 所示,模型加载阶段,补偿支护锚杆轴力上升速度快于常规支护,且其轴力较常规支护平均下降 16.9%(240 min)。在稳压阶段,常规

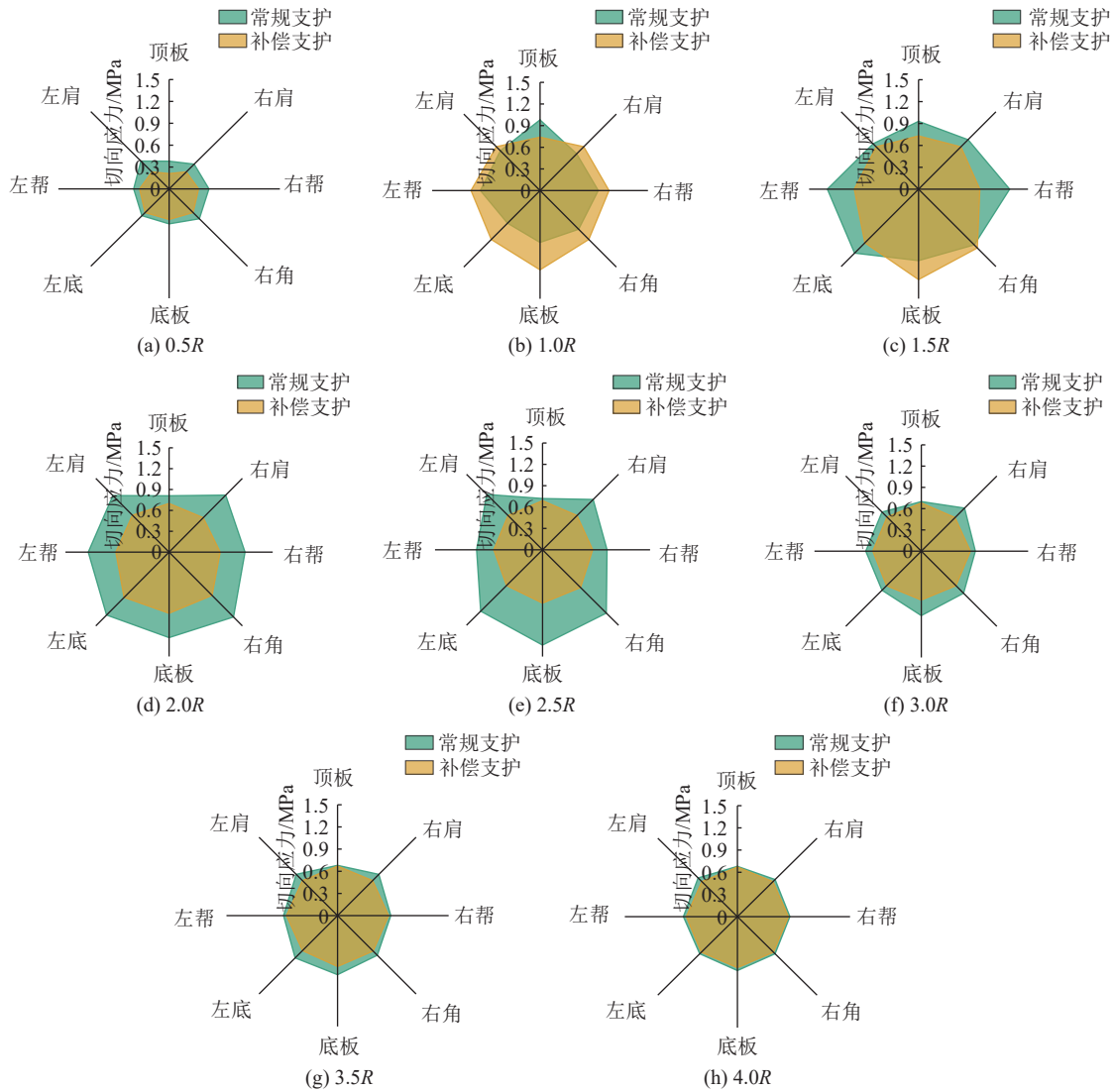


图 15 不同深度围岩切向应力

Fig.15 Tangential stress of surrounding rock at different depth

支护锚杆轴力不断增加,最终顶板和肩部锚杆失效而产生轴力突变。该阶段补偿支护锚杆轴力已基本平稳,表明补偿支护巷道浅部围岩形变小,锚杆受力较小。

如图 16c、图 16d 所示, NPR 锚索的预紧力为 PR 锚索的 3 倍,其轴力随围岩变形快速升高并实现恒阻(80 min),且轴力对称分布。PR 锚索由于预紧力低,轴力缓慢波动增加,170 min 时达到相对稳定状态。NPR 锚索轴力比 PR 锚索平均高 1.5 倍。因此, NPR 锚索能及时且高强度补偿围岩开挖损失的应力,快速恢复岩体的三向受力状态。PR 锚索对围岩提供低强度的应力补偿,岩体易进入非平衡态。

