DOI: 10.3901/JME.2018.01.027

基于裂纹失效区域划分的TBM刀盘裂纹位置预估及分析*

孙伟 朱晔 霍军周 黄晓琦

(大连理工大学机械学院 大连 116024)

摘要: 裂纹是造成TBM刀盘失效的主要原因,由于TBM刀盘本身体积庞大,受力情况复杂等原因,导致TBM刀盘不同部位的裂纹扩展情况不同,加上无法准确预估裂纹的位置,进而无法准确地计算TBM刀盘疲劳寿命。针对这种情况本文提出一套基于TBM刀盘裂纹失效区域划分的TBM刀盘裂纹位置预估与分析方法。结合受力及结构形式的不同划分刀盘易发生裂纹的危险区域,根据实际掘进情况,将TBM刀盘掘进过程分为四种工况,分析总结各个工况下TBM刀盘的应力分布,结合裂纹失效统计结果,预估TBM刀盘裂纹位置,根据裂纹失效区域划分的结果统计预估裂纹位置所在区域,以此作为依据分析计算TBM刀盘疲劳寿命裂纹所需参数,以吉林引淞TBM刀盘为例,刀盘易发生裂纹的部位可划分为10个区域,根据计算显示中心块面板、支撑筋与面板连接处、中心刀、边滚刀刀座焊接处、出渣槽等位置为裂纹易出现的位置,结合分区结果计算各区域应力幅值,为后期计算TBM刀盘疲劳寿命奠定基础。

关键词: TBM刀盘;刀盘分区;裂纹位置;掘进工况;应力集中;裂纹失效分析

中图分类号: TH113

Predict and Analysis the Locations of Fatigue Crack in TBM Cutterhead Based on Crack Failure Regions Division

SUN Wei ZHU Ye HUO Junzhou HUANG Xiaoqi

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Cracks are the main cause of TBM cutter failure. As TBM cutter itself bulky, poor working conditions, the complex force function etc., the location of the cracks cannot be predicted accurately, in addition the the fatigue life of TBM cutter also do not be calculated accurately. For dealing with this problem, a method of predicting the crack position of TBM cutterhead based on crack failure regions division is proposed. The dangerous area was divided on the basis of the different stress and structure. Based on the facts, the excavation process is divided into four conditions, analyzed and summarized the stress distribution of TBM cutter in various of working conditions, combined with failure statistics and analysis of the previous crack, the cracks location can be estimated. Statistics the area which crack location belong to area based on the results of crack failure division, as a basis for analysis of crack parameters needed for TBM cutter head fatigue life. Taking the TBM cutterhead of Yin Song Jilin as an example, 10 areas has been divided according to crack-resistance, the forecast results of cracks location including the central block panel, connections between support bars and panel, the center cutter, edge hob knife welding, slag slot. calculated the regional stress amplitude combined with regions division. It's the prerequisite for calculating the fatigue life of TBM cutter.

Key words: TBM cutterhead; regions division; crack location; driving condition; stress concentration; crack failure analysis

0 前言

全断面岩石掘进机(Tunnel boring machine, TBM)是一种专门用于开挖地下通道工程的大型工程机械,它具有开挖快、安全、经济、降低劳动强度的优点。随着铁路交通的大力发展,对全断面岩

石掘进机的需求也与日俱增。刀盘是TBM的心脏,主要有破岩、稳定掌子面等功能,是影响掘进性能及效率的关键部件^[1]。由于复杂恶劣地质环境及施工参数的多变性,刀盘的风险事故率占到TBM总体风险事故的一半以上,这些事故使TBM开挖效率和刀盘使用寿命大大降低^[2-3]。由于TBM在工作中不能倒退的原因,若刀盘没有满足预定的工作时间和施工长度会产生严重的后果,破坏前盘体表面出现裂纹,在变载荷的作用下裂纹一直扩展直至断裂,刀盘盘体等现象,因此对TBM刀盘裂纹的研

* 国家重点基础研究发展计划(973计划, 2013CB035400)、国家自然科学基金(51375001)、辽宁省科技攻关课题(2015106016)和辽宁省优秀人才培养课题(LJQ2014005, LJQ2014075)资助项目。20170302 收到初稿, 20170602 收到修改稿

