

DOI: 10.3901/JME.2023.14.043

表面强化车轴裂纹扩展及剩余寿命 预测方法研究^{*}

王超 杨冰 朱涛 肖守讷 阳光武 范晓达
(西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

摘要: 为了研究表面强化车轴的裂纹扩展行为, 提出了基于裂纹扩展行为表征与探伤概率结合的剩余寿命预测方法。首先, 基于线弹性有限元裂纹扩展方法, 考虑车轴表面残余应力及裂纹扩展闭合效应, 开展了表面强化车轴疲劳裂纹扩展行为研究; 然后, 研究了服役载荷对裂纹缺陷演化的影响, 探索了不同初始深长比裂纹的扩展剩余寿命; 最后, 将剩余寿命曲线与无损检测检出概率结合, 提出了基于裂纹检出状态的阶梯检修周期策略。分析结果表明: 残余压应力对深度小于 4 mm 裂纹的扩展有显著抑制作用, 基于 NASGRO 方程估算了不同初始深长比的裂纹扩展剩余寿命区间为 10.5 万~18.8 万 km, 初始缺陷深长比越小, 剩余寿命越短; 基于动态的阶梯周期探伤策略实现了 0.056 1%~0.007 84% 的累积探伤失效概率用于指导维修周期优化。研究方法和结果为含缺陷表面强化车轴的剩余寿命评价及服役安全性运营维护提供有益参考。

关键词: 表面强化车轴; 疲劳裂纹扩展; 残余应力; 剩余寿命; 检修周期

中图分类号: TH117

Research on Crack Propagation and Remaining Life Prediction Method of Surface Strengthened Axle

WANG Chao YANG Bing ZHU Tao XIAO Shoune YANG Guangwu FAN Xiaoda
(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: In order to study the crack growth behavior of surface-strengthened axles, a remaining life prediction method based on the combination of crack propagation behavior characterization and flaw detection probability was proposed. Firstly, based on the linear elastic finite element crack propagation method, considering the residual stress on the axle surface and the crack growth closure effect, the fatigue crack growth behavior of the surface strengthened axle was studied. Then, the influence of service load on the evolution of crack defects was studied, and the remaining life of crack growth with different initial depth-to-length ratios was explored. Finally, combining the remaining life curve with the detection probability of non-destructive testing, a stepped maintenance cycle strategy based on the crack detection status is proposed. The analysis results show that the residual compressive stress has a significant inhibitory effect on the growth of cracks with a depth of less than 4 mm. Based on the NASGRO equation, the remaining life interval of crack propagation with different initial depth-to-length ratios is estimated to be 105 000-188 000 km. The smaller the initial defect depth-length ratio, the shorter the remaining life. The dynamic step cycle flaw detection strategy achieves a cumulative flaw detection failure probability of 0.056 1%-0.007 84%, which is used to guide the maintenance cycle optimization. The research methods and results provide a useful reference for the remaining life assessment and service safety operation and maintenance of the surface-enhanced axle with defects.

Key words: surface strengthened axle; fatigue crack growth; residual stress; remaining life; repair cycle

^{*} 国家自然科学基金(52175123)、四川省国际科技创新合作(2022YFH0075)和四川省杰出青年基金(2022JDJQ0025)资助项目。20220301 收到初稿, 20221112 收到修改稿

0 前言

随着高速铁路车辆关键结构可靠性的提高以及逐步实现基于状态的检修转化,在保证结构安全服役条件下,实现普遍应用的 CRH 系列动车组表面强化车轴的寿命预测至关重要^[1]。车轴在服役过程中出现了诸多损伤以及裂纹扩展最终断裂失效的案例。因此,车轴在运维中主要通过定期超声波探伤实现服役状态检测,保证车轴在检修周期内不发生断裂失效事故^[2],频繁的检修保证了列车的安全运营,同时产生了大量的资源消耗。研究表面强化车轴的裂纹扩展行为,实现剩余寿命评估与维修周期的优化决策,具有重要的理论和工程价值。

车轴服役可靠性对车辆的安全运行至为重要,为实现基于车轴缺陷的可靠性评估及工程化应用,诸多学者针对车轴服役缺陷,从裂纹扩展机理^[3]、实测载荷谱^[4-5]、车轴工艺^[6]等方面开展了寿命评估。吴圣川等^[7]提出了阶梯疲劳寿命评估方法的剩余寿命决策过程。马利军等^[8-9]考虑了表面应力梯度、表面强化残余应力对车轴服役寿命的影响。徐忠伟等^[10-11]综合考虑了轮轴压装应力、实测动应力载荷谱等因素分析了表面强化车轴的寿命。基于上述学者采用的损伤容限评估方法^[12-14]与车轴服役过程中的探伤检测概率结合^[15],能够更加准确实现车轴服役周期的安全评估。以超声探伤作为有效检修手段一定程度保证了车轴裂纹检出概率,而目前检修中仍然按照固定的周期进行检查,缺乏一定的检修策略。

综合考虑车轴物理状态、裂纹扩展行为与无损检测概率性探伤周期,实现基于裂纹扩展与探伤周期结合的策略目前尚未建立。本文以动车组拖车表面强化车轴为例,综合考虑了确定性初始裂纹形态、载荷谱、材料性能和概率性无损探伤检出曲线,建立了车轴剩余寿命的预测方法,实现车轴服役周期的状态寿命评估及探伤周期阶梯化维修决策。

1 车轴失效形式分析

车轴服役过程中,在冲击或弯曲交变载荷的作用下,容易在应力集中(或缺陷)部位萌生疲劳裂纹,进而扩展形成宏观裂纹。如果在车辆运行过程中发生车轴疲劳断裂,会直接影响行车安全,这也是造成铁路列车脱轨倾覆事故的重要原因之一。因此,

对含裂纹车轴结构的剩余寿命预测及状态检修周期决策可为车轴安全服役性提供重要保障,图 1 给出了国外车辆车轴典型失效的案例^[16]。

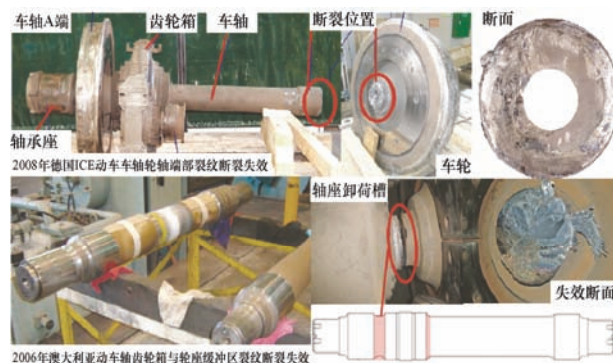


图 1 车轴失效案例

目前车轴服役期间通过定期无损检测 (Nondestructive testing, NDT) 发现潜在的缺陷,车轴的损伤形式主要包括横向、纵向裂纹、异物冲击表面凹坑等。结构寿命评估的准确性主要受到材料特性、检测技术敏感性、环境条件和人为因素等随机性影响。因此,无损检测周期的间隔要考虑到周期内未检测到所有缺陷的概率以及裂纹扩展行为。

