

# 空间多点分布载荷下 TBM 刀盘应力强度因子分析

赵健,凌静秀,柳世鸣,吴勉

(福建理工大学 机械与汽车工程学院,福建 福州 350118)

**摘要:**以某实际工程刀盘为例,利用 ANSYS Workbench 对 TBM 刀盘结构在典型工况下进行静力学分析,得到 3 处薄弱位置,在刀盘薄弱位置引入预制裂纹,后改变裂纹形状比,得到不同位置裂纹随形状比改变时应力强度因子的分布变化。结果表明,正滚刀刀座处主要裂纹是开裂式且主要往深度方向扩展,边滚刀刀座处第一种裂纹类型应力强度因子呈现负值,而后两种裂纹数值都在  $6 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$  以下,说明裂纹扩展不是该处的主要失效形式。该研究可为刀盘设计过程中裂纹扩展和寿命预测领域提供参考,对延长刀盘寿命,减少工程中的经济损失有重要意义。

**关键词:** TBM 刀盘;静力学分析;应力强度因子

中图分类号: U455.39

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)06-0560-07

## Stress intensity factor analysis of TBM cutter under spatial multi-point distributed loading

ZHAO Jian, LING Jingxiu, LIU Shiming, WU Mian

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** Taking a practical engineering cutterhead as an example, the static analysis of TBM cutterhead structure under typical working conditions was carried out by ANSYS Workbench, and three weak positions were obtained. Prefabricated cracks were introduced at the weak positions of the cutter, and the crack shape ratio was changed afterward, so as to get the distribution change of stress intensity factor at different positions of cracks with the change of the shape ratio. Results show that the main cracks at the positive hobbing cutter seat are open cracks and mainly expand in the depth direction, the first crack type at the side hobbing cutter seat shows negative stress intensity factor, and the last two cracks are below  $6 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ , indicating that crack propagation is not the main failure form at this location. This study can provide reference for the field of crack propagation and life prediction in the design process of cutterhead, which is of great significance to extend the life of cutterhead and reduce the economic loss in engineering.

**Keywords:** TBM cutterhead; static analysis; stress intensity factor

刀盘作为 TBM 的关键主承力部件,其结构复杂,最常见的失效形式有大面积磨损和疲劳裂纹失效<sup>[1]</sup>。应力强度因子是对裂纹尖端区域应力分布的描述,可用于评估结构是否处于不稳定的扩展状态,是评估裂纹结构寿命的重要参数。

近年来,国内外学者在裂纹扩展方面开展了

大量研究。肖汉斌<sup>[2]</sup>通过用红外热像法监测金属结构的温度实现裂纹扩展的评估。张亚军<sup>[3]</sup>通过试验,得出不同金属合金在 Paris 公式中的常数  $C$  和  $m$  的线性关系。朱晔<sup>[4]</sup>等应用三维裂纹扩展仿真,分析了多裂纹扩展形式对裂纹扩展参数的影响。王丁<sup>[5]</sup>研究了干扰裂纹的尺寸参数、

收稿日期:2024-03-29

基金项目:中国博士后科学基金自助项目(2020M671956)

第一作者简介:赵健(1999—),男,浙江宁波人,硕士研究生,研究方向:机械设计及理论。

通信作者:凌静秀(1985—),男,浙江温州人,副教授,博士,研究方向:机械系统动力学、复杂机械设备的疲劳寿命预测、振动和损伤探测。

位置角的影响,结果表明干扰裂纹位置角在  $115^{\circ} \sim 155^{\circ}$  之间会抑制裂纹的扩展。

在刀盘裂纹方面,国内外相关学者已开展了大量研究工作,并取得了一定的研究成果。Sun<sup>[6]</sup>在 TBM 刀盘服役后进行裂纹取样及断裂破坏研究,并建立了三维有限元裂纹扩展模型,用于计算动载荷下的裂纹扩展,验证了计算方法的准确性。Wang Ding<sup>[7]</sup>对 TBM 刀盘主要受力部分进行疲劳可靠性测试,并利用子建模技术计算了刀盘裂纹的应力强度因子,深入分析了裂纹扩展机理和损伤特征。凌静秀<sup>[8]</sup>等对于复杂应力状态下刀盘裂纹进行有限元分析,结果表明裂纹位置在  $45^{\circ}$  和  $135^{\circ}$  时,裂纹尖端的等效应力强度因子最大。Li<sup>[9]</sup>提出了对有裂纹刀盘的疲劳可靠性分析方法,研究结果表明,过载和初始裂纹尺寸对刀盘的裂纹扩展寿命和可靠性有很大影响。刘建琴<sup>[10]</sup>通过在裂纹中心附近安装止裂板,使裂纹宽度和深度止裂系数分别提升 28.42% 和 27.86%。

