

加载相位差对微动磨损影响的数值模拟研究

李玲, 麻诗韵, 阮晓光, 康乐, 蔡安江

(西安建筑科技大学 机电工程学院, 西安 710055)

摘要: **目的** 研究不同加载相位差下微动磨损量随切向载荷幅值的变化规律。**方法** 在 ABAQUS 中建立柱面/平面微动磨损模型, 设置不同的加载相位差, 结合能量模型和 UMESHMOTION 子程序, 进行仿真试验, 对不同情况下的磨损深度进行仿真分析。**结果** 法向载荷、位移载荷和应变载荷取定值时, 0° 相位差的磨损深度最小, 180° 相位差的磨损深度最大, 90° 和 270° 相位差的磨损深度相同, 且介于二者之间; 当法向载荷和位移载荷为定值时, 0° 相位差的磨损深度随应变载荷的增大而减小, 90° 相位差的磨损深度不受应变载荷幅值的影响, 180° 相位差的磨损深度随应变载荷的增大而增加, 且接触状态由部分滑移向完全滑移逐渐过渡; 当法向载荷和应变载荷一定时, 随位移载荷的增加, 各相位差下磨损宽度和磨损深度都呈现出增大的趋势; 在部分滑移状态下, 当应变载荷较大时, 0° 相位差的最大磨损深度发生在接触区后缘, 180° 相位差的最大磨损深度发生在接触区前缘, 90° 相位差的前、后缘磨损深度极大值接近。**结论** 两切向载荷间加载相位差对磨损深度随切向载荷幅值变化的趋势影响明显, 0° 相位差的磨损深度最小, 相位差对最大磨损深度的产生位置也有影响。

关键词: 柱面/平面磨损模型; 相位差; 微动磨损; 能量模型; UMESHMOTION 子程序

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0093-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.013

Numerical Simulation of the Effect of Loading Phase Difference on Fretting Wear

LI Ling, MA Shi-yun, RUAN Xiao-guang, KANG Le, CAI An-jiang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

ABSTRACT: The work aims to study the variation of fretting wear parameters with tangential load amplitude under different loading phase differences. A dynamic cylinder/flat wear model was established in ABAQUS and different loading phase differences were set up to conduct the simulation test based on the energy model and the UMESHMOTION subroutine to analyze the wear depth of different loading conditions. When normal load, displacement load and strain load were constant value, the wear depth of 0° phase difference was the smallest, the wear depth of the 180° phase difference was the largest and the wear depth of 90° phase difference was the same as that of 270° in the middle. When the normal load and displacement load were fixed, the wear depth of 0° phase difference decreased with the increase of strain load and the wear depth of 90° phase difference was not

收稿日期: 2018-03-15; 修订日期: 2018-06-04

Received: 2018-03-15; **Revised:** 2018-06-04

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目 (2018JM5066); 国家自然科学基金资助项目 (51305327); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20136120120020)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2018JM5066); National Natural Science Foundation of China (51305327); the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, China (20136120120020)

作者简介: 李玲 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为数字化设计与制造, 振动信号处理与参数辨识方法研究。

Biography: LI Ling (1981—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: digital design and manufacturing, vibration signal processing and parameters identification methods.

affected by the strain load amplitude, but the phase difference of 180° increased as the strain load increased and the contact state gradually transferred from partial slip to full slip. The wear width and the wear depth at different phase differences increased with the increase of the displacement load when the normal load and the strain load were constant. In addition, the phase difference of 0° had the largest wear depth at the trailing edge of the contact zone, while the largest wear depth of 180° phase difference occurred at the leading edge of in the partial slip state. However, the maximum wear depth of 90° phase difference in the trailing edge and leading edge of the contact zone was equivalent. The phase difference of two tangential loads had a significant influence on the wear depth with the variation of tangential load amplitude, and the wear depth of 0° phase difference is the smallest. The phase difference also affects the position of the maximum wear depth.

KEY WORDS: cylinder/flat wear model; phase difference; fretting wear; energy model; UMESHMOTION subroutine

微动广泛发生于各种相互运动或有相互运动趋势的“紧固”配合的机械零部件之间,例如导轨、制动装置、螺栓和螺母、键与键槽等。微动磨损是一种主要的微动损伤形式,会产生材料去除,导致部件的尺寸轮廓发生改变^[1]。影响微动磨损的参量非常多,其中主要参量包括材料属性、表面粗糙度、表面形貌、润滑条件、载荷形式与载荷幅值等^[2-5]。

目前,微动磨损研究主要包括试验和有限元仿真两种方式。Xin等^[6]在不同的位移载荷幅值下,对690合金进行微动磨损试验,研究表明随着位移载荷幅值的增加,切向力与法向载荷的比值和磨损体积随之增大。Wang等^[7]在振荡往复磨损实验机上,研究了超高分子量聚乙烯(UHMWPE)对GCr15钢球的微动磨损,研究表明法向载荷和位移条件存在临界值,UHMWPE在此临界值或其附近时的摩擦系数和磨损体积会产生剧烈变化。陈志强等^[8]在新型冲击微动磨损试验机上对不同材料的薄壁管进行了冲击磨损试验,研究了材料属性、冲击能量对薄壁管微动损伤行为的影响。Yue等^[9]在ABAQUS中建立二维柱/平面接触模型,并将随磨损周期变化的摩擦系数引入微动磨损过程,仿真结果较固定摩擦系数的仿真结果更接近实验数据。李聪波等^[10]基于修正的Archard磨损模型,利用ANSYS软件对机床导轨的磨损过程进行模拟分析,得到磨损深度关于磨损次数的计算公式。李文丽等^[11]基于Archard磨损模型,利用ADAMS软件对断路器传动机构进行模拟仿真,获得了运动副不同接触点的磨损量,实现了复杂磨损过程的有限元仿真。赵杰江等^[12]建立二维平面/柱面接触模型,通过有限元数值模拟铝合金的微动磨损行为,发现接触状态由部分滑移转变为整体滑移的临界应变载荷幅值与法向载荷近似成正比,磨损速率随应变载荷幅值增加而增加。