#### 4 深部高应力软岩巷道失稳机理分析

不同模式的围岩及支护变形如图 17 所示。宏观裂隙具体指开度大于 1 mm 的裂隙,微观裂隙具体

指开度小于 1 mm 的裂隙。常规支护巷道帮部、底板和肩部产生大范围破裂碎胀,碎裂岩块间的大量空隙迫使围岩向临空面膨胀而产生大变形。顶板由于 PR 锚索的应力补偿作用,其破坏程度减轻,但仍出现明显的宏观裂隙。围岩破裂碎胀范围超过锚杆长度,其锚固力大幅下降甚至丧失,难以控制浅部围岩位移。钢拱架底梁因剧烈底鼓发生破断而失效,部分钢梁出现撕裂和扭曲。补偿支护围岩破裂碎胀区域主要集中于底板和帮部,顶板在 NPR 锚索高应力补偿作用下产生了微观裂隙,但仍具有较强的完整性。补偿支护的锚杆长度超过围岩松动破坏范围,其锚固力能限制浅部围岩挠曲和离层。钢拱架随围岩变形产生错动,主要变形为底梁扭曲。NPR 锚索受力达到恒阻值,锥体明显滑动,应力补偿效果显著。

物理模型试验结果表明,岩体开挖后,围岩应力表现为径向卸压和切向增压。开挖岩体  $\sigma_3$  损失引起

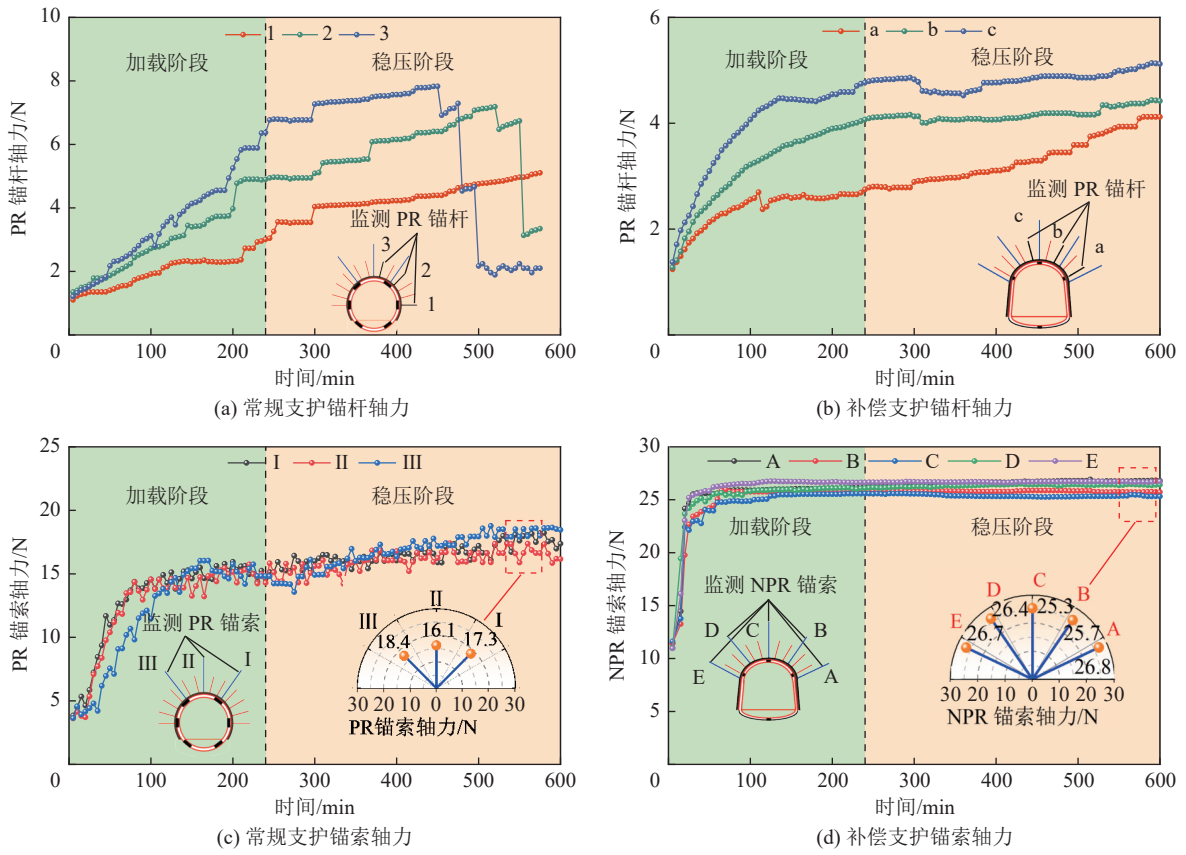


图 16 锚杆和锚索轴力曲线

Fig.16 Bolt and cable axial force curves



图 17 不同支护模式围岩及支护变形

Fig.17 Surrounding rock and support deformation under different supporting modes

浅部围岩萌生微观裂隙,并随张拉力持续作用而扩展贯通,导致围岩黏聚力降低。 $\sigma_1$ 集中促使微观裂隙持续张开且纵深延长,从而造成浅部围岩形成宏观裂隙的同时深部围岩产生损伤。在高地应力作用下,宏观裂隙发生错动,破裂岩块沿裂隙面的错动、滑移和翻转形成大量空隙,导致浅部围岩体积快速膨胀而产生碎胀变形,深部围岩出现微观裂隙则产生扩容变形。对开挖岩体支护后,补偿了围岩 $\sigma_3$ 并削弱 $\sigma_1$ 。PR 锚索对围岩进行低应力补偿, $\sigma_3$ 补偿程度低且 $\sigma_1$ 降低程度小,裂隙受其约束作用有限而不断发育,进而产生大面积碎胀破坏。NPR 锚索对围岩提供高应力补偿, $\sigma_3$ 补偿程度高且 $\sigma_1$ 大幅降低,裂隙受其约束作用明显,地应力与围岩自承力快速达到平衡,从而实现围岩自稳。

