doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 006
张杰, 孙学森, 陈小伟, 等. 深部高应力TBM掘进巷道钻孔卸压力学特性及卸压效果研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 54-63.
Zhang Jie, Sun Xuesen, Chen Xiaowei, et al. Mechanical characteristics and pressure relief effect of drilling pressure relief in deep high-stress TBM tunneling roadway[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2026, 78(6): 54-63.

深部高应力TBM掘进巷道钻孔卸压力学特性及卸压效果研究

张　杰[1,2], 孙学森[1,2], 陈小伟[1,2], 朱瑞军[1,2], 夏长念[1,2]
(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;
2. 深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038)

摘　要: 针对深部高应力TBM掘进巷道围岩暴露快、应力调整时间短、易发生岩爆等动力灾害的问题, 采用理论分析与FLAC3D数值模拟相结合的方法, 建立含钻孔巷道的弹塑性力学模型, 揭示卸压钻孔在TBM掘进条件下的力学特性与卸压效果影响规律。结果表明: 钻孔卸压的力学本质是通过扩展塑性区、释放弹性应变能, 推动应力峰值向围岩深部转移; 孔深由1 m增至5 m时, 高应力区最大转移距离为2. 04 m, 切向应力曲线由单峰转变为双峰形态; 孔间距增大到2. 0 m会产生卸压盲区。提出以卸压区深度≥1. 38倍巷道半径作为充分卸压的量化判据, 据此推荐卸压钻孔优化参数为孔深4 m、间距1. 2～1. 5 m、孔径200 mm。研究成果可为深部高应力TBM巷道钻孔卸压设计提供理论依据。

关键词: TBM掘进巷道; 高应力; 钻孔卸压; 应力转移
中图分类号: TD421. 5; TD803　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0054-10

Mechanical characteristics and pressure relief effect of drilling pressure relief in deep high-stress TBM tunneling roadway

Zhang Jie[1,2], Sun Xuesen[1,2], Chen Xiaowei[1,2], Zhu Ruijun[1,2], Xia Changnian[1,2]
(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;
2. Key Laboratory of Ground Control Management Plan in Deep Metal Mines National Mine Safety Administration, Beijing 100038, China)

Abstract: Addressing the problems of rapid surrounding rock exposure, short stress adjustment time, and high susceptibility to dynamic disasters such as rockburst in deep high-stress TBM tunneling roadways, a combined theoretical analysis and FLAC3D numerical simulation method was adopted. An elastic-plastic mechanical model of the roadway containing boreholes was established to reveal the mechanical characteristics and pressure relief effect of pressure-relief boreholes under TBM excavation conditions. The results show that the mechanical essence of drilling pressure relief is to expand the plastic zone, release elastic strain energy, and promote the stress peak to transfer to the deep surrounding rock. When the borehole depth increases from 1 m to 5 m, the maximum transfer distance of the high-stress area reaches 2. 04 m, and the tangential stress curve changes from a single-peak to a double-peak pattern. Increasing the borehole spacing to 2. 0 m will produce pressure relief blind areas. A quantitative criterion for sufficient pressure relief is proposed: the pressure relief zone depth should be no less than 1. 38 times the roadway radius. Accordingly, the recommended optimized parameters for pressure relief boreholes are: borehole depth of 4 m, spacing of 1. 2—1. 5 m, and diameter of 200 mm. The research results can provide a theoretical basis for the design of drilling pressure relief in deep high-stress TBM roadways.

Key words: TBM tunneling roadway; high stress; drilling pressure relief; stress shift

收稿日期: 2026-07-21
基金项目: 深地国家科技重大专项项目(2024ZD1003800); 五矿集团科技专项 "揭榜挂帅" 项目(2025ZXA01); 五矿集团青年科技基金项目(2026QNJJA03)
作者简介: 张　杰, 博士, 土木工程专业。

随着金属矿山开采深度不断延伸，巷道围岩处于“三高一扰动”的复杂环境，高应力诱发的岩爆、大变形等动力灾害严重威胁施工安全[1-2]。全断面隧道掘进机(TBM)凭借高效、安全、对围岩扰动小等优势，已在金属矿山领域得到推广应用[3-4]。由于TBM在深部高应力岩体中掘进时，围岩暴露速率高、应力调整时间短，高地应力扰动更易诱发岩爆等灾害，亟需厘清TBM掘进条件下钻孔卸压的应力转移规律，为其参数设计提供理论依据。

钻孔卸压是控制深部巷道围岩动力灾害的有效手段之一，国内外学者对此开展了大量研究。康红普等[5]系统阐述了围岩卸压技术的分类及其适用条件。王猛等[6]提出以应力转移效果及围岩变形控制效果作为卸压效果的评价指标，研究了卸压钻孔参数对深部巷道围岩稳定性的动态作用规律。马斌文等[7]揭示了钻孔形成的弱化带破坏煤体的承载结构，使应力峰值区域向深部转移。汪学清等[8]基于卸压钻孔布孔方式及钻孔参数研究，发现双排钻孔相比单排钻孔方式能较好地转移应力和控制巷道变形。丰永乐等[9]指出影响高应力区转移程度的主次因素依次为孔深、孔径、孔间距。Xie等[10]研究了深埋硬岩隧道超前应力释放钻孔的参数设计方法，并对参数的敏感性进行排序。张玉江等[11]研究超前支承静载与扰动载荷组合下的钻孔卸压响应特征，发现大直径钻孔通过应力转移能够有效降低冲击地压风险。针对金属矿山工程实践，研究人员以三山岛金矿为工程背景，基于FLAC3D数值模型，分析了钻孔卸压过程中采场周围岩体的应力和弹性应变能的变化规律[12]。在深井高应力软岩巷道底鼓控制研究方面，研究者推导了巷道两侧底板极限破坏深度和宽度的计算公式，提出了大直径钻孔卸压等底鼓防治措施[13]。

上述研究为钻孔卸压技术奠定了坚实基础，但现有成果多针对传统钻爆法巷道，在TBM快速掘进条件下，围岩暴露速率高、应力调整时间短，卸压钻孔与高应力区的时空协调机制尚不明确，尤其缺乏量化设计判据。为此，本文以深部高应力金属矿山TBM掘进巷道为工程背景，采用理论推导结合FLAC3D数值模拟的方法，阐明卸压钻孔周边围岩的力学响应与应力调控机制，为TBM掘进巷道钻孔卸压设计提供理论依据。

