

文章编号: 1674-8190(2024)05-127-08

高速篦齿碰摩对封严环裂纹萌生与扩展影响研究

畅佳琪¹, 李辉东², 解文博³, 慕琴琴¹, 陈永辉¹, 杨卫华³

(1. 中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 西安 710065)

(2. 中国航发南方工业有限公司, 株洲 412002)

(3. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 篦齿封严结构碰摩是航空发动机空气系统工作中存在的普遍问题, 由于实际碰摩中难以观察到封严环上裂纹萌生与扩展的过程, 采用有限元方法进行数值仿真能够对裂纹萌生与扩展过程和机理有更加深入的认识。建立碰摩后带磨损槽的封严环模型, 考虑了封严环表面对流换热、碰摩力和碰摩温度, 采用扩展有限元法(XFEM)对封严环碰摩温度场、应力场以及裂纹的萌生与扩展进行数值研究, 并将仿真分析结果与碰摩试验裂纹结果进行对比。结果表明: 数值仿真所得到的裂纹萌生位置及扩展方向均与碰摩试验中实际产生的裂纹基本一致, 揭示了裂纹产生的机理, 证明了该模型能够较好地模拟碰摩所导致的裂纹萌生与扩展过程。

关键词: 篦齿封严; 碰摩; 扩展有限元; 裂纹萌生; 裂纹扩展

中图分类号: V231

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.05.13

Research on the influence of high speed labyrinth rubbing on the initiation and propagation of crack in sealing ring

CHANG Jiaqi¹, LI Huidong², XIE Wenbo³, MU Qinqin¹, CHEN Yonghui¹, YANG Weihua³

(1. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

(2. AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412002, China)

(3. College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The rubbing of the labyrinth sealing structure is a common problem during the operation of aeroengine air system. Due to the difficulty in observing the process of crack initiation and propagation on the sealing ring during actual rubbing, using finite element method for numerical simulation can provide a deeper understanding of the process and mechanism of crack initiation and propagation. The sealing ring model with wear grooves after rubbing is proposed. The surface convective heat transfer coefficient, rubbing force and rubbing temperature of the sealing ring are considered. The extended finite element method (XFEM) is used to numerically study the temperature field, stress field, and crack initiation and propagation of the sealing ring. The crack numerical simulation result is compared with the result of rubbing experiment. The results show that the crack initiation and propagation direction obtained from numerical simulation are basically consistent with those obtained from rubbing experiment. The mechanism of crack initiation is revealed, and it is proven that this method can effectively simulate the process of crack initiation and propagation caused by rubbing.

Key words: labyrinth sealing; rubbing; extended finite element; crack initiation; crack propagation

收稿日期: 2024-06-17; 修回日期: 2024-07-15

基金项目: 国家科技重大专项(2017-VII-0011)

通信作者: 杨卫华(1972-), 男, 博士, 教授。E-mail: yangwh-sjtu@163.com

引用格式: 畅佳琪, 李辉东, 解文博, 等. 高速篦齿碰摩对封严环裂纹萌生与扩展影响研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(5): 127-134.

CHANG Jiaqi, LI Huidong, XIE Wenbo, et al. Research on the influence of high speed labyrinth rubbing on the initiation and propagation of crack in sealing ring[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(5): 127-134. (in Chinese)

0 引言

篦齿封严作为航空发动机空气系统的重要组成部分,常处于高温环境中,同时在发动机实际工作过程中,转子在进行高速旋转的同时会产生振动和较大的离心力,发动机工作的过渡态会加剧转子的振动现象,在热膨胀、离心力以及振动等因素的共同作用下可能会引起篦齿封严结构发生碰撞和磨损,对发动机性能及使用寿命造成影响,严重的话可能会对发动机直接造成损伤^[1]。

国内外针对篦齿封严碰摩的研究主要集中在封严碰摩试验上,借助于高速高温碰摩试验台来研究篦齿封严结构之间的接触碰摩行为。慕琴琴等^[2]从碰摩实验装置、测试技术及涂层可磨耗试验验证方面阐述了国内外目前的研究现状,并分析了主要差距;Munz 等^[3]利用高速摩擦磨损试验台对篦齿与蜂窝衬套之间磨损机制进行大量的摩擦实验研究;Delebarre 等^[4]基于最大转速 40 000 r/min 的高精度五轴铣床改造的可磨耗试验台,研究了篦齿与耐磨涂层之间的接触碰摩行为;Zhang N 等^[5]使用最大转速为 16 000 r/min 的高速可磨耗试验台研究了 Hastelloy-X 蜂窝材料和 GH4169 双台阶篦齿之间的高速摩擦行为;Lu B 等^[6]使用最大转速为 15 000 r/min 的高速旋转实验台进行篦齿与蜂窝的碰摩实验,研究了 Hastelloy-X 蜂窝材料和 Ti17 篦齿之间的高速摩擦行为;赵心我等^[7]使用高温高速碰摩试验台研究了不同侵入速率下封严涂层的可磨耗性,采用叶片高度磨损比(IDR)对涂层可磨耗性进行评价。

