

直升机变距拉杆杆端自润滑关节轴承的力学分析和损伤特性

周长春, 杨永生, 谭德强, 杨晓强, 贺 强, 胡 月
(中国民用航空飞行学院 航空工程学院, 四川 广汉 618307)

摘 要: 以 R44 直升机主旋翼变距拉杆杆端自润滑关节轴承为研究对象, 用三维建模软件 Solidworks 建立其旋转摆动的有限元模型并导入到有限元分析软件 Ansys Workbench 中, 分析计算其在径向正弦载荷下衬垫的等效应力、位移、接触应力和等效剪切应力的变化特性; 并结合实际服役工况下 R44 直升机失效的自润滑关节轴承衬垫进行分析。结果表明: 在整个周期内, 衬垫的边缘因为被挤压而发生变形, 衬垫的等效应力和等效变形最大值均出现在外圈的边缘上, 接触应力最大值所在的区域始终出现在衬垫的顶部和底部, 并且接触应力分布区域的移动与内圈的转动方向一致, 切应力最集中的地方在径向载荷施加点的左上方、左下方、右上方、右下方以及左右两侧; 由于实际服役工况中载荷的变化, 导致衬垫的损伤上半部分是以接触应力引起的疲劳损伤为主, 下半部分是以切应力导致的转移膜形成为主。

关 键 词: 关节轴承; 有限元分析; 径向载荷; 自润滑衬垫; 摩擦磨损

中图分类号: V258.5; TH117.1

文献标志码: A

Mechanical analysis and damage characteristics of self-lubricating joint bearings of helicopter variable-pitch tie rod ends

ZHOU Changchun, YANG Yongsheng, TAN Deqiang,
YANG Xiaoqiang, HE Qiang, HU Yue

(Aviation Engineering College,
Civil Aviation Flight University of China, Guanghan Sichuan 618307, China)

Abstract: The self-lubricating joint bearings of the R44 helicopter main rotor variable-pitch tie rod ends were taken as the research objects. The rotating and swinging finite element model was established with three-dimensional modeling software Solidworks and applied to the finite element analysis software Ansys Workbench. The change characteristics of equivalent stress, displacement, contact stress and shear stress of the liner under radial sinusoidal load were analyzed and calculated, and the failure of the self-lubricating joint bearing liner of the R44 helicopter under actual service conditions was analyzed. The results showed that during the whole period, the edge of the liner was deformed due to being squeezed, and the equivalent stress and the equivalent maximum deformation of the liner appeared on the edge of the outer ring; the area with the

收稿日期: 2021-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(52105132); 四川省应用基础研究项目(2020YJ0192、2021YJ0537);

四川省科技成果转化平台项目(2019ZHC0139); 中国民用航空飞行学院面上项目(J2021-044)

作者简介: 周长春(1972—), 男, 教授, 硕士, 主要从事通用航空器零部件适航与安全研究。

通信作者: 谭德强(1989—), 男, 副教授, 博士, 主要从事航空器关键零部件服役行为和损伤机理研究。E-mail: tdqtx2@163.com

引用格式: 周长春, 杨永生, 谭德强, 等. 直升机变距拉杆杆端自润滑关节轴承的力学分析和损伤特性[J]. 航空动力学报, 2022, 37(5): 924-933. ZHOU Changchun, YANG Yongsheng, TAN Deqiang, et al. Mechanical analysis and damage characteristics of self-lubricating joint bearings of helicopter variable-pitch tie rod ends[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(5): 924-933.

maximum contact stress always appeared at the top and bottom of the liner, and the movement of the contact stress distribution area was consistent with the rotation direction of the inner ring; the most concentrated shear stress was in the upper left, lower left, upper right, lower right, left and right areas of the radial load application point. Due to the change of load in actual service conditions, the damage of liner was mainly caused by fatigue damage arising from contact stress in the upper part and transfer film was caused by shear stress in the lower part.

Key words: joint bearing; finite element analysis; radial load; self-lubricating liner; fraction and wear

自润滑关节轴承结构简单,主要由外圈、内圈以及衬垫构成^[1]。因其具有体积小、摩擦因数低、自润滑效果好、耐腐蚀、抗冲击等特点被广泛应用于航空航天、高铁运输等领域^[2-4]。由于自润滑关节轴承的服役环境较恶劣,常被用于高温、高速、重载等工作场合,因此很容易发生故障。自润滑关节轴承发生故障的主要原因是衬垫的磨损^[5],磨损会导致轴承内圈和衬垫的间隙增大,进一步会导致内圈脱出,从而引发轴承故障。与衬垫相比,轴承的内圈和外圈的可靠性就相对较好,因此,衬垫的使用寿命直接决定着自润滑关节轴承的使用寿命。

目前,国内外针对轴承衬垫的力学特性做了相关研究。胡宝根等^[6]通过对 GE30C 轴承进行有限元建模分析,得到了衬垫的接触应力和变形量的结果以及该结果在衬垫上的分布,为本文提供了参考。张瑞芬等^[7]利用有限元分析软件对自润滑关节轴承的成形过程进行了数值模拟,通过分析衬垫接触应力、等效应力等来研究轴承的装配机理。结果表明,不同的挤压方式,衬垫的接触应力最大值出现的位置是不同的。杨帆等^[8]建立轴承衬垫磨损 1/2、1/3 和 1/5 的模型,再通过有限元对轴承实际工况的模拟得到了衬垫的不同磨损量。李杨等^[9]通过对航空发动机的实际工况进行仿真,并对轴承施加多个角度不同的径向载荷,得到轴承应力和变形的分布。结果表明:轴承的应力值和变形量随着径向载荷加载角度的变化而变化。Kim 等^[10-11]通过试验对轴承的磨损性能进行研究,并结合有限元进行模拟分析。李迎春等^[12]在摩擦试验机上对自润滑关节轴承进行摩擦磨损性能试验,并用扫描电镜(SEM)观测衬垫表面的微观形貌,得出结论:在磨损的过程中,衬垫的表面形成了一层转移膜,由于转移膜的存在,减缓了衬垫和内圈的磨损,转移膜形成得越快,轴承的性能越优。

