

滑动接触效应对裂纹尖端 J 积分值影响分析

闫玉涛, 钱晓林, 张毅博, 孙志礼

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 采用断裂力学和有限元法对无润滑摩擦条件下滑动接触效应对摩擦表面裂纹尖端 J 积分值的影响进行研究, 分别得到了不同摩擦因数、接触压力、裂纹长度和裂纹形态下裂纹尖端 J 积分值的变化规律。结果表明: 摩擦效应对裂纹尖端 J 积分值的影响因裂纹形态不同而变化; 对于竖直型裂纹, 摩擦效应的增加加剧了裂纹尖端 J 积分值的变化; 对于斜裂纹, 在滑动至裂纹附近时, 摩擦效应的增加减弱了裂纹尖端 J 积分值的变化。裂纹尖端 J 积分值波动幅度随着接触压力的增大而增大。相同接触压力和摩擦效应下, 裂纹与滑动速度方向的夹角越小, 裂纹尖端 J 积分值变化越显著。裂纹尖端 J 积分值随着裂纹深度的增加先增大后减小。

关 键 词: 滑动接触效应; 裂纹; J 积分; 有限元分析; 断裂力学

中图分类号: TB 125

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)12-1744-06

Analysis on Crack Tip J Integral Value Under Sliding Contact Effect

YAN Yu-tao, QIAN Xiao-lin, ZHANG Yi-bo, SUN Zhi-li

(School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: YAN Yu-tao, E-mail: ytyan@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The influence of sliding contact effect on crack tip J integral value was investigated by fracture mechanics and finite element analyses under dry friction. The variation regulation of crack tip J integral value under different friction coefficient, contact pressure, crack length and crack modality was obtained. The results show that the variation of crack tip J integral value is different with crack modality while the friction effect is considered. The increasing of friction effect aggravates variation of the crack tip J integral value for vertical crack. For oblique crack, the increasing of friction effect weakens variation of the crack tip J integral value in the vicinity of sliding to crack. The fluctuation range of crack tip J integral value increases with contact pressure increasing. The smaller the included angle between the direction of the sliding velocity and the crack, the more significantly the crack tip J integral value changes under the same contact pressure and frictional effects. The J integral value first increases and then decreases as the crack deepens.

Key words: sliding contact effect; crack; J integral; finite element analysis; fracture mechanics

表面裂纹是零件疲劳破坏的疲劳源, 穿透裂纹多由表面裂纹扩展而成, 失效模式影响因素对表面裂纹扩展导致的疲劳破坏至关重要^[1-2]。疲劳破坏和摩擦磨损失效是机械产品的两种主要失效形式, 随着机械制造业的发展, 单一从摩擦学观点或疲劳学观点对运行于摩擦条件下, 同时又产生和传递交变负荷的机械系统的损伤、寿命或极限状态进行评估都是不全面的^[3]。裂纹扩展规

律, 裂纹尖端区域弹塑性应力、应变场理论是断裂力学研究的问题, 表征裂纹尖端附近区域应力场强弱的参量主要是 J 积分、应力强度因子及能量释放率, 其中 J 积分是一个重要的参量。表面裂纹数值模拟分析方法有有限元法^[4-6], 边续位错环理论^[7], 能量释放率方法^[8]及权函数法^[1,9]等。有限元法是求解 J 积分和应力强度因子的有效方法, 断裂力学理论和有限元法已成为摩擦疲劳研

收稿日期: 2015-04-29

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(2013020034)。

作者简介: 闫玉涛(1970-), 男, 吉林磐石人, 东北大学副教授, 博士; 孙志礼(1957-), 男, 山东巨野人, 东北大学教授, 博士生导师。

究的有效手段^[10].

