doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 014
周少兵, 刘荣乐, 李明睿, 等. TBM始发硐室群围岩稳定性及开挖工法优化研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 145-154.
Zhou Shaobing, Liu Rongle, Li Mingrui, et al. Stability of surrounding rock and optimization of excavation methods for TBM launching chamber groups[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2026, 78(6): 145-154.

TBM始发硐室群围岩稳定性及开挖工法优化研究

周少兵[1], 刘荣乐[2], 李明睿[2], 孙志浩[3], 张春虎[2], 周新勋[2]
(1. 江西铜业股份有限公司, 南昌 330038;
2. 中国瑞林工程技术股份有限公司, 南昌 330038;
3. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

摘　要: 针对矿山TBM大型始发硐室群开挖的围岩稳定性问题, 本文以江西某金属矿山为背景, 利用PLAXIS 3D数值模拟, 研究了斜坡道分层法与小断面扩刷法两类施工工艺下大断面组装硐室围岩变形和应力分布特征。研究表明: 斜坡道分层法对应的围岩变形量峰值为3. 20 mm, 小于小断面扩刷法(峰值3. 30～3. 41 mm); 两类工法在施工过程中均会在拐角处出现应力集中, 且在施工完成后出现残余应力, 其中, 斜坡道分层法施工产生的最大残余应力为49. 7 MPa, 小断面扩刷法施工产生的最大残余应力为16. 7 MPa, 综合考虑变形控制效果与施工机械化程度, 推荐优先采用斜坡道分层法, 并实施“锚杆＋钢筋网”临时支护。研究成果可为深部金属矿山TBM始发硐室群的设计与施工提供科学依据。

关键词: 大硐室群; TBM; 数值模拟; 施工技术; 围岩稳定性; 金属矿山
中图分类号: TD421. 5; TD803　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0145-10

Stability of surrounding rock and optimization of excavation methods for TBM launching chamber groups

Zhou Shaobing[1], Liu Rongle[2], Li Mingrui[2], Sun Zhihao[3], Zhang Chunhu[2], Zhou Xinqing[2]
(1. Jiangxi Copper Corporation Limited, Nanchang 330038, China;
2. China Nerin Engineering Co., Ltd., Nanchang 330038, China;
3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To address the stability issues of surrounding rock during the excavation of large-scale TBM launching chamber groups in deep mines, this study takes a TBM launching chamber group project in a metal mine in Jiangxi Province as the engineering background. Using PLAXIS 3D numerical simulation software, the deformation and stress distribution characteristics of the surrounding rock of a large-section assembly chamber were investigated under two construction methods: the ramp bench method and the small-section pilot tunnel enlargement method. The results indicate that the peak surrounding rock deformation induced by the ramp bench method is 3. 20 mm, which is smaller than that of the small-section enlargement method (peak values ranging from 3. 30 to 3. 41 mm). Both methods exhibit stress concentration at corners during construction and residual stress after completion. The maximum residual stress generated by the ramp bench method is 49. 7 MPa, while that of the small-section pilot tunnel enlargement method is 16. 7 MPa. Considering the overall deformation control effect and the degree of mechanization, the ramp bench method is recommended as the preferred approach, with immediate support using “rock bolts＋steel mesh” applied at corner locations. The research findings can provide a scientific basis for the design and construction of TBM launching chamber groups in deep metal mines.

Key words: large chamber group; TBM; numerical simulation; construction technology; surrounding rock stability; metal mine

收稿日期: 2026-06-15
作者简介: 周少兵, 高级工程师, 长期致力于有色金属资源开发与冶炼技术有关的管理工作。

全断面硬岩隧道掘进机(Tunnel Boring Machine，TBM)作为一种高效的机械化施工设备，凭借其在深埋长隧洞施工中掘进效率高、成形质量好、安全风险低的显著优势，越来越多地应用于深部金属矿山巷道建设中[1-4]。然而，受矿井提升能力和巷道运输能力限制，TBM整机无法整体下井，需分体运输至井下后完成组装，并在专用硐室内实现设备调试和始发掘进。因此，在TBM施工前需预先开挖由组装硐室、步进硐室和始发硐室组成的始发硐室群。

与常规地下硐室群相比，TBM始发硐室群在结构形式及施工组织方面具有明显差异。一方面，组装硐室、步进硐室及始发硐室沿掘进方向呈线性串联布置，各硐室间距较小，空间耦合作用明显，且硐室群施工顺序及临时通道布置受到施工工艺的约束，可调整空间有限；另一方面，TBM设备拼装对硐室断面成型质量及围岩稳定性要求远高于普通地下硐室，局部围岩失稳、底板隆起或断面收敛均可能影响设备安装精度及后续始发施工。

目前，针对地下硐室群围岩稳定性的研究已积累了丰富成果。纵观既有文献，硐室群稳定性的研究焦点长期集中于支护体系优化[5-12]，在此基础上，学者们进一步探讨了施工顺序与开挖过程的协同影响，陈佳琪[13]针对深部软岩条件，证实优化开挖顺序可有效抑制塑性区扩展并减小周边位移；王炯等[14-15]以“塑性区破坏体积最小化”为目标，通过数值模拟确定了最优施工顺序，并配套提出了软岩硐室群的变形控制技术；董亚宁等[16]结合数值模拟并结合理论推导，研究了井下溜破系统这类复杂硐室群施工中的互扰效应。尹升华等[17]采用数值模拟手段开展了深部硐室群围岩变形规律研究并提出了深部硐室群的空间布局及施工顺序。这些研究为地下硐室群围岩稳定性分析提供了重要理论基础。

然而，上述研究对象多集中于地下厂房及矿山生产硐室等常规地下硐室群，其结构形式与TBM始发硐室群存在明显差异。针对TBM始发硐室群这一特殊工程形式，其研究主要集中于工程设计及施工组织优化[18]，而对围岩力学响应的量化机理仍缺乏深入的理论分析，难以为TBM始发硐室群施工方案优化提供可靠理论依据。

针对上述问题，本文以某金属矿TBM始发硐室群工程为依托，建立三维数值模型，通过模拟斜坡道分层开挖法和小断面导洞扩刷法两种典型施工方案，对不同开挖次序下围岩应力重分布以及位移响应机制进行分析，并据此提出适用于TBM始发硐室群的施工优化方案，为类似工程设计与施工提供理论参考。