同时,常规支护和补偿支护围岩的破坏特征存在显著区别。与补偿支护相比,常规支护的应力补偿效应较弱,其浅部围岩受卸荷效应影响而导致 $\sigma_3$ 衰减程度高且 $\sigma_1$ 更加集中,当复合应力超过其抗拉强度后发生张拉破坏<sup>[29]</sup>。深部围岩 $\sigma_3$ 衰减程度及 $\sigma_1$ 集中程度降低,复合应力不足以造成张拉破坏而以压剪形式作用于围岩,因此,常规支护围岩破坏由浅部的张拉破坏向深部剪切破坏转变。补偿支护 NPR 锚索的应力补偿效应显著,浅部围岩 $\sigma_3$ 得到补偿且大幅削弱其 $\sigma_1$ ,复合应力超过其抗剪强度而发

生剪切破坏。因此,补偿支护围岩破坏以剪切滑移为主。

构建了摩尔圆分析模型,根据摩尔圆与摩尔库仑线的位置关系可以准确判断围岩状态,摩尔圆与摩尔库仑线接触代表围岩破坏,摩尔圆位于摩尔库仑线下方代表围岩稳定<sup>[16]</sup>。如图 18a 所示,开挖巷道未进行支护时,围岩 $\sigma_3$ 趋于 0,这一现象被称为开挖第一效应。同时, $\sigma_1$ 增大到原来 2 倍,这一现象被称为开挖第二效应。开挖第一效应使浅部围岩产生微观裂隙,开挖第二效应拓宽微观裂隙并产生新裂隙,因此,开挖效应导致围岩物化性质和宏观强度劣化而产生变形破坏。对开挖岩体支护后,围岩应力进行了动态调整。首先,围岩 $\sigma_3$ 得到补偿,这一现象被称为开挖补偿第一效应。其次,围岩 $\sigma_1$ 下降,这一现象被称为开挖补偿第二效应。低预应力 PR 锚索开挖补偿效应弱,无法有效约束微观裂隙的产生和发育,围岩承载能力不断降低,导致摩尔圆超过库仑摩尔线而导致支护失败,如图 18b 所示。高预应力 NPR 锚索具有较强的开挖补偿效应,能充分补偿 $\sigma_3$ 并削弱 $\sigma_1$ ,摩尔圆位于库仑摩尔线下方,软岩巷道处于稳定状态,如图 18c 所示。补偿支护能有效限制微观裂隙的剪切错动,控制浅部围岩变形。其次,充分调动深部岩体的自承力,将浅部锚杆锚固结构与深部岩体连接,形成深浅一体化高强度稳定支撑结构。