究非常重要,准确的预估裂纹发生的位置是准确计算裂纹扩展、预估剩余寿命的前提条件,对提高 TBM 刀盘疲劳强度、准确预估 TBM 刀盘裂纹扩展寿命提供了重要的理论价值和实际意义。

长期以来,国内外专家学者对 TBM 刀盘强度及刀盘寿命进行了大量的研究工作,孙伟等^[4-5]建立了 TBM 刀盘动力学方程得到刀盘工作是动态响应,并分析了复杂应力状态下 TBM 刀盘的应力强度因子的变化规律,基于雨流计数法计算 TBM 刀盘疲劳寿命;霍军周等^[6-7]研究了刀盘的振动特性,基于刀盘动力学模型对影响 TBM 刀盘振动的参数进行了分析;朱冬等^[8-9]利用短时间尺度计算了焊接裂纹扩展时间。SAMUEL 等^[10]对 4.1 m 的罗宾斯刀盘进行现场载荷测试,研究滚刀载荷变化规律,并与其设备性能参数比较;ZHANG 等^[11]在硬岩实验室对 1.75 m 的 TBM 刀盘滚刀载荷进行测试,考虑滚刀三向力耦合的基础上,提出滚刀载荷测量的数学处理方法,统计滚刀三向载荷分布规律;ROSTAMI 等^[12]对影响刀盘性能的不同因素进行分析,研究硬岩刀盘系统设计方法,从滚刀布置的角度评价刀盘的承载平衡性能;蔡宗熙等^[13-14]推导新的刀盘比能计算模型,评价盾构机的能耗性能指标,并对工程实测数据进行回归分析,确定不同工况下的切削深度的最佳范围;夏毅敏等^[15-16]采用离散元方法研究围岩特性、刀间距对刀盘性能的影响,并与滚刀切削试验进行对比;张魁等^[17]研究了不同工况下岩石的破碎形式及破碎规律,归纳破碎模式与具体工况的破碎关系;蒲毅等^[18]提出确定刀具数量的磨损系数法和掘进系数法;针对具体施工问题,可预测盾构在开挖区间,刀具的磨损量以及许用磨损情况下刀具的掘进距离,为保障工程的安全顺利进行提供参考;郭伟等^[19]分析获得给定地质条件下相同开口率不同开口分布特征的刀盘前后渣土的压力分布规律,以及刀盘开口分布特征对盾构机刀盘开挖渣土流动性能的影响作用关系,并通过回归分析,得到刀盘开口分布特征与刀盘前后渣土压力之间的映射关系。同时许多学者采用试验或者仿真的方法研究大型设备的疲劳强度。

综上所述,国内外学者主要采用现场测试、滚刀破岩机理,刀盘振动特性,掘进载荷及滚刀平面布局等问题进行研究,而关于 TBM 刀盘结构裂纹扩展寿命的报道不多,而且忽略了 TBM 刀盘位置对预测裂纹的重要性,现在没有提出预测 TBM 刀盘裂纹位置的方法。针对以上问题本文提出一套基于裂纹失效区域划分预估 TBM 刀盘裂纹位置的方法,在此基础上分析该区域在计算疲劳寿命时所需的参数。

1 TBM 刀盘裂纹位置预估与分析

对 TBM 刀盘裂纹位置的预估与分析是计算 TBM 刀盘疲劳寿命的前提条件,然而由于 TBM 刀盘结构复杂、工作环境恶劣,导致不同位置裂纹的扩展情况不同,而且给裂纹预估带来了很大的难度,针对这种情况本文提出一套基于 TBM 刀盘裂纹失效区域划分的 TBM 刀盘裂纹位置预估与分析方法。根据疲劳裂纹的特点将 TBM 刀盘进行区域划分,在此基础上预估 TBM 刀盘裂纹位置,从而确定裂纹所属区域,根据裂纹所在区域分析、计算用于计算疲劳寿命的参数,具体流程如图 1 所示。

图 1 TBM 刀盘裂纹位置预估与分析流程图

1.1 刀盘裂纹失效危险区域划分

TBM 刀盘服役中产生大量的裂纹,然而由于 TBM 刀盘体积庞大导致不同部位裂纹的扩展情况不同,所以将 TBM 刀盘进行裂纹危险区域划分,进而将不同部位的裂纹区别对待,TBM 刀盘裂纹区域划分方法的具体内容在文献[20]中介绍,具体流程如图 2 所示。