1　TBM掘进巷道钻孔卸压机理分析

1.1　钻孔卸压的力学本质

在高应力岩体中施工钻孔后，钻孔周边围岩的应力状态发生显著改变。假设围岩为均质各向同性线弹性体，则钻孔周边围岩的应力分布满足经典的Kirsch解：

$$\sigma_r = p_0\left(1-\frac{r_0^2}{r^2}\right) \tag{1}$$

$$\sigma_\theta = p_0\left(1+\frac{r_0^2}{r^2}\right) \tag{2}$$

式中，p_0为原岩应力，MPa；σ_r和σ_θ分别为径向应力和切向应力，MPa；r为距钻孔中心的距离，m；r_0为钻孔半径，m。钻孔施工后，钻孔周边切向应力集中，σ_θ增大，而径向应力解除，围岩由三向应力状态转变为近似双向甚至单向应力状态，抗压强度显著降低。当σ_θ超过岩体强度时，钻孔周边围岩进入塑性状态甚至发生破裂，积聚的弹性应变能得以释放。

对于深部高应力TBM掘进巷道，卸压钻孔的作用不仅在于在岩体中制造弱面释放能量，更关键的是通过应力重分布将高应力集中区从巷道浅部转移至围岩深部，从而保障TBM掘进过程中巷道围岩的稳定性。

1.2　围岩弹塑性分析

假定围岩为服从摩尔-库仑屈服准则的理想弹塑性体，对公式进行弹塑性分析，可得钻孔周围的塑性区半径(m)。

$$R_{\mathrm{p}} = r_0\left\{\frac{\left(p_0+c\cot\ \phi\right)\left(1-\sin\ \phi\right)}{c\cot\ \phi}\right\}^{\frac{1-\sin\ \phi}{2\sin\ \phi}} \tag{3}$$

式中，c为黏聚力，MPa；ϕ为内摩擦角，(°)。由式(3)可知：塑性区半径R_{p}与钻孔半径r_0呈正比，与围岩强度参数(c、ϕ)呈反相关，与原岩应力p_0呈正相关。

分析表明，在原岩应力越高、围岩强度越低的情况下，钻孔卸压的波及范围越大，卸压效果越显著。

2　数值模拟方法

2.1　工程概况与模型构建

本文以某铁矿深部TBM掘进巷道为工程背景，该矿为典型的鞍山式沉积变质铁矿床，主矿体呈单斜层状产出，走向近东西，倾向北-北东，矿体延长超过4 745 m，延深大于1 000 m。矿体及围岩以磁铁石英岩、赤铁石英岩、千枚岩、混合岩为主，岩石质量总体为中等至较好。矿山采用地下开采方式，开拓系统采用胶带斜井＋辅助斜坡道＋竖井联合布置，其中胶带斜井及辅助斜坡道采用TBM施工，断面净直径6.7 m。TBM掘进巷道埋深约500～800 m，围岩处于高地应力环境，爆破开挖产生的强扰动与高静

载应力叠加，易诱发岩爆、片帮等动力灾害，亟需采用钻孔卸压措施主动转移应力、释放弹性能。

基于上述工程条件，建立FLAC3D数值模型。模型X轴尺寸为20 m，Y轴为4 m，Z轴为20 m，巷道断面为直径6.7 m的圆形，模拟TBM掘进圆形断面。根据对称性，建立四分之一模型以节省计算资源，巷道位于模型中心，模型边界距巷道中心不小于5倍洞径，消除边界效应。模型网格划分采用六面体单元，在巷道及钻孔周边加密，最小单元尺寸0.02 m，模型网格单元总个数491 713，节点总个数87 468，如图1所示。

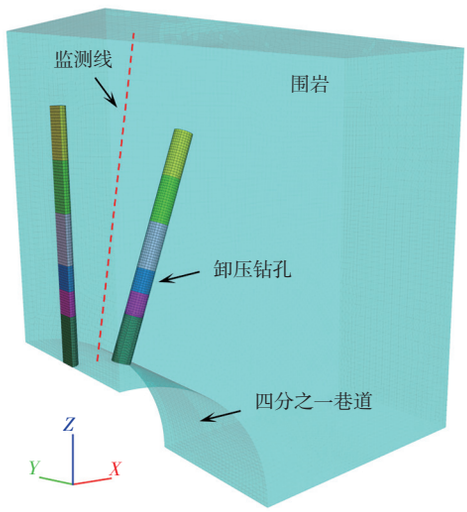


图1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

2.2 模型参数与试验方案

围岩本构采用摩尔-库伦模型，物理力学参数依据岩石力学试验结果，并结合岩体质量分级进行折减，选取代表性参数，见表1。

表1 岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass

类别	密度/(kg·m^{-3})	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
围岩	2 700	3.45	38	1.0	12.0	0.25

通过在三个坐标轴方向的对称平面上施加对称边界条件，初始地应力场按实测回归公式施加，矿区深部地应力场以水平构造应力为主，最大水平主应力的方向均为NE向，大致走向为NE68°，随深度增加的应力为：

$$\sigma_H=-0.0567h-3.671 \tag{4}$$

$$\sigma_h=-0.0301h+3.859 \tag{5}$$

$$\sigma_v=-0.029h+0.0037 \tag{6}$$

式中，σ_H为最大水平主应力，MPa；σ_h为最小水平主应力，MPa；σ_v为垂直主应力，MPa；h为巷道埋深，m。设巷道模型埋深800 m，则X轴、Y轴、Z轴的应力分别为41、20、23 MPa。

本次研究选定卸压孔直径为200 mm，钻孔与巷道岩面垂直布置，为探究孔深及间距两项参数对卸压效果的敏感性，孔深参数设置6个水平，分别为1、1.5、2、3、4、5 m，间距参数设置4个水平，分别为1、1.2、1.5、2 m，共计24个算例。两相邻卸压钻孔中部设置监测线，用以记录开挖过程中不同卸压孔参数工况条件下围岩应力变化信息。

3 结果分析与讨论

3.1 钻孔卸压巷道高应力分布特征

1)TBM掘进巷道应力重分布

金属矿山深部地应力场具有明确的方向性，通常以水平构造应力为主，当TBM掘进方向与最大水平主应力方向成小角度相交时应力集中于两帮，大角度工况下应力集中于顶底板[14]。本次研究中，最大水平主应力为X轴方向，与TBM掘进巷道的轴线方向垂直，模型的计算结果见图2。

