水　利　学　报
2026年4月　SHUILI　XUEBAO　第57卷　第4期

文章编号：0559-9350(2026)04-0601-11

TBM刀盘卡机风险分级预测方法构建与验证

陈天楠，刘立鹏，汪小刚，刘和艺，李佩茹
（中国水利水电科学研究院 流域水循环与水安全全国重点实验室，北京　100038）

摘要：针对TBM穿越断层破碎带时刀盘卡机灾害预测难题，收集整理了TBM工程数据库，构建了关联掌子面最大变形与TBM最大驱动扭矩的卡机风险预测图，建立了考虑岩体强度与地应力比值的掌子面变形量预测模型，结合预测模型与预测图，形成了一套TBM刀盘卡机风险分级预测方法，并依托国内3个TBM工程对判别方法可靠性进行了验证。结果表明：针对刀盘卡机风险，可划分为极高风险、较高风险、中等风险、较低风险和极低风险五级等级；掌子面变形量预测模型中强度应力比与掌子面变形率呈负指数函数关系，基于模型可获取隧洞掌子面变形量；基于所提出的刀盘卡机风险分级预测方法的预测结果与工程实际相比总体准确率可达96%，可用于隧洞工程TBM刀盘卡机风险的判别。

关键词：隧洞工程；刀盘卡机；风险预测；数值模拟
中图分类号：TV554　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.3724/j.slxb.20250558

1　研究背景

全断面隧道掘进机TBM(Tunnel Boring Machine)作为当前隧洞施工的主要手段之一，已广泛应用于水工隧洞的施工建造，而通常水工隧洞沿线穿越的地质条件复杂多变[1-2]，导致TBM在穿越断层破碎带等不良地质环境时易发生卡机灾害，已有统计表明刀盘卡机占TBM掘进灾害总量的45%[3]，如意大利Fransadello和Antea隧洞、引松工程及滇中引水等国内外隧洞工程均频频发生刀盘卡机灾害。刀盘卡机会影响TBM的掘进效率，脱困延时可能会转变为刀盘和护盾双重被卡，拖延工程建设进度的同时极大提高工程造价。对于刀盘卡机灾害的诱发主因，学术界多认为与断层破碎带位置掌子面塌方存在强关联性[4-6]，普遍认知当TBM所能提供的最大扭矩小于掘进所需克服的扭矩时即会发生刀盘卡机，但国内外并无可直接用于刀盘卡机灾害风险相关判据。目前针对卡机的预测识别主要分为基于数学手段的定性或半定量分析的主观经验法以及结合现场地质条件的数值模拟两种。主观经验法多依赖层次分析理论、概率矩阵及归纳法等数学手段，如温森等[7]基于概率理论建立了刀盘被卡概率公式和卡机风险评价矩阵，司景钊等[8]采用层次分析法得出了卡机预警决策主要影响参数，但该方法案例大多基于单一工程，工程普适性相对较弱。数值模拟技术因能模拟TBM掘进过程中的岩-机关系，已应用于TBM掘进过程研究[9-11]，但多聚焦于不良地质中围岩稳定或护盾卡机灾害预测[12-15]，对刀盘的研究则多关注破岩过程模拟[16-18]，对刀盘卡机灾害的研究相对空白且考虑因素存在不足，如忽略刀盘-围岩间的摩擦效应会导致预测值偏离实际[19]，且针对长大隧洞不同桩号段建立精细化模型耗时耗力，难以快速支撑工程可研阶段对于设备选型需求和刀盘卡机风险的判别。

收稿日期：2025-09-03；网络首发日期：2026-03-24
网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.1882.TV.20260324.0932.002
基金项目：国家自然科学基金面上项目(52179121)；中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(GE0145B012021)；国家电网有限公司科技项目(5200-202455105A-1-1-ZN)
作者简介：陈天楠(1998—)，博士生，主要从事地下洞室及结构工程稳定性研究。E-mail：eli0328@163.com
通信作者：刘立鹏(1983—)，正高级工程师，主要从事地下洞室及结构工程稳定性研究。E-mail：liulip@iwhr.com

基于此，本文收集整理了国内外采用TBM建造的隧洞工程数据并建立数据库，模拟得到不同案例中隧洞掌子面最大变形，结合所采用的TBM输出扭矩情况构建了刀盘卡机风险预测图；根据现有规范，建立了岩体强度参数与围岩评分标准T值关系，同时基于大量的数值计算提出了考虑岩体强度与地应力比值的掌子面最大变形量预测模型，结合预测模型与预测图，形成了一套TBM刀盘卡机风险分级预测方法。针对国内3个TBM工程实际掘进情况，对所提出的刀盘卡机风险预测方法进行了验证，结果表明所提出的预测方法可满足工程需要，可为刀盘卡机风险判别提供支撑。

2　刀盘卡机风险预测图

2.1　TBM工程数据库　从力矩角度来说，刀盘卡机与否取决于TBM最大驱动扭矩与刀盘所受阻力矩间的关系，阻力矩主要由掌子面附近围岩变形挤压刀盘所产生，因此掌子面变形量及TBM最大驱动扭矩是预测刀盘卡机风险的关键参数。为探析掌子面变形量与TBM最大驱动扭矩关系，基于前人研究成果[3]，系统扩充了TBM工程数据库。构建的数据库共包含45个工程案例，其中22例为刀盘卡机灾害案例，23例为正常掘进未卡机案例。案例中TBM包括敞开式TBM及护盾式TBM两类，刀盘直径为3.6 ~ 11.74 m，TBM最大驱动扭矩2600 ~ 30 000 kN·m，涉及的断层破碎带宽度为15 ~ 50 m，刀盘直径及驱动扭矩已基本涵盖目前国内外常见隧洞直径及TBM设备扭矩取值，表1所示为TBM数据库中部分典型的TBM工程数据。