针对封严碰摩行为的数值模拟,目前国内外开展的相关研究较少,且主要采用有限元方法来对封严涂层碰摩过程中的碰摩力与碰摩温度进行计算,以此来研究碰摩过程中篦齿封严部件的损伤机理。Pychynski 等^[8]通过使用解析法和数值模拟提出一种分析篦齿在摩擦过程中以及摩擦后的宏观热机械行为的理论方法,分析篦齿径向裂纹的产生机理,即主要径向裂纹由热应力造成,与机械载荷无关,但其未考虑篦齿封严摩擦过程中的高温对材料性能的影响,因而仅在宏观尺度有效;Munz 等^[9-10]开发了一维数值模型用于研究篦齿封

严的摩擦行为,该模型考虑碰摩过程中的运动接触条件、摩擦、热传导以及磨料和塑性磨损,可以计算出部件上的接触压力及温度等负载,并通过旋转篦齿与蜂窝金属箔之间的理想接触实验对该模型进行验证,通过该数值模型可以对密封系统的破坏性影响进行评估,以此对篦齿封严的设计进行指导;Seichepine 等^[11]建立了一种可磨耗涂层模型及碰摩试验模拟过程对涂层性能进行研究,使用该模拟流程,可以通过可磨耗涂层的微观结构对碰摩过程中叶片与涂层的应力和温度变化进行计算预测,有助于理解复杂的封严碰摩现象并对涂层设计提供了帮助;王志雄^[12]使用 Abaqus 软件仿真并计算了封严篦齿与衬套在不同转速、不同入侵速度下的碰摩,得到了不同工况下的接触力以及封严碰摩型面;杨毅成等^[13-14]使用 Abaqus 软件中扩展有限元方法对涡轮叶片叶尖篦齿刮磨过程中径向裂纹的萌生与扩展进行了计算,并分析了碰摩温度、碰摩模式以及碰摩力对裂纹萌生及扩展的影响,研究发现碰摩温度的升高会加速径向裂纹的萌生和扩展,而刮磨力则对篦齿径向裂纹萌生与扩展无明显影响,即篦齿刮磨过程中径向裂纹的萌生与扩展主要受热载荷的影响。

本文建立碰摩后带磨损槽的封严环模型,考虑封严环表面对流换热、碰摩力和碰摩温度的影响,采用扩展有限元法(XFEM)对封严环碰摩温度场、应力场进行计算,并在此基础上对碰摩过程中周向裂纹的萌生及扩展机理进行分析。

1 碰摩裂纹数值计算模型

1.1 几何模型

由于篦齿封严结构碰摩试验后裂纹实际出现在封严环中,而直接模拟该篦齿与封严环之间的碰摩过程所需计算资源较大。为了减少计算量、节省计算时间,仅选用碰摩后产生裂纹的封严环作为计算模型,并在封严环内壁面预制出磨损槽来模拟碰摩过程中篦齿切削产生的磨损槽,封严环截面示意图如图 1 所示,封严环计算模型如图 2 所示。

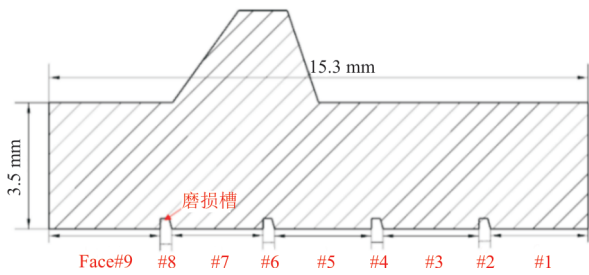


图 1 封严环截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sealing ring section

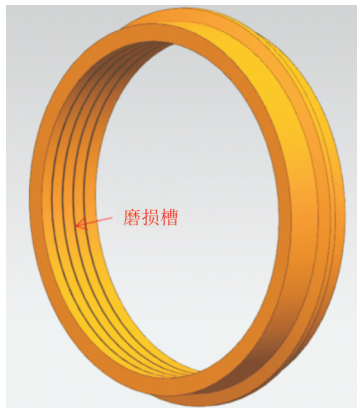


图 2 封严环计算模型

Fig. 2 Sealing ring calculation model

1.2 材料参数

封严环材料主要为铜合金,其材料性能参数如表 1~表 2 所示。

表 1 铜合金的材料参数

Table 1 Copper alloy material parameters

参数	数值	参数	数值
密度/(kg·m ⁻³)	8 900	比热/[J·(kg·°C) ⁻¹]	377
弹性模量/GPa	103	热传导率/[W·(m·°C) ⁻¹]	109
泊松比	0.3	温度/°C	200,600
线膨胀系数/(10 ⁻⁶ °C)	18,17,21,68		

表 2 铜合金的屈服强度

Table 2 Yield strength of copper alloy

温度/°C	屈服强度/MPa	温度/°C	屈服强度/MPa
20	192.0	400	134.3
200	186.0	450	113.0
250	178.0	500	80.3
300	170.0	550	47.0
350	153.7	600	32.3

材料损伤模型使用 Maxps 损伤模型,采用屈服强度为最大主应力,损伤演化使用能量类型、线性软化幂法则混合模式行为,幂为 1,损伤稳定黏性为 5×10^{-5} 。

