



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404283

引用格式:夏曾银,章慧健,陈军,等.膨胀性泥岩隧道的支护力学特性及对策:以内蒙古某隧道为例[J].科学技术与工程,2025,25(12):5164-5172.

Xia Zengyin, Zhang Huijian, Chen Jun, et al. Lining mechanics and countermeasures of tunnel in expansive mudstone: taking a tunnel in Inner Mongolia as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(12): 5164-5172.

交通运输

## 膨胀性泥岩隧道的支护力学特性及对策: 以内蒙古某隧道为例

夏曾银<sup>1</sup>, 章慧健<sup>2\*</sup>, 陈军<sup>1</sup>, 李彬<sup>3</sup>, 侯磊超<sup>1</sup>, 李志强<sup>1</sup>, 曹攀<sup>2</sup>, 刘功宁<sup>2</sup>

(1. 中铁隧道局集团路桥工程有限公司, 天津 300308; 2. 西南交通大学, 交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031;  
3. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308)

**摘要** 膨胀性围岩的吸水膨胀特性会对隧道支护结构产生不利影响,继而容易诱发各类工程灾害,影响工程进度和后期列车正常运营。因此,此类隧道的力学特性和支护方式的选择一直备受关注。以内蒙古某一穿过膨胀性泥岩的隧道为例,基于现场监测和数值计算方法,分析原支护条件下膨胀性泥岩隧道支护结构的变形破坏特性,进而从支护变形和力学特性方面研究双层初支在此类隧道的适用性,并提出相应的支护参数建议。结果表明:泥岩的膨胀特性引起原支护条件下(单层初支)支护结构变形达到 309 mm,导致隧道施工现场出现支护严重侵限和被迫换拱等问题。相对单层初支,双层初支施工方法可以显著改善膨胀性泥岩隧道支护的变形和受力状况,且变形降幅达到 63.88% 以上。随着二次初支厚度的增加,初支变形和受力逐渐降低,最大变形降幅可达 234.5 mm,各工况下的压应力降幅达到 39%。因此,可考虑在膨胀性泥岩隧道中采用双层支护施工方法,并结合变形需求合理选择第二层初支厚度。研究成果可为今后类似工程提供重要参考。

**关键词** 膨胀性泥岩; 隧道; 支护对策; 双层初支; 力学特性

**中图分类号** U455.7; **文献标志码** A

## Lining Mechanics and Countermeasures of Tunnel in Expansive Mudstone: Taking a Tunnel in Inner Mongolia as an Example

XIA Zeng-yin<sup>1</sup>, ZHANG Hui-jian<sup>2\*</sup>, CHEN Jun<sup>1</sup>, LI Bin<sup>3</sup>, HOU Lei-chao<sup>1</sup>,  
LI Zhi-qiang<sup>1</sup>, CAO Pan<sup>2</sup>, LIU Gong-ning<sup>2</sup>

(1. China Railway Tunnel Group Road & Bridge Engineering Co., Ltd., Tianjin 300308, China;

2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

3. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

**[Abstract]** The water absorption and expansion characteristics of the swelling surrounding rock can have adverse effects on the tunnel lining structure, which can easily lead to the induction of various engineering disasters, and impact the progress of the project, as well as the normal operation of the train in subsequent stages. Therefore, the mechanical characteristics and support method selection of such tunnels have always been of great concern. Taking a tunnel passing through expansive mudstone in Inner Mongolia as an example, based on field monitoring and numerical calculation methods, the deformation and failure characteristics of the tunnel lining structure in mudstone tunnel under the original lining conditions were analyzed. Subsequently, the applicability of double-layer preliminary lining in such tunnels was studied from the aspects of support deformation and mechanical properties, and corresponding lining parameter suggestions were proposed. The results indicate that the expansion of mudstone causes the deformation of the original lining structure (single-layer preliminary lining) to reach a magnitude of 309 mm. Such deformation leads to significant encroachment of the lining and necessitated forced arch replacement during the tunnel construction process. In comparison to the single-layer preliminary lining, the double-layer preliminary lining construction method has been found to significantly improve the deformation and stress state of the tunnel in expansive mudstone, achieving a deformation reduction rate that exceeds 63.88%. As the thickness of the

收稿日期: 2024-06-08; 修订日期: 2025-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(52178395)

第一作者: 夏曾银(1979—), 男, 汉族, 安徽当涂人, 高级工程师。研究方向: 隧道与地下工程的施工力学行为。E-mail: 2721378801@163.com。

\* 通信作者: 章慧健(1982—), 男, 汉族, 浙江淳安人, 博士, 副教授。研究方向: 隧道与地下工程的施工力学行为。E-mail: huijianz@163.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

secondary preliminary lining increases, the deformation and stress of the preliminary lining gradually decrease, achieving a maximum deformation reduction of 234.5 mm and a compressive stress reduction rate of up to 39% under various conditions. Consequently, the double-layer lining construction method can be considered for tunnels in expansive mudstone, with the thickness of the secondary preliminary lining being reasonably selected based on deformation requirements. The research findings can serve as a valuable reference for similar projects in the future.