表1　TBM工程数据库部分关键案例

Table 1　Representative cases from the TBM engineering database

编号	工程名称	TBM类型	隧洞直径/m	隧洞埋深/m	断层破碎带宽度/m	TBM最大驱动扭矩/(kN·m)	卡机/未卡机
1	大伙房输水工程	双护盾	8.00	423	28	6275	卡机
2	万家寨引黄工程	双护盾	4.88	124	15	2600	
3	吉林引松工程	敞开式	7.93	268	16	12615	
4	引大济湟工程	双护盾	5.93	750	30	5200	
5				810	20		
6	引汉济渭工程	敞开式	8.02	575	30	7661	
7	台湾雪山隧道	双护盾	11.74	420	40	30000	
8	引大入秦工程	双护盾	5.54	210		3210	未卡机
9	中部引黄工程	双护盾	5.06	150		5733	
10	吉林引松工程	敞开式	7.93	334		12615	
11	高黎贡山隧道	敞开式	9	420		9225	
12				500			
13	CSC水电站引水隧洞	双护盾	9.11	450		19179	

2.2　刀盘卡机风险预测图　既有文献及数值模拟[16,19]的研究表明，隧洞工程开挖时掌子面变形量最大值集中于掌子面中心区域。据此，选定掌子面中心点变形量作为分析指标，基于构建的TBM工程数据库(表1)，采用FLAC3D软件建立刀盘卡机与未卡机各工况数值模拟模型，分步开挖，读取各工况下掌子面最大变形量，结合对应TBM最大驱动扭矩数据，分析得到卡机与未卡机两类样本的掌子面最大变形量与TBM最大驱动扭矩的散点图，分别对卡机与未卡机样本集进行回归分析，发现卡机样本点分布趋势服从线性关系，未卡机样本点的分布更符合幂函数关系，由此构建了掌子面最大变形量与TBM最大驱动扭矩的关系图(图1)，两条趋势线定义了卡机与否的临界包络。

由图1可见，发生刀盘卡机与未卡机样本点的分布呈现显著分异特征，卡机样本点近似呈线性正

相关趋势，反映了岩体变形与掘进所需克服扭矩间的正相关关系，而未卡机样本点则呈现下凹型非线性增长特征，揭示了扭矩裕度对卡机灾害的抑制效应。若分类区别刀盘卡机样本和刀盘未卡机样本，不考虑直径对于设备所需扭矩的影响或掌子面变形的影响(实际中直径增加，掌子面变形以及设备设计扭矩均会增加)，单纯基于数据分布规律来看，掌子面变形越大，TBM所需要的设计驱动扭矩越大；当设备可提供的最大驱动扭矩低于某一临界阈值时，变形的进一步增加则会存在发生刀盘卡机风险。在两条拟合曲线所界定的主分布区域之外，仍存在少量离散分布的“独立样本点”，这是由于在TBM设备规格相似的工程案例中，其所处地质条件及赋存环境存在差异，导致模拟得到的掌子面变形量产生变化。

基于图1中两条关键趋势线，引入区间估计概念[20]，依据掌子面变形量与最大驱动扭矩的关联特征，可将TBM刀盘卡机风险划分为5个等级，所构建的TBM刀盘卡机风险预测图如图2所示。

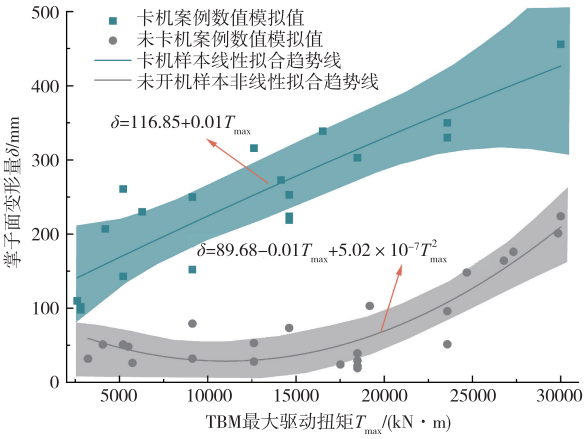


图1　掌子面变形量与TBM最大驱动扭矩关系

Fig. 1　Relationship between tunnel face deformation and TBM's maximum driving torque

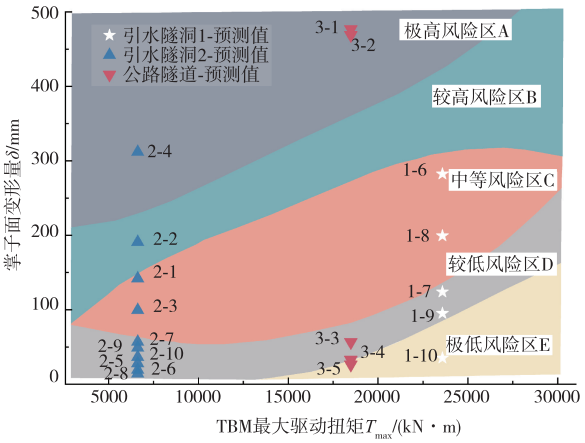


图2　基于掌子面变形-TBM最大驱动扭矩关系的刀盘卡机风险预测图

Fig. 2　Cutterhead jamming risk prediction chart derived from the face deformation vs. torque relationship

(1)“极高风险区”：明显高于“卡机”样本线性趋势线上方的带状区域。该区域内的点，其掌子面变形远大于当前扭矩水平下发生卡机的临界值。

(2)“较高风险区”：紧邻“卡机”样本线性趋势线的带状区域。通过计算该趋势线一定置信水平(置信度95%)的预测区间得到，将此区间的上界与下界分别作为较高风险区与极高风险区、中等风险区的边界。

