

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.04.015

双裂纹损伤下 TBM 刀盘结构疲劳寿命分析

吴勉^{1,2}, 凌静秀^{1,2,3}, 成晓元^{1,2}, 王文景^{1,2}

- (1. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;
2. 福建工程学院 福建省数控装备产业技术创新研究院, 福建 福州 350118;
3. 中建海峡建设发展有限公司, 福建 福州 350100)

摘要: 基于 Paris 公式建立 TBM 刀盘的裂纹扩展模型, 利用 Workbench 模拟裂纹的开裂过程, 计算出其循环次数与应力强度因子。并改变双裂纹的初始长度、距离、角度, 分析多部位损伤时筋板的裂纹扩展寿命。结果表明, 裂纹的初始长度越长构件越容易失效, 每增加 2.5 mm 寿命将减少 35%, 而双裂纹距离对寿命的影响较小, 在 10% 以内。当裂纹方向和受力方向垂直时, 构件容易失效, 反之则对寿命的影响越小。该研究可为刀盘设计过程中疲劳寿命领域提供参考。

关键词: TBM 刀盘; 双裂纹扩展; Paris 公式; 疲劳寿命

中图分类号: TH113 文献标志码: A 文章编号: 1672-4348(2022)04-0397-05

Fatigue life analysis of TBM cutter head structure under double crack damage

WU Mian^{1,2}, LING Jingxiu^{1,2,3}, CHENG Xiaoyuan^{1,2}, WANG Wenjing^{1,2}

- (1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. Fujian Institute of Technology Innovation of CNC Equipment Industry, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
3. CSCEC Strait Construction and Development Co., Ltd., Fuzhou 350100, China)

Abstract: Based on the Paris formula, the crack propagation model of the TBM cutter head was established, and the cracking process of the crack was simulated by Workbench, and the cycle times and stress intensity factor were calculated. The initial length, distance and angle of the double cracks were changed so as to analyze the crack propagation life of the rib when multiple parts are damaged. Results show that the longer the initial length of the crack, the more likely the component will fail, and the life will be reduced by 35% for every 2.5 mm increase, while the double-crack distance has less effect on the life, i.e., within 10%. When the crack direction is perpendicular to the force direction, the component is prone to failure, and otherwise, the impact on the life is smaller. This research can provide reference for the field of fatigue life in the design of cutter head.

Keywords: TBM cutter head; double crack propagation; Paris formula; fatigue life

TBM 材料本身缺陷或加工过程中造成的损伤, 导致结构内部不可避免地会存在微裂纹, 在一定条件下微裂纹会不断扩展、积聚汇合最终造成失效^[1]。张斌^[2]对某型 TBM 刀盘疲劳裂纹扩展寿命进行预测研究, 利用 ANSYS 软件分析了疲劳裂纹失效关键区域的裂纹扩展类型和扩展规律。

朱晔^[3]运用软件 Zencrack 对 TBM 刀盘服役过程中盘体开裂严重的问题, 进行了三维裂纹扩展和寿命预测。孙伟^[4]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, 根据数值模拟, 提出了裂纹萌生寿命为 84 d。马捷^[5]以 TBM 刀座焊缝为研究对象, 对刀座焊缝的疲劳寿命进行

预测并且进行可靠性分析。随着 TBM 刀盘动力学理论的成熟和对安全性要求的不断提高,如何准确计算三维裂纹尖端应力强度因子是评估工程材料失效的关键^[6]。Chong Zhewen^[7]分析了双裂纹间距、裂纹深度比、裂纹长径比对弹簧边界下双裂纹 SIF 的影响。You-Sheng Deng^[8]基于守恒定律和弯曲理论,提出了一种确定三维构件复杂应力强度因子的方法。凌静秀^[9]基于有限元分析复杂应力状态下刀盘裂纹的应力强度因子,并给出了不同裂纹参数对应力强度因子的影响规律。

