

基于裂纹失效区域的分体式刀盘可靠性计算

孙 伟,朱 晔,凌静秀,霍军周

(大连理工大学 机械工程学院,辽宁 大连 116024)

摘 要:全断面岩石掘进机(tunnel boring machine, TBM)工作时刀盘表面会产生大量裂纹,针对这种情况提出一套裂纹区域划分法,在此基础上建立可靠度计算模型.首先,根据受力及结构形式的不同划分刀盘易发生裂纹的危险区域,然后运用雨流计数法获取应力幅值.以裂纹疲劳损伤累积为基本变量,创建 TBM 刀盘裂纹扩展形式的可靠度计算模型.以中天山隧道工程 TBM 刀盘为例,刀盘易发生裂纹的部位可划分为 10 个区域. TBM 掘进 4 km 时可靠度的计算结果与实际工程相符.刀座焊接处最易发生疲劳破坏,维修时应采取措施防止其裂纹扩展.

关 键 词:刀盘裂纹;可靠度;刀盘分区;应力幅值

中图分类号:TH 113.1 文献标志码:A 文章编号:1005-3026(2016)08-1144-05

Split Cutter Head Reliability Calculation Based on Crack Failure Regions

SUN Wei, ZHU Ye, LING Jing-xiu, HUO Jun-zhou

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China. Corresponding author: ZHU Ye, E-mail: zhuye198727@163.com)

Abstract: A calculation model of reliability was developed based on the method of dividing crack regions on the surface of TBM (tunnel boring machine) cutter head. The dangerous area was divided on the basis of different stress and structure, and the stress amplitude spectrum was obtained by rain-flow counting. To calculate the reliability, a model of cracks extension was built with crack fatigue damage accumulation as basic variable. For example, dangerous areas of the TBM cutter head used on Zhongtianshan tunnel engineering were divided into 10 according to crack-resistance, and the calculated reliability in TBM tunneling for 4 km was consistent with the reality. At this stage, fatigue damage most likely occurred on cutter saddle welding, therefore, measures should be taken to prevent the crack growth during repairs.

Key words: cutter head cracks; reliability; cutter head region division; stress amplitude

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,刀盘是整个 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]. TBM 在施工中存在着风险,在掘进过程中,刀盘的风险事故率占到 TBM 总体风险事故的一半以上.由疲劳载荷所导致的刀盘的裂纹扩展是 TBM 刀盘工作时失效的主要原因,这些事故使 TBM 开挖效率和刀盘使用寿命大大降低^[2-3].据统计,国内 TBM 施工中,由裂纹造成的

失效在工程中都有不同程度的出现^[4],一方面增加了隧道建设的工程费用,另一方面延长了隧道建设的工期.因此,研究 TBM 刀盘失效可靠度具有非常重要的意义.

以秦岭隧道、大伙房引水隧道、中天山隧道为例,由于地质条件的复杂性及施工参数的多变性,刀盘承受着空间多点随机冲击载荷的耦合作用,导致结构急剧振动,刀盘面板开裂,降低了刀盘的使用寿命^[5-7].

长期以来,国内外专家学者对 TBM 刀盘系

统设计进行了大量的研究工作. Zhang ,Samuel 等^[8 - 9]对 TBM 滚刀载荷进行现场测试,研究滚刀载荷的变化规律. 夏毅敏、谭青等^[10 - 11]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. 许多学者采用试验和仿真等手段研究疲劳裂纹在扩展过程中的形态变化,并分析裂纹前沿应力强度因子的分布规律^[12 - 14].

可以看出,国内外学者主要采用模型实验、数值仿真及现场测试等手段,研究了滚刀破岩机理及受力模型、刀盘掘进时随机载荷及滚刀布置等问题,而对于刀盘的具体区域在空间多点冲击载荷作用下的裂纹失效情况未作研究. 本文的主要工作是针对 TBM 刀盘金属结构疲劳裂纹,基于断裂力学方法,提出一套计算刀盘疲劳可靠度的方法.