[ **Keywords** ] expansive mudstone; tunnel; lining countermeasures; double-layer preliminary lining; mechanical property

中国地域辽阔,地质条件复杂多变,膨胀性岩土便是其中的一种特殊地质情况。随着中国隧道工程的快速发展,将不可避免地穿越膨胀性岩土地层。膨胀性围岩因其富含黏土矿物而具有显著吸水膨胀特性,产生的膨胀变形会严重威胁隧道围岩和支护结构的稳定性<sup>[1-3]</sup>。因此,在隧道工程穿越此类地层时,大多会面临不同程度的工程灾害<sup>[4-5]</sup>,如混凝土开裂、初支侵限破坏、隧道底鼓等,甚至引起隧道坍塌<sup>[6]</sup>,而围岩和支护结构的稳定性与施工方法紧密相关<sup>[7-8]</sup>。因此,开展膨胀性泥岩隧道的支护力学机理和对策研究具有重要意义。

运凯等<sup>[9]</sup>基于二维计算模式的荷载-结构法,以膨胀压力来模拟膨胀作用,研究膨胀岩隧道的二衬力学特性,并提出优化后的仰拱厚度和仰拱失跨比建议。目前,针对软弱围岩变形问题,采用的隧道支护方法主要分为刚性支护和柔性支护两方面。刚性支护是指采用强度和刚度较大的支护结构来抵御围岩的膨胀变形,常采用的具体施工方法包括增加支护结构厚度和拱架型号等<sup>[10-11]</sup>。尽管该方法可以在施工初期快速限制围岩变形,由于围岩膨胀是一个长期发展过程,当变形量达到一定值时仍会对支护结构产生巨大形变压力而容易超过支护结构承载能力,进而引发支护严重变形乃至坍塌等问题,且后期维修十分困难<sup>[12-13]</sup>。同时,刚性支护也存在制作成本较高、施工难度大、自重大等缺陷。鉴于刚性支护存在的问题,柔性支护、刚柔结合支护等逐渐受到学者关注<sup>[14]</sup>。此类支护是指利用其自身各部件协调受力进而允许围岩发生一定变形量的一种支护方式,主要包括让压锚杆、恒阻吸能锚杆、可伸缩钢拱架、让压限阻器、双层初支等<sup>[15-16]</sup>。其中,由于双层初支具有“先让后抗”支护特性,既能承受围岩发生的大变形,也能有效减小支护受力<sup>[17-18]</sup>,且该施工方法具有施工方便、成本较低等优势,在现场工程中得到越来越多的应用。然而,目前双层初支的应用主要聚焦于软岩地层中的隧道建设<sup>[19-21]</sup>,而对于该技术在应对膨胀性围岩隧道中的支护效果评价的研究仍鲜见涉及,尤其是针对本文所依托的内蒙古某隧道建设过程中遇到的膨胀性泥岩地层,未见相关文献报道。该隧道在施工过程中多次出现由于泥岩膨胀导致的严重支护侵限问题而被迫进行换拱,严重阻碍施工进度。

由于膨胀性泥岩的膨胀特性和工程地质差异,已有研究成果不能简单套用到本工程。

鉴于此,依托内蒙古某膨胀性泥岩隧道工程,采用现场监测和数值模拟方法,并基于温湿等效原理模拟膨胀性泥岩的吸水膨胀作用,进而开展双层初支在膨胀性泥岩隧道的支护力学特性和适用性研究,并提出相应的施工建议,旨在为今后类似工程的设计和施工提供一定的参考。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

依托隧道工程位于内蒙古乌兰察布市,为单洞双线高铁隧道,起讫里程为 DK32 + 380 ~ DK36 + 649,全长 4 269 m。隧道最大埋深约 141 m,因该隧道长距离穿越膨胀岩地段,评定为 II 级风险隧道。其中,该隧道通过膨胀岩地段总长 1 419 m,位于 DK35 + 190 ~ DK36 + 609 位置,占隧道总长的 33.24%。全线 V 级围岩段总长 2 349 m,占比全长 55.03%。隧道基本情况如图 1 所示。该隧道采用三台阶临时仰拱法施工,开挖进尺为 1.8 m。隧道原设计支护参数如表 1 所示。

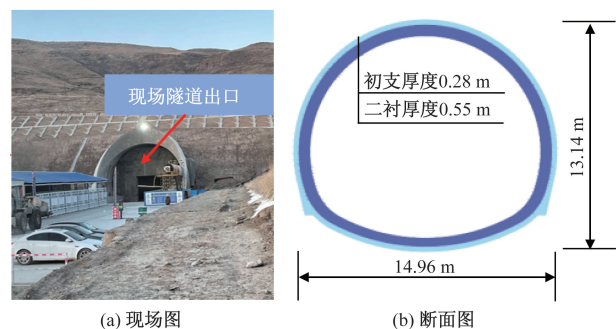


图 1 隧道基本情况

Fig. 1 Basic information of the tunnel

### 1.2 现场隧道支护变形情况

在原隧道设计支护措施下,自隧道出口段施工以来,多次出现初支严重侵限破坏、掌子面挤压变形等问题,且部分支护结构被迫进行拆除和换拱,严重影响工程进度。部分现场隧道变形情况如图 2 所示。

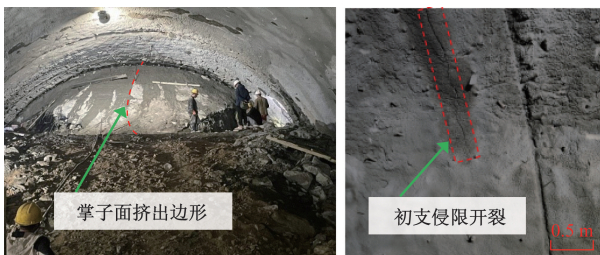
为进一步获得隧道支护结构变形发展规律,在施工初期对现场初支布置若干监测点用于监测隧道拱顶沉降和两侧部位水平收敛情况,监测点布置示意图如图 3 所示。

表1 设计支护类型及其参数

Table 1 Designed type and parameters of lining

支护类型	规格	结构尺寸
钢筋网	Φ8 mm, 200 mm × 200 mm	单层钢筋网
喷射混凝土	C25 喷混凝土	厚 28 cm
钢架	工 20 工字钢	纵向间距 0.6 m
台阶锁脚	Φ60 mm 热轧无缝 钢管, t = 5 mm	L = 5 m, 每处 4 根, 每榀共计 28 根
仰拱锁脚	Φ60 mm 热轧无缝 钢管, t = 5 mm	L = 4 m, 每榀 4 根
纵向连接筋	Φ22 mm	L = 60 cm, 间距 1 m, 两榀间梅花布置
临时仰拱钢架	工 18 工字钢	纵向间距 1.2 m
临时仰拱纵向连接筋	Φ22 mm	L = 120 cm, 间距 1.2 m, 两榀间梅花布置
临时仰拱喷射混凝土	C25 喷混凝土	厚 10 cm