1 工程背景

江西某金属矿山拟在井下建设TBM地下始发硐室群，用于TBM设备井下组装、步进及始发施工。始发硐室群主要由组装硐室、步进硐室和始发硐室组成，三者首尾相连，沿轴线方向线性布置。

TBM组装硐室设计为三心拱断面，掘进断面9.3 m×9.2 m，硐室长度17 m，组装硐室跨度大、开挖量大，是整个硐室群中最关键的控制结构。

步进硐室设计为三心拱断面，掘进断面5.02 m×4.45 m，硐室长度43 m，步进硐室与组装硐室串联布置，始发硐室设计为圆形断面，掘进断面Φ3.83 m，硐室长度8 m。三个硐室线性串联，前部硐室开挖方式直接影响后续硐室施工条件。

2 数值模拟与施工方案

2.1 数值模型建立

本文采用PLAXIS 3D有限元软件建立TBM始发硐室群三维数值模型。为消除边界效应对开挖响应的干扰，模型边界至开挖轮廓的最小距离宜取3～5倍洞径[19]。基于该原则，本文模型沿垂直巷道掘进方向(x方向)取100 m，沿巷道掘进方向(y方向)取200 m，沿竖直方向(z方向)取50 m，该尺寸能够有效避免模型边界对计算结果产生显著影响，从而保证模拟结果的合理性与准确性。

实际工程中TBM始发硐室群深约300 m，模型顶部按上覆岩体自重施加等效垂直荷载，以模拟实际地应力场。边界条件设置如下：模型底面施加固定约束，限制其在三个方向的位移；模型侧面施加法向约束(滑动约束)，限制法向位移而允许切向变形，从而较好地反映围岩在无限域条件下的受力特征。

2.2 模型参数确定

TBM始发硐室群布置于－190 m中段，研究区间内主要发育微风化熔结凝灰岩、微风化角砾凝灰岩及局部构造破碎带。结合工程勘察资料和硐室实际围岩条件，本文数值计算选取工勘报告中的微风化凝灰岩作为代表性围岩进行分析，该岩体对应Ⅱ级围岩类别。

围岩本构模型采用Mohr-Coulomb理想弹塑性

模型，相关物理力学参数见表1，相关参数选取于地勘报告，工程资料未给出的参数参考相关资料[20]进行取值。

本模型设置锚网喷支护。喷砼采用实体单元模拟，锚杆采用PLAXIS自带的弹塑性点对点弹簧单元模拟，钢筋网采用PLAXIS的土工格栅模拟。PLAXIS土工格栅单元具有轴向刚度而无弯曲刚度，只能承受拉力，一般用来模拟土体的加固作用，同样适用于模拟喷射混凝土包裹的钢筋网。模型材料参数见表2。

表1　围岩物理力学参数

Table 1　Physical and mechanical parameters of surrounding rock

岩石类型	天然密度/(g·cm^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比	凝聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	静止侧压力系数K_0
Ⅱ类	2.5	17	0.3	4.3	44	4.8	0.5

表2　支护材料物理力学参数

Table 2　Physical and mechanical parameters of support materials

材料类型	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	拉伸强度/MPa	横截面积/m^2	间距(横向×纵向)/m
喷砼	28	0.2	25	2.7		
钢筋网片	200	0.3		360	2.8×10^{-5}	0.1×0.1
锚杆	210	0.3		270	3.14×10^{-4}	1×1

2.3　施工工序数值模拟

为真实再现不同施工工艺的动态过程，模型通过“冻结”土体单元模拟开挖卸荷。本研究设置以下三种典型施工方案。

2.3.1　斜坡道分层法

在距离组装硐室11.54 m位置施工上山斜坡，斜坡总水平长度17.54 m，其中联络道段斜坡水平长度11.54 m，进入组装硐室部分水平长度6 m(图1)。组装硐室上部先开挖，断面宽9.3 m、高4.5 m、长17.8 m；上部采用分块掘进方式，先开挖右侧，再开挖左侧，每侧宽4.65 m、高4.5 m(图2)。上部完成后，自联络道起坡点开始开挖组装硐室下部，下部按一次性全断面开挖考虑，掘进循环步长3 m。组装硐室完成后，再开挖步进硐室及始发硐室。步进硐室断面宽5.02 m、高4.45 m，掘进长度43 m；始发硐室为圆形断面，长度8 m，均按每循环3 m推进。

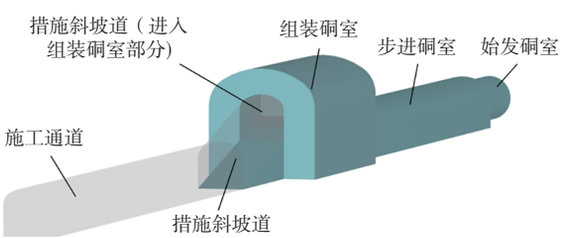


图1　斜坡道分层开挖模拟示意图

Fig. 1　Schematic diagram of layered excavation simulation for the ramp

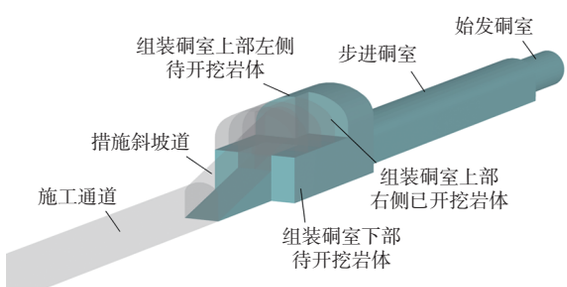


图2　组装硐室上部岩体开挖模拟示意图

Fig. 2　Schematic diagram of simulated excavation of the overlying rock mass of the assembly chamber

斜坡分层法施工总开挖步为40步，其中：开挖步1～3为辅助斜坡道逐步开挖，开挖步4～17为组装硐室观测断面位置上部右侧岩体以及上部左侧岩体的逐步循环开挖，开挖步18～23为组装硐室下部岩体的逐步循环开挖，开挖步24～37为步进硐室逐步循环开挖，开挖步38～40为始发硐室的逐步循环开挖。

2.3.2　小断面扩刷法方案一

在组装硐室入口位置先逐步开挖断面宽5.02 m、高4.45 m的小断面施工通道，掘进步长3 m，开挖长度17.8 m。小断面贯通后，立即利用该通道开挖步进硐室和始发硐室，待后续两硐室开挖完成后，再对组装硐室进行扩刷。扩刷按“先右帮、后左帮、再顶板”的顺序逐步进行，每一循环步内扩刷至设计位置后再进入下一循环，施工模拟如图3所示。