国内外大多数学者研究的是在恒定载荷或恒幅疲劳载荷下对轴承的力学分析,不能很好地模拟关节轴承实际复杂工况,本文采用径向疲劳载荷与转动载荷相结合,并将实际服役关节轴承的损伤特征和力学分析进行对比研究。

1 结构和材料参数

本文以罗宾逊 R44 直升机主旋翼变距拉杆杆端自润滑关节轴承为研究对象,在实际工况中,承受轴向和径向转动的联合载荷,主要以径向载荷为主。对其进行力学结构分析,研究转动工况下,径向载荷对自润滑关节轴承衬垫的影响。

自润滑关节轴承由杆端体、外圈、衬垫和内圈组成,其外圈和自润滑衬垫黏结在一起。表 1 是自润滑关节轴承的主要参数,该参数是根据轴承的实际使用情况得到的,图 1 是自润滑关节轴承的尺寸示意图。由于研究的对象是 R44 直升机主旋翼变距拉杆的杆端自润滑关节轴承,根据它的材料情况,建模时采用的参数如下:轴承的杆端体和外圈的材料为 17-PH 不锈钢,内圈的材料为 440C 不锈钢,衬垫是由聚四氟乙烯纤维和凯夫拉纤维编织而成的^[13],衬垫的厚度为 0.35 mm,宽度为 8.10 mm,这 3 种材料的性能参数见表 2^[14-15]。为了尽可能地简化模型,将衬垫当作各向同性材料处理,模型的边缘也没有倒圆角处理。

图 2 为自润滑关节轴承的转动示意图,衬垫

表 1 自润滑关节轴承的主要参数
Table 1 Main parameters of self-lubricating joint bearing

参数	数值
外径 D /mm	17.78
内径 B /mm	7.84
外圈宽度 W_2 /mm	8.10
内圈宽度 W_1 /mm	11.08
内圈球面直径 d /mm	15.04

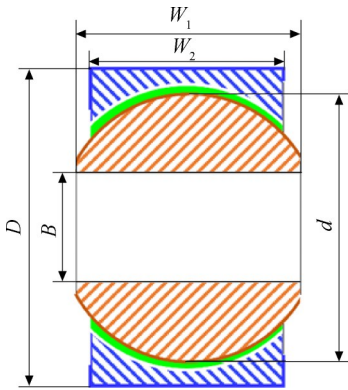


图 1 自润滑关节轴承的尺寸示意图

Fig.1 Schematic diagram of sizes of of self-lubricating joint bearing

表 2 自润滑关节轴承的材料性能参数

Table 2 Material performance parameters of self-lubricating joint bearing

参数	密度/(kg/m ³)	泊松比	弹性模量/MPa
440C	7 750	0.30	2.06×10^5
17-PH	7 800	0.30	1.36×10^5
衬垫	2 200	0.40	280

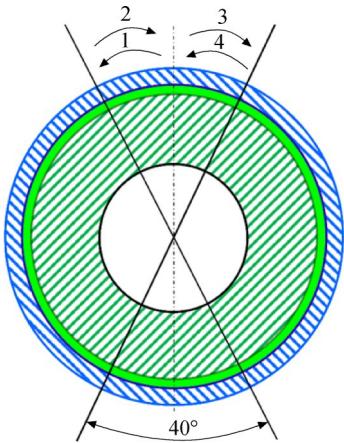


图 2 自润滑关节轴承转动示意图

Fig.2 Schematic diagram of self-lubricating joint bearing rotation

黏结在外圈上,两者设为固定,只有内圈在转动,图中1~4表示的是内圈转动一个周期的顺序,在一个周期内,内圈转动的最大角度是40°,摆动周期 $T=0.5\text{ s}$ 。

2 仿真模型的简化与建立

1) 用三维建模软件 Solidworks 建立好自润滑关节轴承的模型后,将其导入到有限元分析软件 Ansys Workbench 的模块 Transient Structural

中,设置好参数并将参数赋予给相对应的零件。建模时忽略模型边缘处的倒角,采用 MXW-1 型旋转往复摩擦磨损试验机(济南益华摩擦学测试技术有限公司),测得内圈和衬垫之间的摩擦因数约为 0.1,因此将模型中的摩擦因数设定为 0.1。

2) 设置接触。模型中共有 3 对接触对,分别是杆端体和外圈、外圈和衬垫、内圈和衬垫。其中,杆端体和外圈、外圈和衬垫之间的接触方式为绑定接触(bonded),采用的算法是多点约束法(MPC),内圈和衬垫之间的接触方式设置为摩擦接触(fractional),摩擦因数设置为 0.1,采用的算法是增广拉格朗日乘法(augmented Lagrange),为了加快模型的计算速度,将对称行为设置为非对称(asymmetric),将内圈和衬垫的接触面的法向接触刚度设置为 1,这样能减少两者之间的渗透。由于内圈是在转动的,所以还需要设置关节连接,关节连接类型设置为体-体(body-body),关节类型为旋转(revolute),其中,杆端体为参考体,内圈为运动体。

3) 划分网格。对外圈、衬垫和内圈进行网格划分,划分类型主要以六面体主导的网格为主。由于研究对象主要是衬垫,所以衬垫的网格大小需设置得小一点,内圈、外圈及杆端体的网格大小设置为 0.5 mm,衬垫的网格大小设置为 0.25 mm,共产生 45 366 个单元,225 235 个节点,单元质量检查的平均值为 0.858 4,单元质量好。自润滑关节轴承的有限元模型如图 3 所示,图中 X、Y、Z 为坐标轴的方向。