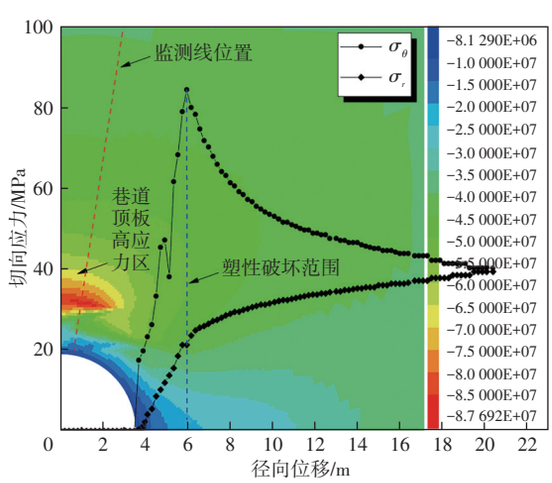


图2 TBM掘进巷道围岩应力分布

Fig. 2 Stress distribution of surrounding rock of TBM tunneling roadway

图2中巷道高应力集中区主要分布在巷道顶板深部位置，在高应力区布设监测线，记录切向应力和径向应力的变化曲线，随巷道径向距离的增大，应力值逐渐恢复至原岩应力。根据式(3)计算出塑性区发展深度为2.60 m，与数值模拟结果基本一致。

数值模拟过程中发现，当最大水平主应力为 Y 轴方向时，即 TBM 掘进巷道轴向与最大水平主应力方向一致，由最大主应力分布情况可知，巷道围岩未出现高应力集中区；当垂直主应力为最大主应力方向时，巷道高应力集中区域主要分布在巷道边帮深部位置。

2）钻孔参数敏感性分析

针对 TBM 掘进巷道高应力分布区域，采用钻孔卸压方法改善围岩应力集中现象。卸压钻孔布置方向均垂直巷道岩壁，当钻孔间距为 1.0 m 时不同钻孔长度的模型最大主应力分布情况如图 3 所示，当钻孔长度为 3.0 m 时不同钻孔间距的模型最大主应力（集中应力）分布情况如图 4 所示（篇幅所限，仅列出两组典型工况结果）。

由于模型中最大主应力方向为 X 轴方向，因此在该方向布置的两相邻钻孔的卸压效果最为显著。由图 3 可知，当钻孔间距为 1.0 m，且孔长分别为 1、1.5、2、3、4、5 m 时，TBM 掘进巷道顶板上方应力集中，呈条带状分布，最大应力值为 87 MPa，巷道边帮处于应力释放状态，其应力值小于初始原岩应力，该位置的位移变化量最大，约 32 mm。模型竖直剖面