1.3 边界条件

数值计算过程中,设置封严环最外侧圆柱面的边界条件为完全固定,对封严环进行约束。由于碰摩的本质是摩擦,封严环碰摩区域在碰摩过程中受到篦齿进给切削所带来径向力、轴向力和切向摩擦力,同时伴随着温度的升高。

为模拟实际碰摩试验过程,取封严环 1/4 的磨损槽作为碰摩区域,如图 3 所示(红色区域),碰摩区域的碰摩力则通过将磨损槽边界条件设置为垂直于磨损槽底面的径向力 F_r 、垂直于磨损槽侧面的轴向力 F_z 以及磨损槽与篦齿接触的所有表面的切向力 F_t 来模拟,这些碰摩力参数均使用篦齿封严结构高速旋转碰摩试验所测得碰摩力的数据。为了模拟试验过程中的传热过程,通过在碰摩区域磨损槽与篦齿接触的表面添加一恒定热流 Q 来模拟篦齿与封严环摩擦生热的过程,具体热流 Q 依据试验中所测得温升大小来决定,封严环壁面初始温度 $T_w=400$ °C;同时将铜合金封严环内壁面设置为换热表面,使用篦齿封严换热数值模拟得到封严环表面的对流换热系数 h 来模拟壁面与气流之间的对流换热。

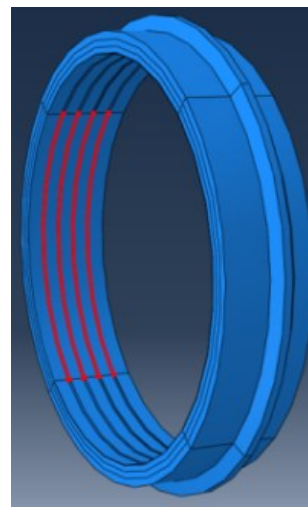


图 3 碰摩区域示意图

Fig. 3 Schematic diagram of rubbing area

碰摩计算时间 $t=10$ s, 其中 0~5 s 模拟碰摩接触过程, 篦齿与铜合金封严环接触发生碰摩, 5~10 s 模拟脱离阶段, 篦齿与铜合金封严环脱离接触, 退回至初始位置。由于碰摩试验得到的碰摩力变化接近线性增加, 因此数值模拟过程中碰摩力设置为 0~5 s 内线性加载。边界条件示意图如图 4 所示(图中切向力未标出, 均沿圆周切线方向), 径向碰摩过程中, 磨损槽底面和两侧面均与篦齿接触摩擦, 故在磨损槽所有表面均施加热载荷和机械载荷。

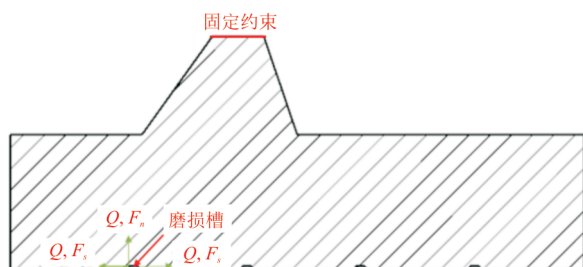


图 4 边界条件示意图

Fig. 4 Boundary conditions diagram

Abaqus 软件不能同时使用温度单元和 XFEM 计算裂纹的萌生与扩展, 因此分别使用“热传递”和“静力-通用”两个分析步来进行计算。首先使用“热传递”分析步, 得到封严环在相应碰摩工况下的温度场; 再使用“静力-通用”分析步, 将“热传递”分析步得到的温度场结果作为预定义场, 设置固定约束及机械载荷, 不插入预制裂纹计算裂纹的萌生。

1.4 计算工况

计算工况如表 3 所示, 封严环初始温度 T_w 为 400 °C, 径向侵入深度 D_r 分别为 0.1、0.2 和 0.3 mm, 侵入时间则均为 5 s, 共计 3 组工况。同时根据篦齿封严结构碰摩试验各径向侵入深度下所测量得到的轴向力 F_s 、径向力 F_n 、切向力 F_t 峰值以及碰摩产生的最高温度 T_{max} , 并以此来确定所需施加的热载荷和机械载荷。

表 3 计算工况

Table 3 Calculate operating conditions

封严环初始温度 $T_w/^\circ\text{C}$	径向侵入深度 D_r/mm	径向力 F_n/N	轴向力 F_s/N	切向力 F_t/N	最高温度 $T_{max}/^\circ\text{C}$
400	0.1	34.51	15.51	18.93	483.6
400	0.2	43.80	20.94	25.47	521.0
400	0.3	67.71	29.40	33.60	566.2

2 应力场结果与分析

2.1 温度场结果

各工况径向碰摩结束时刻 ($t=5$ s) 封严环碰摩区域的温度场分布如图 5 所示, 可以看出: 封严环整体温度场均呈现为碰摩区域中间位置温度较高, 沿周向往两侧温度逐渐下降; 并且由于导热作用, 碰摩区域附近封严环的温度也有所升高, 但相较于碰摩区域中心位置, 温升较小, 且越远离碰摩区域中心, 温度越低, 这是由于热量传递过程中, 热能沿程不断转化为封严环的内能, 其温度增加, 传递至距碰摩区域中心较远位置处的热量逐渐减少的缘故; 封严环大约有 2/3 左右的体积, 其温度无明显变化, 说明篦齿与封严环之间的碰摩仅造成碰摩位置局部温度大幅升高。