注: t 为钢管厚度; L 为结构长度。



(a) 掌子面变形图示意图 (b) 初支开裂图示意图

图2 现场变形情况

Fig. 2 On-site deformation situation

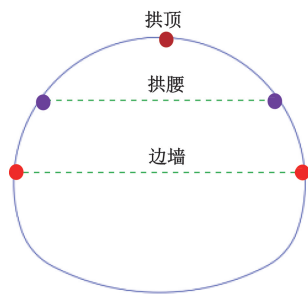


图3 初支变形监测点

Fig. 3 Monitoring points of the deformation of preliminary lining

获得的现场隧道初支变形规律如图4所示,规定变形值以向洞内收敛为负,反之为正。

由图4可知,随着施工的推进,初支出现了严重变形,尤其是拱顶部位,最大变形量达到309 mm,导致初支出现了开裂破坏。拱腰收敛值相对边墙收敛值更大,达到263 mm。从变形发展趋势来看,拱顶沉降一般在开挖支护完成后的10 d内达到最大值。这是因为开挖扰动引起风化层中的地下水缓慢渗流,围岩并非一下就吸水饱和,因此产生的膨胀也是相对缓慢发展的过程。当围岩吸水饱和后不再继续膨胀,此时初支变形不再显著发展。

综上所述,原设计支护对策在膨胀性泥岩遇水情况时,支护强度是不足够的,支护结构洞内变形

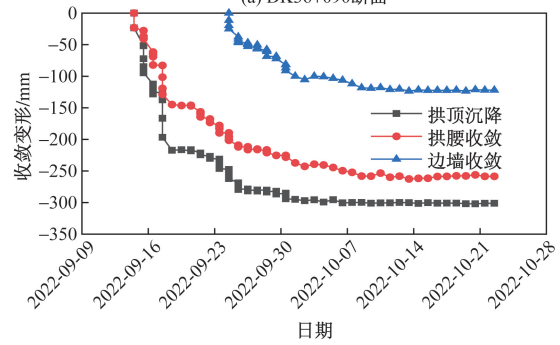
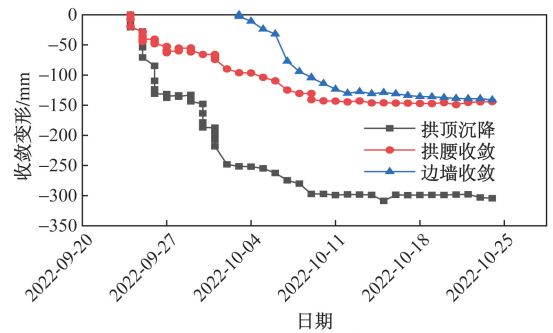


图4 现场初支结构变形监测时程曲线

Fig. 4 On-site monitored time-history curve of the deformation of the preliminary lining structure

量值很大,远远超过了设计预留变形量。因此,必须改变原支护措施,并提出相应的支护对策来控制膨胀性泥岩隧道支护变形,从而减少换拱风险,拟对此开展深入研究。

## 2 膨胀性泥岩隧道的支护对策选取及模拟分析

### 2.1 支护方式的选择

在软弱岩层中进行隧道建设时,既要考虑开挖施工期间围岩的稳定性<sup>[22-23]</sup>,也要防止支护完成后出现围岩出现大变形。目前针对软弱围岩大变形问题,一般是从两个方面采取防治措施。一方面是加强支护体系,主要措施有:①增强支护结构刚度;②采用多层柔性支护结构(如双层初支);另一方面是提高或改善围岩强度,主要措施有:③采用让压锚杆、大变形恒阻锚杆等特殊支护,增强超前小导管注浆。对于①措施,强调的是采取传统“强支硬顶”的刚性支护理念,即采用大刚度、高强度的支护型式来抑制围岩的变形,由于围岩应力释放较少,支护结构将承受很大的应力,采用刚性支护的“强支硬顶”支护效果往往不尽人意<sup>[24]</sup>。对于③措施特殊支护结构造价高且施工难度大,支护效果的好坏与施工作业水平紧密相关。在实际工程中,一些学者对措施②中双层初支结构的支护效果进行分析研究<sup>[18,25-26]</sup>,通过二次初支补强一次初支的不足,发现双层初支兼备施工简

单、围岩变形控制较好、灵活性高和施工成本可控等优势。然而,双层初支对本依托膨胀性围岩隧道的控制效果仍需深入研究,且已有研究成果不能简单套用,需对此问题做进一步分析。

2.2 数值计算说明

2.2.1 计算模型和支护参数

参考隧道施工图和设计方案来建立数值计算模型,设定隧道埋深为 115 m。由圣维南原理可知,为降低边界效应,隧道周边一般取洞径的 3~5 倍为宜。为便于计算,隧道左右两侧边界取洞径的 4 倍距离,下边界到仰拱的距离取洞径的 3 倍距离,最终确定模型横向尺寸(x 方向)为 130 m。隧道开挖方向即纵向(y 方向)尺寸为 50 m。建立的计算模型图如图 5 所示。在模型前、后、左、右、下边界施加法向约束,上边界为自由边界。根据该工程设计和现场勘察资料,采用的围岩计算参数如表 2 所示。

主要研究双层初期支护对围岩膨胀的控制效果。第二层初期支护的支护参数以及支护时机选择较为灵活,对第二层初期支护厚度为 15、20、25、30 cm 工况下的支护效果进行对比分析,初支的弹性模量按照式(1)计算。