(3)“中等风险区”：介于较高风险区与较低风险区之间的过渡区域。在此区间内，卡机与否的概率相当。

(4)“较低风险区”与“极低风险区”：采用类似方法，基于“未卡机”样本的幂函数趋势线，计算其置信度为95%的预测曲线，将此区间的上界与下界分别作为较低风险区与中等风险区、极低风险区的边界。

通过上述基于区间估计的定量方法，确定了刀盘卡机风险预测图(图2)中5个风险等级的具体边界范围，对应各风险等级的关键地质特征及针对性防控措施如表2所示。

3　掌子面变形量预测模型

3.1　岩体参数与*T*值关系构建　由刀盘卡机风险预测图可知，TBM刀盘卡机风险等级判别需要掌子面变形量与TBM最大驱动扭矩两个关键参数。后者一般为TBM设备的固定参数，掌子面变形量则难以直接获得，因此需构建基于岩体参数的掌子面变形量预测模型，以解决风险预测图中掌子面变形量输入问题。

表 2　不同刀盘卡机风险等级下地质特征及防控措施

Table 2　Geological characteristics and prevention measures for different TBM cutterhead jamming risk levels

卡机风险	围岩类别	地质特征	掘进方案	
			支护形式	参数调整
极高	Ⅴ	断层带，岩体多为碎石、泥等混合而成，呈轻度—重度高岭土化，无自稳能力，且伴随着涌水灾害	采用管棚和化学灌浆结合的超前支护，加强尾盾后方支护形式，必要时可采用人工开挖、TBM步进方式	采用低转速、低掘进速度、低贯入度，每个循环进刀盘观察掌子面围岩状况，及时优化掘进参数
较高	Ⅳ、Ⅴ	由硬岩地层掘进至软弱地层，软弱地层多为断层破碎带，岩体整体较为破碎，且强度较低，几乎无自稳能力或自稳时间很短	采用化学灌浆的超前支护，加强并及时支护尾盾后方已掘进洞段	
中等	Ⅳ	硬岩-断层破碎带组合，多为前期地质勘测无法揭露的小型断层破碎带	根据出渣量判断是否需要采用超前预固结措施，边掘进边架立钢拱架+钢筋排进行围岩支护	卸掉刀盘上合适位置面刀、中心刀或铲牙，连续快速通过
较低	Ⅲ	围岩有较好的自稳能力，无较大断裂破碎带、软弱围岩、突水涌泥等不良地质条件	围岩出露后及时初期支护	
极低	Ⅲ、Ⅱ			

此处，掌子面变形主要考虑岩体强度和隧洞处地应力水平。岩体强度参数主要有变形模量E、黏聚力c、内摩擦角φ等，可通过国际通用的岩体分级系统，如RMR[21]、Q系统[22]和GSI[23]进行间接估算与综合评定。我国水工隧洞领域普遍采用《水利水电工程地质勘察规范》[24]中围岩评分标准T值进行岩体分级，此外《引调水线路工程地质勘察规范》[25]给出了围岩力学参数建议值，具体如表3所示。

表 3　各类围岩主要力学参数地质建议值及评分T值

Table 3　Recommended values and T-scores of key mechanical parameters for various rock mass type

岩体等级	黏聚力c/MPa	内摩擦角φ/(°)	变形模量E/GPa	T
Ⅰ	1.8 ~ 2.2	52 ~ 56	>20	>85
Ⅱ	1.3 ~ 1.8	48 ~ 52	10 ~ 20	65 ~ 85
Ⅲ	0.6 ~ 1.3	35 ~ 48	5 ~ 10	45 ~ 65
Ⅳ	0.3 ~ 0.6	27 ~ 35	1 ~ 5	25 ~ 45
Ⅴ	<0.2	19 ~ 27	<1	<25

通过线性回归分别建立围岩评分标准T值与岩体参数变形模量E、黏聚力c、内摩擦角φ之间的定量关系，其决定系数R^2分别为0.94、0.92、0.92，具体表达式为

$$c = 4 \times 10^{-6}T^3 - 8 \times 10^{-5}T^2 + 0.0093T + 0.05 \tag{1}$$

$$\varphi = -4 \times 10^{-5}T^3 + 0.0075T^2 + 0.1175T + 21.801 \tag{2}$$

$$E = 10^{-5}T^3 + 0.0009T^2 + 0.0419T + 0.2 \tag{3}$$

3.2　掌子面变形预测模型　为构建一种可快速获取掌子面变形量的模型，利用FLAC3D软件和蒙特卡洛随机数原理开展1000次随机抽样数值模拟试验，获取不同岩体参数和地应力水平下掌子面变形量值。所建立的模型如图3所示，尺寸为50 m×120 m×120 m（长×宽×高），选择理想弹塑性本构模型和Mohr-Coloumb屈服准则用于模拟岩体，隧洞埋深和围岩评分T值通过蒙特卡洛随机数生成，岩体力学参数则通过式(1)—(3)的线性关系确定。其中地应力水平按照文献[26-27]中地应力反演与设置方法，模型前后

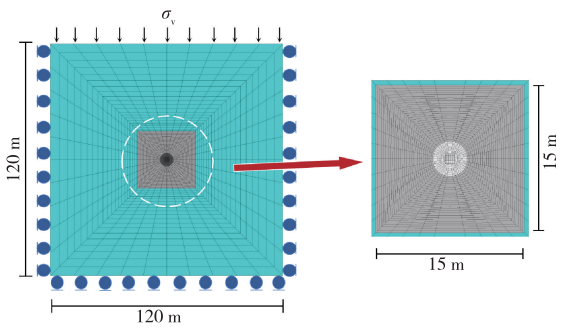


图 3　数值模拟模型示意

Fig. 3　Schematic diagram of the numerical simulation model

左右及下边界均施加法向约束，上部施加竖向均布荷载以模拟隧洞上部岩体覆盖作用，设置侧压力系数K_0=1.2，生成初始应力场，利用测量点应力值对力边界进行计算调整，直至新初始应力场与测量点地应力吻合。最后，通过分步开挖的掘进方式得到1000次随机试验下掌子面的最大变形量。