4) 设置边界条件。考虑到自润滑关节轴承的实际工况以及施加的约束尽可能地不影响轴承的计算结果,内圈的前后两个面上不添加约束,所

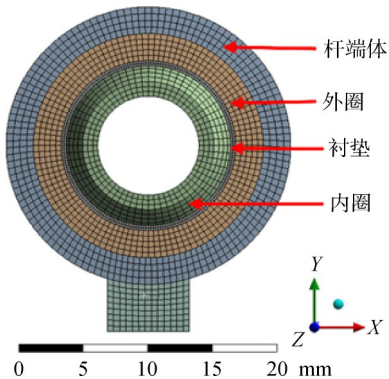


图 3 自润滑关节轴承的有限元模型

Fig.3 Finite element model of self-lubricating joint bearing

有的约束只施加在杆端体上,在杆端体的外圈表面添加一个固定约束。以内圈的内表面为参考面建立参考点,参考点位于内圈内表面的中心位置,并在该参考点上添加一个沿径向方向的正弦载荷^[16],系数为3 000,周期为0.5 s。由于内圈是在左右转动的,还需要添加一个关节载荷,转动周期为0.5 s。自润滑关节轴承的边界条件如图4所示。

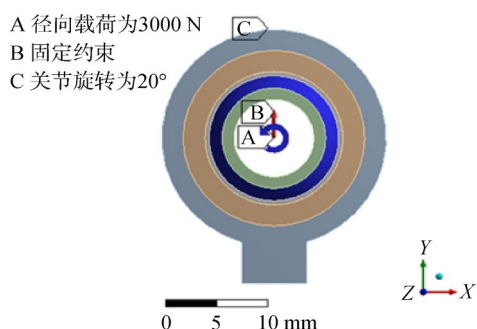


图4 自润滑关节轴承的边界条件

Fig.4 Boundary conditions of self-lubricating joint bearings

3 结果分析

在实际飞行服役过程工况中,自润滑关节轴

承的服役工况比较恶劣,常常会发生故障,而衬垫失效是导致轴承发生故障的最主要的原因^[17],所以本文主要针对衬垫进行分析。在0~0.25 s和0.25~0.5 s这两个时间段内,径向载荷的曲线变化是一致的,只是方向不同,故主要对0~0.25 s这半个周期的仿真结果进行分析。

3.1 衬垫的等效应力

图5为衬垫的等效应力仿真结果。根据仿真结果得出,在整个周期内,衬垫的最大 von-Mises 等效应力出现在外球面的边缘上,出现这种情况的原因是衬垫被夹在内圈和外圈中间,同时内圈比衬垫要宽,在径向载荷的作用下衬垫被挤压,由于衬垫边缘的影响,产生应力集中的现象。图5(a)展示的是在时间 $t=0.125$ s 时,衬垫的最大等效应力为 21.625 MPa 以及该值所在的位置出现在衬垫的边缘处。图5(b)是整个周期内各个时刻等效应力最大值,等效应力最大值变化曲线与加载的径向载荷的变化一致。在整个周期内,0.125 s 和 0.375 s 这两个时刻的等效应力值是最大的,主要原因是在这两个时刻内圈的转动方向发生改变,产生了力的突变。

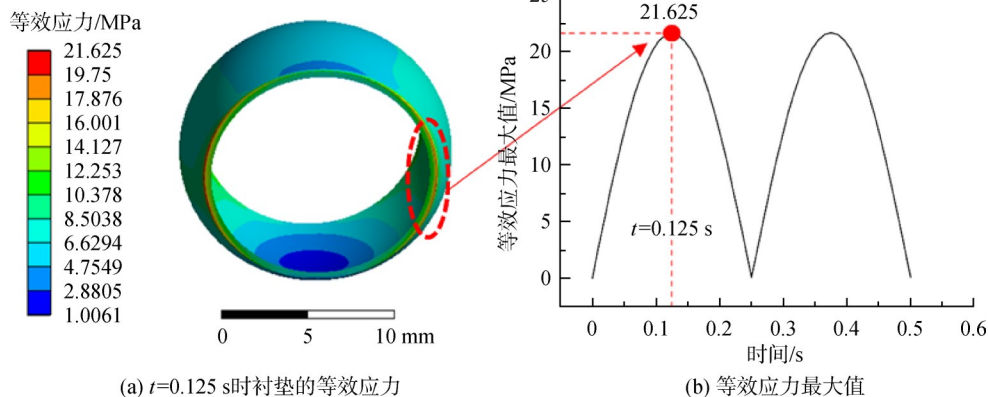


图5 衬垫的等效应力

Fig.5 Equivalent stress of liner

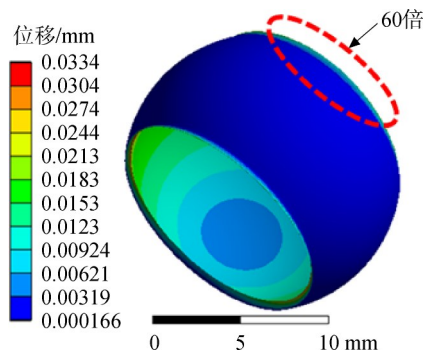
3.2 衬垫的位移

在0~0.25 s内,衬垫的等效变形主要发生在上半部分的边缘处;而在0.25~0.5 s内,衬垫的等效变形发生在下半部分的边缘处。

图6所示是 $t=0.125$ s 时刻衬垫的位移分布,最大等效变形为 0.033 4 mm。出现这种情况的原因是衬垫的弹性模量比内圈和外圈的要小,在径向载荷的作用下,衬垫被挤压,容易变形,向外凸出,故衬垫的最大等效变形出现在边缘处。

3.3 衬垫的接触应力及损伤

对自润滑关节轴承设计和优化时,接触应力的大小和其所出现的位置对轴承的影响是非常大的。在轴承内圈左右转动的过程中,接触应力的大小决定了轴承和衬垫之间摩擦力的大小,从而影响到衬垫的磨损和轴承的整体寿命^[18]。图7展示的是0~0.25 s几个时刻点衬垫的接触应力,从图中可以看出,这几个时刻点衬垫接触应力最大值所在的区域出现在衬垫的顶部,并且该值随着外加径向载荷的增加而增加,两者呈现线性关系,

