

DOI: 10.3901/JME.2022.05.161

# 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\*

董懿辉<sup>1</sup> 鲁连涛<sup>1</sup> 李小萱<sup>2</sup> 赵海<sup>3,4</sup> 陈翰<sup>1</sup> 曾东方<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;

2. 中国铁路北京局集团有限公司北京动车段 北京 102600;

3. 安徽工业大学材料科学与工程学院 马鞍山 243000;

4. 马鞍山钢铁股份有限公司技术中心车轮研究所 马鞍山 243000)

**摘要:** 为了分析空心轴与实心轴过盈配合结构微动磨损与疲劳行为的差异,建立了两种过盈配合结构的微动磨损-微动疲劳联合仿真模型。该联合仿真模型基于 Archard 磨损方程和有限元软件 ABAQUS 的自适应网格技术实现了循环微动磨损的仿真,基于线性累积损伤理论和修正的 SWT 临界平面法实现了微动疲劳寿命预测。分析结果表明:空心轴的微动磨损比实心轴严重,微动磨损显著降低了过盈配合边缘附近的应力集中,同时在配合内部引起了新的应力集中,并导致微动裂纹萌生位置出现在配合内部。受到微动磨损的影响,空心轴的微动疲劳寿命仅约为实心轴的 40%,但两种结构的微动裂纹萌生位置几乎一致。

**关键词:** 微动磨损; 微动疲劳; 过盈配合; 空心轴; 有限元

**中图分类号:** TH117

## Simulation Analysis of Fretting Wear and Fatigue of Press-fitted Structure of Hollow Axle and Solid Axle

DONG Yihui<sup>1</sup> LU Liantao<sup>1</sup> LI Xiaoxuan<sup>2</sup> ZHAO Hai<sup>3,4</sup>CHEN Han<sup>1</sup> ZENG Dongfang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2. Beijing EMU Depot of China Railway Beijing Group Co., Ltd., Beijing 102600;

3. School of Material Science and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243000;

4. Wheel &amp; Tyre Institute of Technology Center, Maanshan Iron &amp; Steel Co., Ltd., Maanshan 243000)

**Abstract:** In order to analyse the difference of fretting wear and fatigue behaviour between hollow axle and solid axle press-fitted structure, the fretting wear-fretting fatigue co-simulation model of two kinds of the press-fitted structure was established. The co-simulation model is based on Archard wear equation and ALE adaptive mesh method of ABAQUS, and fretting fatigue life prediction is realized based on linear cumulative damage theory and modified SWT critical plane method. The simulation results showed that the fretting wear of the hollow axle was more serious than that of the solid axle. The stress concentration at the edge of fit decreased significantly by fretting wear. At the same time, a new stress concentration was established inside the fit and caused the cracks initiation position to appear inside the contact surface. As a result of fretting wear, the fretting fatigue life of hollow axle is only about 40% of the solid axle, and the cracks initiation position was almost the same as that of the solid axle.

**Key words:** fretting wear; fretting fatigue; press-fitted; hollow axle; finite element

\* 国家自然科学基金(51905455)、国家重点实验室自主课题(2021TPL-T01)、中国博士后科学基金(2021M692687)和安徽省科技重大专项(202003a05020038)资助项目。20210413 收到初稿, 20210902 收到修改稿

## 0 前言

轴类过盈配合结构在机械领域应用广泛,如齿轮与轴<sup>[1]</sup>,铁路车轮与车轴<sup>[2]</sup>等。在旋转弯曲载荷作用下,过盈配合边缘不可避免地发生微小的往复滑移,即微动<sup>[3]</sup>。由微动导致的微动磨损和微动疲劳会大幅降低过盈配合结构的服役寿命<sup>[4-5]</sup>。

空心轴具有轻量化和易于无损探伤的优点,因而被广泛应用于高速铁路车辆轮对系统之中。但是,实心车轴过盈配合结构的微动损伤行为与空心车轴相比存在一定的不同。现场检修发现,空心车轴轮座边缘部位发生的微动磨损情况较实心车轴严重<sup>[6]</sup>。如表 1 所示,从 BS EN 13103<sup>[7]</sup>给出的实际车轴疲劳强度可以看出,对于同一车轴钢,空心车轴与实心车轴非配合部位的疲劳强度相同,但是空心车轴配合部位的疲劳强度较实心车轴低至少 10 MPa。这说明在相同载荷作用下,空心车轴过盈配合部位相较于实心车轴更容易出现微动疲劳。但是,由于研究者尚未对两种车轴微动损伤差异的原因进行深入研究,相关部门无法制定差异化的车轴设计方法和维修策略。

表 1 实际车轴疲劳强度

| 钢种   | 非配合部位疲劳强度 /MPa |     | 配合部位疲劳强度 /MPa |     |
|------|----------------|-----|---------------|-----|
|      | 实心轴            | 空心轴 | 实心轴           | 空心轴 |
| EA1N | 200            | 200 | 120           | 110 |
| EA4T | 240            | 240 | 145           | 132 |

研究者针对车轴微动疲劳裂纹萌生问题,先后提出了考虑材料弹性变形、塑性变形和微动磨损影响的弹性-疲劳<sup>[8]</sup>、弹塑性-疲劳<sup>[9-10]</sup>和磨损-疲劳<sup>[11-14]</sup>微动裂纹萌生预测模型,并分析了过盈配合结构参数对微动裂纹萌生的影响<sup>[6,14]</sup>。近年来的研究发现,在微动磨损的影响下,轮轴过盈配合边缘的应力会发生重分布,进而对微动裂纹的萌生产生显著影响。