上述研究成果为使用有限元方法分析微动磨损的影响机制拓宽了思路,但研究中使用的模型大都只是考虑在切向施加一种载荷,没有考虑施加两种或多种切向载荷的情况。Hojjati-Talemi等^[13-14]在加载不同相位差的两种切向载荷下,对Al 2024-T3进行微动试验并设计了相应的有限元数值模拟,研究相位差对微动疲劳初始裂纹产生的影响。Bhatti等^[15-16]建立二

维平面/柱面接触模型,通过有限元数值模拟加载相位差对微动疲劳裂纹初始位置和微动疲劳寿命的影响。但他们都没有考虑加载相位差对微动磨损的影响。

本文针对汽轮机涡轮节的涡轮盘槽与叶片附件接触面的微动损伤问题,通过在有限元软件ABAQUS中构建柱面/平面接触模型,结合能量磨损模型^[17]和UMESHMOTION子程序,进行仿真试验,通过磨损深度分析揭示加载相位差对微动磨损的影响规律。

1 微动磨损的数值计算方法

根据能量模型^[17]可知,磨损量与接触面间的总能耗量成正比,即:

$$V = \alpha E_d \quad (1)$$

式中: V 为磨损体积; α 为能耗法磨损系数; E_d 为总磨损耗能量,其表达式见式(2)。

$$E_d = \int Q ds \quad (2)$$

式中: Q 为摩擦剪切力; S 为试样位移幅值。

在有限元数值中,用表面每一个节点的摩擦剪切应力代替试验直接测量的总摩擦力来分别计算每一个节点处的磨损深度,所以在一个完整的循环载荷作用过程内,位置 x 处的磨损深度表达式为:

$$h(x) = \sum_{i=1}^n \alpha q(x)_i \Delta s(x)_i \quad (3)$$

式中: n 为有限元计算中一个完整循环载荷作用过程内的增量步数; $q(x)$ 为位置 x 处的局部摩擦剪切应力; $\Delta s(x)$ 为位置 x 处的局部相对滑移量。

同理,在一个完整的循环载荷作用过程内,位置 x 处的磨损体积表达式为:

$$V(x) = \Delta A \sum_{i=1}^n \alpha q(x)_i \Delta s(x)_i \quad (4)$$

式中: ΔA 为局部接触面积。

在微动磨损中,一次微动循环产生的磨损量非常小,无法造成接触面轮廓的显著变化,不能影响模拟结果。因此,可用仿真计算的一个载荷步代表 ΔN 次循环载荷的作用,从而实现加速计算,在不影响计算精确性的同时,大幅度地减小分析计算时间。当加速次数为 ΔN 时,位置 x 处的磨损深度可表示为:

$$h(x) = \Delta N \sum_{i=1}^n \alpha q(x)_i \Delta s(x)_i \quad (5)$$

微动磨损数值仿真的具体流程图如图 1 所示, 具体步骤为: ①在 ABAQUS 软件中建立有限元模型, 生成 INP 文件, 这种格式的文件保留了有限元模型所有的节点、单元信息, 以及材料参数和边界条件信息, 并可直接被求解器调用进行分析; ②在 ABAQUS 中对 INP 文件进行求解, 获取接触区域各节点的坐标、接触正压力、剪切力、滑移量等信息; ③在各增量步结束时, 调用基于能量模型的 UMSHMOTION 子程序, 根据修正的能耗磨损模型计算出每个节点的磨损深度 Δh 和磨损体积 ΔV , 接着根据磨损深度进行节点更新, 更新后节点 i 处坐标为 $h_i = h_i - \Delta h$; ④节点更新后生成新的表面轮廓, 生成新的 INP 文件; ⑤统计微动循环次数 N , 判断是否达到预设总循环次数 N_t ; ⑥若步骤⑤的判断结果为否, 重复进行步骤②—⑤, 若判断的结果为是, 微动磨损的仿真计算完成。