图6 衬垫的位移分布图($t=0.125$ s)Fig.6 Displacement distribution of liner ($t=0.125$ s)

如图8。在 $0\sim 0.25$ s内,衬垫的接触应力只在上半部分出现,下半部分的接触应力几乎为0,在这段时间内,衬垫上表面的接触应力的最大值一直出现在顶部,这是由于在这个时间段内径向载荷的方向是沿着Y轴正方向的,在径向载荷的作用下,下半部分的衬垫和内圈产生分离,故衬垫的下半部分接触应力几乎为0 MPa。

选取 $t=0.125$ s时衬垫的接触应力进行分析,

如图9(a)。接触应力最大值所在的区域在衬垫的顶部,沿两侧逐渐递减,这表明衬垫的顶部是磨损最为严重的部位。在衬垫内球面建立一条从A到B的路径,图9(b)图所示是 $t=0.125$ s时接触应力沿路径的变化,呈现出抛物线的形状,由图中可以看出,接触应力最大值位于顶部正中心左侧0.44 mm处,最大值为9.006 4 MPa,A处接触应力的值为0.530 11 MPa,B处的接触应力为0 MPa。这表明,随着内圈的转动,衬垫上接触应力的分布位置在发生移动,并且移动的方向与内圈的转向一致。图9(c)展示了R44直升机关节轴承实际服役工况中衬垫顶部的损伤特征,从图中可以看出,衬垫表面表现出不同程度的损伤^[19],大量的纤维被磨断、撕裂、分离,甚至还有少量转移膜的形成^[20]。这是由于内圈和衬垫的不断接触,衬垫表面的纤维在接触应力的作用下产生疲劳,容易被损伤。