近年来,部分研究者对空心车轴过盈配合面上的接触应力、滑移幅值、微动磨损等参量进行了仿真分析。平学成等<sup>[15]</sup>仿真获得了动车组车轴过盈配合面上应力和滑移幅值分布,发现了轮轴接触区域裂纹分布的位置在接触边缘内部。张雨等<sup>[16]</sup>仿真研究了空心率对高速列车车轴与轴承配合面滑移幅值的影响,发现滑移幅值随着空心率增加呈非线性下降趋势。宫昱滨等<sup>[6]</sup>对空心轴与实心轴过盈配合结构进行微动磨损仿真研究,发现在相同过盈量和外载条件下,空心轴的磨损较实心轴严重,这与现场

观察到的现象一致。HAN 等<sup>[17]</sup>仿真研究了空心轴过盈配合面上的应力分布。可见,研究者尚未对空心轴的微动磨损和微动疲劳进行综合研究。

本文建立了空心轴与实心轴过盈配合结构有限元模型,并在考虑微动磨损的前提条件下对空心轴与实心轴的微动疲劳进行了仿真分析。

## 1 有限元模型

张远彬等<sup>[11]</sup>对实心轴试样进行了微动疲劳中斷试验,如图 1 所示。试样由套环和轴组成,采用过盈配合方式连接。轴在连接部位的直径为 13 mm,套环外径为 30 mm,过盈量为 21  $\mu\text{m}$ ,满足标准 BS EN 13260<sup>[18]</sup>对过盈量的要求。轴的材料为 35CrMo 车轴钢,套环的材料为 ER8 车轮钢,轴和套环的材料力学性能如表 2 所示<sup>[13]</sup>。

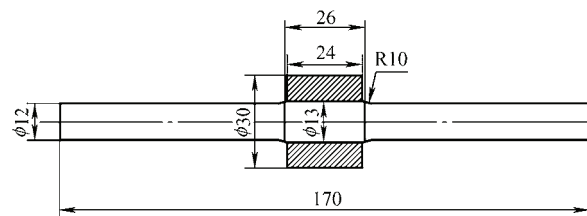


图 1 过盈配合结构试样

表 2 材料力学性能

| 项目     | 循环屈服强度 /MPa | 切线模量 /GPa | 弹性模量/GPa | 泊松比  |
|--------|-------------|-----------|----------|------|
| 35CrMo | 705         | 4.5       | 212      | 0.28 |
| ER8    | 600         | 8         | 212      | 0.28 |

根据图 1 的试样形状和尺寸建立如图 2a 所示实心轴有限元模型。以实心轴模型为基础,在中心部位增加一个通孔就可以得到空心轴模型。铁路空心车轴允许的最大内外径之比为 0.6<sup>[19]</sup>,因此,按 0.6 考虑,将轴中心通孔的孔径设为 7.8 mm。由于结构的受力以及边界条件关于 YZ 平面对称,为了节约计算成本,本文建立关于 YZ 平面对称的二分之一模型进行计算。有限元模型由轴和套环两部分组成,均采用八节点六面体单元(C3D8)划分网格。为缓解配合边缘严重的应力集中,对该部分进行网格细化,如图 2b 所示,过盈配合边缘最小网格尺寸为 15  $\mu\text{m}$ 。仿真采用主从接触算法对轴和套环间接接触面相互作用进行建模,将套环内表面设为主面,而将轴过盈配合面设为从面。将主从面间的摩擦系数设置为 0.6,利用罚函数控制切向接触行为。仿真计算采用双线性弹塑性模型。

仿真施加的载荷及边界条件与试验一致，计算过程如下：分析步 1，对轴右端面  $Y$ 、 $Z$  方向施加平动自由度的固定约束，对模型的对称面沿  $X$  方向施加对称约束，并实现轴和套环的过盈接触；分析步 2，距轴右端面 30 mm 的位置施加  $Y$  方向的载荷，在过盈配合部位，轴的名义弯曲应力为 220 MPa；自分析步 3 开始，在加载处分别沿  $Y$ 、 $Z$  方向施加如图 3 所示的随分析步变化的集中力。通过这种方式对轴施加方向变化，大小不变的集中力，从而表征旋转弯曲载荷。

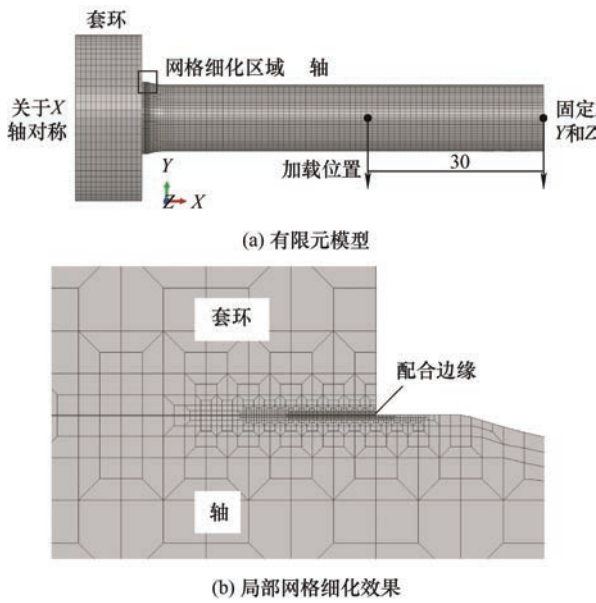


图 2 有限元模型

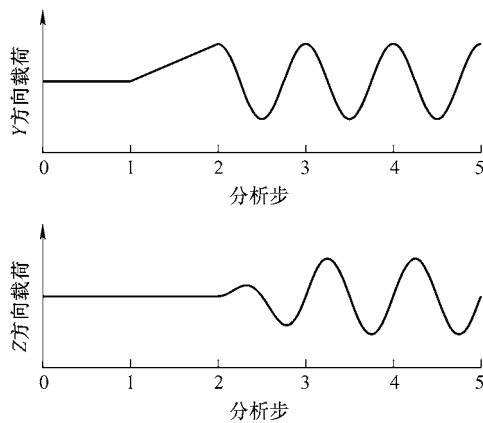


图 3  $Y$ 、 $Z$  方向载荷变化情况

## 2 数值仿真模型

### 2.1 磨损模型

本研究使用能耗法磨损方程计算过盈配合部位的磨损量。微动区某节点  $x$  在某一时间  $t$  的磨损深

度可以表示为<sup>[13]</sup>

$$\Delta h(x, t) = \alpha q(x, t) \Delta s(x, t) \quad (1)$$

式中， $\alpha$  为能耗磨损系数； $q(x, t)$  和  $\Delta s(x, t)$  分别为某节点  $x$  在时间  $t$  所受的摩擦剪应力和滑移增量。

