doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 002
周子龙, 马耀财, 张铭志, 等. 金属矿山TBM开拓卡机扩挖-加固协同防控机理[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 15-24.
Zhou Zilong, Ma Yaocai, Zhang Mingzhi, et al. Synergistic control mechanism of excavation enlargement and reinforcement for TBM Jamming in metal-mine development[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2026, 78(6): 15-24.

金属矿山TBM开拓卡机扩挖-加固协同防控机理

周子龙[1,2], 马耀财[1], 张铭志[1], 苏益群[1], 王浩浩[1]
(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083;
2. 中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘　要: TBM凭借连续掘进、微扰开挖和高质量成巷等优势,已成为深部金属矿山长距离开拓的重要选择。然而,深部不良地质条件下TBM卡机事故频发,严重制约其规模化应用,因此破解TBM卡机防控难题是实现金属矿山安全高效开拓的关键。本文针对金属矿山断层破碎带典型地质,基于应力型和重力型卡机模式,建立了巷道围岩-TBM护盾力学分析模型,揭示了穿越断层破碎带TBM卡机扩挖-加固协同主动防控机理。研究表明:扩挖法的作用是直接减小护盾位移荷载,但扩挖不当易造成时滞型卡机;加固法的核心是驱动卡机模式由重力型向应力型转变,但过度加固在卡机防控中并不可取;扩挖法与加固法协同可以实现二者优势互补,达到抑制围岩变形、改善围岩承载与降低护盾挤压作用的目的。研究成果可为深部矿山TBM卡机防控设计提供理论指导。

关键词: 金属矿山;开拓工程;TBM卡机;扩挖法;加固法;主动防控
中图分类号: TD421;TD853　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0015-10

Synergistic control mechanism of excavation enlargement and reinforcement for TBM Jamming in metal-mine development

Zhou Zilong[1,2], Ma Yaocai[1], Zhang Mingzhi[1], Su Yiqun[1], Wang Haohao[1]
(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: With the advantages of continuous excavation, minimally disturbed tunnelling and high-quality roadway formation, TBMs have become an important option for long-distance development in deep metal mines. However, TBM jamming accidents frequently occur under adverse geological conditions at depth, which severely restrict its large-scale application. Thus, addressing the challenge of TBM jamming prevention and control is critical to realizing safe and efficient development in metal mines. This paper focuses on the typical geological conditions of fault fracture zones in metal mines. Based on stress-induced and gravity-induced jamming modes, mechanical models are established for the surrounding rock of roadways and the TBM shield. It further reveals the synergistic active prevention and control mechanism of reaming-reinforcement for TBM jamming during tunnelling through fault fracture zones. The research show that the reaming method directly reduces displacement-induced loading on the TBM shield, but inappropriate excavation enlargement may trigger delayed jamming. The core of the reinforcement method lies in driving the shield jamming mode from gravity-dominated to stress-dominated behavior, however, excessive reinforcement is not advisable for jamming prevention. The combined application of the reaming method and the reinforcement method leverages their complementary advantages to restrain surrounding rock deformation, enhance rock mass bearing capacity, and mitigate shield squeezing effects. These findings provide theoretical guidance for the design of TBM jamming prevention and control measures in deep mines.

Key words: metal mines; development project; TBM jamming; reaming method; reinforcement method; active control

收稿日期:2026-08-02
基金项目:国家自然科学基金青年基金项目C类(42402274)
作者简介:周子龙,博士,二级教授,博士生导师,主要从事岩石破碎与工程防护方面研究。
通信作者:马耀财,博士,副教授,硕士生导师,主要从事地下工程领域围岩灾变控制与岩石力学相关研究。

全断面岩石隧道掘进机(TBM)凭借掘进速度快、成型质量高、围岩扰动小等优势,为破解深部金属矿山大埋深长距离井巷安全高效开拓难题提供了重要技术路径[1-4]。然而,深部极端不良地质发育,TBM掘进卡机事故频发,造成工期延误、设备损毁及建设成本增加等后果,严重制约着TBM规模化应用。例如:Prince Lyell铜矿因卡机问题造成长时间停工和严重设备损毁,经爆破、扩挖与支护等多种手段才得以脱困[5];Libanon金矿更因严重卡机影响,致使5 000 m掘进计划仅完成约170 m便被迫终止[6]。TBM卡机是围岩变形破坏、掌子面稳定性、刀盘载荷、护盾间隙和支护响应等因素失衡后的集中表现[7]。众多学者围绕TBM卡机类型、卡机机理与风险判识等方面开展了深入研究。李建斌等[8]根据卡机成因与TBM受力情况,将TBM卡机分为应力型卡机和重力型卡机两类,为TBM卡机应对提供了基本认识。针对应力型卡机,研究主要聚焦于围岩收敛、护盾压力与设备推进力之间的失衡关系。姬超等[9]和许汉华等[10]揭示了围岩收敛、护盾间隙消耗及摩阻增大的演化过程,分析了扩挖间隙、掘进速度和护盾长度等参数对TBM卡机的影响。刘远程等[11]基于相似模型试验研究了掌子面前后的围岩位移释放特征及应变能变化特征。王悦等[12]阐明了岩体结构面对围岩-护盾接触压力的控制作用。针对重力型卡机,研究主要聚焦于围岩塌落高度、块体失稳与TBM刀盘阻力矩之间的临界关系。Xu等[13]通过多项工程案例指出围岩塌落是TBM卡机的主要灾害模式,并结合高黎贡山隧道揭示了破碎带掌子面失稳、块体塌落及松散渣体涌入刀盘最终导致刀盘卡滞的演化过程。王世龙等[14]揭示了陷落柱中围岩渐进失稳、松散体塌落堆积、压实包裹并最终导致刀盘转矩超限的灾变路径。在卡机风险判识方面,任亚坤等[15]构建了以掘进参数响应为判据的卡机风险分级标准和防控技术体系。陈天楠等[16]建立了掌子面变形-驱动扭矩耦合的刀盘卡机风险分级方法。Pan等[17]利用掘进参数、护盾监测数据研究围岩-装备相互作用演化规律并提出卡机预判准则,进而结合机器学习判识破碎围岩下的卡机风险。

TBM卡机发生后采用的主要脱困技术有卸压法、冻结法、加固法和旁洞法等[18-19]。其中,卸压法成本相对较低,但施工安全风险较高,易因二次扰动与支护滞后诱发围岩失稳;冻结法一般适用于浅埋松散富水地层,兼具加固岩体与防治突水涌泥的功能,但经济代价极高;加固法可降低围岩收敛变形、减少复卡风险,具有安全风险低与经济成本适中的特点,但对硬岩卡机工况效果极为有限;旁洞法施工成本极高且工期滞后往往可达半年以上,通常作为重度卡机问题的备用脱困手段。总体而言,上述应对TBM卡机问题的技术手段普遍存在地质适用性受限的问题,由于TBM掘进过程中地质环境的强变异性与不良地质体的隐蔽性,使得被动脱困不可避免地陷入风险不可控、代价难预期的困境[20]。加之相较于交通、水利等领域TBM隧道(洞),深部矿山井巷工程是连接开拓系统与生产系统的骨干通道[21-22],TBM卡机造成的后果更加难以接受。因此,在金属矿山TBM卡机灾害防控中,亟需探索由事后抢险脱困向事前主动防卡转变的防控理念与方法,将卡机风险与脱困成本控制在可预期、可调控的范围内。