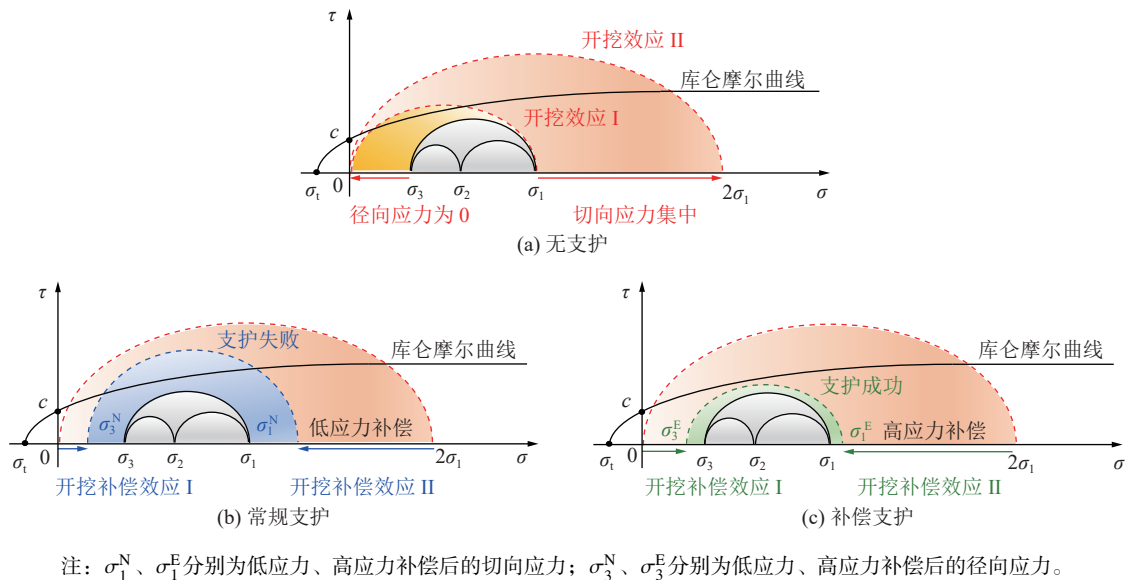


图 18 不同支护软岩巷道变形机理

Fig.18 Deformation mechanisms of soft rock roadways with different supports

## 5 现场工程应用

### 5.1 支护方案数值分析

为研究常规支护和补偿支护下围岩变形和支护

破坏特征,基于小康矿 S2N7 工作面地质条件建立的数值模型如图 19 所示。模型尺寸(长×宽×高)为 80 m×30 m×53 m,顶部施加 18.07 MPa 应力来模拟覆岩的重量,四周施加 22.76 MPa 水平应力,底部施

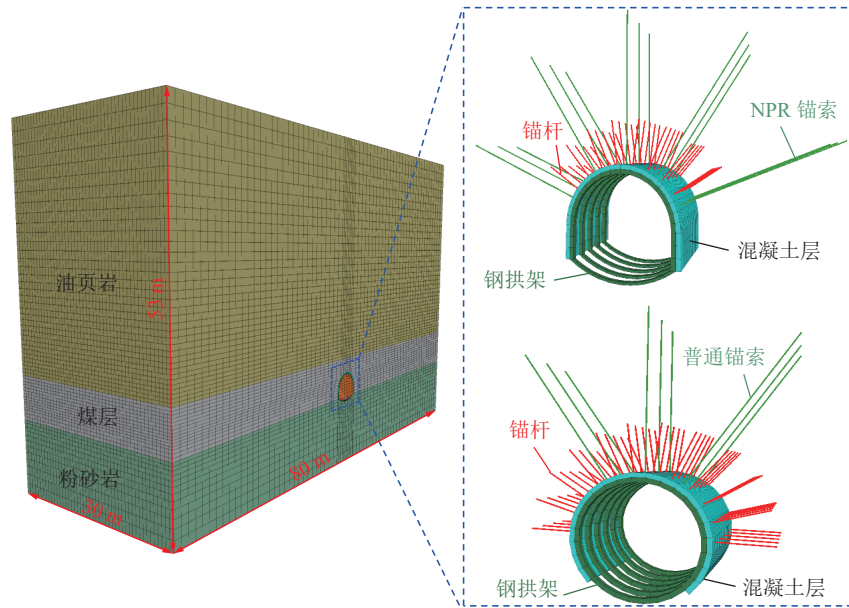


图 19 不同支护模式数值模型

Fig.19 Numerical model of different support modes

加位移约束。煤层及顶底板采用 Mohr-Coulomb 准则, 钢拱架采用弹性准则, 其弹性模量为 200 GPa, 泊松比 0.2。在岩层参数赋值时采用岩体地质强度指标 GSI 岩体分类方法进行相应的折减。

GSI 岩体分类方法具体转换式如式(17)一式(21)所示:

$$\frac{E_{m}}{E_i} = 0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + \exp[(60 + 15D - GSI)/11]} \quad (17)$$

$$\sigma_{c_{mass}} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)]}{2(1 + a)(2 + a)} \left(\frac{m_b}{4 + s}\right)^{a-1} \quad (18)$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (19)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (20)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (21)$$

式中:  $\sigma_{ci}$  为岩块的单轴抗压强度, MPa;  $E_i$  为岩块的弹性模量, GPa;  $\sigma_{c_{mass}}$  为岩体的单轴抗压强度, MPa;  $E_m$  为岩体的弹性模量, GPa;  $GSI$  为工程岩体强度指标;  $D$  为岩体损伤系数, 取 0.5;  $m_i$  为岩块的材料常数;  $m_b$ 、 $s$  和  $a$  分别为岩体的材料常数。折算后的各岩层及支护结构的物理力学参数见表 3、表 4。

不同支护模式下巷道位移云图如图 20 所示。数值模拟结果表明, 常规支护段软岩巷道顶底板移近量约 2 m, 补偿支护段软岩巷道顶底板移近量约 0.75 m, 较常规支护降低 62.5%。常规锚索由于预紧力小, 无法及时补偿围岩开挖损失的应力, 巷道易产生大变形破坏, 难以维持正常的安全需求。NPR 锚索的应力补偿作用显著, 高强度补偿了围岩应力, 能