为提高计算效率，仿真时采用循环周次跳跃技术，即认为仿真时每  $\Delta N$  个循环周次内的磨损速率不变。因此，对式(1)进行修正，得到如下表达式

$$\Delta h(x, t) = \Delta N \alpha q(x, t) \Delta s(x, t) \quad (2)$$

根据文献[12]，35CrMo 车轴材料的能耗磨损系数  $\alpha_z = 4.17 \times 10^{-8} \text{ MPa}^{-1}$ ，ER8 套环材料的能耗磨损系数  $\alpha_t = 5.42 \times 10^{-8} \text{ MPa}^{-1}$ 。仿真分别对 0~360 000 循环周次空心轴和实心轴的微动磨损进行计算。

本研究中，微动磨损模型采用 UMESHMOTION 用户子程序和 ALE 自适应网格技术来实现模型网格的自动更新，并避免因微动磨损材料移除导致的网格过度畸形。

### 2.2 微动疲劳模型

学者们普遍认为轴类过盈配合结构在旋转弯曲载荷下萌生的微动裂纹属于多轴疲劳裂纹<sup>[12,14, 20-21]</sup>。多轴疲劳裂纹的萌生取决于特定平面上的应力和应变，该平面被称为临界平面。因此，研究多轴疲劳裂纹萌生问题时，学者们经常将多轴疲劳方法同临界平面法结合，建立了诸如 Fatemi-Socie (F-S<sup>[22]</sup>)，Smith-Watson-Topper (SWT<sup>[23]</sup>) 等多轴疲劳临界平面法。本文选用了修正的 SWT 临界平面法分析微动裂纹萌生行为<sup>[14]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \varepsilon_{eq,a}}{2} &= \frac{\Delta \varepsilon_{a,eq}^e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_a^p}{2} = \frac{\sigma_{n,max}}{\sigma'_f} \frac{\Delta \varepsilon_a^e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_a^p}{2} \\ &= \frac{\sigma'_f}{E} (2N_i)^{2b} + \varepsilon'_f (2N_i)^c \\ \frac{\Delta \varepsilon_{eq,a}}{2} &= \frac{\sigma_{n,max}}{\sigma'_f} \frac{\Delta \varepsilon_a^e}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

式中， $\frac{\Delta \varepsilon_{eq,a}}{2}$  为等效应变幅值； $\frac{\Delta \varepsilon_{eq,a}}{2} = \frac{\sigma_{n,max}}{\sigma'_f} \frac{\Delta \varepsilon_a^e}{2}$  为

在考虑平均应力影响条件下得到的等效弹性应变幅值； $\sigma_{n,max}$  为临界平面上的最大法向应力； $\Delta \varepsilon_a^e / 2$  和  $\Delta \varepsilon_a^p / 2$  分别为临界平面上的法向弹性应变幅值和塑性应变幅值； $\sigma'_f$  为疲劳强度系数； $E$  为弹性模量； $N_i$  为疲劳寿命； $\varepsilon'_f$  为疲劳延性系数； $b$  为疲劳强度指数； $c$  为疲劳延性指数。上述参数取值见表 3<sup>[13]</sup>。

表 3 35CrMo 车轴钢的应变-寿命常数

| 参数                       | 数值       |
|--------------------------|----------|
| 疲劳强度系数 $\sigma'_f$ / MPa | 1 146.78 |
| 弹性模量 $E$ / GPa           | 212      |
| 疲劳延性系数 $\epsilon'_f$     | 0.95     |
| 疲劳强度指数 $b$               | -0.075   |
| 疲劳延性指数 $c$               | -0.81    |

有限元计算时, 获得轴过盈配合部位表层单元中心位置的应力和应变值。然后, 通过三维转换方程得到各位置所有备选平面上的法向应力和应变。将所有备选平面的法向应力和应变幅值代入式(3), 获得所有备选平面的  $\Delta\epsilon_{eq,a}/2$  参数。对于某一位置,  $\Delta\epsilon_{eq,a}/2$  参数最大值所在的平面就是该位置处的临界平面。各位置的最大  $\Delta\epsilon_{eq,a}/2$  参数可以通过 Matlab 程序计算获得。

由于受到微动磨损的影响,  $\Delta\epsilon_{eq,a}/2$  参数随着循环周次变化, 预测得到的疲劳寿命也随着循环周次时刻变化。本文采用 Miner-Palmgren (M-P) 线性累积损伤方法表征微动磨损对疲劳寿命的影响。由于仿真采用了循环周次跳跃技术, 损伤累积表达式如下

$$D = \sum_{l=1}^{N/\Delta N} \frac{\Delta N}{N_{i,l}} \quad (4)$$

式中,  $D$  为疲劳损伤累积值, 当  $D$  累积到 1 时, 微动裂纹萌生;  $N$  为总循环周次;  $N_{i,l}$  为在某一磨损状态  $l$  下, 由式(3)预测得到的微动裂纹萌生寿命。