基于读取的掌子面最大变形量，参考Hoke运用强度应力比(岩体强度σ_{cm}与原位应力σ的比值)量化无支护状态下岩体抵抗挤压变形的能力[28]，并通过归一化处理，绘制掌子面变形率与强度应力比关系的散点分布图(图4)，并通过回归分析建立掌子面变形预测模型，其中变形率为掌子面变形量与隧洞直径比。

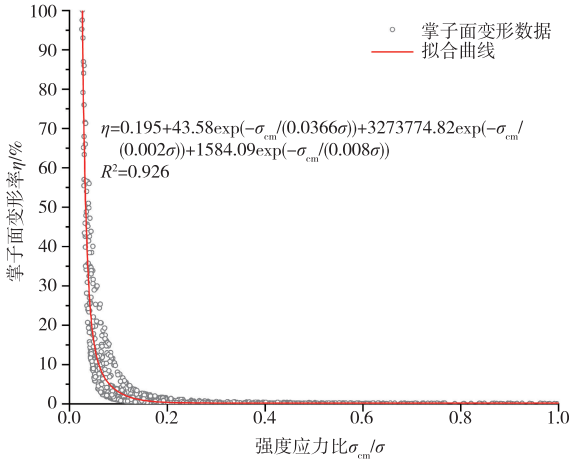


图4　掌子面变形率与强度应力比关系

Fig. 4　Relationship between face deformation rate and strength-stress ratio

由图可知，围岩强度应力比越小掌子面变形率越大，强度应力比越大掌子面变形率越小，两者间为负指数函数关系。对图4中散点进行回归分析，建立的掌子面变形预测模型如式(4)所示，其决定系数R^2为0.926。

$$\eta = 0.195 + 43.58\exp(-\sigma_{cm}/(0.0366\sigma)) + 3273774.82\exp(-\sigma_{cm}/(0.002\sigma)) + 1584.09\exp(-\sigma_{cm}/(0.008\sigma)) \tag{4}$$

式中：η为掌子面变形率；σ_{cm}/σ为强度应力比。通过L-M迭代优化算法拟合确定各项回归系数。

基于所建立的掌子面变形预测模型，可获得不同直径隧洞的掌子面变形量。

4　刀盘卡机风险分级预测流程与验证

4.1　预测流程　基于刀盘卡机风险预测图和掌子面变形预测模型，可进行刀盘卡机风险预测，具体流程如图5所示：

(1)强度应力比计算：依据隧洞埋深H、岩体密度ρ、黏聚力c和内摩擦角φ等关键参数，计算竖向应力σ(σ=ρgH)及岩体强度σ_{cm}($\sigma_{cm}=2c\cos\varphi/(1-\sin\varphi)$)，进而得到强度应力比$\sigma_{cm}/\sigma$；若使用围岩评分$T$值，可通过式(1)(2)先获取黏聚力$c$和内摩擦角$\varphi$。

(2)掌子面变形量推算：利用掌子面变形量预测模型，即式(4)，将步骤(1)计算得到的强度应力比值代入，求得掌子面变形率η，将该值乘以隧洞直径D，即可获得掌子面变形量δ。

(3)刀盘卡机风险预测：将掌子面变形量δ与TBM设备最大驱动扭矩T_{max}作为输入参数，在刀盘卡机风险预测图(图2)中进行坐标定位，得到刀盘卡机风险等级。

同时，利用该方法在TBM设备选型设计阶段，可根据工程资料，预测潜在不良地质洞段掌子面变形量，结合刀盘卡机风险预测图，逆向推求TBM所需的最大驱动扭矩值，在设备配置源头优化关键参数，预先规避TBM掘进过程中的卡机风险。

需要指出的是，本研究所构建的TBM刀盘卡机风险分级预测方法，其数据库中卡机案例均集中于敞开式TBM和双护盾TBM，其判别方法是基于围岩挤压变形导致刀盘扭矩超限所构建的，因此，该判别方法现阶段主要适用于这两类TBM在断层破碎带等挤压性地层中的刀盘卡机风险预测，因大规模涌水、突泥等流体作用主导的卡机风险预测，其适用性有待进一步研究。

4.2　刀盘卡机风险分级预测方法验证

4.2.1　*刀盘卡机案例概况*　某两条采用敞开式TBM建造的引水隧洞和一条采用双护盾TBM建造的公路隧道，直径分别为9.83、7.03和9.13 m，工程沿线地质条件复杂，构造发育强烈。引水隧洞1沿线发育13条大断层，隧洞埋深一般为400～1300 m，区间岩体破碎，岩体以灰岩及白云质灰岩为主，围