1 刀盘可靠性计算关键技术

1.1 基于裂纹区域划分法的空间多点冲击载荷下分体式刀盘可靠性计算流程

本文以具体服役后 TBM 刀盘为研究对象,创新性地提出裂纹区域划分法:测量、统计服役后 TBM 刀盘裂纹出现区域的结构形式,应用 Ls-Dyna 对刀盘上不同部位的滚刀进行仿真,获得其破岩载荷,以此作为激励载荷;在此基础上运用 ANSYS 瞬态动力学求解空间多点载荷下刀盘应力分布情况. 根据受力及结构形式的不同将刀盘易发生裂纹的危险区域进行划分,以区别对待. 运用雨流计数法获取各个区域的应力幅值分布,以其均值、方差作为刀盘可靠度计算的输入条件. 结合 Paris 裂纹扩展准则创建以裂纹疲劳损伤累积为基本变量的可靠度计算模型,在此基础上应用 Monte-Carlo 数值模拟方法计算 TBM 刀盘的动态可靠度. 计算流程如图 1 所示.

1.2 基于裂纹区域划分法的刀盘裂纹失效危险区域划分

TBM 刀盘掘进过程中由于空间多点冲击载荷的影响,工作一段时间后刀盘金属表面会产生一定数量的疲劳裂纹. 通过对服役后刀盘裂纹的检测发现,由于刀盘的结构不同、受力不同导致裂纹出现的频率及扩展速率均不同. 为便于更具体及准确地计算 TBM 刀盘疲劳裂纹可靠度,本文提出裂纹区域划分法,对刀盘裂纹进行危险区域划分. 具体流程如图 2 所示.

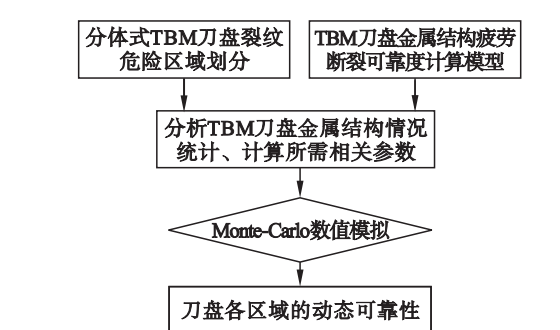


图 1 TBM 刀盘可靠度计算流程
Fig. 1 Reliability calculation process of TBM cutter head

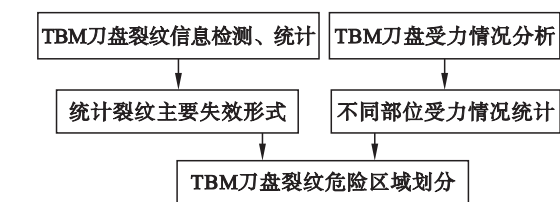


图 2 TBM 刀盘裂纹失效危险区域划分流程
Fig. 2 Division process of crack failure risk region of TBM cutter head

应用无损检测技术对服役后的 TBM 刀盘裂纹进行检测,统计裂纹出现的部位、裂纹尺寸、出现的频率,分析、总结刀盘金属结构易出现裂纹的部位. 裂纹处受到的应力是影响裂纹扩展的主要条件. 本文使用显式动力有限元分析软件 Ls-Dyna 对刀盘上不同安装位置的中心滚刀、正滚刀、边滚刀三种盘形滚刀群破碎岩石进行仿真,得到不同类型滚刀破碎岩石时受到的载荷时间历程,以此为激励载荷,应用 ANSYS 瞬态动力学分析 TBM 刀盘动应力多点分布情况.

综合上面裂纹出现的部位及不同部位的应力情况,对 TBM 刀盘裂纹危险区域进行划分,以区别对待.

1.3 TBM 刀盘裂纹疲劳断裂可靠度极限模型

本文根据 TBM 裂纹实际情况,结合 Paris 法则描述裂纹扩展的状态,创建以裂纹疲劳损伤累积为基本变量的可靠度计算模型. 借鉴 Yang 等^[15 - 16]将裂纹扩展过程看作一平稳正态过程,本文拟定裂纹随机扩展尺寸服从正态分布,如图 3 所示,以此为基础建立 TBM 刀盘的疲劳可靠性的极限方程.

TBM 的裂纹长度模型极限状态方程为

$$\psi(a_c, a_0) - \psi(a_N, a_0) = 0. \quad (1)$$

式中 $\psi(a_c, a_0)$ 为裂纹尺寸从初始值 a_0 扩展到临界值 a_c 时疲劳累积损伤, $\psi(a_N, a_0)$ 为裂纹从初始值 a_0 经过 N 次应力循环扩展到 a_N 时的疲劳累积损伤.