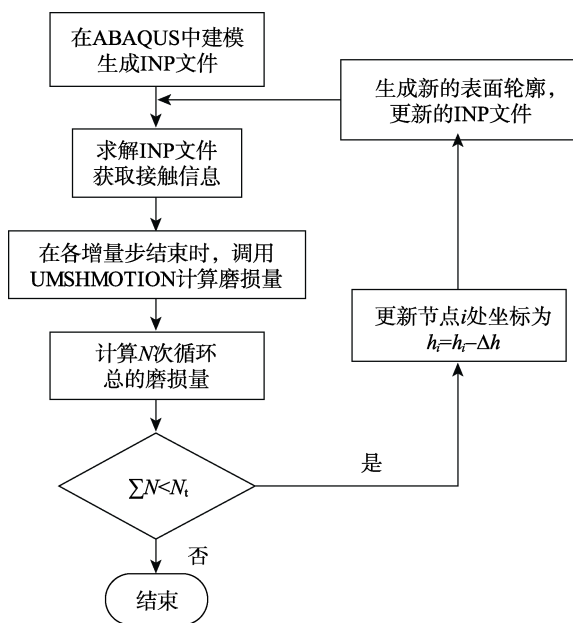


图 1 微动磨损数值仿真流程
Fig.1 Flowchart of fretting wear numerical simulation

2 仿真试验

2.1 仿真模型

汽轮机涡轮节的涡轮盘槽与叶片附件接触面的微动损伤对整机的动力学有很大影响, 装机前需要对其微动特性进行测试。但实际结构造价过于昂贵, 且需要花费大量的时间和人力, 因此将实际结构理想化为圆柱/平面接触模型, 在专用的微动磨损试验机上进行测试, 分析轴向应变载荷与位移载荷之间相位差对微动损伤的影响, 试验方法如图 2 所示。

圆柱试件在法向载荷 P 的作用下与平板试件接

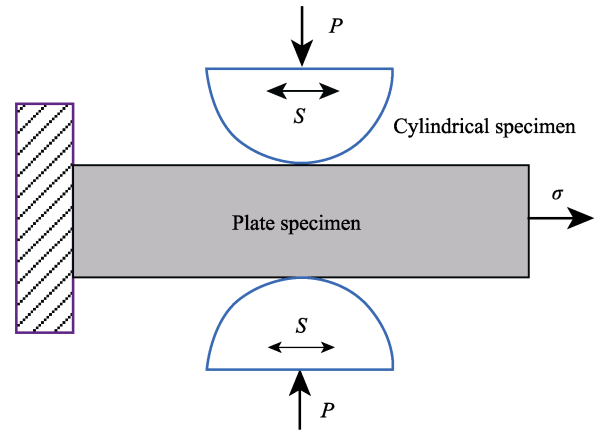


图 2 加载相位差微动磨损试验方法
Fig.2 Fretting wear test method of loading phase difference

触, 在切向周期性位移载荷 S 的作用下往复运动, 平板试件左端固定, 底部约束竖直方向位移, 右端受轴向应变载荷 σ 的作用, 应变载荷即可使平板试件产生应变的交变载荷, 以均布力的形式施加。圆柱试件的半径为 5 mm, 下试件的长宽分别为 10 mm 和 5 mm。材料的选取与文献[9]相同, 即弹性模量和泊松比分别为 200 GPa 和 0.3。试验法向载荷 $P=20$ MPa, 位移载荷幅值为 1~10 μm , 应变载荷幅值为 10~110 MPa。模拟圆柱/平板试件在微动磨损试验机上的试验方法, 利用在 ABAQUS 中建立的微动磨损二维柱面/平面接触模型^[14,18], 如图 3 所示进行仿真试验。有限元模型采用四节点平面应变单元 (CPE4)^[19], 并且圆柱/平面模型的接触区域进行网格细化处理, 细化后的网格单元为 5 $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 。

对模型的接触面进行接触属性设置并定义柱面/平面间的接触。切向设置为具有各向同性摩擦的库仑摩擦定律, 摩擦系数为 0.6^[12], 法向设置为硬接触。采用有限滑移算法, 并且切向约束设置为拉格朗日乘数法, 这样设置获得的接触应力和相对滑移距离会更加准确。在柱面/平面有限元模型中, 采用主-从面的设置定义两个接触面。其中, 圆柱的下表面设置为主面, 下试件的上表面设置为从面。通过这种设置, 方便提取磨损仿真模型接触区域的接触变量, 依据这些数据进行磨损量的计算。

2.2 加载过程

针对模型, 考虑位移载荷与应变载荷之间的四个相位差角 ($\Phi=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$)。如图 4 所示, 当相位差取 0° 或 180° 时, 整个磨损过程包括 5 个分析步; 而当相位差取 90° 或 270° 时, 整个磨损过程分为 6 个分析步。相位差取 90° 或 270° 时, 位移载荷先于应变载荷施加的分析步为辅助分析步。在圆柱顶面施加恒定的法向载荷 P , 并在后续的磨损过程中保持恒定施加。