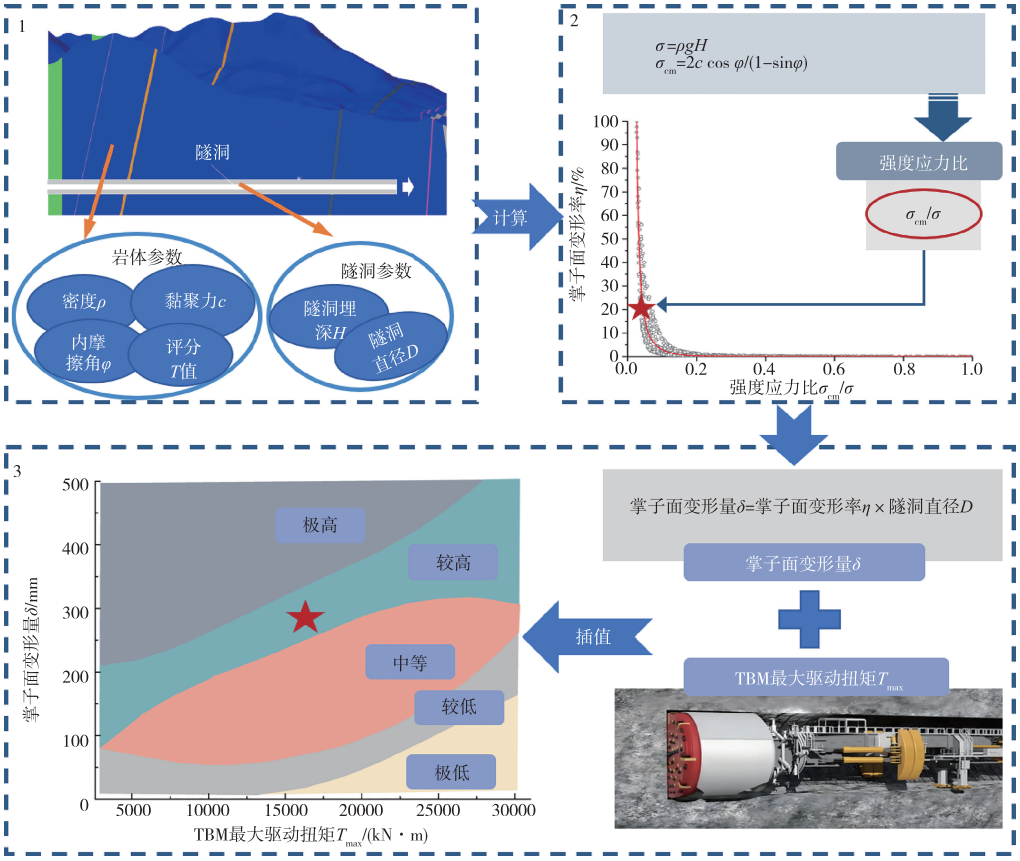


图5　融合岩体与设备参数的刀盘卡机风险预测流程图

Fig. 5　Flowchart for TBM cutterhead jamming risk prediction based on rock mass and equipment parameters

岩总体以Ⅳ类为主，部分为Ⅲ类，局部洞段围岩为Ⅴ类；引水隧洞2沿线发育一条宽度为800 m的大断裂带及8条宽度10～30 m不等的次级断层，洞段埋深150～650 m，发育有多条小断层，破碎带宽度一般为0.5～2.4 m，断层带岩性以破裂岩、挤压片岩、糜棱岩为主，岩体抗风化与抗冲蚀能力较低，遇水易软化甚至崩解；公路隧道卡机埋深在600～680 m，岩性主要以条带状混合岩为主，附近发育有断层构造，局部条带状分布有长英质脉体，且出现蚀变现象，局部高岭土化，降低了自身强度和节理裂隙结构面强度。3个工程共计出现的12次刀盘卡机情况如表4所示。

4.2.2　判别结果　为验证提出的刀盘卡机风险分级预测方法的工程适用性，在表4的12次刀盘卡机案例基础上补充了同工程中13组正常掘进断面数据，其中岩体力学参数及TBM设备参数详见表5，刀盘卡机风险等级预测结果如图2及表6所示。

对于引水隧洞1的中1-1—1-5的5个桩号段，预测得到掌子面变形量均超过500 mm，无法在图2中直接采用插值法进行判别，然而，鉴于该工程TBM最大驱动扭矩为固定值(23 578 kN·m)，结合刀盘卡机风险随变形量增加的分布趋势判断，5个桩号段刀盘卡机风险等级均属极高风险。由判别结果可知(表6、图2)，刀盘卡机风险的总体预测准确率为96%。对正常掘进工况成功判别率达100%，对于12组实际卡机案例准确率为91.7%。

唯一误判的是引水隧洞2的2-3桩号段，判别结果显示刀盘卡机风险位于中等风险区、邻近较低风险区边界，故综合预测为低风险，实际掘进显示该断面存在未探明的小规模破碎带。此类误判案例揭示了本判别方法的一个重要边界条件：其风险预测精度很大程度上依赖于输入地质参数的准确性。对于勘测精度有限的洞段，若存在未探明的局部不良地质体，可能导致卡机风险被低估。因此，在实际工程应用中，建议将本文所构建的刀盘卡机风险预测图的判别结果与超前地质预报(如TSP、地质雷达)结果进行综合研判。当预报显示掌子面前方围岩破碎等异常时，若预测图判别为中等风险等级，均应提高预警等级并加强超前支护等主动防控措施，以最大限度规避卡机风险。

表4　刀盘卡机概况

Table 4　Overview of recorded cutterhead jamming incidents

工程名称	卡机桩号/m	塌落体位置	卡机概况	卡机原因
引水隧洞1	58+041	刀盘前方和侧向	TBM掘进过程中掌子面及附近围岩间歇性垮塌，出渣量急剧增加，大块孤石不断垮落，隧洞拱部形成高度约3～8 m不等的空腔	两个工程的刀盘卡机事故均因塌方导致刀盘卡机，TBM由硬岩进入松散软弱的断层带时，围岩性质突变，强度瞬间下降，岩土体软弱破碎，围岩失稳后堆积挤压刀盘，同时，部分碎石及岩块进入刀盘，导致扭矩快速上升，进而发生刀盘卡机灾害
	58+040	刀盘前方和侧向		
	58+039	刀盘前方和侧向		
	55+167	刀盘前方		
	55+079	刀盘前方		
	53+326	刀盘前方和上方		
引水隧洞2	0+717	刀盘前方和上方	TBM掘进时，围岩破碎，同时伴随着掉块塌方，周边坡脚为塌方松散体，掌子面前方塌方严重，多数塌腔深度0.2～1.1 m，最大深度6 m	
	3+083	刀盘前方及护盾左上侧部位		
	63+815	刀盘前方和侧向		
	64+413	刀盘前方和侧向	TBM遭遇突涌水，涌水量为10 m^3/h，涌泥携带前方断裂中的软弱夹层形成泥浆包裹刀盘，围岩失稳，形成4 m塌腔	
公路隧道	10+143	刀盘上方及前盾	遭遇多条小规模断层破碎带，带内物质多为碎粉、碎砾岩，岩体较为破碎，掌子面至前盾之间11—5点钟方向围岩严重塌方，形成大空腔	卡机洞段均发现有长英质脉体不同程度发育，均出现蚀变现象局部高岭土化，从而降低自身强度和节理裂隙结构面强度，发生严重塌方后，集中压在刀盘及前盾上部，造成刀盘卡机
	10+202	刀盘上方及前盾		