表 3 岩层物理力学参数

Table 3 Physical mechanical parameters of rock strata

岩性	岩块		GSI	常数				岩体	
	$\sigma_{ci}$ /MPa	$E_i$ /GPa		$m_i$	$m_b$	$s$	$a$	$\sigma_{c_{mass}}$ /MPa	$E_m$ /GPa
油页岩	16.8	6.3	28	13	0.421 6	0.000 068	0.526	1.45	0.25
煤体	11.6	5.8	24	11	0.294 9	0.000 040	0.533	0.70	0.20
粉砂岩	23.2	8.8	36	18	0.854 5	0.000 197	0.515	2.78	0.53

表 4 支护结构物理力学参数

Table 4 Physical mechanical parameters of support structure

支护构件	横截面积/mm <sup>2</sup>	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	预紧力/kN	抗拉强度/MPa
锚杆	346	375	200	46	455
锚索	532	680	200	100	770
NPR 锚索	532	680	200	300	770

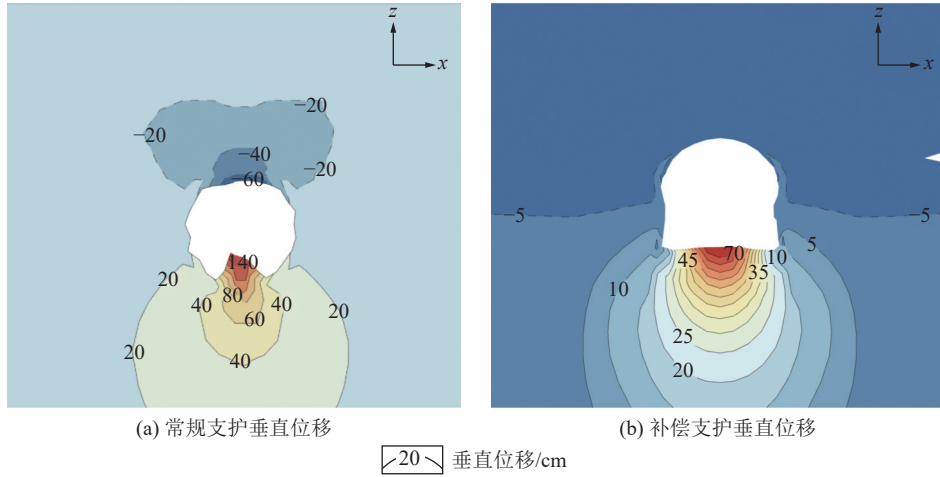


图 20 不同支护模式巷道垂直位移

Fig.20 Roadway vertical displacement of different support modes

有效控制软岩巷道围岩变形。

不同支护模式下钢拱架受力及变形如图 21 所示。常规支护下钢拱架底梁受剧烈底鼓影响呈“V”型破坏，顶梁几乎被压平，两帮钢梁产生明显收缩变形。在 NPR 锚索的补偿作用下，钢拱架顶梁几乎不变形，两帮钢梁发生轻微变形，底梁受底板围岩挤压

呈近水平状态。

### 5.2 现场监测

锚索轴力监测曲线如图 22 所示。常规锚索预紧力约 100 kN，其轴力呈现先升高(0~6 d)再降低(6~14 d)最终小幅波动变化(>14 d)的趋势。肩部常规锚索轴力大于顶板，当其轴力升高到 374 kN 时