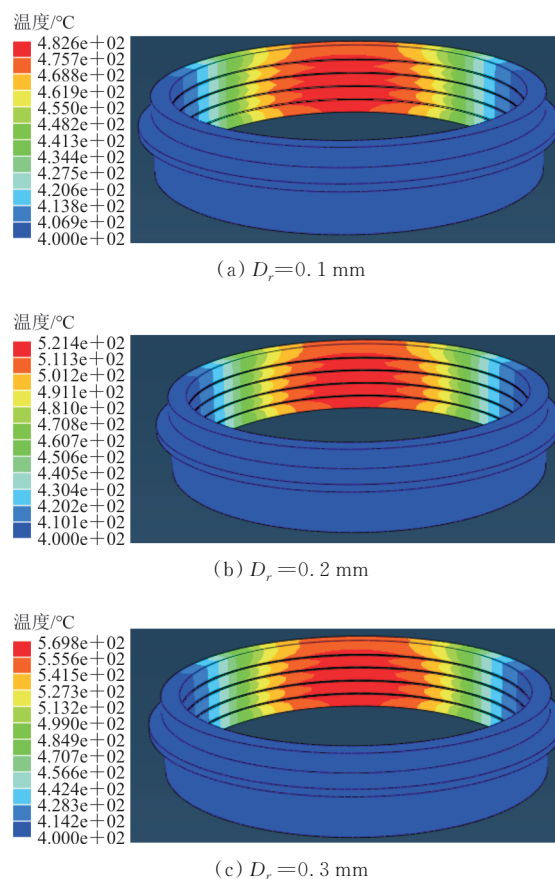


图 5 $t=5$ s 时刻各工况温度场

Fig. 5 Temperature fields under various conditions at $t=5$ s

各碰摩工况在碰摩过程中最高温度的变化曲线 (0~10 s 内) 如图 6 所示, 可以看出: 温度升高过程均为先快后缓的趋势, 在篦齿封严碰摩结束后,

封严环温度先发生骤降,随后才开始缓慢下降。

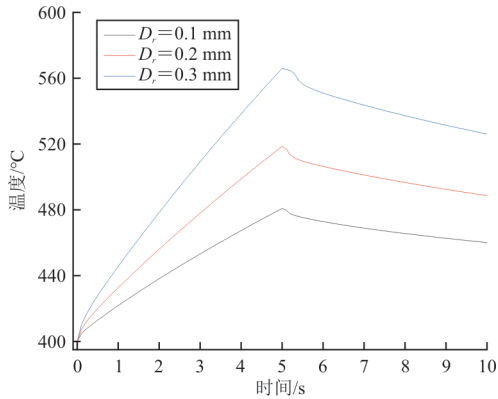


图 6 各工况碰摩过程温度变化(0~10 s)

Fig. 6 Temperature variation curve of rubbing process under various conditions (0~10 s)