表5　各断面埋深及岩体参数值

Table 5　Burial depth and rock mass parameters for each section

工程名称	序号	卡机桩号/m	评分T值	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	岩体密度/(g·cm^{-3})	洞室埋深/m	TBM最大驱动扭矩/(kN·m)
引水隧洞1	1-1	58+041	18	0.21	26.11	2.22	720	23578
	1-2	58+040	18	0.21	26.11	2.22	720	
	1-3	58+039	18	0.21	26.11	2.22	720	
	1-4	55+167	24	0.28	28.39	2.31	560	
	1-5	55+079	20	0.23	26.83	2.28	530	
	1-6	53+326	26	0.31	29.22	2.30	450	
	1-7	23+128	38	0.51	34.90	2.36	610	
	1-8	15+062	32	0.39	31.93	2.33	520	
	1-9	62+568	43	0.58	37.20	2.40	660	
	1-10	52+223	46	0.69	39.18	2.41	590	
引水隧洞2	2-1	0+717	29	0.35	32.00	2.55	420	6620
	2-2	3+083	21	0.25	24.60	2.60	280	
	2-3	63+815	32	0.40	28.80	2.65	380	
	2-4	64+413	16	0.20	20.40	2.50	260	
	2-5	2+362	46	0.70	34.20	2.74	490	
	2-6	22+046	50	0.80	38.80	2.76	520	
	2-7	36+188	35	0.45	30.10	2.68	370	
	2-8	51+085	44	0.65	32.50	2.70	280	
	2-9	60+486	42	0.60	30.00	2.72	460	
	2-10	66+094	51	0.84	39.30	2.76	635	
公路隧道	3-1	10+143	25	0.30	28.80	2.68	460	18482
	3-2	10+202	21	0.25	27.20	2.60	380	
	3-3	12+427	39	0.52	35.40	2.70	260	
	3-4	15+162	45	0.68	39.20	2.72	330	
	3-5	16+088	51	0.84	42.90	2.75	320	

表6　各断面刀盘卡机判别结果

Table 6　TBM cutterhead jamming assessment results for each section

工程名称	序号	卡机桩号/m	强度应力比	掌子面变形量/mm	刀盘卡机风险等级	实际掘进状态
引水隧洞1	1-1	58+041	0.04	2176.83	极高	卡机
	1-2	58+040	0.04	2176.83	极高	卡机
	1-3	58+039	0.04	2176.83	极高	卡机
	1-4	55+167	0.07	626.25	极高	卡机
	1-5	55+079	0.06	876.16	极高	卡机
	1-6	53+326	0.10	282.52	较高	卡机
	1-7	23+128	0.14	123.94	中等	未卡机
	1-8	15+062	0.12	199.43	中等	未卡机
	1-9	62+568	0.15	95.26	中等	未卡机
	1-10	52+223	0.20	35.30	极低	未卡机
引水隧洞2	2-1	0+717	0.12	142.21	较高	卡机
	2-2	3+083	0.11	191.00	较高	卡机
	2-3	63+815	0.13	99.61	中等	卡机
	2-4	64+413	0.09	312.01	较高	卡机
	2-5	2+362	0.20	28.17	较低	未卡机
	2-6	22+046	0.23	19.53	较低	未卡机
	2-7	36+188	0.16	57.08	较低	未卡机
	2-8	51+085	0.31	14.34	较低	未卡机
	2-9	60+486	0.17	49.10	较低	未卡机
	2-10	66+094	0.20	36.62	较低	未卡机
公路隧道	3-1	10+143	0.08	476.66	极高	卡机
	3-2	10+202	0.08	468.77	极高	卡机
	3-3	12+427	0.29	56.53	较低	未卡机
	3-4	15+162	0.32	32.75	较低	未卡机
	3-5	16+088	0.44	26.41	极低	未卡机

5　结论

基于TBM工程数据库，利用FLAC3D数值模拟软件，获取了各案例的掌子面最大变形量，结合TBM最大驱动扭矩构建了刀盘卡机风险预测图。同时，根据现行规范量化了岩体强度参数与围岩评分T值关系，提出了掌子面变形量预测模型，融合图形成了一套刀盘卡机风险分级预测方法，并结合具体工程对方法进行了验证，结果表明：(1)TBM设备驱动扭矩裕度不足时，掌子面变形越大、刀盘卡机风险越高。依据掌子面变形量与最大驱动扭矩的关联特征，可将刀盘卡机风险划分为极高风险、较高风险、中等风险、较低风险及极低风险5个等级。(2)洞室赋存环境越差，围岩强度应力比越小，掌子面变形越大，强度应力比与掌子面变形率符合负指数函数关系，可根据建立的掌子面变形量预测模型获取不同直径隧洞的掌子面变形量。(3)工程实例验证结果表明，本文所提出的刀盘卡机预测方法准确率为96%，与工程开挖结果吻合度较高，可用于刀盘卡机风险判别。

参 考 文 献：

[1] 苏凯，龚睿，陶军，等. 输水隧洞管片衬砌梁-弹簧模型中接头转动刚度计算方法[J]. 水利学报，2025，56(5)：611-623.（SU K，GONG R，TAO J，et al. Calculation method of joint rotational stiffness in segmental lining beam-spring model of water conveyance tunnel[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2025，56(5)：611-623.(in Chinese))

[2] 李宇，韩科，段庆伟，等. 基于地质和渗控双因素的富水地层隧洞堵排设计研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文)，2025，23(4)：401-411.（LI Y，HAN K，DUAN Q W，et al. Research on design of tunnel plugging and drainage in water-rich strata based on geological and seepage control factors[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research，2025，23(4)：401-411.(in Chinese))

[3] 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[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2021，108：103683.