综上所述,现有TBM卡机研究主要集中于卡机机理与工程处置两大方面,但防控方法的选取仍多依赖工程经验,针对不同卡机类型的防控机理仍缺乏系统认识。本文针对深部金属矿山穿越断层破碎带TBM开拓巷道时的护盾卡机问题,基于主动防控理念,分别针对围岩收敛挤压引起的应力型卡机和破碎岩体塌落侵入引起的重力型卡机防控问题,建立起基于扩挖法和加固法的巷道围岩-TBM护盾力学分析模型,揭示TBM卡机灾害扩挖-加固协同主动防控机理,为地下矿山TBM卡机防控方案设计提供理论依据。

1 金属矿山断层破碎带影响下TBM卡机问题

1.1 TBM开拓断层破碎带地质挑战

金属矿床通常经历多期构造活动,并受到岩浆侵入、热液蚀变及后期断裂等作用的叠加改造,形成了大量规模不一、性质复杂的断层破碎带,是金属矿山的典型致灾构造。目前TBM已在金属矿山平巷、斜坡道和竖井等开拓工程中开展了初步应用(图1)。然而,受矿体赋存形态、开拓系统布置及生产接续关系约束,矿山巷道线路绕避空间有限,TBM开拓时往往需要直接穿越断层破碎带,甚至在较短掘进距离内连续遭遇多条构造带。大量工程实践表明,断层破碎带在金属矿山TBM开拓线路中分布广泛,例如:西鞍山铁矿TBM线路具有深埋硬岩与软弱构造带交替分布的特征,局部围岩达到Ⅴ~Ⅵ级[23];银珠山

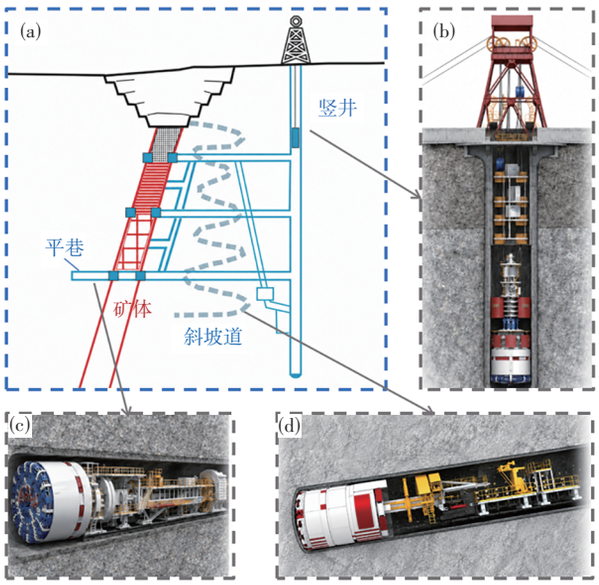


图 1　TBM 在井下开拓系统中的应用：(a) 矿山开拓系统示意；(b) TBM 竖井施工示意；(c) TBM 平巷施工示意；(d) TBM 斜坡道施工示意

Fig. 1　Application of TBMs in underground mine development system: (a) schematic of a mine development system; (b) TBM shaft excavation; (c) TBM drift excavation; (d) TBM ramp excavation

铅锌银矿 TBM 线路中的破碎带和断层累计长度接近 1 km，局部斜坡道内破碎带占比约 40%[1]。图 2 显示了某金属矿山中段 F2 与 F15 断层分布与开拓系统的空间关系以及断层影响区内的岩体破碎情况。

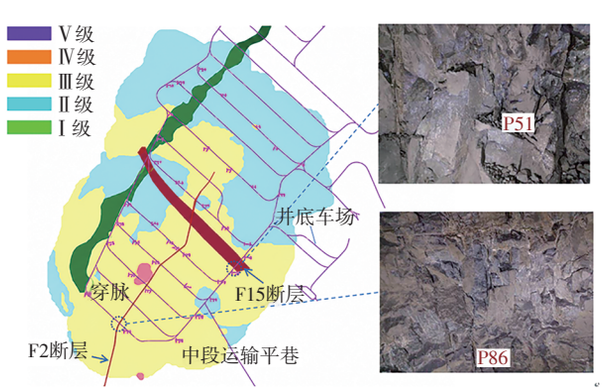


图 2　某金属矿山断层分布与开拓系统空间示意及破碎带岩体情况

Fig. 2　Schematic diagram of fault distribution and development system in a metal mine, with rock mass conditions of the fracture zone

金属矿山断层破碎带主要地质特征有：1) 岩体性质变异大，除断层活动形成的构造破碎带外，还可能包括受岩浆侵入、接触交代和热液蚀变影响形成的软弱破碎区，不同成因破碎带常相互叠加，形成软硬交错地层；2) 空间展布复杂，破碎带产状、宽度及延伸规模沿走向、倾向呈强非平稳性变化，局部常呈透镜状、雁列状或网状密集发育，多期构造复合叠加致使边界形态高度异化，显著增加了地质条件的不可预测性；3) 岩体结构松散，破碎带内部通常节理裂隙密集、岩块尺度小、完整性差，并可能含有泥化、蚀变或碎屑充填物，其强度、刚度和自稳能力显著低于上下盘完整围岩；4) 水力条件复杂，破碎带内裂隙网络贯通性好，可构成优势渗流通道，具有较强的导水性或富水性，不仅软化泥化夹层及软弱充填物，更显著劣化岩体抗剪强度，极易诱发突水涌泥灾害。因此，金属矿山断层破碎带给 TBM 开拓带来了严峻地质挑战，其诱发的 TBM 卡机灾害严重制约了 TBM 在金属矿山的规模化应用。

1.2　穿越断层破碎带 TBM 卡机模式

虽然 TBM 卡机研究大都针对软岩、断层破碎带及富水地层等开展[24-25]，但其核心均在于分析围岩荷载来源、作用方式以及 TBM 受阻部位。TBM 卡机本质上是围岩荷载作用与装备承载能力失衡的结果：当围岩作用引起的推进阻力或刀盘阻力矩超过设备可用推力或输出扭矩，致使 TBM 无法维持正常推进或刀盘旋转，即触发卡机灾害[26]。针对金属矿山断层破碎带典型不良地质，其对 TBM 掘进的影响主要是通过围岩变形、块体失稳、塌落堆积及水岩作用等方式，改变围岩 - 装备相互作用，进而诱发不同模式的卡机灾害。