Abdelbary 等^[11]研究了干摩擦条件下聚酰胺疲劳磨损,结果表明应力比越小,表面裂纹对材料疲劳影响越显著. Benuzzi 等^[12]对滚动 - 滑动接触下表面裂纹的应力强度幅值和裂纹扩展方向进行研究,发现表面裂纹的角度、裂纹长度与接触区域的比、两物体之间的摩擦因数等对裂纹的扩展具有一定的影响. 王文健等^[13]研究了钢轨滚动接触疲劳损伤和磨损之间的作用关系,分析了磨损率对疲劳裂纹形成和扩展寿命的影响,当钢轨磨损严重时,斜裂纹损伤表现轻微,滚动疲劳损伤与磨损之间表现为相互竞争和制约关系,增加磨损率可以减轻钢轨滚动疲劳损伤. 赵荣国等^[14]通过疲劳裂纹扩展试验研究发现,随着应力强度因子增大,裂纹扩展路径由平直变得曲折,断裂表面呈现为解理断裂及疲劳条带模式. 目前的研究主要是针对载荷作用下的疲劳裂纹的萌生及扩展规律和磨损率对疲劳损伤的影响,而考虑滑动摩擦效应对裂纹扩展影响的研究较少. 摩擦疲劳学主要是研究摩擦效应与疲劳损伤交互作用下表面裂纹的萌生、扩展及零件使用寿命的预测,进而提出合理有效的控制措施.

本文采用断裂力学理论和有限元方法,针对无润滑摩擦条件下滑动接触效应对表面裂纹 J 积分值的影响及作用规律进行系统的理论分析,为摩擦疲劳的进一步研究奠定基础,研究结果也将有利于进一步研究表面裂纹扩展速率,为表面裂纹扩展寿命的预测提供基础.

1 模型建立

考虑滑动接触效应的影响,建立有限元分析模型如图 1a 所示. 上试件为边长 3 mm 正方形滑块,质量忽略,下试件为 12 mm × 10 mm 长方形,下试件顶端中间预制一微小裂纹(见图 1b),材料弹性模量为 2.06 GPa,泊松比为 0.3. 分析过程中,在上试件顶部施加接触压力,上试件底边与下试件顶边组成一滑动摩擦副,下试件两侧边和底边加固定约束边界条件,上试件沿其顶边作往复滑动. 滑动一个周期时间为 20 s,通过分析可得到各时间节点时裂纹尖端的 J 积分值. 选取 PLANE183 单元,通过对不同尺寸网格的尝试与对比分析,最终采用网格边长为 0.4 mm 对模型进行网格划分,并对裂纹尖端进行奇异化处理,计算结果更为精确.

考虑接触压力 P 、摩擦因数 f 、裂纹夹角 θ 及裂纹长度 a 对裂纹尖端 J 积分的影响,具体变量

参数和意义如表 1 和图 2 所示.

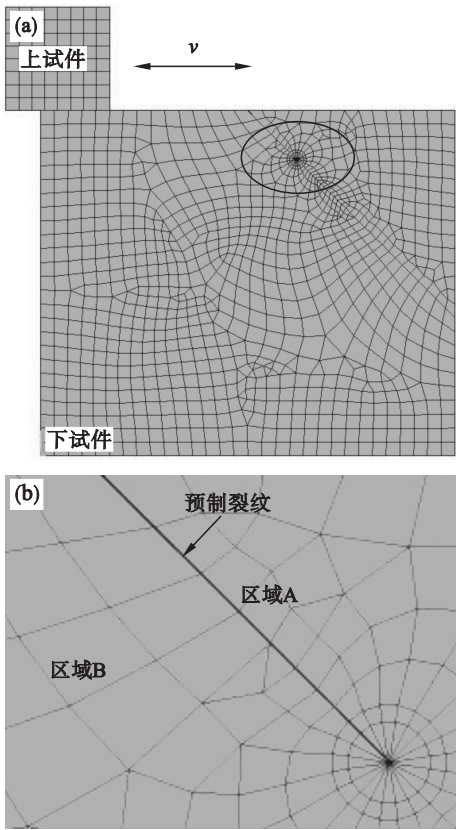


图 1 有限元模型和裂纹尖端局部放大图
Fig. 1 Finite element mesh and partial enlarged drawing of the crack tip
(a)—有限元模型; (b)—裂纹尖端.

