

浅谈微动磨损对缩比车轴轮座裂纹尖端应力强度因子的影响

李言义
(中车青岛四方机车股份有限公司 山东 青岛 266111)

摘要：为了分析微动磨损对缩比车轴轮座表面微动疲劳裂纹尖端应力强度因子 (SIF) 的影响，本文基于试验，分别建立了考虑磨损轮廓与不考虑磨损轮廓的两种有限元模型，对比分析磨损轮廓对裂纹扩展以及裂纹尖端等效 SIF 的影响，得到了不同情况下的裂纹扩展路径和裂纹尖端等效 SIF 的变化情况。分析结果表明，考虑磨损轮廓后预测的裂纹扩展路径更贴合实际试验结果。使用与试验相同的裂纹扩展路径分析，在裂纹较短时 (<1.2 mm)，考虑磨损轮廓与否，会对裂尖等效 SIF 产生较大的影响，两种情况下的相对误差大约在 10%；当裂纹较长后 (>3 mm)，考虑磨损轮廓与否对裂尖等效 SIF 则几乎没有影响。

关键词：微动磨损；裂纹扩展；应力强度因子；磨损轮廓

0 引言

在铁路系统中，轮对作为机车车辆走行部最重要的部件之一，几乎承担了机车车辆的全部重量。由于轮对长期受到旋转弯曲载荷作用的影响，因而很容易导致其在轮轴配合部位发生微动磨损，影响行车安全。由于材质不同，现场发现在车轴轮座处，更容易出现微动疲劳裂纹，并且由于过盈配合结构的封闭性，裂纹在轮座部位萌生以及向内部扩展，这个过程难以直接观察发现。

因此，国内外许多学者采用试验结合仿真的办法对过盈配合结构的微动裂纹萌生和扩展情况进行分析。宋川基于通过试验发现微动疲劳裂纹往往在磨损较少的地方萌生，他认为在微动磨损严重的区域，裂纹很难萌生；而在磨损轻微的区域，表面损伤对裂纹形核有促进作用，会加速裂纹的萌生。但并未对裂纹扩展问题进行更深入的研究。杨广雪通过带缺口的轴套试样研究微动疲劳裂纹扩展，利用有限元仿真得到裂纹尖端 SIF，获得了裂纹扩展寿命，并基于此结果预测微动疲劳寿命。Foletti 等人利用 Dang Van 判据结合 El-Haddad 方程，提出轮座表面可容忍的临界缺陷尺寸，认为在此尺寸内的缺陷不会引起微动疲劳裂纹的扩展。Pourheidar 等人通过在实际铁路车轴轮座表面预制缺陷，利用断裂力学方法研究裂纹扩展问题。通过仿真分析发现，裂纹扩展主要受 I 型裂纹应力强度因子 (SIF) 幅值 ΔK_I 影响。上述研究对压装配合部位裂纹萌生和扩展行为进行了阐述和分析，证明轮座微动疲劳裂纹扩展主要受裂纹尖端 SIF 的影响。但其都并未考虑微动磨损对轮轴压装结构微动疲劳裂纹扩展的影响。

由于轮座处的微动疲劳裂纹都是伴随着微动磨损的出现而产生的，因此考虑磨损轮

廓的分析将更加符合实际情况，能够更准确的反映真实情况。裂纹尖端的 SIF 是描述裂纹扩展的重要参数之一，通过 SIF 可以反映裂纹尖端附近的应力分布状态。本文通过 1:4 比例轮轴试样进行试验，得到试样表面磨损形貌，并通过有限元分析计算裂纹尖端 SIF 的变化情况。对比考虑磨损轮廓与不考虑磨损轮廓情况下，裂纹扩展路径的差异和轮座裂纹尖端 SIF 的变化情况，并分析原因。

1 缩比轮轴试验

1.1 试验简介

试验在缩比轮轴试验机上进行。缩比轮轴试样在轮座部位根据实际铁路车轴严格缩比得到。缩比轮轴试样材料分别取自实际铁路车轴与车轮，材料分别为：EA4T 与 ER8。根据实际轮对装配标准，缩比试样轮轴过盈配合部位过盈量 mm；在本试验中，试样轮座处所受名义弯曲应力为 160 MPa。试样比例车轮一侧与试验机旋转端连接，车轴一侧与加载端连接。在试验机上模拟旋转弯曲疲劳试验。当试样出