综上所述,国内外学者在裂纹扩展和刀盘裂纹方面进行了大量研究,但对刀盘薄弱处裂纹几何形状参数对于裂纹扩展的影响提及较少。本文拟在刀盘正常工作时的最大应力和最大变形处,引入初始裂纹,计算裂纹尖端应力强度因子。模拟 TBM 刀盘在实际工作中裂纹尖端应力强度因子分布规律。

## 1 刀盘静力学分析

刀盘模型如图 1 所示。在 ProE 中按实际尺寸 1:1 建立 TBM 刀盘的三维模型,在不影响结果的前提下进行适当的简化,以降低运算压力,提高计算速度。分体块与中心块通过捆绑连接,整个刀盘可视为一个整体。

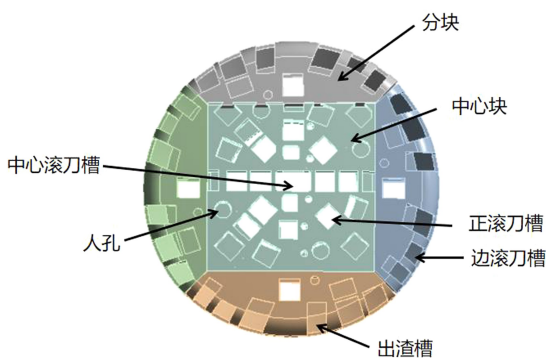


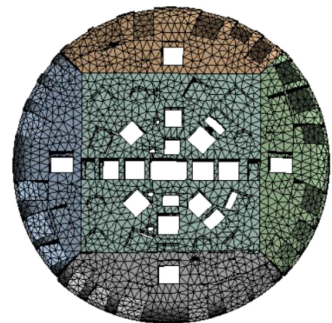
图 1 TBM 刀盘模型

Fig.1 TBM cutterhead model

将上述模型导入 ANSYS Workbench 中,检查零件和构件有无丢失,模型完整。定义材料为 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,屈服强度为 345 MPa,极限拉伸强度为 500 MPa。根据以往工程经验,选取 8 r/min 的刀盘转速、0.8 mm/s 的掘进速度为最大推力工况,根据文献<sup>[11]</sup>求出的滚刀破岩载荷如表 1 所示,对刀盘不同的滚刀槽分别施加正滚刀、边滚刀和中心滚刀载荷。刀盘实际运动时,由法兰盘和支撑系统相连接,因此在法兰盘上施加固定约束。刀盘以四面体单元划分,总单元数 59 108 个,总节点数为 122 391 个,如图 2 所示。

表 1 滚刀载荷  
Tab.1 Cutter load

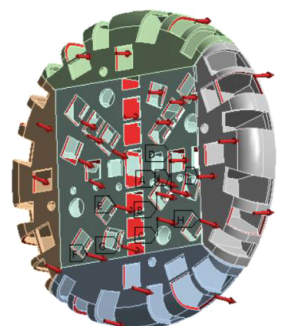
刀圈类型	垂直力	侧向力	滚动力
中心滚刀	250	24.0	37.5
正滚刀	299	29.9	44.9
边滚刀	249	68.9	36.9



(a) 刀盘网格划分

A: Static Structural  
Static Structural  
Time: 1. s  
Items: 10 of 34 indicated  
2023/2/20 14:52

- 1 Force: 2.5393e+005 N
- 2 Force: 3.0383e+005 N
- 3 Force: 3.0383e+005 N
- 4 Force: 3.0383e+005 N
- 5 Force: 3.0383e+005 N
- 6 Force: 3.0383e+005 N
- 7 Force: 3.0383e+005 N
- 8 Force: 3.0383e+005 N
- 9 Force: 3.0383e+005 N
- 10 Force: 3.0383e+005 N