本文以 TBM 刀盘为例,在刀盘的薄弱位置提取子模型,使用 ANSYS Workbench 软件进行精细网格的处理和初始裂纹的预制。同时,在已知载荷的情况下求解双裂纹扩展,分析双裂纹之间的初始长度、双裂纹之间的距离、初始角度对裂纹寿命以及应力强度因子的影响。

1 TBM 刀盘扩展模型

1.1 刀盘特征件

子模型是指 TBM 刀盘中的部分区域,通过分析子模型进而得到更加精确的有限元分析结果。如在刀盘整体中引入多部位损伤裂纹需要将其网格划分的非常精密,从而导致计算量极大,效率低,精确度低,而且很难保证其收敛。因此,本文在刀盘特征件中引入多部位损伤裂纹,在薄弱位置预制初始裂纹,进行精密的网格划分。在刀盘分体件中提取子模型如图 1 所示。

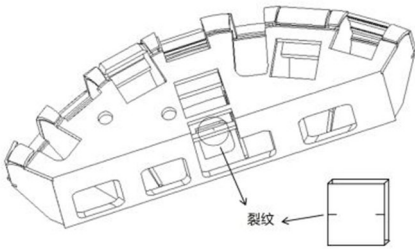


图 1 子模型提取位置

Fig.1 Submodel extraction location

1.2 裂纹扩展模型

疲劳破坏是有规律可循的,而部件的寿命很大程度上取决于裂纹扩展速率的大小,裂纹扩展速率就是裂纹长度随着裂纹循环次数的变化,一般用 da/dN 表示,基本表达式为:

$$da/dN = f(\Delta K, R)$$

式中, a 为裂纹长度, mm; N 为应力循环次数, 次; da/dN 为裂纹扩展速率, mm/次。

对于裂纹扩展速率的研究,主要是 da/dN 与各个相关参数之间的关系,也就是确定 f 的表达式是整个裂纹扩展以及寿命预测的关键所在,通常双对数坐标系下的裂纹扩展速率曲线呈 S 形。

在疲劳裂纹扩展寿命预测方法中,Paris 公式使用最为广泛,可以描述裂纹扩展速率 da/dN 与应力强度因子幅值 ΔK 之间的关系。

$$da/dN = C(\Delta K)^m$$

式中, C 和 m 为材料参数; ΔK 为应力强度因子幅值。

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

式中, K_{\max} 为最大应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$; K_{\min} 为最小应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ 。

基于上述公式,使用 ANSYS Workbench 中的智能裂纹扩展模拟工程结构中的疲劳或静态裂纹扩展。SMART 是一种基于重新网格化的裂纹扩展模拟方法。SMART 代表分离、变形、自适应和重新网格化技术。自动使用变形、自适应和重新网格化方法的组合来更新网格,以模拟求解过程中的静态或疲劳裂纹扩展。网格变化仅发生在裂纹前缘区域附近。在裂纹扩展模拟前需对刀盘面板的材料进行参数设定,本文 TBM 刀盘选取的材料为 Q345D,其密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 $2 \times 10^5\text{ MPa}$,泊松比为 0.3, C 为 1.735×10^{-13} , m 为 $4.66^{[2]}$ 。在模型中加载即可模拟出裂纹的扩展情况,得到响应的应力强度因子以及载荷循环次数。

2 多部位损伤裂纹开裂仿真

通过预制双裂纹的方法进行裂纹的扩展分析,即通过在特征件两端分别引入人为设置的裂纹来分析裂纹在扩展时候的相互作用,以及记录裂纹试件失效过程中的载荷循环周期,预估试件的寿命,总结出裂纹扩展的规律。

图 2 为预制裂纹的结构示意图, L 为子模型长度 120 mm, W 为子模型宽度 100 mm, T 为子模型厚度 10 mm, l 为两裂纹之间的距离 0 mm,且距离中心线的长度相同, $2k$ 为裂纹开口宽度 2 mm, h 为预制裂纹长度 10 mm, θ 为裂纹尖端线与子模型边之间的角度, 90° 。下文将改变 l 、 h 、 θ 进行分析。