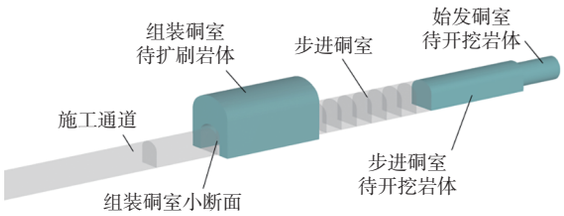


图3 小断面扩刷法方案一开挖模拟示意图

Fig. 3 Excavation simulation schematic for scheme I of the small section enlargement method

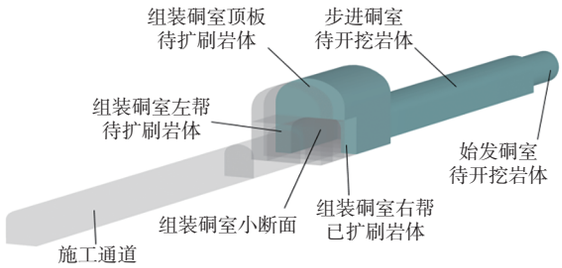


图4 小断面扩刷法方案二开挖模拟示意图

Fig. 4 Excavation simulation schematic for scheme Ⅱ of the small section enlargement method

小断面扩刷法方案1施工的总开挖步为42步，其中：开挖步2～7为组装硐室小断面逐步循环开挖，开挖步8～21为步进硐室逐步循环开挖，开挖步22～24为始发硐室逐步循环开挖，开挖步25～42为组装硐室右帮扩刷、左帮扩刷和顶板扩刷循环开挖。

2.3.3 小断面扩刷法方案二

组装硐室小断面开挖过程与方案一一致，但小断面贯通后不立即开挖步进硐室与始发硐室，而是先对组装硐室进行扩刷，扩刷完成后再依次开挖步进硐室与始发硐室。与方案一相比，方案二主要改变了组装硐室扩刷与后续硐室开挖的先后次序，施工模拟如图4所示。

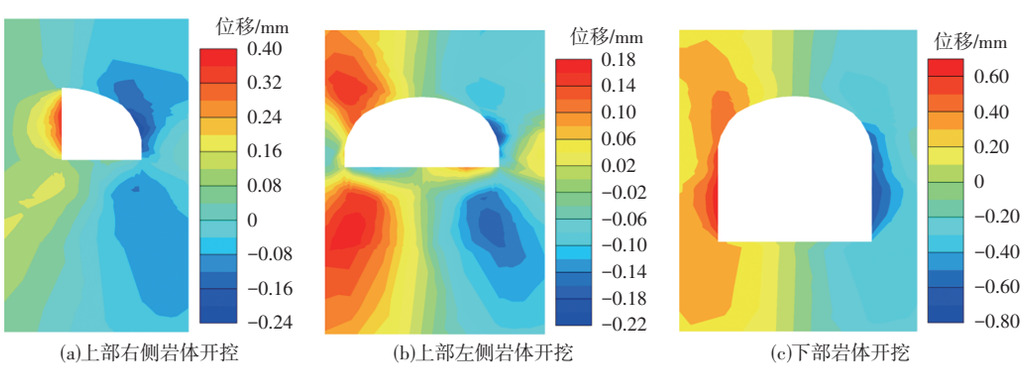
小断面扩刷法方案2施工的总开挖步为42步，其中：开挖步2～7为组装硐室小断面逐步循环开挖，开挖步8～25为组装硐室右帮扩刷、左帮扩刷和顶板扩刷循环开挖，开挖步26～39为步进硐室逐步循环开挖，开挖步40～42为始发硐室逐步循环开挖。

3 数值计算结果与分析

3.1 单硐室开挖围岩位移场分析

3.1.1 组装硐室斜坡道分层法开挖位移响应

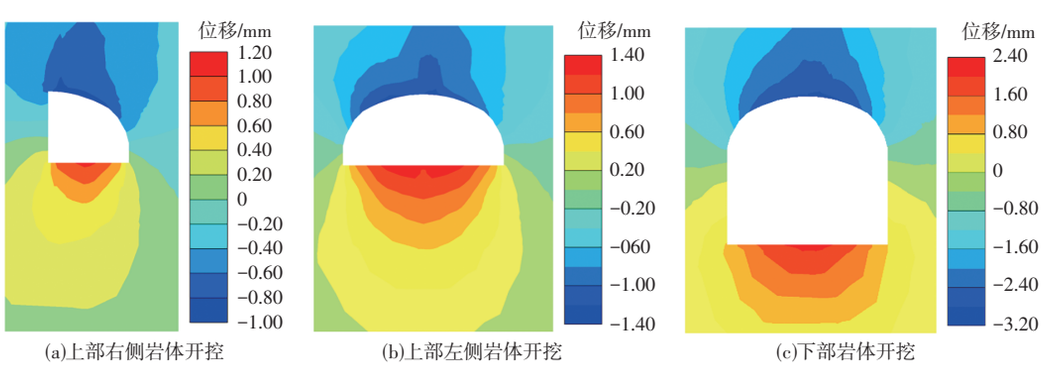
组装硐室采用斜坡道分层法开挖时，上部右侧围岩开挖后、上部左侧围岩开挖后以及下部围岩开挖后，组装硐室围岩水平和竖直位移云图如图5、图6所示。



(a)上部右侧岩体开挖 (b)上部左侧岩体开挖 (c)下部岩体开挖

图5 斜坡道分层法施工组装硐室围岩水平位移云图

Fig. 5 Horizontal displacement contours of surrounding rock in assembly chamber constructed by the ramp benching method



(a)上部右侧岩体开挖 (b)上部左侧岩体开挖 (c)下部岩体开挖

图6 斜坡道分层法施工组装硐室围岩竖直位移云图

Fig. 6 Vertical displacement contours of surrounding rock in assembly chamber constructed by the ramp benching method

当组装硐室上部右侧围岩开挖后，左帮最大变形量约为0.40 mm，右帮最大变形量约为0.24 mm，顶板最大沉降值约为1.0 mm，底板最大隆起量约为1.2 mm。此阶段硐室断面尚未对称成型，左帮变形大于右帮。