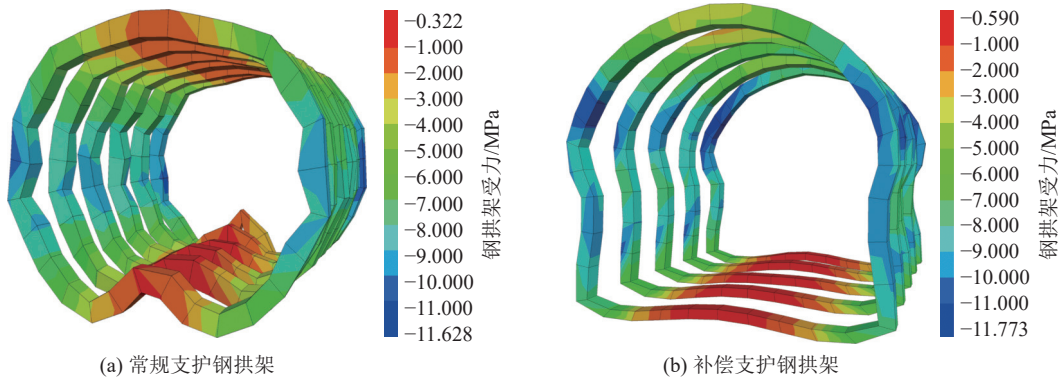


图 21 不同支护模式钢拱架受力及变形

Fig.21 Stress and deformation of steel arch in different supporting modes

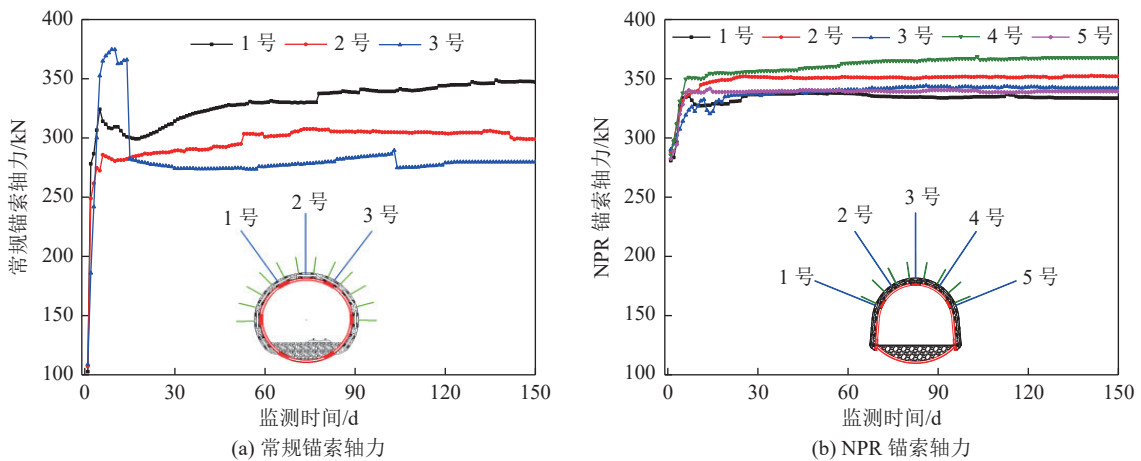


图 22 锚索轴力监测曲线

Fig.22 Cable axial force monitoring curves

会产生失效,锚固力出现大幅降低。NPR锚索预紧力约290 kN,其轴力呈现先快速增加(0~8 d)再缓慢增加(8~27 d)最终实现恒阻(>27 d),NPR锚索达到恒阻状态后其轴力仅出现轻微波动,最终稳定在333~367 kN。因此,NPR锚索通过对围岩施加高预紧力而实现高强度的应力补偿。

围岩变形监测曲线如图23所示。在整个监测

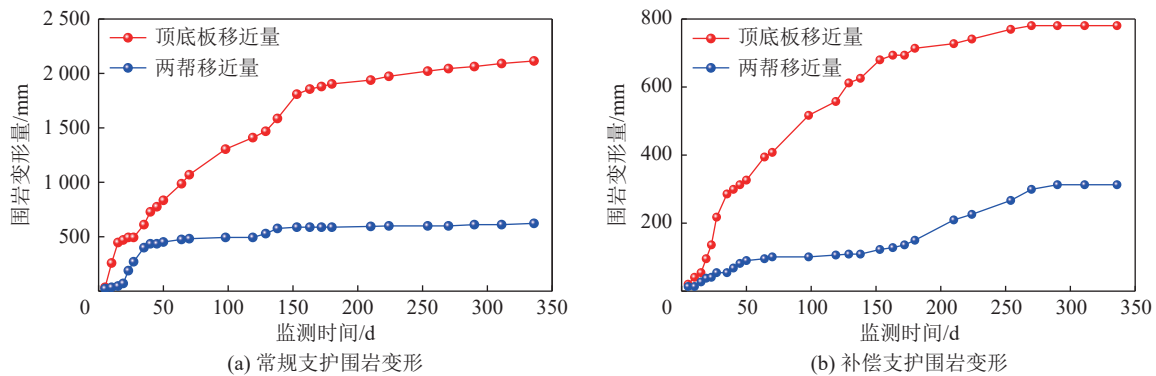


图23 围岩变形监测曲线

Fig.23 Deformation monitoring curve of surrounding rock

## 6 结 论

1) 基于弹性理论叠加原理,建立了深部高应力软岩巷道开挖瞬间的围岩力学模型和支护力学模型。理论分析结果表明,静水压力条件下,开挖瞬间巷道边缘 $\sigma_3$ 降为0, $\sigma_1$ 变为原岩应力的2倍,其应力重分布是多元应力的复合力学问题。对开挖岩体进行支护后,巷道边缘 $\sigma_3$ 为围岩的支护阻力, $\sigma_1$ 随支护阻力的增加而降低。

2) 补偿支护能显著提高围岩 $\sigma_3$ 并削弱 $\sigma_1$ 。与常规支护相比,补偿支护浅部围岩(0.5R) $\sigma_3$ 提高68.3%, $\sigma_1$ 峰值下降18.2%。围岩破裂碎胀面积减少88.3%,巷道面积增加36.8%,裂隙长度减少11.0%,围岩变形降低73.7%。补偿支护围岩 $\sigma_3$ 在0.5R处发生衰减,在1.0R~4.0R保持稳定,较常规支护围岩 $\sigma_3$ 衰减范围平均降低33%。围岩 $\sigma_1$ 在1.0R~1.5R达到峰值,较常规支护围岩 $\sigma_1$ 集中范围平均降低28.6%。