表 1 参数设置 Table 1 Parameters setting			
参 数	数 值		
接触压力 P/MPa	100	300	500
摩擦因数 f	0	0.1	0.3
裂纹夹角 $\theta/(\text{^\circ})$	90	60	45
裂纹长度 a/mm	1	2	3

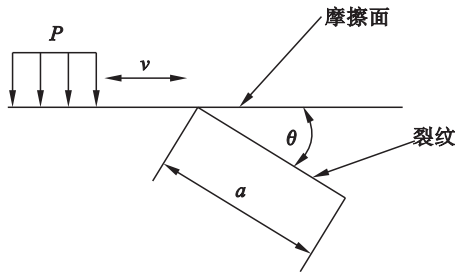


图 2 分析中的参数设置
Fig. 2 Parameters considered in the analyses

2 模型分析与验证

选取表 1 中参数 $f = 0.1$, $\theta = 90^\circ$, $a = 2\text{ mm}$, $P = 100$ 和 300 MPa , 根据文献[15]中应力强度因

子和 J 积分理论,通过 ANSYS 求解所建立有限元模型分析条件下的应力强度因子和 J 积分值,并利用应力强度因子与 J 积分的关系式将求得的应力强度因子转换成 J 积分值进行对比分析,计算结果如图 3 所示.图 3 中 A,B 线为接触压力 $P=100\text{ MPa}$ 时的 J 积分值, C,D 线为接触压力 $P=300\text{ MPa}$ 时的 J 积分值. A,C 线是通过 J 积分公式利用 ANSYS 直接求解得到的 J 积分值, B,D 线是利用 ANSYS 求解各个时间节点的应力强度因子转换后得到的 J 积分值.比较 A,B 线可以发现,两种分析方法得到的各个时间节点的 J 积分值基本保持一致,符合线弹性下的应力强度因子与 J 积分的关系.比较 C,D 线各个时间节点上的 J 积分值发现,应力强度因子转换的 J 积分值比通过 ANSYS 直接求得的 J 积分值小,最大误差为 45%,不符合线弹性下的应力强度因子与 J 积分的关系式.通过应力强度因子与 J 积分求解的对比分析可知,本文采用有限元模型和分析方法进行的裂纹尖端应力、应变场分析是正确有效的.根据研究需要,本文采用 J 积分作为考虑滑动接触效应对裂纹尖端影响分析参量.

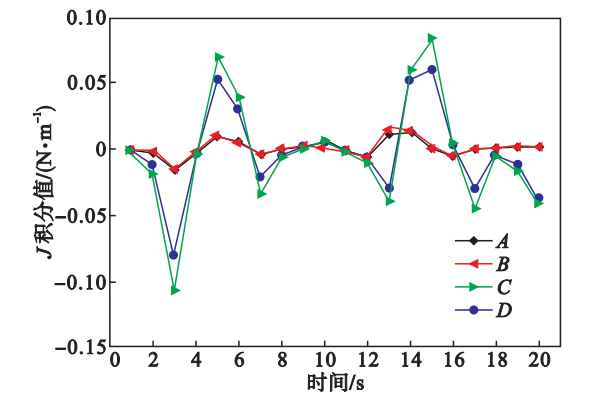


图 3 J 积分值对比分析

Fig. 3 Comparing analysis for J integral

3 结果分析与探讨

3.1 摩擦因数对 J 积分值影响

考虑摩擦因数条件下, J 积分值随时间变化规律如图 4 所示.可以看出,当裂纹与滑动速度方向垂直($\theta=90^\circ$)条件下,不考虑摩擦效应($f=0$)时,即只存在接触压力作用,裂纹为 II 型裂纹,在 1~4 s 内, J 积分为负值,原因是上试件施加的接触压力使裂纹表面发生挤压闭合滑移,在 3 s 时 J 积分值出现突变,是因为上试件距裂纹较远,接触压力效果不明显,但力矩较大,对裂纹具有一定滑开效应,随着上试件向裂纹靠近, J 积分值不断增