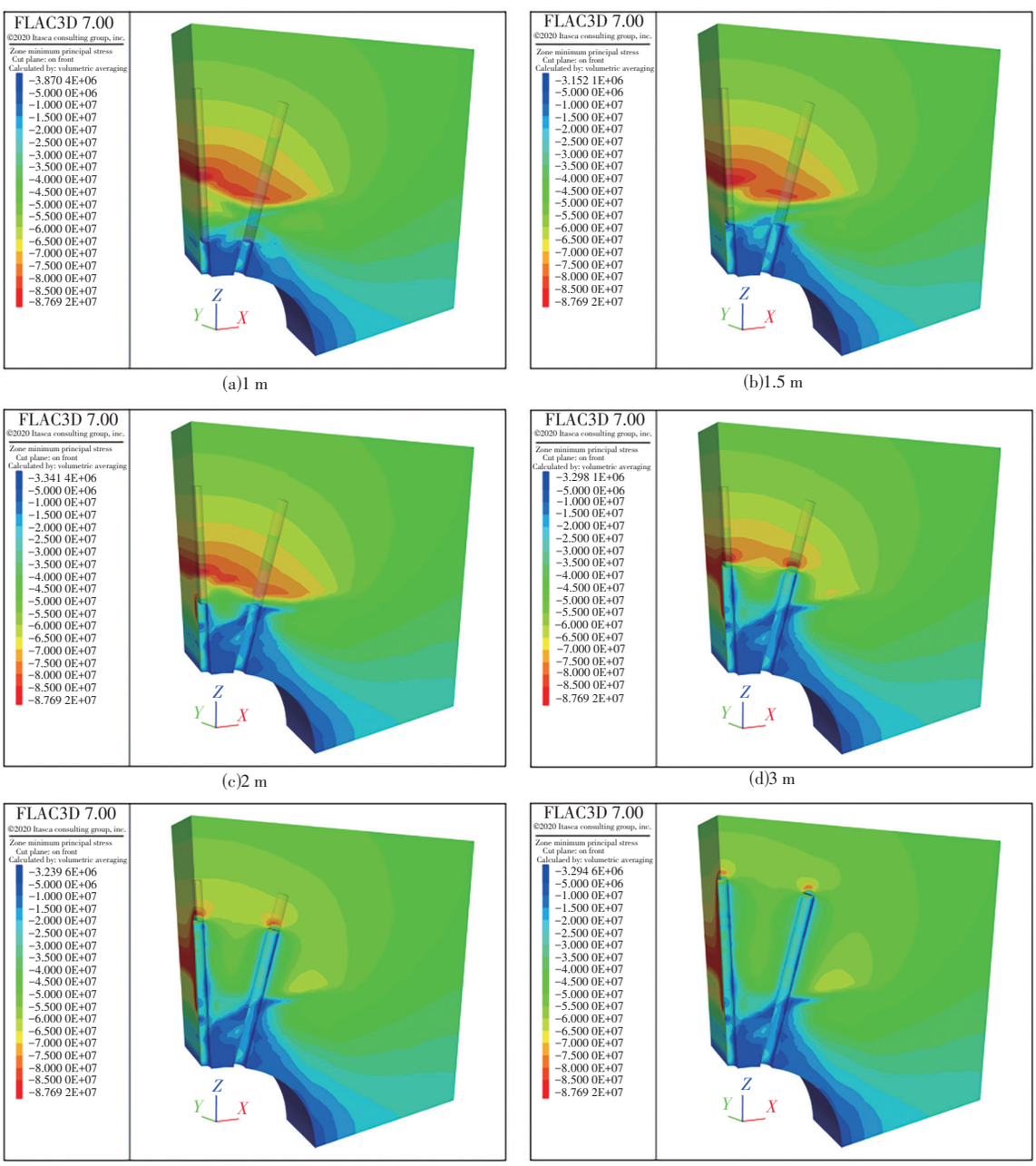


图 3　钻孔长度对集中应力影响分析

Fig. 3　Analysis of influences of borehole length on concentrated stress

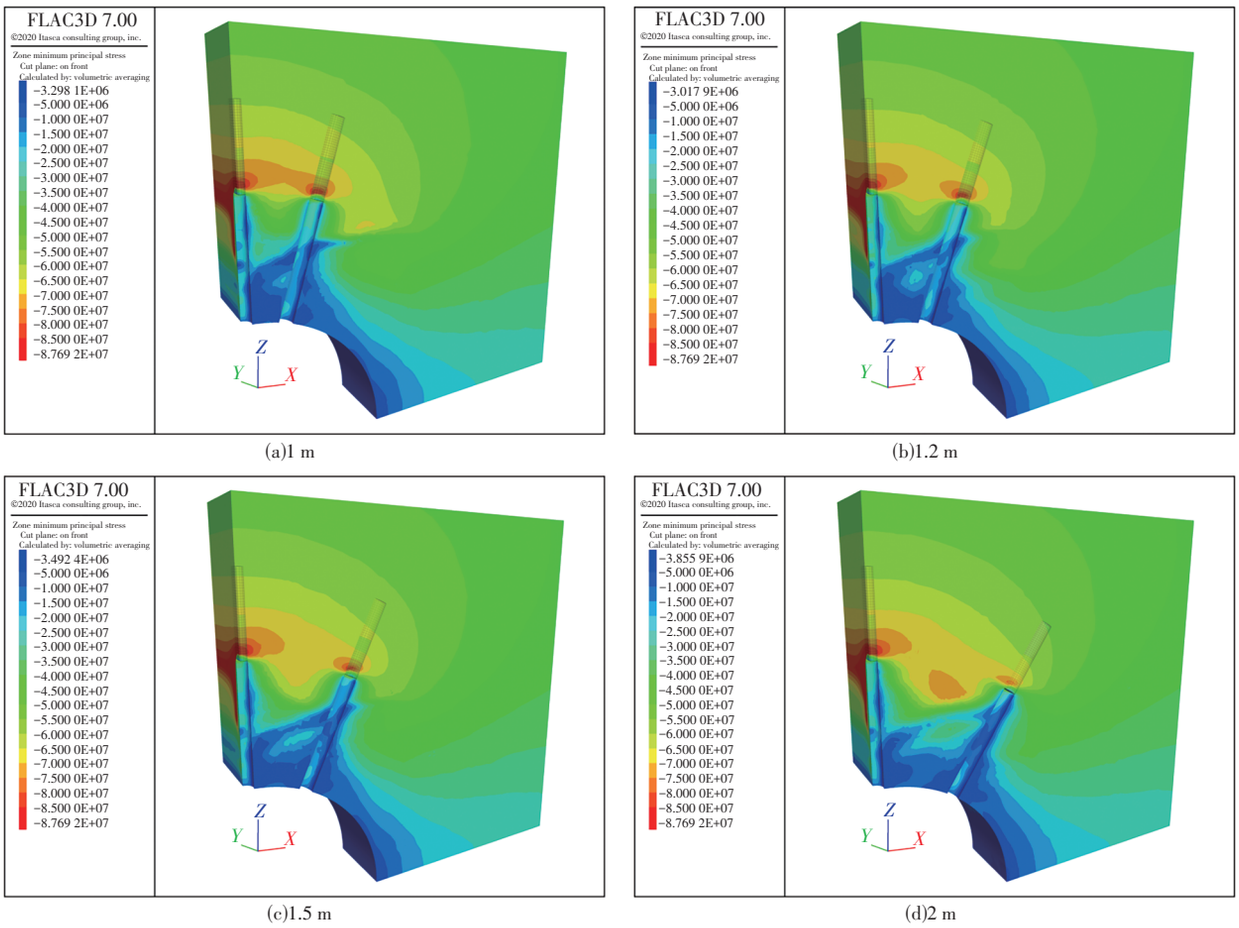


图 4　钻孔间距对集中应力影响分析

Fig. 4　Analysis of influences of borehole spacing on concentrated stress

(X-Z平面)的应力分布情况受卸压孔长度影响，主要分三个阶段：当钻孔长度为1 m和1.5 m时，卸压孔底距离高应力集中区尚有一定距离，两者间相互影响作用较小，最大集中应力值及其分布范围基本不变，两相邻钻孔间应力释放，且应力释放范围与孔深一致，位移变化较小(33 mm)；当钻孔长度为2 m和3 m时，在卸压孔逐渐穿越高应力集中区的过程中，孔底产生的集中应力与巷道围岩高应力集中区逐渐连通，条带状高应力区域呈现出一定的引导效应，高应力逐渐向两侧卸压孔底转移，两相邻钻孔间围岩应力释放范围未发生变化，其深度稳定在塑性区半径的1/2；当钻孔长度为4 m和5 m时，卸压孔底高应力随孔深的增大，持续向深部推进，最大集中应力值降低约20%。

为进一步分析卸压孔间距对集中应力影响，选取钻孔长度为3 m时孔底集中应力与巷道围岩高应力集中区连通情况进行对比。由图4可知，随着钻孔间距的逐渐增大，高应力相连区域分别向两卸压孔的孔底转移，其中间部位监测线位置的高应力值呈现先减小后增大的变化趋势，卸压孔间距在1.2～1.5 m时，监测线位置最大集中应力值下降到65 MPa，当卸压孔间距增大到2.0 m时，监测线位置又出现新的高应力区，最大应力值在70～75 MPa。数值计算过程中，TBM掘进巷道断面应力卸荷位置主要在边帮，以及两相邻卸压孔间塑性区半径的1/2深度范围内，几乎不受卸压孔间距影响。

3.2　钻孔卸压巷道能量耗散特征

钻孔卸压过程中，钻孔周边塑性区扩展耗散了部分积聚的弹性应变能。设钻孔施工前单元体储存的可释放弹性应变能为U_0^e，钻孔施工后为U_1^e，则单位体积岩石释放的能量ΔU为：

$$\Delta U=U_0^e-U_1^e \tag{7}$$

为了分析巷道开挖过程中围岩的能量分布和能量聚集程度，在FLAC3D模拟定义弹性应变能参数，分析开采过程中采场围岩能量分布特征。岩石弹性应变能的计算按式(8)进行：

$$\Delta U=\frac{1}{2}\left(\sigma_1\varepsilon_1+\sigma_2\varepsilon_2+\sigma_3\varepsilon_3\right) \tag{8}$$

式中，σ_1、σ_2、σ_2分别为岩体单元内的主应力；ε_1、ε_2、ε_2分别为岩体单元内的主应变。

采用FLAC3D数值模拟软件内置FISH语言，根据式(8)编制命令流，绘制TBM掘进巷道围岩弹性应变能分布云图，如图5所示。图5中卸压钻孔穿越高应力集中区，开挖过程中围岩释放的单位体积应变能最大值高达1.86×10^5 J/m^3，超过了1×10^5 J/m^3，因此，具有发生岩爆的可能性，该区域主要分布在高应力集中区下方，向巷道顶板中部延伸。