将初支钢架的作用按照其弹性模量折算给喷射混凝土考虑,计算公式为

$$E = E_0 + \frac{S_g E_g}{S_c} \tag{1}$$

式(1)中: $E$ 为折算后的混凝土弹性模量; $E_0$ 为原混凝土弹性模量; $S_g$ 为钢拱架截面积; $E_g$ 为钢材弹性模量; $S_c$ 为混凝土截面积。

第一层和第二层初期支护分别采用实体单元和 shell 单元模拟,采用的相应支护结构参数如表 3 所示。

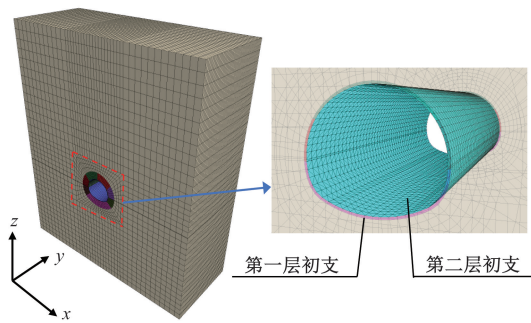


图 5 计算模型

Fig. 5 Calculation model

表 2 围岩计算参数

**Table 2 Calculation parameters of the surrounding rock**

材料	容重/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )
围岩	21	0.367	0.38	264	31

表 3 支护参数

Table 3 Lining parameters

结构	厚度/ cm	弹性模量/ GPa	泊松比	容重/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )
第一层初支	30	33.1	0.2	2 500
	15	35.3		
第二层初支	20	34.0	0.2	2 500
	25	33.2		
	30	32.6		

隧道开挖方案与施工现场保持一致,采用三台阶临时仰拱法开挖,隧道中上台阶开挖后施作临时仰拱,临时仰拱材料采用 I18 型工字钢 + 10 cm 厚喷射混凝土,开挖循环进尺为 1.8 m。

2.2.2 膨胀效应的实现

温度场的热膨胀特性和膨胀土遇水膨胀特性的公式描述基本一致<sup>[27]</sup>,基于参数换算能借助温度场来模拟湿度场,并通过数值计算软件中的热-力耦合分析模块,便可以得到土体中湿度变化时膨胀土变形受力特性。热力学的热膨胀方程为

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \alpha \Delta T \delta_{ij} \tag{2}$$

式(2)中: $\Delta \varepsilon_{ij}$ 为温度变化引起的应变增量; $\alpha$ 为热膨胀系数, $1/^\circ\text{C}$ ; $\Delta T$ 为温度变化量; $\delta_{ij}$ 为 Kronecker 记号。

湿度影响膨胀土的变形方程为

$$\Delta \varepsilon_{ij}^\omega = \beta \delta_{ij} \Delta \omega = \beta \delta_{ij} C_\omega \Delta u \tag{3}$$

式(3)中: $\Delta \varepsilon_{ij}^\omega$ 为湿度变化引起的岩土体应变增量; $\beta$ 为湿度膨胀系数; $\Delta \omega$ 为单位体积的岩土体含水量变化量; $C_\omega$ 为比水容量; $\Delta u$ 为基质吸力变化量。

联立式(2)和式(3)便可得热膨胀系数与湿度膨胀系数间的关系可表示为

$$\alpha = \frac{\beta \Delta \omega}{\Delta T} = \frac{\beta C_\omega \Delta u}{\Delta T} \tag{4}$$

因此,在假定温度变化值的情况下,通过确定湿度线性膨胀系数对应的温度线性膨胀系数,便能够使用温度应力场对湿度应力场进行模拟。也即知道围岩湿度场的变化,就可以利用式(4)来建立温度场,以便利用数值软件中的温度应力场来近似模拟膨胀性围岩的膨胀特性。因此利用 FLAC3D 软件中的温度模块并基于材料升温热膨胀效应来模拟围岩吸水膨胀的过程。结合文献[28]和大量软件试算结果,获得的围岩温度场计算参数如下:初始含水率 5%,湿度线膨胀系数 0.004 6,温差  $\Delta T$  为  $100^\circ\text{C}$ ,温度线膨胀系数 0.001 1。

2.2.3 隧道的开挖和支护模拟

关于第二层初期支护的施作时机,学者们对此开展了一定的研究<sup>[29-30]</sup>,发现第二层初支如果施作过早,由于第一层初支与围岩的协同作用体系无法

得到充分利用,围岩应力释放得不够,此时第二层初支依然受到很大的压力。若较晚施作第二层初支,则不利于控制围岩的变形。因此,选择合理的第二层初支支护时间至关重要。重点分析双层初支对隧道受力变形规律,第二层初支施作时间滞后于第一层初支,以期实现支护承受较小围岩应力的同时并进一步控制变形量的目的。采用的模拟开挖支护具体过程如表4所示。

#### 2.2.4 计算模型验证分析

采用原支护条件下的围岩和支护结构计算参数(表1和表2)建模分析。计算模型边界条件设置及围岩膨胀模拟同2.2.2节和2.2.3节,开挖方法与现场保持一致。开挖支护结束后,隧道支护结构的变形如图6所示。

由图6所示的初支竖向位移云图可知,按照原设计支护措施,围岩发生膨胀后初支拱顶沉降达到344 mm。而由前述现场监测中初支拱顶沉降最大位移为309 mm,也即数值模拟与现场监测得到的初支变形误差为10.2%,说明二者误差较小,即验证了本文计算方法的合理性。

### 3 结果与分析

#### 3.1 初支的变形规律分析

隧道开挖支护完成后,不同二次初期支护厚度

下的支护结构竖向变形云图如图7所示。限于篇幅,此处仅展示支护结构竖向变形图,提取其余支护结构部位变形值如表5所示。

由图7和表5可以看出,采用双层初期支护后,4种二次初支厚度下,第一层初支最大沉降值分别为111.6、102.0、86.6、74.5 mm,第二层初支最大沉降值分别为91.3、82.0、65.6、47.2 mm。相较于原支护条件下的现场单层支护结构变形量309 mm,初支结构的拱顶变形得到明显降低,最大下降幅度达到234.5 mm。各工况下的支护变形降幅分别达到63.88%、66.99%、71.97%、75.89%,可见第二层初

