

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.061

复杂地质条件下 TBM 刀盘振动数值模拟及预警研究

王吉康, 索飞

(国网新源集团有限公司, 北京 100052)

摘要:为提高全断面硬岩掘进机(TBM)在复杂地质环境下的使用寿命和安全性,采用数值模拟方法,对 TBM 在 II 类—V 类围岩情况下的振动情况进行分析,并对现场监测数据进行评估。结果表明:正常掘进情况下,筋板是刀盘最薄弱位置,在 II、III、IV、V 类围岩情况下的许用应力分别为 135.3 MPa、121.8 MPa、110.7 MPa 和 101.5 MPa;在 II 类和 III 类围岩情况下,刀盘的等效应力基本接近筋板的许用应力,而在 IV 类和 V 类围岩情况下,刀盘的等效应力则小于筋板的许用应力;刀盘的振动曲线符合正态分布规律,在 II 类和 III 类围岩掘进时,现场监测到的振动范围均超过了对应的振动限值,在 IV 类和 V 类围岩掘进时,现场监测到的振动范围均未超过振动预警限值。在 II 类和 III 类围岩掘进时,应采取合理的应急措施来降低刀盘振动幅度。

关键词:全断面硬岩掘进机;复杂地质;刀盘;振动;正态分布;预警限值

中图分类号:U455.3⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)05-0314-06

Numerical Simulation and Early Warning Research on TBM Cutterhead Vibration under Complex Geological Conditions

WANG Jikang, SUO Fei

(State Grid Xinyuan Group Co., Ltd., Beijing 100052, China)

Abstract: In order to improve the service life and safety of the full face hard rock tunneling machine (TBM) in complex geological environments, numerical simulation methods were used to analyze the vibration of TBM in Class II–V surrounding rock conditions, and on-site monitoring data was evaluated. The results show that under normal excavation conditions, the reinforcement plate is the weakest position of the cutterhead, and the allowable stresses in Class II, III, IV, and V surrounding rocks are 135.3 MPa, 121.8 MPa, 110.7 MPa, and 101.5 MPa, respectively. In the case of Class II and III surrounding rocks, the equivalent stress of the cutterhead is basically close to the allowable stress of the reinforcement plate, while in the case of Class IV and V surrounding rocks, the equivalent stress of the cutterhead is less than the allowable stress of the reinforcement plate. The vibration curve of the cutterhead follows a normal distribution pattern. During excavation of Class II and III surrounding rocks, the vibration ranges monitored on site, both of which exceeding the corresponding vibration limits, and during excavation of Class IV and V surrounding rocks, the vibration ranges monitored on site, both of which did not exceed the vibration warning limits. Therefore, reasonable emergency measures should be taken to reduce the vibration amplitude of the cutterhead during excavation of Class II and III surrounding rocks.

Keywords: full face hard rock excavation machine; complex geology; knife disc; vibration; normal distribution; warning limit

0 引言

全断面硬岩掘进机(TBM)是进行长距离隧洞挖掘最常用的设备之一,其集合了机械、自动化、计算机等多项技术,相比传统钻爆法,具有掘进效率高、安全可靠性强、经济效益好等优势,在现代水利、交通、矿山、市政等工程中被广泛应用^[1]。TBM 的掘进主要依靠冲击荷载带动滚刀进行挤压破碎,刀盘作为 TBM 的核心部件,滚刀

在破岩过程中主要受垂直力、滚动力以及侧向力的共同作用,极易引发刀盘发生剧烈振动,尤其是在大埋深、多岩层等复杂地质环境中,受刀盘振动影响,经常出现刀盘面板开裂、齿轮齿部和连接螺栓断裂、主梁焊缝开裂等工程事故,刀盘的使用寿命将大打折扣,这将导致 TBM 的稳定性和安全性无法得到有效保障^[2]。