图 2 刀盘裂纹失效危险区域划分具体流程

1.2 TBM 刀盘裂纹位置预估

预估 TBM 刀盘裂纹位置是准确计算 TBM 刀盘疲劳裂纹的前提,如何准确、全面地预测 TBM 刀盘裂纹位置是计算疲劳寿命的关键,本文结合以往服役后 TBM 刀盘裂纹失效数据与多个工况下刀盘应力集中情况,综合预测刀盘裂纹位置具体流程如

图 3 所示。

图 3 TBM 刀盘裂纹位置预测流程图

1.3 TBM 刀盘受力情况分析

大量的疲劳破坏事故和试验结构都表明^[21-22], 疲劳源总是出现在应力集中处。TBM 刀盘的应力是造成裂纹出现一个非常重要的原因, 因此分析刀盘的受力情况是准确预测 TBM 刀盘裂纹位置的最关键因素。

1.3.1 完整隧道下 TBM 刀盘工况分类

根据 TBM 施工特点与实际地质情况, TBM 刀盘施工中的典型工况可定义为最大推力、纠偏、脱困与正常运行四种工况, 前三种工况主要考察刀盘在极限工作情况下的受力情况, 如图 4 所示, 其中 F_V 为最大推力, G 为刀盘重力, b 为重力扭矩, F_K 为转弯或纠偏时的推力, F_C 为脱困时刀盘推力, r 为刀盘半径, T_1 为最大推力时的扭矩, T_2 为纠偏时的扭矩, T_3 为刀盘脱困扭矩。主要以静力学分析为主, 第四种工况考察刀盘在正常掘进中的受力情况, 主要以动力学分析为主。

1.3.2 加载工况与约束条件

(1) 最大推力工况: TBM 在均匀地质情况下沿直线掘进时, 为了考察 TBM 刀盘在最大推力情况下的应力分布, 每把滚刀都加载滚刀极限载荷(300 kN 垂向力、30 kN 侧向力、45 kN 滚动力), 而法兰受到约束。

(2) 转弯纠偏工况: 当 TBM 转弯或纠偏时, 刀盘盘面与掘进面成一定角度, 此时只有刀盘一边边侧的滚刀受力, 约束施加在刀盘法兰处。

(3) 脱困工况: TBM 掘进时可能遇到孤石或边刀卡死等情况, 此时必须提高刀盘扭矩, 这时刀盘只有一边边侧滚刀受力, 而且盘体添加脱困扭矩,

(a) 最大推力工况

(b) 转弯纠偏工况

(c) 脱困工况

图 4 各载荷工况下刀盘系统的受力简图

约束施加在刀盘法兰处。

(4) 正常运行工况: 由于 TBM 刀盘工作环境复杂刀盘受强冲击载荷的特点, 仅开展静力学分析无法全面了解刀盘的实际承载及其与应力、变形的实际情况。因此, 本章利用滚刀破碎岩石时所受冲击载荷作为瞬态载荷输入, 同时考察轴向力、径向力及扭矩瞬态变化对刀盘结构应力及振动位移随时间的变化情况。

1.3.3 TBM 刀盘滚刀破岩载荷

TBM 滚刀与岩石之间的接触力学行为复杂, Ls-Dyna 软件可以在其丰富的材料库中为岩石选择能够描述其力学特征的材料本构, 并且准确地描述滚刀与岩石之间的接触行为^[23]。

TBM 刀盘瞬态分析时确定准确的外部激励载荷时计算的关键, 基于 LS-DYNA 程序建立典型地质条件下滚刀群三维仿真模型, 深入分析盘形滚刀与岩石

相互作用机理,参考工程实测载荷谱^[10-11]修正滚刀群动态载荷历程,最终根据滚刀布置合成 TBM 刀盘系统载荷谱,为其系统动力学模型提供外部激励(图 5)。

图 5 TBM 刀盘外部激励载荷计算流程

1.4 TBM 刀盘裂纹失效数据采集与统计

TBM 工作环境恶劣,单一从应力集中的角度预估 TBM 刀盘裂纹位置不够全面,因此曾多次前往施工现场及 TBM 维修工厂对以往服役后 TBM 刀盘进行裂纹失效数据采集,如图 6 所示,并分析 TBM 刀盘裂纹产生原因。