采用 ALE 技术会导致仿真计算时无法累积同一单元中心点的损伤情况。为解决此问题, MADGE 等<sup>[24]</sup>提出了一种 Material Point Mesh (MPM)方法考虑材料移除对损伤累积情况的影响。利用该方法首先得到单元中心点的累积损伤值, MPM 内的中心点有固定坐标, 然后线性插值计算得到各中心点的累积损伤, 对于已经被磨损掉的单元, 损伤不再累积。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 微动磨损

由于轴和套环组成摩擦副, 因此微动磨损同时发生在轴和套环的配合边缘区域。考虑到轴在弯曲应力作用下的损伤更加严重, 本文将仅对轴进行分析。将仿真得到的磨损轮廓与试验结果<sup>[11]</sup>对比, 由图 4 可见, 仿真模型能够较好地预测过盈配合部位的磨损轮廓, 尤其是对磨损深度的模拟情况较好。

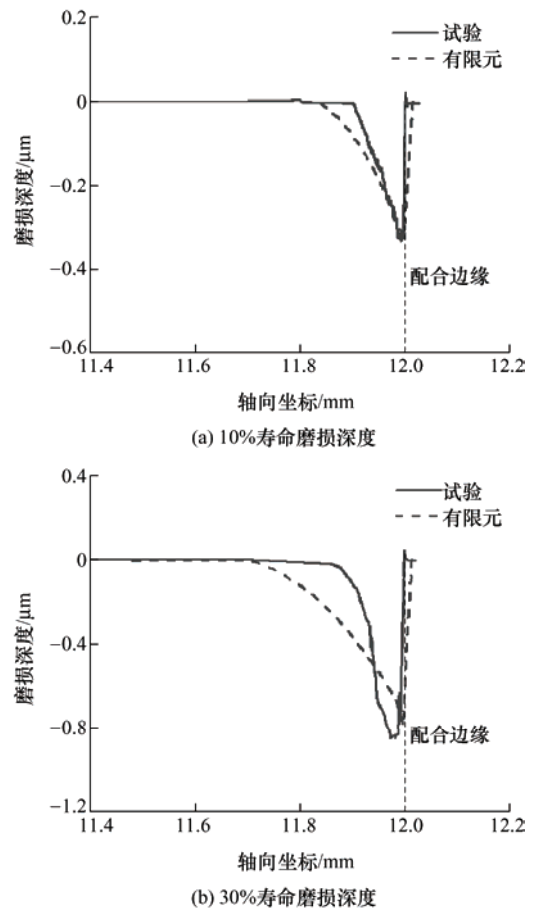
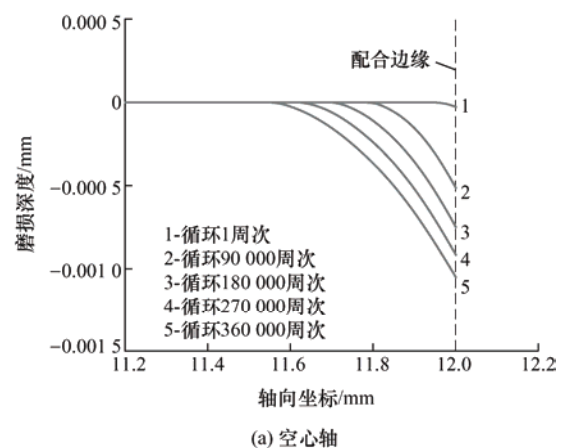


图 4 仿真与试验磨损深度对比

由于轮廓变化主要发生在配合边缘附近的区域, 因此对距配合边缘 0.8 mm 范围内的轮廓变化情况进行研究。不同循环周次时, 仿真计算得到的空心轴与实心轴配合面的磨损轮廓变化如图 5 所示。配合边缘的磨损深度最大, 随着评估位置向内部移动, 磨损深度逐渐变小。在相同循环周次下, 空心轴的磨损宽度和深度都明显大于实心轴。显然, 空心轴的磨损较实心轴严重, 这与现场观察到的现象一致。磨损区域的宽度随着循环周次的增加而逐渐增加, 且磨损区域各位置的磨损深度也逐渐增加。



(a) 空心轴



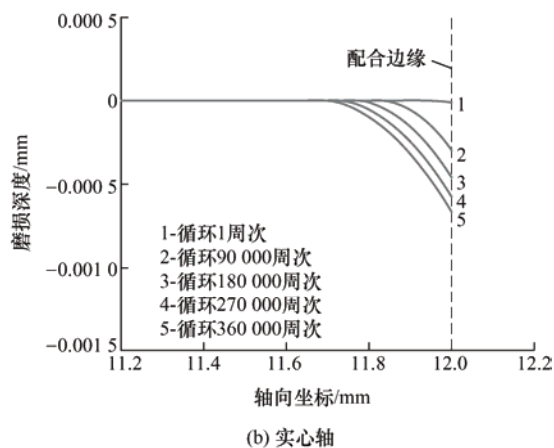


图5 微动磨损轮廓

### 3.2 微动参量

接触压应力, 摩擦剪应力和轴向滑移幅值是轴类过盈配合结构重要的微动参量。但是, 由于结构的封闭性, 这些参量难以通过试验测得。此外, 这些微动参量在微动磨损的作用下时刻发生变化。因此, 有必要研究微动参量在微动磨损作用下的演变规律。考虑到结构在受到拉应力时更容易出现微动损伤, 因此本文对轴受拉侧的主要微动参量进行分析。

#### 3.2.1 接触压应力

不同循环周次时, 仿真计算的空心轴与实心轴接触压应力分布如图6所示。SOSA等<sup>[25]</sup>研究指出, 当最大弯曲应力与接触压应力的比值超过某一值时, 过盈配合结构中轴与套环发生分离, 近配合边缘区域出现张开区。本研究中, 轴受到的名义弯曲应力较大(220 MPa), 这使得初始时刻空心轴与实心轴配合边缘均出现张开区。试验观察到微动磨损主要发生在张开区, 因此本研究中认为磨损区与张开区相同。张开区内的接触压应力为零, 接触压应力的峰值出现在张开区与接触区边界。随着评估位置向内部移动, 接触压应力逐渐减小。随着循环周次增加, 张开区宽度由于微动磨损作用而逐渐增大。