(b) 刀盘边界条件及载荷施加

图 2 刀盘网格划分及边界条件图

Fig.2 Mesh delineation and boundary condition diagram of cutterhead

图 3 为刀盘静力学分析的等效应力和等效变形图,最大应力为 52.26 MPa,出现在支撑筋与刀盘板面结构处,其最大应力小于材料的屈服强度;最大变形量为 0.33 mm,出现在正滚刀两侧安装处。分析结果表明,刀盘的支撑筋与刀盘板面结合处、正滚刀刀座安装处容易发生疲劳失效。

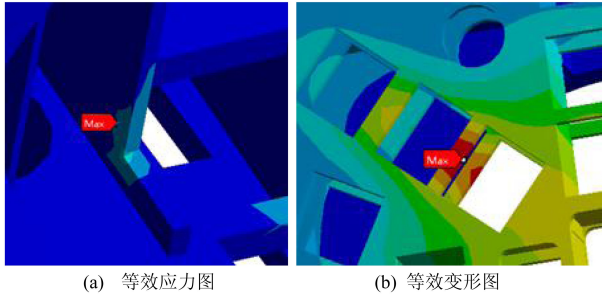


图 3 TBM 刀盘等效应力与等效变形图

Fig.3 Equivalent stress and equivalent deformation diagram of TBM cutterhead

## 2 刀盘应力强度因子分析

应力强度因子为判断裂纹疲劳扩展的重要参数之一,它表示受外力作用的弹性体裂纹尖端附近的应力场强度。一般来说,裂纹开裂分为张开型(I型)、滑开型(II型)和撕开型(III型)3种,如图 4 所示;裂纹扩展呈半椭圆形,如图 5 所示。而张开型裂纹在刀盘上最为常见,应力强度因子可表示为:

$$K_I = \zeta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

式中,  $\zeta$  为裂纹类型、构件形状和加载方式有关的形状系数;  $\sigma$  为外界施加的应力, MPa;  $a$  为裂纹尺寸, mm。

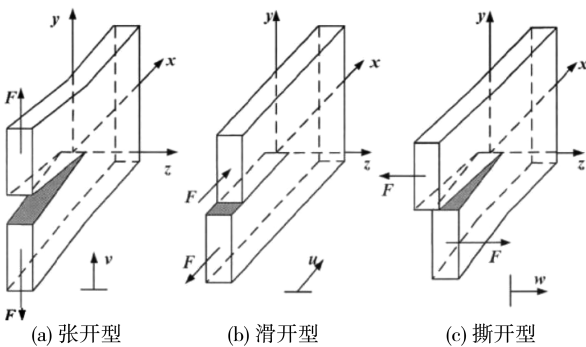


图 4 3 种裂纹类型

Fig.4 Three types of cracks

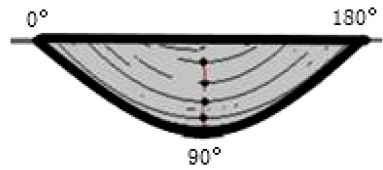


图 5 裂纹扩展方向

Fig.5 Crack propagation direction

以线弹性断裂力学作为基础,裂纹尖端应力强度因子公式如下:

$$\begin{cases} u \\ v \\ w \end{cases} = \frac{K_I}{4G\sqrt{2\pi}} \begin{cases} (2k-1)\cos\frac{\theta}{2} - \cos\frac{3\theta}{2} \\ (2k+1)\cos\frac{\theta}{2} - \cos\frac{3\theta}{2} \\ 0 \end{cases} + \frac{K_{II}}{4G\sqrt{2\pi}} \begin{cases} (2k+3)\sin\frac{\theta}{2} + \sin\frac{3\theta}{2} \\ (3-2k)\cos\frac{\theta}{2} - \cos\frac{3\theta}{2} \\ 0 \end{cases} + \frac{K_{III}}{4G\sqrt{2\pi}} \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 8\sin\frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $u, v, w$  分别为裂纹尖端经向、法向、切向位移, mm;  $r$  为坐标系中的分量, mm;  $\theta$  为坐标系中的分量, rad;  $G$  为剪切模量, GPa;  $k$  为与材料有关的常数;  $K_I, K_{II}, K_{III}$  分别为 I 型、II 型、III 型的应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ ; 平面应变问题:  $k = 3 - 4\nu$ ; 而平面应力问题:  $k = (3 - \nu)(1 + \nu)$ 。