采取多种方法对裂纹进行测量、评估、统计,如图 7 所示,并搜集裂纹样本进行断口分析,分析

裂纹产生的原因及裂纹源的位置,如图 8 所示。

(a) 辽西北引水罗宾斯 TBM 刀盘裂纹失效统计

(b) 中天山隧道 TBM 刀盘裂纹失效统计

(c) 辽西北引水维尔特 TBM 刀盘裂纹失效统计

图 6 TBM 刀盘失效数据统计

(a) 直接观察法

(b) 裂纹测深仪

(c) 相控阵测试裂纹

图 7 裂纹测试方法

根据以上 TBM 刀盘裂纹失效数据的采集、统计、分析,将 TBM 刀盘易发生裂纹失效的部位及造成裂纹的原因进行汇总,具体结果如表 1 所示。

可以看出根据对裂纹的统计及分析,大部分裂纹主要由于应力集中造成,但是由于 TBM 刀工作环境恶劣,也有本身缺陷和磨损造成的裂纹开裂,在计算疲劳寿命时不能忽视。本文通过对以往的 TBM 刀盘裂纹工程数据采集统计的结果结合刀盘有限元应力分析,综合确定 TBM 刀盘的裂纹萌生位置。

表 1 裂纹失效数据统计结果

主要发生地带	形成裂纹主要原因	已经或可能导致的后果
刀座焊接处	焊缝焊接缺陷/应力集中	刀具变形和刀具脱落
底部隔板	应力集中	隔板变形/隔板失效
支撑隔板	应力集中	隔板变形/隔板失效
刀孔外侧	焊缝焊接缺陷/应力集中	刀具脱落
出渣槽	磨损严重	出渣槽失效
刀座	应力集中	刀座脱落/刀具失效
刀孔外侧	应力集中	刀具脱落/刀座变形
分体结合处	焊缝缺陷	刀盘变形/刀盘失效
中心面板	应力集中	刀盘面板变形

图 8 TBM 刀盘裂纹断口失效分析

2 工程实例

本文以吉林引淞中方五分式 TBM 刀盘为例，刀盘的结构模型如图 9 所示。

图 9 中方五分式 TBM 刀盘示意图

2.1 TBM 刀盘裂纹失效危险区域划分

结合以往刀盘裂纹失效的数据，根据 TBM 刀盘本身的结构和刀盘各个部位应力的特点将 TBM 刀盘进行危险区域划分，具体过程见文献[20]，结果如表 2 所示。

表 2 TBM 刀盘裂纹危险区域划分

区域编号	区域名称	区域编号	区域名称
区域 1	分体结合处裂纹	区域 6	边缘体刀孔外侧裂纹
区域 2	支撑筋板与面板焊接处裂纹	区域 7	中心块刀孔外侧裂纹
区域 3	支撑筋裂纹	区域 8	边缘体刀座焊接处裂纹
区域 4	中心块面板裂纹	区域 9	中心块刀座焊接处裂纹
区域 5	边缘体面板裂纹	区域 10	出渣槽焊接处裂纹

2.2 刀盘静力学分析

刀盘前三种工况主要以静力学分析为主，本文基于有限元 Workbench 软件建立刀盘三维模型，依据工况情况施加边界载荷，对刀盘整体及重要组成部件的应力进行分析。

2.2.1 加载与约束条件

根据上述的介绍，结构分析边界条件均采用支撑法兰固定约束，前 3 种工况的刀盘加载与约束条件如图 10 所示，根据吉林引淞 TBM 刀盘的实际情况，各个工况的加载载荷大小如表 3 所示。

表 3 岩石主要物理力学参数

工况	轴向力/kN	径向力/kN	倾覆力矩/(kN·m)	扭矩/(kN·m)
1	14 682	126	1 156	5 763
2	1 444	331	5 002	1 000
3	1 444	2 694	5 002	10 500