随着上部左侧围岩开挖完成，左帮最大变形量约为0.18 mm，右帮约为0.20 mm，顶板最大沉降增至1.4 mm，底板最大隆起约为1.4 mm。相较于仅开挖右侧时，左右帮变形差异明显减小，而顶板与底板变形则进一步增长。

在下部岩体开挖完成后，组装硐室围岩变形显著增大，左帮和右帮最大变形量分别增至0.70 mm和0.80 mm，顶板最大沉降达到3.2 mm，底板最大隆起约为2.4 mm。可见，组装硐室围岩最大变形主要发生于断面最终成型阶段，即下部岩体一次性开挖完成后。

3.1.2　组装硐室小断面扩刷法开挖位移响应

组装硐室采用小断面扩刷法方案1时，小断面开挖后、右帮扩刷后、左帮扩刷后以及顶板扩刷后，组装硐室围岩水平、竖直位移云图分别如图7、图8所示。

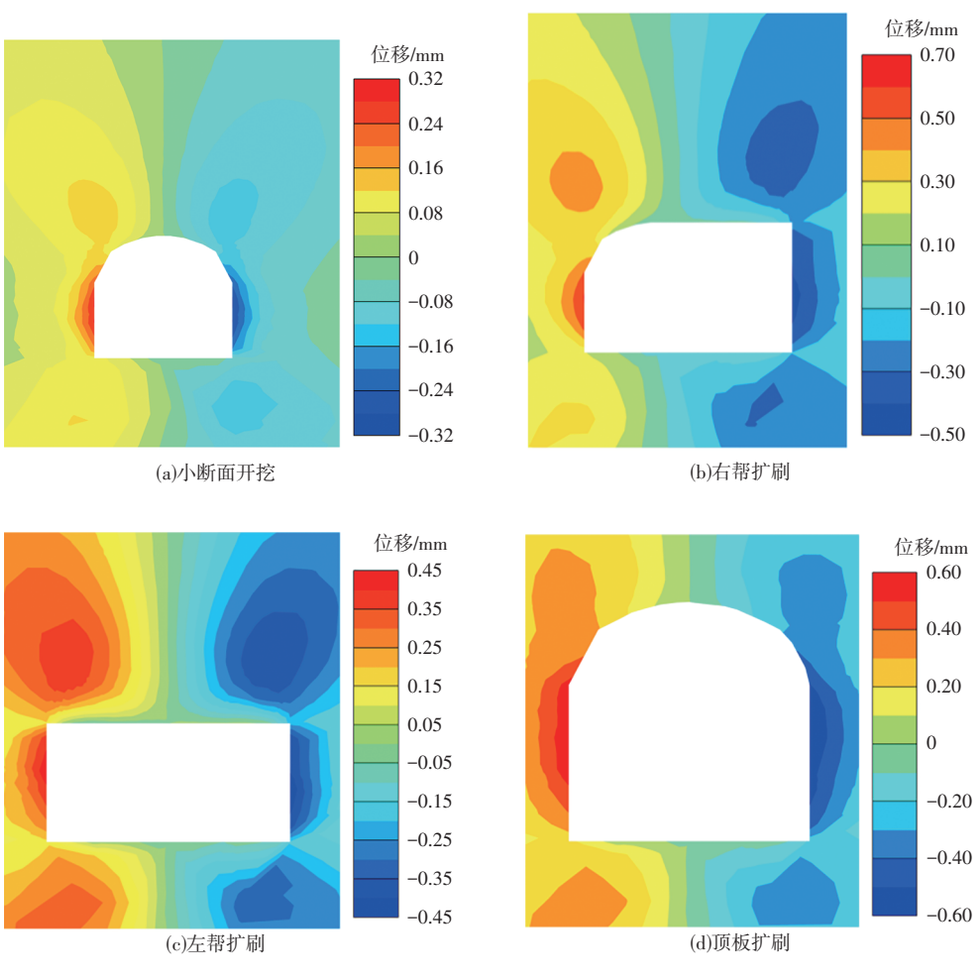


图7　小断面扩刷法施工组装硐室围岩水平位移云图

Fig. 7　Horizontal displacement contours of surrounding rock in assembly chamber constructed by the small section enlargement method

当组装硐室仅开挖小断面后，两帮最大变形量约为0.32 mm，顶板最大沉降约为1.2 mm，底板最大隆起约为1.0 mm。由于此时断面较小，且断面形态相对规则，围岩受力条件较好，因此总体变形尚处于较低水平。

当右帮扩刷完成后，围岩变形迅速增加，左帮与右帮最大变形量分别约为0.70 mm和0.50 mm，顶板最大沉降增至3.2 mm，底板最大隆起约为2.4 mm。此时断面一侧已扩展而另一侧仍保持原小断面形态，硐室空间与围岩受力呈明显不对称状态，且局部形成近似矩形的临时受力结构，顶板约束能力下降，因此引起显著变形增长。