[4] 王亚锋. 高黎贡山隧道TBM不良地质条件下卡机脱困施工关键技术[J]. 隧道建设(中英文)，2021，41(3)：441-448.（WANG Y F. Key technologies for TBM jamming release of Gaoligongshan tunnel under unfavorable geologies[J]. Tunnel Construction，2021，41(3)：441-448.(in Chinese))

[5] BAYATI M，HAMIDI J K. A case study on TBM tunnelling in fault zones and lessons learned from ground improvement[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2017，63：162-170.

[6] 王玉杰，李秀文，曹瑞琅，等. 水工隧洞TBM施工适宜性围岩分类研究[J]. 水利学报，2023，54(7)：880-888.（WANG Y J，LI X W，CAO R L，et al. Study on classification of surrounding rock suitable for TBM construction of hydraulic tunnel[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2023，54(7)：880-888.(in Chinese))

[7] 温森，孔庆梅. 隧洞塌方引起的TBM刀盘被卡事故风险评估[J]. 长江科学院院报，2014，31(4)：59-62.（WEN S，KONG Q M. Risk assessment on the accident of TBM cutterhead jamming caused by tunnel collapse[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute，2014，31(4)：59-62.(in Chinese))

[8] 司景钊，王唤龙，曹贵才，等. 高黎贡山隧道TBM掘进卡机段TSP法物性参数响应特征分析[J]. 隧道建设(中英文)，2021，41(3)：396-401.（SI J Z，WANG H L，CAO G C，et al. Analysis of response characteristics of physical parameters of Tunnel Seismic Prediction Method in TBM-jammed section of Gaoligongshan Tunnel[J]. Tunnel Construction，2021，41(3)：396-401.(in Chinese))

[9] 吴斐，温森，孔庆梅. 节理岩体力学参数对双护盾TBM卡机的影响[J]. 北京交通大学学报，2022，46(1)：105-114.（WU F，WEN S，KONG Q M. Influence of mechanical parameters for jointed rockmasses on double-shield TBM jamming[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2022，46(1)：105-114.(in Chinese))

[10] 黄兴，刘泉声，彭星新，等. 引大济湟工程TBM挤压大变形卡机计算分析与综合防控[J]. 岩土力学，2017，38(10)：2962-2972.（HUANG X，LIU Q S，PENG X X，et al. Analysis and comprehensive prevention-control for TBM jamming induced by squeezing deformation of surrounding rock around water diversion tunnel from Datong river into Huangshui river[J]. Rock and Soil Mechanics，2017，38(10)：2962-2972.(in Chinese))

[11] LIU P，WANG X，LI C，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.

[12] 李志军，王明年，于丽，等. 护盾式TBM施工下穿河流破碎带稳定性分析及变形控制技术[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(11)：4612-4623.（LI Z J，WANG M N，YU L，et al. Deformation and settlement control technology of shield TBM tunnel construction under river fracture zone[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(11)：4612-4623.(in Chinese))

[13] 侯少康，刘耀儒. 双护盾TBM掘进数值仿真及护盾卡机控制因素影响分析[J]. 清华大学学报：自然科学版，2021，61(8)：809-817.（HOU S K，LIU Y R. Numerical simulations of double-shield TBM tunneling for analyzing shield jamming control factors[J]. Journal of Tsinghua University：Science and Technology，2021，61(8)：809-817.(in Chinese))

[14] 程建龙，杨圣奇，李学华，等. 位移释放率对双护盾TBM护盾压力的影响研究[J]. 岩土力学，2016，37(5)：1399-1407，1416.（CHENG J L，YANG S Q，LI X H，et al. Impact of longitudinal displacement profile

relaxation on contract force acted on double shield TBM in squeezing ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1399-1407, 1416. (in Chinese))

[15] 刘泉声，黄兴，刘建平，等. 深部复合地层围岩与TBM的相互作用及安全控制[J]. 煤炭学报，2015，40(6)：1213-1224.（LIU Q S，HUANG X，LIU J P，et al. Interaction and safety control between TBM and deep mixed ground[J]. Journal of China Coal Society，2015，40(6)：1213-1224.（in Chinese））

[16] 王超，乔世范，刘红中. TBM破岩过程的滚刀受力计算模型研究[J]. 工程力学，2021，38(10)：54-63.（WANG C，QIAO S F，LIU H Z. Research on force calculation model of hob in TBM rock breaking process[J]. Engineering Mechanics，2021，38(10)：54-63.（in Chinese））

[17] 张照煌，王鑫鑫，卓兴建，等. TBM不均匀磨损盘形滚刀破岩力研究[J]. 力学学报，2025，57(5)：1188-1201.（ZHANG Z H，WANG X X，ZHUO X J，et al. Study on the rock-breaking forces of TBM disc cutters with uneven wear[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics，2025，57(5)：1188-1201.（in Chinese））