目前 CRH 系列动车组空心车轴超声波探伤规程中将 S38C 车轴的探伤周期修订为 6 万 km, 60 万 km 磁粉探伤。定义两个连续无损检测之间的间隔作为它们之间可以安全运行的里程,这个间隔主要是可检测到的最小缺陷尺寸 a_{\min} 和裂纹扩展速率来表征。根据损伤容限原理,通常采用这两个贡献来定义检测到的裂纹扩展寿命^[17-18],裂纹扩展无损检测寿命评估方法如图 2 所示。

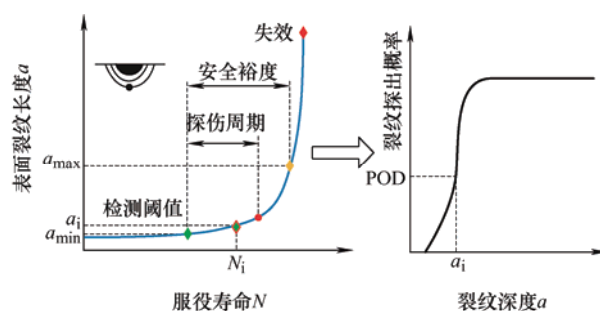


图 2 裂纹扩展无损检测寿命评估方法

2 材料特性与分析方法

2.1 车轴力学性能参数

表面强化 S38C 车轴在热处理的影响下,表面形成了约 5 mm 深的压缩应力区,文献[9]给出了 S38C 车轴的基本力学性能以及材料应力-应变关

系, 如表 1 所示^[9], 这些参数是损伤车轴评价模型的重要输入之一。

表 1 基本材料特性参数

	弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	泊松比 μ
硬化层	220	1 970	1 600	0.3
轴芯部	206	603	374	0.3

采用 NASGRO 裂纹扩展公式进行裂纹扩展剩余寿命估算, 考虑裂纹扩展速率的三个不同部分(近阈值区、Paris 区间和临界区)以及裂纹闭合效应, 同时考虑了应力比的影响($-2 < R < 0.7$), 车轴在旋转弯曲交变载荷作用下, 表面裂纹张开与闭合交替进行, 因此应力比 $R=-1$, 通常采用的 NASGRO 裂纹扩展公式如下^[19]

$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{(1-\Delta K_{th}/\Delta K)^p}{(1-K_{max}/K_c)^q} \quad (1)$$

式中, N 为循环次数, a 为裂纹深度, da/dN 为裂纹扩展速率, $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ 为应力强度因子范围, K_{max} 为加载循环最大 SIF, C 、 n 、 p 和 q 是 NASGRO 公式经验常数。 K_c 是在纯 I 型平面应变条件下断裂的临界 K 值。 F 是裂纹张开函数, 可以考虑 ΔK 对裂纹的扩展只起部分作用。 ΔK_{th} 是 ΔK 的阈值, 作为应力比的函数变化, 代表了最小值 ΔK , 低于此值则不发生扩展, 裂纹张开函数 f 计算公式如下^[20]

$$f = \frac{K_{op}}{K_{max}} = \begin{cases} \max(R, A_0 + A_1 \cdot R + A_2 \cdot R^2 + A_3 \cdot R^3) \\ A_0 + A_1 \cdot R \end{cases} \quad (2)$$

对于式(2)中的未知函数为

$$\begin{cases} A_0 = (0.825 - 0.34\alpha + 0.05 \cdot \alpha^2) \cdot \left[\cos \left(\frac{\pi \sigma_{max}}{2\sigma_0} \right) \right]^{1/\alpha} \\ A_1 = (0.415 - 0.071 \cdot \alpha) \cdot \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \right) \\ A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3 \\ A_3 = 2A_0 + A_1 - 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, K_{op} 为裂纹张开应力强度因子, α 为约束因子 ($\alpha=2.5$), σ_{max} 为最大施加应力, σ_0 为流动应力, 可同等假设为单轴屈服应力和单轴抗拉强度之间的平均值, A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 是纽曼函数的拟合多项式系数, 此外 $\sigma_{max}/\sigma_0=0.3$ 用于工程金属材料参数拟合^[20], 与裂纹尺寸和应力比的门槛值公式为

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0} \sqrt{a/(a+a_0)} \left/ \left[\frac{1-f}{(1-A_0)-(1-R)} \right]^{(1+C_{th}R)} \right. \quad (4)$$

式中, R 是应力比, f 是裂纹张开函数, A_0 是式(3)中的常数, ΔK_{th0} 是应力强度因子在 $R=0$ 时的门槛值, C_{th} 是经验常数, a 是裂纹长度, a_0 是 EI-Haddad 参数(此处取 0.381 mm), NASGRO 校准的参数列举于表 2 中^[9]。

表 2 基于 NASGRO 方程的抗疲劳断裂参数

	C	n	p	q	α
硬化层	6.09×10^{-17}	6.16	1.3	0.001	2.5
轴芯部	8.33×10^{-17}	6.57	1.3	0.001	2.5

2.2 车轴表面强化残余应力

由于车轴表面淬火引入了残余应力, 因此模型中根据车轴工艺按照 0~2 mm, 2~4 mm 分层线性插值输入沿轴向的残余应力场。首先在表层轴向施加 1 N/mm^2 的单位压力, 约束轴心单元节点, 得到每层单元的应力传递系数^[9, 21]。以 2 mm 层单元节点所对应的试验测试均值-390 MPa 和第二层 4 mm 处 0 MPa 为方程边界, 迭代求得表面层-476 MPa。然后, 将初始应力场的结果文件作为一个新的分析步输入到无缺陷有限元模型中, 并在裂纹扩展过程中将轴向梯度的残余应力转换为裂纹面上的牵引力, 将外部载荷于初始残余应力场叠加作为有效驱动力。各层内线性变化残余应力的仿真值与实际车轴测试值对比如图 3、4 所示。

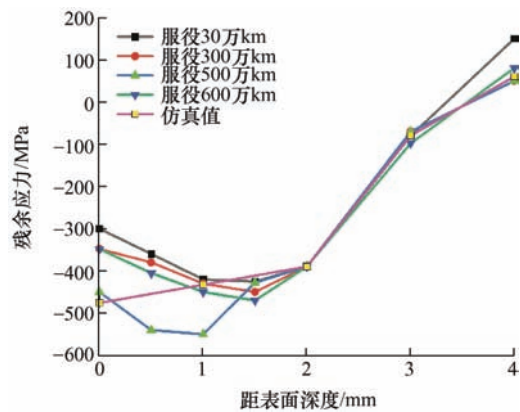


图 3 轴向梯度残余应力对比

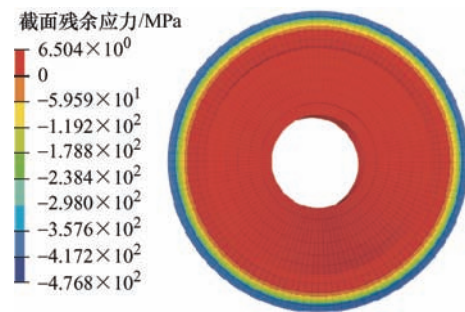


图 4 截面残余应力

根据文献[7]中车轴实际服役过程表面残余应力未出现明显释放。从车轴表面沿深度 4 mm 方向, 表面层、硬化层和轴芯部体现出了不同阶段的线性变化趋势, 因此在仿真模型中以不同层间线性变化的初始残余应力梯度作为输入, 可以较为准确的建立与实际物理结构一致性的残余应力状态。

