

再制造全断面隧道掘进机刀盘多元损伤探究

柴保明¹, 白岩龙¹, 刘建琴², 李路路¹

(1. 河北工程大学机械与装备工程学院, 河北邯郸 056038; 2. 天津大学机械工程学院, 天津 300072)

摘要: 为解决国内大量全断面隧道掘进机 (TBM) 未能全寿命使用, 以及损伤修复相关问题。通过查阅国内外文献资料, 分析 TBM 刀盘疲劳、磨损、蠕变、断裂等因素的影响程度, 研究刀盘微观裂纹扩展机理, 结合 TBM 刀盘特定服役环境 (地质参数、结构参数、操作参数等) 构建多元损伤模型, 从再制造刀盘方面提出了多元损伤耦合框架。

关键词: TBM 刀盘; 微观损伤; 多元损伤; 再制造

中图分类号: U455.3

文献标识码: A

Research on multiple damage of remanufacturing TBM cutterhead

CHAI Baoming¹, BAI Yanlong¹, LIU Jianqin², LI Lulu¹

(1. College of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China; 2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper is to solve the problem that the large number of full face tunnel boring machine (TBM) can not be used in the whole life, as well as the related problems of damage repair. By reviewing the literature at home and abroad, we analyze the influence of TBM cutter wear, fatigue, creep, fracture and other factors, the micro crack propagation mechanism of cutter. The multiple damage model under TBM specific service environment (operating parameters of geological parameters, structure parameters, etc.) is built. In this paper, the multiple damage coupling framework is put forward from the aspect of remanufacturing cutter head.

Key words: TBM cutter head; Microscopic damage; Multiple damage; Remanufacturing

随着城市的快速发展, 为缓解出行压力, 城市轨道交通建设步入快车道, 成为社会热门。我国已成为世界上对 TBM 保有量最大、增长最快的国家。从全球市场价值大数据分析, 中国已成为盾构机需求最大的市场, 占全球市场的 60% 以上, 目前现有盾构机保有量 900 多台, 5 年内将新增约 500 台^[1-2]。到 2020 年, TBM 需求 200 台以上, 装备直接费用超过 500 亿元, 拉动相关产业投入 8 000 亿元。2014 年, Elso Kuljanić^[3] 提到 TBM 关键部件再利用, 并提出了全生命周期的理念; 2016 年, 郭伟等^[4] 基于 CSM 受力模型, 推导出常截面滚刀的破岩量公式和基于变切深的边滚刀磨损量公式。在刀盘损伤研究以及刀盘再制造领域, 我国尚处于起步阶段, 国内 TBM 修复率约占 20%。本文以已服役 TBM 刀盘为研究对象。概述了刀盘服役情况, 并分析了刀

盘单一损伤机理; 推导出 TBM 刀盘微观裂纹计算模型, 提出 TBM 再制造刀盘多元损伤耦合思路框架, 进一步丰富 TBM 刀盘损伤研究的再制造基础理论。

1 刀盘掘进性能参数

1.1 刀盘服役地质参数

服役的地质条件: 施工工段的岩土形成结构、围压、含水量等, 岩土力学参数包括抗剪强度、变形模量、弹性模量和承载力等。服役指标: 已服役距离、维修次数、掘进过程比能消耗、轴承性能诊断等^[5-6]。

1.2 刀具布局参数

刀盘的刀具布局对于刀盘的掘进性能影响非常

收稿日期: 2017-04-21

特约专稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51275339, 51675374)

作者简介: 柴保明 (1964-), 男, 河北邯郸人, 博士, 教授, 从事动力机械及工作过程和机械设备故障诊断等方面的研究。

大,也决定了力和能量传递的形式。针对不同地质条件,选择匹配性最佳的刀具布局,从而达到最佳掘进效率^[7-8]。影响因素归纳为以下几点:滚刀参数:滚刀直径、刃宽、刃倾角刀间距等;地质参数:岩石抗压强度、抗拉强度、岩石节理指标、Is50等;还有控制参数:掘进参数、贯入度、刀盘转速等。

2 TBM 刀盘宏观损伤行为

研究刀盘的宏观损伤,首先对刀盘损伤类别大致归类,从损伤机理分析入手。刀盘服役过程中宏观单一损伤有以下几类:磨损、裂纹及断裂、高温蠕变、疲劳^[9-10]。归纳出主要损伤机理,如表1。

3 刀盘的微观裂纹分析模型

3.1 刀盘微观裂纹模型

刀盘基体等效力计算公式:

$$(1-f)\sum \bar{\eta}^p = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^p \quad (1)$$