2.2 应力场结果

各碰摩工况在 $t=5$ s 时刻,即封严环与篦齿径向碰摩结束时刻碰摩区域的等效应力场分布图 7 所示。

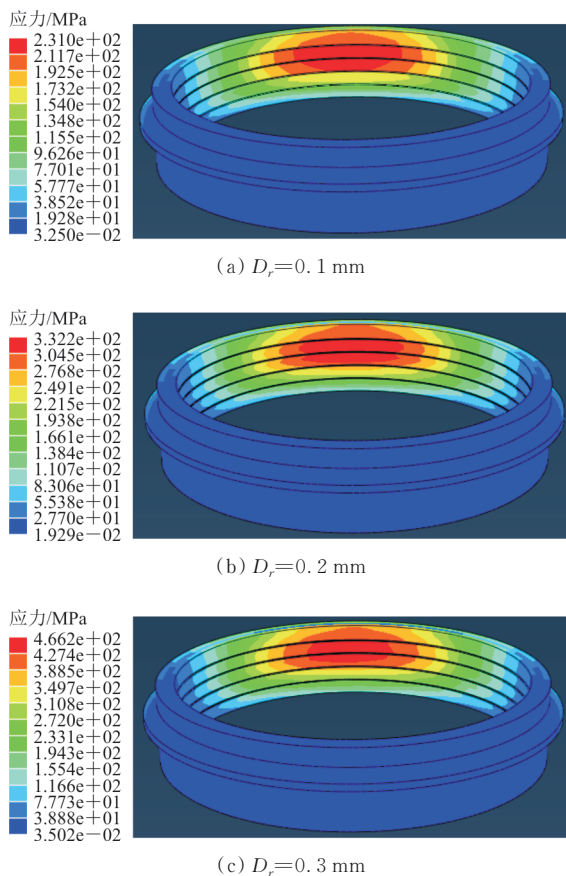
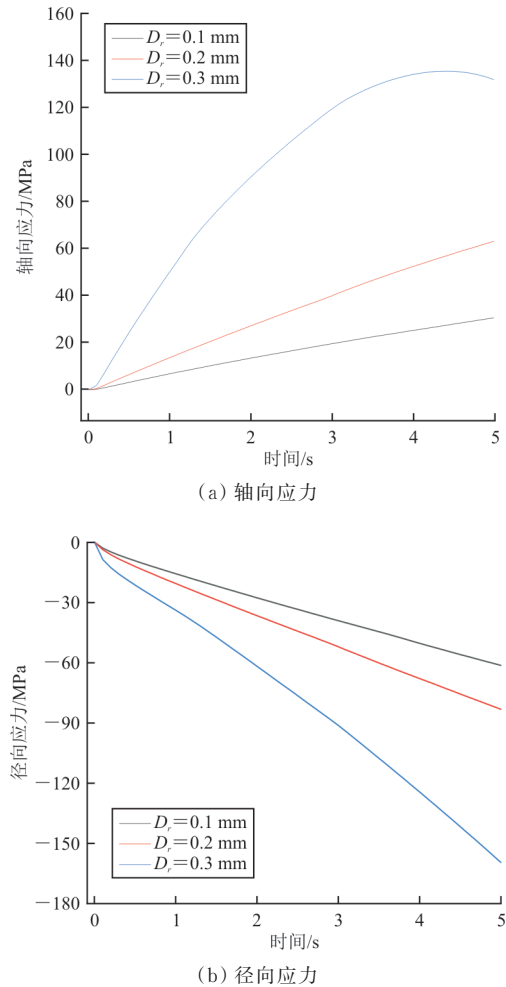


图 7 $t=5$ s 时刻各工况等效应力场

Fig. 7 Equivalent force fields under various conditions at $t=5$ s

从图 7 可以看出:封严环碰摩区域中心位置应力值较大,沿周向往两侧应力值逐渐下降,而在轴线方向上,仅碰摩区域上方两道磨损槽两侧区域的应力值较大,下方的两道磨损槽附近区域的应力场则比较小;封严环大约有 2/3 左右体积的部分应力很小,几乎为 0,说明篦齿与封严环之间的碰摩仅造成碰摩位置局部产生较高的应力,同时封严环整体应力值随径向碰摩量的增加而增大;在 $D_r=0.3$ mm 工况下的封严环碰摩区域发现有裂纹萌生与扩展。

不同径向侵入深度下时碰摩区域在整个碰摩过程中(0~5 s)最大应力的变化曲线如图 8 所示,可以看出:在径向碰摩过程中,轴向应力为拉应力,径向应力以及周向应力均为压应力;随着径向侵入深度的增大,机械载荷和热载荷增加,导致铜合金封严环轴向应力、径向应力以及周向应力均在增大。



(b) 径向应力

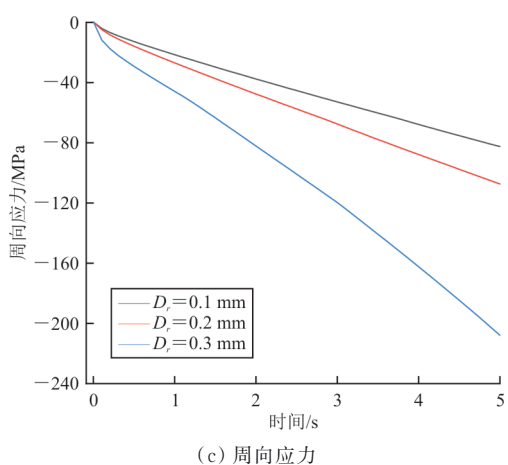


图 8 各工况应力变化曲线

Fig. 8 Stress variation curves under various conditions

2.3 裂纹萌生与扩展

径向侵入深度 $D_r=0.3$ mm 时,在该工况碰摩过程的 $t=2.14$ s 时刻,封严环磨损槽底部有周向裂纹产生。碰摩试验后的封严环裂纹为 I 型裂纹(张开型裂纹),其主要受到拉应力的作用,而径向碰摩过程中,封严环仅在轴向受拉应力。碰摩过程中裂纹萌生网格单元的轴向拉应力变化曲线如图 9 所示。