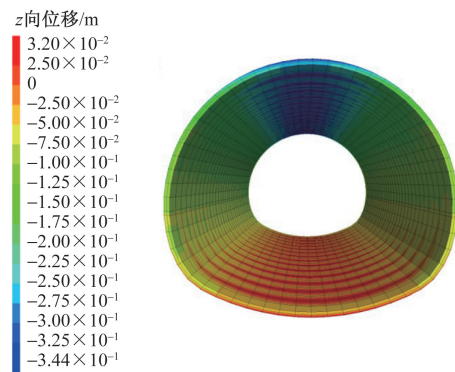


图6 原设计支护措施下初支竖向位移云图

Fig. 6 Vertical displacement cloud diagram of preliminary lining under the original designed lining measures

表4 开挖支护具体过程

Table 4 Specific excavation and lining process

计算过程说明	部分开挖支护过程示意图
(1) 以某一开挖支护循环作为初始状态	
(2) 开挖上台阶掌子面	
(3) 及时施作上台阶掌子面的第一层初期支护	
(4) 施作上台阶前一循环单层初支的第二层初支。在前一循环施作完成的单层初支支护下,围岩应力得到有效释放,此时第二层初支补强第一层初支,围岩变形和压力可得到有效控制	
(5) 施作下台阶和仰拱处在上一循环即已经施工完毕的初支的第二层初支。开挖和支护上台阶掌子面这一段时间,上一循环开挖的下台阶处的围岩应力在单层初支下得到一定释放。此时施作该处的第二层初支既可控制围岩变形,也可减小围岩压力	
(6) 开挖中台阶掌子面	
(7) 施作中台阶掌子面两侧的第一层初期支护	
(8) 开挖下台阶及仰拱	
(9) 施作下台阶两侧及仰拱处第一层初期支护	
(10) 施作下台阶初期支护这一段时间内,中台阶围岩在第一层初支支护下得到了一定应力释放,此时施作中台阶第二层初期支护	

表5 单层初支与双层初支结构变形及支护效果  
Table 5 Deformation and lining effect of single-layer and double-layer preliminary linings

工况	厚度/ cm	最大拱顶 沉降/mm	降幅/ %	最大水平 收敛/mm	降幅/ %
原支护	30	309	—	263	—
双层初支 (第一层/ 第二层)	30/15	111.6	63.88	72.4	72.47
	30/20	102.0	66.99	66.2	74.83
	30/25	86.6	71.97	60.8	76.88
	30/30	74.5	75.89	55.0	79.09

支的施作对于支护变形控制效果非常显著。表5也表明,双层初支对水平收敛控制效果(降幅百分比72.47%~79.09%)略强于拱顶沉降(降幅百分比63.88%~75.89%)。

### 3.2 初支的力学特性分析

由于支护结构主要承受压应力,最大主应力值很小,故主要展示初支结构的最小主应力。不同二次初支厚度下的支护结构最小主应力分布规律如图8所示。为进一步揭示不同二次初支厚度下的支

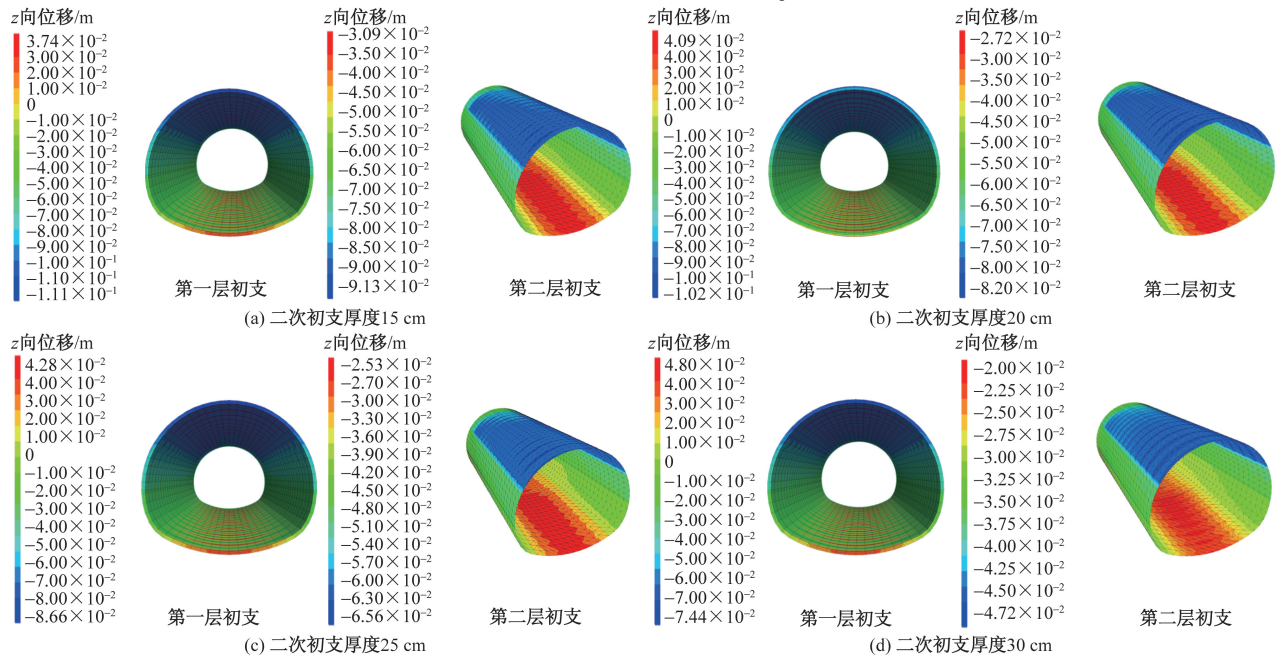


图7 不同二次初支厚度下的支护结构变形图

Fig. 7 Deformation of lining under different thicknesses of the secondary preliminary lining