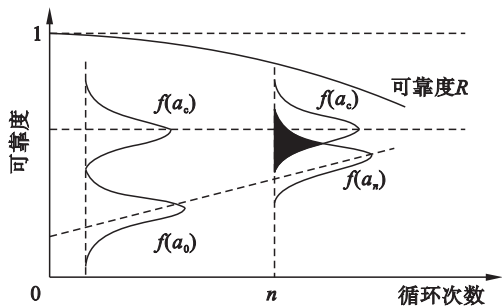


图 3 裂纹长度干涉模型
Fig. 3 Model of crack length interference

图 3 中 a_0 、 a_c 分别是初始裂纹长度和临界裂纹长度, a_n 是循环 n 次时的裂纹长度; $f(\cdot)$ 为服从正态分布的概率密度的函数。

基于线弹性断裂力学的疲劳断裂可靠度极限状态方程可以表示为^[17]

$$g(X)=\int_{a_0}^{a_c}\frac{da}{[F(a,Y)\cdot\sqrt{\pi a}]^m}-C\cdot S^m\cdot(N-N_0). \quad (2)$$

式中: C 、 m 是与疲劳有关的材料特性参数; Y 为随机矢量, 如应力集中系数、尺寸系数等; S 为裂纹处的应力幅值; F 为形状函数. 当疲劳破坏发生时 $g(X)\leq 0$. 构件的疲劳断裂可靠度计算模型为

$$R=p\{g(X)>0\}. \quad (3)$$

2 工程实例

2.1 中天山隧道刀盘裂纹危险区域划分

2.1.1 中天山隧道工程刀盘裂纹信息统计
以中天山隧道工程刀盘为例统计服役后的 TBM 刀盘的裂纹情况, 对发生裂纹的部位和裂纹失效的状况进行统计, 结果如表 1 所示。

表 1 刀盘失效数据
Table 1 Failure data of cutter head

裂纹发生位置	裂纹长度/mm	已经或可能导致的后果
刀座焊接处	600×120(十字裂纹)	刀具变形和刀具脱落
底部隔板	800	隔板变形/隔板失效
支撑隔板	1 000	隔板变形/隔板失效
刀孔外侧	300	刀具脱落
出渣槽	450×500(直角裂纹)	出渣槽失效
刀座	600(弧形裂纹)	刀座脱落/刀具失效
刀孔外侧	300~900(弧形裂纹)	刀具脱落/刀座变形
分体结合处	1 300	刀盘变形/刀盘失效
面板	1 000	刀盘面板变形

根据统计的数据分析, 刀盘由裂纹造成的主要失效形式有: ①刀盘解体, ②中心块损坏, ③边缘体断裂, ④面板变形, ⑤刀座脱落, ⑥刀座变形, ⑦刀具损坏, ⑧出渣槽失效。

2.1.2 有限元分析法确定 TBM 刀盘不同部位受力情况

掘进过程中刀盘受力情况复杂, 多把滚刀与岩石产生冲击载荷, 使刀盘承受空间多点载荷的影响. 使用显式动力有限元分析软件 Ls-Dyna 对

刀盘上不同安装位置的中心滚刀、正滚刀、边滚刀三种盘形滚刀群破碎岩石进行仿真, 得到不同类型滚刀破碎岩石时经受的载荷时间历程。

以滚刀的三向载荷为输入条件, 应用 ANSYS 瞬态动力学对中天山隧道工程中方五分式 TBM 刀盘进行应力分析如图 4 所示, 计算刀盘应力多点分布情况, 对求得的应力历程求均值, 结果如表 2 所示。

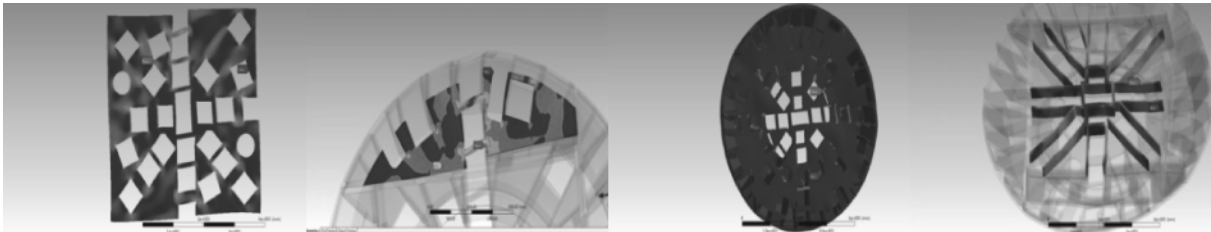


图 4 ANSYS 仿真刀盘各区域受力情况
Fig. 4 ANSYS simulation of the stress distribution on cutter head