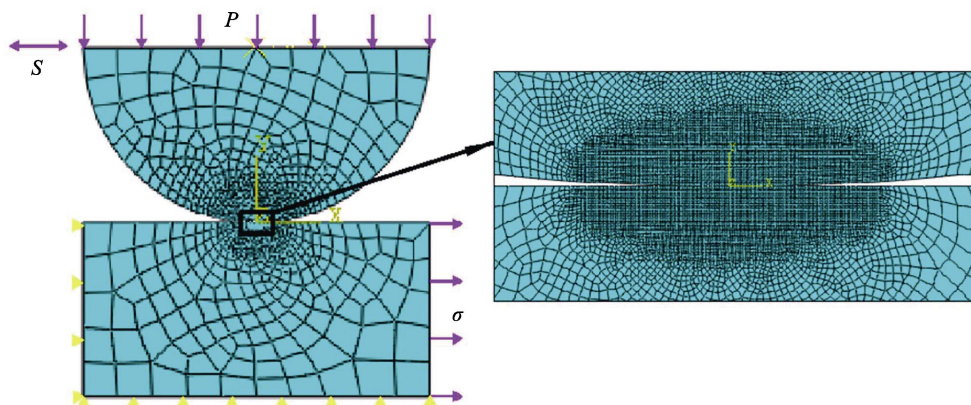


图3 有限元模型

Fig.3 Finite element model

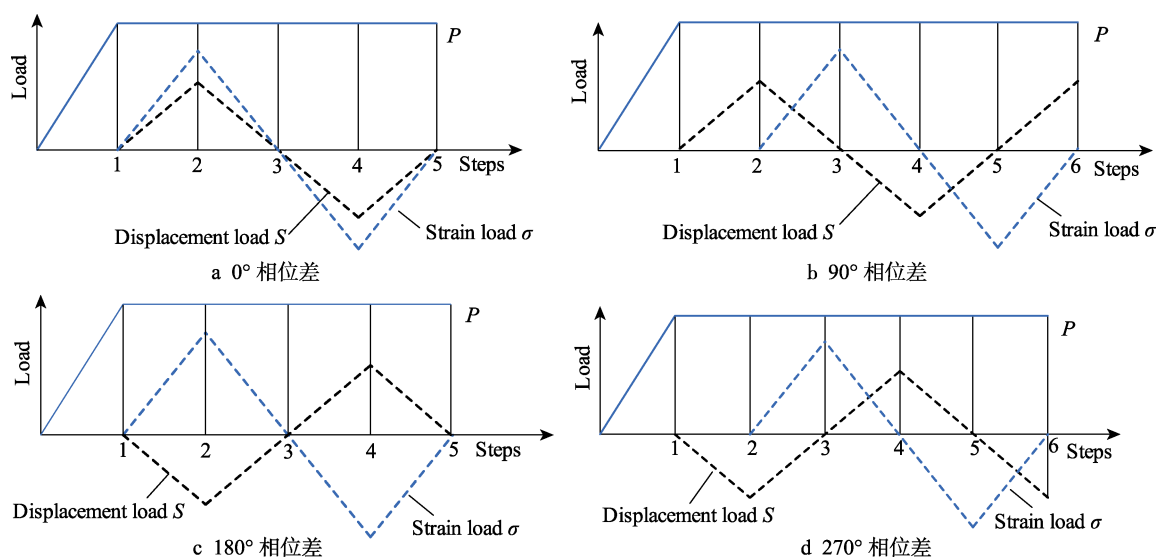


图4 加载过程

Fig.4 Load step: (a) 0° phase difference; (b) 90° phase difference; (c) 180° phase difference; (d) 270° phase difference

图 4a 表明, 0°相位差时, 位移载荷和应变载荷在分析步 2 中同时施加且都在分析步结尾时取到正向最大值。图 4b 表明, 180°相位差时, 位移载荷和应变载荷在分析步 2 中同时施加, 但在分析步结尾时, 应变载荷取到正向最大值, 位移载荷取到负向最大值。图 4c 表明, 对于 90°相位差的情况, 位移载荷在分析步 2 中施加, 应变载荷在分析步 3 中施加, 并分别在分析步结尾时取到正向最大值。图 4d 表明, 270°相位差时, 位移载荷在分析步 2 中施加, 应变载荷在分析步 3 中施加, 位移载荷在分析步 2 结尾时取到负向最大值, 而应变载荷在分析步 3 结尾时取到正向最大值。

2.3 模型验证

微动磨损是一个磨损量不断累积的过程, 磨损量的计算需要大量准确的接触应力和相对滑移数据。在进行仿真时, 必须保证有限元模型的正确性。因此, 使用 Hertz 接触理论来验证模型的正确性^[12], 接触压力分布的解析式为:

$$p(x) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (6)$$

$$\text{式中: } a = \sqrt{\frac{4PR}{\pi E^*}}, p_0 = \sqrt{\frac{PE^*}{\pi R}}, \text{其中, } E^* = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}, R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}, P \text{ 表示施加的法向载荷,}$$

E_1 和 E_2 表示两材料的弹性模量, ν_1 和 ν_2 表示两材料的泊松比, R_1 和 R_2 表示两试样接触表面的曲率半径; x 为接触区域的水平位置坐标。

在分析步 1 结束时, 法向载荷 $P=20$ MPa 完全加载, 对接触压力的解析解和有限元解进行比较, 如图 5 所示, 可以看出有限元模型的分析结果与 Hertz 接触理论计算的接触压力分布是一致的。

文献[15]中模型 3 与本文所建模型结构相似, 所受载荷和约束形式相同, 文献[15]依据有限元模型提取的剪切摩擦力、相对滑移距离以及法向应力来预测微动疲劳损伤的起始位置, 其预测结果与实验结果一

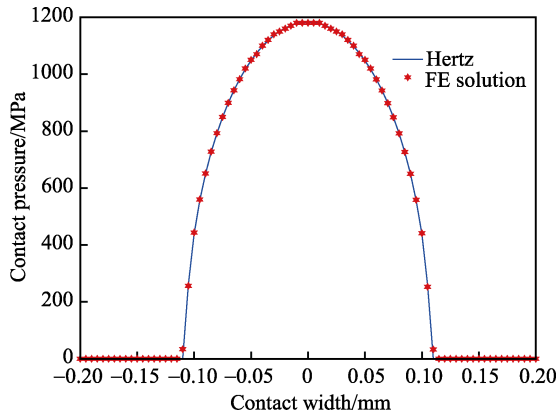


图 5 接触压力的有限元解与 Hertz 解比较
(法向载荷 $P=20$ MPa)