当前,振动监测已成为 TBM 施工的一个关键环节,振动参数已成为设备安全运行的一个重要

基金项目:国网新源集团有限公司科技项目(SGXYKJ-2022-091)

第一作者简介:王吉康(1982—),男,山东梁山人,高级工程师,本科,研究方向为安全监督管理,mei08641975649@163.com。

考核指标^[3-4]。张照煌等^[5]采用 ABAQUS 软件,对不同刀盘前、后板厚度及其间距下的振动特性进行了研究,证实了掘进施工中刀盘大轴承过早失效的可能原因为刀盘振动过大。杨亚磊、焦露琳、王滨等^[6-8]针对不同的地质情况,开展了 TBM 刀盘振动情况的研究,分析了地质参数大小对振动的影响。杨峰等^[9]通过搭建加速度数据远程采集平台,获得了不同围岩等级下主要掘进参数的分布范围。叶尔肯·扎木提等^[10]通过有限元与动力学仿真,研究了正常掘进工况下的 TBM 刀盘振动加速度变化规律。

以上研究加深了对于 TBM 刀盘在不同地质围岩情况下振动变化情况的了解,但是缺少将理论与实际有效结合的研究结果。本文首先采用数值模拟方式,结合现场地质监测数据,对 II 类—V 类围岩情况下 TBM 刀盘振动进行了分析,然后再通过现场振动监测数据来实现应急预警,从而实现对于 TBM 刀盘在复杂地质环境中的振动预警。

1 TBM 数据来源

本文数据均来自某供水工程 II 标段引水隧洞工程,隧洞总长 182.5 km,均采用 TBM 施工。TBM 的总长为 200 m,整机质量 1 300 t,其中主机长度为 23.8 m,主机质量为 600 t,刀盘直径为 7.03 m,刀盘驱动功率 2 800 kW,额定转矩 4 410 kNm,脱困转矩 6 620 kNm,转速范围 0~10.9 r/min,总推力大小为 23 562 kN,刀盘包含 8 把中心滚刀、29 把正滚刀和 12 把边滚刀。TBM 在施工过程中,自身携带了多种类型传感器,可对掘进、振动和地质等共计 228 种参数进行实时监测和存储。

引水隧洞沿线地质情况比较复杂,包含泥盆系凝灰质砂岩(II 类围岩)、石炭系安山岩(III 类围岩)、石炭系钙质砂砾岩(IV 类围岩)、炭质粉砂岩(V 类围岩)等多种围岩等级。对不同围岩等级下的主要施工参数进行了统计,如表 1 所示。从表 1 中可知:在不同的围岩等级下,TBM 的施工参数呈现一定的规律性,因此可通过施工参数来对 TBM 的运行情况进行分析。

表 1 不同围岩等级下施工参数统计情况

施工参数	II 类围岩	III 类围岩	IV 类围岩	V 类围岩
推进速度/(mm/min)	70~90	45~75	30~60	30~60
刀盘转速/(r/min)	6.5~7.5	5.0~7.0	3.0~5.5	3.0~5.5
刀盘推力/kN	16 000~17 000	11 000~14 000	7 000~8 000	6 000~8 000
刀盘转矩/kNm	2 200~3 000	1 800~2 500	700~1 000	500~1 600

2 刀盘受力数值模拟分析

2.1 数值模型构建

采用 ABAQUS 软件构建 TBM 刀盘数值模型,如图 1 所示。刀盘受力以正常掘进状态工况进行分析,滚刀模型采用 482.6 mm(19 in) 盘形滚刀。滚刀受力情况较为复杂,但可以对其进行结构简化,并将其视作为一个刀圈,刀圈材质为硬质合金钢,密度 $7\ 800\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.3,弹性模量为 210 GPa,刀盘固定约束位于法兰处。围岩本构模型采用 D-P 弹塑性模型,且假设围岩均为各项同性、连续、均匀的岩体,并将其简化为具有一定厚度的圆弧形岩石,不同围岩等级下岩体材料参数如表 2 所示。为了缩短模拟计算所用的时间,采用 mesh 模块的局部细化功能对岩石模型进行网格划分,首先将岩石拆分为上、下两个结构,然后将与滚刀接触的岩石上面区域进行渐变式布种,

