

井巷支护

深部劣化围岩巷道蠕变大变形控制机理研究

Research on the Control Mechanism of Creep and Large Deformation in Deep Deteriorated Surrounding Rock Tunnels

李德阳, 李鹏飞, 李亮 (沈阳焦煤股份有限公司红阳三矿, 辽宁 沈阳 110000)

摘要:随着地下资源开采逐步向深部推进,巷道围岩的流变问题变得尤为突出,成为制约深部巷道支护效果的主要难题之一。本文以晋城胡底煤矿轨道大巷为研究对象,采用理论分析的方法探讨了深部巷道流变变形的控制机制,并借助FLAC3D数值模拟软件对理论研究进行了验证。研究表明,巷道流变的有效控制与支护反力和地应力的相互关系密切,通过合理提升支护强度,可显著抑制围岩流变的发展趋势,为深部巷道的稳定性控制提供了重要的参考依据。

关键词:深部巷道;流变变形;支护强度

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)02-0020-06

Abstract: As underground resource extraction progresses deeper, the rheological behavior of surrounding rock in tunnels has become increasingly prominent, emerging as one of the main challenges restricting the effectiveness of deep tunnel support. Taking the rail roadway of the Hudu coal mine in Jincheng as the research object, this paper investigates the control mechanism of rheological deformation in deep tunnels through theoretical analysis, and validates the theoretical findings using FLAC3D numerical simulation software. The research results indicate that the effective control of tunnel rheology is closely related to the interaction between support reaction forces and geological stresses. By reasonably increasing the support strength, the development trend of surrounding rock rheology can be significantly suppressed. This study provides an important reference for the stability control of deep tunnels.

Key words: deep roadway; rheological deformation; support strength

1 前言

随着自然资源的开采向深部地区延伸,开采深度的增加为资源的获取提供了可能,但也带来了更加复杂的地质和力学问题^[1-3]。深部巷道围岩受力条件显著不同于浅部,其主要表现为高地应力、围岩性质劣化以及复杂的变形模式。在深部巷道开挖后,围岩的变形并非瞬时完成,而是随时间逐渐发展,这种时间依赖性的变形即为围岩的流变效应^[4-7]。

流变作用主要表现为:(1)围岩的缓慢变形发展。巷道开挖后,围岩在高地应力作用下产生初始变形,随后变形随着时间推移而缓慢积累。这种长期的变形发展可能超出支护结构的承载能力,导致

支护体系失效。(2)支护结构的伴随变形与损伤:随着围岩流变的发展,支护结构与围岩之间的相互作用使得支护体系逐渐变形。如果支护结构无法适应流变引起的变形,可能导致其刚度和强度退化,从而失去对围岩的有效控制。(3)流变与多因素耦合作用:围岩的流变行为并非孤立发生,而是受到围岩性质、高地应力、地下水以及温度等多种因素的共同影响^[8-9]。这种多因素的耦合作用使得围岩的变形机制更加复杂,也对支护设计提出了更高的要求^[10-12]。

目前学者们针对深部巷道的流变变形控制做了大量的研究。王旭锋通过分析平顶山矿区深部软岩巷道的变形特征,揭示出巷道的蠕变变形机制,并提出了响应的控制措施^[13]。王高昂分析了高应力巷道在加速蠕变的作用下冲击失稳的力学模型和判据的,并提出了针对性的冲击地压防治措施^[14]。张建智分析了渗流与扩容作用下隧洞的变形机制,建立了响应黏弹塑性围岩的蠕变力学模型并分析了渗

[作者简介] 李德阳(1991—),男,辽宁朝阳人,本科,工程师,主要从事矿山生产技术管理工作。

[引用格式] 李德阳,李鹏飞,李亮.深部劣化围岩巷道蠕变大变形控制机理研究[J].中国矿山工程,2025,54(2):20-25+30.