加.考虑摩擦效应($f\neq 0$)时,即接触压力和摩擦力同时作用,裂纹为 I- II 型复合裂纹,在 1~3 s 内, J 积分值减小,且随着摩擦力的增大,降低梯度增大.随着上试件向裂纹靠近, J 积分值不断增加,其增大梯度较不考虑摩擦效应时更显著,然后随着上试件远离裂纹区, J 积分值又经历先变小而后增加的变化规律.裂纹与滑动速度方向不垂直($\theta=45^\circ$)时, J 积分值变化规律与垂直条件下有较大差异.不考虑摩擦效应时,在 1~4 s 内, J 积分值基本为 0,对裂纹影响极小.随着上试件向裂纹靠近,上试件处于区域 B 内, J 积分值近似线性增大.当上试件滑至区域 A 内时, J 积分值减小,随着上试件继续滑动,在运动末端产生的力矩使裂纹又处于张开的态势, J 积分值变为正值.在返回时, J 积分值的变化规律为先减小后增大,上试件处于区域 A 内向裂纹靠近,接触压力的作用使裂纹趋于闭合状态,故在 12~15 s 内, J 积分值为负,对裂纹的起裂起到抑制作用,在 13 s J 积分值最小,原因是裂纹的倾斜使该时刻上试件刚好处于裂纹尖端正上方. J 积分值的波动幅度随着摩擦因数的增大而增大,但在远离裂纹中心区域时,摩擦因数对裂纹尖端的 J 积分值影响很小.

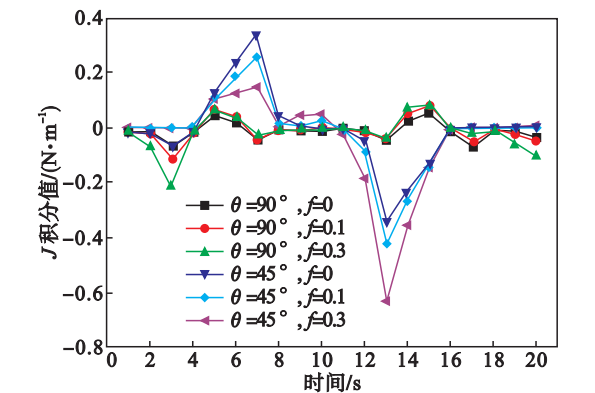


图 4 考虑摩擦效应下 J 积分值随时间变化
($P=300\text{ MPa}$, $a=2\text{ mm}$)

Fig. 4 Variation of J integral with time under friction effect
($P=300\text{ MPa}$, $a=2\text{ mm}$)

分析认为:考虑摩擦效应时,上试件产生的摩擦效应促使裂纹闭合,接触压力作用效果使裂纹张裂,故上试件第一次滑过裂纹前,摩擦效应与接触压力对裂纹扩展的影响是负向效应.当上试件滑过裂纹时,摩擦效应与接触压力作用效果都是促使裂纹张裂,对裂纹扩展起到正向效应,故在 10 s 时考虑摩擦的 J 积分值大于不考虑摩擦的 J 积分值.返程时,上试件处于区域 A 时,摩擦效应与滑块接触压力的作用效果都是使裂纹处于闭合态势, J 积分值减小剧烈.上试件滑入区域 B 时,

摩擦效应与接触压力作用使裂纹张裂,故 J 积分值逐渐变大,且大于同时节点不考虑摩擦效应的 J 积分值。

3.2 接触压力对 J 积分值影响

图 5 所示为考虑接触压力变化下, J 积分值随时间的变化规律。可以看出,不考虑摩擦效应时,不同接触压力作用下的一个往复周期内, J 积分值的变化规律基本相同,但 J 积分值的波动幅度随着接触压力的增大而增大。随着接触压力的增加,裂纹尖端开始由线弹性向弹塑性转变,接触压力对裂纹的挤压和张裂效应的影响趋于显著。考虑摩擦效应时, J 积分值的变化规律与不考虑摩擦效应时基本相同,只是 J 积分值的波动幅度变大,这主要是摩擦效应的叠加作用所致。返回时,上试件通过裂纹上方时的 J 积分值较大,说明接触压力对裂纹尖端的应力应变场的作用大于摩擦效应。摩擦因数相同时,接触压力越大,摩擦效应越显著,如在 5 s 时,对比分析 500 MPa 与 300 MPa 作用下 J 积分的差值,不考虑摩擦效应时为 $0.088\ 2\ \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$,考虑摩擦效应时为 $0.124\ \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$,可见当接触压力为 500 MPa 时,摩擦效应对裂纹扩展的影响更大。