若已知上、下裂纹表面 ( $\theta = \pm\pi$ ) 的某一点位移分量,则可以导出:

$$\begin{cases} K_I \\ K_{II} \\ K_{III} \end{cases} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{2G}{k+1} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \begin{cases} v \\ u \\ (k+1)w/4 \end{cases} \Big|_{\theta=\pm\pi} \quad (3)$$

上述方法的优点是可以与有限元方法相结合,在三维裂纹扩展中,计算出裂纹尖端的应力、应变状态,其中平面应变占据了裂纹尖端的大部分,而平面应力状态存在于裂纹尖端自由表面以下的极小区域。对于平面应变状态,张开型裂纹的应力强度因子  $K_I$  可用裂纹面的位移表示。

$$K_I = \frac{E\nu}{4(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \quad (4)$$

由于 TBM 刀盘处于空间多点分布载荷的共同作用下,故可采用复合等效应力强度因子作为裂纹扩展的判据指标,公式如(5) [12-13]。

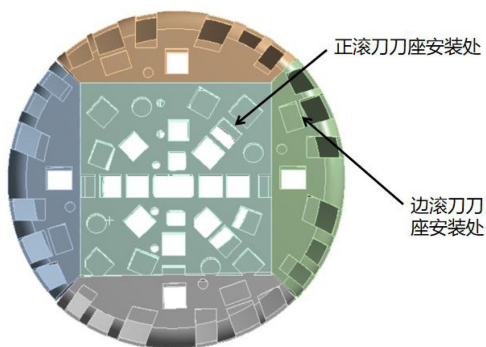
$$K_{eq} = \sqrt{(K_I + K_{II})^2 + K_{III}^2 / (1 - \nu)} \quad (5)$$

准确地确定裂纹扩展阶段的位置是研究 TBM 刀盘应力强度因子的首要条件。根据上述静力学分析,选取最大应力、最大变形、边滚刀刀座位置,基于上述公式在 ANSYS Workbench 中 Fracture 模块插入裂纹,如图 6 所示。其位置的应力和变形如表 2 所示。

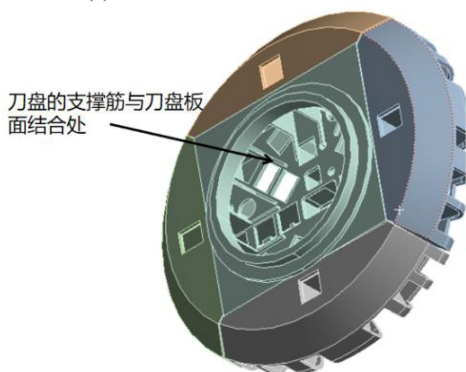
表 2 裂纹引入位置处的应力和变形表

Tab.2 Table of stresses and deformations at crack introduction position

位置	应力/MPa	变形/mm
正滚刀刀座安装处	56.28	0.33
边滚刀刀座安装处	20.37	0.18
刀盘支撑筋与板面结合处	176.07	0.06



(a)滚刀安装处裂纹位置



(b)刀盘支撑筋与面板处裂纹位置

图 6 裂纹插入位置示意图

Fig.6 Schematic diagram of crack insertion position

裂纹长半轴为  $c$ ,短半轴为  $a$ ,裂纹的长半轴方向垂直于结合面。裂纹尖端最深处的应力强度因子为  $K_{\sigma}$ ,裂纹表面自由端的应力强度因子为  $K_{\sigma}$ ,两者共同构成了裂纹两端扩展的驱动力。

采用上述半椭圆裂纹插入 TBM 刀盘所选取

位置,采用四面体单元进行刀盘整体的网格划分,如图 7 所示。在裂纹区域引入奇异单元,用于模拟刀盘裂纹尖端的奇异区域,边界条件和静力学分析相同。椭圆裂纹共划分为 30 等分,31 个节点。每个节点可以求出相对应的应力强度因子,共得到 31 个应力强度因子。