通过对比空心轴与实心轴, 可以发现在相同的循环周次下, 空心轴磨损情况更严重, 其过盈配合边缘存在更大应力集中。且空心轴由于刚度低, 导致其相较于实心轴变形更严重。因此, 空心轴张开区边缘接触压应力峰值明显高于实心轴, 且张开区宽度明显大于实心轴。而在接触内部, 空心轴的接

触压应力与实心轴相近。

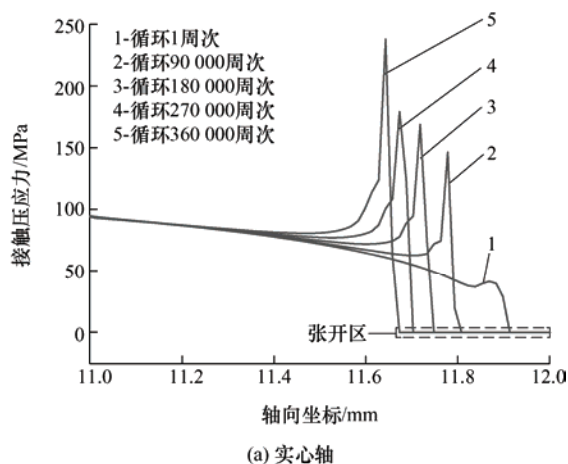
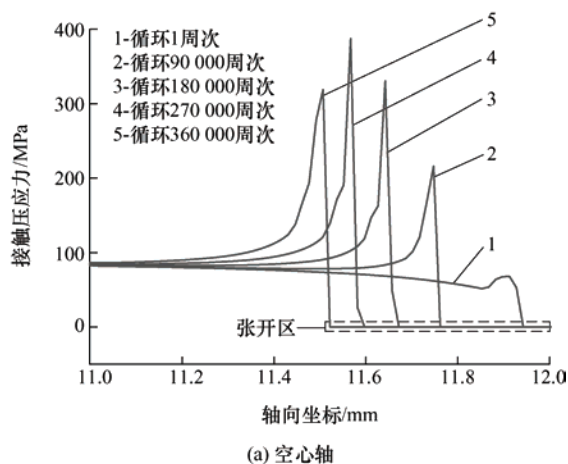
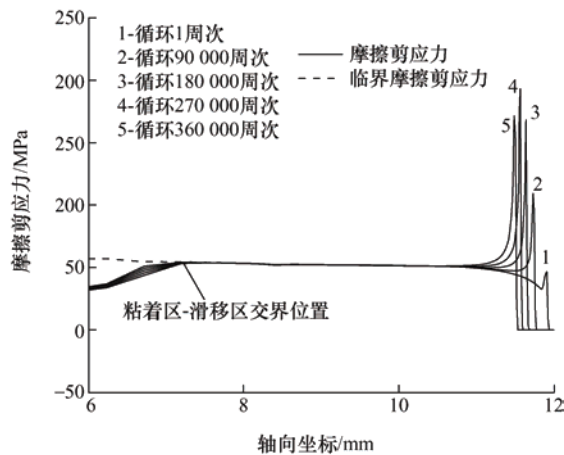


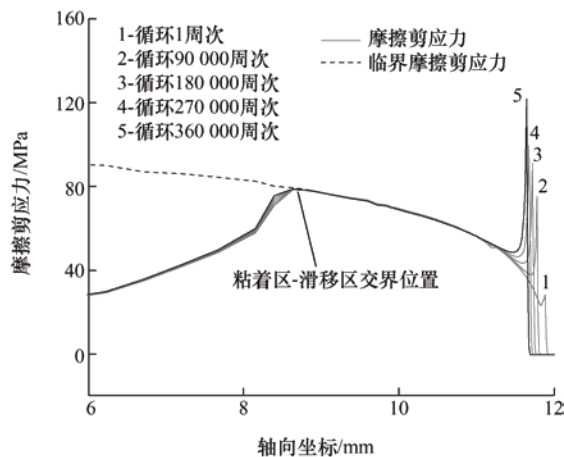
图6 接触压应力分布

#### 3.2.2 摩擦剪应力

不同循环周次时, 仿真计算的空心轴与实心轴摩擦剪应力分布如图7所示。当某位置临界摩擦剪应力大于配合面上摩擦剪应力时, 该位置位于粘着区; 临界摩擦剪应力等于摩擦剪应力时, 该位置位于滑移区。由于在疲劳载荷的作用下, 配合区一定宽度范围总是处于粘着区, 无相对运动, 因此取滑移区附近的摩擦剪应力进行分析。由图7可知, 同一循环周次下, 滑移区内摩擦剪应力变化趋势与接触压应力相同, 这是因为滑移区内的接触压应力与摩擦剪应力可以通过库仑摩擦定律进行转换。粘着区内摩擦剪应力随着评估位置向内部移动逐渐下降。不同的循环周次时, 空心轴与实心轴的粘着-滑移区交界位置基本不变。且由于空心轴内部临界摩擦剪应力小, 更容易产生滑移, 所以空心轴较实心轴滑移区宽。