3 车轴模型缺陷及裂纹扩展方法

3.1 车轴模型及初始缺陷

以拖车表面强化 S38C 车轴为例开展裂纹扩展评估, 其车轴长度 2 382 mm, 轴身直径 192 mm, 轮座直径 196 mm, 轮座与轮毂孔安装过盈量为 0.215~0.220 mm。非动力车轴上的车轮和制动盘, 均采用基轴制与车轴过盈装配, 由于列车在运行过程中承受的主要载荷为垂向载荷, 基于既有文献中裂纹扩展试验的位置引入初始缺陷, 以距离轮毂内侧 15 mm 处引入初始单边半椭圆表面裂纹物理缺陷^[21], 车轴模型及缺陷位置如图 5 所示。

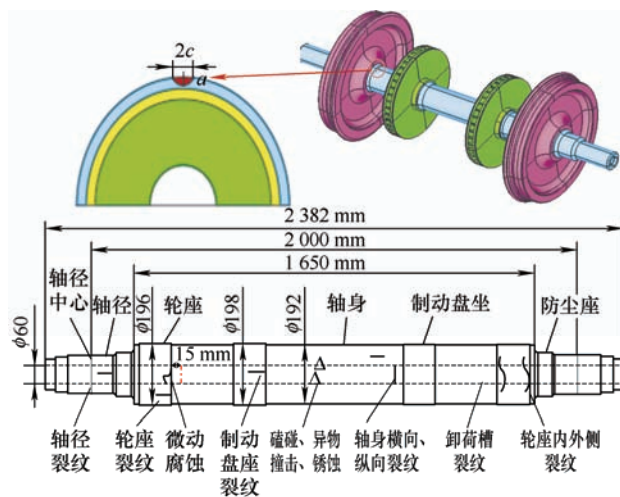


图 5 表面强化车轴尺寸及缺陷部位

结合结构的真实几何尺寸建立有限元模型, 采用接触单元模拟轮轴、盘轴过盈配合量(过盈量介于 0.15~0.3 mm), 取 0.3 mm 作为过盈配合间隙, 配合间隙的摩擦因数设置为 0.6^[21], 采用六面体 SOLID186 单元进行离散。

同时考虑车轴工艺, 中频感应淬火在车轴表面约 4 mm 范围引入残余压应力, 将车轴分为第一层 2 mm 硬化层, 第二层过渡层 2~4 mm, 第

三层为轴芯, 分别赋予不同的材料属性^[9]。车轴服役中较大的弯曲载荷是引起疲劳裂纹扩展的主导因素^[22-23], 因此仅考虑最大弯曲应力对应的加载条件可以满足失效的主要因素, 而动力传递引起的切向应力可以忽略不计。国内外车轴失效案例中沿着垂直于轴断面裂纹扩展的失效案例解释了裂纹驱动力为垂直于最大弯曲应力的机理^[12,17], 车轴有限元模型及边界如图 6 所示。

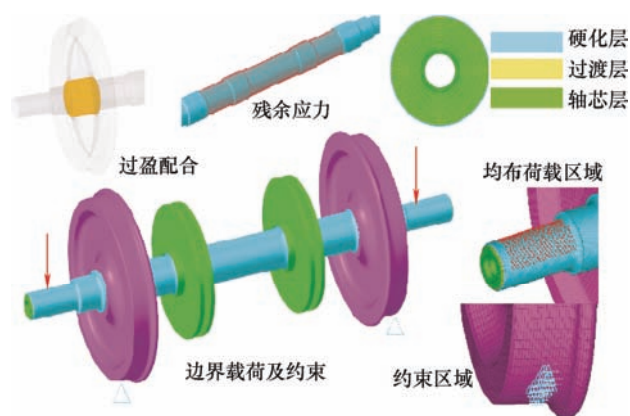


图 6 车轴有限元模型及边界条件

由于裂纹扩展过程中需要每次迭代计算裂纹尖端的应力场, 为减小迭代网格重划分的规模, 选取裂纹区附近的子模型作为网格迭代区域, 将初始裂纹前缘节点残余应力转换为裂纹面的牵引力, 以表征残余压应力对裂纹表面产生的压应力作用, 表面残余应力与裂纹面牵引力转化模型如图 7 所示。

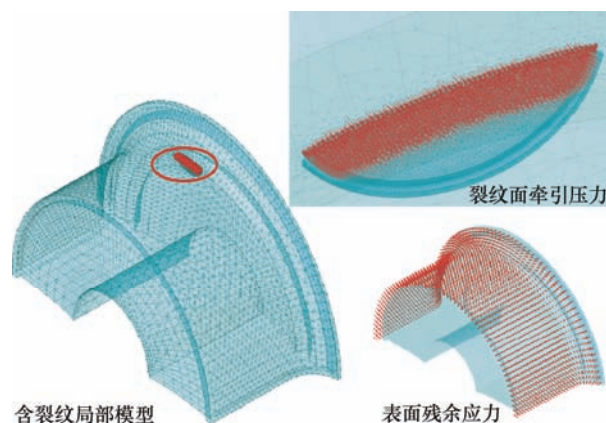


图 7 残余应力与裂纹面牵引力

由于实际服役过程中轮轴激扰载荷以垂向为主, 因此本文以拖车车轴实测载荷谱作为输入, 线路测试里程 848 km^[24], 载荷及频次如图 8 所示。

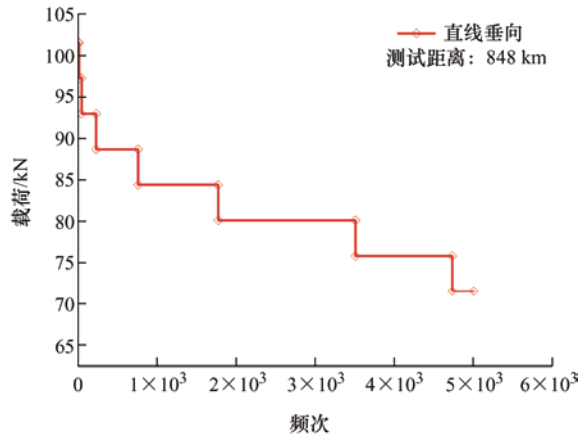


图 8 拖车车轴实测服役载荷谱

3.2 基于裂纹扩展的寿命评估方法

裂纹的缺陷等效模型，一种是在明确的几何结构中呈现，一种是隐含在已知的数学模型中。目前被文献广泛采用的数值模拟方法主要有：有限元法(Finite element method, FEM)、对偶边界元法(Dual boundary element method, DBEM)扩展有限元法。有限元法通过裂纹尖端的奇异单元模拟尖端应力奇异性，扩展有限元法通过构造裂尖形函数驱动裂纹扩展，边界元法在定义域的边界上划分单元一定程度上克服了单元积分的奇异性。