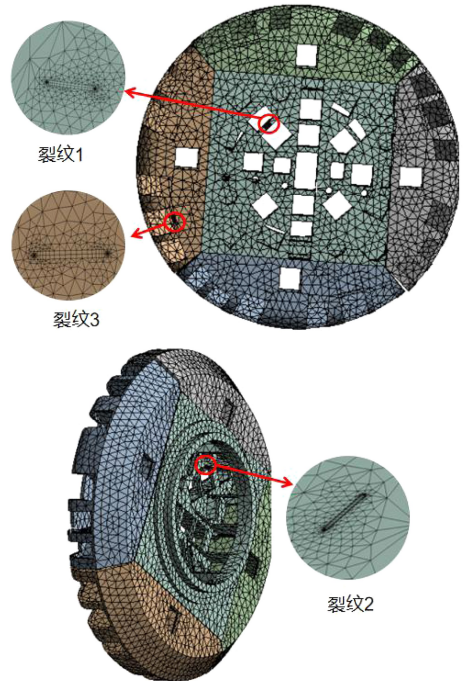


图 7 插入裂纹的网格划分

Fig.7 Mesh division of inserted cracks

以含有相同裂纹尺寸的刀盘模型作为研究对象,探讨裂纹 I、II、III 型应力强度因子的变化规律。对刀盘的正滚刀刀座、边滚刀刀座、支撑筋与版面结合处引入不同类型的裂纹,通过数值计算,研究不同位置处不同裂纹的应力强度因子变化规律,使半椭圆形裂纹长度  $c = 20 \text{ mm}$  保持不变,改变裂纹的形状比,使裂纹的  $a/c$  比分别为 0.2、0.4、0.7、0.8、1,得出结果进行比较。

正滚刀刀座安装位置设置裂纹单元,依次改变裂纹形状比,计算所得的裂纹应力强度因子如图 8 所示。

由图 8 可见, I 型裂纹应力强度因子的数值远大于 II 型和 III 型裂纹应力强度因子,此处的裂纹类型主要是开裂型。

(1) I 型裂纹在  $a/c = 0.2$ 、角度为  $90^\circ$  时,应力强度因子最大,即向椭圆弧弧顶方向,为  $126.6 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ ,说明裂纹主要向着深度方向扩展;当  $a/c = 1$  时,最大应力出现在裂纹两端,其最大

值为  $164.7 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ , 说明裂纹主要向着长度方向扩展。

裂纹的形状较扁平, 那么 III 型应力强度因子受到的影响就比较大。

在刀盘的支撑筋与刀盘板面结合处设置裂纹单元, 改变裂纹形状比, 计算所得的应力强度因子如图 9 所示。

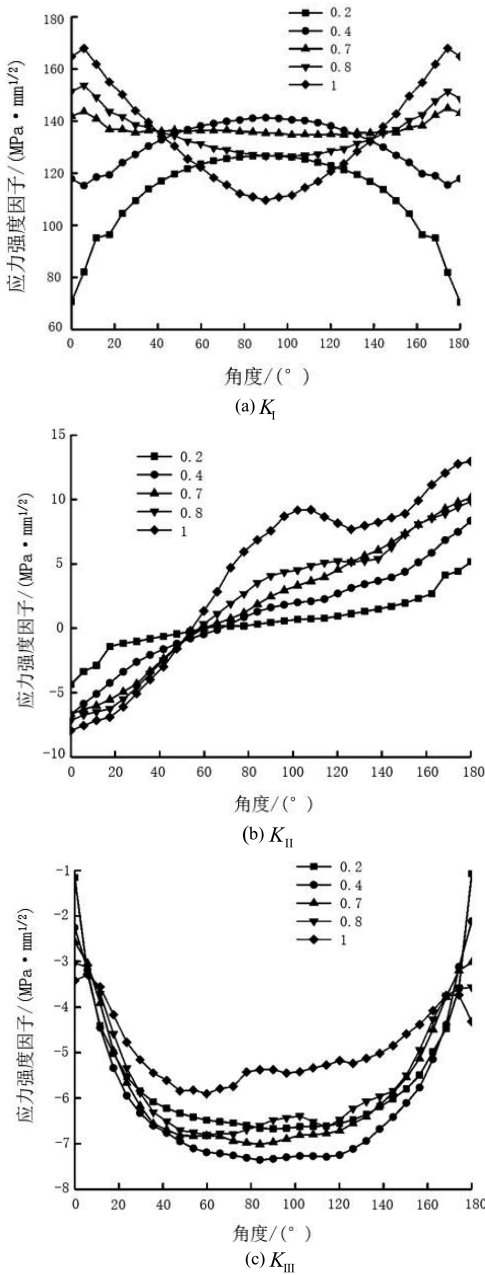


图 8 正滚刀刀座安装位置处裂纹应力强度因子

Fig.8 Crack stress intensity factor at positive cutter tool holder mounting location