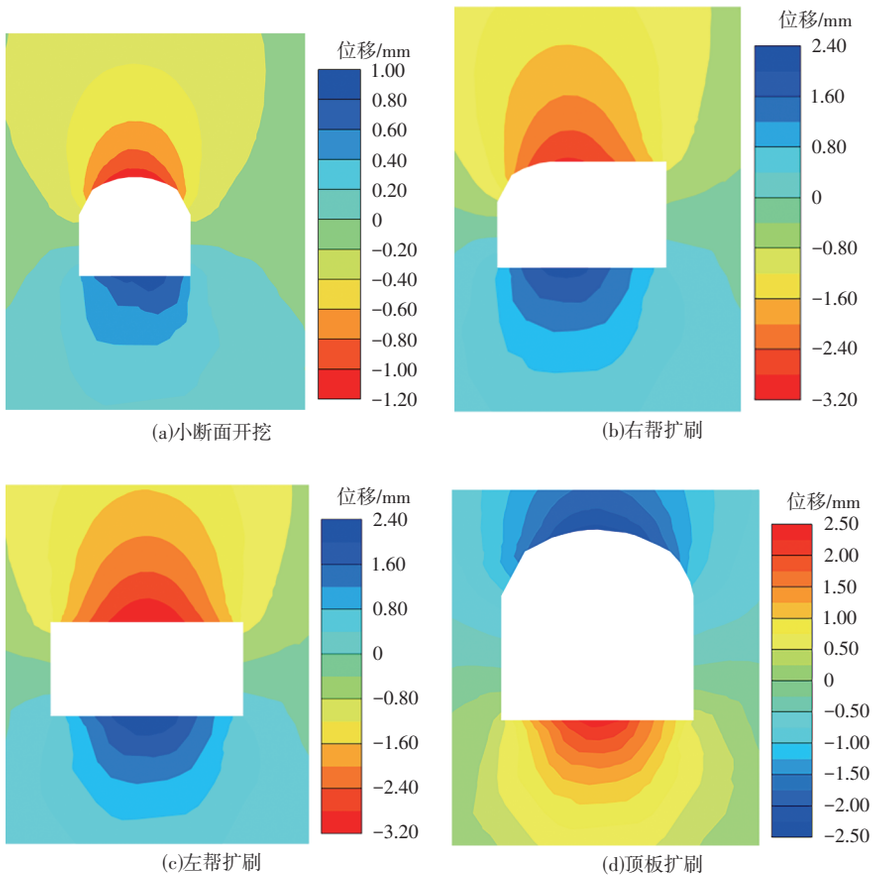


图8 小断面扩刷法施工组装硐室围岩竖直位移云图

Fig. 8 Vertical displacement contours of surrounding rock in assembly chamber constructed by the small section enlargement method

当左帮扩刷完成后，左帮与右帮最大变形量均约为0.45 mm，顶板最大沉降仍约为3.2 mm，底板最大隆起约为2.4 mm。说明两帮对称扩刷后，帮部受力条件有所改善，两帮收敛出现一定程度回落，但由于顶板尚未成拱，顶板和底板变形并未明显减小。

当顶板扩刷完成后，两帮最大变形量约为0.60 mm，顶板最大沉降约为2.5 mm，底板最大隆起约为2.5 mm。与两帮扩刷阶段相比，顶板沉降出现一定幅度回落，表明顶板成拱后断面受力条件得到优化，拱效应开始发挥作用，围岩整体稳定性有所提高。

3.1.3 步进硐室与始发硐室围岩位移分析

步进硐室、始发硐室开挖后围岩位移云图分别如图9、图10所示。步进硐室开挖后，围岩两帮最大变形量约为0.32 mm，顶板最大沉降约为1.2 mm，底板最大隆起约为1.0 mm。始发硐室开挖后，顶板最大沉降约为1.0 mm，底板最大隆起约为0.6 mm，两帮最大变形量约为0.16 mm。总体上，步进硐室和始发硐室的围岩变形水平均小于组装硐室，尤其始发硐室为圆形断面，受力条件明显优于大跨度异形组装硐室。

3.2 单硐室开挖围岩应力场分析

3.2.1 斜坡道分层法下组装硐室应力场演化

组装硐室采用斜坡道分层法开挖时，上部右侧围岩开挖后、上部左侧围岩开挖后以及下部围岩开挖后，组装硐室围岩最大主应力场如图11所示。

可以发现，上部右侧岩体开挖后，在顶板拐角位置出现明显应力集中，最大主应力达到310.3 MPa，最大主应力方向与直墙方向呈约45°夹角。该点三向应力状态为σ_1=310.3 MPa、σ_2=115 MPa、σ_3=55 MPa，代入Mohr-Coulomb准则(c=4.3 MPa，φ=44°)得临界$\sigma_1\approx$350 MPa>310.3 MPa，表明该点仍处于弹性状态，未发生剪切破坏。这一现象说明，当大跨度断面局部形成自由面后，顶板与侧墙交汇处的几何不连续性极易引起应力集中，且三维约束效应使岩石在高应力集中下仍能维持稳定。当组装硐室上部左侧围岩开挖后，该处应力集中现象仍然存在，但最大主应力降低至49.1 MPa，且主应力方向发生明显转变，近似旋转90°。当组装硐室下部岩体开挖完成后，原先发生应力集中的位置仍存在残余应力，

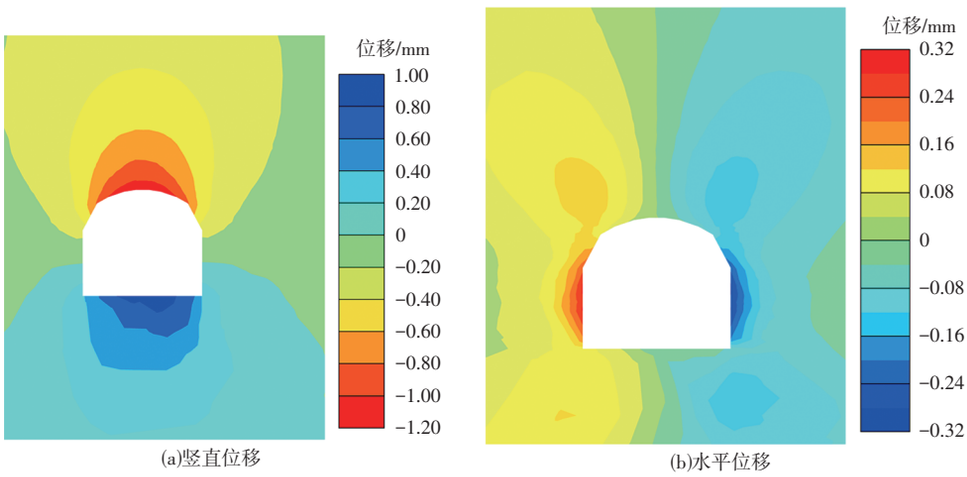


图 9　步进硐室开挖后围岩位移云图

Fig. 9　Displacement contours of surrounding rock after excavation of stepping chamber