在线弹性断裂领域，基于有限元的相互作用积分对于三维结构的裂纹尖端应力强度因子求解具有广泛的研究^[25-26]，虽然基于有限元法需要每次迭代更新网格，但相互作用积分求解裂尖参数在一定程度上消除了单元应力奇异性影响，因此通过近似求解得的值具有较高的精度。

基于相互作用积分的有限元法求解应力强度因子，通过最大周向拉应力驱动扩展，定义每次扩展裂纹长度，将积分步长代入式(1)求解裂纹扩展寿命^[27]，局部裂纹扩展模型及裂纹如图 9 所示。

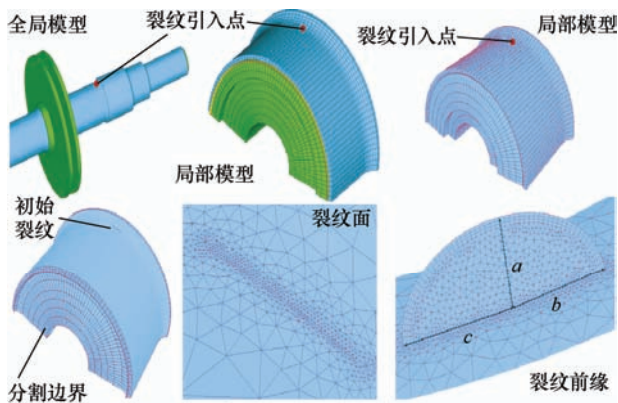


图 9 局部裂纹模型及初始缺陷

基于有限元法的相互积分求解裂尖应力强度因子，通过 1/4 奇异单元模拟裂纹尖端的奇异性，并

通过六面体单元围线积分得到应力强度因子^[27]，由于车轴在垂向载荷作用下以弯曲为主，以 I 型裂纹作为扩展主要形式，裂纹垂直于轴向方向并自动循环网格更新驱动裂纹扩展，裂纹尖端扩展驱动模型如图 10 所示。

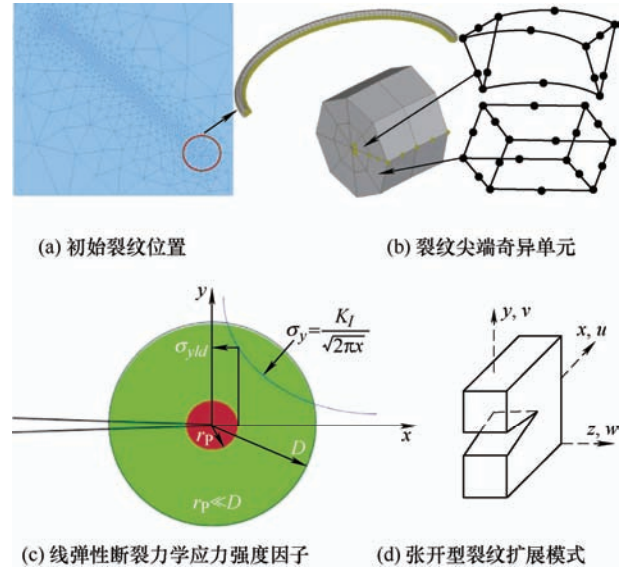


图 10 基于相互作用积分的裂纹驱动模型

4 裂纹扩展寿命评估结果分析

在数值模拟中，可以任意假设初始虚拟裂纹的大小和形状。然而，具有真实形状的宏观裂纹(如从虚拟的裂纹开始的数值预测)被认为是后续疲劳寿命预测的有效起始裂纹。特别地，初始裂纹的大小是通过考虑检测阈值(可检测尺寸)选择的。由于超声波无损检测精度尺寸深度为 2 mm，因此本文基于最小深度尺寸分析裂纹扩展情况。

取初始裂纹深度分别为 2 mm、3 mm、4 mm、5 mm，分别进行裂纹引入，分析裂纹尖端应力强度因子只有深度大于 4 mm 才扩展^[9]。因此，以 $a=5$ mm 作为初始深度，植入不同深长比的初始缺陷分别为 ($a/c=0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0$) 植入不同初始深长比的裂纹形貌如图 11 所示。

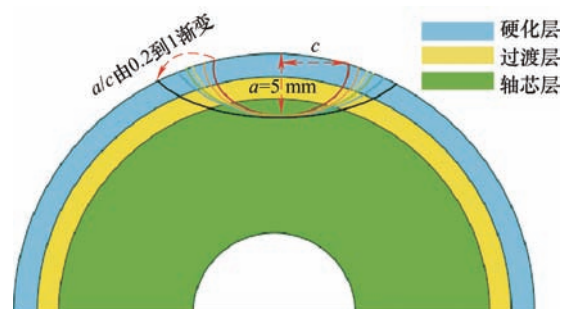


图 11 植入裂纹深长比示意图

通过在相同位置相同载荷下植入不同深长比的初始裂纹, 计算沿裂纹尖端的应力强度因子, 本文以载荷谱中 79.95 kN 载荷, 初始深度 5 mm 裂纹为例, 计算不同深长比裂纹前缘应力强度因子, 如图 12 所示。