在分体盘中分割出子模型,利用 ANSYS 软件

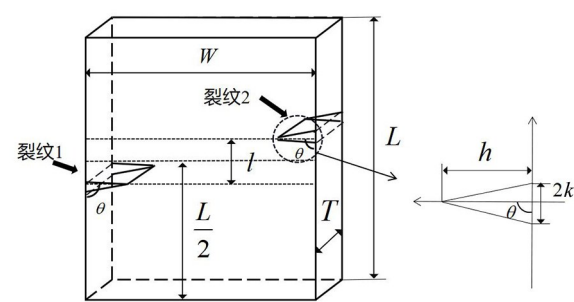


图 2 预制裂纹结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of prefabricated crack structure

对其进行网格划分,子模型采用六面体单元而其他部分采用自动划分,提高求解效率与精度。建立含子模型的刀盘分体盘有限元模型,在刀盘法兰上添加固定约束,盘形滚刀受力加载^[10]计算子模型处的拉力。图 3 为分体盘施加的边界条件,图 4 为子模型两端的受力情况图,得到子模型两端受力为 13.532 kN。

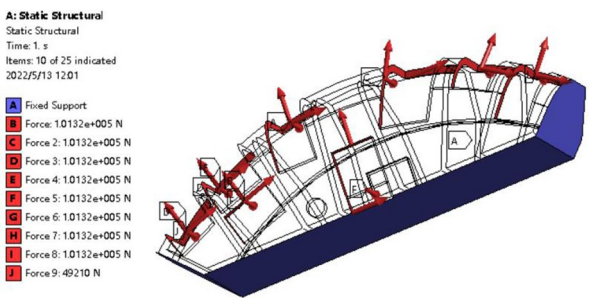


图 3 分体盘边界条件

Fig.3 Split disk boundary conditions

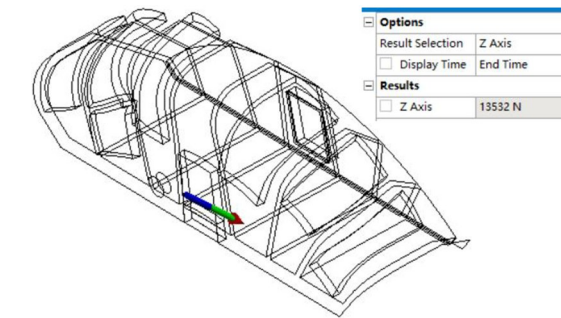


图 4 子模型两端受力图

Fig.4 Force diagram at both ends of the submodel

在 workbench 中导入有限元子模型,整体采用四面体网格划分,网格大小设置成 5 mm,在裂纹尖端引入半径 8 mm、网格大小 1 mm 的影响球

用于细化裂纹尖端的网格,在模型的一端施加 13.532 kN 的拉应力,另一端固定等效两端受拉状态,smart crack 裂纹扩展中的载荷表示加载的幅值,后设置 15 个子步进行加载。

裂纹扩展时的最大应力出现在裂纹尖端如图 5 所示,从图 5 可见,双裂纹在扩展时相互吸引。裂纹扩展量与循环次数的关系如图 6 所示,双裂纹在预制大小相同时,裂纹扩展量也基本相同,在后期双裂纹都快速扩展。