(a) 空心轴

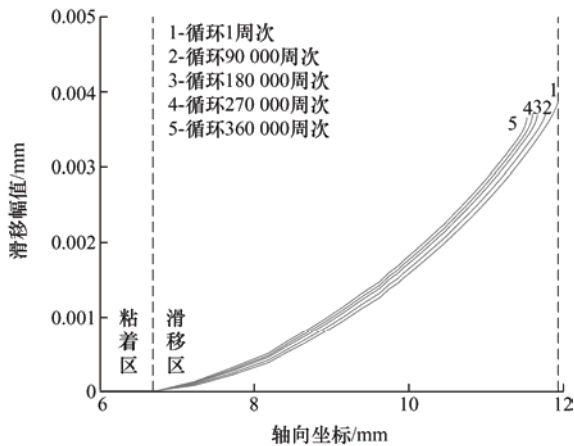


(b) 实心轴

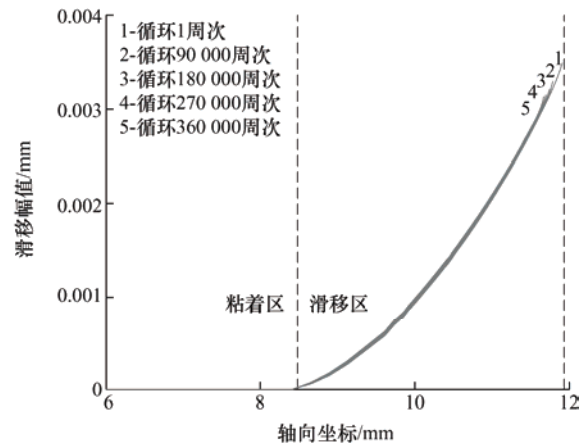
图 7 摩擦剪应力分布

### 3.2.3 轴向滑移幅值

不同循环周次时, 仿真计算得到空心轴与实心轴的轴向滑移幅值分布如图 8 所示。由于仿真采用了循环周次跳跃技术, 总的滑移幅值是由每个增量步的滑移值累加所得。在此, 只考虑不同循环周次时受拉侧滑移区的滑移幅值。空心轴与实心轴的滑移幅值分布规律基本相同, 且基本不随循环周次变



(a) 空心轴



(b) 实心轴

图 8 轴向滑移幅值分布

化而变化。空心轴的滑移区宽度大于实心轴, 且各位置的滑移幅值大于实心轴。

综上, 空心轴在配合边缘的磨损区范围以及接触应力幅值和轴向滑移幅值均大于实心轴。因此, 空心轴的配合边缘部位相较于实心轴出现更剧烈的往复相对运动, 其微动磨损情况更严重。

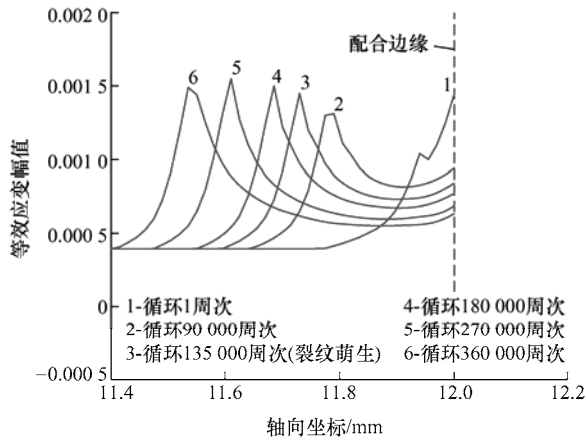
### 3.3 微动疲劳

#### 3.3.1 等效应变幅值 $\Delta\epsilon_{a,eq}/2$

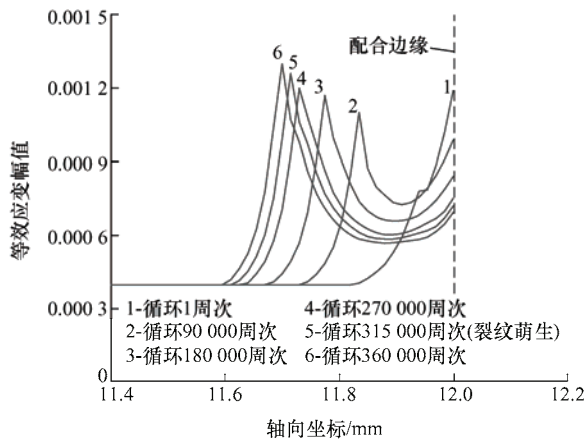
由于微动磨损主要发生在近配合边缘区域, 因此对配合边缘附近微动疲劳情况进行研究。空心轴和实心轴微动区等效应变幅值  $\Delta\epsilon_{a,eq}/2$  随着循环周次的演变情况如图 9 所示。

在同一循环周次内, 等效应变幅值会由配合边缘处到张开区边缘呈现“U”型变化趋势, 在张开区边缘出现峰值后逐渐下降, 最终趋于平缓。从图 6 可以发现, 接触压应力的峰值出现在配合内部的张开区边缘, 因此空心轴与实心轴在接触内部出现新的等效应变幅峰值。空心轴在配合内部的等效应变幅值与实心轴相比明显更高。随着循环周次的增加, 配合边缘部位应变幅值逐渐减小, 而配合内部出现新的应变幅峰值, 且内部的峰值随着循环周次增加逐渐向内部移动。从图 5 中可以发现, 随循环周次增加, 轴在配合边缘部位的磨损深度在增加, 因此配合边缘部位等效应变幅值不断降低。空心轴与实心轴相比, 循环初期在内部产生的等效应变幅值增长速率更快。如图 5 所示, 仿真结果表明由于配合边缘部位存在微动磨损现象, 磨损轮廓会发生变化, 这缓解了配合边缘处的应力集中, 导致该位置的等效应变幅值下降。同时, 配合内部产生了新的应力集中, 该位置等效应变幅值增大, 这显著地增加了内部萌生微动裂纹的风险。试验结果<sup>[12]</sup>也证

明了这一点, 即微动裂纹萌生位置在配合内部而非配合边缘。在配合边缘, 空心轴接触压应力高于实心轴, 且空心轴变形量大。因此, 在相同条件下空心轴等效应变幅值高于实心轴。