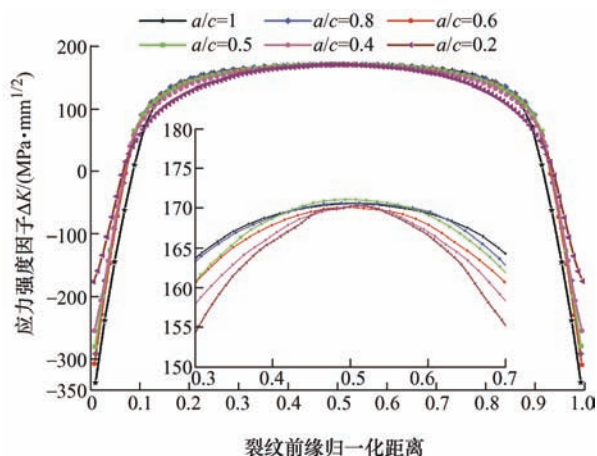


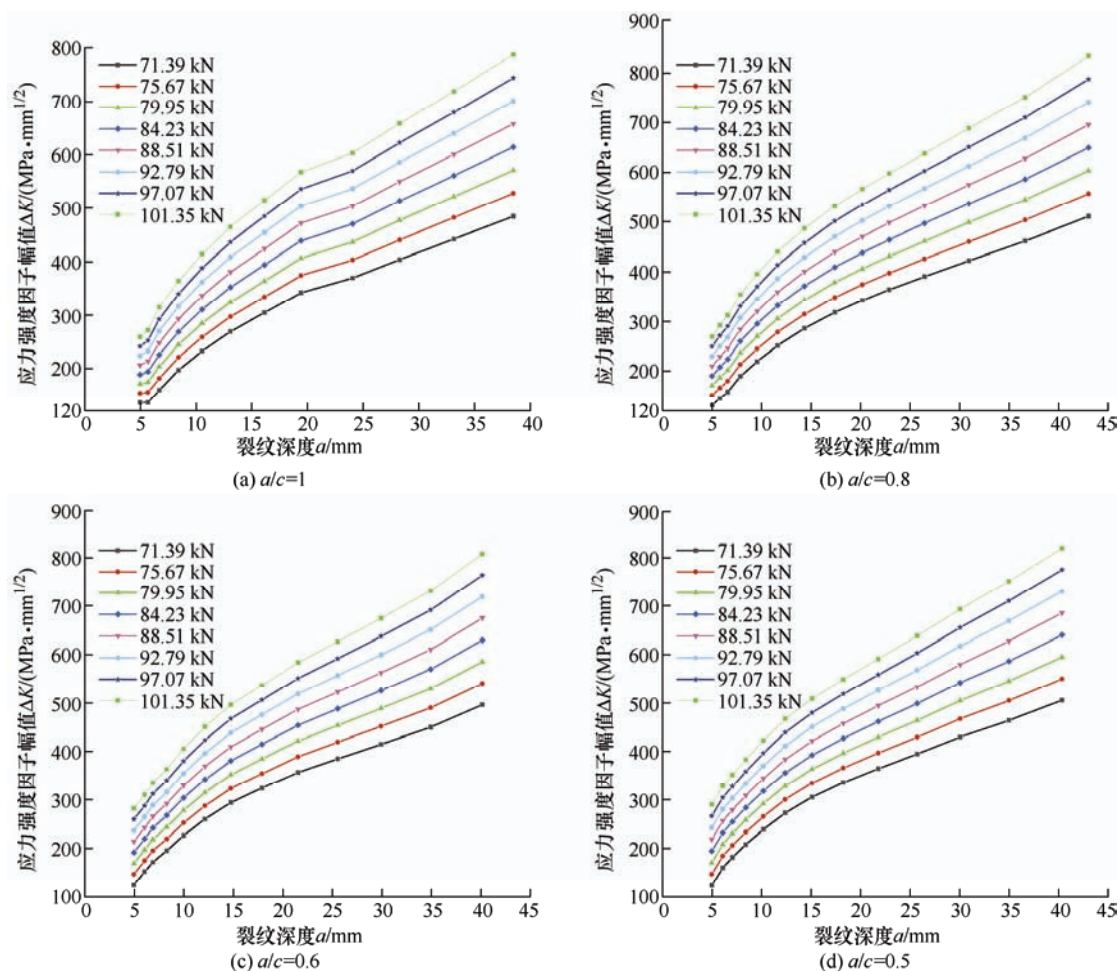
图 12 不同深长比裂纹前缘应力强度因子

由图 12 可知, 由于表面残余压应力导致的表面裂纹前缘处于闭合状态, 逐渐沿深度方向应力强度

因子增加, 中心深度前缘应力强度因子最大; 通过对比同一载荷下裂纹穿过硬化层、过渡层达到深度 5 mm 时, 初始不同深长比裂纹沿前缘的应力强度因子可知, 深长比越小, 表面应力强度因子越高, 裂纹尖端深度方向基本一致。

在实际工程中, 根据文献[5]以车轴壁厚的 1/2 作为判定车轴失效的临界裂纹尺寸, 从初始裂纹到临界裂纹循环载荷的次数与对应载荷谱的关系即为剩余寿命, 图 13 分别列举了以六种不同初始深长比的裂纹扩展至临界深度时, 裂纹深度尺寸与沿着深度扩展方向的应力强度因子幅值关系。

由于表面强化车轴硬化层残余压应力导致表面裂纹沿深度方向从 5 mm 开始扩展, 从图 13 中六组不同初始深长比表面裂纹在载荷谱作用下的应力强度因子规律可以得出, 同一初始深长比的裂纹在不同载荷作用下沿深度方向的应力强度因子幅值平行递增, 不同初始深长比裂纹在扩展过程中同一载荷作用下伴随着比值减小, 初始深度应力强度因子幅逐渐增加。



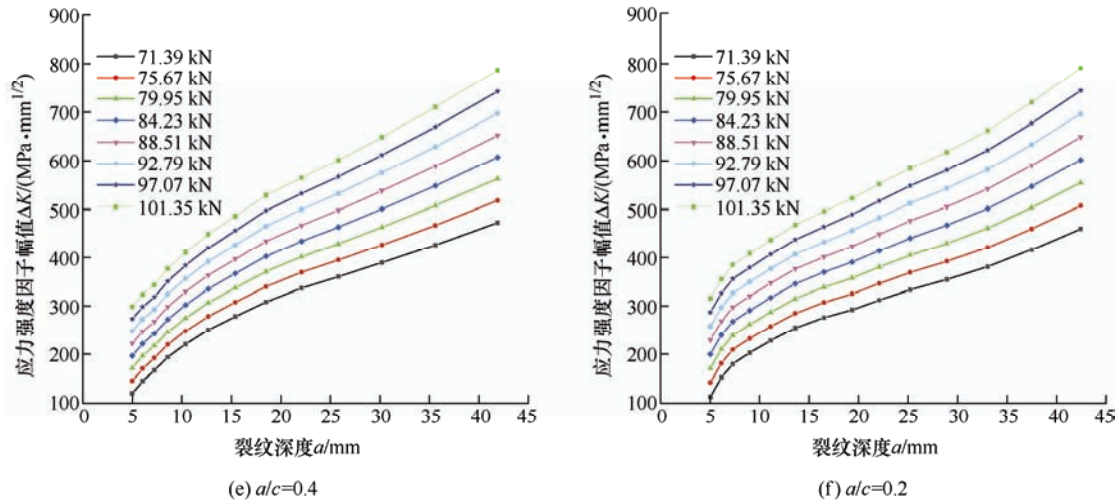


图 13 裂纹尖端应力强度因子幅值演变规律

通过将每一步扩展的应力强度因子幅值代入积分公式(1)得到载荷谱下裂纹深度与载荷的循环次数关系, 并与载荷谱的里程关系结合得到了不同初始深长比表面裂纹在载荷谱作用下的裂纹扩展深度与服役里程曲线如图 14 所示。

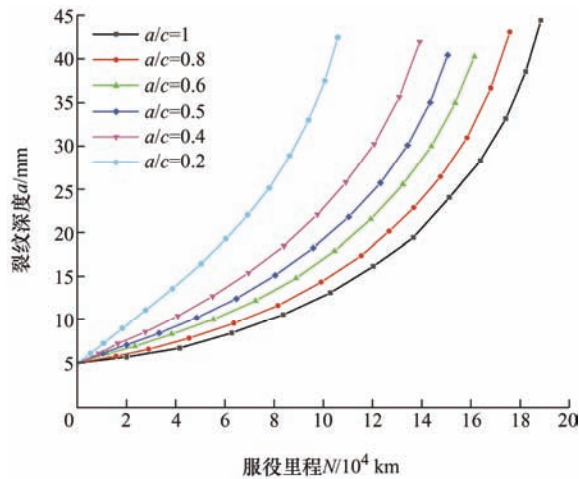


图 14 裂纹深度与服役里程的变化规律

从图中可以得出, 深长比越小, 裂纹扩展速率越高, 失效里程越短, 最小深长比下的服役寿命为 10.5 万 km, 在剩余服役期内需要结合超声波探伤的失效概率来保证安全服役运营, 因此下文进一步结合裂纹扩展规律与探伤失效概率对车轴剩余寿命的探伤周期策略展开分析。