Fig.5 Comparison between FEM analysis and analytical solution of Hertz of contact pressure
(Normal load $P=20$ MPa)

致, 这表明通过有限元模型提取的剪切摩擦力和相对滑移距离数据是可靠的。而本文所采用的能量模型正是利用剪切摩擦力和相对滑移距离来计算微动磨损量, 所以采用本文有限元模型来进行微动磨损仿真有效可行的。

3 磨损结果分析

3.1 不同加载相位差对磨损量的影响

当有限元模型施加的法向载荷、位移载荷及应变载荷取定值, 加载过程如 1.2 所述时, 加载相位差对有限元模型磨损量的影响如图 6 所示。 0° 相位差时的磨损深度最小, 180° 相位差时的磨损深度最大, 90° 和 270° 相位差时的磨损深度介于 0° 和 180° 之间。同时注意到 90° 相位差的磨损深度和 270° 相位差的磨损深度大致相等, 其原因是当相位差为 90° 和 270° 时, 应变载荷与位移载荷的切向合应力值接近。由于 270° 相位差与 90° 相位差的磨损深度大致相等, 下文为避免重复, 只考虑 90° 相位差的情况。在仿真分析中发

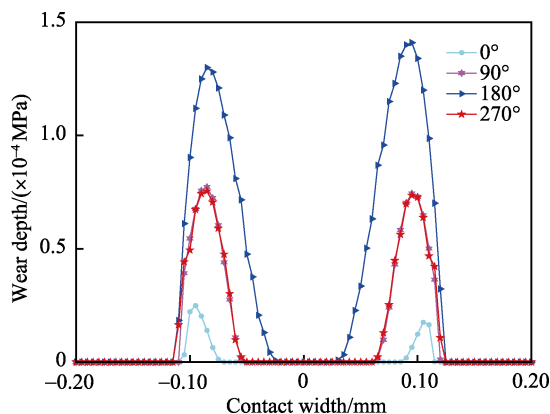


图 6 不同相位差下磨损形貌 (法向载荷 $P=20$ MPa, 位移载荷 $S=2$ μm , 应变载荷 $\sigma=50$ MPa)

Fig.6 Wear scar under different loading phase (Normal load $P=20$ MPa, displacement load $S=3$ μm , strain load $\sigma=50$ MPa)

现, 磨损深度在相位差由 0° 变化到 180° 的过程中逐渐增加, 而在相位差由 180° 增加到 360° 的过程中逐渐减小, 这是由于相位差由 0° 变化到 360° 的过程中, 切向合应力值先增大后减小, 在 180° 处取到极大值。

3.2 不同应变载荷幅值对磨损量的影响

当有限元模型施加的法向载荷、位移载荷取定值, 加载过程如 1.2 所述时, 分别在 0° 、 90° 及 180° 相位差下, 分析磨损量随应变载荷幅值变化的规律, 如图 7 所示。发现在不同的相位差下, 磨损深度和磨

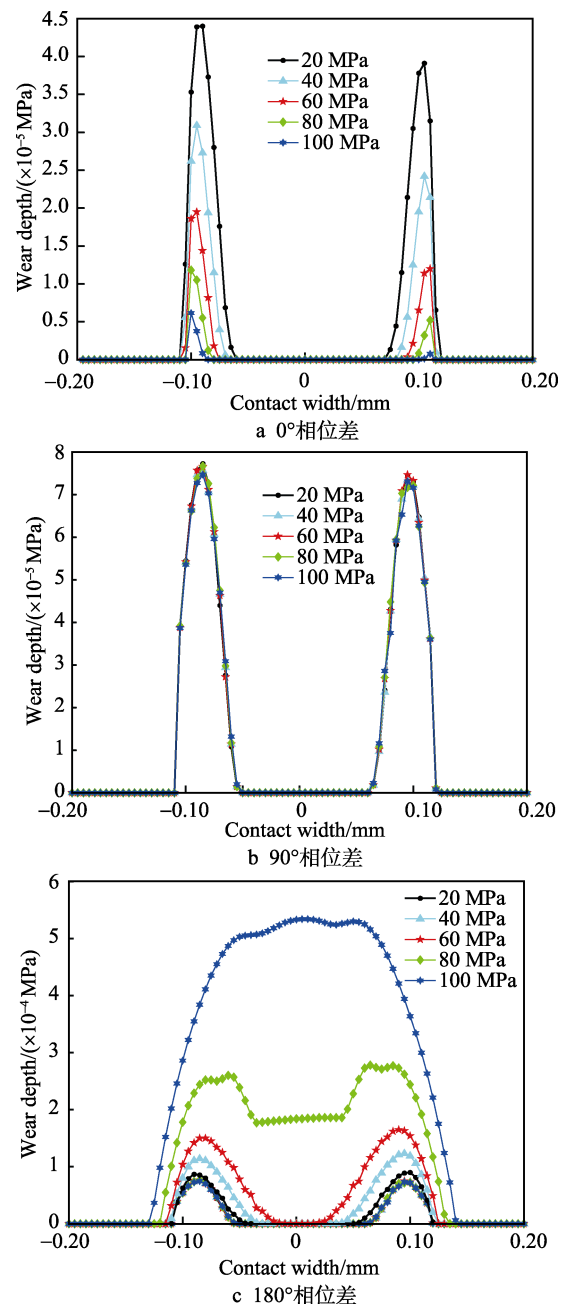


图 7 不同应变载荷下的磨损形貌

(法向载荷 $P=20$ MPa, 位移载荷 $S=3$ μm)