2.2.2 计算结果与分析

工况 1 的刀盘应力计算结果如图 11 所示(表 4)，刀盘应力主要集中在刀盘中心刀刀座焊接处、中心块正滚刀刀座焊接处、中心块周边面板、附近、筋板与上面板焊接处，这主要由于刀盘的中心刀没有筋板支撑。

表 4 工况 1 刀盘受力分析结果(MPa)

应力集中区域	应力
中心刀附近面板	66.944
中心块支撑筋与上面板焊接处	51.018
中心刀刀座焊接处	65.967

图 10 TBM 刀盘载荷加载与约束示意图

图 11 工况 1TBM 刀盘应力计算结果

工况 2 的刀盘应力计算结果如图 12 所示(表 5), 刀盘应力重要集中在边缘体边滚刀刀座焊接处、边缘体支撑筋与下面板焊接处, 这主要由于刀盘在纠偏过程中只有一侧边缘体滚刀受力, 刀盘一侧边缘体承受扭矩过大刀盘中心刀刀座焊接处、中心块正滚刀刀座焊接处、中心块周边面板、附近、筋板与上面板焊接处, 这主要由于刀盘的中心刀没有筋板支撑。

图 12 工况 2TBM 刀盘应力计算结果

工况 3 的刀盘应力计算结果如图 13 所示(表 6), 刀盘应力重要集中在边缘体支撑筋本身及支撑筋与

上下面板焊接处, 这主要由于刀盘在脱困过程中只有一侧边缘体滚刀受力, 而且添加了脱困扭矩, 使得支撑筋受力过大。

表 5 工况 2 刀盘受力分析结果(MPa)

应力集中区域	应力
边滚刀刀座焊接处	45.825
边缘体支撑筋板	45.825
边缘体支撑筋板与下面板焊接处	45.825

图 13 工况 3TBM 刀盘应力计算结果

表 6 工况 3 刀盘受力分析结果(MPa)

应力集中区域	最大应力
筋板与面板焊接处	85
筋板本身	73.19

2.3 刀盘瞬态动力学仿真

2.3.1 TBM 刀盘外部激励载荷

刀盘承受滚刀破碎岩石产生的冲击载荷, 因此刀盘系统输入外部激励是否正确将影响刀盘系统响

应的正确性，使用 Ls-Dyna 有限元分析软件对滚刀破岩过程仿真，得到滚刀破岩冲击载荷，具体过程参考文献[5]。根据吉林引淞的地址参数如表 7 所示，的得到滚刀破岩载荷历程如图 14 所示。

2.3.2 瞬态动力学加载与约束

在求得每把滚刀破岩载荷的基础上，由于每把滚刀的安装半径不同，故加载时考虑各个滚刀动态载荷的步长和相位差并对法兰进行约束(图 15)。

表 7 岩石主要物理力学参数

参数	数值
密度/(kg·m ⁻³)	2 750
岩石饱和抗压强度/MPa	93.6
内摩擦角/(°)	33.4
内聚力/MPa	0.9
弹性模量/MPa	18×10 ³
泊松比	0.19
围压/MPa	6~30
埋深/m	130~1 000

图 14 滚刀三向载荷曲线

图 15 加载与约束条件

2.3.3 计算结果与分析

工况 4 的刀盘应力计算结果如图 16 所示，刀盘在时变载荷的动力学分析下应力分布比较均匀。没有出现应力过于集中的现象，但从应力云图中可以发现刀座周边及支撑筋与面板焊接处受力较大，一定程度上有助于 TBM 刀盘产生裂纹。在此列举一个支撑筋的应力历程。

图16 工况4TBM刀盘应力计算结果

2.4 TBM刀盘裂纹位置预测

根据以上刀盘各个工况应力分析结果,结合表1中对以往TBM刀盘裂纹的统计结果,对容易由其他因素造成裂纹的位置加以补充。并根据表2分区的结果统计预测裂纹所在刀盘危险区域。结果如表8所示。

表8 吉林引淞TBM刀盘裂纹位置预估结果

预估裂纹区域	主要原因	所在TBM刀盘区域
中心块面板	应力集中	区域4
支撑隔板	应力集中	区域3
支撑筋与上面板焊接处	应力集中	区域2
中心刀刀座焊接处	应力集中/焊接本身缺陷	区域9
边滚刀刀座焊接处	应力集中/焊接本身缺陷	区域8
出渣槽	磨损严重	区域10
分体结合处	焊接本身缺陷	区域1