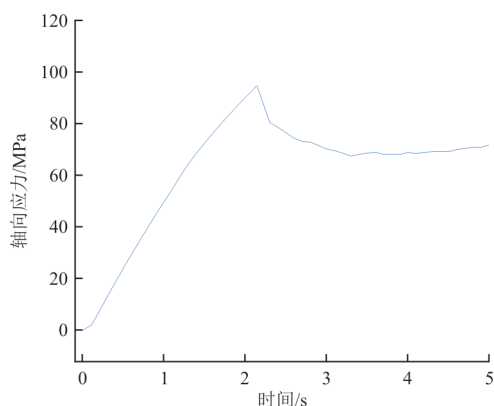
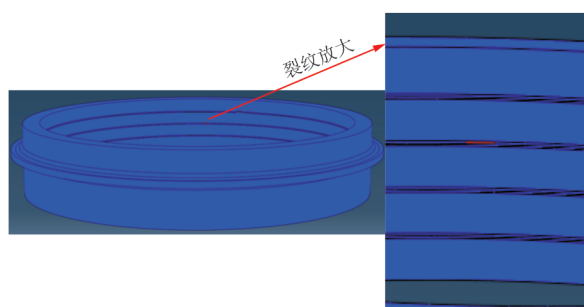
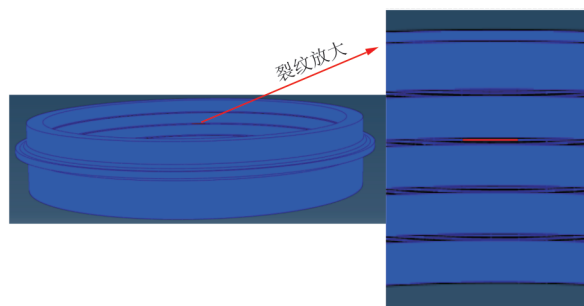
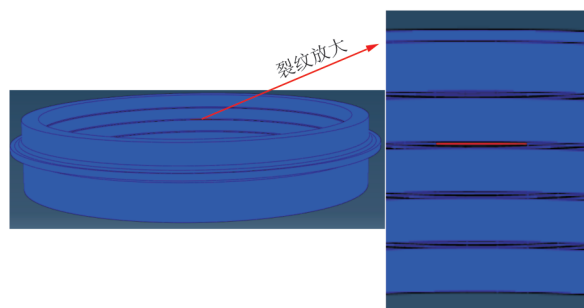


图 9 裂纹萌生网格单元轴向应力变化

Fig. 9 Axial stress variation crack initiation grid elements

从图 9 可以看出: $t=2.14$ s 时刻裂纹萌生处的铜合金涂层轴向拉应力达到最大值,此时有裂纹萌生;裂纹产生后,该位置处应力急剧减小释放直至趋于稳定。 $t=2.14$ s 时刻,铜合金涂层网格单元所受的轴向拉应力为 94.87 MPa,而由图 6 可知, $t=2.14$ s 时裂纹萌生处网格单元温度约为 479.5 °C,由铜合金材料性能参数进行线性插值可

知,该温度下铜合金涂层屈服强度为 93.7 MPa,轴向拉应力略大于屈服强度。而 $t=2.1$ s 时,无裂纹产生,此时该网格单元温度约为 478 °C,由铜合金材料屈服强度参数进行线性插值可知,该温度下铜合金涂层屈服强度为 94.69 MPa,而此时该网格单元所受的轴向拉应力为 93.42 MPa,轴向拉应力略小于屈服强度。因此径向碰摩过程中的周向裂纹是由于铜合金涂层所受到的轴向拉应力大于其屈服强度而产生,即轴向拉应力超过了使铜合金产生损伤的最大主应力,同时在轴向拉应力作用下裂纹沿周向进行扩展,径向碰摩过程中裂纹的扩展过程如图 10~图 14 所示。

图 10 $t=2.14$ s 时刻裂纹Fig. 10 Crack at $t=2.14$ s图 11 $t=2.90$ s 时刻裂纹Fig. 11 Crack at $t=2.90$ s图 12 $t=3.80$ s 时刻裂纹Fig. 12 Crack at $t=3.80$ s

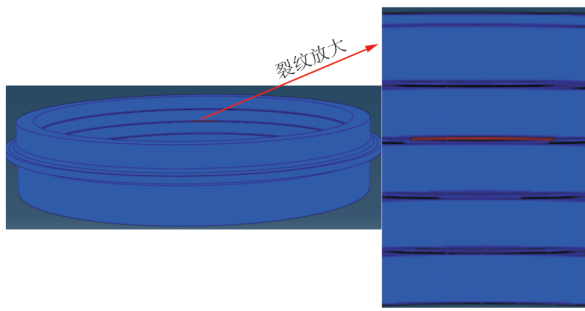


图13 $t=4.50$ s时刻裂纹
Fig. 13 Crack at $t=4.50$ s

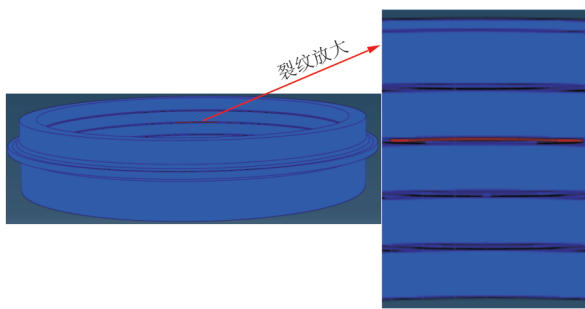


图14 $t=5.00$ s时刻裂纹
Fig. 14 Crack at $t=5.00$ s

在篦齿封严结构高速旋转碰摩实验过程中,封严环壁面温度 $T_w=400$ °C、径向侵入深度 $D_r=0.3$ mm 碰摩工况下,在封严环第二道磨损槽底部区域产生了一条长度约 25 mm 的周向裂纹,如图 15 所示。根据实验中所得到的裂纹形貌,分析该裂纹为 I 型裂纹,并由碰摩过程中萌生的周向微裂纹沿周向扩展形成。