如图 3 所示，李建斌等[8]基于围岩 - 装备相互作用，将 TBM 卡机划分为应力型和重力型两类。应力型卡机主要由围岩收敛、挤压或流变变形引起，随着围岩与护盾等结构之间的预留间隙逐渐闭合，接触范围和法向压力不断增大，摩擦阻力超过设备有效推力后，TBM 将难以继续推进；重力型卡机则主要由破碎岩体或结构面控制块体失稳塌落引起，塌落物在刀盘前方或护盾周围发生堆积、压实和包裹，使刀盘阻力矩或机体阻力持续增加，最终超过设备动力能力。有鉴于此，本文根据卡机过程中占主导地位的荷载来源和受阻形式，将穿越断层破碎带 TBM 卡机划分为应力型和重力型两类开展研究。

2　TBM 卡机主动防控力学机理

针对深部金属矿山断层破碎带典型不良地质中的 TBM 护盾卡机问题，采用扩挖法和加固法进行主动防控，通过建立巷道围岩 -TBM 护盾力学模型

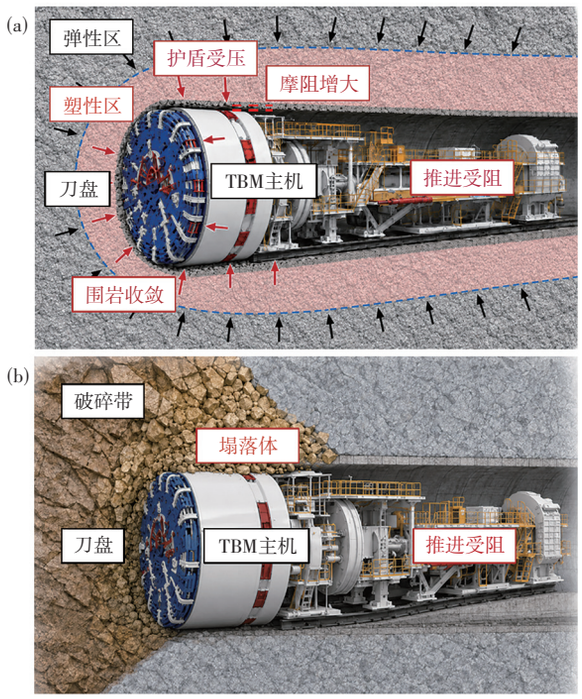


图3　TBM卡机机理示意:(a)应力型卡机;(b)重力型卡机

Fig. 3　Schematic illustration of TBM jamming mechanisms: (a) stress-type jamming; (b) gravity-type jamming

进行分析,分别揭示其主动防控力学机理。

2.1　围岩扩挖与加固分析方法

本文将破碎带围岩视为均质和各向同性的等效连续介质,采用解析方法计算围岩的弹性、塑性力学行为。考虑到TBM护盾通常具有5～10 cm厚度,将TBM护盾简化为具有一定临时支护作用的环状结构。为了分析围岩扩挖和加固后的围岩-护盾相互作用,针对断层破碎带和TBM掘进特性,提出如下方法分析围岩扩挖与加固作用。

2.1.1　扩挖作用

实际工程中,扩挖法是通过在TBM掘进时加装扩挖刀盘人为扩大巷道轮廓半径,让掌子面附近围岩和护盾之间形成一定变形释放空间,围岩在发生部分变形后再与TBM护盾接触,共同抵抗地层压力。为了模拟扩挖法对围岩-护盾相互作用的延滞效应,本文在计算时引入了扩挖系数η来定量表征其影响。不妨考虑围岩可以达到自稳并将其最大收敛变形记为u_{max},人工扩挖量记为u_{ex},则扩挖系数η定义如下:

$$\eta=\frac{u_{ex}}{u_{max}} \tag{1}$$

式中,η取值范围为[0,1],取0时表示不扩挖,取1时表示完全扩挖,即扩挖后围岩与TBM护盾刚好不接触。

2.1.2　加固作用

针对断层破碎带岩体,注浆加固通过改变其强度与刚度特性,直接影响巷道围岩与TBM护盾的相互作用,进而降低卡机风险。本文使用注浆技术对断层破碎带岩体进行超前全断面加固,在巷道周围形成具有一定厚度的圆环加固区,并引入等效加固区概念来描述超前注浆对原岩区的影响,进而分析围岩力学响应。如图4所示,在广义Zhang-Zhu(简称GZZ)岩体强度三维分析理论框架下[27-28],采用理想弹塑性模型来描述岩体峰前-峰后的应力应变关系,以此说明破碎岩体与加固岩体的力学差异性。可以看出,注浆加固岩体在π平面上的强度包络范围更大、承载特性更好。

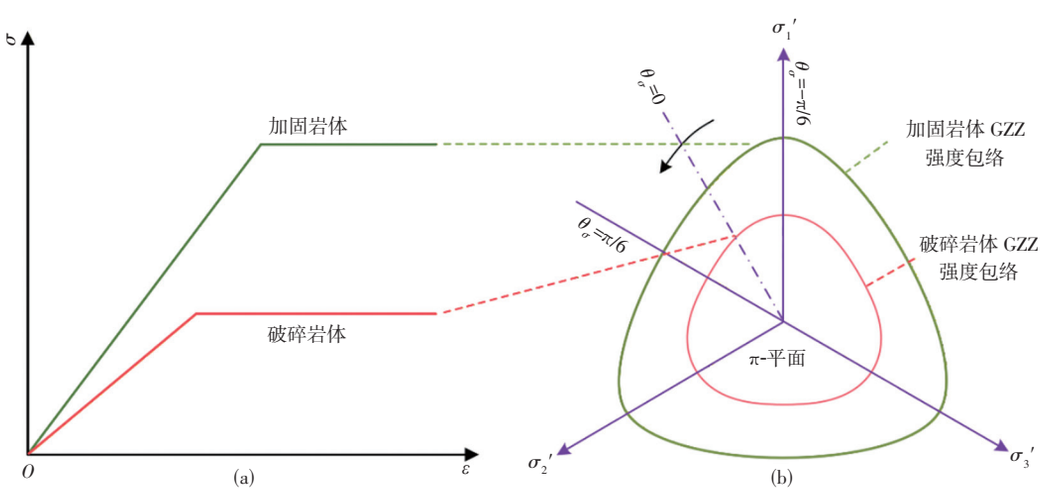


图4　破碎岩体和注浆加固岩体力学特性示意:(a)应力应变关系;(b)π平面上的GZZ强度包络

Fig. 4　Schematic illustration of the mechanical behavior of fractured and grout-reinforced rock masses: (a) stress-strain relationships; (b) GZZ strength envelopes in the π-plane