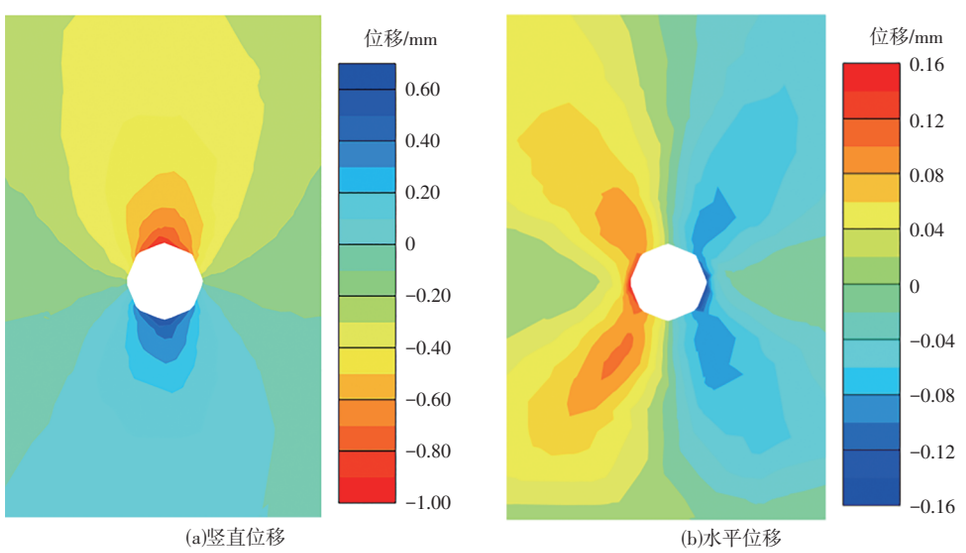


图 10　始发硐室开挖后围岩位移云图

Fig. 10　Displacement contours of surrounding rock after excavation of launching chamber

最大主应力约为 49. 7 MPa，主应力方向基本保持不变。由此可见，前期形成的应力集中部位并不会完全消失，而是以残余应力形式保留在最终成型断面附近。因此，该类部位在现场施工中仍需重点关注，应采取临时支护或局部加固措施，以防止围岩掉块。

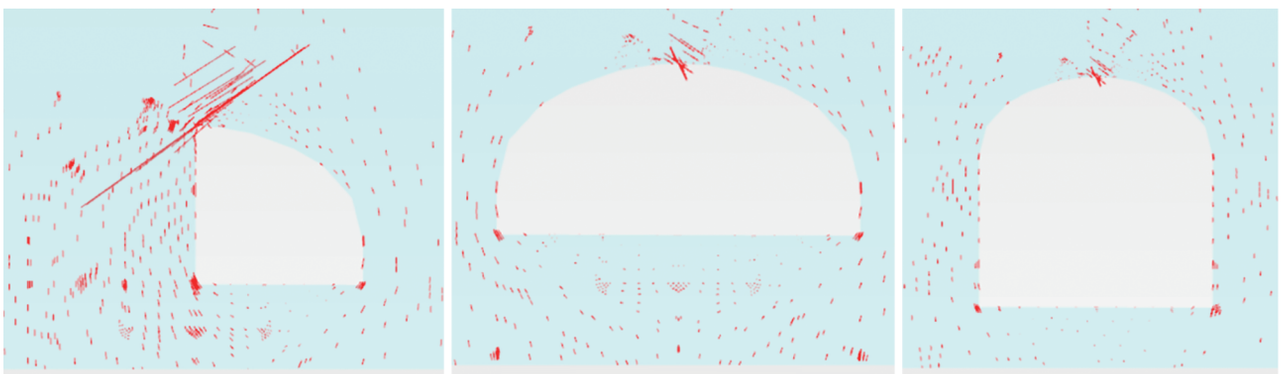
3. 2. 2　小断面扩刷法下组装硐室应力场演化

组装硐室采用小断面扩刷法方案 2 开挖时，小断面开挖后、右帮岩体扩刷后、左帮岩体扩刷后以及顶板岩体扩刷后，组装硐室围岩最大主应力场如图 12 所示。

组装硐室采用小断面扩刷法时，小断面开挖后，在三心拱两个底角及两个拱脚四个拐角处出现应力集中，最大主应力达到 20. 44 MPa。当右帮扩刷后，右帮转为矩形断面，左帮仍保持三心拱形式，此时矩形断面拐角处最大主应力约为 18 MPa，而左侧三心拱断面的最大主应力由 20. 44 MPa 增大至 25. 54 MPa。当左帮扩刷完成后，硐室整体断面趋于矩形，四个拐角处出现较为典型的应力集中，其中最大主应力约为 18. 9 MPa。当顶板扩刷完成后，硐室重新形成三心拱断面，此时在两个底角和两个拱脚处再次出现应力集中，此外原小断面阶段形成的局部应力集中区域仍存在残余应力，围岩最大主应力约为 16. 71 MPa。

3. 3　不同施工方案对组装硐室围岩影响分析

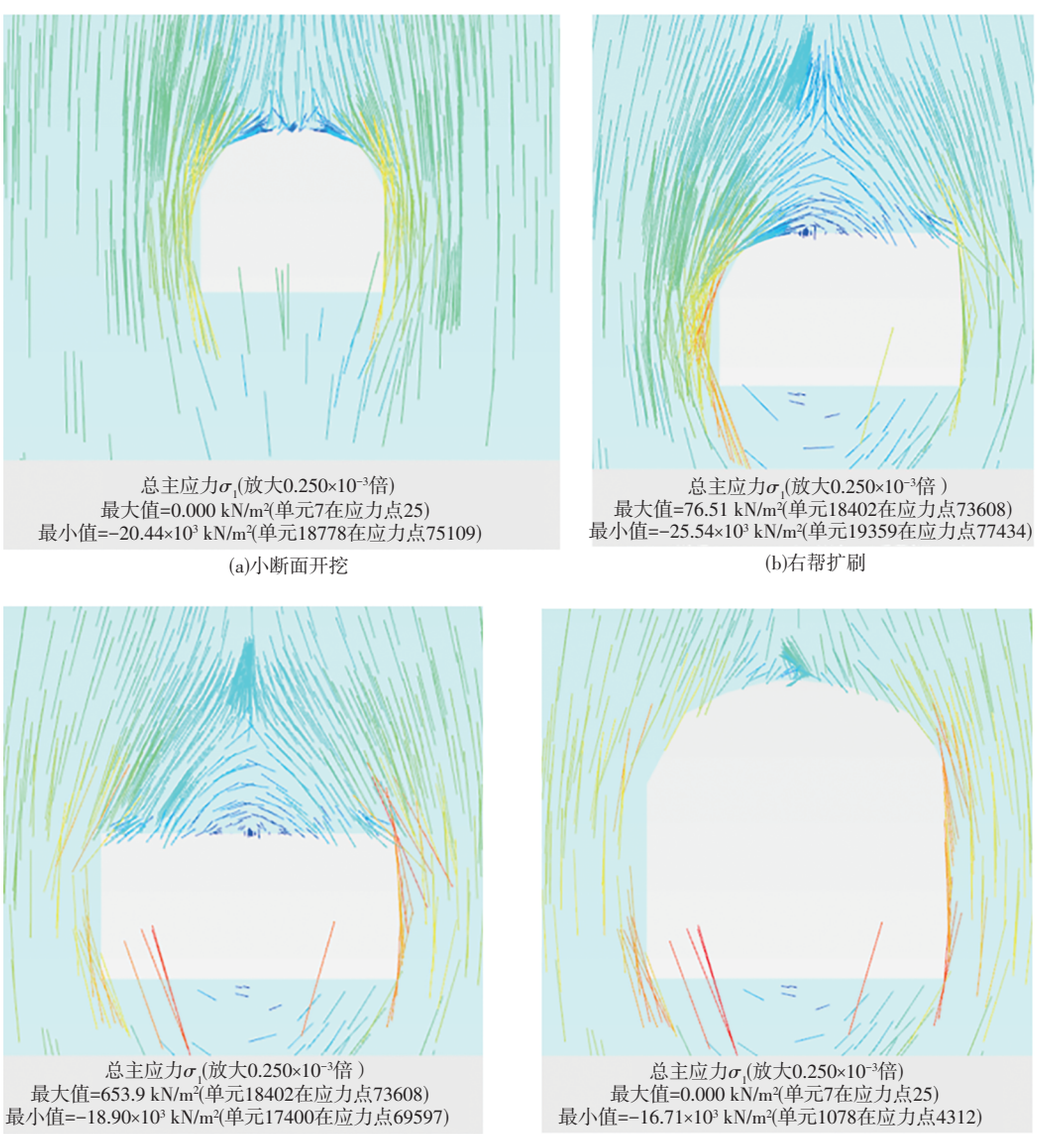
为综合评价组装硐室围岩稳定性，引入围岩表征变形量指标 S，与围岩变形量相比，该指标能够更加全面地反映围岩的整体变形情况[21]。