(a) 空心轴



(a) 实心轴

图 9 等效应变幅值

### 3.3.2 累积损伤

空心轴与实心轴最大累积损伤随循环周次的变化如图 10 所示。在相同循环周次条件下, 空心轴的最大损伤值大于实心轴, 且最大损伤值的积累速度更快。累积损伤值达到 1 时, 相应位置微动裂纹萌生。实心轴的微动裂纹萌生循环周次约为 315 000 次, 这与试验观察结果<sup>[11]</sup>(微动裂纹萌生寿命占总寿命的 10%~30%, 其中总寿命  $N_f=1\ 310\ 000$ )吻合。空心轴的微动裂纹萌生循环周次约为 135 000 次。因此, 可以说明在相同条件下空心轴的抗微动疲劳能力弱于实心轴。从图 11 可以发现, 空心轴和实心轴同样循环至萌生微动裂纹的周次, 即累积损伤情况达到 1 后, 空心轴的接触压应力峰值明显高于实心轴。与实心轴相比, 在相同条件下空心轴的微动磨损程度更严重, 导致空心轴配合边缘的应力集中更显著。因此, 空心轴微动裂纹萌生寿命短于实心

轴。从图 12 可以看出, 空心轴与实心轴在微动裂纹萌生时的磨损轮廓基本相同, 可以说明微动裂纹萌生时磨损区的磨损宽度和深度基本相同。因此无论空心轴或实心轴, 当微动磨损区域的深度和宽度达到某一条件时, 过盈配合部位会萌生微动裂纹。

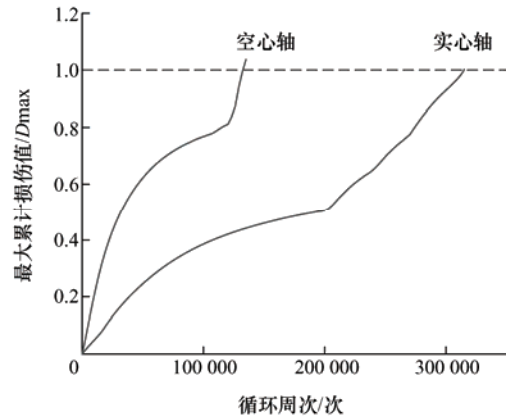


图 10 最大累积损伤值随循环周次的变化

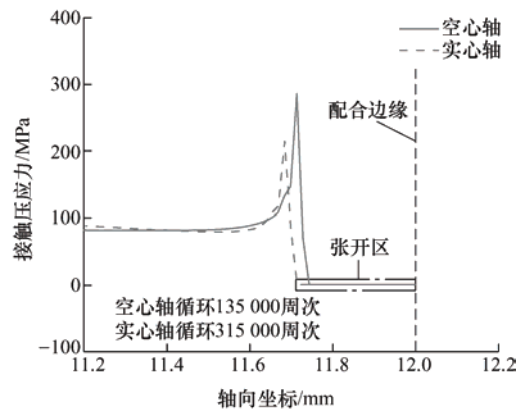


图 11 裂纹萌生时的接触压应力

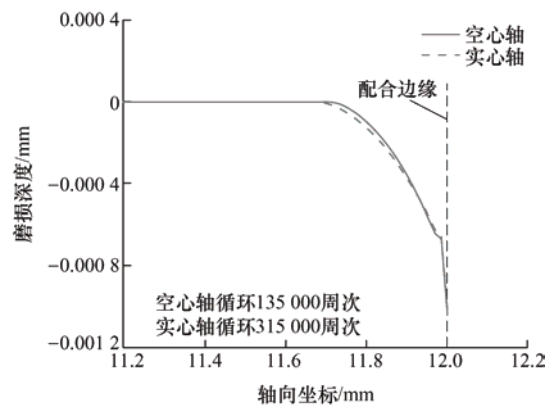


图 12 裂纹萌生循环周次下的磨损情况

从图 13 可以看出, 随着循环周次增加, 最大累积损伤值出现的位置逐渐向配合区域内部移动。从图 11 可以看出, 萌生微动裂纹时, 空心轴与实心轴张开区宽度相近, 张开区边缘位置与微动裂纹萌生

位置几乎一致。通过对试验结果的观察发现,多数微动裂纹萌生位置在距离压装部位边缘 0.2 mm 的区域<sup>[11]</sup>,仿真结果表明,实心轴微动裂纹萌生位置距压装部位边缘 0.24 mm,与实验观察到的结果吻合较好;空心轴的微动裂纹萌生位置距压装部位边缘 0.22 mm。可见,尽管空心轴与实心轴的疲劳寿命有差距,但微动裂纹萌生位置基本相同。

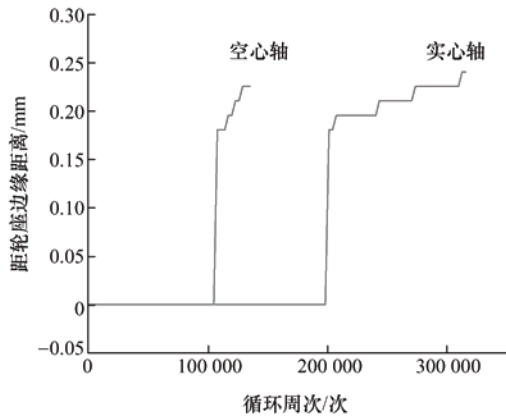


图 13 最大累积损伤值出现位置

## 4 结 论

(1) 空心轴在配合边缘的磨损区范围以及接触应力幅值和轴向滑移幅值均大于实心轴。因此,空心轴的配合边缘部位相较于实心轴出现更剧烈的往复相对运动,其微动磨损情况更严重。