对直接接触的下半部分进行细化处理,单元格采用 C3D8R,共生成 340 130 个单元网格。

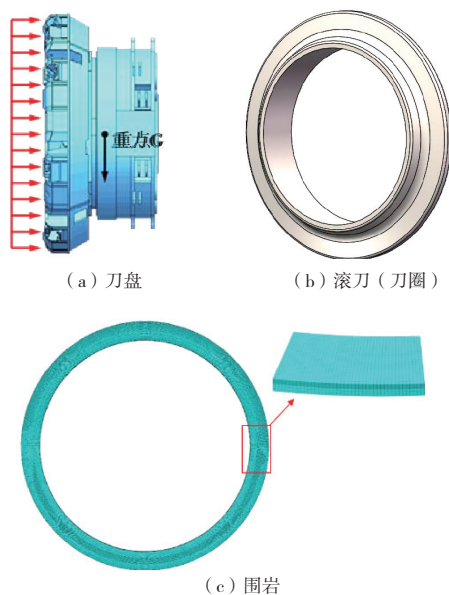


图 1 有限元模型

表2 不同围岩等级下岩体材料参数

围岩等级	抗压强度/MPa	密度/(g/cm ³)	弹性模量/GPa	泊松比	摩擦角/(°)
Ⅱ类	100~170	2.6~2.8	18~20	0.20~0.25	50~60
Ⅲ类	60~113	2.6~2.8	10~12	0.25~0.30	38~50
Ⅳ类	30~80	2.4~2.7	8~10	0.30	27~38
V类	10~65	2.1~2.4	2	0.35	<27

在模拟过程中,滚刀为主动面,岩石为从动面,两者法向接触部分选择“硬接触”,并允许两者在接触后可以分离,两者切向接触部分采用惩罚函数摩擦公式(摩擦因数为0.3的有限滑移)^[11]。在Ⅱ类—V类围岩下,贯入度分别取值为11.6 mm/r、10.5 mm/r、9.1 mm/r和8.8 mm/r,转速分别取值为6.8 r/min、5.7 r/min、4.5 r/min、3.8 r/min。岩体的下表面完全固定,滚刀采用铰连接来模拟公转和自转。

2.2 刀盘许用应力

模拟分析得到正常掘进工况下刀盘各部位的静强度结果如表3所示。从表3中可知:刀盘过渡弧板的安全系数最大,达到19.78,其次为前面板,安全系数为10.87,刀盘筋板和刀盘法兰处的安全系数相对较小,安全系数仅为2.72和3.65。从模拟结果来看,刀盘筋板部位为整个刀盘最薄弱的位置,因此在计算刀盘许用应力时,应以刀盘筋板位置的安全系数进行分析。

表3 刀盘各部位静强度分析

部位	板厚/mm	许用应力/MPa	最大应力/MPa	安全系数
刀盘法兰	185	550	150.5	3.65
前面板	90	275	25.3	10.87
中面板	90	275	69.3	3.97
后面板	90	275	52.4	5.25
筋板	70	275	101.2	2.72
过渡弧板	60	275	13.9	19.78

围岩类别对于TBM的施工具有重要影响,在不同的围岩类别下,其稳定性是不同的,而且围岩也不是一层不变的,具有复杂多变性。以V类围岩BQ值为基准,计算得到Ⅱ类—V类围岩的不稳定性修正系数为0.750、0.833、0.917和1.000。结合刀盘筋板静强度安全系数与围岩稳定性安全系数,可以得到筋板在正常掘进工况下的瞬态动力学安全系数值和许用应力,如图2所示。从