当钻孔间距为1.0 m时，不同钻孔长度的模型弹性应变能分布情况如图6所示，当钻孔长度为3.0 m时，不同钻孔间距的模型弹性应变能分布情况如图7所示。

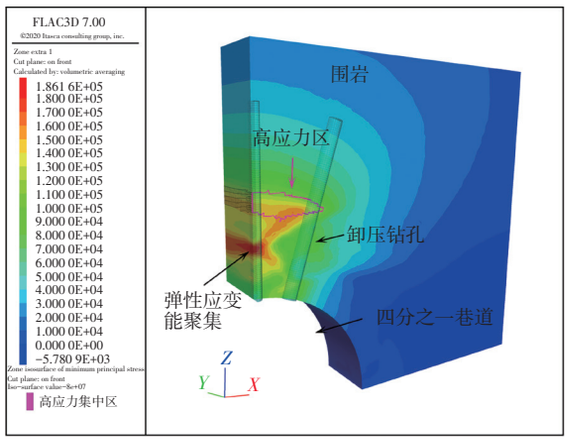


图5　TBM掘进巷道弹性应变能分布云图

Fig. 5　Cloud map of elastic strain energy distribution in TBM tunneling roadway

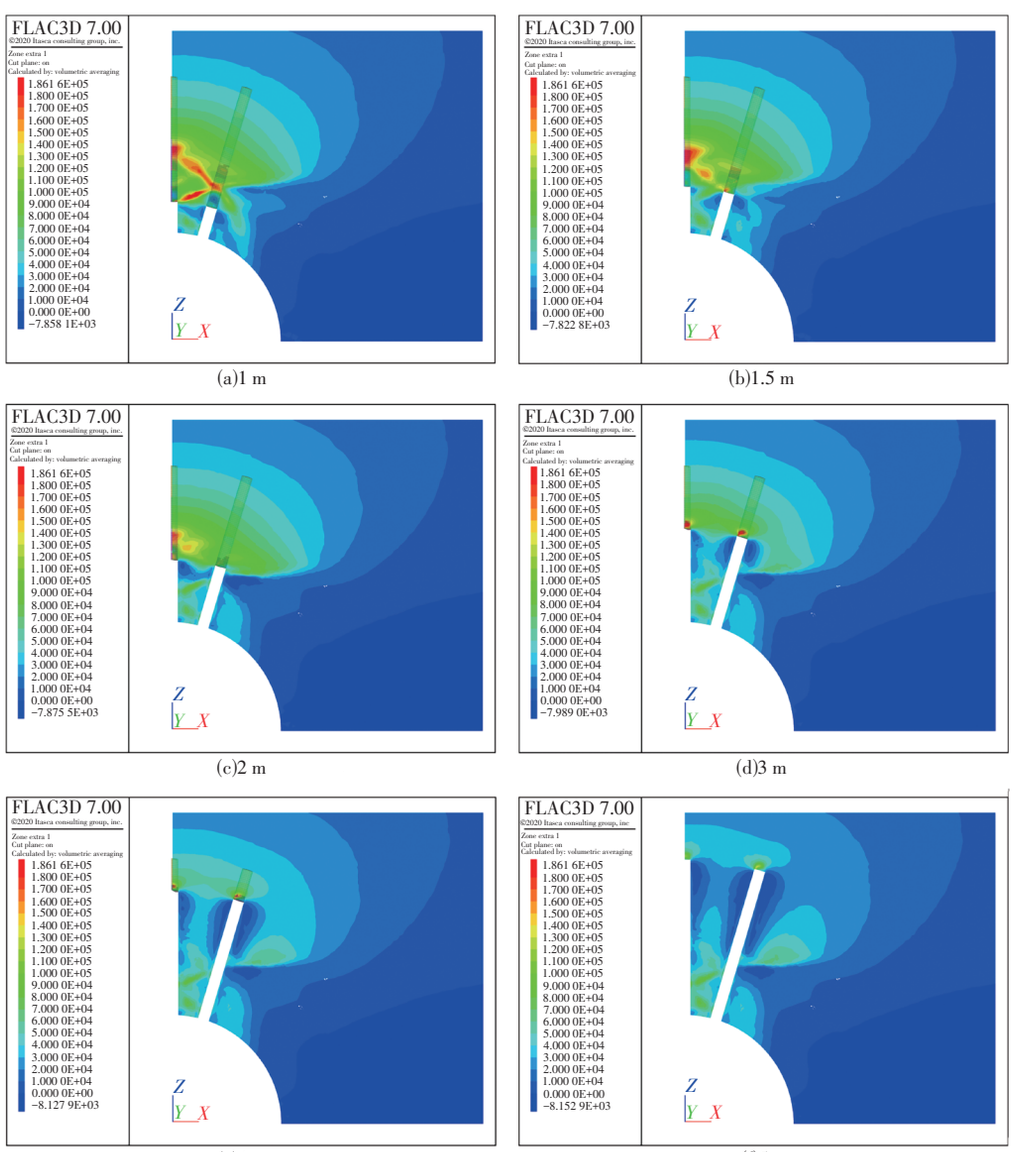


图6　钻孔长度对弹性应变能的影响分析

Fig. 6　Analysis of influences of borehole length on elastic strain energy

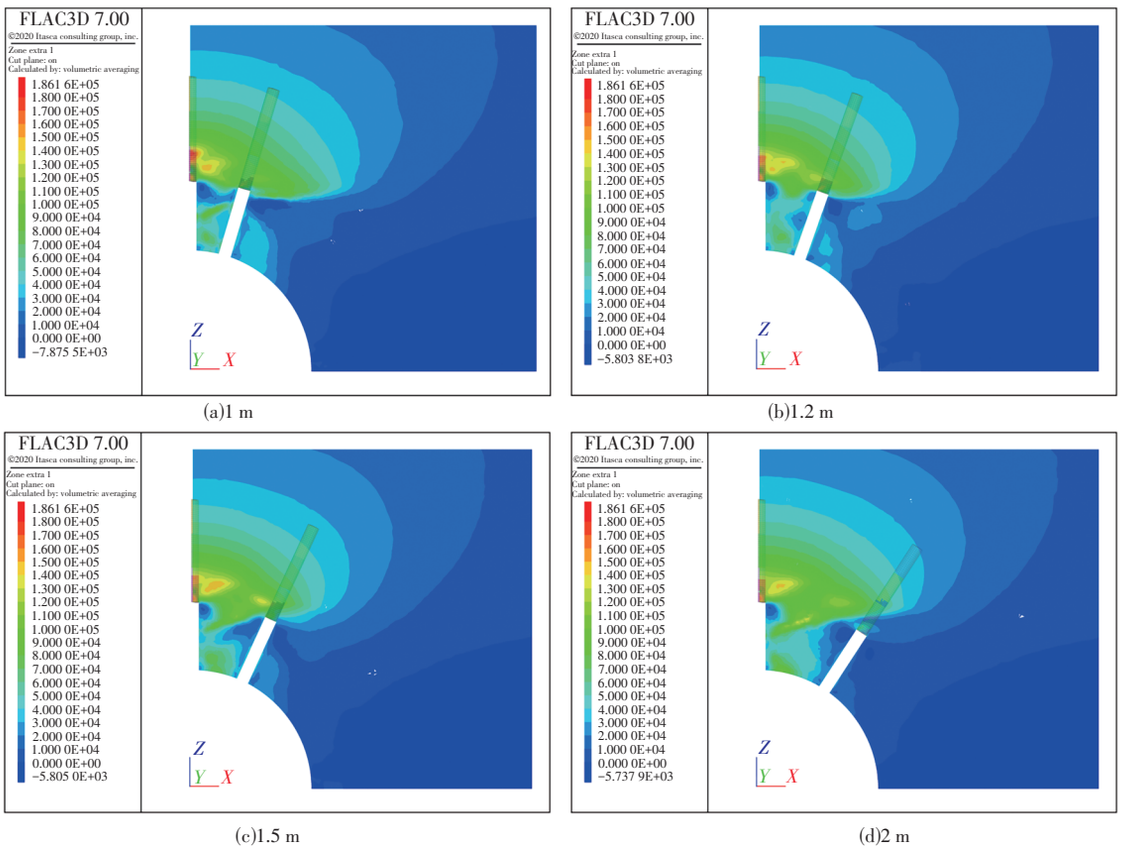


图7 钻孔间距对弹性应变能的影响分析

Fig. 7 Analysis of influences of borehole spacing on elastic strain energy

由图6可知，TBM掘进巷道顶部弹性应变能随钻孔长度的增大，能量值及其分布范围均呈减小趋势：当钻孔长度为1 m和1.5 m时，卸压孔底刚好接触到围岩的高弹性应变能区，两相邻孔底高弹性应变能区域连通，高达1.86×10^5 J/m^{3}的最大弹性应变能区域向深部转移，基本稳定在塑性区半径位置；当钻孔长度为2 m时，高弹性应变能向巷道顶板正上方转移，监测线附近最大弹性应变能在1.5×10^5 J/m^{3}以内；当钻孔长度为3 m和4 m时，仅卸压孔底部出现高弹性应变能，X-Z平面其他位置的弹性应变能均在1.0×10^5 J/m^{3}以内；当钻孔长度为5 m时，X-Z平面内的弹性应变能均小于1.0×10^5 J/m^3，围岩不再有岩爆风险。