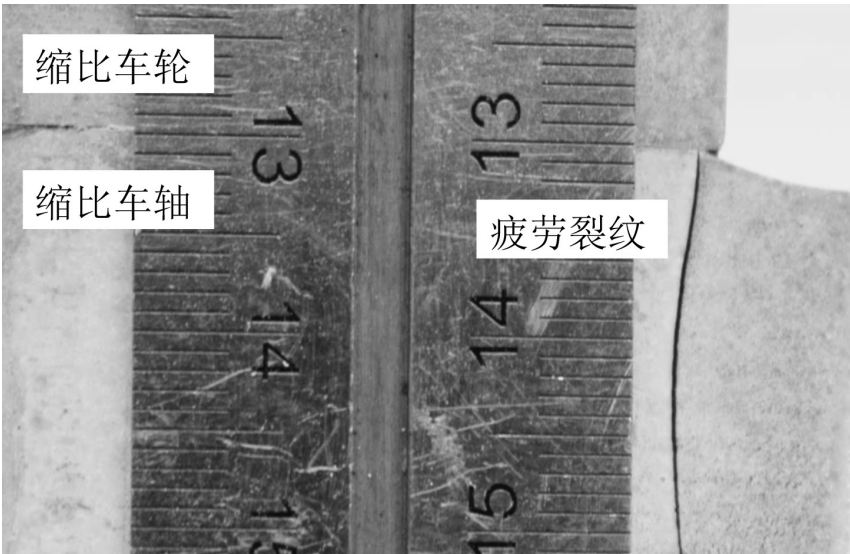


图 1 试样剖面裂纹

现裂纹后会导致试样的刚性降低，从而导致旋转过程中会出现加载端垂向位移幅值增大的情况。通过前期试验观察发现当加载端位移幅值超过 0.5 mm 时即可认为试样失效。试验设置停机条件为：达到最大试验周次 107，或加载端位移幅值超过 0.5 mm。

1.2 试验结果

当试验周次达到 6.22×10^6 次时，加载端位移幅值超限，试验机停机，沿轴向切割试样后发现试样轮座处出现较长的轴向裂纹，试样失效，如图 1 所示。发现周向裂纹，同时，发现试样轮座边缘存在明显的磨损，利用激光共聚焦显微镜 (Olympus-LEXT) 观察并提取磨损轮廓，将数据平均处理后得到缩比轮对试样表面的磨损轮廓，如图 2 所示。