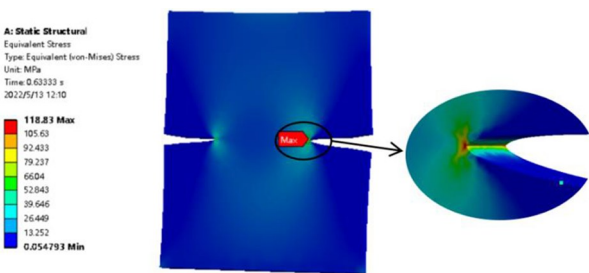


图 5 裂纹开裂应力图

Fig.5 Cracking stress diagram

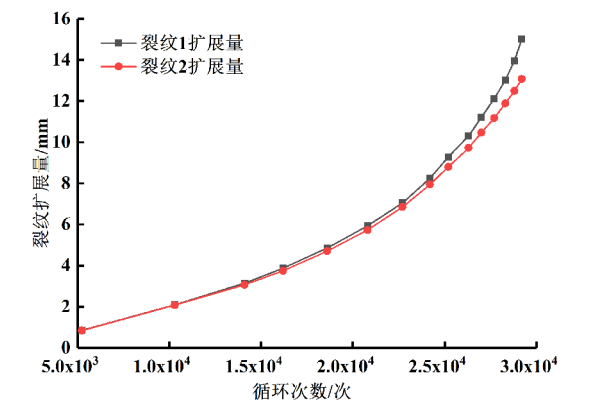


图 6 循环次数与裂纹扩展量关系图

Fig.6 The relationship between number of cycles and crack growth

3 双裂纹参数对裂纹扩展的影响分析

针对刀盘裂纹的不确定性,本节使用相同的刀盘子模型,在相同的条件边界下,分析不同参数对双裂纹扩展的影响。

3.1 双裂纹长度参数分析

设置 4 组对照试验,长度 h 分别为 7.5、10、12.5、15 mm,双裂纹距离 l 为 0 mm,角度取 90° 。从图 5 中可以看出,当双裂纹距离为 0 时,双裂纹扩展状态相差很小,下面统一提取裂纹 1 数据进行分析,如图 7 所示。

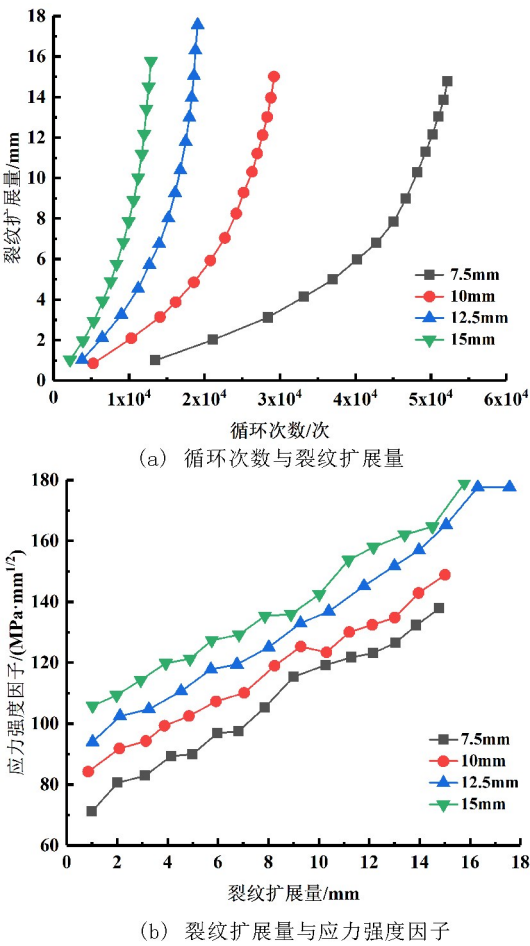


图 7 裂纹初始长度对参数影响图

Fig.7 Effect of initial crack length on parameters

由图 7 可见,4 组裂纹扩展的趋势都相同,前部分为平稳扩展状态,后面进入快速扩展。当不同初始长度裂纹达到相同扩展量 15 mm 时, h 为 7.5、10、12.5、15 mm 4 组分别需要的循环次数为 5.2×10^4 、 2.92×10^4 、 1.85×10^4 和 1.27×10^4 次。从中可看出,初始裂纹越长,需要达到相同扩展量的循环次数越少。当 4 组扩展量都达到 15 mm 时,两两对比寿命之间的关系、循环次数的衰减可视为寿命的衰减, $h = 7.5$ mm 对比 $h = 10$ mm 时,寿命减少了 43.8%; $h = 10$ mm 对比 $h = 12.5$ mm 时和 $h = 12.5$ mm 对比 $h = 15$ mm 时,寿命分别减少了 36.6% 和 31.35%。可见,随着裂纹初始长度的增加,裂纹寿命会急剧下降,控制初始裂纹是延长刀盘使用寿命的关键。在相同扩展量情况下,应力强度因子随着初始裂纹长度的增加呈现从低到高排布,且每增加 2.5 mm,应力强度因子增加 10 MPa·mm^{1/2} 上下。