2.2　计算模型

如图 5 所示，建立起深埋巷道围岩 -TBM 护盾简化力学分析模型。不妨记简化后的 TBM 护盾环状结构内半径为 R_1，深埋长圆形巷道半径为 R_2，超前注浆加固区半径为 R_3，考虑自重应力 σ_h 和构造应力 σ_v 两向不等压地应力场，分析扩挖法和加固法对围岩 - 护盾相互作用的影响。计算时，将加固区材料参数设置为与原岩区完全一致，可使模型退化为未加固工况。由于断层破碎带岩体承载能力较弱，巷道围岩可能在开挖后产生大范围塑性区，使用 GZZ 岩体三维强度准则描述塑性区岩体的屈服破坏力学行为，光滑 GZZ 准则表达式为：

$$F_{\mathrm{GZZ}}=\frac{1}{\sigma_{\mathrm{c}}^{(1/a-1)}}\left(\sqrt{3J_2}\right)^{1/a}+\left(\frac{3+\sin 3\theta_\sigma}{2\sqrt{3}}\right)\times m_{\mathrm{b}}\sqrt{J_2}-m_{\mathrm{b}}\frac{I_1}{3}-s\sigma_{\mathrm{c}}=0 \tag{2}$$

式中，σ_{c} 为完整岩石的单轴抗压强度；m_{b}、s 和 a 为经验参数，可反映岩体质量特征和结构特征；θ_σ 为应力 Lode 角，反映了中间主应力 σ_2 对强度的影响，I_1 为应力第一不变量，J_2 为应力偏量第二不变量，θ_σ、I_1、J_2 的表达式为：

$$\begin{cases}\theta_\sigma=\tan^{-1}\left[\dfrac{2\sigma_2-(\sigma_1+\sigma_3)}{\sqrt{3}(\sigma_1-\sigma_3)}\right]\\ I_1=\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3\\ J_2=\dfrac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_1-\sigma_3)^2}{6}\end{cases} \tag{3}$$

强度参数 m_{b}、s 和 a 与地质强度指标 GSI 的关系表示为：

$$\begin{cases}m_{\mathrm{b}}=m_{\mathrm{i}}\exp\left[(GSI-100)/(28-14D)\right]\\ s=\exp\left[(GSI-100)/(9-3D)\right]\\ a=1/2+\left[\exp(-GSI/15)-\exp(-20/3)\right]/6\end{cases} \tag{4}$$

式中，m_{i} 为反映岩石质量特征的材料参数。

2.3　围岩 - 护盾相互作用

图 5 表示的力学模型是一类接触问题，引入复变函数方法求解围岩与 TBM 护盾在弹性阶段的应力场与位移场。根据复变函数理论，围岩和 TBM 护盾平面内的应力分量可以用两个解析函数 $\varphi_1(z)$ 和 $\psi_1(z)$ 给出，其表达式如下：

$$\sigma_x+\sigma_y=4\,\mathrm{Re}\left[\varphi_1'(z)\right] \tag{5}$$

$$\sigma_y-\sigma_x+2\mathrm{i}\tau_{xy}=2\left[\bar{z}\varphi_1''(z)+\psi_1'(z)\right] \tag{6}$$

式中，σ_x 和 σ_y 分别是直角坐标系下沿着 x 和 y 方向的正应力分量，τ_{xy} 是剪应力分量，Re[] 表示对 [] 内的函数取实部，z 表示围岩或 TBM 护盾平面上的一点的坐标，其复变函数表示为 $z=x+\mathrm{i}y$，i 为虚数单位，$\bar{z}$ 为 z 的共轭。

围岩和护盾平面内位移分量的复变函数表示为：

$$2G(u+\mathrm{i}v)=\kappa\varphi_1(z)-z\overline{\varphi_1'(z)}-\overline{\psi_1(z)} \tag{7}$$

式中，u 和 v 分别表示沿着 x 轴和 y 轴的位移分量，G 为剪切模量，其与弹性模量 E 和泊松比 μ 的关系为 $G=E/2(1+\mu)$，κ 只与 μ 有关，对于本文考虑的平面应变问题有 $\kappa=3-4\mu$。

将 z 取为边界值并代入式可以直接给出位移边界

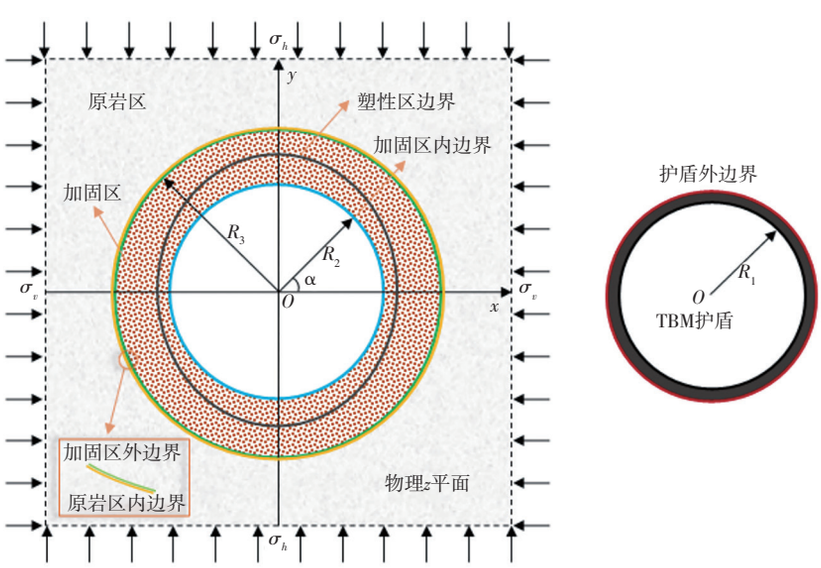


图 5　深部圆形巷道围岩 -TBM 护盾力学简化模型示意图

Fig. 5　Schematic diagram of a simplified mechanical model for surrounding rock and TBM shield in a deep circular tunnel

条件，而应力边界条件表示为：

$$\varphi(z)+z\overline{\varphi'(z)}+\overline{\psi(z)}=\mathrm{i}\int_A^B(X_n+\mathrm{i}Y_n)\mathrm{d}s+C \tag{8}$$

式中，A为边界上所取的积分起算点，B是边界上任意一点，C是待定复常数。

利用保角变换分别将物理z平面上围岩域映射为象平面上半径为1的单位圆外域，将TBM护盾等效环状体映射为象平面上外半径为1而内半径为R_1/R_2的圆环，其映射函数表达式为：

$$z=\omega(\zeta)=R_2\zeta \tag{9}$$

式中，ζ为象平面上的点。

将式(9)代入式(5)和式(6)中可以得到围岩-护盾应力场的复变函数表示，将式(9)代入式(7)和式(8)中可以得到围岩-护盾应力与位移边界条件的复变函数表示，随后，根据围岩-护盾交界上的应力连续与变形协调条件，可以确定围岩和护盾的应力状态，受限于篇幅，其具体求解过程可参考已有研究[27]。