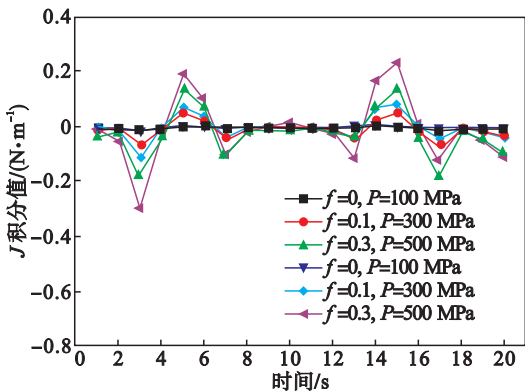


图 5 考虑接触压力下 J 积分值随时间变化 ($\theta=90^\circ, a=2\ \text{mm}$)
Fig. 5 Variation of J integral with time under contact pressure ($\theta=90^\circ, a=2\ \text{mm}$)

3.3 裂纹与滑动速度方向夹角对 J 积分值影响

图 6 所示为考虑裂纹与滑动速度方向夹角变化时, J 积分值随时间变化规律。可以看出,裂纹与滑动速度方向的夹角越小,裂纹尖端的 J 积分值波动越显著,斜裂纹与垂直裂纹 J 积分值的变化规律表现出一定的差异,但斜裂纹 ($\theta=45^\circ$ 和 60°) 的 J 积分值变化规律是一致的,在一个往复周期内的 4 ~ 8 s 和 12 ~ 16 s 时间内, J 积分值变化显著,主要原因是当裂纹倾斜时,裂纹尖端更接近摩擦效应和接触压力作用面,接触压力宏观应

力场大,在往复滑动时,当上试件向接近裂纹区域运动(前进阶段区域 B,返回阶段区域 A)时,摩擦效应与接触压力作用效应都是使裂纹闭合。当上试件向远离裂纹区域运动(前进阶段区域 A,返回阶段区域 B)时,摩擦效应与接触压力作用效应都是使裂纹张裂。返回时,对于上试件滑过相同位置时的 J 积分值比前进时变化显著,说明上试件滑过一次后在裂纹尖端产生了反向的塑性区。对于垂直裂纹, J 积分值的最大值出现在上试件经过裂纹正上方的位置,说明接触压力对垂直裂纹闭合/张裂的影响更显著。

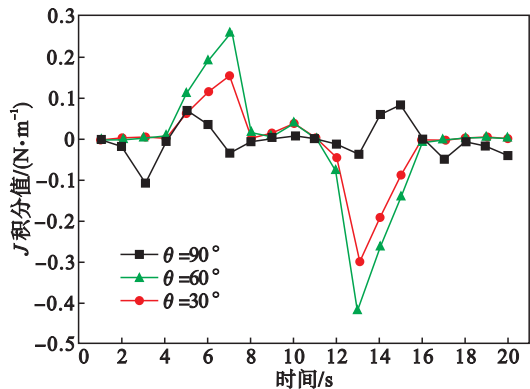


图 6 考虑裂纹夹角下 J 积分值随时间变化 ($P=300\ \text{MPa}, a=2\ \text{mm}, f=0.1$)
Fig. 6 Variation of J integral with time under crack angle ($P=300\ \text{MPa}, a=2\ \text{mm}, f=0.1$)