(2) II 型裂纹, 说明此处形状比对裂纹的影响较小, 只是在裂纹滑开方向发生了改变。

(3) III 型裂纹的应力强度因子数值均为负值, 且都维持在一个相对较小的范围内波动, 在  $90^\circ$  基本展现出对称性, 裂纹的形状越接近圆形, III 型应力强度因子受到的影响就越小; 相反, 如果

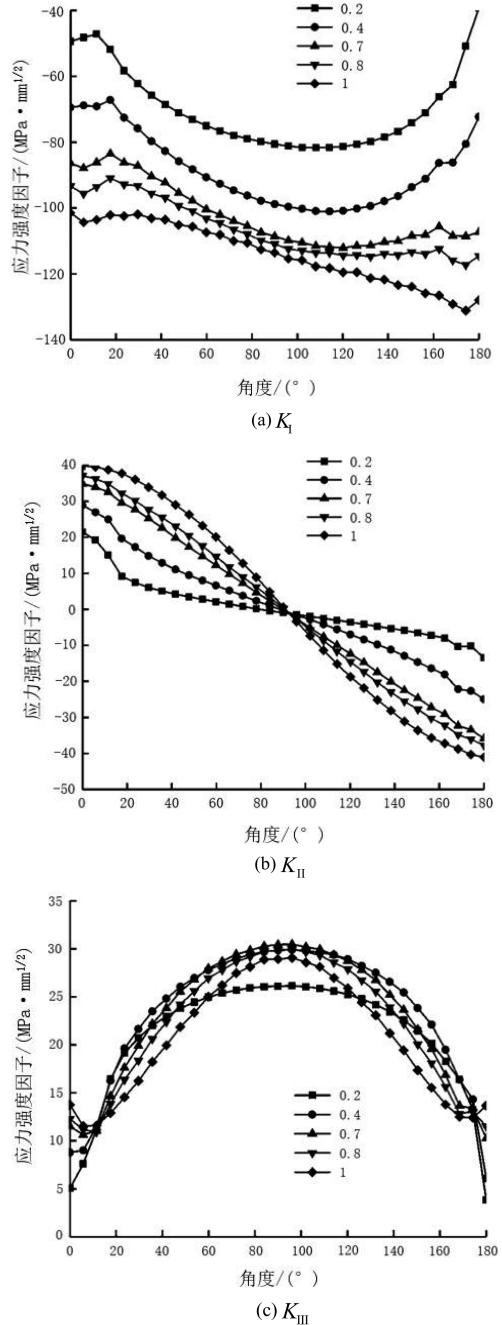


图 9 支撑筋与板面结合处裂纹应力强度因子

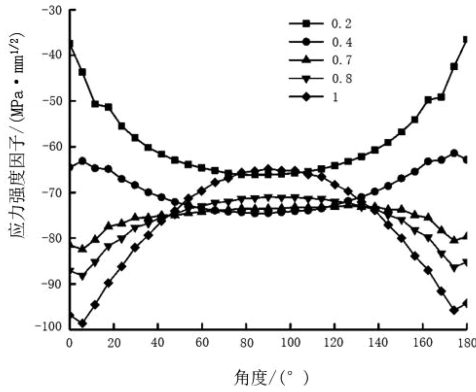
Fig.9 Crack stress intensity factor at junction of supporting bar and slab surface

从图 9 可知:

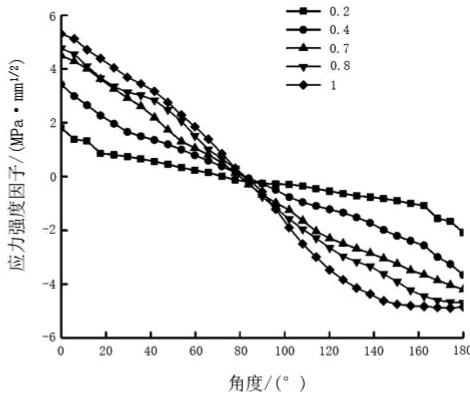
(1) I 型应力强度因子呈现负值, 说明两端

受挤压。除  $a/c=1$  外,其他形状比都呈现先增后减趋势,说明随着  $a/c$  比的增大其挤压程度也越大。

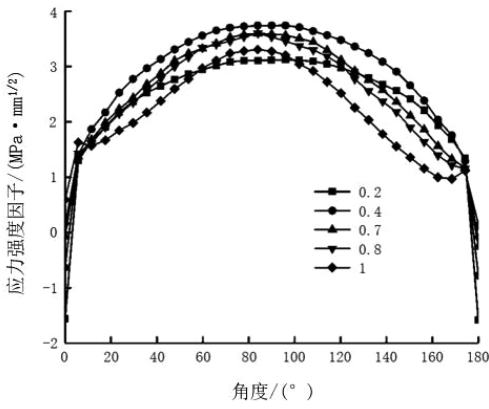
(2) II 型应力强度因子在角度为  $90^\circ$  时,呈现中心对称,表明前后滑移方向发生了改变,角度为  $90^\circ$  前, $a/c$  越大其应力强度因子也随之增大,说明裂纹形状越接近圆形越容易发生滑移。



(a)  $K_I$



(b)  $K_{II}$



(c)  $K_{III}$

图 10 边滚刀刀座安装处裂纹应力强度因子

Fig.10 Crack stress intensity factor at edge cutter holder installation

(3) III 型应力强度因子在角度为  $90^\circ$  时,呈现出对称,而且随着  $a/c$  的增大数值基本相同,说明此处发生左右的滑移裂纹,而且裂纹尖端处比裂纹两端的滑移程度更大。

在边滚刀刀座安装处设置裂纹单元,依次改变裂纹形状比,计算所得的应力强度因子如图 10 所示。

从图 10 中可以看出:

(1) I 型应力强度因子呈现负值,说明裂纹两端受挤压,当  $a/c$  小于 0.7 时,应力强度因子最大绝对值出现在角度为  $90^\circ$  的位置,而当  $a/c$  大于 0.7 时,最大绝对值出现在裂纹两端。

(2) II 型应力强度因子呈现中心对称,说明前后滑移方向发生了改变而且趋势为先减小后增大,随着  $a/c$  的增大,II 型应力强度因子也随之增大。

(3) III 型应力强度因子在角度为  $90^\circ$  时,呈现对称,且数值都较小。总体可看出,边滚刀刀座处 3 种类型裂纹的应力强度因子数值都较小,说明裂纹扩展并不是边滚刀刀座处主要的失效形式。

### 3 结论

1) 建立刀盘等效模型,根据刀盘系统外部载荷激励情况,在 ANSYS Workbench 中对刀盘进行静力学求解,得到最大应力为 52.26 MPa、最大变形量为 0.33 mm,其位置分别出现在支撑筋与刀盘板面结构处和正滚刀的刀座安装处。

2) 在正滚刀刀座处,I 型裂纹是主要开裂方式,且在  $a/c$  比为 0.2、角度在  $90^\circ$  时,应力强度因子最大,为  $126.6 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ ,说明此时裂纹往深度方向扩展。当  $a/c$  比为 1 时,裂纹两端的应力强度因子最大,为  $164.7 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ ,说明此时裂纹往长度方向扩展。支撑筋和板面结合处的 I 型裂纹,两端受挤压导致应力强度因子为负值。II 型裂纹随着  $a/c$  比增大,滑移程度加剧,III 型裂纹应力强度因子在角度为  $90^\circ$  时呈对称。边滚刀刀座处裂纹应力强度因子都处于较小范围,只有 I 型裂纹呈现负值,说明裂纹扩展不是该处的失效形式。从以上分析中可以得知,刀盘裂纹失效主要是 I 型裂纹。