(2) 微动磨损导致过盈配合内部出现新的应力集中。由于空心轴配合边缘的微动磨损程度大于实心轴,其应力集中更显著。因此空心轴的疲劳寿命小于实心轴。

(3) 尽管空心轴与实心轴的疲劳寿命有差距,但微动裂纹萌生位置基本相同,均萌生于磨损区边缘附近区域。

## 参 考 文 献

- [1] HU Yongxu, LIN Jianhui, TAN A C. Failure analysis of gearbox in CRH high-speed train[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 105: 110-126.
- [2] ZOU Lang, ZENG Dongfang, LI Yabo, et al. Experimental and numerical study on fretting wear and fatigue of full-scale railway axles[J]. Railway Engineering Science, 2020, 28(4): 365-381.
- [3] MICHNEJ M, GUZOWSKI S. Fretting wear simulation in a clamped joint based on the example of a rail vehicle wheel set[J]. Wear, 2019, 438-439(1).
- [4] 袁才钦, 李亚波, 杨凯, 等. 铁路车轴过盈配合面微动

损伤分析及有限元仿真[J]. 摩擦学学报, 2020, 198(04): 108-118.

YUAN Caiqin, LI Yabo, YANG Kai, et al. Damage analysis and finite element simulation of fretting wear on press-fitted surface of railway axle[J]. Tribology, 2020, 198(04): 108-118

- [5] 杨广雪, 谢基龙, 李强, 等. 过盈配合微动损伤的关键参数[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 53-59.

YANG Guangxue, XIE Jilong, LI Qiang, et al. Key parameters of fretting damage under shrink fit[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 53-59.

- [6] 宫昱滨, 鲁连涛, 张远彬, 等. 空心轴过盈配合结构循环微动磨损的仿真研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(6): 123-130.

GONG Yubin, LU Liantao, ZHANG Yuanbin, et al. Simulation research on the fretting wear of press-fitted hollow axle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(6): 123-130.

- [7] BS EN 13103 Railway applications. wheelsets and bogies. non powered axles. design method [S]. London: BS Press, 2017.

- [8] WHITE D J, HUMPHERSON J. Finite-element analysis of stresses in shafts due to interference-fit hubs[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1969, 4(2): 105-114.

- [9] 张远彬, 鲁连涛, 宫昱滨, 等. 微动磨损对过盈配合结构微动疲劳性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(4): 495-502.

ZHANG Yuanbin, LU Liantao, GONG Yubin, et al. Influence of fretting wear on fretting fatigue properties of press-fitted shaft[J]. Tribology, 2016, 36(4): 495-502.

- [10] KUBOTA M, KATAOKA S, KONDO Y. Effect of stress relief groove on fretting fatigue strength and index for the selection of optimal groove shape[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(3): 439-446.

- [11] ZHANG Yuanbin, LU Liantao, GONG Yubin, et al. Fretting wear-induced evolution of surface damage in press-fitted shaft[J]. Wear, 2017, 384-385, 131-141.

- [12] ZHANG Yuanbin, LU Liantao, GONG Yubin, et al. Finite element modeling and experimental validation of fretting wear scars in a press-fitted shaft with an open zone[J]. Tribology Transactions, 2017, 61(4): 585-595.

- [13] ZHANG Yuanbin, LU Liantao, ZOU Lang, et al. Finite element simulation of the influence of fretting wear on fretting crack initiation in press-fitted shaft under rotating bending[J]. Wear, 2018, 400-401, 177-183.

- [14] ZOU Lang, ZENG Dongfang, WANG Jing, 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.
- [15] 平学成, 赵辽翔. 新型空心车轴轮对过盈配合微动疲劳特性分析[J]. 机械设计与制造, 2014(7): 116-119.
- PING Xuecheng, ZHAO Liaoxiang. Fretting fatigue characteristics of interference fit joints of wheel and shaft in a locomotive[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(7): 116-119.
- [16] 张雨, 张开林, 王晓鹏, 等. 高速列车空心轴的边缘效应及微动分析[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(6): 15-18.
- ZHANG Yu, ZHANG Kailin, WANG Xiaopeng, et al. Fretting analysis and edge effect of high-speed train hollow shaft[J]. Railway Locomotive & Car, 2015, 35(6): 15-18.
- [17] HAN Chuanjun, ZHANG Jie. Interference assembly and fretting wear analysis of hollow shaft[J]. The Scientific World Journal, 2014: 919518.
- [18] BS EN 13260 Railway applications. Wheelsets and bogies- Wheelsets. Product requirements [S]. London: BS Press, 2011.
- [19] 严隽毫, 傅茂海. 车辆工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- YAN Junmao, FU Maohai. Vehicle engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.
- [20] ZHU Chongfei, HE Jifan, PENG Jinfang, et al. Failure mechanism analysis on railway wheel shaft of power locomotive[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 104: 25-38.
- [21] GÜNER G, GÜR C H. Failure analysis of fretting fatigue initiation and growth on railway axle press-fits[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 84: 151-166.
- [22] LI Jing, QIU Yuanying. A path-dependent multiaxial fatigue life estimation criterion for metals under various loading conditions[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 149(3): 106300.
- [23] PUNIT A, SUNEEL K, MAHENDRA K, et al. Multiaxial fatigue tests under variable strain paths and asynchronous loading and assessment of fatigue life using critical plane models[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 145, 106049.
- [24] MADGE J J, LEEN S B, MCCOLL I R, et al. Contact-evolution based prediction of fretting fatigue life: Effect of slip amplitude[J]. Wear, 2007, 262(9-10): 1159-1170.
- [25] SOSA G U, HILLS D A, SACKFIELD A. A shrink-fit peg subject to bending and shearing forces[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1999, 34(1): 23-29.
- 
- 作者简介: 董懿辉, 男, 1998 年出生, 博士研究生。主要研究方向为铁路车轴疲劳断裂和摩擦磨损。
- E-mail: yhdong@my.swjtu.edu.cn
- 曾东方(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为材料与结构的疲劳断裂和摩擦磨损。
- E-mail: zengdongfang@swjtu.edu.cn