图2中可知:随着围岩情况逐渐变差,刀盘筋板许用应力呈逐渐降低的变化趋势,Ⅱ类—V类围岩下,许用应力分别为135.3 MPa、121.8 MPa、110.7 MPa和101.5 MPa。

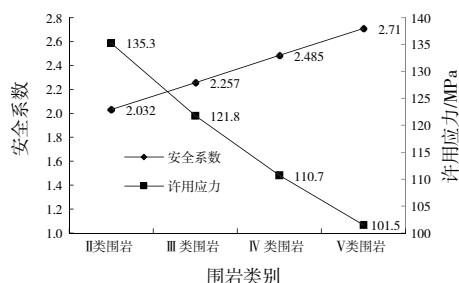


图2 刀盘筋板在不同围岩类别下的安全系数和许用应力

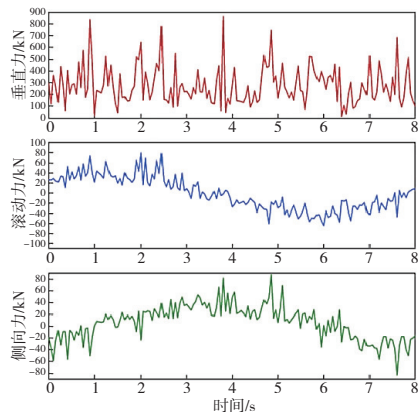
2.3 滚刀三向受力情况

取Ⅱ类围岩135 MPa、Ⅲ类围岩113 MPa、Ⅳ类围岩80 MPa以及V类围岩65 MPa的极限情况进行滚刀三向受力分析,得到三向应力-时程曲线,结果如图3所示。从图3中可知:无论在哪一种围岩情况下,滚刀所受的垂直力荷载(轴向荷载)均是最大的,滚动力和侧向力相差不是很大,且远小于垂直力荷载,故主要对垂直力荷载进行分析。在Ⅱ类围岩情况下,滚刀所受的平均垂直力为295.5 kN,最大值为885 kN;在Ⅲ类围岩情况下,滚刀所受的平均垂直力为175.1 kN,最大值为710 kN;在Ⅳ类围岩情况下,滚刀所受的平均垂直力为114.6 kN,最大值为324.9 kN;在V类围岩情况下,滚刀所受的平均垂直力为57.4 kN,最大值为181.2 kN。通过受力分析可知,围岩情况越好,滚刀受力越大,受力波动幅度也越大。

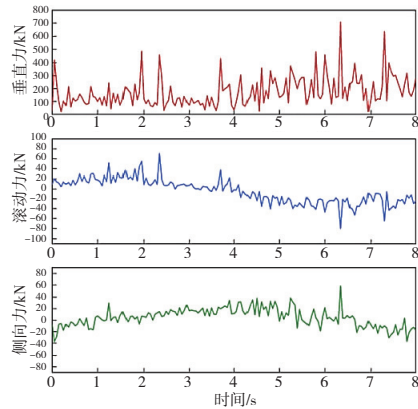
2.4 等效应力

将上一小节分析得到的不同围岩情况下的滚刀受力情况作为刀盘外激励,并考虑刀盘自身重力的影响,对刀盘进行瞬态动力学分析,得到等效应力-时程曲线,如图4所示。从图4中可知:在Ⅱ类围岩情况下,刀盘等效应力变化幅度较大,在30~350 MPa间跳跃,平均等效应力值为134.8