将吉林引淞TBM刀盘的裂纹预测结果与施工现场的工作人员提供的刀盘裂纹出现的位置进行对比,对比结果显示吻合度比较好。

2.5 TBM刀盘疲劳寿命所需参数分析

根据表8裂纹所在区域统计的结果,分析该区域计算裂纹时所需参数,应力幅值是计算疲劳寿命的关键因素根据,根据瞬态动力学的计算结果计算所需区域的应力幅值,此外根据TBM刀盘本身材料及TBM刀盘结构尺寸计算各个区域的临界裂纹尺寸,结果如表9所示。

表9 吉林引淞TBM刀盘裂纹扩展寿命预估所需参数

预估裂纹区域	刀盘应力幅值/MPa	临界裂纹尺寸/mm
区域4	29.4	647
区域3	22.9	682
区域2	37.2	608
区域9	41.7	508
区域8	72.1	242
区域10	71.9	239
区域1	52.3	456

3 结论

(1) 通过以往对TBM刀盘裂纹的检测及分析,发现造成裂纹的主要原因为应力集中、焊接本身缺陷以及磨损三个原因,其中以应力集中为主。

(2) 根据刀盘裂纹所属部位结构不同、裂纹受力情况不同,将中方五分式TBM刀盘划分为分体结合处、底部隔板、支撑筋板等10个危险区域。

(3) 以往刀盘检查分析结果表明,刀座焊接处与分体结合处焊缝内部容易出现焊接缺陷,而出渣槽磨损严重,这些因素也容易产生裂纹。

(4) 通过对应力分析结果,吉林引淞TBM刀盘中心块面板、支撑筋与面板连接处、中心刀刀座、边滚刀刀座容易产生应力集中现象。

(5) 结合TBM刀盘分区的结果与裂纹位置的预估,根据裂纹所在区域将裂纹区别对待,将裂纹区别对待,更加精准的预测TBM刀盘裂纹扩展寿命,并分析该区域计算裂纹扩展寿命时所需参数,结合刀盘分区的结果结合TBM刀盘分区结果,计算各个区域应力幅值,区域8和区域10应力幅值较大。

本文提出了TBM刀盘裂纹位置预测方法,基于刀盘裂纹失效区域划分的结果,分析、统计计算疲劳寿命所需的参数,是准确预测裂纹扩展寿命的前提,是设计及工程的重要参数依据,而裂纹形状因子、临界裂纹长度都是计算刀盘疲劳寿命的重要参数,这些问题都需要进一步研究。

参考文献

- [1] 水利部科技推广中心. 全断面岩石掘进机(TBM)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
Promotion Center for Science&Technology Achievements of Ministry of Water Resources. Full face rock tunnel boring machine(TBM)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [2] 齐梦学, 王雁军, 李宏亮. 敞开式掘进机全面整修技术研究与应用[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(4): 64-70.
QI Mengxue, WANG Yangjun, LI Hongliang. Research and application of overall refit of open type TBM[J]. Modern Tunneling Technology, 2009, 46(4): 64-70.
- [3] 李宏亮. TB880E型岩石掘进机刀盘开裂原因分析及修复方法[J]. 工程机械, 2010, 41(3): 62-67.
LI Hongliang. Troubleshooting for cutter disk cracking of model TB880 rock tunneler[J]. Construction Machinery and Equipment, 2010, 41(3): 62-67.
- [4] LING Jingxiu, SUN Wei, HUO Junzhou, et al. Study of TBM cutterhead fatigue crack propagation life based on