当围岩内有塑性区产生时，塑性区内的应力根据平衡方程、GZZ强度准则以及面外应力与面内应力的补充方程确定，具体求解过程参考已有研究[28]。原岩区与加固区力学性质的不同使得这类复杂接触问题下的塑性区求解变得困难，使用保角变换方法将物理平面上加固区处于弹性状态的环状区域映射为象平面上的外半径为1内半径待定的简单圆环域，由于塑性区边界形状的复杂性使得映射函数具有的复杂表达式为：

$$z=\sum_{k=-\infty}^{\infty}D_k\zeta^k \tag{10}$$

式中，D_k为映射函数系数，具体计算时其正负幂次各取10项左右即可满足精度要求。

围岩塑性区范围通过其边界上的弹性与塑性应力连续条件确定，可以将弹塑性问题转化为求解表征塑性区边界映射函数的最优化问题，受限于篇幅，其快速求解方法可参考已有研究[28]。

2.4 TBM卡机防控机理

基于应力型卡机和重力型卡机模式，分别进行围岩扩挖和围岩加固计算分析，研究其主动防控力学机理。

2.4.1 扩挖法防控机理

以半径为4 m的深埋巷道为例，埋深对应自重地应力σ_h为10 MPa，构造地应力σ_v为15 MPa。围岩弹性模量20 GPa，泊松比0.25。为分析扩挖对围岩和TBM护盾力学响应的影响，粗略将TBM护盾等效为一厚度为10 cm、弹性模量为100 GPa、泊松比为0.3的环状临时承载体。分析不同扩挖系数下围岩与护盾的协同承载演化规律，结果如图6所示。

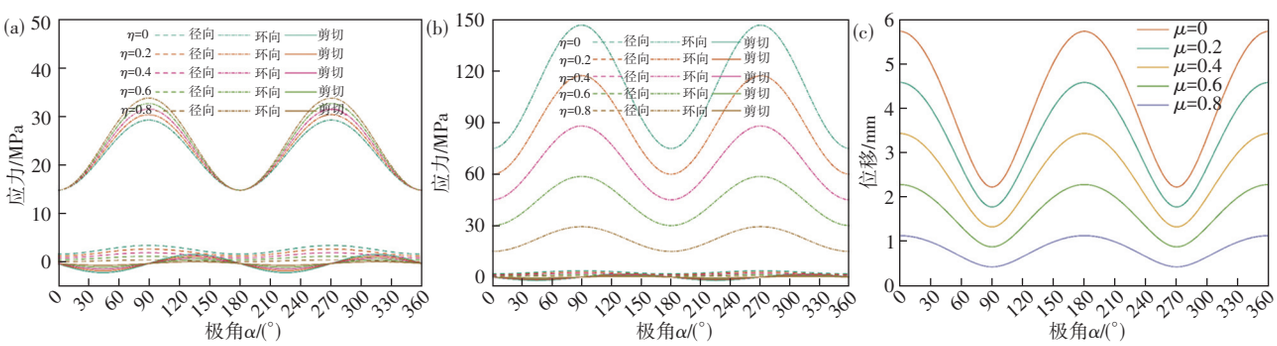


图6 不同扩挖系数下巷道围岩-TBM护盾协同承载演化规律：(a)围岩内边界应力，(b)护盾外边界应力，(c)围岩作用在护盾上的位移荷载绝对值

Fig. 6 Evolution of the load-sharing response between the roadway surrounding rock and the TBM shield under different overcut coefficients: (a) stress at the inner boundary of the surrounding rock; (b) stress at the outer boundary of the shield; (c) magnitude of the displacement load exerted by the surrounding rock on the shield

由式(1)定义可知，扩挖系数与扩挖量呈正相关，扩挖系数的增大表示预留给围岩更大的变形释放空间。图6分别给出了不同扩挖系数下围岩与护盾的应力分布，以及围岩作用在护盾上的位移荷载，由于围岩与护盾的剪切应力均较小，通过分析径向和切向应力变化可以表示二者协同承载特性。由图6(a)和图6(b)可以看出，随着扩挖系数增大，围岩内部径向应力减小而环向应力增大，应力集中程度不断加剧，对围岩承载越来越不利；与之相反，护盾所承受的径向与环向应力均大幅减小，应力集中程度逐渐降低，对起临时支护作用的护盾受力更为有利。图6(c)进一步显示，扩挖围岩不仅显著降低了护盾外边界的

位移荷载，还使得位移荷载在环向上的分布趋于均匀，也就是说，通过扩挖既可有效削弱围岩对护盾的挤压作用，还可改善由非静水应力场所导致的护盾偏压承载特性。

根据李建斌等[8]的研究，TBM 护盾卡机由护盾外表面积 s、护盾承受挤压力 P_t、和 TBM 最大推力 F_{st} 决定，当护盾所受摩擦阻力 $F_{sf}=\int P_t \mathrm{d}s$ 大于 F_{st} 时，TBM 护盾卡机发生。从力学机理分析，TBM 护盾所承受的压力为形变压力，其大小取决于围岩与 TBM 的承载特性以及二者接触的时间。可以看出，扩挖法是通过延缓围岩与 TBM 接触后的协同承载，降低护盾承受的径向挤压力进而降低护盾所受的摩擦阻力，以此达到降低 TBM 卡机风险的目的。因此，在 TBM 未进入断层破碎带的影响段时，即使原始地应力较高，但由于岩体完整性好、变形小，TBM 护盾承受的形变压力通常有限，所以卡机风险较低；而在断层破碎带及其影响段，即使原始地应力较低，但由于岩体破碎程度高变形大，围岩作用在护盾上的形变压力较大，更容易导致卡机灾害发生。

值得注意的是，扩挖系数的引入隐含了一个基本假定，即围岩变形收敛规律清晰且可定量预测。科学厘定围岩临界扩挖量，是扩挖法在 TBM 卡机防控中得以成功应用的核心前提。然而，当 TBM 穿越结构松散且可能具有强流变特性的断层破碎带时，围岩力学响应特征难以准确描述，一旦扩挖参数选取不当，可能导致围岩因承载过高或支护滞后而发生难以预测的大变形，最终诱发时滞型卡机灾害。