Fig.7 Wear scar under different strain loads (Normal load $P=20$ MPa, displacement load $S=3$ μm): (a) 0° phase difference; (b) 180° phase difference; (c) 270° phase difference

磨损区宽度随应变载荷幅值的变化呈现出完全不同的趋势。图 7a 表明, 0° 相位差时的磨损深度和磨损区宽度, 随着应变载荷的增大逐渐减小, 其原因是当应变载荷较小时, 接触状态取决于位移载荷。仿真范围内随着应变载荷的增加, 切向合应力逐渐减小, 导致磨损深度逐渐减小。图 7b 表明, 90° 相位差时的磨损深度和磨损区宽度, 随着应变载荷的增大而基本保持恒定, 其原因是 90° 相位差下, 随应变载荷的增加, 切向合应力基本不变, 故磨损深度和磨损区宽度保持恒定。图 7c 表明, 180° 相位差时的磨损深度和磨损区宽度, 随着应变载荷的增大逐渐增加, 并观察到接触状态由部分滑移状态向完全滑移状态逐渐过渡, 其原因是 180° 相位差下, 切向合应力随应变载荷的增加而增大, 磨损深度随之增大。通过上述分析, 在实际应用中, 为了达到减缓磨损的目的, 在 0° 相位差时, 可以适当地提高应变载荷幅值, 使得磨损深度取得较小值。在 180° 相位差时, 应尽量减小应变载荷幅值, 使得磨损深度取得较小值。在 90° 相位差时, 可以忽略应变载荷变化对接触区磨损深度和磨损宽度的影响。

3.3 不同位移载荷幅值对磨损量的影响

当有限元模型施加的法向载荷、应变载荷为定值, 加载过程如 1.2 所述时, 分别在 0° 、 90° 及 180° 相位差下, 分析磨损量随位移载荷幅值变化的规律, 如图 8 所示。发现在不同的相位差下, 磨损深度和磨损区宽度随位移载荷幅值大小的变化呈现出相同的趋势。磨损深度和磨损区宽度随着位移载荷的增大, 都逐渐增加。图 8c 表明, 随着位移载荷的增大, 180° 相位差下的接触状态率先由部分滑移状态过渡为完全滑移状态, 该状态下的磨损深度远大于部分滑移状态下的磨损深度。图 8b 表明, 90° 相位差时的临界位移载荷幅值稍大。图 8a 阐明, 0° 相位差时的临界位移载荷幅值更大。出现上述情形的原因是, 当应变载荷一定时, 位移载荷决定切向合应力的大小, 随着位移载荷的增加, 各相位差下的切向合应力都增大, 导致磨损深度增加。相位差为 180° 时, 切向合应力最大, 因此 180° 相位差下, 接触状态率先过渡为完全滑移状态。因而在实际应用中, 为了达到减缓微动损伤的目的, 应尽量减小位移载荷; 在位移载荷幅值取定的情况下, 应尽量减小载荷间的相位差。

从图 6 和图 8 中还可发现, 当接触状态为部分滑移状态时, 各相位差下的最大磨损深度值相差较大, 90° 相位差下的最大磨损深度远小于 180° 相位差下的最大磨损深度。当接触状态过渡到完全滑移状态时, 0° 相位差下的最大磨损深度还是明显小于 90° 和 180° 相位差下的最大磨损深度, 但 90° 和 180° 相位差下的最大磨损深度值接近。出现这种情况的原因是, 当接触状态处于完全滑移状态时, 单一切向载荷决定接触状态, 相位差影响相对较小。