5 探伤周期及失效概率

由于无损检测是依赖于检测概率的统计问题, 目前动车组运用中, 一级修规定里程为 4 400 km, 二级修为 3 万 km, 超声波探伤周期里程已修订到 6 万 km, 三级修 60 万 km 采用磁粉探伤^[28]。车轴在

服役中产生物理缺陷后, 在考虑探伤失效概率基础上, 采用合理有效的策略, 适度延长 S38C 车轴超声波探伤里程具有重要意义。由材料疲劳导致的断轴事故大多伴随着裂纹漏探, 而目前常用的超声波探伤技术在某些情况下, 即使对于 4 mm 深的裂纹探出概率仍不足 0.4, 特定尺寸和方向的缺陷只能以一定的概率被检测到, 这被称为“检测概率”(Probability of detection, POD)^[29-30]。

由于车轴在实际服役过程中以表面深度 1 mm 裂纹作为报废限度, 缺少服役过程中裂纹扩展演化的特征, 因此通过裂纹扩展数值手段模拟其扩展行为以及服役寿命周期。目的是为了研究车轴在确定性裂纹扩展行为下, 提出改进和优化的维护周期策略。在避免未来事故发生的前提下, 研究车轴的裂纹扩展行为需要结合既有探伤手段明确可剩余服役的限度, 不同无损检测方法对不同裂纹尺寸的检出概率曲线以及基于裂纹概率的剩余服役寿命规律如图 15^[29, 31-32]、16 所示。

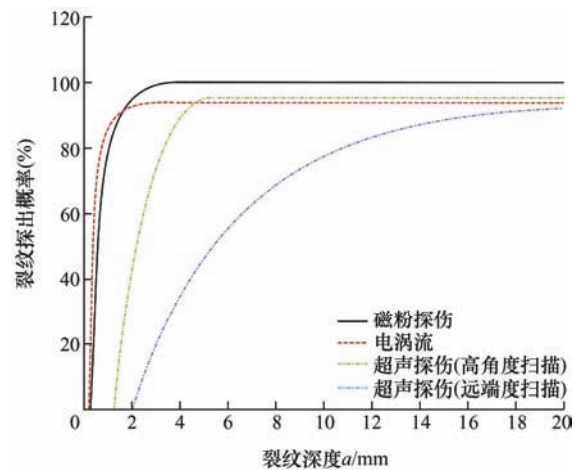


图 15 无损检测裂纹探出概率

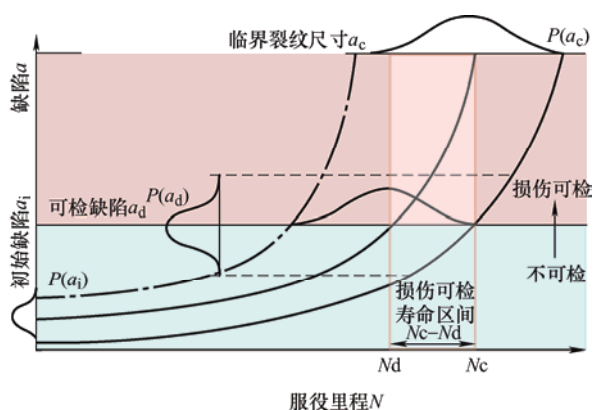


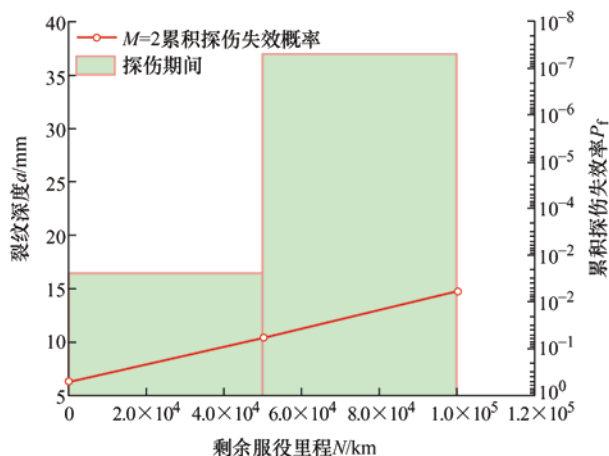
图 16 裂纹概率剩余服役寿命

S38C 车轴采用中频感应淬火，服役性能保证了检修周期内的可靠性，然而在运用中仍发现各种损伤缺陷，深度可达 0.5 mm。因此，基于随机裂纹的检出概率确定剩余寿命评估至关重要。本文采用图 15 基于超声波远端 5 mm 深度裂纹的较高 $POD=51\%$ 检出概率作为初始值^[30, 32]，根据裂纹深度扩展曲线计算扩展至失效剩余寿命的探伤周期。

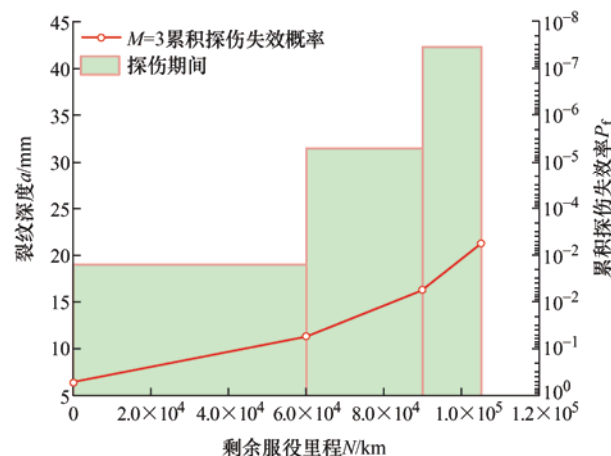
在使用过程中，设计良好的检查程序允许在部件最终失效之前对其进行多次检查。首先，给定检查间隔的服役里程 N 然后从无损检测曲线中选择裂纹检出概率，根据疲劳裂纹扩展寿命曲线、给定数量的检查次数 i 和所采用较为保守的远端超声波 POD 曲线，从而计算得到扩展裂纹的累积检测概率，以未检测到的概率定义为 $1-POD$ ，经过一系列 M 次无损检测未检测到裂纹的概率计算公式为

