

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-10

航空器高升力系统万向节磨损数值仿真研究

权莉¹, 康宁², 邵琴雯¹, 席博伟², 刘宗兴³

(1. 航空工业庆安集团有限公司 民机管理部, 西安 710077)

(2. 航空工业庆安集团有限公司 航空设备研究所, 西安 710077)

(3. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 聚焦于航空器高升力系统襟缝翼传动中的核心部件——十字轴万向节, 探讨其材料磨损特性对航空器功能和疲劳寿命的影响。通过液态金属摩擦磨损试验机, 本文准确测定了十字轴万向节材料的磨损系数, 并基于 Archard 磨损模型, 构建了仿真模型进行磨损分析, 该模型的预测与实验数据吻合程度高, 证实了其有效性。基于 Archard 磨损模型, 提升万向节接头耳片处的硬度有助于增加万向节抗磨损性能, 结果显示, 在 25 °C 下, 耳片硬度增加可使全寿命磨损游隙角度相对降低 24.5%, 而在 400 °C 下降低 20.6%, 显著提高了万向节的抗磨损性能。本研究为万向节抗磨损设计提供了宝贵的理论依据和实际指导。

关键词: 十字轴万向节; Archard 模型; 磨损; 全寿命; 数值模拟

中图分类号: V224+.5; V328

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Numerical simulation study on wear of universal joints in aircraft high lift systems

QUAN Li¹, KANG Ning², SHAO Qinwen¹, XI Bower², LIU Zongxing³

(1. Civil Aircraft Management Department, AVIC Qing'an Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

(2. Aeronautical Equipment Research Institute, AVIC Qing'an Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

(3. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Universal joint torque tube assembly is used in flaperon transmission system of high lift system. As an important part of aircraft, its performance determines the main function and fatigue life of aircraft. Wear between components seriously affects the transmission accuracy of universal joint. This paper takes the cross-shaft universal joint as the research object, uses the liquid metal friction and wear testing machine to measure the wear coefficient of the cross-shaft universal joint material. A numerical simulation model for friction and wear was established based on the Archard wear model, and compared with friction and wear tests. Subsequently, a validated numerical simulation model was used to study the friction and wear problem of the cross shaft universal joint. A model for analyzing the wear clearance angle of the cross shaft universal joint was proposed. Based on the analysis results and Archard wear theory, optimization suggestions were proposed to increase the hardness of the universal joint ear piece, and a comparison was made with the original structure's full life wear clearance angle. The research results indicate that the numerical simulation results based on the Archard wear model have good consistency with the experimental results, and the numerical simulation results can predict the wear results well, thereby significantly shortening the test cycle and increasing design efficiency. Increasing the hardness of the universal joint ear can effectively reduce the wear clearance angle of the cross shaft universal joint. At 25 °C, the full life wear clearance angle is relatively reduced by 24.5%, and at 400 °C, the full life wear clearance angle is relatively reduced by 20.6%. The research results provide certain guiding value for the anti-wear design of universal joints.

Key words: cross axis universal joint; Archard model; wear; life-cycle; numerical simulation

收稿日期: 2023-12-08; 修回日期: 2024-03-08

通信作者: 席博伟(1992-), 男, 博士, 工程师。E-mail: 850202143@qq.com

引用格式: 权莉, 康宁, 邵琴雯, 等. 航空器高升力系统万向节磨损数值仿真研究[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-10.

QUAN Li, KANG Ning, SHAO Qinwen, et al. Numerical simulation study on wear of universal joints in aircraft high lift systems [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-10. (in Chinese)

0 引言

万向节扭力管组件安装在高升力系统襟翼传动系统和缝翼传动系统中,用于连接传动部件和作动部件,主要功能为传递动力驱动装置(PDU)的驱动功率,同时调整由于安装、机翼变形及热变形所带来的轴向和角度误差^[1],作为航空器的重要部件之一,其性能决定着航空器的主要功能、疲劳寿命等^[2],十字轴万向节具有结构简单、效率高、转矩大、传动精度高、使用时间长及成本低等特点,而获得广泛应用^[3-4],在使用过程中由于万向节接头与销钉之间的磨损,影响了十字轴万向节的传动精度,影响产品的可靠性。