表 2 不同部位应力平均值计算结果

Table 2 Average stress results of different parts

区域	应力均值/MPa	区域	应力均值/MPa
分体结合处	180.647	边缘体刀孔	198.214
隔板裂纹	82.64	中心块刀孔	104.55
中心块面板	73.5	边缘体面板	202.34

表 3 刀盘危险区域的划分

Table 3 Division of TBM cutter head risk region

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	底部隔板裂纹	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 TBM 刀盘应力幅值统计

以滚刀的三向载荷为输入条件,应用 ANSYS 模拟刀盘受力情况,获得应力-时间历程.使用雨流计数法对刀盘上不同区域应力-时间历程进行统计,从而得到应力谱分布情况.以边缘体面板的应力-时间历程为例,统计得到区域应力幅值分布,如图 5 所示.

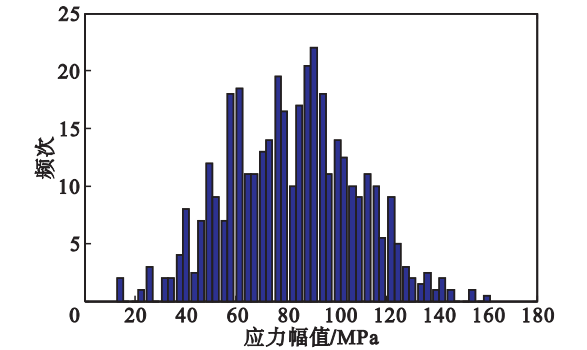


图 5 边缘体面板应力幅值分布

Fig. 5 Stress amplitude distribution of cutter head edge plate

从以上结果可知,边缘体面板应力幅值服从正态分布,应用 Matlab 计算均值和方差: $\mu=82.2\text{ MPa}$ $\sigma=14.8\text{ MPa}$.同理其他区域的统计结果如表 4 所示.

2.3 刀盘各区域可靠度计算

统计中天山隧道中方五分式 TBM 刀盘在各区域应力循环 2×10^6 次时各个区域的可靠度.将刀盘应力循环 2×10^6 次转换成刀盘累积工作时间(计算应力过程以 2 s 为间隔进行采样,所以认为 2 s 为 1 次应力循环),按下式计算:

$$t=N_pT=2\times10^6\times2=4\times10^6\text{ s}.$$

由中天山隧道工程 TBM 刀盘系统参数可知,刀盘转速 $\omega=6\text{ r/min}$,贯入量 $p=10\text{ mm/r}$,则

2.1.3 TBM 刀盘裂纹危险区域划分

综合上述分析,结合中方五分式刀盘不同部位的应力情况及各自部位的结构特点,将中方五分式刀盘易发生裂纹的危险区域进行划分,如表 3 所示.

掘进速度 $v=1\text{ mm/s}$,将刀盘裂纹扩展时间转换为掘进距离:

$$L=v\times t=4\times10^6\text{ mm}=4\text{ km}.$$

表 4 刀盘各区域应力统计结果

Table 4 Each regional sensitive site of cutter head stress

刀盘区域	μ/MPa	σ/MPa
分体结合处	76.3	10.5
底部隔板	41.2	11.3
支撑筋	36.1	9.6
中心块面板	44.4	10.6
边缘体面板	82.2	14.8
边缘体刀孔外侧	101.5	16.7
中心块刀孔外侧	52.3	7.4
边缘体刀座焊接处	94.7	9.8
中心块刀座焊接处	53.4	5.8
出渣槽焊接处	94.9	9.7

计算中天山隧道 TBM 刀盘各区域在运行 4 km 时可靠度结果如图 6 所示.

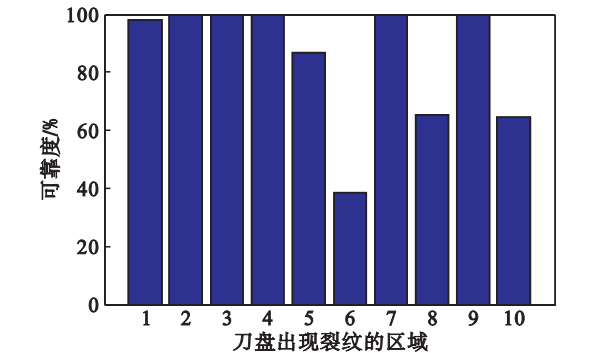


图 6 应力循环 2×10^6 次时刀盘各区域可靠度

Fig. 6 Reliability of each region of TBM cutter head when stress cycles 2 000 000 times