流,膨胀和扩容对其影响^[15]。本文通过理论分析了深部巷道的蠕变发展机制,以具体巷道为工程背景,采用数值模拟的手段计算了蠕变作用下围岩的应力和位移演化规律,研究了巷道围岩的蠕变机制。

2 深部流变巷道变形机理

深部巷道环境具有显著的地质特征,包括高应力、较高的温度以及围岩的劣化特性。这些因素对围岩的力学性质产生重要影响,导致围岩的蠕变行为表现出较强的时间依赖性。采用了考虑应力梯度与蠕变速度关系的力学模型来分析深部围岩巷道的蠕变大变形行为。该模型通过考虑围岩的应力状态、蠕变特性,较为有效地描述了深部巷道中的力学过程。

深部巷道在开挖后,围岩沿着巷道半径方向应力呈现梯度分布的规律,在巷道远端,围岩应力状态接近原岩应力,而巷道边缘由于开挖卸荷的作用,围岩径向应力降低至接近于0。具体如图1所示,深部巷道在地应力 p 的作用下,围岩逐渐向巷道内部产生蠕变变形,在一段时间 T 后,巷道的蠕变量为 ε ,巷道的蠕变速度与巷道的应力梯度成正比,如式(1)所示。

$$V = \frac{K(\delta_r - \delta_{r_1})}{(r - r_0)} \quad (1)$$

式中, V 为蠕变变形速度; K 为围岩的蠕变系数; r_1 为巷道边缘上一点; δ_r 为至巷道中心距离为 r 位置处的径向应力; δ_{r_0} 表示巷道边缘的径向应力。根据式(1)可知,降低巷道围岩的蠕变速度首先要降低巷道围岩的应力梯度。而降低应力梯度主要有两种方式,一是增加巷道边缘的支护反力,使得 δ_r 与 δ_{r_1} 的差降低;另一种方式是增加支护的卸压空间,使得 $(r - r_0)$ 的值增加。

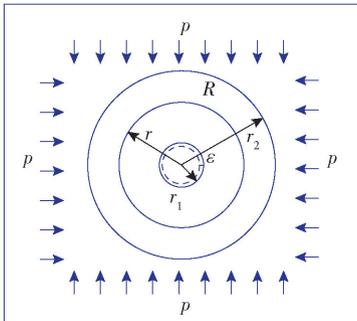


图1 力学模型

根据蠕变的大小,方向以及围岩的性质不同,式(1)可以转化为

$$\begin{cases} V_x = k_x \frac{\partial \delta_r}{\partial x} \\ V_y = k_y \frac{\partial \delta_r}{\partial y} \end{cases} \quad (2)$$

假设围岩的蠕变满足连续方程,则:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

将上式代入可得岩石蠕变的微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \delta_r}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \delta_r}{\partial y} \right) = 0 \quad (4)$$

式中, k_x 和 k_y 分别表示不同方向对应的岩石蠕变系数。根据边界条件可知,巷道围岩的在 R 区域内的应力分布函数为

$$\delta(x, y) |_{r_1, r_2} = \sum \delta_r(x, y) |_{(x, y) \in r_1, r_2} \quad (5)$$

其中 r_1 , r_2 分别代表巷道周围区域 R 的内外边界。则巷道边的单位长度的蠕变量为

$$K_m \frac{\partial \delta}{\partial n} \Big|_{r_1} = \pm q(x, y) |_{(x, y) \in r_1, r_2} \quad (6)$$

根据上述理论分析可知,当巷道开挖后,围岩的应力分布发生了显著变化,尤其是在开挖后的初期阶段。由于巷道的开挖,围岩遭受了原始地应力的扰动,这导致巷道周围岩体发生了变形,并且应力集中在巷道的边缘和拱肩部分。在这种情况下,岩石围岩会经历一种应力释放过程,产生蠕变变形,即岩石在持续应力作用下缓慢流动并发生塑性变形。

支护反力的增加是应对这一现象的有效方法。当巷道的支护结构提供较强的约束力时,围岩的变形会受到抑制,特别是在应力较大的区域,如巷道的拱肩和底部。增加支护反力能够增强支护结构的稳定性,使支护力更好地传递到围岩中,从而使围岩变形得到控制。支护反力的增大促进了围岩应力的均匀分布,避免了局部应力的过度集中,减缓了围岩的蠕变速率。当支护反力增大时,巷道周围岩体的变形速度(即蠕变速率)会显著降低。这是因为支护反力通过提高围岩的整体刚度和稳定性,减缓了围岩内部应力的重新分配过程,尤其是在开挖后的初期阶段,围岩在没有足够支护反力的情况下容易出现较大的变形和应力集中。强有力的支护反力通过增加支护结构的刚度,减少了围岩的塑性变形区,使得巷道的整体稳定性得到了增强。