3.2 双裂纹距离参数分析

设置 4 组对照试验,距离 l 分别为 0、5、10、15 mm,子模型高度为 120 mm,远高于双裂纹之间的距离故不会对其造成影响,双裂纹初始长度 h 为 10 mm,角度取 90°,统一取裂纹 1 数据进行分析,如图 8 所示。

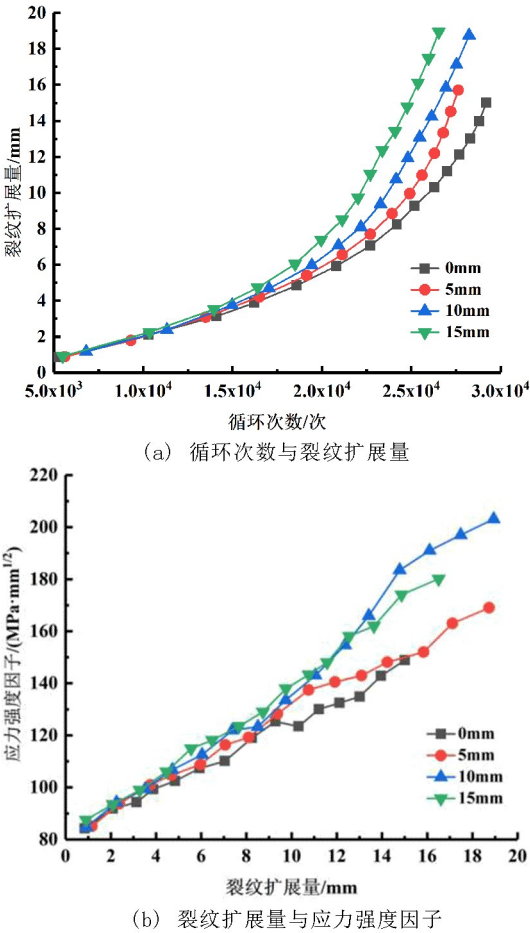


图 8 裂纹初始距离对参数影响图

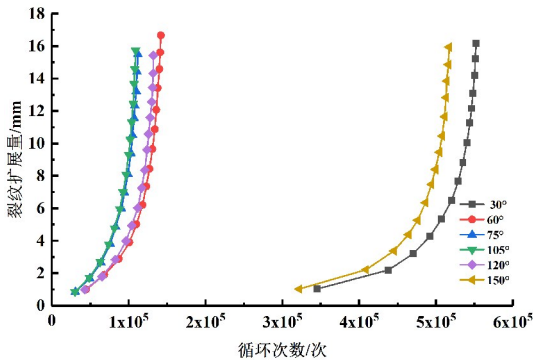
Fig.8 Effect of initial crack distance on parameters

由图 8 可见,经历循环次数 1.5×10^4 次之前,4 条曲线几乎重合,双裂纹距离对裂纹平稳扩展区间的影响较小。对比裂纹扩展到 15 mm 的扩展次数, l 为 0 mm 组扩展量到达 15 mm 需要循环次数 2.92×10^4 次; l 为 5 mm 组需要的循环次数为 2.73×10^4 次; l 为 10 mm 和 15 mm 组扩展到 15 mm 的循环次数分别为 2.64×10^4 次和 2.49×10^4 次。对比 l 为 0 到 5 mm 的寿命衰减为 6.5%,而当 l 为 10 增加到 15 mm 时,寿命减少了 5.6%,可见距离越远对裂纹扩展寿命影响越小。扩展量小于 9 mm 时,4 组相同扩展量对应的应力强度因子