2 有限元仿真

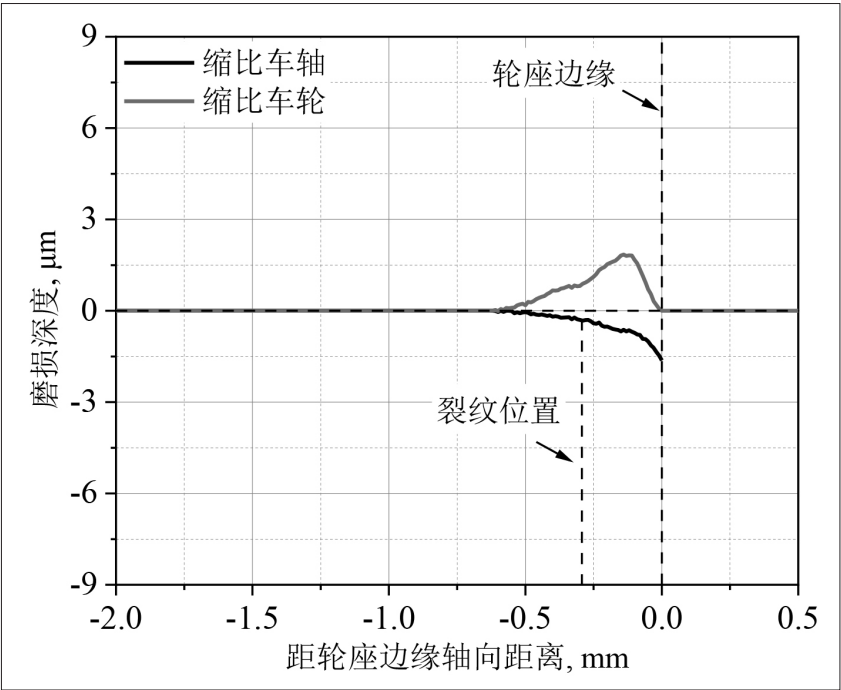


图 2 缩比试样磨损轮廓

通过试验可以得到缩比轮轴试样配合的表面磨损轮廓，将其与不含磨损的初始轮廓分别带入有限元计算中，利用仿真分析，得到微动磨损轮廓对裂纹尖端 SIF 的影响。

2.1 有限元模型

利用 HYPERMESH 对有限元模型网格进行划分和前处理。由于裂尖处 SIF 的计算必须满足线弹性及小范围屈服假设，因此将轮轴材料简化为线弹性材料计算，如表所示。控制模型除裂尖区域外用含有减缩积分的 8 节点线性六面体单元 (C3D8R) 划分网格。根据裂纹问题的弹性解，裂纹尖端处的应力和应变具有奇异性。因此利用奇异单元处理

裂纹尖端网格，奇异单元可以通过折叠常规单元的单元边以及调整中间节点的位置得到，其特点为单元形函数自动包含所需的奇异项，因而能够反映裂纹尖端附近的奇异性，如图 3 所示。磨损轮廓通过改变车轴与车轮配合面表层节点的位置表示。

表 材料的力学性能参数

材料	弹性模量 /GPa	泊松比
车轴 (EA4T)	209	0.3
车轮 (ER8)	210	0.28

根据试验观察结果，在距离轮座边缘轴向 300 μm 处建立初始裂纹，长度按 200 μm 计算。ABAQUS 对包含裂纹的有限元模型计算，在第一个分析步建立轮轴之间的过盈配合，在第二个分析步施加载荷 F，使轮座边缘名义弯曲应力达到 160 MPa。对比考虑磨损轮廓与否的情况可以获得不同的 SIF，通过计算可以获得裂纹扩展角度，根据不同的裂纹扩展角度以相同步长 200 μm (裂纹长度每次增加的值) 更新裂纹模型继续计算。在现场检修中发现，当实际车轴表面裂纹深度达到 1 mm 后，便会认为车轴失效报废；本文中模型计算裂纹长度达到 4 mm，足够模拟实际情况。

2.2 SIF 计算方法

目前常见的 SIF 计算方法主要有数值解法、试验标定法等。由于轮轴结构的复杂性与结构限制，因此数值解法便成为分析轮轴结构 SIF 最常见的方法。目前在工程应用中最为广泛的数值解法主要为互作用积分法等。本文用互作用积分法计算 SIF，该方法主要通过能量释放率来计算 SIF，因此对网格尺寸不敏感，可以在保证一定计算速度的前提下具有较高的计算精度。