支护反力的增强不仅减小了蠕变速率,还能够有效控制巷道的长期变形,减少由于蠕变带来的岩体疲劳和支护结构的损伤。这种机制对于深部巷道

尤为重要,因为随着埋深的增加,围岩的压缩应力和蠕变现象更加明显,支护反力的适当增强可以显著延长巷道的使用寿命,保障矿山和隧道等地下工程的安全。

3 数值模拟研究

在深部巷道工程中,围岩的蠕变行为是影响巷道稳定性和支护设计的关键因素。为了精确模拟和预测围岩在长期荷载作用下的变形行为,使用 FLAC3D 中的 Burgers 蠕变模型进行蠕变分析是一种有效的手段。蠕变本构的示意图如图 2 所示。Burgers 模型是一种常用的蠕变本构模型,由 Maxwell 模型和 Kelvin-Voigt 模型串联组成,能够较好地描述岩石或土体的瞬时变形、初始蠕变和稳态蠕变。然而,该模型存在显著缺陷,即无法模拟加速蠕变阶段。在长期荷载作用下,岩石或围岩材料往往经历三阶段蠕变(衰减蠕变、稳定蠕变、加速蠕变),而 Burgers 模型仅能准确描述前两阶段,对加速蠕变阶段的应变增长和损伤演化无法有效刻画。

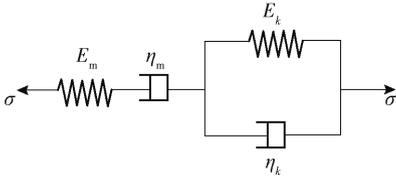


图 2 Burgers 模型示意图

为克服这一不足,本文引入 Burgers 损伤模型,在 Burgers 模型的基础上加入损伤变量,使材料的蠕变行为能够随时间和应力水平演化。使用分数阶 Abel 黏壶代替牛顿黏壶,建立变系数分数阶蠕变模型。具体如图 3 所示。根据 Zhou 的蠕变损伤定义

$$D = 1 - e^{-wt} \quad (7)$$

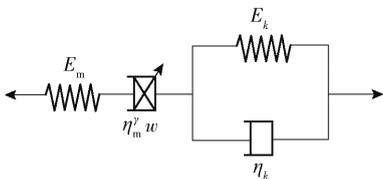


图 3 Burgers 损伤模型示意图

则损伤 Abel 黏壶的本构方程为

$$\sigma(t) = \eta^\gamma e^{-wt} \frac{d^\gamma \varepsilon(t)}{dt^\gamma} \quad (8)$$

损伤变量通常与塑性应变或微裂纹扩展相关,在加速蠕变阶段,损伤变量逐步增大,导致材料刚度下降、应变增长加快,从而成功模拟加速蠕变的非线性特征。

该改进使得 Burgers 损伤模型在围岩蠕变分析中更具工程适用性。经典 Burgers 蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_m} + \frac{t}{\eta_m} \sigma_0 + \frac{\sigma_0}{E_k} \left(1 - e^{-\frac{E_k}{\eta_k} t}\right) \quad (9)$$

则损伤变系数 Burgers 蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_m} + \frac{\sigma}{E_m} t^\gamma E_{1,1+\gamma}(wt) + \frac{\sigma}{E_k} (1 - e^{-\frac{E_k}{\eta_k} t}) \quad (10)$$

本文使用 FLAC3D 的二次开发功能将本文的损伤 Burgers 损伤模型嵌入到软件中调用,编写 stress() 函数以定义材料的应力-应变关系。为了实现蠕变本构模型,首先在类中定义弹性、黏性、塑性和损伤部分的应力计算函数。为了处理时间依赖性,需要在模型中定义时间步长和损伤演化方程,例如通过 damage = f(strain) 来更新损伤变量,并将其与本构模型耦合。在时间步求解过程中,利用 FLAC3D 的 step() 函数进行每个时间步的求解,更新应力、应变、损伤等状态变量。然后,通过定义边界条件和荷载历史,使用 FLAC3D 的 set_boundary() 和 apply_load() 函数施加合适的边界条件和加载路径。接下来,进行数值模拟,并通过 plot()、result() 等后处理函数可视化模拟结果,分析应力、应变、损伤等演化过程。最后,调整参数以优化模型。