- multi-degree of freedom coupling system dynamics[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 83(5): 1-14
- [5] 凌静秀, 孙伟, 杨晓静, 等. 复杂应力状态下 TBM 刀盘裂纹应力强度因子分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(4): 633-639.
- LING Jingxiu, SUN Wei, YANG Xiaojing, et al. Analysis of stress intensity factors for a TBM cutterhead crack in complex stress states[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(4): 633-639.
- [6] HUO Junzhou, WANG Weizheng, SUN Wei, et al. The multi-stage rock fragmentation load prediction model of tunnel boring machine cutter group based on dense core theory[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(1-4): 277-289.
- [7] HUO Junzhou, HOU Nan, SUN Wei, et al. Analyses of dynamic characteristics and structure optimization of tunnel boring machine cutter system with multi-joint surface[J]. Nonlinear Dynamics, 2017, 87(1): 237-254.
- [8] HUO Junzhou, ZHU Dong, LI Guangqing, et al. Application of a small time scale fatigue crack growth model of plane stress/strain transition in life prediction of TBM cutter-head[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 71: 11-30.
- [9] HUO Junzhou, ZHU Dong, WANG Weizheng, et al. Theoretical crack growth prediction model for thick plate butt welding joints based on stress/strain transitions[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017(3): 1-16.
- [10] SAMUEL S. Disc force measurements on a full-face tunnelling machine[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1984, 21(2): 83-96.
- [11] ZHANG Z X, KOU S Q, LINDQVIST P A. In-situ measurements of cutter forces on boring machine at Äspö hard rock laboratory[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2003, 36(1): 63-83.
- [12] ROSTAMI J. Hard rock TBM cutterhead modeling for design and performance prediction[J]. Geomechanics & Tunnelling, 2008, 1(1): 18-28.
- [13] WANG Lihui, KANG Yilan, CAI Zongxi, et al. The energy method to predict disc cutter wear extent for hard rock TBMs[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 183-191.
- [14] ZHANG Qian, QU Chuanyong, KANG Yilan, et al. Identification and optimization of energy consumption by shield tunnel machines using a combined mechanical and regression analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 350-354.
- [15] 谭青, 徐孜军, 夏毅敏, 等. 2 种切削顺序下 TBM 刀具破岩机理的数值研究[J]. 中南大学学报, 2012, 43(3): 940-946.
- TAN Qing, XU Mujun, XIA Yimin, et al. Numerical study on mode of breaking rock by TBM cutter in two cutting orders[J]. Journal of Central South University, 2012, 43(3): 940-946.
- [16] XIA Yimin, ZHANG Xinming. Mechanical model of breaking rock and force characteristic of disc cutter[J]. Journal of Central South University, 2012, 19: 1846-1852.
- [17] 张魁, 夏毅敏, 朱宗铭, 等. 不同地质工况条件下 TBM 刀具破岩模式研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(9): 1240-1245.
- ZHANG Kui, XIA Yimin, ZHU Zongming, et al. Rock-breaking modes of TBM cutters under different working conditions[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(9): 1240-1245.
- [18] 蒲毅, 刘建琴, 郭伟, 等. 土压平衡盾构机刀盘刀具布置方法研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15): 161-168.
- PU Yi, LIU Jianqin, GUO Wei, et al. Research on cutting tool layout method of earth pressure balance shield[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(15): 161-168.
- [19] 郭伟, 胡竟, 王磊, 等. 基于 CFD 的土压平衡盾构刀盘开口分布特征研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 144-151.
- GUO Wei, HU Jing, WANG Lei, et al. Study on the opening distribution characteristics of earth pressure balance shield cutter head based on CFD[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(17): 144-151.
- [20] 孙伟, 朱晔, 凌静秀, 等. 基于裂纹失效区域的分体式刀盘可靠性计算[J]. 东北大学学报, 2016, 37(8): 1144-1148.
- SUN Wei, ZHU Ye, LING Jingxiu, et al. Split cutter head reliability calculation based on crack failure regions[J]. Journal of North East University, 2016, 37(8): 1144-1148.
- [21] 李舜酩. 机械疲劳与可靠性设计[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- LI Shunming. Mechanical fatigue and reliability design[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [22] 赵少汴. 抗疲劳设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- ZHAO Shaobian. The anti-fatigue design[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [23] YAMG K, XIA Y M, WU Y. Studies on rock-breaking of positive disc cutter and edge disc cutter[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 508: 159-164.

作者简介: 孙伟, 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为大型设备结构优化与设计。

E-mail: sunwei@dlut.edu.cn

霍军周(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士研究生导师。主要研究方向为复杂机械结构疲劳裂纹扩展及抗损设计。

E-mail: huojunzhou@dlut.edu.cn