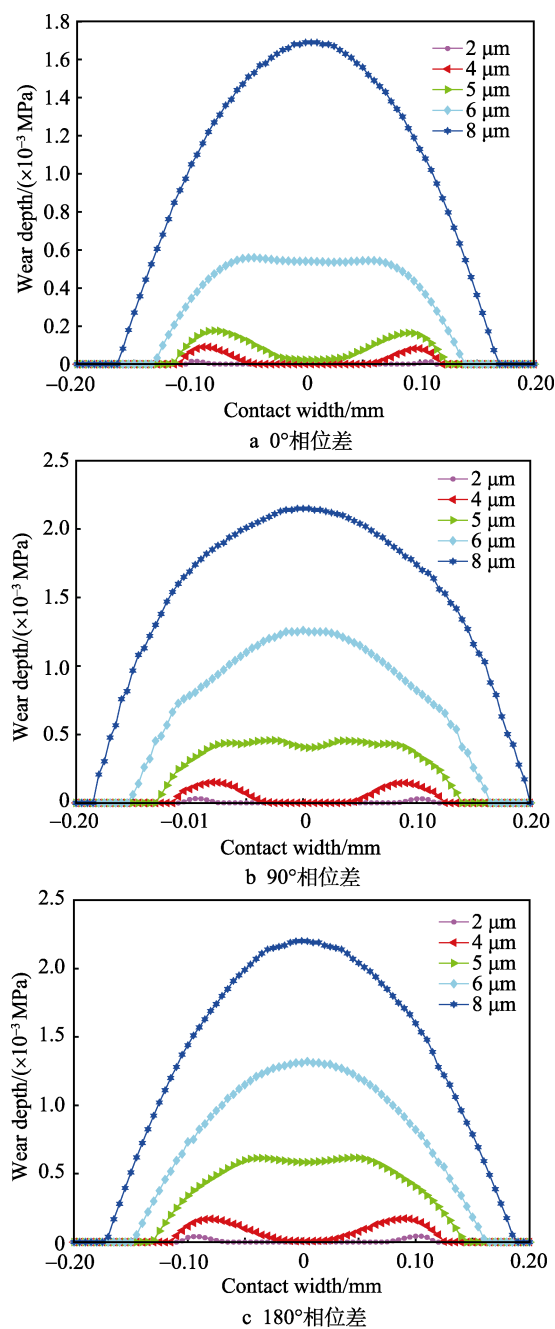


图 8 不同位移载荷下的磨损形貌

(法向载荷 $P=20$ MPa, 应变载荷 $\sigma=20$ MPa)

Fig.8 Wear scar under different displacement loads (Normal load $P=20$ MPa, strain load $\sigma=20$ MPa): (a) 0° phase difference; (b) 90° phase difference; (c) 180° phase difference

从图 9 中观察到, 当位移载荷为 $3 \mu\text{m}$ 时, 0° 相位差下最大磨损深度为 $0.0259 \mu\text{m}$, 90° 相位差下最大磨损深度为 $0.0754 \mu\text{m}$, 180° 相位差下最大磨损深度为 $0.149 \mu\text{m}$ 。磨损深度在相位差由 0° 变化到 180° 的过程中逐渐增加, 与图 6 表现出相同的规律。同时还注意到在部分滑移状态下, 当所施加的应变载荷较大时, 磨损深度的最大值点随加载相位差的改变表现出一定的规律性。

图 9a 表明, 0° 加载相位差时, 磨损深度的最大值在接触区域的后缘, 即远离应变载荷加载一侧。图

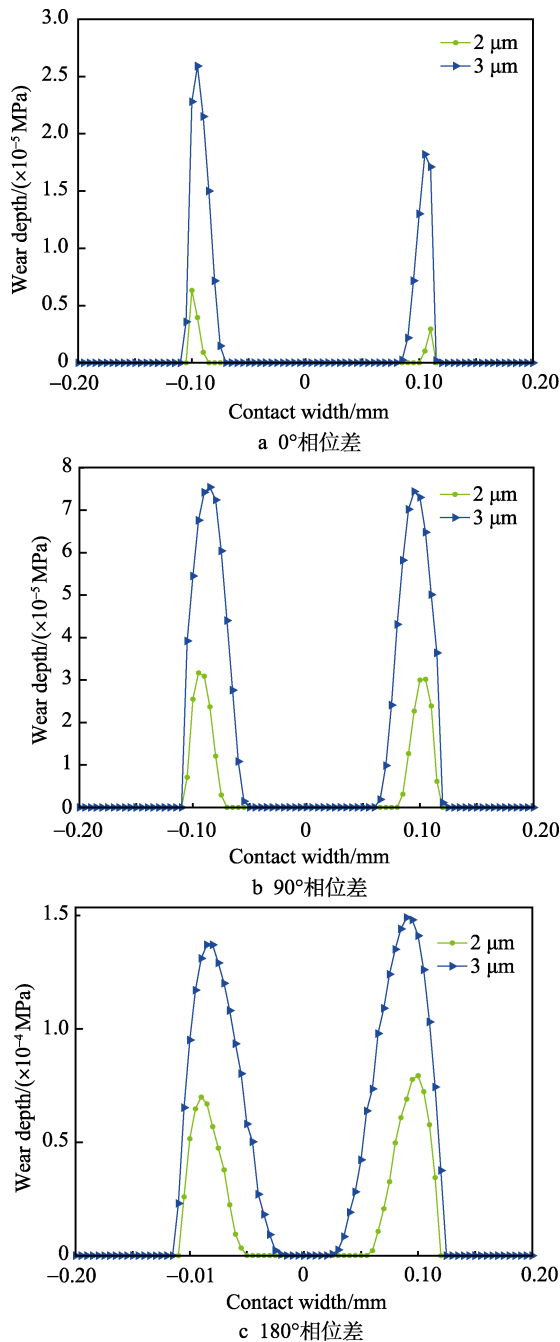


图 9 不同位移载荷下的磨损形貌

(法向载荷 $P=20$ MPa, 应变载荷 $\sigma=50$ MPa)Fig.9 Wear scar under different displacement loads (Normal load $P=20$ MPa, strain load $\sigma=50$ MPa): (a) 0° phase difference; (b) 90° phase difference; (c) 180° phase difference

9b 表明, 90° 加载相位差时, 磨损深度在前、后缘的极大值接近。图 9c 表明, 180° 加载相位差时, 磨损深度的最大值在接触区域的前缘, 即靠近应变载荷加载一侧。在实际应用中可以据此推测相应加载相位差下的最大磨损位置。

4 结论

1) 当法向载荷、周期性位移载荷和周期性应变

载荷取定值时, 相位差由 0° 变化到 180° 过程中磨损深度逐渐增大, 相位差 180° 变化到 360° 过程中磨损深度逐渐减小, 并且 90° 和 270° 相位差时具有相同的磨损深度。