3.4 衬垫的剪切应力及损伤

内圈来回转动并且在径向载荷的作用下使得衬垫和内圈频繁接触,产生了接触应力和切应

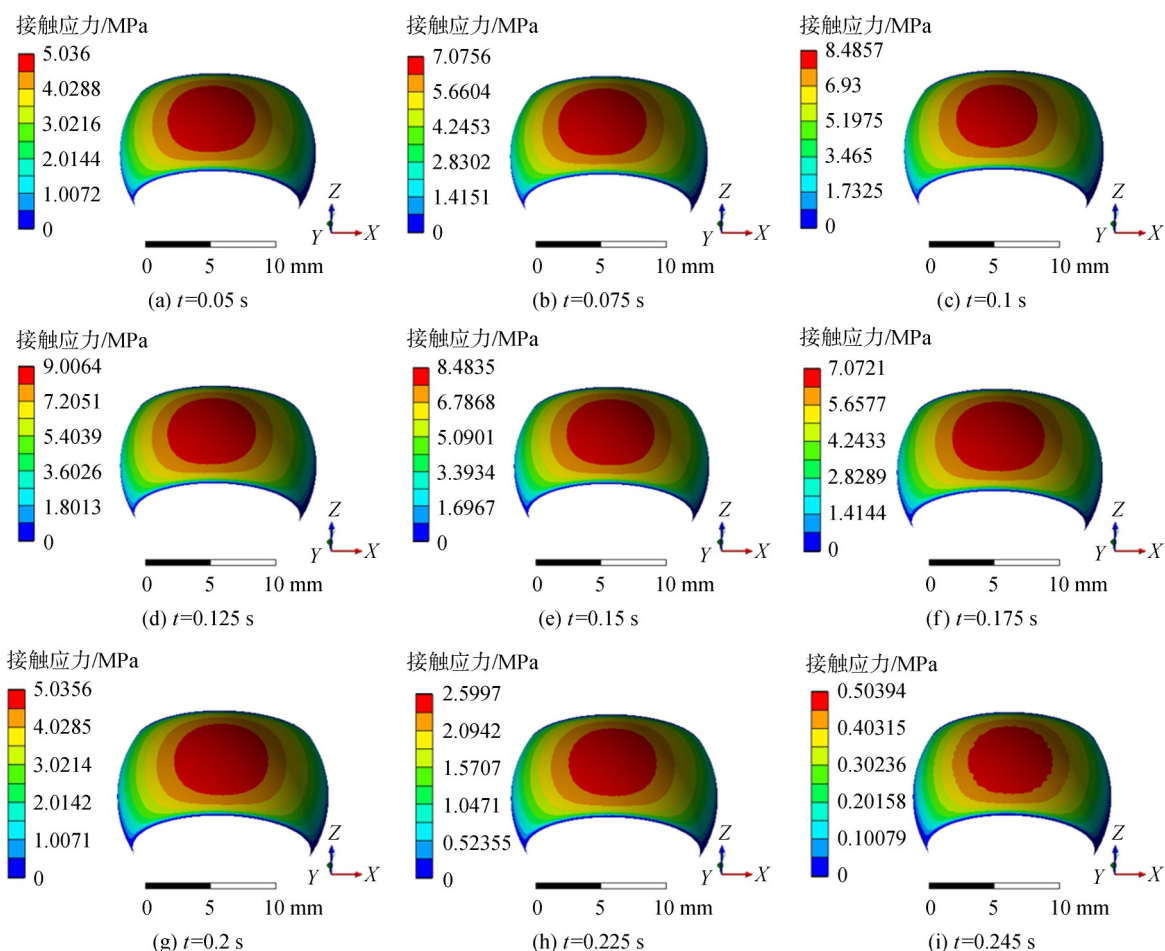


图7 半个周期内衬垫的接触应力

Fig.7 Contact stress of liner in a half cycle

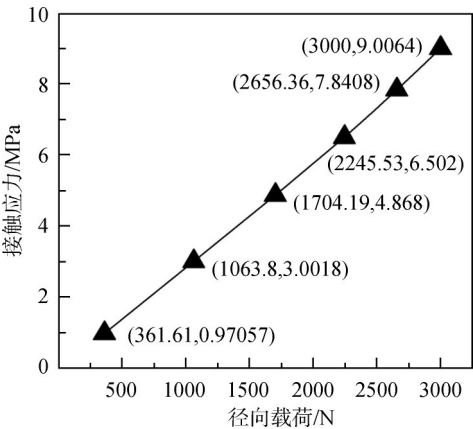
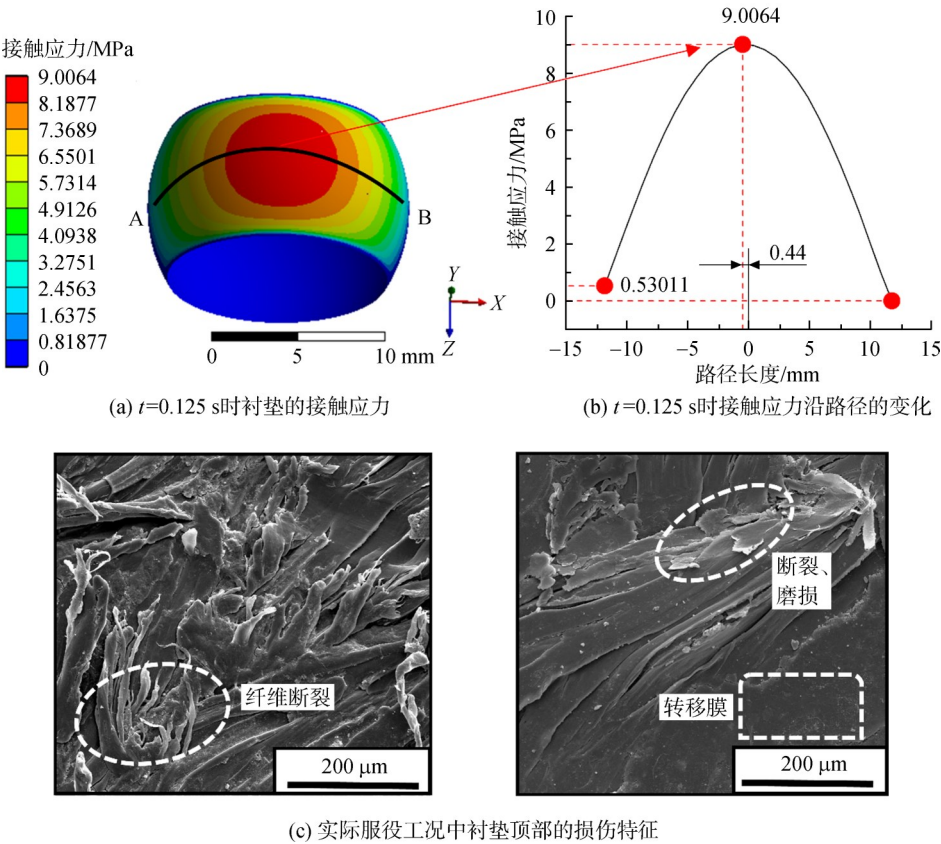


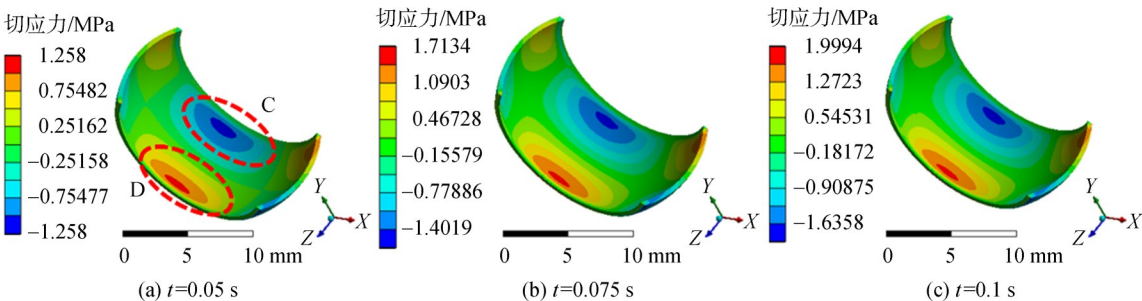
图 8 接触应力随径向载荷的变化
Fig.8 Change of contact stress with radial load

力,从而导致了衬垫的失效。在 $0\sim 0.25\text{ s}$ 内,由于径向载荷一直作用在内圈上半部分,导致内圈与衬垫下半部分产生分离,此时衬垫下半部分有切应力的存在,这是由于衬垫被内圈挤压,导致衬垫产生细微变形,从而在衬垫的表面出现剪切应力。以径向载荷的施加点为参考点,以 $t=0.125\text{ s}$ 时径向载荷的方向为参考方向,衬垫的切应力最集中的区域出现在径向载荷施加点的左上方、左下方、右上方、右下方以及左右两侧。在 $0\sim 0.25\text{ s}$ 内选取几个时间点,对衬垫的左下部分进行分析,如图 10,可以看出,衬垫的最大切应力主要集中在 C、D 两个区域,并且随着时间的增加,C、D 这