(a)上部右侧岩体开挖 (b)上部左侧岩体开挖 (c)下部岩体开挖

图 11 斜坡道分层法施工组装硐室围岩最大主应力场

Fig. 11 Maximum principal stress field of surrounding rock in assembly chamber constructed by the ramp benching method



(a)小断面开挖 (b)右帮扩刷 (c)左帮扩刷

图 12 小断面扩刷法施工组装硐室围岩最大主应力场

Fig. 12 Maximum principal stress field of surrounding rock for chamber constructed by small−section reaming method

$$S=\frac{U_t+U_b+(U_l+U_r)/2}{3}$$

式中：U_t为顶板最大变形量；U_b为底板最大变形量；U_l和U_r分别为左帮和右帮最大变形量，监测断面为组装硐室中间位置处的断面。该指标综合考虑顶板、底板及两帮变形，可较全面反映巷道整体围岩稳定状态。

为直观分析硐室开挖相互影响，建立横坐标为开挖步，组装硐室围岩表征变形量为纵坐标，得到斜坡道分层法开挖、小断面扩刷法方案一、小断面扩刷法方案二这三组模型中，组装硐室围岩变形随开挖的变化规律分别如图 13 所示。

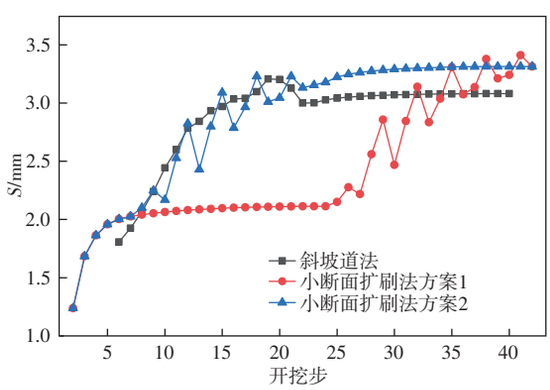


图 13　不同施工工法下组装硐室围岩变形随开挖的变化规律

Fig. 13　Variation law of surrounding rock deformation of assembly chamber with excavation under different construction methods

斜坡道分层开挖、小断面扩刷方案 1(后扩刷组装硐室)、小断面扩刷方案 2(先扩刷组装硐室)三者围岩变形演化规律与极值差异显著：

1) 斜坡道分层法。变形随硐室上部分步开挖持续上升，开挖步 19(硐室下部开挖)达到峰值 3. 20 mm，后续下部接续开挖小幅回弹，步进、始发硐室施工阶段缓慢收敛至 3. 08 mm。

2) 小断面扩刷方案 1。前期随着小导硐、步进及始发硐室开挖阶段变形缓慢增长至 2. 11 mm，随着组装硐室扩刷后变形陡增，两帮开挖断面呈非对称矩形使变形快速抬升，顶板扩刷成型为拱形后受力改善、变形小幅回落，全流程变形峰值 3. 41 mm。

3) 小断面扩刷方案 2。前期小导硐变形发展规律同方案 1，提前完成组装硐室扩刷，两帮、顶板分步开挖同样引发变形交替升降，最终整体峰值 3. 30 mm，相较方案 1 变形极值有所降低。

定量对比可知：斜坡道分层法最大变形 3. 20 mm，较扩刷方案 1 减小 6. 6%、较扩刷方案 2 减小 3. 1%；两类小断面扩刷工法均在扩刷阶段出现明显变形突增，其本质原因在于开挖中断面经历拱形 - 矩形 - 拱形的转换，围岩受力条件劣化，导致变形增大。

4　结论与工程建议

针对某金属矿山 TBM 始发硐室群工程，本文通过数值模拟系统对比了不同施工工法的力学效应，得出以下结论：

1) TBM 始发硐室群施工中，不同开挖工法对围岩的力学响应有显著影响，斜坡道分层法施工的表征变形量峰值(3. 20 mm)小于小断面扩刷法(3. 30～3. 41 mm)，但最终产生的最大残余应力(49. 7 MPa)却远高于后者(16. 7 MPa)。产生该差异的机理在于：斜坡道法受前方未开挖岩体的空间约束，限制了围岩大面积松动，导致岩体能量以高集中应力的形式留存；而小断面扩刷法因导洞贯通提前卸荷，且扩刷时的临时矩形断面导致受力恶化，使得位移出现陡增现象。

2) 建议在类似金属矿山 TBM 始发硐室群施工中，优先选用斜坡道分层法，该方法不仅围岩变形较小，且具备良好的施工通达性和机械化作业条件。针对该工法导致围岩产生较高的残余应力，虽短期内未发生破坏，但长期作用下可能造成岩体的蠕变或诱发延迟性掉块的风险，建议施工中，及时做好临时支护，防止围岩松动掉块，保障作业人员与后续 TBM 始发的安全。

参　考　文　献

[1] 陈发兴，蔡光辉，胡韬. 浅谈 TBM 在金属矿山的应用[J]. 有色金属设计，2021，48(2)：1-8.
Chen Faxing，Cai Guanghui，Hu Tao. Introduction to TBM application in metal mines[J]. Nonferrous Metals Design，2021，48(2)：1-8.