本文以晋城胡底煤矿轨道大巷为工程背景,巷道断面为直墙半圆拱形,巷道宽 4.2 m,高 3.2 m。巷道顶底板和帮部为岩性较软的砂质泥岩,巷道原支护形式为 U29 钢支架。巷道开挖后,设计专门的测量方案,分别监测拱顶至拱底的竖向变形和两帮之间的水平位移。根据现场监测数据发现,巷道变形特点主要体现在为变形量大,变形不均匀,变形持续时间长并且无法稳定的特点。经过 165 天的巷道变形监测可知,拱顶最大下沉量为 440 mm,两帮变形量为 557 mm,底板变形为 353 mm。

根据现场实际工况,建立三维数值仿真计算模型,网格划分和岩性分组如图 4 所示。模型长 × 宽 × 高 = 50 m × 36 m × 4 m。模型共有节点 99 063 个,单元 87 352 个。模拟埋深 1 100 m,根据该矿地应力测试数据,竖直和水平方向分别施加 27.5 MPa 和 33 MPa 的应力。水平方向限制位移,底面竖直方向限制位移。蠕变时间设置为 180 d。支护构件为 U 型钢支架,分别建立支护强度较高的 U36 钢支架与支护强度相对较低的 U29 钢支架的数值计算模型,分别命名为模型 1 和模型 2。研究蠕变作用下不同支护强度影响下的围岩力学响应。

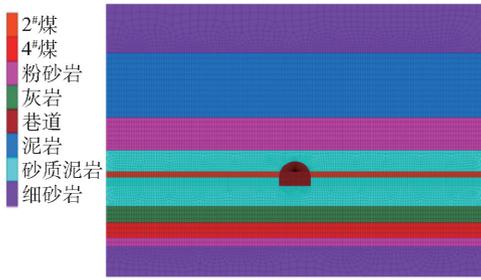


图4 数值计算模型

表1 岩性物理力学参数

岩层	弹性模量/GPa	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	内摩擦角/ $(^\circ)$	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
细砂岩	15.8	2 650	33	8.20	2.5
砂质泥岩	9.8	2 500	32.5	6.52	2.2
泥岩	7.65	2 550	30.8	5.54	1.8
粉砂岩	10.6	2 600	35.8	6.15	2.8
灰岩	16.7	2 650	36.5	10.40	3.0
煤	3.2	2 450	28.5	2.40	0.8

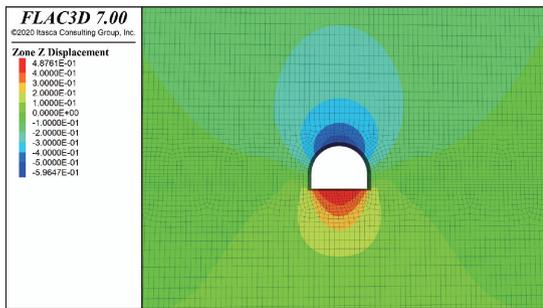
表2 岩性物理力学参数

支护类型	截面面积/ m^2	弹性模量/GPa	泊松比	截面惯性矩	
				I_x/mm^4	I_y/mm^4
U29	9.2×10^{-3}	210	0.3	4.37×10^7	2.65×10^8
U36	1.3×10^{-2}	210	0.3	7.3×10^7	3.0×10^8

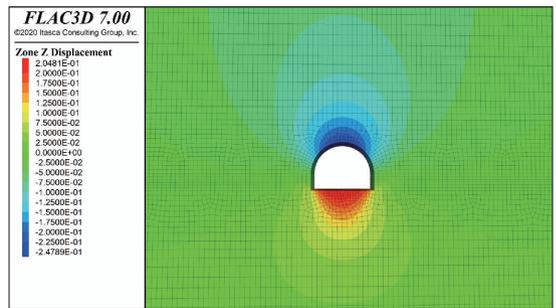
图5和图6展示了在不同支护强度条件下两个数值模型的位移响应情况。通过对比发现,在相同的蠕变时间内,不同支护强度显著影响巷道的位移分布及变形程度,特别是在拱顶、拱底和巷道帮部等关键位置的响应特征尤为明显。