磨损现象属于工业领域中的常发现象,随着工业生产的迅猛发展,研究者对摩擦消耗这方面关注度也不断提高。英国的“Jost 报告”^[5]提出,全球消耗在摩擦磨损上的资源占总数的 1/3~1/2,其中磨损会降低零件寿命甚至使其失效,尽量避免机械设备严重的摩擦磨损,将会极大地减少经济损失。

工业中对磨损过程的研究主要集中在磨损寿命预测、磨损状态监测、摩擦副参数优化三个方向,这是热点问题,也是难点问题。同时,对摩擦磨损的控制和对润滑性能的改善,也是许多人研究的方向。

装备的全寿命周期保障性要求试验验证是保证装备形成真正战斗力的重要手段^[6],然而摩擦磨损试验耗时长、反馈慢、且消耗大量人力和财力,一些真实工况难以通过试验获取,因而很多研究者采用数值模拟的方式研究摩擦磨损问题。Patil^[7]等采用分子动力学仿真方法,对刹车片的磨损量做了定量分析;高恒强等^[8]结合试验测得的磨损系数,针对轴承滚子与轴承内圈建立了磨损仿真模型,得到磨损量随接触面径向载荷和接触角呈单增长趋势。1953年,Archard^[9]提出了被广泛应用至今的 Archard 磨损模型;Wei 等^[10]基于 Archard 磨损模型考虑了列车的动态冲击及材料的弹塑性特性对轴重和车速对钢轨的磨损深度影响进行了研究;Bortoleto 等^[11]提出了一种基于线性 Archard 磨损规律和有限元建模的计算方法;Behrens 等^[12]通过有限元方法基于 Archard 模型,研究在温度对热锻模具磨损后表面轮廓的影响。针对摩擦磨损试验耗时较长的问题, Park 等^[13]、Brien 等^[14]结合

Archard 模型,通过试验方法确定了磨损因素影响的大小; Mukras 等^[15]考虑机构的动力学特性对磨损深度变化的影响,结合有限元方法和 Archard 磨损模型提出一种磨损深度预测方法,并对所提方法进行了试验验证;谢鲲等^[16]基于 Archard 磨损理论对球笼式等速万向节内部进行了磨损分析;Xin 等^[17]对比了磨损试验结果与几种磨损经验公式,结果表明, Archard 磨损公式与试验结果吻合较好; Yu 等^[18]研究了起落架手指锁在 500 次开锁循环下的磨损,得到了手指锁的材料、长度、直径等 6 个参数对磨损的影响规律,同时其研究结果也表明了 Archard 方法在计算磨损时的有效性; Tabrizi^[19]指出 Archard 磨损方程是描述和预测零件磨损行为的基本关系,但是 Archard 磨损方程忽略了磨损过程磨损表面特性改变对磨损的影响,而仅将表明特性限制在软表面的硬度值上, Tabrizi 对 Archard 方程进行了修正,修正后的方程考虑了磨损表面特性改变对磨损的影响;林丹益等^[20]对球笼式万向节内外滚道接触应力进行了有限元分析,得出内滚道的接触应力明显大于外滚道,内滚道更容易受到破坏。

磨损在航空领域也备受关注,张辉辉等^[21]开展十字轴万向节磨损性能和传动效率测试试验,依据试验结果提出了磨损计算公式,用于预测十字轴万向节寿命末期的磨损量;赵广^[22]基于 Archard 经典磨损理论,对振动条件下航空花键的键齿之间的磨损进行了预测,并开展了试验研究,研究结果表明,合理控制内、外花键所在转子的振幅、提高花键转子设计动平衡等级可以有效延缓花键磨损;葛薇^[23]指出,航空液压泵典型的渐进性故障之一是磨损,但实际结构的磨损量测量十分困难,对磨损状况进行准确的预测也比较困难,为此提出了一种基于多尺度数据的支持向量机预测方法,模型预测精度更高,适于中长期预测;刘彬^[24]探讨了 TA15 钛合金高温耐磨性能的潜力,结果表明,随着试验温度的升高,TA15 钛合金磨损表面的氧化磨损现象也更加明显。