[2] 刘荣乐，樊忠华，张春虎，等. TBM 施工技术在金属矿山长距离运输巷掘进的应用[J]. 现代矿业，2024，40(6)：179-181，185.
Liu Rongle，Fan Zhonghua，Zhang Chunhu，et al. Application of TBM construction technology in excavation of long-distance transportation roadway in metal mines[J]. Modern Mining，2024，40(6)：179-181，185.

[3] 刘荣乐，张春虎，周新勋，等. 多中段平巷矿山系统：202421250390. 3 [P]. 2025-01-14.
Liu Rongle，Zhang Chunhu，Zhou Xinqing，et al. Multi-level horizontal drift mine system：CN202421250390. 3 [P]. 2025-01-14.

[4] 黄建鑫. TBM 在某金属矿山长距离井巷掘进中的应用[J]. 现代矿业，2023，39(7)：205-209.
Huang Jianxin. Application of TBM in long-distance tunneling

in a metal mine[J]. Modern Mining, 2023, 39(7): 205-209.

[5] 侯朝炯. 深部巷道围岩控制的关键技术研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 970-978.
Hou Chaojiong. Key technologies for surrounding rock control in deep roadway[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5): 970-978.

[6] 张俊文. 深部大规模松软围岩巷道破坏分区理论分析[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(2): 292-299.
Zhang Junwen. Theoretical analysis on failure zone of surrounding rock in deep large-scale soft rock roadway[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(2): 292-299.

[7] 陈顺满, 吴爱祥, 王少勇, 等. 软弱围岩巷道变形机理及返修控制技术[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(4): 830-837.
Chen Shunman, Wu Aixiang, Wang Shaoyong, et al. Deformation mechanism and repair control technology of soft surrounding rock roadway[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(4): 830-837.

[8] 王琦, 王雷, 刘博宏, 等. 破碎围岩注浆体空隙特征和力学性能研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(6): 1197-1205.
Wang Qi, Wang Lei, Liu Bohong, et al. Study of void characteristics and mechanical properties of fractured surrounding rock grout[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(6): 1197-1205.

[9] 杨仁树, 朱晔, 李永亮, 等. 层状岩体中巷道底板应力分布规律及损伤破坏特征[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(4): 615-626, 645.
Yang Renshu, Zhu Ye, Li Yongliang, et al. Stress distribution and damage characteristics of roadway floor in layered rock mass[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(4): 615-626, 645.

[10] 侯朝炯. 深部巷道围岩控制的有效途径[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 467-473.
Hou Chaojiong. Effective approach for surrounding rock control in deep roadway[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 467-473.

[11] 刘永乐. 深部高应力硐室群开挖与支护技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
Liu Yongle. Research on excavation and support technology in deep & high stress chamber group[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.

[12] 杨仁树, 薛华俊, 郭东明, 等. 复杂岩层大断面硐室群围岩破坏机理及控制[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2234-2242.
Yang Renshu, Xue Huajun, Guo Dongming, et al. Failure mechanism of surrounding rock of large section chambers in complex rock formations and its control[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2234-2242.

[13] 陈佳琪. 超大跨软弱富水破碎岩层硐室群施工方法优化研究[J]. 铁道建筑技术, 2025(3): 150-153.
Chen Jiaqi. Optimization research on construction method of ultra large span chamber group built in weak water-rich fractured layer[J]. Railway Construction Technology, 2025(3): 150-153.

[14] 王炯, 王浩, 郭志飚, 等. 深井高应力强膨胀软岩泵房硐室群稳定性控制对策[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 78-83.
Wang Jiong, Wang Hao, Guo Zhibiao, et al. Stability control strategy of high stress and intense expansion softrock underground openings for pump house in deep mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(1): 78-83.

[15] 王炯, 马磊, 刘鹏, 等. 深井软岩硐室群支护技术研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(2): 330-340.
Wang Jiong, Ma Lei, Liu Peng, et al. Study on soft rock cavern groups support technology in deep mine[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(2): 330-340.

[16] 董亚宁, 金爱兵, 陈成, 等. 深部软岩硐室群施工相互影响及变形破坏分析[J]. 金属矿山, 2024, 53(6): 61-70.
Dong Yaning, Jin Aibing, Chen Cheng, et al. Analysis of the interaction and deformation and failure of the construction of deep soft rock chamber group[J]. Metal Mine, 2024, 53(6): 61-70.

[17] 尹升华, 寇永渊, 周昀, 等. 深部硐室群布置方式及开挖顺序优化研究[J]. 工程科学学报, 2025, 47(4): 628-641.
Yin Shenghua, Kou Yongyuan, Zhou Yun, et al. Optimized layout and excavation sequence of deep chambers[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(4): 628-641.

[18] 李玉选, 郭红斌, 黄丹, 等. 金属矿山TBM地下始发硐室群设计及关键施工技术研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(6): 152-160.
Li Yuxuan, Guo Hongbin, Huang Dan, et al. Study on design and key construction technology of underground starting chamber group of TBM in metal mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024, 76(6): 152-160.

[19] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
Guan Baoshu. Key points of tunnel engineering design[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.

[20] 刘志祥, 张海清. PLAXIS高级应用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
Liu Zhixiang, Zhang Haiqing. PLAXIS advanced application course[M]. Beijing: China Machine Press, 2015.

[21] 黄玉兵, 王琦, 高红科, 等. 深部软岩硐室群破坏机制与施工过程优化[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(1): 69-78.
Huang Yubing, Wang Qi, Gao Hongke, et al. Failure mechanism and construction process optimization of deep soft rock chamber group[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(1): 69-78.