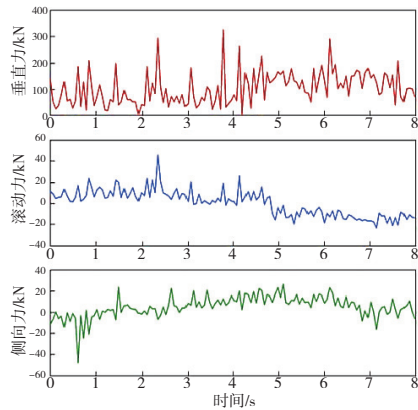
MPa;在Ⅲ类围岩情况下,刀盘等效应力变化幅度有所减小,在50~300 MPa间跳跃,平均等效应力值为120.5 MPa;在Ⅳ类围岩情况下,刀盘等效应力变化幅度进一步减小,大部分时间内均在150 MPa以内跳跃,平均等效应力值为58 MPa;在Ⅴ类围岩情况下,刀盘等效应力降至60 MPa以内,平均等效应力值仅为32 MPa。围岩情况越差,刀盘所受的等效应力越小,应力变化幅度越小,在Ⅱ类和Ⅲ类围岩情况下,刀盘的等效应力会基本达到筋板的许用应力,而在Ⅳ类和Ⅴ类围岩情况下时,未达到刀盘筋板的许用应力。



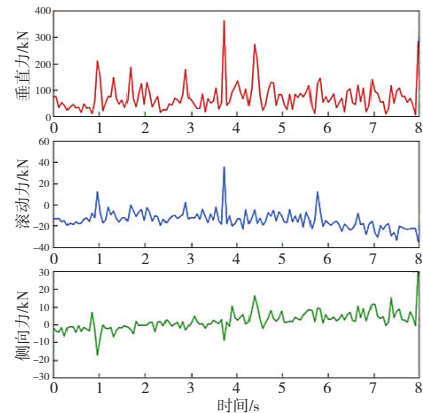
(a) Ⅱ类围岩 (135 MPa)



(b) Ⅲ类围岩 (113 MPa)

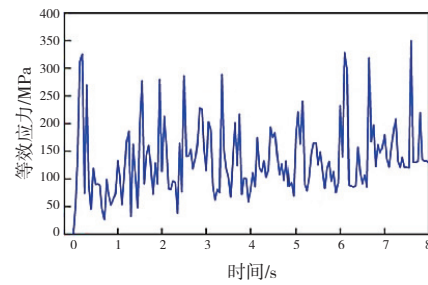


(c) Ⅳ类围岩 (80 MPa)

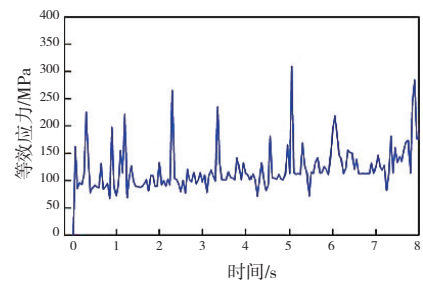


(d) Ⅴ类围岩 (65 MPa)

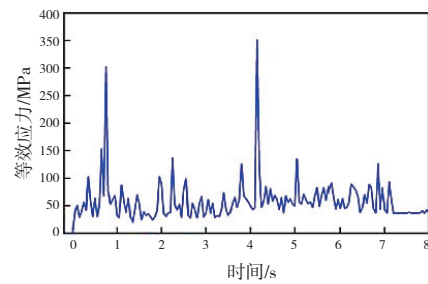
图3 不同围岩情况下滚刀三向受力



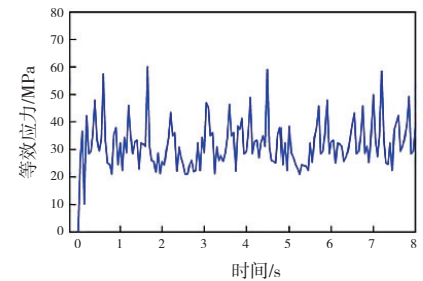
(a) Ⅱ类围岩 (135 MPa)



(b) Ⅲ类围岩 (113 MPa)



(c) Ⅳ类围岩 (80 MPa)



(d) Ⅴ类围岩 (65 MPa)