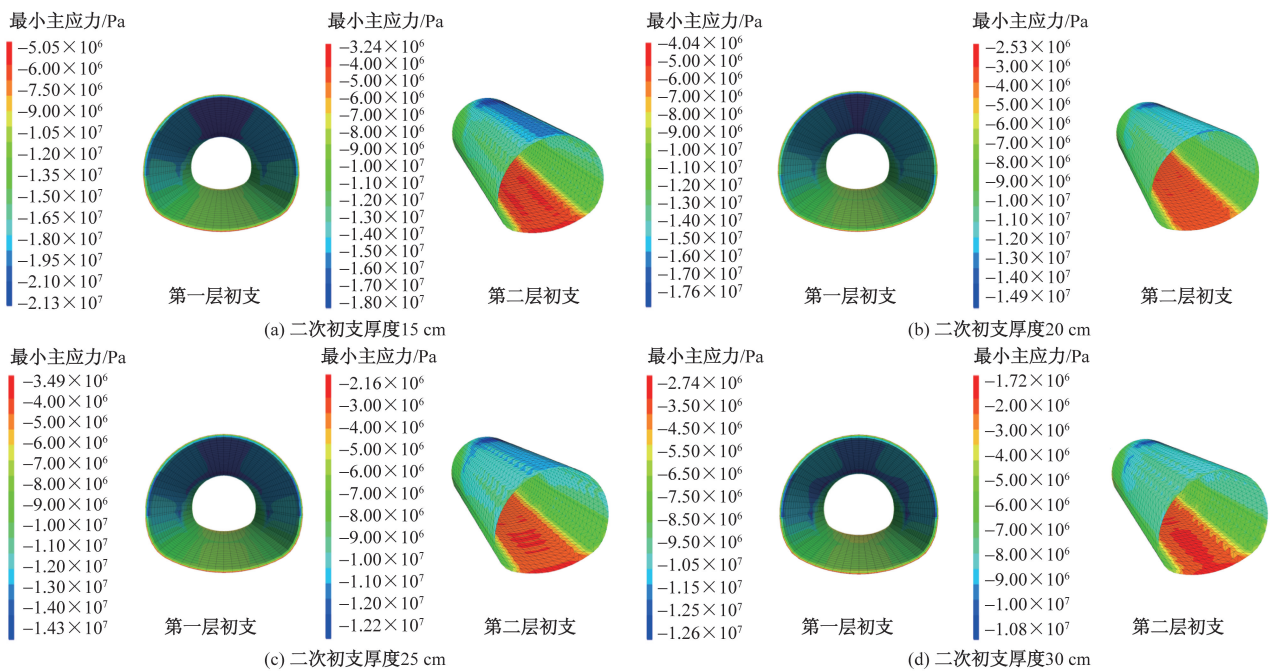


图8 不同二次初支厚度下的支护结构最小主应力云图

Fig. 8 Minimum principal stress nephogram of the lining structure under different thicknesses of secondary preliminary lining

护结构受力规律,以隧道中心断面为例,分别在隧道初支关键部位布设监测点,得到的支护结构压应力分布图如图9所示。

由图8、图9可知,支护结构受力较大区域主要体现在拱顶、拱腰、拱脚部位,第二层初支由于后施作,其受力略小于第一层初支。在第二层初期支护厚度为15、20、25、30 cm时,第一层初期支护承受的最大压应力分别为18.6、15.7、13.1、11.9 MPa。相较于二次初支厚度15 cm时的压应力,其余二次初支厚度下第一层初支最大压应力降幅分别达到15.6%、29.6%、36.0%。而第二层初期支护承受的最大压应力分别为15.4、12.4、10.3、9.4 MPa,其余二次初支厚度下第二层初支最大压应力降幅分别达到19.5%、33.1%、39.0%。也即采用双层初期支护后,第一层初期支护承受的压应力随第二层初期支护厚度的增加而显著降低。总体而言,第一层初支与第二层初支受到的压应力均未超出所使用的混凝土抗压强度范围,即两层初支结构均处于安全状态。

## 4 结论

(1)原隧道支护条件下,隧区膨胀性泥岩吸水膨胀引起的隧道初支结构拱顶沉降和水平收敛分别达到309 mm和263 mm,进而导致支护破坏和被迫换拱。与此同时,围岩吸水膨胀是一个较缓慢过程,且支护结构变形约在支护施作完成后的10 d内达到最大值。

(2)采用双层初支后,隧道支护结构变形降幅达到234.5 mm,下降百分比可达到75.89%,说明双层初支可以有效控制初支变形。且相比各二次初支厚度下的围岩拱顶沉降值,双层初支对水平收敛控制效果更为显著。从支护结构的力学演变特性来看,随着第二层初支厚度增加,初支结构所受压应力显著降低,最大降低幅度达到39.0%。相比单层初支,双层初支可以很好地减少结构受力。

(3)双层初支体系很好地弥补了单层初支体系的不足,在实现进一步控制膨胀性泥岩隧道变形的同时,也能很大程度改善支护结构的受力。因此,双层初支可在膨胀性泥岩隧道中应用,其中,第二层初支参数可根据现场施工变形控制要求进行选择。本文研究结果可为此类工程提供一些重要参考。

## 参 考 文 献

- [1] 李靖杰,张馨,孙金山,等. 膨胀性页岩铁路隧道围岩大变形机制及化学抑制技术研究[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(6): 34-41.