$$P_f = \Pi_i^M \text{POND}(a)_i = \Pi_i^M [1 - \text{POD}(a)]_i \quad (5)$$

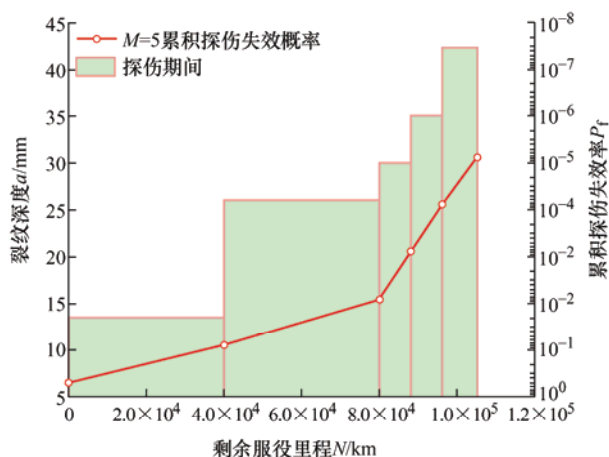
以图 15 中 $a/c=0.2$ 较为保守的扩展寿命曲线结合图 16、图 17 裂纹探伤概率曲线，分析探伤周期策略与检出失效的概率，为优化检修周期提供支撑。在剩余寿命服役周期内，结合目前的检修制度分别定义检查间隔的服役长度，在尽可能保证较高可靠度下以 $M=2、3、5、7$ 探讨检修周期与裂纹探出失效概率，如图 17 分别列举了四种服役间隔周期下服役里程与裂纹深度和失效概率的曲线。



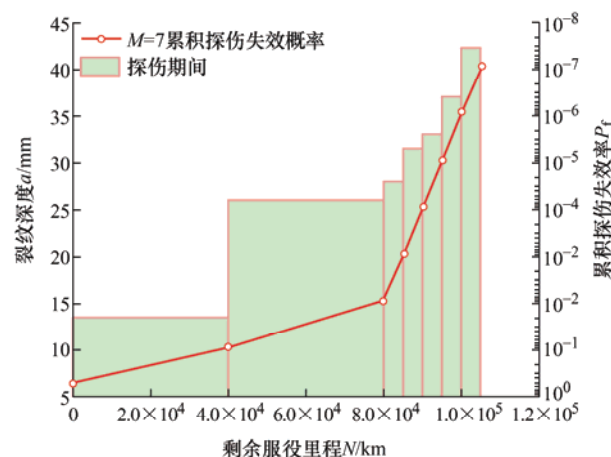
(a) 2次探伤累积失效概率与裂纹深度关系



(b) 3次探伤累积失效概率与裂纹深度关系



(c) 5次探伤累积失效概率与裂纹深度关系



(d) 7次探伤累积失效概率与裂纹深度关系

图 17 探伤周期策略与累积探伤失效概率关系

从图 17 不同探伤周期间隔和超声波探伤累积

探伤失效概率得出，基于目前的探伤周期和维修间

隔以 6 万 km 作为初次探伤间隔,以 3 万 km 作为二级修间隔,至少探伤两次,累积探伤失效概率为 0.561%,不能满足达到临界失效裂纹深度时累积探伤小于 0.1%的失效概率。在二级修程结束后增加一次 5 000 km 间隔的一级修,累积探伤失效概率为 0.056 1%,可以达到安全服役要求。

基于裂纹扩展深度寿命曲线和 POD 裂纹检出概率曲线,正如预期的那样,检查间隔的服役时间越长,探伤失效的累积概率越高,为提高检修概率保证服役安全,进一步分析了 $M=5$ 、7 时的阶梯探伤周期策略与服役累积探伤失效概率。

以 4 万 km 作为二级修间隔,8 000 km 作为一级修间隔,历经两次二级修间隔后,采用一级修作为降阶探伤,可使得累积探伤失效概率为 0.007 84%;以 4 万 km 作为二级修间隔,5 000 km 作为一级修间隔,历经两次二级修后采用一级修降阶探伤,可使得探伤失效率进一步降低。

基于裂纹扩展剩余寿命曲线与探伤检出概率曲线结合实现阶梯检修的策略可以进一步延长车轴服役寿命,表 3 给出了阶梯探伤周期策略,为动车组车轴维修周期的优化提供重要参考。

表 3 阶梯探伤检修周期策略

初次探伤 /10 ⁴ km	一级修 /km	二级修 /10 ⁴ km	探伤 频次	累积失效 概率(%)
6	—	3	3	0.561
6	5 000	3	4	0.0561
4	8 000	4	5	0.007 84

在车轴实际服役中,要求的累积探伤失效概率越低,意味着更高的探伤次数以及更短的探伤周期,本文以确定性的裂纹扩展行为结合既有探伤手段的不确定性从方法上给出了维修策略,实际服役检修中要结合修程修制从整体上平衡车辆系统的检修规程,选择最佳的维修时间。

6 结论

通过考虑表面强化车轴的服役载荷、材料工艺,综合分析了存在初始裂纹下的车轴裂纹扩展行为,并对初始深度 5 mm 下的不同深长比裂纹开展了扩展寿命研究。在此基础上,将裂纹扩展曲线与无损检测累积探伤失效概率结合,分析了探伤周期与累积探伤失效概率的关系,得到如下结论。

(1) 针对表面强化车轴,残余应力对表面裂纹萌生扩展行为有显著抑制作用,裂纹尖端一旦延伸至轴芯后,裂纹将加速扩展。

(2) 对于车轴薄弱部位深度 5 mm 的初始裂纹,深长比越小,表面裂纹前缘的应力强度因子越大,深长比较小的初始缺陷,在实际载荷谱作用下将有更短的剩余寿命,基于 NASGRO 方程在特定实测载荷谱下的扩展剩余寿命区间为 10.5 万~18.8 万 km。

(3) 基于裂纹探伤检出概率,将裂纹扩展寿命与较为保守的超声波累积探伤失效概率结合,得到了基于阶梯探伤的周期策略以及累积探伤失效概率,可采取 6 万 km 作为初次探伤周期,3 万 km 二级修间隔结合 5 000 km 一级修的策略作为延寿的指导方案。

在车轴的状态维修运用中,基于损伤的裂纹缺陷失效分析以及探伤周期优化策略,可以采用阶梯探伤周期进行失效风险评估,为更加精确地实现状态检修、动态周期确定,以及运用维护提供支撑。后续可根据实测载荷开展台架试验和累积探伤失效概率统计分析,结合阶梯探伤周期验证其维修间隔可靠性,实现表面强化车轴动态健康状态维修的统一化规律应用。

参 考 文 献

- [1] WU S C, XU Z W, KANG G Z, et al. Probabilistic fatigue assessment for high-speed railway axles due to foreign object damages[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 117: 90-100.
- [2] ZHANG S, XIE J, JIANG Q, et al. Fatigue crack growth behavior in gradient microstructure of hardened surface layer for an axle steel[J]. Materials Science and Engineering, 2017, 700: 66-74.
- [3] WU S C, XU Z W, LIU Y X, et al. On the residual life assessment of high-speed railway axles due to induction hardening[J]. International Journal of Rail Transportation, 2018, 6(4): 218-232.
- [4] POKORNY P, HUTAR P, NAHLIK L. Residual fatigue lifetime estimation of railway axles for various loading spectra[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2016, 82: 25-32.
- [5] 周素霞, 李福胜, 谢基龙, 等. 基于损伤容限的动车轴车轴实测载荷谱等效应力评价[J]. 机械工程学报, 2015, 51(8): 131-136.
ZHOU Suxia, LI Fusheng, XIE Jilong, et al. Equivalent stress evaluation of measured load spectrum of electric vehicle axle based on damage tolerance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(8): 131-136.
- [6] 邹洪伟, 李亚波, 马丽英, 等. S38C 车轴表层梯度材