具体而言,模型1的拱顶的竖向位移达到59.6 cm,而拱底的竖向位移为48.8 cm。相比之下,当支护强度提高后的模型2,拱顶和拱底的竖向位移分别减少至24.8 cm和20.5 cm。由此可见,通过提升支护强度,拱顶的竖向位移降低了58.4%,而拱底的竖向位移下降了58.0%。这一结果表明,增强支护强度在控制围岩竖向位移发展方面具有显著效果。此外,水平位移主要集中在巷道的帮部区域。在支护强度为0.5 MPa的条件下,巷道帮部的水平位移最大值为51.8 cm。

在支护强度提升至1 MPa后,水平位移降至22.1 cm,下降幅度达57.3%。这说明,通过增强支护强度,不仅能有效控制围岩的竖向变形,还能显著减小帮部的水平位移,进一步提高巷道的整体稳定性。从位移的空间分布来看,低支护强度下,拱顶和帮部的位移集中区域更为明显,变形范围更大,表现出围岩流变发展迅速、变形剧烈的特点。而在高支护强度下,位移场分布更加均匀,变形集中区域明显缩小,表明支护系统对围岩的约

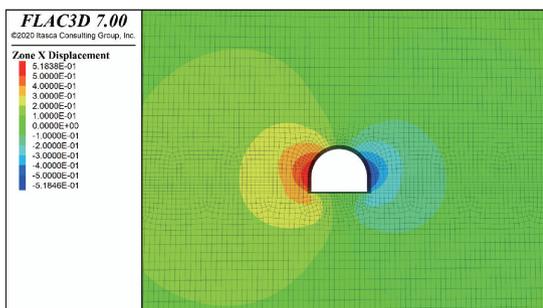


(a) 模型1

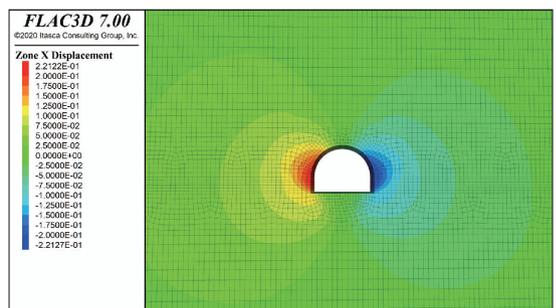


(b) 模型2

图5 竖直位移



(a) 模型1



(b) 模型2

图6 水平位移

束作用显著增强。综上所述,通过提升支护强度,能够显著抑制围岩在蠕变作用下的位移发展,尤其是在拱顶、拱底和帮部区域的变形控制效果尤为显著。

根据第 2 节理论分析可知,围岩的蠕变速度随着应力梯度的增加而增大,进而蠕变变形量也大。本节的数值模拟结果也验证了这一点,支护强度高的 U36 钢支架减小了远端围岩与巷道壁的应力梯度,显著控制了围岩的蠕变速度和蠕变变形发展。综上所述,通过提升支护强度,能够显著抑制围岩在

蠕变作用下的位移发展,尤其是在拱顶、拱底和帮部区域的变形控制效果尤为显著。

图 7、图 8 所示为不同支护强度竖直应力、水平应力变化情况。从应力响应结果来看,竖向应力在巷道帮部距离边缘约 4 m 处达到最大值。在支护强度较低的模型中,该位置的竖向应力峰值为 43.9 MPa;而当支护强度提高后,峰值略微下降至 43.6 MPa。这表明,尽管提升支护强度对竖向应力的分布影响有限,但支护系统对应力集中区域的调控效果依然显现。