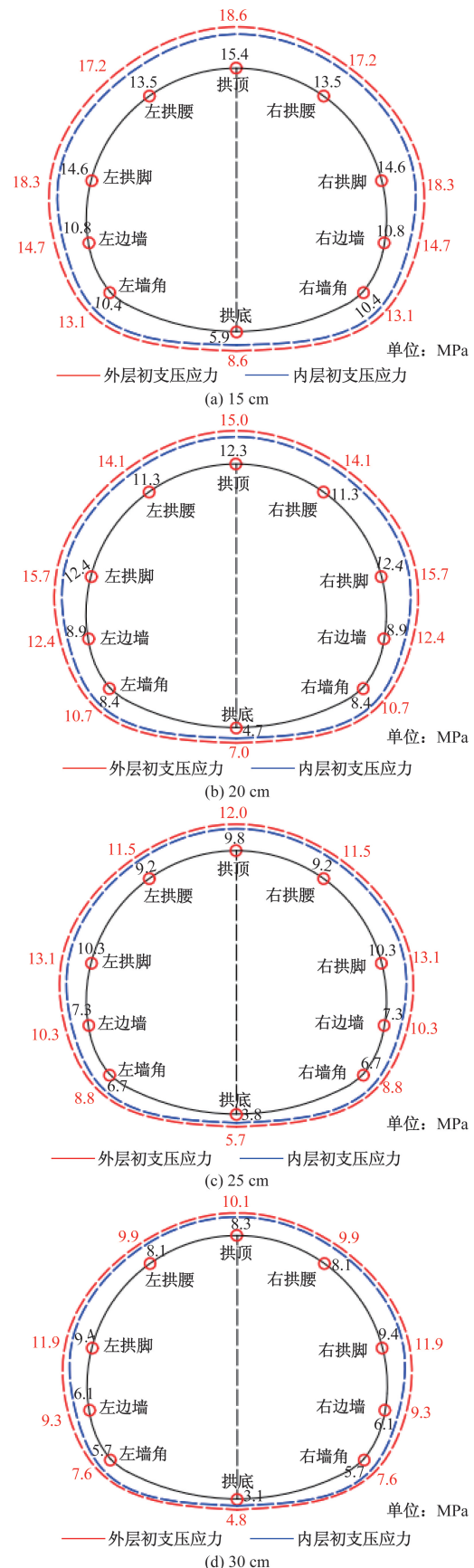


图9 支护结构中心断面压应力分布图

Fig. 9 Compressive stress distribution diagram of the middle section of lining structure

- Li Jingjie, Zhang Xin, Sun Jinshan, et al. Large deformation mechanism and chemical inhibition technology for surrounding rock of swelling shale railway tunnel[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, 29(6): 34-41.
- [2] 陶伟明,李化云,张志强,等. 浅埋膨胀土隧道围岩抗剪强度与支护结构受力特征关系研究[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(1): 36-43.  
Tao Weiming, Li Huayun, Zhang Zhiqiang, et al. Study on the shear strength of surrounding rocks and mechanical behaviors of supporting structure of the shallow-buried tunnel in swelling soil[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, 57(1): 36-43.
- [3] 廖福星. 基于膨胀及强度劣化效应的玉园隧道失稳机理研究[J]. *安全与环境工程*, 2022, 29(4): 33-45.  
Liao Fuxing. Instability mechanism of Yuyuan Tunnel based on expansion and strength deterioration effect[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, 29(4): 33-45.
- [4] 左清军,李心怡,赵先强,等. 膨胀性软岩隧道支护结构受力特性及缓释方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(9): 2190-2202.  
Zuo Qingjun, Li Xinyi, Zhao Xianqiang, et al. Mechanical characteristics and force slow-release method of support structure of expansive soft rock tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(9): 2190-2202.
- [5] Ziegler M, Lavasan A A, Loew S. Stress evolution around a TBM tunnel in swelling clay shale over four years after excavation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 128: 104649.
- [6] 张毅,折学森,李楠. 弱膨胀土地区隧道施工工法及塌方原因研究[J]. *公路交通科技*, 2018, 35(10): 82-91.  
Zhang Yi, She Xuesen, Li Nan. Study on tunnel construction scheme in weak-expansive soil area and reason of collapse[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018, 35(10): 82-91.
- [7] 王志杰,李金宜,周飞聪,等. 中老铁路膨胀性盐岩地层隧道结构体系优化及施工技术探究[J]. *隧道建设*, 2021, 41(1): 16-27.  
Wang Zhijie, Li Jinyi, Zhou Feicong, et al. Structural system optimization and construction technology of tunnel in expansive salt rock stratum for China-Laos railway[J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(1): 16-27.
- [8] Wu J X, Jiang J, Li Z L, et al. Stability analysis method for initial support structure of tunnel inswelling loess[J]. *Processes*, 2023, 11(4): 1090.
- [9] 运凯,朱永全,郭小龙. 膨胀岩隧道二次衬砌结构受力特性及工程对策分析[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(17): 7539-7548.  
Yun Kai, Zhu Yongquan, Guo Xiaolong. Analysis on mechanical characteristics and engineering countermeasures of secondary lining structure of tunnel in expansive surrounding rock[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(17): 7539-7548.
- [10] 刘建国,王春明,薛宁鸿,等. 强膨胀岩浅埋富水隧道变形分析及施工控制[J]. *高速铁路技术*, 2018, 9(1): 84-89.  
Liu Jianguo, Wang Chunming, Xue Ninghong, et al. Deformation analysis and construction control of heavily expansive rock tunnels with shallow-buried rich water[J]. *High Speed Railway Technology*, 2018, 9(1): 84-89.
- [11] 吴迪. 膨胀性黄土隧道受力特性及加固措施研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.  
Wu Di. Research on the stress characteristics and reinforcement measures of the expanded loess tunnel[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018.
- [12] Alonso E E, Berdugo I R, Ramon A. Extreme expansive phenomena in anhydritic-gypsiferous claystone: the case of Lilla Tunnel[J]. *Geotechnique*, 2013, 63(7): 584-612.
- [13] 唐晓冬. 甘塔斯隧道膨胀岩刚性支护设计与施工[J]. *国防交通工程与技术*, 2016, 14(3): 31-34.  
Tang Xiaodong. On the design and construction of the primary rigid supports for Ganntas tunnel in swelling ground[J]. *Traffic Engineering and Technology for National Defence*, 2016, 14(3): 31-34.
- [14] 李树忱,晏勤,谢璨,等. 膨胀性黄土隧道钢拱架-格栅联合支护力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(2): 446-456.  
Li Shuchen, Yan Qin, Xie Can, et al. The mechanical behavior of composite supports of steel-grid in loess tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(2): 446-456.
- [15] 仇文革,王刚,龚伦,等. 一种适应隧道大变形的限阻耗能型支护结构研发与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(8): 1785-1795.  
Qiu Wenge, Wang Gang, Gong Lun, et al. Research and application of resistance-limiting and energy-dissipating support in large deformation tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(8): 1785-1795.
- [16] 曹小平,魏飞鹏,王波,等. 高地应力软岩隧道合理支护方案试验研究[J]. *铁道工程学报*, 2018, 35(7): 65-71.  
Cao Xiaoping, Wei Feipeng, Wang Bo, et al. Experimental research on the reasonable support scheme of soft rock tunnel with high ground stress[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 35(7): 65-71.
- [17] 杨林霖,杨文波,田浩晟,等. 考虑围岩短期蠕变效应的隧道双层初期支护变形控制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(7): 1731-1742.  
Yang Linlin, Yang Wenbo, Tian Haosheng, et al. Study on deformation control of double-layered initial support in tunnels considering short-term creep effects of surrounding rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(7): 1731-1742.
- [18] 陈子全. 高地应力层状软岩隧道围岩变形机理与支护结构体系力学行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.  
Chen Ziquan. Study on the deformation mechanism of surrounding rock and mechanical behavior of supporting structures for layered soft rock tunnel under high geo-stress[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [19] 李涛,刘瑞辉,王万平,等. 大跨度软岩隧道施工中双层初期支护施作时机优化分析[J]. *公路*, 2023, 68(7): 58-62.  
Li Tao, Liu Ruihui, Wang Wanping, et al. Optimization analysis of construction timing of double-layer initial support in construction of large-span soft rock tunnel[J]. *Highway*, 2023, 68(7): 58-62.
- [20] 齐甦,窦克伟,徐勇. 双层衬砌在软岩隧道中支护应力分析[J]. *施工技术*, 2017, 46(1): 94-98.