其中, ε_{ij}^p 为宏观塑性应变率; $\bar{\mu}^p$ 为材料等效应变率。

正交性条件和塑性加载一致条件如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi(\bar{\sigma}, \bar{\Sigma}, f) &= \left[\frac{\bar{\sigma}}{\bar{\Sigma}} \right]^2 + 2f^* q_1 \cosh \left[\frac{q_2 \sigma_{kk}}{2\bar{\Sigma}} \right] - 1 - q_3 f^{*2} = 0 \\ \bar{f} &= \bar{f}_g + \bar{f}_n \\ \bar{f}_g &= (1-f) \varepsilon_{kk}^p \\ \bar{f}_n &= A \bar{\Sigma} + B (\sigma_{kk}^p / 3) \\ (1-f) \sum \bar{\eta}^p &= \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^p \\ \bar{\Sigma} &= h \bar{\eta}^p = \frac{EE_t}{E-E_t} \frac{\sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^p}{(1-f) \bar{\Sigma}} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

通过以上公式,推导出刀盘裂纹塑性本构方程:

$$\varepsilon_{ij}^p = \frac{1}{H} \left[\frac{3}{2} \frac{\sigma'_{ij}}{\bar{\Sigma}} + \alpha G_{ij} \right] \left[\frac{3}{2} \frac{\sigma'_{kl}}{\bar{\Sigma}} + \beta G_{kl} \right] \sigma_{kl}^{\Delta} \quad (3)$$

其中, G_{ij} 、 G_{kl} 为度量张量; σ_{kl}^{Δ} 为 Cauchy 应力张量 Jaumann 率; σ'_{ij} 、 σ'_{kl} 为宏观应力张量偏移值。

3.2 刀盘微观裂纹计算流程

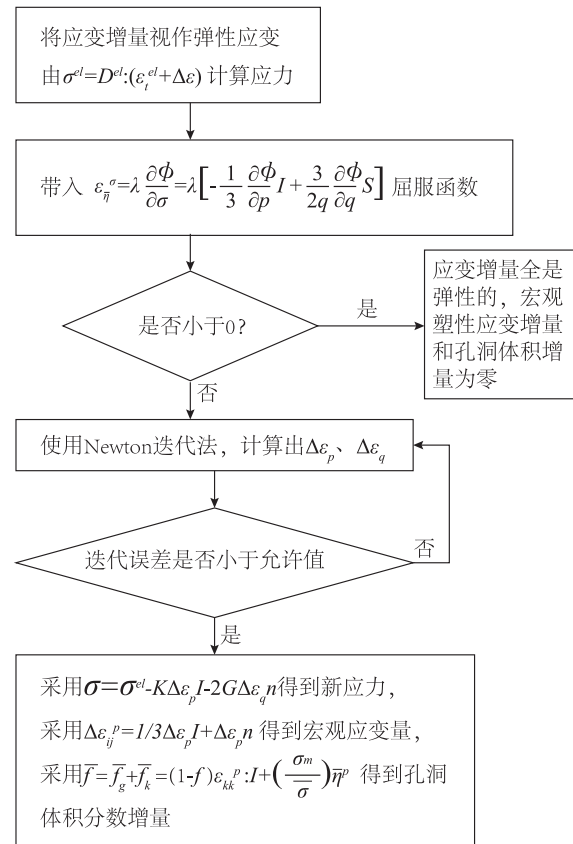


图1 刀盘微观裂纹模型计算流程图
Fig.1 Calculation model of micro crack model of cutterhead

表1 TBM 刀盘主要损伤分类
Tab.1 Classification of main damage of TBM cutter head

种类	损伤机理
磨损	刀盘面板在掘进过程中受到刀盘前面大石块的直接挤压、碰撞冲击和摩擦,导致刀盘磨损、变形和破损。 磨损包括:边刀刀座磨损、刮刀刀座磨损、刀盘锥型面磨损等 ^[11]
裂纹及断裂	刀盘掘进工作中,循环周转受不均匀力和扭矩作用产生裂纹。 主要包括:疲劳裂纹、焊缝裂纹及断裂、刀盘面板表面及内部细小裂纹等
蠕变	高温蠕变断裂韧性表征了材料所固有的蠕变裂纹扩展抗力,蠕变断裂韧性数值越大,材料中的裂纹越不容易扩展
疲劳	刀盘表面及内部疲劳相关参数的变化反映了岩石内部损伤不断加剧、累积程度。