3) 开挖效应造成围岩径向卸压及切向增压,从而引发围岩萌生裂隙并持续扩展,导致其物化性质和宏观强度劣化而产生碎胀扩容变形。PR锚索预紧力低,开挖补偿效应弱,难以抑制裂隙的滑移和错动,导致围岩损伤开裂而产生大变形。NPR锚索对围岩施加高预紧力,高强度补偿围岩应力,有效限制裂隙的萌生和发育,进而控制围岩非连续变形。

4) 数值模拟和现场工程应用表明,补偿支护技

术能有效控制深部高应力软岩巷道围岩大变形。常规支护锚索轴力呈现先升高后降低最终波动变化的趋势,轴力始终未达到稳定状态。补偿支护NPR锚索预紧力是常规锚索的3倍,其轴力呈现先快速增加再缓慢增加最终实现恒阻的趋势,恒阻值保持在333~367 kN。与常规支护段相比,补偿支护段围岩变形平均降低约62%。

### 参考文献(References):

- [1] 何满潮. 深部建井力学研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 726-746.  
HE Manchao. Research progress of deep shaft construction mechanics[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 726-746.
- [2] 谢和平, 李存宝, 高明忠, 等. 深部原位岩石力学构想与初步探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 217-232.  
XIE Heping, LI Cunbao, GAO Mingzhong, et al. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 217-232.
- [3] 康永水, 耿志, 刘泉声, 等. 我国软岩大变形灾害控制技术与方法研究进展[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2035-2059.  
KANG Yongshui, GENG Zhi, LIU Quansheng, et al. Research progress on support technology and methods for soft rock with large deformation hazards in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(8): 2035-2059.
- [4] 靖洪文, 吴疆宇, 尹乾, 等. 结构体围岩变形破裂演化全过程力电磁声多源信息响应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(7): 1582-1598.