- Qi Su, Dou Kewei, Xu Yong. Bracing stress analysis of double lining in soft-rock tunnel[J]. Construction Technology, 2017, 46(1): 94-98.
- [21] 张德华, 雷可, 谭忠盛, 等. 软岩大变形隧道双层初期支护承载性能对比试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S2): 86-92.
- Zhang Dehua, Lei Ke, Tan Zhongsheng, et al. Field test on bearing and deformation properties of double primary layers applied to large deformation tunnel in weak rock[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 86-92.
- [22] 王琴, 陶铁军, 李晋, 等. 复杂煤层组隧道围岩与支护结构施工力学行为[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(23): 10105-10117.
- Wang Qin, Tao Tiejun, Li Jin, et al. Construction mechanical behavior of surrounding rock and supporting structure of tunnel in complex coal seam group[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(23): 10105-10117.
- [23] 徐波, 杨旺兴, 李加加, 等. 中洞法连拱隧道施工稳定性分析及优化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 812-820.
- Xu Bo, Yang Wangxing, Li Jiajia, et al. Stability analysis and optimization of double-arch tunnel constructed by center drift method[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2): 812-820.
- [24] 罗江, 王刚, 白柱, 等. 限阻耗能型支护在高速公路软岩大变形隧道中的应用——以玉楚高速公路齐云隧道为例[J]. 隧道建设, 2023, 43(5): 856-864.
- Luo Jiang, Wang Gang, Bai Zhu, et al. Application of support-resistant limiting damper in soft rock highway tunnel with large deformation: a case study of Qiyun Tunnel of Yuxi-Chuxiong Expressway[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(5): 856-864.
- [25] 陈建勋, 刘伟伟, 陈丽俊, 等. 绿泥石片岩地层大跨度公路隧道大变形控制及合理支护形式现场试验[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 212-223.
- Chen Jianxun, Liu Weiwei, Chen Lijun, et al. In-situ experimental study on large-deformation control and reasonable support forms for a large-span highway tunnel in chlorite schist[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 212-223.
- [26] 陈丽俊, 陈建勋, 罗彦斌, 等. 深埋大跨度绿泥石片岩隧道变形规律及合理预留变形量[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 147-157.
- Chen Lijun, Chen Jianxun, Luo Yanbin, et al. Deformation law and reasonable reserved deformation of deep large-span chlorite schist tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(6): 147-157.
- [27] 曾仲毅, 徐帮树, 胡世权, 等. 增湿条件下膨胀土隧道衬砌破坏数值分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 871-880.
- Zeng Zhongyi, Xu Bangshu, Hu Shiquan, et al. Numerical analysis of tunnel liner failure mechanism in expansive soil considering water-increased state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 871-880.
- [28] 曹攀. 膨胀性泥岩高铁隧道稳定性分级及支护对策研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- Cao Pan. Research on stability classification and support countermeasures of high-speed tunnel in expansive mudstone[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [29] 陈俊武. 挤压性围岩隧道双层支护和可让式支护比较研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- Chen Junwu. A comparative study on double-layer support and yielding support for tunneling in squeezing rocks[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [30] 袁刚, 徐金峰, 李守仁, 等. 挤压大变形软岩隧道双层初期支护最优施工方案研究[J]. 施工技术, 2023, 52(19): 58-65.
- Yuan Gang, Xu Jinfeng, Li Shouren, et al. Research on optimal construction scheme of double-layer primary support for tunnel in squeezing rock[J]. Construction Technology, 2023, 52(19): 58-65.