模型在裂尖奇异单元与常规单元之间划分 9 层过渡单元，以每层过渡单元的单元边所构成的封闭

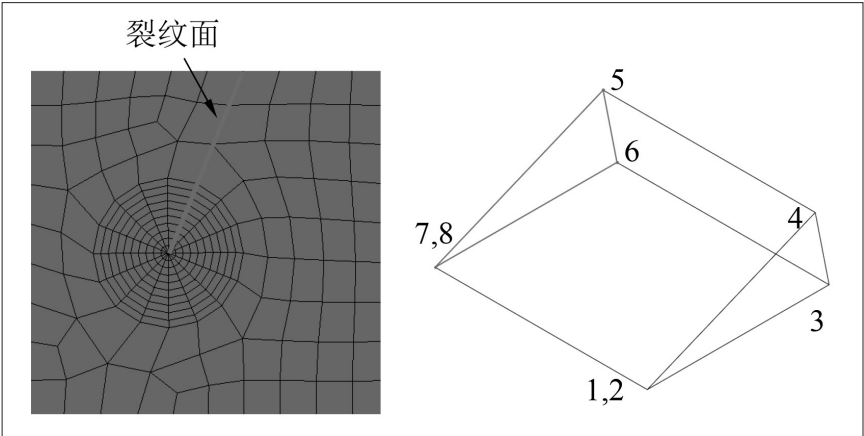


图 3 裂纹尖端网格以及奇异单元构造

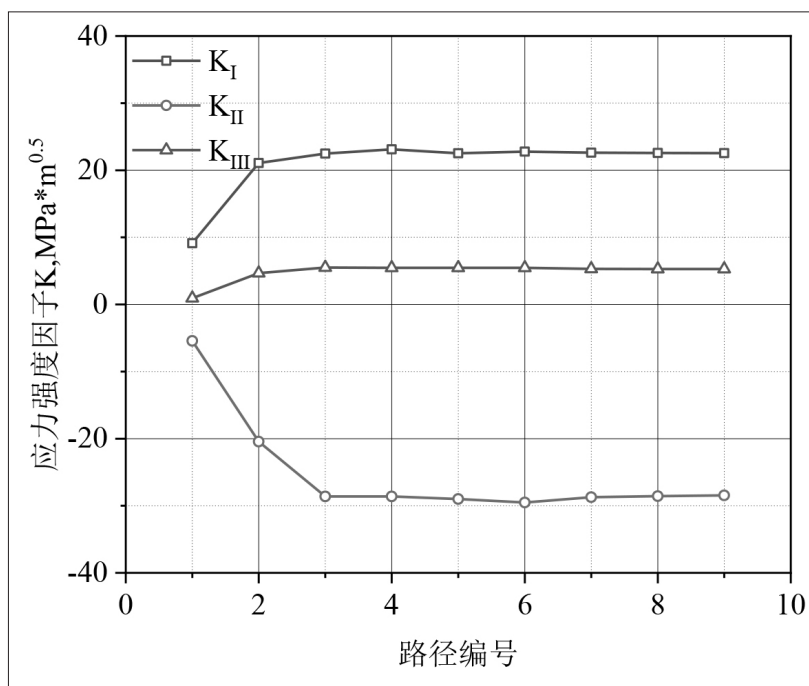


图4 不同路径上的应力强度因子

曲线作为互作用积分的积分路径，通过 ABAQUS 分别评估每一条积分路径上的 SIF。利用互作用积分法评估得到的微动疲劳裂纹长度为 400 μm 时某一裂纹尖端在不同积分路径上的 SIF 如图 4 所示。

考虑到裂尖的奇异性，靠近尖端奇异单元的第一条积分路径上的 SIF 误差较大，随着积分路径逐渐远离裂尖区域，应力强度因子的取值趋于稳定，表明互作用积分的路径无关性。第 3 到 9 条积分路径上取值的平均值用于计算。在 ABAQUS 中选用最大周向应力 (the Maximum Circumferential Tensile Stress, MTS) 复合型断裂准则预测车轴轮座的裂纹扩展角度 θ 以及对应的等效应力强度因子幅值 ΔK_{θ} 。本文中利用 A. Pourheidar 等人提出的公式来计算等效应力强度因子幅值 ΔK_{θ} ，通过该公式可以得到偏于保守的裂纹扩展寿命：

$$\Delta K_{\theta} = \frac{0.83\Delta K_I + \sqrt{0.4489\Delta K_I^2 + 3\Delta K_{II}^2}}{1.5} \quad (1)$$

2.3 仿真结果分析

对比仿真得到的裂纹路径可以发现，考虑磨损轮廓后计算结果更接近实际情况，如图 5 所示。这是由于考虑磨损轮廓后可以更准确的对轮座表面的应力情况进行模拟，与未

考虑磨损轮廓的情况相比，可以得到更准确的应力分布情况。当轮座表面磨损后，应力会发生重分布，在裂纹萌生的位置局部应力集中较为严重，受多轴应力影响，考虑磨损后更真实的表面应力就会得到更好的预测结果。