2.4.2　加固法防控机理

继续以半径为 4 m 的深埋巷道为例，考虑埋深对应自重地应力 σ_h 为 12 MPa，构造地应力 σ_v 为 15 MPa。断层破碎带岩体弹性模量 E 为 10 GPa，泊松比 υ 为 0.35，单轴抗压强度 σ_c 为 40 MPa；基于 GZZ 强度理论，取强度参数 m_i 为 15，GSI 为 20，考虑到 TBM 开挖的微扰效应，将岩体损伤因子 D 取为 0。研究表明，基于等效力学参数法可模拟超前注浆加固作用对岩体力学性质的影响，加固作用对岩体泊松比的影响十分有限，对岩体弹性模量和强度的影响则与破碎带岩性和破碎程度有关。系统分析不同加固参数下围岩力学特征对 TBM 护盾卡机的影响规律。首先，仅考虑注浆加固范围对围岩的影响，将加固区岩体弹性模量保持为 12 GPa，GSI 保持为 40 不变，图 7 对比了未加固、加固区半径为 2 m 和加固区半径为 4 m 时的围岩塑性区分布特征。然后，考虑

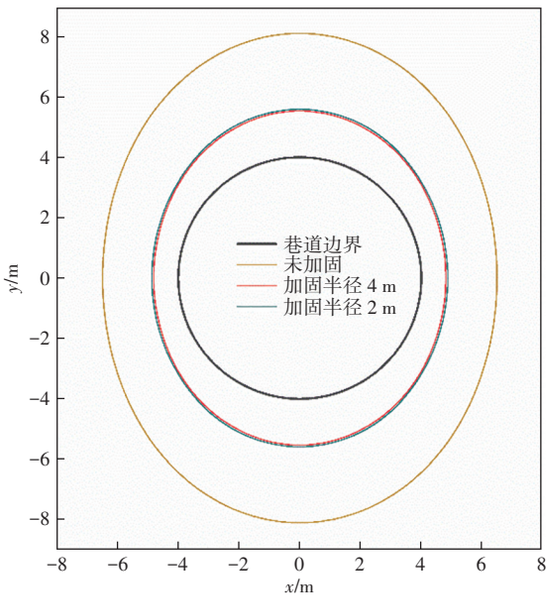


图 7　不同加固范围下断层破碎带围岩塑性区演化规律

Fig. 7　Evolution of the plastic zone around the roadway in a fault-fracture zone under different reinforcement extents

加固区强度和刚度的影响，将加固区半径固定为 2 m，图 8 分别给出了加固区强度参数 GSI 分别为 40、50、60，以及弹性模量 E 分别为 12、14、16 GPa 时的围岩塑性区演化规律。

当围岩产生塑性区后变形以塑性流动为主，因此塑性区大小可以反映围岩的自稳定特性以及对 TBM 护盾的挤压作用。图 7 的对比结果表明，超前注浆加固对抑制断层破碎带围岩塑性区发育效果显著，施作加固层后围岩塑性区范围大幅缩减。然而，进一步对比不同加固半径发现，加固范围对塑性区演化的影响存在明显阈值效应。究其力学本质，这是因为，当加固圈厚度足以覆盖围岩潜在塑性区时，继续增大加固区范围对围岩应力重分布影响甚微，致使无法充分发挥加固区岩体的强度潜能。因此，在实际 TBM 卡机防控工程实践中，凭借大范围注浆加固来提升围岩承载力并非经济有效的技术路径。图 8 表明，当注浆加固范围不变时，提高加固区强度能有效抑制塑性区发展，而增大加固区刚度产生的效果则刚好相反。这是因为，增大加固区刚度将驱使围岩应力集中沿着巷道径向由深部向浅部转移，加剧了浅部围岩变形破坏的风险，从而增大作用在 TBM 护盾上的位移荷载。相比之下，岩体强度的提升则在于帮助围岩承担更高的荷载，削减应力集中转移带来的不利影响。由此可见，这种强度 - 刚度相互作用机制给 TBM 卡机加固防控的启示在于，在考虑合适加固范围的基础

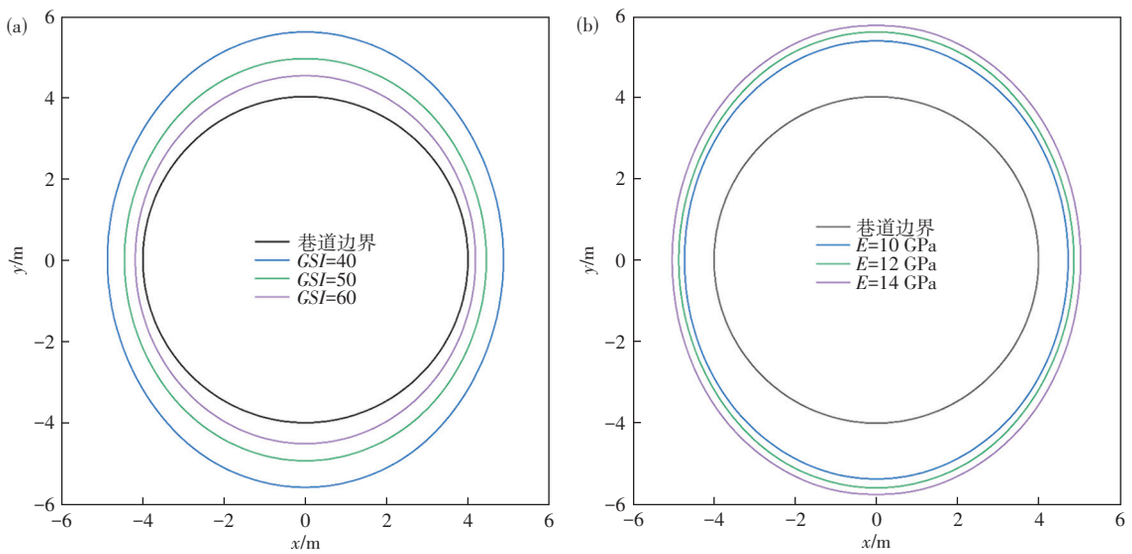


图8 加固区强度与刚度参数影响下断层破碎带围岩塑性区演化规律:(a)强度参数*GSI*;(b)弹性模量*E*

Fig. 8 Effects of the strength and stiffness parameters of the reinforced zone on the evolution of the plastic zone around the roadway in a fault-fracture zone: (a) strength parameter *GSI*; (b) elastic modulus *E*

上,要重视加固岩体强度与刚度的力学匹配关系。

综上所述,在TBM穿越断层破碎带之前进行一定范围超前加固,其作用首先在于提升岩体整体性与降低塌落风险,促使TBM卡机灾害由重力型向应力型转变。加固区刚度的提升会造成浅部围岩高应力集中,这与充分调动深部围岩承载的岩体工程灾害防控理念相悖,但加固区强度的同步提升可有效削弱这种不利影响。由此可见,基于原岩区-加固区围岩协同承载力学机制,合理设计加固区范围、强度与刚度参数,是提升TBM卡机防控效果的重要路径。