3.4 裂纹长度对 J 积分值影响

图 7 所示为考虑裂纹长度变化时, J 积分值随时间的变化规律。可以看出,随着裂纹长度的增大, J 积分值先减小后增大,裂纹长度为 2 mm 时, J 积分值波动最大,而在裂纹长度为 1 mm 和 3 mm 时, J 积分值波动则相对较弱,裂纹长度对裂纹尖端应力场的影响是非线性关系。返回时裂纹正上方的 J 积分值大于前进时的值,说明分析条件下,每滑过一次,摩擦效应和接触压力对裂纹尖端应力场产生极大的影响,出现了塑性滑移和变形区域。分析认为:摩擦效应产生的剪应力作用于滑动接触表面,接触压力的作用随裂纹长度的增加而减弱,摩擦效应与接触压力的协同作用相互叠加,使得裂纹尖端应力场表现出先增后减的趋势。上试件接近裂纹前,两者作用使裂纹闭合,远离裂纹时,两者作用使裂纹张裂。

3.5 机理探讨

通过结果分析可知:在摩擦效应和接触压力共同作用下,考虑摩擦效应,第一个波峰处 J 积分值小于无摩擦效应值,摩擦效应导致的裂纹尖端区域的塑性流动促使裂纹闭合,接触压力使裂纹

产生塑性滑移,形成塑性变形区域,裂纹尖端出现钝化现象,上试件第一次滑过裂纹前,摩擦效应与接触压力对裂纹尖端影响是负向效应.当上试件滑过裂纹时,摩擦效应与接触压力促使裂纹张裂,对裂纹扩展起到正向效应,同时在裂纹尖端附近形成一个小区域残余应力场,加快了裂纹的张裂,但随着上试件的继续滑移,裂纹张裂的迟滞效应出现, J 积分值又出现下降趋势.上试件在返回过程中处于裂纹前端时,摩擦效应和接触压力的作用都是促使裂纹区域闭合,裂纹出现塑性滑移和裂纹尖端钝化,对裂纹起裂的影响小,但由于上一次滑过时对裂纹尖端性能的影响,使得 J 积分值的减小更显著.当上试件滑过裂纹时,摩擦效应与接触压力的作用都是使裂纹张裂的正向效应, J 积分值逐渐增大,并且大于相同时间节点不考虑摩擦效应值,可以发现,本文研究条件下,同时间节点的 J 积分值随着滑动次数的增加而增加.

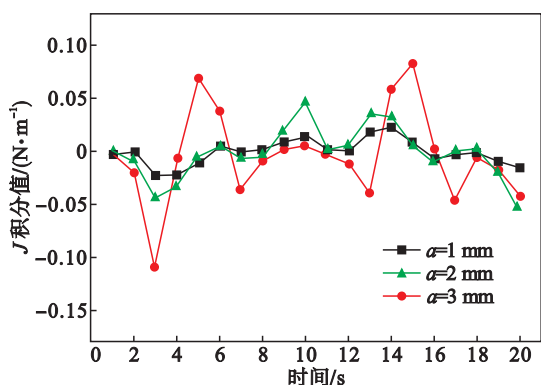


图 7 考虑裂纹长度下 J 积分值随时间变化
($P=300$ MPa, $\theta=90^\circ$, $f=0.1$)

Fig. 7 Variation of J integral with time under crack length
($P=300$ MPa, $\theta=90^\circ$, $f=0.1$)

本文中计算得到了不同状态下各个时间节点的 J 积分值,利用 J 积分准则,可以进行裂纹扩展的评定,为裂纹扩展速率及寿命预测提供理论基础,对工程中处于摩擦疲劳工作条件下含裂纹零件剩余寿命评估具有指导意义.

4 结 论

1) 裂纹与滑动速度方向垂直条件下,不考虑摩擦效应时,裂纹扩展趋势为 II 型裂纹.考虑摩擦效应时,裂纹扩展为 I - II 型复合裂纹, J 积分值随滑动时间先减小后增大,主要是由于摩擦效应使裂纹先闭合,而后又使裂纹张裂.当裂纹与滑动速度方向处于非垂直状态时,只有接触压力在裂纹附近时, J 积分值出现显著变化,而在远离裂纹

区域, J 积分值基本为零,主要是由于摩擦效应与接触压力在滑向裂纹时起负向效应,而在滑过裂纹时起正向效应.