沿实际裂纹扩展路径进行仿真，对比分析考虑磨损和不考虑磨损两种情况下裂纹尖端的等效 SIF，如图 6 所示，裂纹尖端的等效 SIF 随裂纹长度的增加不断增大，考虑磨损轮廓与否对裂纹尖端等效 SIF 增加的趋势几乎没有影响。在裂纹扩展初期，考虑磨损轮廓与否对裂纹尖端等效 SIF 相对误差影响较大，二者相对误差在 10% 以上；随着裂纹向车轴内部扩展，影响逐渐减小，相对误差最终在 2% 以内。可以认为随着裂纹长度增加到 3 mm 以后，相对误差小于 3%，磨损轮廓对裂纹尖端等效 SIF 几乎不再有影响。

3 结语

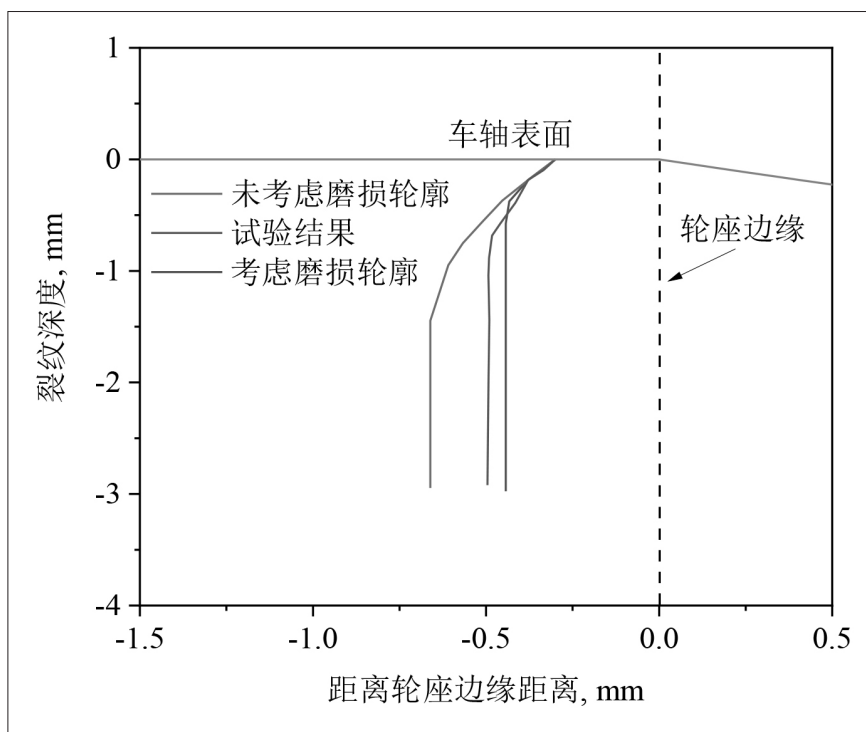


图5 裂纹扩展路径

相较于未考虑磨损轮廓的情况，考虑磨损轮廓后，裂纹扩展路径更贴近试验结果，预测结果更可信。

在裂纹扩展初期，裂纹长度较短 (<1.2 mm) 时，磨损轮廓对裂纹尖端等效 SIF 有较大影响，随着裂纹向内部扩展，磨损轮廓对内部应力的影响逐渐降低，当裂纹长度较长 (>3 mm) 后，基本可以认为磨损轮廓对裂纹尖端等效 SIF 不再有明显影响。