计算结果与中天山隧道工程在运行 4 km 时实际刀盘裂纹损坏情况对比,各个区域状况基本相符。

3 结 论

1) 比较中天山隧道 TBM 刀盘各个区域可靠度计算结果与工程实际情况,证明本文的计算方法适合于分体式刀盘裂纹的可靠度计算。

2) 根据中天山隧道实际工程情况可将刀盘划分为分体结合、底部隔板、支撑筋板等 10 个危险区域。

3) 结合刀盘各个区域的应力幅值分布及刀盘裂纹参数,运用 Monte-Carlo 模拟刀盘可靠度,计算出刀盘各区域的动态可靠度,计算结果与刀盘运行情况吻合,边缘体的刀座焊接处为最易失效区域,施工时应采取措施控制裂纹长度。

4) 本文建立了适用于 TBM 刀盘金属结构疲劳的可靠度计算模型,但是在建模过程中没有考虑焊接系统对疲劳失效的影响,目前对裂纹扩展寿命的计算模型大多建立在线性断裂力学基础上,裂纹扩展寿命计算模型有待于进一步的研究。

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,2005:76-77.
(Promotion Center for Science & Technology Achievements of Ministry of Water Resources. Full face rock tunnel boring machine(TBM)[M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2005:76-77.)
- [2] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J]. 隧道建设,2010,30(4):351-364.
(Wang Meng-shu. An overview of development of railways tunnels and underground works in China[J]. *Tunnel Construction* 2010,30(4):351-364.)
- [3] 张启君,张忠海,张宏,等. 对国内隧道盾构掘进机技术与市场需求量的探讨[J]. 非开挖技术,2003(4):76-80.
(Zhang Qi-jun, Zhang Zhong-hai, Zhang Hong, et al. Discussion on shield technology and market demand in China[J]. *Trenchless Technology* 2003(4):76-80.)
- [4] 钱七虎,李朝甫,傅德明. 隧道掘进机在中国地下工程中应用现状及前景展望[J]. 地下空间与工程学报,2002,22(1):1-11.
(Qian Qi-hu, Li Chao-fu, Fu De-ming. The present and prospect of application of tunnelers in China's underground engineering[J]. *Underground Space* 2002,22(1):1-11.)
- [5] 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 Hong-liang. Trouble shooting for cutter disk cracking of model TB880E rock tunneler[J]. *Construction Machinery*

and Equipment, 2010,41(3):62-67.)

- [6] 王雁军. TBM 主轴承故障成因分析及维保技术[J]. 国防交通工程与技术,2011(2):46-49.
(Wang Yan-jun. Analysis of the causes of failures of the main bearing of the TBM and maintenance techniques for it[J]. *Traffic Engineering and Technology for National Defense*, 2011(2):46-49.)
- [7] 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 Meng-xue, Wang Yan-jun, Li Hong-liang. Research and application of overall refit of open type TBM[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2009,46(4):64-70.)
- [8] Zhang Z X, Kou S Q, Tan X C et al. In-situ measurements of cutter forces on boring machine at Äspö hard rock laboratory[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2003,36(1):39-61.
- [9] Samuel S. Disc force measurements on a full-face tunneling machine[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1984,21(2):83-96.
- [10] Xia Y M, Ouyang T, Zhang X M et al. Mechanical model of breaking rock and force characteristic of disc cutter[J]. *Journal of Central South University*, 2012,19(7):1846-1852.
- [11] 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 Zi-jun, Xia Yi-min 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.)
- [12] Lin X B, Smith R A. Finite element modeling of fatigue crack growth of surface cracked plates. part I: the numerical technique[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1999,63(5):503-522.
- [13] Bowness D, Lee M M K. Prediction of weld toe magnification factors for semi-elliptical cracks in T-butt joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2000,22(5):369-387.
- [14] 赵传宇. CFL 加固钢板中表面裂纹扩展规律研究[D]. 广州:华南理工大学,2013.
(Zhao Chuan-yu. Study on surface crack propagation behavior in steel plate strengthened with CFL[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2013.)
- [15] Yang J N, Salivar G C, Annis C G. Statistical modeling of fatigue-crack growth in a nickel-base superalloy[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1983,18(2):257-270.
- [16] 李振华. 起重机金属结构疲劳寿命预测与疲劳可靠性研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
(Li Zhen-hua. Study on fatigue life prediction and fatigue reliability of the metal structure of crane[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2009.)
- [17] 杨静. TBM 刀盘系统振动特性分析与掘进现场测试研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.
(Yang Jing. Vibration characteristics analysis of TBM cutter-head system and research on tunneling testing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.)