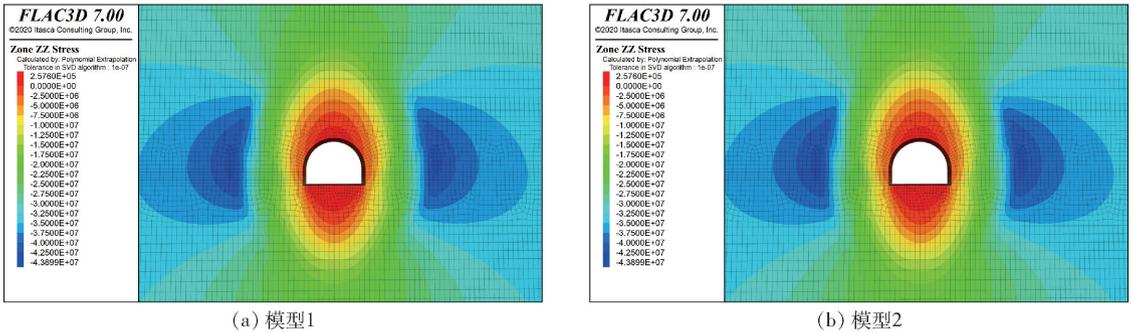


图 7 竖直应力

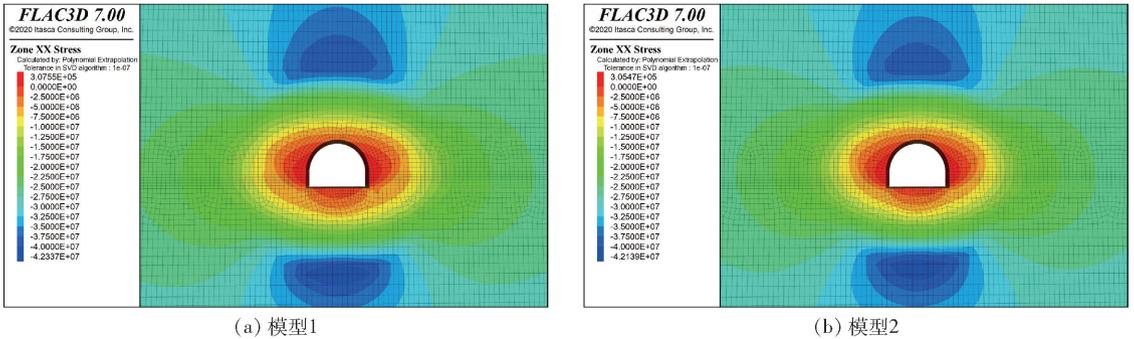


图 8 水平应力

水平应力的分布表现出另一种特征:在巷道壁上约 5 m 位置达到峰值。在低支护强度条件下,水平应力峰值为 42.3 MPa,而在高支护强度条件下,峰值略微下降至 42.1 MPa。这一变化表明,支护强度的提高对水平应力的集中效应也具有一定的调节作用,尤其是在蠕变长期作用下。

图 9 所示为巷道开挖后围岩的剪应力(XZ 方向)分布,呈现四象限对称特征,高剪应力主要集中在拱肩和底角区域,可能成为剪切破坏的潜在部位。剪应力较小或接近零的区域位于巷道顶部和底部的正中轴线上,说明这些位置受其他应力主导。当支护反力较小时,剪应力集中于拱肩和底角,局部应力梯度大,可能导致围岩剪切破坏,且巷道变形较大。

支护反力增大后,剪应力分布趋于均匀,高应力区范围扩大但峰值降低,增强了围岩的承载能力并降低局部失稳风险。

关于塑性区分布,图 10 所示为不同支护强度下巷道围岩塑性区范围的显著差异。在支护强度较低时,巷道周围的塑性区范围较大,尤其是在帮部和拱顶区域,塑性区扩展范围更为明显。而随着支护强度的逐步增大,塑性区范围显著缩小,围岩的整体稳定性得到了明显改善。这表明,增强支护强度不仅能够有效约束围岩的变形,还能够抑制塑性区的扩展趋势,从而降低巷道失稳的风险。