在卸压孔间距对弹性应变能的影响分析中发现，近距离钻孔间卸压区域相连通，具有较好的卸压效果，但也使得模型单元内的主应变增大，从而计算得到的弹性应变能增大；随着卸压孔间距的增大，巷道正上方高弹性应变能由1.86×10^5 J/m^{3}逐渐减小到1.2×10^5 J/m^3。因此，钻孔卸压的力学本质是通过扩展钻孔塑性区释放积聚的弹性应变能，并促使应力峰值向围岩深部转移。

3.3 卸压效果分析

1) 卸压监测曲线形态

孔深参数为1、1.5、2、3、4、5 m，间距参数分别为1、1.2、1.5、2 m时，各算例中监测线应力变化统计情况如图8所示。分析可知，TBM掘进巷道高应力区域施加卸压钻孔，能够有效减小局部集中应力，监测线位置的切向应力最大值出现持续向深部转移的变化趋势。在卸压孔间距在1.2～1.5 m时，卸压孔深度达到5 m后，应力值变化曲线由单峰变为双峰形态；当卸压孔间距达到2 m后，应力值变化曲线会在卸压孔深度达到4 m时，由单峰变为双峰形态。此外，卸压孔间距达到2 m后，大间距卸压孔中部重新出现高应力区(图8(d))。

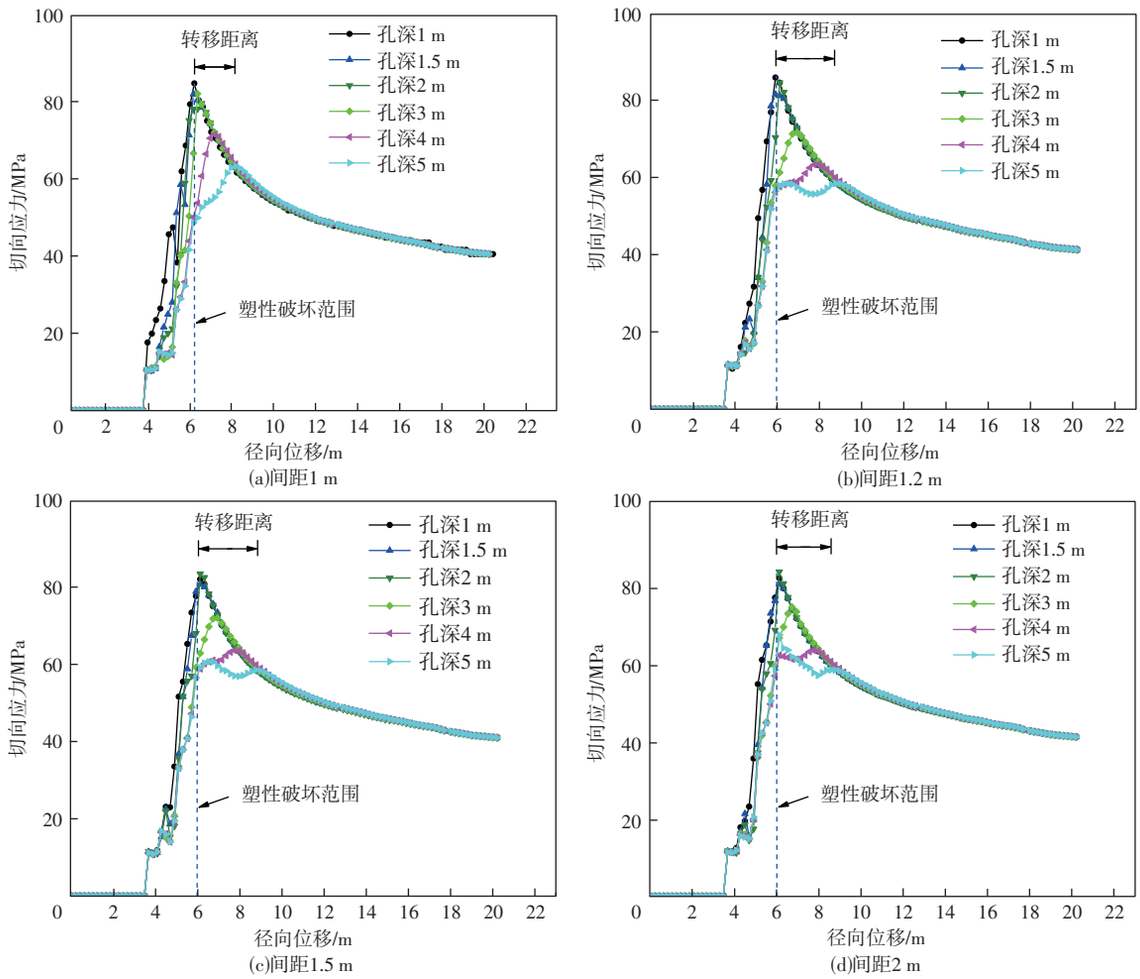


图 8　多工况条件下监测线应力变化情况

Fig. 8　Stress variations of monitoring line under multiple working conditions

选取监测线位置的最大集中应力值及其转移距离，分别绘制不同工况条件下的变化曲线如图 9 所示。

图 9(a) 为不同钻孔深度和间距条件下，监测线上最大集中应力的变化趋势。分析可知：随着钻孔深度增加，集中应力整体呈下降趋势，当钻孔间距为 1.2～1.5 m 时，集中应力下降幅度最明显，在孔深 4 m、