图4 不同围岩情况下刀盘等效应力-时程曲线

3 刀盘振动预警分析

3.1 轴向振动曲线

从上文分析可知:在Ⅱ类(135 MPa)和Ⅲ类(113 MPa)围岩情况下,刀盘的等效力会基本达到筋板的许用应力,因此取极限情况进行振动分析;在Ⅳ类(80 MPa)和Ⅴ类(65 MPa)时,虽然没有达到许用应力,但是振动与围岩硬度有关,因此可以取在对应围岩类别下的最硬围岩参数进行振动限值分析,即Ⅳ类(80 MPa)、Ⅴ类(65 MPa),得到4种围岩情况下刀盘轴向振动曲线,如图5所示。从图5中可知,随着围岩情况越来越差,刀盘的振动加速度变化幅度越来越小,TBM逐渐向稳定方向发展。

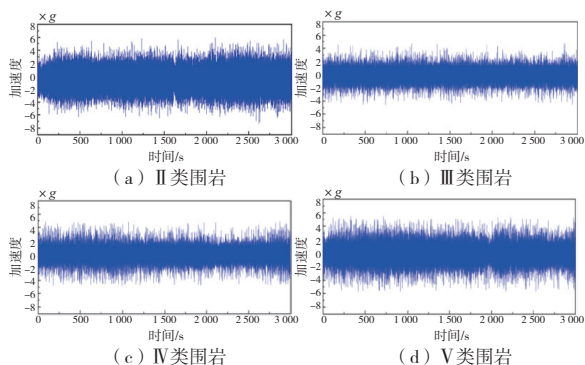


图5 不同围岩情况下刀盘轴向振动曲线

3.2 振动预警分析

对4种围岩情况下的轴向振动分布情况进行分析,结果如图6所示。从图6中可知,刀盘的轴向振动数据服从正态分布特征,围岩情况越糟糕,加速度越向 $0g$ 集中,正态分布曲线表现越“纤瘦”。对4种正态分布曲线进行特征参数提取,得到不同围岩等级下刀盘的振动限值,并与现场实际监测值进行比较,结果如表4所示。从表4中可知:在Ⅱ类围岩情况下,刀盘的振动预警限值为 $\pm 4.5g$,而实测值达到 $\pm 8.0g$,可见,在Ⅱ类围岩情况下,刀盘的振动是超限的,而且超出接近1倍的幅度,应引起格外重视,需要采取应急预防措施;在Ⅲ类围岩情况下,刀盘的振动预警值为 $\pm 4.0g$,而实测值达到 $\pm 5.5g$,因此,在Ⅲ类围岩情况下,刀盘的振动也是超限的,TBM在Ⅲ类围岩掘进时,也应该采取应急防振措施以保护刀盘结构;在Ⅳ类和Ⅴ类围岩情况下,现场实测振动值均在振动预警值范围内,故没有超限。

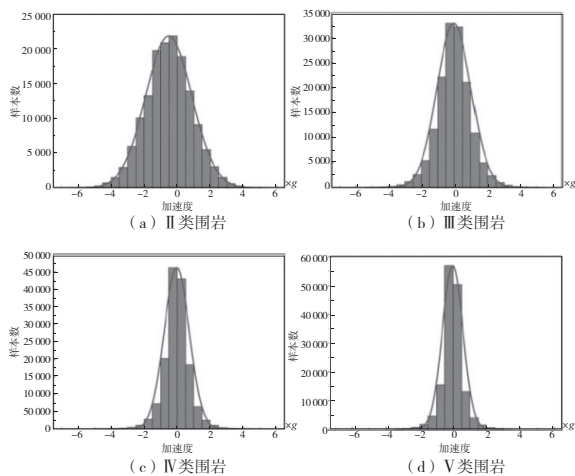


图6 不同围岩情况下刀盘振动分布统计

表4 刀盘振动预警值

围岩类别	振动预警值/($\times g$)	现场实测值/($\times g$)
Ⅱ类	± 4.5	± 8.0
Ⅲ类	± 4.0	± 5.5
Ⅳ类	± 3.0	± 3.0
Ⅴ类	± 2.0	± 2.5