(c) 实际服役工况中衬垫顶部的损伤特征

Fig.9 衬垫的接触应力及损伤
Fig.9 Contact stress and damage of liner



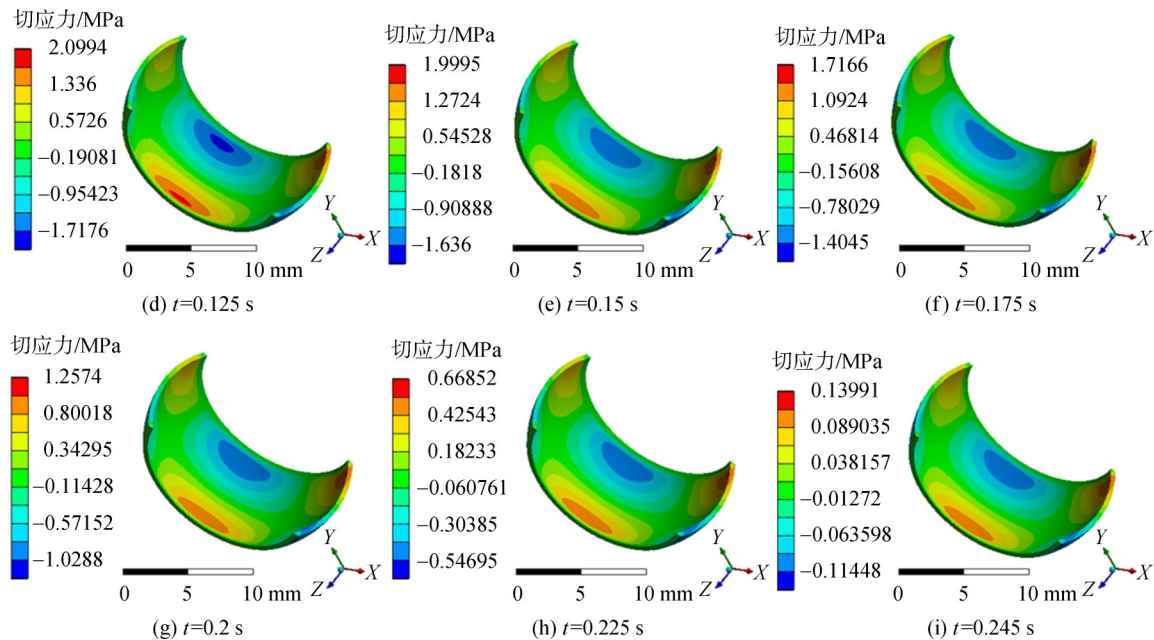


图 10 半个周期内衬垫下半部分的切应力

Fig.10 Shear stress in lower part of liner in a half cycle

两个区域的剪切应力值随着径向载荷的增加而增加,两者呈线性关系,如图 11 所示。

图 12 展示了 R44 直升机关节轴承衬垫下半部分磨损失效的损伤特征与对应切应力分布的对

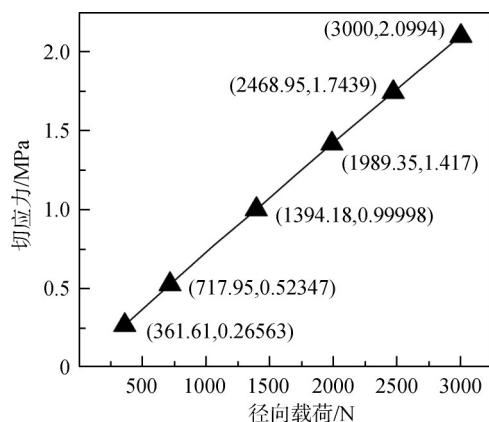
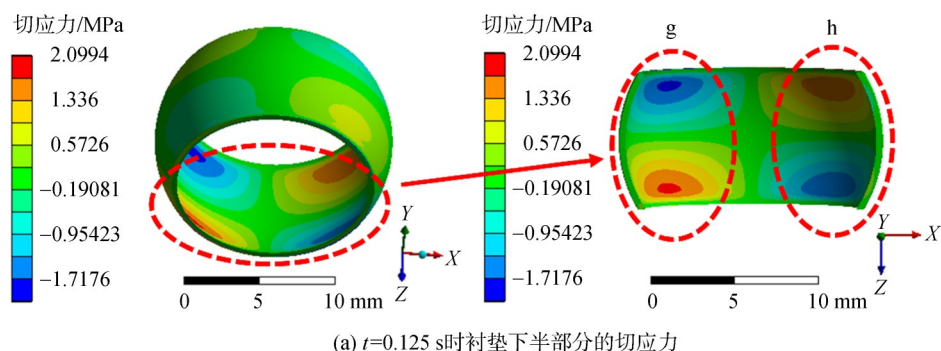