3 扩挖-加固协同主动防控

由上述关于扩挖法和加固法防控TBM卡机灾害的分析可知:扩挖法虽能有效释放位移荷载以减小TBM护盾形变压力,降低即时型卡机风险,但容易加剧围岩浅部应力集中与变形失稳,诱发时滞型卡机灾害;加固法则通过提升弱破碎岩体的整体性与自承载特性,可在承担较大浅部应力集中的同时抑制围岩塑性区的发育及塑性变形的产生,进而降低即时型与时滞型卡机风险,扩挖法和加固法在防控机理上存在优势互补。此外扩挖法工艺简便、经济性优异,但是加固法工序繁杂、工程造价偏高。若能实现扩挖法和加固法的协同利用,可大幅提升TBM卡机防控效果与工程落地可行性。

有鉴于此,本文提出金属矿山穿越断层破碎带TBM开拓卡机扩挖-加固协同主动防控思路:首先在TBM穿越断层破碎带之前,使用超前注浆加固岩体承载力,从改造围岩力学响应特征曲线的角度出发抑制围岩变形发展,将重力型卡机灾害向应力型卡机灾害转变;然后,在TBM掘进到加固后的断层破碎带时,使用扩挖刀盘增大围岩-TBM护盾之间的变形空间,从延缓围岩-TBM护盾协同承载的角度出发降低护盾形变压力,通过扩挖-加固协同防控,同时达到改善围岩承载特性、抑制围岩变形发展、降低护盾挤压作用的目的,主动防控断层破碎带TBM护盾卡机风险。扩挖-加固协同力学机理见图9。

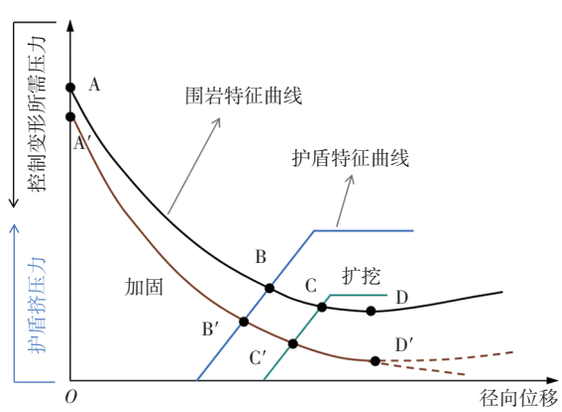


图9 穿越断层破碎带TBM护盾卡机扩挖-协同主动防控力学机理示意图

Fig. 9 Schematic of the mechanical mechanism of over-excavation-based coordinated active prevention and control of TBM shield jamming during passage through a fault fracture zone

由图9可以看出，未采取防控措施时，围岩特征曲线与护盾特征曲线交于B点，此时破碎围岩变形发展快，对护盾挤压作用强。扩挖法可以预留围岩与护盾间的变形空间，降低护盾挤压力，使护盾特征曲线右移，平衡点由B移至C；加固法可以抑制围岩塑性变形与松弛破坏，降低控制围岩变形所需压力，使围岩特征曲线下移，平衡点由B移至B′。同时，超前注浆加固还可能使围岩特征曲线的上翘段(D′之后的力学行为)变缓或消失，阻止围岩的流变行为，预防时滞型TBM卡机事故。图9显示，综合采用扩挖-协同主动防控措施后，围岩特征曲线与护盾特征曲线的交点由B移至C′，作用于护盾上的挤压力明显减小，大大降低了TBM卡机风险。

4　结论与展望

1)扩挖法的本质在于延缓围岩-护盾协同承载，通过预留变形空间允许围岩发生位移释放，有效降低作用于护盾上的形变压力并改善其偏压受力特性，其成功应用的核心前提是准确把握围岩力学响应特征，基于围岩-护盾协同承载科学确定扩挖量，针对断层破碎带围岩，扩挖参数选取不当易诱发时滞型卡机灾害。

2)加固法的本质在于提升加固区岩体强度与刚度，通过改变浅部围岩应力分布与承载特性，将TBM卡机模式由重力型向应力型转变，能够有效抑制围岩塑性区发展从而大幅降低塑性流动作用于护盾上的形变压力，基于加固区范围、强度与刚度参数优化设计，是提升断层破碎带TBM卡机防控效果的重要路径。

3)针对金属矿山断层破碎带TBM卡机灾害防控难题，提出了扩挖-加固协同主动防控思路，通过超前注浆改性与扩挖预留空间协同作用，将重力型卡机转变为应力型卡机，达到改善围岩承载特性、抑制围岩变形发展、降低护盾挤压作用的目的，实现扩挖法与加固法在防控机理、技术路线与经济成本上的优势互补。

本文未深入探讨岩体流变对TBM卡机的影响，对防控机理的认识尚处于定性阶段。TBM卡机防控未来发展的目标是根据不良地质条件给出围岩扩挖和加固参数定量设计依据。因此，亟需在考虑复杂岩体力学行为的基础上，揭示TBM掘进过程中的岩-机相互作用，满足深部金属矿山TBM安全高效连续开拓需求。

参　考　文　献

[1] 刘泉声，潘玉丛，余宏淦，等. 深部金属矿山巷道TBM掘进技术应用现状及研究进展[J]. 有色金属(矿山部分)，2024，76(6)：25-41.
Liu Quansheng，Pan Yucong，Yu Honggan，et al. Application status and research progress of TBM tunnelling technology in deep metal mine roadways[J]. Nonferrous Metals (Mining Section)，2024，76(6)：25-41.

[2] Cai Meifeng，Li Peng，Tan Wenhui，et al. Key engineering technologies to achieve green，intelligent，and sustainable development of deep metal mines in China[J]. Engineering，2021，7(11)：1513-1517.

[3] 黄丹，杨小聪，陈何. TBM在地下金属矿山应用中的发展现状与趋势[J]. 有色金属工程，2019，9(11)：108-121.
Huang Dan，Yang Xiaocong，Chen He. Development status and trend of tunnel boring machine in underground metal mine application[J]. Nonferrous Metals Engineering，2019，9(11)：108-121.

[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] Embery B D. Tunnel boring in the Mount Lyell Mine[C]// Proceedings of the Second Australian Tunnelling Conference，1976：193-202.

[6] Pickering R G B，Watson I C，Klokow J W，et al. Practical feasibility of using TBMs in deep level gold mines[C]// Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC)，1999：981-992.

[7] Hasanpour R，Schmitt J，Ozcelik Y，et al. Examining the effect of adverse geological conditions on jamming of a single shielded TBM in Uluabat tunnel using numerical modeling[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering，2017，9(6)：1112-1122.

[8] 李建斌，鲁义强，贺飞. TBM卡机类型与应对技术研究[J]. 隧道建设(中英文)，2025，45(8)：1425-1440.
Li Jianbin，Lu Yiqiang，He Fei. Study on TBM jamming mechanism and response techniques[J]. Tunnel Construction，2025，45(8)：1425-1440.