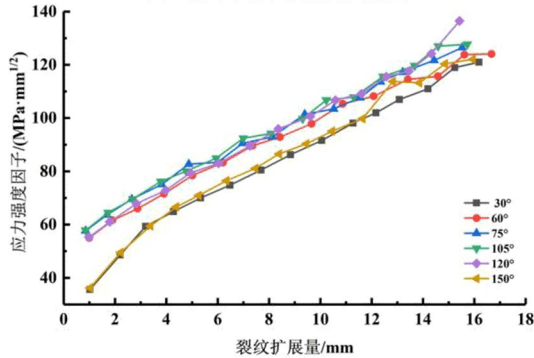
几乎相同。

3.3 双裂纹角度参数分析

裂纹初始长度 h 为 10 mm, 距离 l 为 0 mm, 其裂纹与邻边角度 θ 分别设置为 30°、60°、75°、105°、120°、150° 6 组研究对象, 统一提取裂纹 1 数据用于分析, 如图 9 所示。



(a) 循环次数与裂纹扩展量



(b) 裂纹扩展量与应力强度因子

图 9 裂纹不同角度对参数影响图

Fig.9 Impact of different crack angles on parameters

从图 9 可知, 当角度 θ 为 30° 和 150° 时, 其扩展状态相同, 且 30° 组达到相同扩展量所需的循环次数更多, 当角度 θ 为 60° 和 120°、75° 和 105° 时, 其曲线分别重合, 原因是这些角度对称于 90° 中心线, 实质上是一种状态, 后只分析 30° 到 90° 的数据。当角度 θ 为 30°、60°、75° 时, 裂纹扩展到 15 mm 的循环次数分别为 5.51×10^5 、 1.41×10^5 、 1.12×10^5 次。当裂纹角度为 90° 时, 裂纹扩展到 15 mm 需要的循环次数为 2.92×10^4 次。当初始裂纹为 75° 时, 扩展到相同量的循环次数是 90° 的 3.8 倍, 60° 是 75° 的 1.26 倍, 而 30° 是 60° 的 3.9 倍。可见, 裂纹初始角度越倾斜于受力方向对试验件的寿命影响越小。相同裂纹扩展量下的应力强度因子相差不大, 只有 30° 和 150° 组相对低于其他组。

4 结论

1) 当双裂纹对称且初始长度相同时, 其扩展量随循环次数的增加量也基本相同。裂纹长度每增加 2.5 mm 寿命将减少 35%, 在相同裂纹扩展量的应力强度因子越大。

2) 双裂纹之间的距离对于构件寿命的影响相对较少, 在不同距离的双裂纹扩展中, 其扩展前期的趋势基本相同。

3) 裂纹与受力方向角度对构件寿命影响最大, 当裂纹方向与受力方向夹角为 90° 时, 其寿命最短; 当裂纹夹角与 90° 中心线对称时, 其扩展状况可视为相同情况。

参考文献:

[1] 孙志礼, 柴小冬, 柳溪溪, 等. 基于损伤力学的疲劳裂纹萌生及扩展规律研究[J]. 材料导报, 2017, 31(8): 130-134.
[2] 张斌. TBM 刀盘疲劳裂纹扩展寿命预测研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
[3] 孙伟, 朱晔, 霍军周, 等. 基于裂纹失效区域划分的 TBM 刀盘裂纹位置预估及分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(1): 27-35.
[4] 朱晔. TBM 刀盘三维裂纹扩展规律及其抗损伤设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
[5] 马捷. TBM 刀盘疲劳寿命预测和可靠性分析[D]. 天津: 天津大学, 2018.
[6] 张行. 断裂力学中应力强度因子的解法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
[7] CHONG Z W, MA T X, YU D L, et al. Stress intensity factor of double cracks on seabed-spanning pipeline surface under the spring boundary[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2021, 12(4): 04021052.
[8] DENG Y S, LI L, MENG L Q, et al. Mode-I stress intensity factors for cracked R-fluted shells under complex loads[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, 194: 104490.
[9] 凌静秀, 孙伟, 杨晓静, 等. 全断面隧道掘进机刀盘裂纹尖端应力强度因子收敛性分析[J]. 中国机械工程, 2017, 28(10): 1143-1148.
[10] 宋纯宁. 基于对称与不对称刀具下的 TBM 刀盘力学性能分析[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.

(责任编辑: 陈雯)