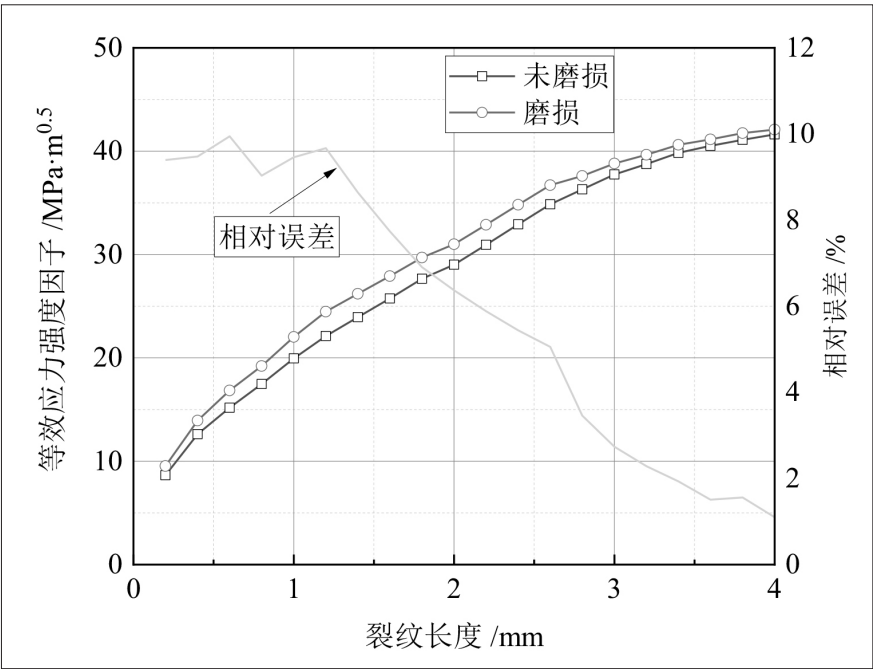


图 6 沿裂纹扩展路径下裂纹尖端应力强度因子的差异

参考文献:

[1] 曾飞. 列车轮对弯曲载荷作用下过盈配合面微动行为研究 [D]. 西南交通大学, 2012.

[2] 宋川. 轴类部件旋转弯曲微动疲劳损伤分析及试验模拟 [D]. 西南交通大学, 2013.

[3] 杨广雪. 高速列车车轴旋转弯曲作用下微动疲劳损伤研究 [D]. 北京交通大学, 2011.

[4] FOLETTI S, BERETTA S, GURER G. Defect acceptability under full-scale fretting fatigue tests for railway axles [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 86: 34-43.

[5] POURHEIDAR A, REGAZZI D, CERVELLO S, et al. Fretting fatigue analysis of full-scale railway axles in presence of artificial micro-notches [J]. Tribology International, 2020, 150: 106383.

[6] ZOU L, ZENG D, WANG J, et al. Effect of plastic deformation and fretting wear on the fretting fatigue of scaled railway axles [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 132: 105371.

[7] TB/T 1463. 机车轮对组装技术条件 [S]. 2015.

[8] 李行, 张继旺, 徐俊生, 等. 缺陷对 EA4T 车轴钢疲劳性能的影响 [J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(3): 627-633.

[9] 解德, 钱勤, 李长安. 断裂力学中的数值计算方法及工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

(上接第 42 页)

良好的状态。对于应急放下活门组件的维护需要注意以下几方面。

- (1) 检查活门处是否存在密封处外漏现象。遇到外漏情况尽快处理，避免泄漏加剧。
- (2) 检查钢索和钢索护套的紧固位置和紧固状况。避免因紧固位置不正确造成钢索变形造成收放不顺利，特别是避免钢索紧固不良造成操纵失灵。
- (3) 检查钢索壳体止动区域是否有杂质，清除杂质避免因杂质的存在导致转轴转动角度不足。
- (4) 注意定期更换液压系统油液排除油液内的杂质，避免因油液污染造成密封圈损伤。

6 结语

应急活门的各种故障深刻地影响着飞机起落架收放和

飞机安全，本文对其结构和工作原理、故障现象和原因进行了分析，并总结了其对起落架收放的影响，希望对起落架系统和液压泵的维修人员有所帮助。

参考文献:

[1] Piper Aircraft, Inc. AIRPLANE MAINTENANCE MANUAL 2021-1-31.

[2] 甄轲. 一起 PA-44-180 飞机起落架应急放下活门故障 [J]. 神州, 2018(15).

[3] 曾祥财, 教文伟, 龚良国, 刘丽红. 某型教练机起落架应急放故障分析及改进措施 [J]. 教练机, 2017(02).

[4] 温育明, 张焱, 汪艳. 飞机液压系统污染控制研究 [J]. 液压与气动, 2020(12).