2) J 积分值随接触压力的增大而增大,考虑摩擦效应影响情况下, J 积分值的波动更显著,接触压力越大,摩擦效应对裂纹扩展的影响越大.

3) 裂纹与滑动速度方向的夹角越小,裂纹尖端 J 积分值波动越大,夹角越小,裂纹尖端越接近摩擦表面,摩擦效应与接触压力的作用效果越显著, J 积分值减小幅度越显著.

4) 裂纹尖端 J 积分值随着裂纹长度的增加呈现先增大后减小变化趋势,裂纹长度为 2 mm 时, J 积分值波动最大,而裂纹长度为 1 mm 和 3 mm 时, J 积分值波动则相对较弱,摩擦效应产生的剪应力作用于滑动表面,接触压力作用效果随裂纹深度增加而减小.

5) 摩擦效应与接触压力共同作用下,裂纹尖端出现了塑性滑移和塑性变形区域,且在一定的条件下出现了钝化现象.

参考文献:

- [1] Sosnovskiy L A. Tribo-fatigue; wear-fatigue damage and its prediction[M]. Berlin: Springer, 2005: 119 - 145.
- [2] 张斌,郭万林.考虑闭合效应和三维应力约束的表面裂纹扩展模拟[J].计算力学学报,2005,22(6):716 - 721.
(Zhang Bin, Guo Wan-lin. Numerical simulation of surface crack propagation considering the crack closure effects and the three-dimensional stress constraints[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2005, 22(6): 716 - 721.)
- [3] 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.
- [4] Lin X B, Smith R A. Finite element modeling of fatigue crack growth of surface cracked plates. Part II: crack shape change[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 63(5): 523 - 540.
- [5] Lin X B, Smith R A. Finite element modeling of fatigue crack growth of surface cracked plates. Part III: stress intensity factor and fatigue crack growth life[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 63(5): 541 - 556.
- [6] Dai D N, Hills D A, Nowell D. Modelling of growth of three-dimensional cracks by a continuous distribution of dislocation loops[J]. Computational Mechanics, 1997, 19(6): 538 - 544.
- [7] Hwang C G, Ingraffea A R. Shape prediction and stability analysis of mode-I planar cracks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71(12): 1751 - 1777.
- [8] Daniewicz S R. A modified strip-yield model for prediction of plasticity-induced in surface flaws[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1998, 21(7): 885 - 901.
- [9] Kim J H, Lee S B. Prediction of crack opening stress for part-through cracks and its verification using a modified strip-yield model[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 66(1):

1-14.

[10] 薛玉君,程先华,黄文振.断裂力学和有限元法在疲劳磨损研究中的应用[J].机械强度,2001,23(3):365-368.
(Xue Yu-jun, Cheng Xian-hua, Huang Wen-zhen. Applications of fracture mechanics and finite element method in fatigue wear[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2001, 23(3):365-368.)

[11] Abdelbary A, Abouelwafa M N, Fahham I M E, et al. The influence of surface crack on the wear behavior of polyamide 66 under dry sliding condition [J]. *Wear*, 2011, 271(9/10): 2234-2241.

[12] Benuzzi D, Bormetti E, Donzella G. Stress intensity factor range and propagation mode of surface cracks under rolling-sliding contact [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2003, 40(1):55-74.



(上接第 1743 页)

3 结 论

- 1) 椰壳活性炭在经过 950 ℃ 的高温改性后,比表面积由 918 m²/g 提升至 2 544 m²/g;同时,表面孔径分布得到优化,孔含量大幅增加,其中以 7~10 nm 的中孔为主,并具有去除活性炭表面杂质的作用。
- 2) 高温改性前后的椰壳活性炭的表面官能团种类没有发生变化,表明高温改性后椰壳活性炭的结构没有发生变化,所以能够在铝电解质熔盐中维持稳定的内部结构。
- 3) 吸附实验表明,椰壳活性炭对熔盐中的 K⁺ 具有一定的吸附能力,在吸附时间达到 35 min 时,吸附达到平衡,所得 K⁺ 最大吸附量为 20.8 mg/g。通过对吸附过程实验数据的分析计算,可以确定椰壳活性炭在铝电解质熔盐中吸附 K⁺ 的吸附动力学过程符合准二级动力学模型,吸附过程可在短时间内达到平衡。

参考文献:

[1] Yang J, Hryn J N, Krumdick G K. Aluminium electrolysis tests with inert anodes in KF-AlF₃-based electrolytes [J]. *Light Metals*, 2006, 3(2):421-424.