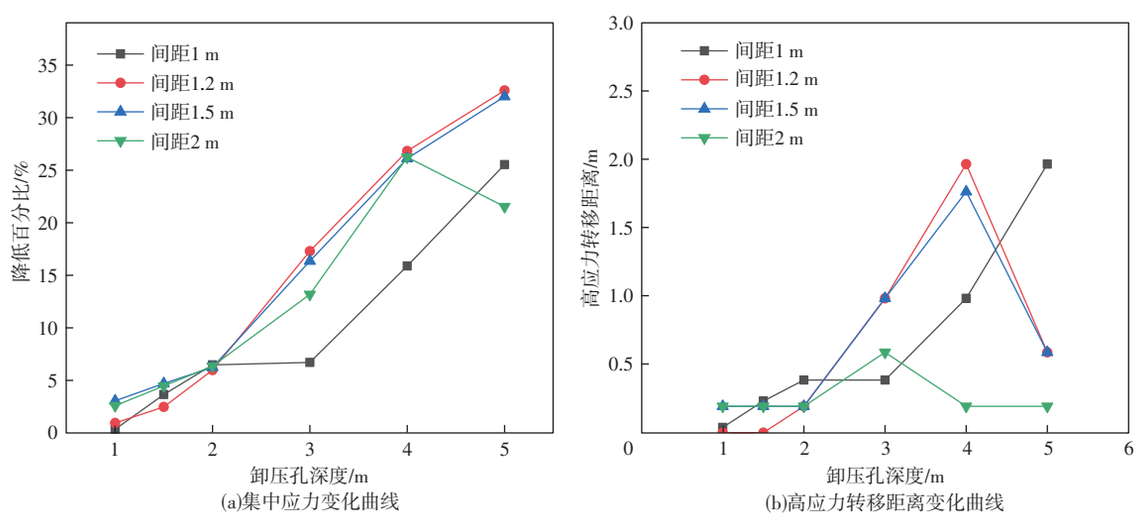


图 9　卸压钻孔卸压效果对比

Fig. 9　Comparisons of pressure relief effect of pressure relief boreholes

间距1.2 m工况下，应力释放降低百分比最高达到32.5%(由87 MPa降至58.7 MPa)；当钻孔深度达到4～5 m时，集中应力增长变缓，降幅不足5%；间距过大，达到2 m时，集中应力在深孔达到5 m后再次升高至66.7 MPa，说明卸压不连续，存在卸压盲区。

图9(b)反映了应力峰值点从巷道轮廓面向围岩深部转移的距离。分析可知：高应力区转移距离D随钻孔深度增加并非单调增长，当孔深由1 m增至5 m时，卸压孔间距为1.2～2.0 m的转移距离变化曲线呈现先增大后减小的变化特点，在孔深4 m、间距1.2 m工况下，最大转移距离达到2.04 m；当应力变化曲线转变为双峰形态后，高应力区转移距离的增长出现波动，说明大间距破坏了卸压连续性；当钻孔深度达5 m后，卸压盲区部位重现的高应力区的转移距离回退至0.2～0.6 m范围。图9表明，孔深是影响应力转移距离的主导因素，而孔间距则决定了卸压的连续性和均匀性。

通过FLA3D软件内置FISH语言编制塑性区分类统计命令，得到巷道卸压前后的塑性区分布对比情况如图10所示。

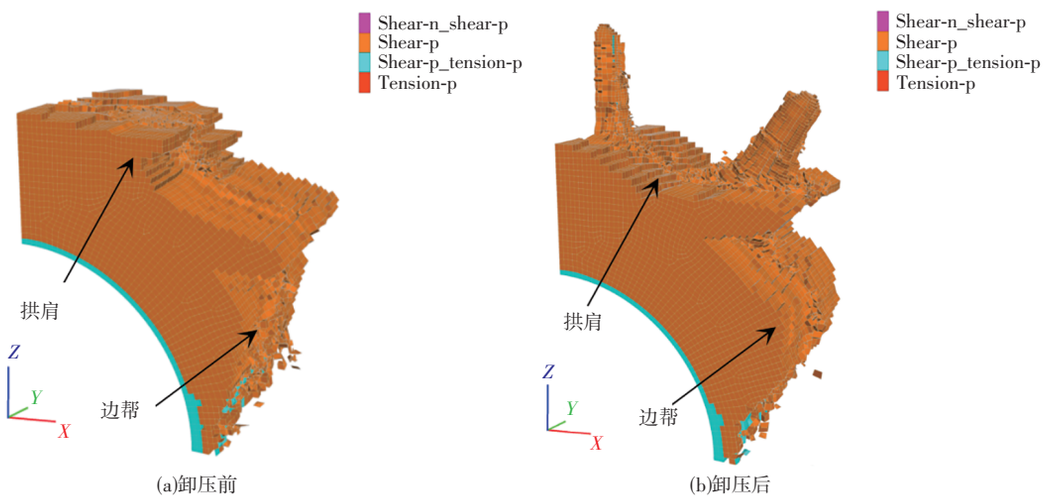


图10 卸压前后塑性区分布对比

Fig. 10 Comparison of plastic zone distribution before and after pressure relief

计算结果显示，各模型中塑性区总体积基本不变，即单元网格发生塑性变形的总数量不受卸压孔孔深及孔间距的影响，但塑性区分布形态发生显著变化：巷道拱肩部位塑性区向两侧的卸压孔转移，巷道边帮上部塑性区向下转移，使得巷道围岩塑性区分布趋于均匀。