3.3 振动超限预警系统构建与应用

基于数值模拟分析和现场监测结果,构建振动预警系统,如图7所示。系统整体上由登录注册模块、工程信息管理、历史数据导入、施工报数据预处理、数据查询分析、刀盘振动预警6大模块构成。系统植入了DNN算法对围岩等级进行实时预测,然后与实测数据进行对比,从而实现超限预警。自系统应用之后,TBM刀盘的使用寿命得到有效提升,且未出现过重大安全事故,取得了较好的应用效果。



图7 振动超限预警系统结构

4 结语

本文采用数值模拟方式,对TBM刀盘在不同围岩情况下的振动情况进行分析,得出如下结论:

1) TBM 刀盘最薄弱位置位于筋板处,在Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类围岩下的许用应力分别为135.3 MPa、121.8 MPa、110.7 MPa 和 101.5 MPa;

2) 刀盘滚刀受到的垂直力荷载(轴向荷载)最大,围岩情况越好,滚刀受力越大,受力波动幅度也越大;在Ⅱ类和Ⅲ类围岩情况下,刀盘的等效应力会基本达到筋板的许用应力,而在Ⅳ类和Ⅴ类围岩情况下,刀盘的等效应力则不会达到刀盘筋板的许用应力;

3) 在正常掘进状态下,TBM 刀盘的振动曲线符合正态分布规律,分析得到在Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类围岩下的振动限值分别为 $\pm 4.5g$ 、 $\pm 4.0g$ 、 $\pm 3.0g$ 和 $\pm 2.0g$;在现场实际施工时,Ⅱ类和Ⅲ类围岩掘进时超过了振动预警限值,Ⅳ类和Ⅴ类围岩掘进时未超过振动预警限值。

参考文献:

- [1] 谭忠盛,邓铭江. 超特长隧洞 TBM 智能辅助掘进技术研究及应用[J]. 隧道建设(中英文),2024,44(3): 442-463.
- [2] 李坚,何雪滋,谢里阳. 复合岩层 TBM 刀盘外部载荷的确定[J]. 机械设计与制造,2022(2):52类 56,61.
- [3] 骆骏德,张兰. TBM 关键部件振动数据监测系统设计与研究[J]. 北华航天工业学院学报,2020,30(6): 7-9.
- [4] 刘东鑫,肖禹航,周小雄,等. TBM 破岩刀盘振动表征参数研究[J]. 现代隧道技术,2023,60(4):153-162.
- [5] 张照煌,宋纯宁,李振. 多点激励下 TBM 刀盘振动特性分析[J]. 矿山机械,2020,48(2):1-11.
- [6] 杨亚磊,杜立杰,李青蔚,等. 不同围岩与掘进参数下的 TBM 主梁振动特性[J]. 振动与冲击,2023,42(12):88-97.
- [7] 焦露琳,杨振兴,赵小龙. 基于实测试验数据的软硬复合地层下刀盘振动特征研究[J]. 施工技术,2021,50(5):112-116.
- [8] 王滨,李尧. 不同间距和倾角的岩石节理对 TBM 滚刀破岩的影响[J]. 科学技术与工程,2022,22(29): 13066-13074.
- [9] 杨峰,许陪玉,张恒,等. 基于振动实测的 TBM 施工数据分析[J]. 机械工程与自动化,2022(6):4-6.
- [10] 叶尔肯·扎木提,杨峰,许陪玉,等. 基于正常掘进工况下的 TBM 刀盘振动限值研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2022(6):159-163.
- [11] 倪寿勇,刘杰,陈勇,等. 硬旋铣刀具振动的在线监测研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(6):29-31.

收稿日期:2024-05-30