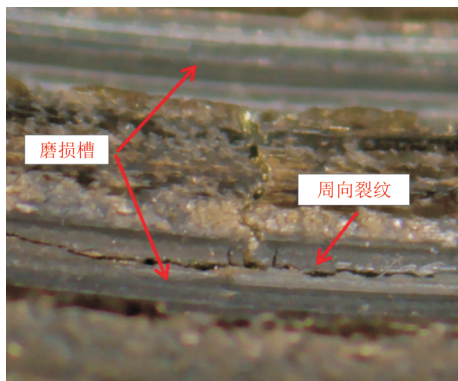


图15 碰摩试验所产生周向裂纹
Fig. 15 Circumferential crack generated during rubbing experiment

根据扩展有限元法对碰摩过程中封严环裂纹的萌生与扩展机理分析可知,数值仿真同样在封严环第二道磨损槽底部区域产生了一条周向裂

纹,并沿着周向进行扩展,最终裂纹长度约 13 mm。周向裂纹是由于封严环所受到的轴向拉应力大于使铜合金产生损伤的最大主应力所导致,并在轴向拉应力的作用下裂纹沿周向进行扩展。

扩展有限元法仿真得到的周向裂纹萌生位置和扩展方向均与碰摩实验中实际产生的周向裂纹位置和扩展方向一致,仅最终裂纹长度略有不同,证明了该方法可以有效的对碰摩裂纹萌生与扩展机理进行分析。

3 结论

1) 篦齿与铜合金封严环之间的碰摩仅造成封严环碰摩位置局部区域的温度和应力大幅升高。

2) 径向侵入深度 0.3 mm,在 $t=2.14$ s 时刻,封严环磨损槽底部开始有周向裂纹产生。

3) 封严环磨损槽底部周向裂纹是由于封严环铜合金涂层所受到的轴向拉应力大于使铜合金产生损伤的最大主应力所导致,并在轴向拉应力的作用下沿周向进行扩展。

4) 数值仿真所得到的裂纹萌生位置及扩展方向均与碰摩试验中产生的实际裂纹一致。

参考文献

- [1] 窦媛媛. 蜂窝外环及磨损槽对篦齿封严泄漏特性的影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
DOU Yuanyuan. Research on the influence of honeycomb land and worn-honeycomb land on the sealing characteristics of labyrinth seals[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [2] 慕琴琴, 徐健. 航空发动机叶片-机匣碰摩试验技术研究综述[J]. 航空工程进展, 2020, 11(3): 293-301.
MU Qinqin, XU Jian. A review of the research on the test technology of aircraft engine blade-casing rub-impact [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(3): 293-301. (in Chinese)
- [3] MUNZ O, HÜHN L, SCHWITZKE C, et al. experimental investigation on the rubbing process of labyrinth seals against honeycomb liners[C]// 2020 ASME Turbomachinery Technical Conference and Exposition. US: ASME, 2020: 1-11.
- [4] DELEBARRE C, WAGNER V, PARIS J, et al. An experimental study of the high speed interaction between a labyrinth seal and an abradable coating in a turbo-engine application[J]. Wear, 2014, 316: 109-118.
- [5] ZHANG N, XUAN H J, GUO X J, et al. Investigation of high-speed rubbing behavior of labyrinth-honeycomb seal for turbine engine application[J]. Journal of Zhejiang University (Science A), 2016(6): 946-96.
- [6] LU B, XUAN H, MA X, et al. The influence of the axial rub added in the radial rub on the wear of the seal fins during the high speed rub of labyrinth-honeycomb seal[J]. Materials, 2021, 14(8): 1997-2004.