2)最优卸压参数取值

钻孔卸压参数取值，可结合高应力集中程度、高应力区转移距离以及弹性应变能密度变化情况进行综合分析。

未卸压时，TBM掘进巷道顶板深部形成明显高应力集中区，最大主应力值可以达到87 MPa，当孔长由1 m增加至5 m时，高应力区域逐渐向孔底转移，转移距离随孔深增加呈现先增大后减小的趋势，间距在1.2～1.5 m时，监测线位置最大集中应力值下降低约32.5%，当孔深为4 m时，转移距离达到2.04 m，此时卸压区深度为TBM掘进巷道半径的1.38倍，应力曲线转变为双峰型。尽管随孔深和间距增加高弹性应变能区域范围缩小，间距增大至2.0 m时，监测线位置出现卸压盲区，存在卸压不连续现象。

因此，推荐卸压参数组合为：孔深4 m、间距1.2～1.5 m，除孔底外弹性应变能降至安全阈值以下，实现了TBM掘进巷道的有效卸压。

4 结论

1)钻孔卸压的力学本质是通过扩展塑性区释放围岩积聚的弹性应变能，并促使应力峰值向围岩深部转移，卸压后高弹性应变能区域明显减小。

2)孔深是影响应力转移距离的主导因素，切向应力曲线由单峰向双峰演化是峰值有效转移的标志；孔间距决定卸压连续性，间距增大到2 m会产生卸压盲区。

3)提出以卸压区深度≥1.38倍巷道半径作为充分卸压的量化判据，据此确定本工况最优孔深为4 m。

4)推荐卸压钻孔优化参数为孔深4 m、间距1.2～1.5 m、孔径200 mm。该组合下围岩弹性应变能整体处于安全阈值以内，卸压效果良好。

参　考　文　献

[1] 陈璐，郭利杰，杨小聪．金属矿深部开采岩爆灾害防控研究进展与工程实践[J]．矿冶，2024，33(4)：482-494，514.
Chen Lu，Guo Lijie，Yang Xiaocong. Research progress and engineering practice of rockburst disaster prevention and control in deep mining of metal mines[J]. Mining and Metallurgy，2024，33(4)：482-494，514.

[2] 李夕兵，宫凤强．基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J]．煤炭学报，2021，46(3)：846-866.
Li Xibing，Gong Fengqiang. Research progress and prospect of deep mining rock mechanics based on coupled static-dynamic loading testing[J]. Journal of China Coal Society，2021，46(3)：846-866.

[3] 徐长磊，刘育明，邓皓泽，等．超大规模硬岩矿山源头推动TBM应用的设计创新与思考[J]．中国矿山工程，2024，53(1)：65-71.
Xu Changlei，Liu Yuming，Deng Haoze，et al. Design innovation and reflection on promoting TBM application at the source of super large scale hard rock mines[J]. China Mine Engineering，2024，53(1)：65-71.

[4] 孙扬，刘文学，牟林，等．金属矿山斜坡道应用TBM施工的可行性探讨[J]．中国矿山工程，2021，50(2)：1-5.
Sun Yang，Liu Wenxue，Mu Lin，et al. Discussion on feasibility of applying TBM to construction slope in metal mine[J]. China Mine Engineering，2021，50(2)：1-5.

[5] 康红普，姜鹏飞，冯彦军，等．煤矿巷道围岩卸压技术及应用[J]．煤炭科学技术，2022，50(6)：1-15.
Kang Hongpu，Jiang Pengfei，Feng Yanjun，et al. Destressing technology for rock around coal mine roadways and its applications[J] Coal Science and Technology，2022，50(6)：1-15.

[6] 王猛，王襄禹，肖同强．深部巷道钻孔卸压机理及关键参数确定方法与应用[J]．煤炭学报，2017，42(5)：1138-1145.
Wang Meng，Wang Xiangyu，Xiao Tongqiang. Borehole destressing mechanism and determination method of its key parameters in deep roadway[J]. Journal of China Coal Society，2017，42(5)：1138-1145.

[7] 马斌文，邓志刚，赵善坤，等．钻孔卸压防治冲击地压机理及影响因素分析[J]．煤炭科学技术，2020，48(5)：35-40.
Ma Binwen，Deng Zhigang，Zhao Shankun，et al. Analysis on mechanism and influencing factors of drilling pressure relief to prevent rock burst[J]. Coal Science and Technology，2020，48(5)：35-40.

[8] 汪学清，吴帅军，唐红平，等．深部巷道钻孔卸压对巷道稳定性的影响及钻孔参数确定[J]．矿冶工程，2023，43(3)：1-5，10.
Wang Xueqing，Wu Shuaijun，Tang Hongping，et al. Impact of pressure-relief borehole on stability of deep roadway and determination of drillings parameters[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2023，43(3)：1-5，10.

[9] 丰永乐，方建厂，翟新献，等．千秋煤矿回采巷道卸压防冲钻孔布置合理参数研究[J]．河南理工大学学报(自然科学版)，2026，45(2)：175-185.
Feng Yongle，Fang Jianchang，Zhai Xinxian，et al. Study on rational parameters of pressure relief and rock burst prevention borehole layout in the extraction roadways of Qianqiu Coal Mine[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)，2026，45(2)：175-185.

[10] Xie Zhenkun，Qiu Shili，Li Shaojun，et al. A new approach to designing advance stress release boreholes to mitigate rockburst hazards in deep boring-machine-constructed tunnels[J]. Applied Sciences，2025，15(1)：95. DOI：10.3390/app15010095.

[11] 张玉江，杨永聪，李书乐，等．动静载组合下钻孔卸压试样的力学响应规律[J/OL]．采矿与岩层控制工程学报：1-17[2026-08-20]. https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2026-1008.
Zhang Yujiang，Yang Yongcong，Li Shule，et al. Mechanical response and fracture evolution of borehole destressing under coupled static and dynamic loading[J/OL]. Journal of Mining And Strata Control Engineering：1-17[2026-08-20]. https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2026-1008.

[12] 田莉梅，张英，张景华．深部开采高地应力区钻孔卸压数值模拟及应用[J]．金属矿山，2017，46(4)：31-35.
Tian Limei，Zhang Ying，Zhang Jinghua. Numerical simulation and application of boreholes destressing technology in high in-situ sress zone during deep mining[J]. Metal Mine，2017，46(4)：31-35.

[13] 鲁健，弓培林，李鹏．深井软岩巷道底鼓机理与钻孔卸压技术研究[J]．矿业安全与环保，2019，46(6)：35-41.
Lu Jian，Gong Peilin，Li Peng. Research on the mechanism of floor heave and borehole pressure relief technology in deep soft rock roadway[J]. Mining Safety & Environmental Protection，2019，46(6)：35-41.

[14] 高富强．最大水平主应力对巷道围岩稳定性影响的数值分析[J]．矿业研究与开发，2008，28(1)：62-64.
Gao Fuqiang. Numerical analysis on the influence of maximum horizontal principal stress on surrounding rock stability of roadway[J]. Mining Research and Development，2008，28(1)：62-64.