[2] Zaikov Y, Chuikin A, Redkin A, et al. Interaction of heat resistance concrete with low melting electrolyte KF-AlF₃ (CR=1.3) [J]. *Light Metals*, 2007, 4(2):369-372.

[3] Fernandez R, Grjothem K, Ostvold T. Physicochemical properties of cryolite and cryolite alumina melts with KF additions. 1. Temperatures of primary crystallization [J]. *Light Metals*, 1985, 2(2):501-506.

[13] 王文健,郭俊,刘启跃,等.磨损对钢轨滚动接触疲劳损伤的影响[J].机械工程材料,2010,34(1):17-19,23.
(Wang Wen-jian, Guo Jun, Liu Qi-yue, et al. Effect of wear on rolling contact fatigue of rail [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2010, 34(1):17-19, 23.)

[14] 赵荣国,罗希延,任璐璐,等.航空发动机涡轮盘用 GH4133B 合金疲劳裂纹扩展行为研究[J].机械工程学报,2011,47(18):55-65.
(Zhao Rong-guo, Luo Xi-yan, Ren Lu-lu, et al. Research on fatigue crack propagation behavior of GH4133B superalloy used in turbine disk of aero-engine [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(18):55-65.)

[15] 程靳,赵树山.断裂力学[M].北京:科学出版社,2006.
(Cheng Jin, Zhao Shu-shan. *Fracture mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 2006.)

[4] Fang Z, Wu X L, Yu J, et al. Electrochemical insertion and penetration and migration behaviour of alkali metal in aluminium electrolysis process [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(6):1746-1755.

[5] Galasiu I, Galasiu R, Thonstad J. Inert anodes for aluminium electrolysis [M]. Hamburg: Aluminium-Verlag, 2007: 23-24.

[6] Li J, Fang Z, Lai Y Q, et al. Electrolysis expansion performance of semigraphitic cathode in [K₃AlF₆ Na₃AlF₆]-AlF₃-Al₂O₃ bath system [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, 16(3):422-428.

[7] 黄英科,肖辉照,彭德泉.铝电解质熔液中碳渣的形成和分布及其分离措施[J].轻金属,1994,1(10):23-27.
(Huang Ying-ke, Xiao Hui-zhao, Peng De-quan. Formation, distribution and separation of carbon slag in molten aluminum electrolyte [J]. *Light Metal*, 1994, 1(10):23-27.)

[8] 徐江海,潘红艳,王宁,等.N₂ 高温热处理对活性炭孔道结构及表面化学性质的影响[J].碳素技术,2014,5(2):21-24.
(Xu Jiang-hai, Pan Hong-yan, Wang Ning, et al. The effect of high temperature treatment in nitrogen on the pore channel structure and the surface chemical properties of activated carbon [J]. *Carbon Techniques*, 2014, 5(2):21-24.)

[9] 刘军利,古可隆.高温改性对活性炭孔隙结构的影响[J].林产化学与工业,1999,19(3):37-40.
(Liu Jun-li, Gu Ke-long. Effects of high temperature treatment on activated carbon pore structure [J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 1999, 19(3):37-40.)

[10] Ho Y S, McKay G. Sorption of dye from aqueous solution by peat [J]. *Chemical Engineering*, 1998, 70(2):115-124.

[11] Chen C L, Li X L, Zhao D L. Adsorption kinetic, thermodynamic and desorption studies of Th (IV) on oxidized multi-wall carbon nanotubes [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007, 302(1):449-454.

[12] Gercel O, Ozcan A. Preparation of activated carbon from a renewable bio-plant of Euphorbia rigida by H₂SO₄ activation and its adsorption behavior in aqueous solutions [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(3):4843-4852.