2) 当法向载荷和周期性位移载荷取定值时, 0° 相位差下, 磨损深度随应变载荷的增大逐渐减小; 90° 相位差下, 磨损深度随应变载荷的增大保持恒定; 180° 相位差下, 磨损深度随着应变载荷的增大逐渐增加, 且接触状态由部分滑移向完全滑移逐渐过渡。

3) 当法向载荷和周期性应变载荷一定时, 在各种相位差下, 磨损深度和磨损区宽度随着位移载荷的增大都逐渐增加。

4) 在部分滑移状态下, 当应变载荷较大, 0° 相位差的最大磨损深度发生在接触区后缘, 即远离应变载荷加载一侧; 180° 相位差的最大磨损深度发生在接触区前缘, 即靠近应变载荷加载一侧; 90° 相位差时, 前、后缘磨损深度极大值接近。

参考文献:

- [1] 周仲荣, 朱旻昊. 复合微动磨损[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
ZHOU Z R, ZHU M H. Composite fretting wear[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2004.
- [2] PEREIRA K, YUE T, WAHAB M A. Multiscale analysis of the effect of roughness on fretting wear[J]. Tribology international, 2017, 110: 222-231.
- [3] MENG X H, GU C X, ZHANG D. Modeling the wear process of the ring/liner conjunction considering the evaluation of asperity height distribution[J]. Tribology international, 2017, 112: 20-32.
- [4] ZHANG P, LIU X J, LU W L, et al. Fretting wear behavior of CuNiAl against 42CrMo4 under different lubrication conditions[J]. Tribology international, 2018, 117: 59-67.
- [5] 范娜, 王云霞, 王秋凤, 等. 载荷对 304 不锈钢微动磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(5): 555-561.
FAN N, WANG Y X, WANG Q F, et al. Effects of load on fretting wear behaviors of 304 stainless steels[J]. Tribology, 2016, 36(5): 555-561.
- [6] XIN L, WANG Z H, LI J, et al. Fretting wear behavior and mechanism of Inconel 690 alloy related to the displacement amplitude[J]. Tribology transactions, 2017, 60(5): 913-922.
- [7] WANG Q F, WANG Y X, WANG H L, et al. Fretting wear behavior of UHMWPE-influence of load and stroke[J]. Tribology transactions, 2017, 60(1): 187-194.
- [8] 陈志强, 蔡振兵, 林映武, 等. 恒定动能作用下薄壁管的冲击微动磨损行为研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(15): 114-120.
CHEN Z Q, CAI Z B, LIN Y W, et al. Impact fretting wear behavior of thin-walled tube under constant low level kinetic energy[J]. Journal of mechanical engineering, 2016, 52(15): 114-120.

- [9] YUE T, WAHAB M A. Finite element analysis of fretting wear under variable coefficient of friction and different contact regimes[J]. *Tribology international*, 2017, 107: 274-282.
- [10] 李聪波, 何娇, 杜彦斌, 等. 基于 Archard 模型的机床导轨磨损模型及有限元分析[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(15): 106-113.
- LI C B, HE J, DU Y B, et al. Archard model based machine tool wear model and finite element analysis[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2016, 52(15): 106-113.
- [11] 李文丽, 原大宁, 刘宏昭, 等. 小子样下机构系统磨损仿真可靠性研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(13): 235-244.
- LI W L, YUAN D N, LIU H Z, et al. Reliability research on the mechanism system wear simulation under the case of the small-scale sample[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2015, 51(13): 235-244.
- [12] 赵杰江, 尹东, 唐力晨, 等. 微动接触状态对铝合金磨损速率影响的数值计算与分析[J]. *工程力学*, 2016, 33: 275-282.
- ZHAO J J, YIN D, TANG L C, et al. Numerical calculation and analysis of the effect of fretting contact conditions on the wear rate of zircaloy[J]. *Engineering mechanics*, 2016, 33: 275-282.
- [13] HOJJATI-TALEMI R, WAHAB M A. Fretting fatigue crack initiation lifetime predictor tool: Using damage mechanics approach[J]. *Tribology international*, 2013, 60: 176-186.
- [14] HOJJATI-TALEMI R, WAHAB M A, BAETS P D. Finite element simulation of phase difference effects on fretting fatigue crack nucleation behaviour[J]. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part J: Journal of engineering tribology*, 2014, 228: 470-479.
- [15] BHATTI N A, WAHAB M A. Finite element analysis of fretting fatigue under out of phase loading conditions[J]. *Tribology international*, 2017, 109: 552-562.
- [16] BHATTI N A, WAHAB M A. A numerical investigation on critical plane orientation and initiation lifetimes in fretting fatigue under out of phase loading conditions[J]. *Tribology international*, 2017, 115: 307-318.
- [17] FOUVRY S, KAPSA P, VINCENT L. Quantification of fretting damage[J]. *Wear*, 1996, 200: 186-205.
- [18] LIU J, SHEN H M, YANG Y R. Finite element implementation of a varied friction model applied to torsional fretting wear[J]. *Wear*, 2014, 314: 220-227.
- [19] DONE V, KESAVAN D, MURALI K R, et al. Semi analytical fretting wear simulation including wear debris[J]. *Tribology international*, 2017, 109: 1-9.