[9] 姬超，陈好，张少轩. 引大济湟工程TBM掘进卡机机理研究及控制措施[J]. 四川理工学院学报(自然科学版)，2019，32(4)：62-69.
Ji Chao，Chen Hao，Zhang Shaoxuan. Study on the mechanism of TBM tunneling jamming and control measures difficulties around water diversion tunnel from Datong River into Huangshui River[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Sicence Edition)，2019，32(4)：62-69.

[10] 许汉华，曾云川，沈维，等. 高黎贡山隧道蚀变带区TBM掘进卡机研究[J/OL]. 铁道标准设计：1-16[2026-07-18]. https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202511240005.
Xu Hanhua，Zeng Yunchuan，Shen Wei，et al. Research on TBM tunneling jamming machine in Gaoligongshan tunnel granite altered zone[J/OL]. Railway Standard Design：1-16[2026-07-18]. https://doi.org/10.13238/j.issn.

1004-2954. 202511240005.

[11] 刘远程,邓荣贵,冯伟,等. 等压条件下TBM掘进过程围岩扰动响应模型试验研究[J]. 振动与冲击,2026,45(7):138-148.
Liu Yuancheng, Deng Ronggui, Feng Wei, et al. Experimental study on disturbance response model of surrounding rock during TBM tunneling under isobaric condition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2026, 45(7): 138-148.

[12] 王悦,王清江,吴斐,等. 节理岩体中双护盾TBM卡机影响分析[J]. 现代隧道技术,2025,62(5):146-153.
Wang Yue, Wang Qingjiang, Wu Fei, et al. Analysis of the jamming influence mechanisms of double-shield TBM operations in jointed rock masses[J]. Modern Tunnelling Technology, 2025, 62(5): 146-153.

[13] Xu Z H, Wang W Y, Lin P, et al. Hard-rock TBM jamming subject to adverse geological conditions: influencing factor, hazard mode and a case study of Gaoligongshan Tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103683. DOI: 10. 1016/j. tust. 2020. 103683.

[14] 王世龙,高保彬,王新壮,等. 敞开式TBM穿越陷落柱刀盘卡机机制及防控策略[J]. 隧道建设(中英文),2026,46(增刊1):348-360.
Wang Shilong, Gao Baobin, Wang Xinzhuang, et al. Cutterhead jamming mechanism and prevention strategy for an open-type TBM crossing collapse columns[J]. Tunnel Construction, 2026, 46(S1): 348-360.

[15] 任亚坤,杨振兴,刘永胜,等. 敞开式TBM卡机风险分级防控技术体系[J/OL]. 隧道建设(中英文):1-10 [2026-07-18]. https://link. cnki. net/urlid/44. 1745. U. 20260727. 1105. 004.
Ren Yakun, Yang Zhenxing, Liu Yongsheng, et al. Prevention and control technical system for jamming risk grading of open TBM (Tunnel Boring Machine) [J/OL]. Tunnel Construction: 1-10 [2026-07-18]. https://link. cnki. net/urlid/44. 1745. U. 20260727. 1105. 004.

[16] 陈天楠,刘立鹏,汪小刚,等. TBM刀盘卡机风险分级预测方法构建与验证[J]. 水利学报,2026,57(4):601-611.
Chen Tiannan, Liu Lipeng, Wang Xiaogang, et al. Formulation and validation of a risk graded prediction method for TBM cutterhead jamming[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2026, 57(4): 601-611.

[17] Pan Yucong, Liu Quansheng, Wu Xinlin, et al. Tunnel boring machine jamming anticipation based on a new monitoring system for real-time perception of shield strain[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2026, 18(7): 5562-5572.

[18] 刘利坤,王明胜,路军富,等. 隧道软弱破碎带TBM卡机脱困技术研究[J]. 地下空间与工程学报,2024,26(6):2064-2073.
Liu Likun, Wang Mingsheng, Lu Junfu, et al. Research on TBM jamming technology in weak fracture zone of tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 26(6): 2064-2073.

[19] 张彬,张莹,郭晓刚,等. 富水断层破碎带TBM卡机及高效处置措施[J]. 水利水电技术(中英文),2025,56(增刊2):323-329.
Zhang Bin, Zhang Ying, Guo Xiaogang, et al. TBM jamming analysis and efficient release technology in water-rich fault fracture zone[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S2): 323-329.

[20] 张宝瑾,谭忠盛,李林峰,等. TBM隧洞软弱围岩不良地质段卡机机理及脱困技术:以我国西北某供水隧洞为例[J]. 土木工程学报,2024,57(增刊1):29-35.
Zhang Baojin, Tan Zhongsheng, Li Linfeng, et al. The jamming mechanism and release techniques of TBM tunneling in weak surrounding rock sections: a case study of a water supply tunnel in northwest China[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(S1): 29-35.

[21] 钱永聪. 公路-胶带-铁路联合开拓运输系统在朱矿深部开采中的应用[J]. 中国矿业,2012,21(增刊1):354-356,386.
Qian Yongcong. Road-tape-railway joint development transport system in the Zhu mine in deep mining application[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(S1): 354-356, 386.

[22] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略[J]. 工程科学学报,2019,41(4):417-426.
Cai Meifeng, Xue Dinglong, Ren Fenhua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 417-426.

[23] 韩佳霖,刘学,王贤钧,等. 全球全断面隧道掘进机典型应用工程案例统计与发展分析[J]. 隧道建设(中英文),2026,46(6):1359-1382.
Han Jialin, Liu Xue, Wang Xianjun, et al. Global typical case statistics and development analysis of full-face tunnel boring machines[J]. Tunnel Construction, 2026, 46(6): 1359-1382.

[24] Lu Yiqiang, Liao Jianxing, Wang Chiyu, et al. A semi-analytical solution for jamming risk in a backup system for an open TBM under high in situ stress: a case study from China[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2026, 59(8): 8813-8832.

[25] Liu Lipeng, Wang Xiaogang, Li Changbo, et al. Jamming of the double-shield tunnel boring machine in a deep tunnel in Nyingchi, Tibet Autonomous Region, China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 131: 104819. DOI: 10. 1016/j. tust. 2022. 104819.

[26] Koizumi Y, Inaba T, Yamamoto T. Theoretical analysis and seismic investigation for TBM jamming in squeezing fissile slate[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 57: 284-286.

[27] Ma Yaocai, Zhu Hehua, Cai Wuqiang, et al. The stress-controlled mechanism of deep-buried tunnels based on functional gradient reinforcement in high tectonic stress zones[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2026, 18(4): 2702-2724.

[28] Ma Yaocai, Cai Wuqiang, Zhu Hehua, et al. Plastic zone characteristics and rapid stability evaluation indexes of circular tunnels subjected to non-hydrostatic stress: a novel complex variable solution incorporating 3D rock mass strength[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 151: 105868. DOI: 10. 1016/j. tust. 2024. 105868.