- 料的疲劳裂纹扩展性能研究[J]. 润滑与密封, 2021, 46(4): 106-110.
- ZOU Hongwei, LI Yabo, MA Liying, et al. Research on fatigue crack growth performance of S38C axle surface graded material[J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(4): 106-110.
- [7] 吴圣川, 任鑫焱, 康国政, 等. 铁路车辆部件抗疲劳评估的进展与挑战[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 81-114.
- WU Shengchuan, REN Xinyan, KANG Guozheng, et al. Progress and challenges of fatigue assessment of railway vehicle components[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 81-114.
- [8] 马利军. 基于断裂力学的含缺陷车轴服役寿命评估方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- MA Lijun. Research on service life evaluation method of defective axle based on fracture mechanics[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [9] 秦庆斌, 吴圣川, 胡雅楠, 等. 高速动车组 S38C 车轴疲劳强度及剩余寿命评价[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(7): 840-850.
- QIN Qingbin, WU Shengchuan, HU Yanan, et al. Evaluation of fatigue strength and remaining life of S38C axles of high-speed EMUs[J]. Science in China: Technical Sciences, 2019, 49(7): 840-850.
- [10] 徐忠伟, 吴圣川, 段浩, 等. 考虑压装和实测动应力的含缺陷空心车轴剩余寿命评估[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(6): 656-665.
- XU Zhongwei, WU Shengchuan, DUAN Hao, et al. Remaining life assessment of hollow axle with defects considering press-fitting and measured dynamic stress[J]. Science in China: Technical Sciences, 2017, 47(6): 656-665.
- [11] 金新灿, 黄巾懿. 基于实测载荷谱的高速列车轮轴剩余寿命分析[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(1): 64-69, 76.
- JIN Xincan, HUANG Jinyi. Remaining life analysis of high-speed train axle based on measured load spectrum[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(1): 64-69, 76.
- [12] TRAUPE M, JENNE S, LUTKEPOHL K, et al. Experimental validation of inspection intervals for railway axles accompanying the engineering process[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 86: 44-51.
- [13] GIANNELLA V. Stochastic approach to fatigue crack-growth simulation for a railway axle under input data variability[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 144: 106044.
- [14] 赵丙峰, 廖鼎, 朱顺鹏, 等. 机械结构概率疲劳寿命预测研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 1-13.
- ZHAO Bingfeng, LIAO Ding, ZHU Shunpeng, et al. Research progress in probabilistic fatigue life prediction of mechanical structures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 1-13.
- [15] LANZAGORTA J L, AIZPURUA I, VAZQUEZ P R, et al. New ways to inspect railway axles: From simulation to experimental validation[J]. NDT & E International, 2021, 121: 102439.
- [16] KLINGER C, BETTGE D. Axle fracture of ICE3 high speed train [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 35: 66-81.
- [17] GIANNELLA V, SEPE R, BORRELLI A, et al. Numerical investigation on the fracture failure of a railway axle[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 129: 105680.
- [18] CARBONI M, CANTINI S. Advanced ultrasonic "Probability of Detection" curves for designing in-service inspection intervals[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 86: 77-87.
- [19] FORMAN R G, METTU S R. Behavior of surface and corner cracks subjected to tensile and bending loads in Ti-6Al-4V alloy[R]. Houston: National Aeronautics and Space Administration, 1990.
- [20] NEWMAN J C. A crack opening stress equation for fatigue crack growth[J]. International Journal of Fracture, 1984, 24(4): 131-135.
- [21] 林浩博. 高速动车组 S38C 车轴疲劳、裂纹扩展特性及可靠性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- LIN Haobo. Research on fatigue, crack growth characteristics and reliability of S38C axles of high-speed EMUs[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [22] 肖乾, 徐红霞, 李清华, 等. 考虑轮轴、盘轴过盈装配的车轴应力分析[J]. 机械强度, 2014, 36(1): 67-71.
- XIAO Qian, XU Hongxia, LI Qinghua, et al. Stress analysis of axles considering interference assembly of axles and disc axles[J]. Mechanical Strength, 2014, 36(1): 67-71.
- [23] 董懿辉, 鲁连涛, 李小萱, 等. 空心轴与实心轴过盈配合结构微动磨损与疲劳的仿真分析[J]. 机械工程学报, 2022, 58(5): 161-169.
- DONG Yihui, LU Liantao, LI Xiaoxuan, et al. Simulation analysis of fretting wear and fatigue of interference fit

- structures with hollow and solid shafts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(5): 161-169.
- [24] 董智超. 高速轮轴载荷谱及疲劳强度分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- DONG Zhichao. High-speed wheel axle load spectrum and fatigue strength analysis[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [25] WAWRZYNEK P A, CARTER B J, BANKS-SILLS L. The M-integral for computing stress intensity factors in generally anisotropic materials[M]. New York: National Aeronautics and Space Administration, Marshall Space Flight Center, 2005.
- [26] 李有堂, 孙智甲. 三维结构中片状疲劳裂纹扩展行为的数值模拟方法[J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(2): 162-166.
- LI Youtang, SUN Zhijia. Numerical simulation method of flaky fatigue crack growth behavior in three-dimensional structure[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(2): 162-166.
- [27] 张俊清. 高速列车空心车轴表面裂纹应力强度因子研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- ZHANG Junqing. Research on surface crack stress intensity factors of high-speed train hollow axles[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [28] 叶孟洪. 基于 CRH2A 型动车组车轴疲劳裂纹扩展超声波探伤周期优化探讨[J]. 机车电传动, 2020, 276(5): 105-109.
- YE Menghong. Discussion on optimization of ultrasonic flaw detection cycle based on fatigue crack propagation of CRH2A EMU[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020, 276(5): 105-109.
- [29] ZERBST U, VORMWALD M, ANDERSCH C, et al. The development of a damage tolerance concept for railway components and its demonstration for a railway axle[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(2): 209-239.
- [30] MATZKANIN G A, YOLKEN H T. Probability of detection (POD) for nondestructive evaluation (NDE)[R]. Austin: Texas Research Institute, 2001.
- [31] CARBONI M. Reliability of non-destructive testing in the railway field: common practice and new trends[M]. Singapore: Springer, 2019.
- [32] 丁然, 李强. 基于漏探概率的车轴探伤周期制定方法[J]. 中国铁道科学, 2017, 338(4): 101-106.
- DING Ran, LI Qiang. The method of formulating axle detection cycle based on the probability of missed detection[J]. China Railway Science, 2017, 338(4): 101-106.
-
- 作者简介: 王超, 男, 1995 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机车车辆结构裂纹扩展与剩余寿命预测。
E-mail: wangchao_study@163.com
- 朱涛(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为机车车辆结构剩余寿命评估方法与预测, 结构强度与轻量化设计方法。
E-mail: zhutao034@swjtu.edu.cn