4 TBM 刀盘多元损伤耦合

4.1 再制造刀盘多元损伤耦合概念

刀盘多元损伤耦合是指 TBM 刀盘两种或两种以上的损伤机理之间存在相互影响, 其中某一损伤在微观相互作用下会对其他种类损伤产生加速或者抑制损伤发展, 最终会由多种损伤耦合关联加速某一种损伤变化和转移到某种宏观损伤扩展的现象。

由多元损伤耦合概念出发主要有以下几点: 再制造刀盘存在多种微观损伤共存; 各损伤之间微观关联度不同, 并且结合不同施工地质参数, 不同的操作参数而表现出不同的损伤关联系数; 多元损伤耦合的结果是“多化一”的关系, 最终表现出一种

宏观损伤。

4.2 再制造刀盘多元损伤耦合框架

4.2.1 再制造 TBM 刀盘损伤间的线性耦合关系

从宏观单一损伤之间联立线性模型计算, 探索微观损伤繁衍机理。

线性耦合损伤度系数可取正、负, 表示单一损伤之间关联损伤加速或者抑制, 加速损伤为正值, 反之取负值。

4.2.2 再制造 TBM 刀盘损伤间的非线性耦合关系

(1) 两种损伤非线性耦合框架: 刀盘两种宏观损伤间的关联通过共同影响因素入手, 模型算法上实现非线性的耦合。

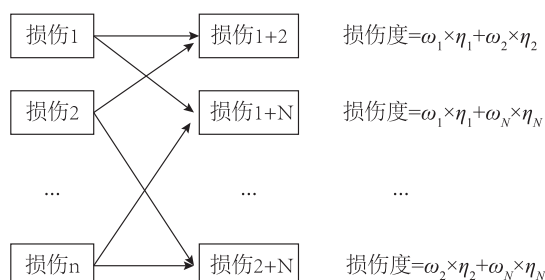


图2 刀盘损伤线性耦合关系图

Fig.2 Linear coupling relation of cutter head damage

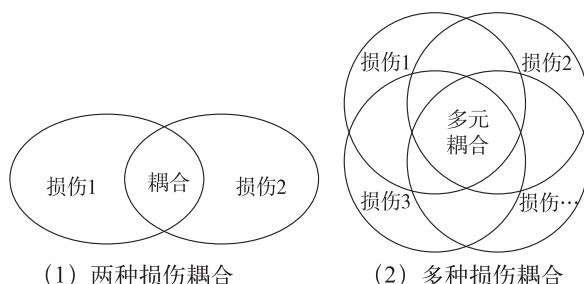


图3 刀盘损伤耦合关系示意图

Fig.3 Schematic diagram of the coupling relation of cutter head

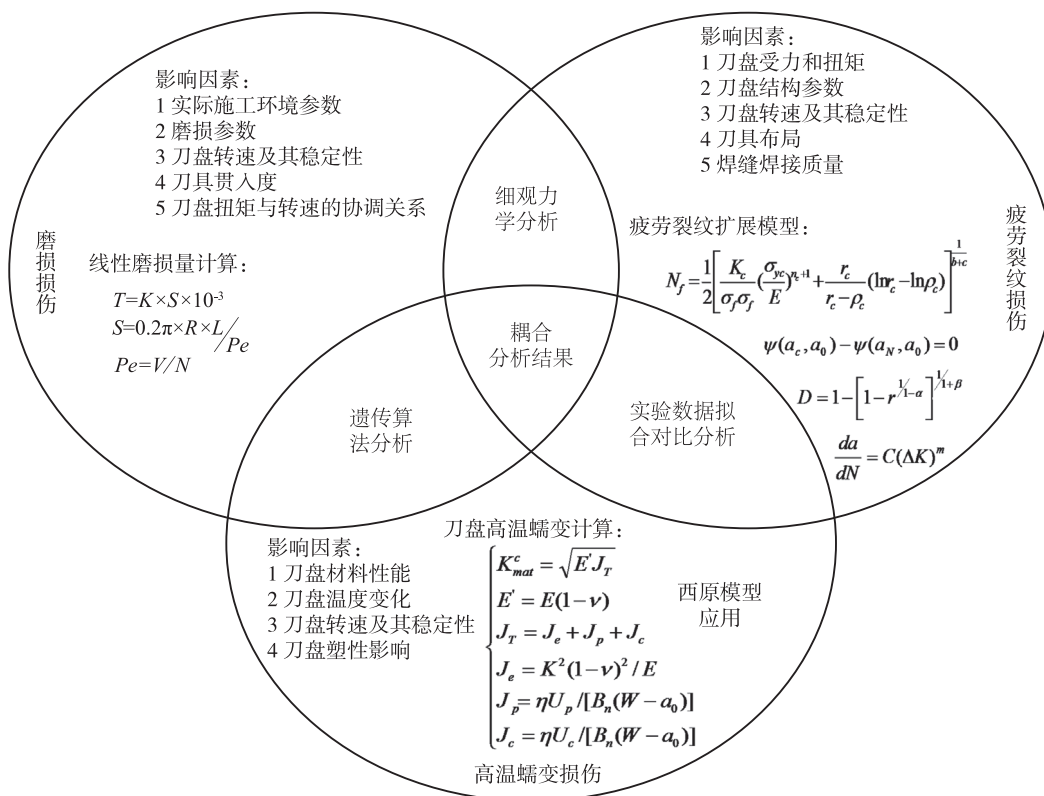


图4 刀盘磨损+疲劳裂纹+高温蠕变耦合关系图

Fig.4 Coupling relationship between wear, fatigue crack and high temperature creep

(2) 多种损伤非线性耦合框架: 刀盘多元损伤之间的耦合要结合微观损伤机理, 从影响刀盘损伤的综合因素入手, 针对“损伤萌生→损伤扩展→损伤转移→变异→损伤加速→……→损伤破坏”各环节提取耦合关键点, 构建多元损伤耦合模型。

4.3 再制造刀盘三种损伤耦合实例

4.3.1 多元损伤耦合理论方面

为实现多元损伤的耦合分析, 将刀盘宏观和微观裂纹模型公式关联分析, 在理论模型上把各种刀盘损伤通过细观力学知识、基因遗传算法理论、微观损伤累积模型结合, 从而在损伤的理论模型方面实现耦合。

4.3.2 多元损伤耦合影响因素方面

首先, 通过刀盘宏观损伤机理, 得出单一损伤的影响因素; 然后, 分析影响因素对于其他损伤的关联影响, 进行标记确定耦合关系; 结合刀盘驱动、岩石反作用力等动力学、静力学分析; 最终, 得到损伤因素耦合结果。

5 结论

1) 通过对 TBM 掘进性影响因素的总结, 得出刀盘的常见宏观损伤类别并分析了磨损、裂纹、蠕变以及疲劳损伤的机理。

2) 从微观裂纹损伤展开研究, 推导出刀盘微观裂纹的塑性本构方程: $\varepsilon_{ij}^p = \frac{1}{H} \left[\frac{3}{2} \frac{\sigma'_{ij}}{\Sigma} + \alpha G_{ij} \right] \left[\frac{3}{2} \frac{\sigma'_{kl}}{\Sigma} + \beta G_{kl} \right] \sigma'_{kl}$, 以及计算流程。