[18] 孙浩凯，高阳，朱光轩，等. 隧道掘进机滚刀破岩动态荷载理论模型及试验研究[J]. 岩土力学，2023，44(6)：1657-1670.（SUN H K，GAO Y，ZHU G X，et al. Theoretical and experimental study of tunnel boring machine dynamic cutting force[J]. Rock and Soil Mechanics，2023，44(6)：1657-1670.（in Chinese））

[19] 刘琪，张传健，颜天佑，等. 敞开式TBM穿越断层破碎带时岩-机作用分析——以滇中引水工程香炉山隧洞为例[J]. 人民长江，2021，52(10)：165-175.（LIU Q，ZHANG C J，YAN T Y，et al. Analysis on interaction between rock and opened TBM during excavation in fault fracture zone：case of Xianglushan tunnel in central Yunnan water diversion project[J]. Yangtze River，2021，52(10)：165-175.（in Chinese））

[20] 袁帅，冯德旺，张森豪，等. 考虑水力参数空间变异性的盾构隧道开挖面稳定性分析[J]. 岩土力学，2022，43(11)：3153-3162.（YUAN S，FENG D W，ZHANG S H，et al. Stability analysis of shield tunnel face considering spatial variability of hydraulic parameters[J]. Rock and Soil Mechanics，2022，43(11)：3153-3162.（in Chinese））

[21] BIENIAWSKI Z T. Determining rock mass deformability：experience from case histories[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts，1978，15(5)：237-247.

[22] BARTON N. Some new Q value correlations to assist in site characterisation and tunnel design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2002，39(2)：185-216.

[23] MARIONS V，MARINOS P，HOEK E. The geological strength index：Applications and limitations[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2005，64(1)：55-65.

[24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水利水电工程地质勘察规范：GB 50487—2008[S]. 北京：中国计划出版社，2009.（Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for engineering geological investigation of water resources and hydropower：GB 50487—2008[S]. Beijing：China Planning Press，2009.（in Chinese））

[25] 中华人民共和国水利部. 引调水线路工程地质勘察规范：SL 629—2014[S]. 北京：中国水利水电出版社，2014.（Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for engineering geological investigation of water diversion route：SL 629—2014[S]. Beijing：China Water & Power Press，2014.（in Chinese））

[26] 裴启涛，李海波，刘亚群，等. 复杂地质条件下坝区初始地应力场二次反演分析[J]. 岩石力学与工程学报，2014，33(S1)：2779-2785.（PEI Q T，LI H B，LIU Y Q，et al. Two-stage back analysis of initial geostress field of dam areas under complex geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2014，33(S1)：2779-2785.（in Chinese））

[27] 李仲奎，戴荣，姜逸明. FLAC3D分析中的初始应力场生成及在大型地下洞室群计算中的应用[J]. 岩石力学与工程学报，2002(S2)：2387-2392.（LI Z K，DAI R，JIANG Y M. Improvement of the generation of the initial stress field by using FLAC3D and application in a huge underground cavern group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2002(S2)：2387-2392.（in Chinese））

[28] HOEK E. Tunnels in bad rock[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering，2001，127(9)：726-740.

Formulation and validation of a risk graded prediction method for TBM cutterhead jamming

CHEN Tiannan, LIU Lipeng, WANG Xiaogang, LIU Heyi, LI Peiru

(*State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*)

Abstract: To address the challenges of predicting the TBM cutterhead jamming risk during tunneling through fault zones, a TBM engineering database was compiled and analyzed. A risk prediction diagram for cutterhead jamming was developed by correlating the maximum tunnel face deformation with the TBM's maximum driving torque. A predictive model for tunnel face deformation was established based on the ratio of rock strength to in-situ stress. By integrating this model with the risk diagram, a comprehensive method for assessing cutterhead jamming risk was formulated and validated using data from three TBM projects in China. The results demonstrate that: (1) the proposed risk diagram classifies jamming potential into five distinct levels: extremely high, high, medium, low, and very low. (2) The deformation prediction model reveals a negative exponential relationship between the strength-stress ratio and the tunnel face deformation rate, enabling quantitative deformation estimation based on the model. (3) The risk graded prediction method achieved an overall accuracy of 96% when validated against actual project data, demonstrating its applicability for jamming risk evaluation in TBM tunnel engineering.

Keywords: tunnel engineering; cutterhead jamming; risk assessment; numerical simulation

(责任编辑：韩　昆)

(上接第 558 页)

CLSVOF interface-tracking technique to numerically investigate the air-core vortex phenomena at vertical hydraulic intakes. The interaction between vortex structures and turbulent flow fields during the air-core vortex formation was analyzed using the turbulent kinetic energy transport equation and proper orthogonal decomposition (POD) method. The results indicate that the evolution of the air-core vortex in vertical hydraulic intakes can be categorized into three distinct stages: V-shaped surface swirl, surface dimple, and coherent air-core vortex. The turbulent kinetic energy distribution exhibits a strong correlation with vortex dynamics. Analyses of the turbulent kinetic energy transport equation reveal that the interaction between the streamwise and spanwise components of fluctuation velocities and their corresponding velocity gradients drives local turbulent kinetic energy production, while turbulent kinetic energy diffusion provides an essential energy transport pathway for the evolution of random vortices into an air-core vortex. The POD analyses of the fluctuation velocity and vorticity fields reveal that the first two modes of the fluctuation fields exhibit a pair of vortices with opposite rotating directions, which causes the strength of the air-core vortex to increase on one side while decreasing on the other, thereby inducing a lateral displacement of the vortex core. The instability characteristics and mechanisms of the air-core vortex revealed in this paper enrich the theoretical understanding of such vortices and provide a basis for vortex control measures and the optimal design of pumping station intake systems.

Keywords: air-core vortex; vertical hydraulic intake; instability characteristics; turbulent kinetic energy; proper orthogonal decomposition

(责任编辑：鲁　婧)