此外,结合应力和塑性区的分布特征可以看出,巷道的应力集中区域与塑性区范围存在较强的关联

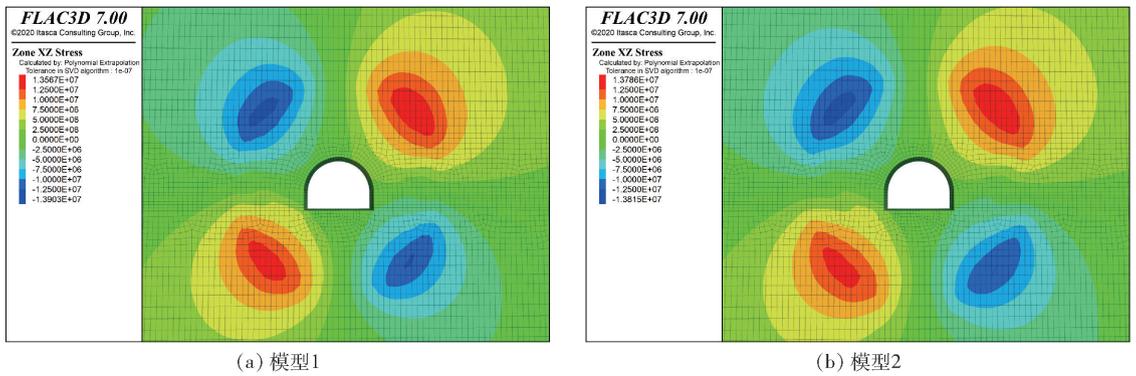


图9 剪切应力

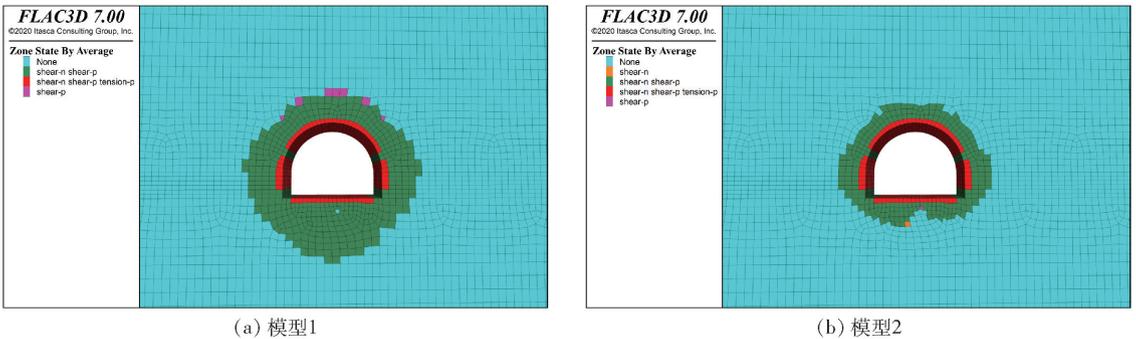


图10 塑性区范围

性。应力峰值通常出现在塑性区的外围,这表明应力集中可能是塑性区扩展的驱动因素之一。而通过提升支护强度,能够有效降低围岩的应力集中程度,从而抑制塑性区的进一步扩展。综上所述,不同支护强度条件下巷道的应力响应和塑性区范围展现出明显的差异性,提升支护强度对围岩的应力调控和塑性区收缩具有重要作用。

4 结论

本文通过结合理论分析和数值模拟的研究方法,系统探讨了深部巷道蠕变发展的关键影响因素以及控制机理,并以实际工程为依托开展深入研究。

(1)通过理论推导得出,围岩蠕变速度与巷道内部的应力梯度呈正比关系。较大的应力梯度会加速围岩应力的重新分布,从而导致蠕变变形的加剧。而在支护系统的作用下,应力梯度得以有效减小,围岩变形速率随之显著降低。理论研究进一步表明,提升支护强度不仅能够优化应力分布,还能抑制围岩中不均匀变形的发展趋势,为深部巷道围岩稳定性提供理论依据。

(2)基于数值模拟的研究进一步验证了理论分

析的结论。模拟结果显示,巷道开挖后围岩受到初始应力场的重新分布影响,表现出显著的流变变形特性。然而,通过逐步提升支护强度,可以显著抑制蠕变变形的持续发展,同时有效限制塑性区范围的扩展。这表明,合理的支护设计不仅可以减缓围岩应力的集中效应,还能在蠕变发展过程中对围岩起到良好的约束作用。模拟还发现,高支护强度条件下,巷道的塑性区范围明显缩小,围岩整体趋于稳定,进一步证明了理论研究的正确性。

[参考文献]

[1] 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.

[2] 王猛,郑冬杰,王襄禹,等. 深部巷道钻孔卸压围岩弱化变形特征与蠕变控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(3): 437-445.

[3] 苏海健,靖洪文,张春宇,等. 软化与膨胀作用下深部巷道围岩黏弹塑性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(2): 185-190.

[4] 丁增,张奇明,王恩元,等. 深部围岩蠕变特性对巷道稳定性影响数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S1): 404-410.

(下转第30页)