3) 定义了刀盘多元损伤耦合的概念, 从损伤的线性关联和非线性耦合两方面分析, 结合宏观微观损伤影响因素和损伤模型构建起耦合分析框架。

参考文献:

- [1] 陈 馈, 洪开荣, 焦胜军. 盾构施工技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- [2] 徐滨士, 董世运, 朱 胜, 等. 再制造成形技术发展及展望 [J]. 机械工程学报, 2012, 15: 96-105.
- [3] E Kuljanic AMST' 02 Advanced Manufacturing Systems and Technology [J]. International Centre for Mechanical Sciences, 2002: 437
- [4] 郭 伟, 李 楠, 王 磊, 等. 土压平衡式盾构机掘进性能评价方法 [J]. 天津大学学报, 2012(5): 379-385.
- [5] YANG H, WANG H, ZHOU X. Analysis on the damage behavior of mixed ground during TBM cutting process [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 57: 55-65.
- [6] ROSTAMI J. Performance prediction of hard rock Tunnel Boring Machines (TBMs) in difficult ground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 57: 173-182.
- [7] 齐梦学. 再制造 TBM 在我国应用初探 [J]. 国防交通工程与技术, 2011(4): 5-8.
- [8] 任家宝. 基于刀盘载荷模型的刀盘性能评价研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [9] KANG E M, KIM Y M, HANG I J, et al. A study on the damage of cutter bit due to the rotation speed of shield TBM cutter head in mixed ground [J]. Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 2015, 17(3): 403-413.
- [10] 欧阳湘宇. 多点冲击下 TBM 刀盘裂纹萌生—扩展全寿命预测 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [11] LIU Q, HUANG X, GONG Q, et al. Application and development of hard rock TBM and its prospect in China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 57: 33-46.

(责任编辑 王利君)

声 明

为适应我国信息化建设的需要、提高本刊的学术影响力、扩大作者知识信息交流渠道, 本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据库等以数字化方式通过信息网络传播本刊全文。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明。