- JING Hongwen, WU Jiangyu, YIN Qian, et al. Experimental study on multi-source information response of force, electromagnetics and acoustics in the whole process of deformation and fracture evolution of structural surrounding rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(7): 1582–1598.
- [ 5 ] 邓鹏海, 刘泉声. 高应力软岩隧道破裂碎胀米级大变形机理研究[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(8): 225–239.
- DENG Penghai, LIU Quansheng. Study on meter-level large deformation mechanism of soft rock mass around tunnel with high in situ stress[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(8): 225–239.
- [ 6 ] 刘泉声, 邓鹏海, 毕晨, 等. 深部巷道软岩围岩破裂碎胀过程及锚喷-注浆加固 FDEM 数值模拟[J]. *岩土力学*, 2019, 40(10): 4065–4083.
- LIU Quansheng, DENG Penghai, BI Chen, et al. FDEM numerical simulation of the fracture and extraction process of soft surrounding rock mass and its rockbolt-shotcrete-grouting reinforcement methods in the deep tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(10): 4065–4083.
- [ 7 ] HOEK E. Big tunnels in bad rock[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(9): 726–740.
- [ 8 ] 李术才, 王汉鹏, 钱七虎, 等. 深部巷道围岩分区破裂化现象现场监测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(8): 1545–1553.
- LI Shucai, WANG Hanpeng, QIAN Qihu, et al. In-situ monitoring research on zonal disintegration of surrounding rock mass in deep mine roadways[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(8): 1545–1553.
- [ 9 ] 黄炳香, 张农, 靖洪文, 等. 深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 911–926.
- HUANG Bingxiang, ZHANG Nong, JING Hongwen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 911–926.
- [ 10 ] 康红普, 姜鹏飞, 黄炳香, 等. 煤矿千米深井巷道围岩支护-改性-卸压协同控制技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 845–864.
- KANG Hongpu, JIANG Pengfei, HUANG Bingxiang, et al. Roadway strata control technology by means of bolting-modification-destressing in synergy in 1 000 m deep coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 845–864.
- [ 11 ] 蔡美峰. 深部开采围岩稳定性与岩层控制关键理论和技术[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2020, 2(3): 5–13.
- CAI Meifeng. Key theories and technologies for surrounding rock stability and ground control in deep mining[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2020, 2(3): 5–13.
- [ 12 ] 侯朝炯, 王襄禹, 柏建彪, 等. 深部巷道围岩稳定性控制的基本理论与技术研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(1): 1–12.
- HOU Chaojiong, WANG Xiangyu, BAI Jianbiao, et al. Basic theory and technology study of stability control for surrounding rock in deep roadway[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(1): 1–12.
- [ 13 ] 何满潮. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [ 14 ] 孙钧, 钦亚洲, 李宁. 软岩隧道挤压型大变形非线性流变属性及其锚固整治技术研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2019, 39(3): 337–347.
- SUN Jun, QIN Yazhou, LI Ning. Nonlinear rheological features and anchoring technology for soft rock tunnel with large squeezing deformation[J]. *Tunnel Construction*, 2019, 39(3): 337–347.
- [ 15 ] 袁亮, 薛俊华, 刘泉声, 等. 煤矿深部岩巷围岩控制理论与支护技术[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(4): 535–543.
- YUAN Liang, XUE Junhua, LIU Quansheng, et al. Surrounding rock stability control theory and support technique in deep rock roadway for coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(4): 535–543.
- [ 16 ] 郭志彪, 李伟涛, 何满潮, 等. 基于补偿理论的深部软岩动压巷道破坏机理及控制对策[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(5): 931–942.
- GUO Zhibiao, LI Weitao, HE Manchao, et al. Failure mechanisms and control strategies in dynamic pressure roadways of deep soft rock based on compensation theory[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(5): 931–942.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] HE M C, WANG Q. Excavation compensation method and key technology for surrounding rock control[J]. *Engineering Geology*, 2022, 307: 106784.
- [ 19 ] 陶志刚, 张博, 杨康, 等. 昌宁隧道软岩大变形及 NPR 锚索开挖补偿支护技术[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(4): 660–671.
- TAO Zhigang, ZHANG Bo, YANG Kang, et al. Large deformation of soft rock and NPR anchor cable excavation compensation support technology in Changning tunnel[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(4): 660–671.
- [ 20 ] 侯公羽. 基于开挖面空间效应的围岩-支护相互作用机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(S1): 2871–2877.
- HOU Gongyu. Interaction mechanism between surrounding rock and support based on spatial effect of excavation face[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(S1): 2871–2877.
- [ 21 ] 李术才, 潘东东, 许振浩, 等. 承压型隐伏溶洞突水灾变演化过程模型试验[J]. *岩土力学*, 2018, 39(9): 3164–3173.
- LI Shucai, PAN Dongdong, XU Zhenhao, et al. A model test on catastrophic evolution process of water inrush of a concealed karst cave filled with confined water[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(9): 3164–3173.
- [ 22 ] 赵亮亮, 杨文波, 潘文韬, 等. 不同大变形等级的层状软岩隧道施工模型试验与数值模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(2): 454–467.
- ZHAO Liangliang, YANG Wenbo, PAN Wentao, et al. Study on model test and numerical simulation of layered soft rock tunnel construction with different large deformation grades[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(2): 454–467.
- [ 23 ] 孟庆彬, 韩立军, 张帆帆, 等. 深部高应力软岩巷道耦合支护效应研究及应用[J]. *岩土力学*, 2017, 38(5): 1424–1435, 1444.
- MENG Qingbin, HAN Lijun, ZHANG Fange, et al. Study and ap-

- plication of coupling support effect in deep high stress soft rock roadway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(5): 1424–1435, 1444.
- [24] 孙晓明, 朱明群, 张勇, 等. 深部泵房吸水井硐室群稳定性控制对策及应用[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(10): 1693–1703.  
SUN Xiaoming, ZHU Mingqun, ZHANG Yong, et al. Stability control strategy and application of deep pump absorbing well chamber group[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(10): 1693–1703.
- [25] 陶志刚, 邓飞, 任树林, 等. 露天矿反倾边坡破坏模式及加固机制模型试验[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(4): 661–673.  
TAO Zhigang, DENG Fei, REN Shulin, et al. Model test on failure mode and reinforcement mechanism of anti-dip slope in open-pit mine[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(4): 661–673.
- [26] 陶志刚, 罗森林, 康宏伟, 等. 公路隧道炭质板岩变形规律及蠕变特性研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(5): 898–906.  
TAO Zhigang, LUO Senlin, KANG Hongwei, et al. Analysis of deformation law and creep characteristics of carbonaceous slate in highway tunnel[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(5): 898–906.
- [27] 吴相超, 刘新荣, 李栋梁, 等. 软岩泡水隧道锚变形破坏模型试验[J]. *岩土力学*, 2016, 37(4): 1023–1030.  
WU Xiangchao, LIU Xinrong, LI Dongliang, et al. Failure model test on soaked tunnel anchor in soft surrounding rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(4): 1023–1030.
- [28] 冯亚松. 挤压性炭质千枚岩隧道模型试验及围岩变形特征研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.  
FENG Yasong. Research on model test and deformation characteristics of carbonaceous phyllite tunnels with squeezing geostress[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2015.
- [29] 舒晓云, 田洪铭, 陈卫忠, 等. 不同水平应力条件下层状软岩隧道开挖变形破坏模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(S2): 4204–4215.  
SHU Xiaoyun, TIAN Hongming, CHEN Weizhong, et al. Experimental study on deformation and failure model of layered soft rock tunnel excavation under different horizontal stress conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(S2): 4204–4215.