- [7] 赵心我, 于月光, 孙建刚. 进给速率对 AlSi/PHB 封严涂层可磨耗性的影响[J]. 热喷涂技术, 2021, 13(2): 69-76.
ZHAO Xinwo, YU Yueguang, SUN Jianguang. The influence of feed rate on the abrasability of AlSi/PHB seal coatings[J]. Thermal Spray Technology, 2021, 13(2): 69-76. (in Chinese)
- [8] PYCHYNSKI T, DULLENKOPF K, BAUER H. Theoretical study on the origin of radial cracks in labyrinth seal fins due to rubbing[C]// 2013 ASME Turbine Technical Conference and Exposition. US: ASME, 2013: 1-9.
- [9] MUNZ O, SCHWITZKE C, BAUER H, et al. Modelling the rubbing process in labyrinth seals[C]// 2018 Global Power & Propulsion Forum. US: ASME, 2018: 1-12.
- [10] MUNZ O, HÜHN L, BLEIER F, et al. Numerical investigations on the rubbing process in labyrinth seals for full flight mission[C]// The 24th International Symposium on Air Breathing Engines. US: IEEE, 2019: 1-8.
- [11] SEICHEPINE J, FARAOUN H, PEYRAUT F, et al. Numerical simulation of the thermo-mechanical behaviour of thermally sprayed abradable coatings: CD-ROM TN. 252 [R]. US: DVS-Berichte, 2008.
- [12] 王志雄. 典型篦齿封严碰磨过程中流动与换热特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
WANG Zhixiong. Investigation on leakage losses and heat transfer in a typical labyrinth seal during wear process[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [13] 杨毅成, 张文灿, 米兆国, 等. 涡轮叶片篦齿径向裂纹的形成原因分析[C]// 第五届空天动力联合会议暨中国航天第三专业信息网第41届技术交流会. 南京: 中国航天第三专业信息网, 2020: 1-5.
YANG Yicheng, ZHANG Wencan, MI Zhaoguo, et al. Analysis of the causes of radial cracks in the labyrinth of turbine blade[C]// The 5th Aerospace Power Joint Conference and the 41st Technical Exchange Conference of China Aerospace Third Professional Information Network. Nanjing: China Aerospace Third Professional Information Network, 2020: 1-5. (in Chinese)
- [14] 杨毅成, 张文灿, 米兆国, 等. 涡轮叶片篦齿径向裂纹扩展规律的数值分析[C]// 第六届空天动力联合会议暨中国航天第三专业信息网第42届技术交流会暨2021航空发动机技术发展高层论坛. 成都: 中国航天第三专业信息网, 2021: 1-7.
YANG Yicheng, ZHANG Wencan, MI Zhaoguo, et al. Numerical analysis of radial crack propagation law in turbine blade labyrinth[C]// The 6th Aerospace Power Joint Conference and the 42nd Technical Exchange Conference of China Aerospace Third Professional Information Network, as well as the 2021 Aviation Engine Technology Development High Level Forum. Chengdu: China Aerospace Third Professional Information Network, 2021: 1-7. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)

(上接第119页)

- [4] PEETERS B. Modern solutions for ground vibration testing of large aircraft[C]// The 26th International Modal Analysis Conference (IMAC). Belgium: LMS International, 2008: 732-742.
- [5] FÜLLEKRUG U, GLOTH G, SINAPIUS M, et al. Tasks for improvement in ground vibration testing of large aircraft[C]// International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics (IFASD). Madrid, Spain: DLR, 2001: 121-133.
- [6] 白春玉, 梁森, 宋巧治. 全尺寸飞行器地面振动试验数字化协同探索与实践[J]. 航空工程进展, 2024, 15(2): 90-100.
BAI Chunyu, LIANG Sen, SONG Qiaozhi. Digital collaborative exploration and practice of ground vibration test for full-scale aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(2): 90-100.
- [7] PAK C G. Multiple shaker placement for ground vibration test of X-59 aircraft using topology optimization[C]// AIAA SciTech 2020 Forum. Orlando: AIAA, 2020: 1901-1917.
- [8] ASHER G W. A method of normal mode excitation utilizing admittance measurements[C]// Proceedings of the National Specialists' Meetings on Dynamics and Aeroelasticity. Fort Worth, Texas: Institute of the Aerospace Sciences, 1958: 69-76.
- [9] WRIGHT J R, HOLMES P S, DESFORGES M J, et al. Optimum exciter placement for normal mode force appropriation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 1998, 212(5): 325-338.
- [10] 沃德·海伦, 斯蒂芬·拉门兹, 波尔·萨斯. 模态分析理论与试验[M]. 白化同, 郭继忠译. 北京: 北京理工大学出版社, 2001: 121-122.
HELEN W, LAMMENS S, SACHS P. Modal analysis theory and testing[M]. Translated by BAI Huatong, GUO Jizhong. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2001: 121-122. (in Chinese)
- [11] WILLIAMS R, CROWLEY J, VOLD H. The multivariate mode indicator function in modal analysis[C]// Proceedings of International Modal Analysis Conference III (IMAC). Los Angeles: LMS International, 1985: 66-70.
- [12] KOPEC D, GIROLAMO P. Selection and evaluation of optimum exciter locations for modal testing via automated acceleration transfer function analysis[C]// 25th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Palm Springs: Martin Marietta Aerospace, 1984: 996.
- [13] AVITABILE P, HASELTON D, MOORE J. Modal test reference selection using an SVD procedure[C]// The 14th International Modal Analysis Conference (IMAC). Dearborn: LMS International, 1996: 1527-1532.
- [14] EWINS D J. Modal testing: theory, practice and application[M]. Hertfordshire: Research Studies Press Ltd., 2000: 300-303.
- [15] 李晓东, 刘凡, 崔盼礼. 飞机地面振动试验中激振力矢量优化技术研究[J]. 工程与试验, 2014, 54(3): 1-5.
LI Xiaodong, LIU Fan, CUI Panli. Study on shaker force vector optimization in aircraft ground vibration test[J]. Engineering & Test, 2014, 54(3): 1-5. (in Chinese)
- [16] SCHEDLINSKI C, LINK M. An approach to optimal pick-up and exciter placement[C]// The 14th International Modal Analysis Conference (IMAC). Dearborn: LMS International, 1996: 376-382.
- [17] EWINS D J. Modal testing: theory, practice and application[M]. Hertfordshire: Research Studies Press Ltd., 2000: 272.

(编辑:马文静)