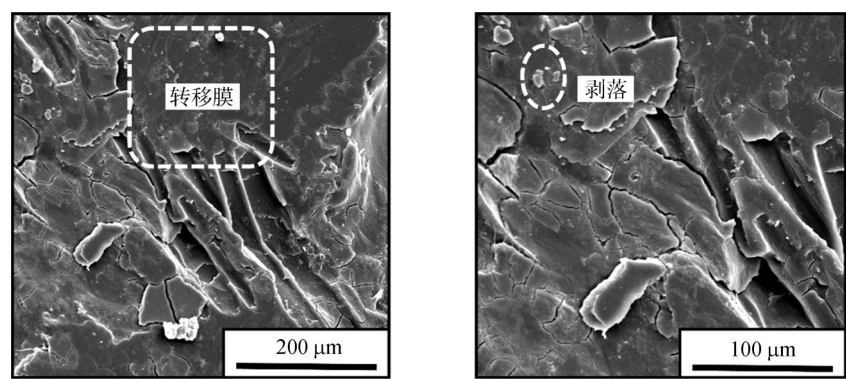
图 11 1/4 周期内切应力随径向载荷的变化

Fig.11 Change of shear stress with radial load in 1/4 cycle

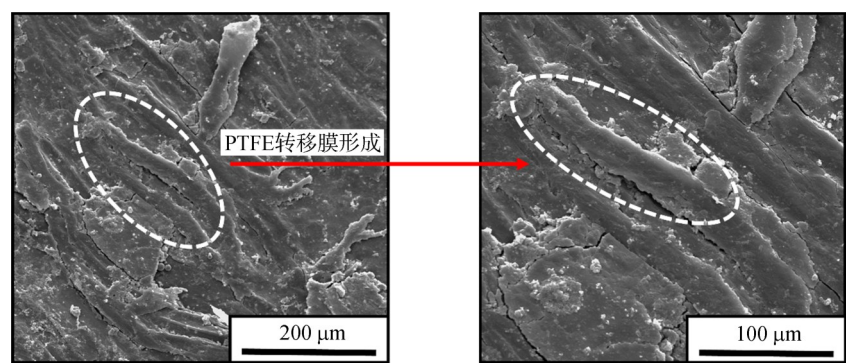
比分析。图 12(a)是 $t=0.125$ s 时 XZ 平面内衬垫下半部分剪切应力的最大值所出现的位置以及实际服役工况中该位置的损伤。由于实际工况不同,衬垫下半部分的损伤主要是以转移膜的形成为主,还存在一定的破裂、剥落,如图 12(b)、图 12(c)。衬垫表面纤维发生了一定程度的塑性变形,这是由于凸出的 PTFE (polytetra fluoroethylene) 纤维在接触应力、剪切应力和摩擦热的共同作用下发生蠕变和转移并对衬垫摩擦表面的间隙进行填充,逐渐在衬垫摩擦表面形成 PTFE 转移膜^[21-22],在持续的切应力和接触应力的作用下,转移膜会加速形成。随着转移膜的不断产出和消磨,衬垫的厚度会逐渐变小,从而导致衬垫和内圈之间的间隙增加,从而引起轴承内圈脱出、振动等一系列问题,故衬垫失效是轴承过早失效的原因。

图 13 所示的是衬垫左右两侧在 XY 平面内的

(a) $t=0.125$ s 时衬垫下半部分的切应力



(b) g区域所对应的损伤工况



(c) h区域所对应的损伤工况

图 12 衬垫下半部分的切应力及损伤
Fig.12 Shear stress in lower part of liner and damage

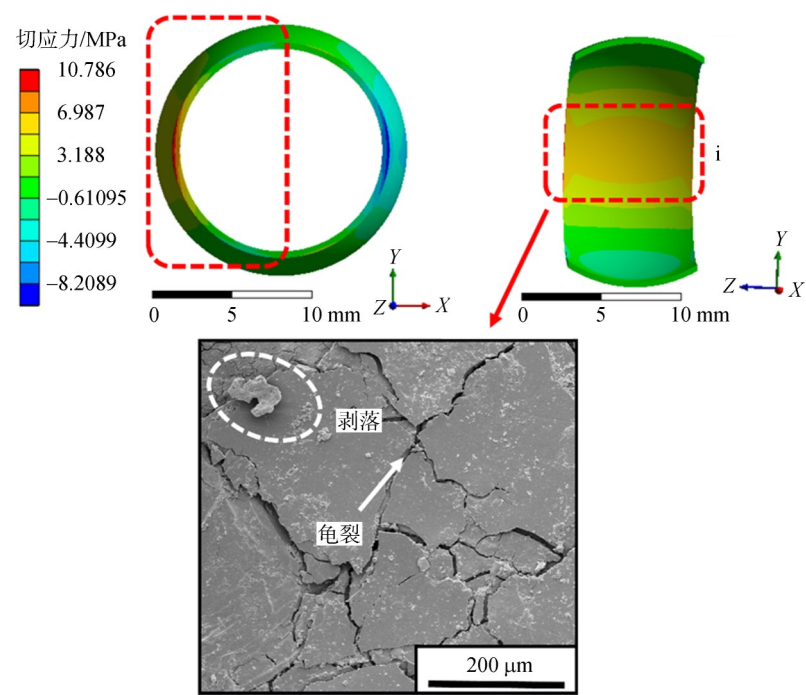


图 13 衬垫两侧的切应力及其实际损伤工况($t=0.125\text{ s}$)
Fig.13 Shear stress on both sides of liner and its actual damage condition ($t=0.125\text{ s}$)

切应力及其在实际服役工况中的损伤,该区域的切应力最大值在边缘处,这是由于边缘处的应力集中导致的,该区域其他位置的切应力值在4~8 MPa,明显比其他区域的切应力值要大。在内圈转动以及在径向载荷的作用下,衬垫的i区域和内圈一直都处于接触状态,所以衬垫该区域比其他区域更容易疲劳。从图13的损伤工况可以看出,衬垫的表面已经形成了转移膜,甚至还出现了裂纹和块状龟裂,表明衬垫左右两侧的损伤是相当严重的。

4 结 论

1) 在转动和径向载荷的联合工况下,衬垫等效应力最大值所处的位置虽然在不断变化,但始终在衬垫的边缘处,衬垫的边缘因为被挤压而发生变形。

2) 在径向载荷的作用下,衬垫的接触应力主要出现在上半部分和下半部分,左右两侧的接触应力值较小;而衬垫的切应力主要出现在径向载荷施加点的左上方、右上方、左下方、右下方以及左右两侧,衬垫左右两侧的切应力较其他区域要大。结合实际服役工况分析,衬垫上表面出现纤维断裂、磨损的现象,形成转移膜的能力较差,则衬垫上表面的润滑性能较差和磨损率较高,表明该部位的损伤严重;衬垫下表面和左右两侧出现完整的转移膜,未发现纤维断裂,表明这两个部位的转移膜起到良好的润滑作用。

3) 由于施加的径向载荷是随时间变化的,等效应力、接触应力和切应力的变化与径向载荷的变化保持一致。

参考文献:

- [1] 魏立保,陈有光.自润滑关节轴承的研制与应用[J].轴承,2008(5):8-10.
WEI Libao, CHEN Youguang. Study and application on self-lubrication spherical plain bearing[J]. Bearing, 2008(5):8-10. (in Chinese)
- [2] ZHANG Zhaozhu, SU Fenghua, WANG Kun, et al. Study on the friction and wear properties of carbon fabric composites reinforced with micro- and nano-particles[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 404(1-2):251-258.
- [3] GUO Fang, ZHANG Zhaozhu, LIU Weimin, et al. Influence of solid lubricant reinforcement on wear behavior of Kevlar fabric composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 110(3):1771-1777.
- [4] 应盛盛,杨晓翔.自润滑关节轴承固化工艺的有限元模拟研究[J].机电工程,2015,32(6):773-777.
YING Shengsheng, YANG Xiaoxiang. Finite element simulation of self-lubricating spherical plain bearing curing process[J]. Mechanical and Electrical Engineering Magazine, 2015, 32(6):773-777. (in Chinese)
- [5] GUO Qiang, SONG Yunfeng, QIAO Hongbin, et al. Friction and wear properties of the spherical plain bearing with self-lubricating composite linear in oscillatory movement[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 19(4):86-90.
- [6] 胡宝根,王卫英,岳琳琳.基于有限元法的自润滑关节轴承静力学分析[J].轴承,2014(4):10-13.
HU Baogen, WANG Weiyang, YUE Linlin. Statics analysis of self-lubricating spherical plain bearings based on FEM[J]. Bearing, 2014(4):10-13. (in Chinese)
- [7] 张瑞芬,吴连平,杨晓翔.自润滑关节轴承二次挤压装配的有限元仿真分析[J].轴承,2015(11):20-22,56.
ZHANG Ruifen, WU Lianping, YANG Xiaoxiang. Numerical simulation of re-extrusion process for self-lubricating spherical plain bearings[J]. Bearing, 2015(11):20-22, 56. (in Chinese)
- [8] 杨帆,孟国营,吴炳胜.多绳摩擦提升机天轮衬垫的有限元分析[J].煤炭工程,2011(3):99-101.
YANG Fan, MENG Guoying, WU Bingsheng. Finite element analysis on sheave liner of multi rope friction hoist[J]. Coal Engineering, 2011(3):99-101. (in Chinese)
- [9] 李杨,司东宏,余永健,等.可变角度径向加载下的轴肩轴承有限元分析[J].机床与液压,2021,49(6):124-128.
LI Yang, SI Donghong, YU Yongjian, et al. Finite element analysis for shoulder bearing with variable angle radial loading[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2021, 49(6):124-128. (in Chinese)
- [10] KIM B C, DONG C P, KIM H S, et al. Development of composite spherical bearing[J]. Composite Structures, 2006, 75(1):231-240.
- [11] KIM B C, LEE D G. Endurance and performance of a composite spherical bearing[J]. Composite Structures, 2009, 87(1):71-79.
- [12] 李迎春,邱明,苗艳伟.PTFE/芳纶纤维编织衬垫自润滑关节轴承的黏接性能及摩擦学性能[J].中国机械工程,2016,27(2):222-229.
LI Yingchun, QIU Ming, MIAO Yanwei. Bonding behavior and tribological property for self-lubricating spherical plain bearings with PTFE/Kevlar woven liners[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(2):222-229. (in Chinese)
- [13] 邱明,张亚涛,卢团良,等.套圈材料对自润滑关节轴承热力学性能的影响[J].航空动力学报,2020,35(10):2097-2103.
QIU Ming, ZAHNG Yatao, LU Tuanliang, et al. Influence of ring material on thermodynamic performance of self-lubricating spherical plain bearing[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(10):2097-2103. (in Chinese)
- [14] TAN Deqiang, LI Rui, YANG Xiaoqiang, et al. Tribological behavior of PTFE/Kevlar fabric under different contact stresses

- [J].AIP Advances, 2021, 11:035233.1-035233.10
- [15] 戴雨静,汪久根,陈芳华,等.带挡边关节轴承静力学有限元分析[J].润滑与密封, 2020, 45(9):7-11.
DAI Yujing, WANG Jiugen, CHEN Fanghua, et al. Finite element analysis on static characteristics of spherical plain bearing with rib[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(9):7-11. (in Chinese)
- [16] 贾新哲.直升机不可逾越速度试飞方法的研究[C]//中国航空学会第十七届全国直升机年会论文集.北京:中国航空学会, 2001:302-305.
- [17] 刘云帆,秦红玲,韩翠红,等.自润滑关节轴承寿命试验及损伤失效机理研究现状[J].材料导报, 2021(1):36-45.
LIU Yunfan, QIN Hongling, HAN Cuihong, et al. Research status of life test and damage failure mechanism of self-lubricating spherical plain bearings[J]. Materials Review, 2021(1):36-45. (in Chinese)
- [18] 李英,李宝福,李如琰.自润滑关节轴承接触应力分析[J].轴承, 2016(5):32-36.
LI Ying, LI Baofu, LI Ruyan. Analysis on contact stress of self-lubricating spherical plain bearings[J]. Bearing, 2016(5):32-36. (in Chinese)
- [19] TAN Deqiang, LI Rui, HE Qiang, et al. Failure analysis of the joint bearing of the main rotor of the Robinson R44 helicopter: A case study[J]. Wear, 2021, 477:203862.1-203862.10.
- [20] 邱明,周大威,庞晓旭.织物衬垫编织工艺对自润滑关节轴承摩擦学性能的影响[J].兵工学报, 2017, 38(9):1867-1872.
QIU Ming, ZHOU Dawei, PANG Xiaoxu. Effect of weave process of fabric liner on tribological properties of self-lubricating spherical plain bearing[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(9):1867-1872. (in Chinese)
- [21] 邱明,周占生,周大威,等.聚四氟乙烯/聚苯硫醚织物自润滑关节轴承的摩擦学性能[J].摩擦学学报, 2018, 38(5):547-553.
QIU Ming, ZHOU Zhansheng, ZHOU Dawei, et al. Tribological properties of self-lubricating spherical plain bearings with PTFE/PPS fabrics liners[J]. Tribology, 2018, 38(5):547-553. (in Chinese)
- [22] 向定汉,潘青林,姚正军.聚四氟乙烯自润滑编织复合材料关节轴承的摆动摩擦磨损性能研究[J].摩擦学学报, 2003, 23(1):72-75.
XIANG Dinghan, PAN Qinglin, YAO Zhengjun. Friction and wear behavior of polytetraethylene fabric composite spherical bearing in swaying[J]. Tribology, 2003, 23(1):72-75. (in Chinese)

(编辑:秦理曼)