## 参考文献:

- [1] 杨博文,霍军周,张伟,等.服役结构超前载荷实时预测方法的研究[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(4):541-550.
- [2] 肖汉斌,秦佳乐,祝锋,等.基于红外热像法的金属裂纹扩展研究[J].激光与红外,2023,53(1):64-69.
- [3] 张亚军,张欢耀,张云浩.金属材料疲劳裂纹扩展速率 Paris 模型中材料常数的相关性[J].材料开发与应用,2021,36(4):1-8.
- [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] 王丁,曲传咏.TBM 刀盘裂纹损伤特性及疲劳可靠性研究[J].应用力学学报,2024,41(1):121-128.
- [6] SUN W,ZHU Y,HUO J Z,et al. Multiple cracks failure rule for TBM cutterhead based on three-dimensional crack propagation calculation[J]. Engineering Failure Analysis,2018,93:224-240.
- [7] WANG D,QU C Y. Research on TBM cutterhead crack damage and fatigue reliability[J]. Applied Sciences,2021,11(5):2111.
- [8] 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.
- [9] LI J,ZHANG B,LYU D,et al. Fatigue reliability analysis of tunnelling boring machine cutterhead with cracks[J]. Engineering Failure Analysis,2022,141:106669.
- [10] 刘建琴,郭晓,闫康伟,等. TBM 刀盘裂纹分析及止裂方案研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(11):3428-3438.
- [11] 吴勉. TBM 刀盘结构多裂纹扩展机理及寿命预测方法[D].福州:福建工程学院,2023.
- [12] DEMIR O,AYHAN A O,IRIC S,et al. Evaluation of mixed mode-I/II criteria for fatigue crack propagation using experiments and modeling[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2018,31(7):1525-1534.
- [13] 胡金花,宋凯,熊礼明.考虑修正平均等效应力强度因子的焊点缺陷疲劳寿命研究[J].中国机械工程,2020,31(6):740-745.

(责任编辑:陈雯)

(上接第 559 页)

水溶液在加工蓝宝石的过程中有化学反应的发生,生成由  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ 、 $\text{AlOOH}$  组成的软质反应层,

最终通过磨料的机械作用去除,以获得超光滑表面。

## 参考文献:

- [1] ZHAI Q,ZHAI W J,DENG T H. Removal mechanism of the chemical products layer on single-crystal sapphire surface in magneto-rheological polishing with  $\text{Fe}_3\text{O}_3/\text{SiO}_2$  core-shell abrasives[J]. Applied Surface Science,2023,619:156778.
- [2] XU Y C,LIN C,WANG Q T,et al. A novel polishing process with rigid-flexible composite structure plate for sapphire wafer polishing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2022,122(2):659-668.
- [3] 许永超.混合磨料柔性抛光工具加工蓝宝石衬底技术研究[D].泉州:华侨大学,2017.
- [4] YIN D,NIU X H,ZHANG K,et al. Preparation of MgO doped colloidal  $\text{SiO}_2$  abrasive and their chemical mechanical polishing performance on c-,r- and a-plane sapphire substrate[J]. Ceramics International,2018,44(12):14631-14637.
- [5] 赵之琳,李薇薇,钱佳,等.不同粒径纳米二氧化硅磨料对蓝宝石 CMP 去除机制的影响[J].电镀与涂饰,2021,40(9):720-725.
- [6] ZHOU M F,CHENG Y Y,ZHONG M,et al. Macro and micro-nano machining mechanism for ultrasonic vibration assisted chemical mechanical polishing of sapphire[J]. Applied Surface Science,2023,640:158343.
- [7] XU W H,CHENG Y Y,ZHONG M. Effects of process parameters on chemical-mechanical interactions during sapphire polishing[J]. Microelectronic Engineering,2019,216:111029.
- [8] 林佳明.基于分子动力学仿真的蓝宝石去除机理研究[D].泉州:华侨大学,2021.
- [9] OSTADHOSSEIN A,KIM S Y,CUBUK E D,et al. Atomic insight into the lithium storage and diffusion mechanism of  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  electrodes of lithium ion batteries; ReaxFF reactive force field modeling[J]. The Journal of Physical Chemistry A,2016,120(13):2114-2127.
- [10] LIU Z S,ZHANG Z Y,FENG J Y,et al. A novel atomic removal model for chemical mechanical polishing using developed mesoporous shell/core abrasives based on molecular dynamics[J]. Nanoscale,2024,16(1):85-96.

(责任编辑:陈雯)