万向节的磨损对万向节的精准传动影响显著,精准预测万向节磨损量可有效指导万向节的结构设计,从而提高万向节产品的可靠性。Archard 磨损模型被广泛应用于摩擦磨损研究,然而从目前的研究来看,对摩擦磨损多用于简单载荷

工况。本文针对十字轴万向节真实服役载荷条件,结合 Archard 磨损模型,首先通过液态金属摩擦磨损试验机测定万向节材料参数,建立与试验类似的数值仿真模型,验证 Archard 磨损模型对磨损结果预测的合理性;然后采用经验证的数值仿真方法,对万向节的服役全寿命磨损量进行了预测,提出分析万向节磨损游隙的分析模型,并基于该模型预测万向节在 25 和 400 °C 的温度下全寿命磨损游隙;最后基于 Archard 磨损模型提出提高增加十字轴万向节接头耳片处硬度的优化建议,并对优化结构进行数值模拟预测,对比优化结构与原始结构的全寿命磨损游隙角度。

1 磨损系数试验测定

1.1 摩擦磨损计算模型

在 ANSYS Workbench 平台可采用 Archard wear 磨损公式计算相互摩擦过程中的磨损量, Archard wear 磨损公式表述如下:

$$\dot{\omega} = \frac{K}{H} P^m v_{rel}^n \quad (1)$$

式中: $\dot{\omega}$ 为磨损率; K 为磨损系数; H 为材料硬度; P 为接触压力; v_{rel} 为相对速度; m 为压力指数; n 为速度指数, m 和 n 一般取 1。

式(1)两边分别对时间 t 积分得到:

$$\int \dot{\omega} dt = \frac{K}{H} P \int v_{rel} dt \quad (2)$$

磨损率对时间求积分是磨损量,即磨损体积,相对速度对时间积分的结果是相对运动距离,因此 Archard wear 磨损公式又可以按式(3)进行表述:

$$V = \frac{K}{H} PL \quad (3)$$

式中: V 为磨损体积; K 为磨损系数; H 为材料硬度; P 为接触压力; L 为相对滑动距离。

1.2 磨损系数测定

磨损系数 K 在 Archard wear 磨损模型中被定义为产生磨粒的概率,而实际上这个系数是包括了除接触压力 P 、相对滑动距离 L 和材料硬度 H 以外所以对磨损产生影响的因素,该值被认为是一个常数,通常材料硬度 H 也是一个常数,因此 K/H 可以反映磨损过程中,除接触压力 P 和相对滑动距

离 L 以外的其它因素对磨损的影响。开展磨损试验,使万向节磨损部位材料在恒定压力 P 下,发生相对运动,得到相对滑动距离,测量试验件磨损体积,依据公式(3)即可计算万向节磨损部位材料的磨损系数 K 与硬度 H 的比值, K/H 。

本文测定万向节材料磨损系数 K 与硬度 H 的比值的试验采用液态金属摩擦磨损试验机/LMT,试验设备如图 1 所示。进行试验时,试验机夹具固定直径为 6mm 圆球与试样相互摩擦,使用材料为 GCr15,硬度为 HRC61-65 制成的圆球, HRC 代表材料的洛氏硬度,以该硬度表征 Archard 模型中的硬度 H ,使用牌号为 BS S82 的万向节原材料加工而成的长方体试样进行试验,试样长 49 mm,宽 29 mm,厚 9 mm,采用与产品相同的热处理工艺,热处理后表面硬度 HRC35-39,磨损试验面表明粗糙度与实际产品相同,表面粗糙度为 Ra 为 0.4,安装在试验机上准备试验的试样如图 2 所示。



图 1 液态金属摩擦磨损试验机/LMT

Fig. 1 Liquid metal friction and wear testing machine/LMT

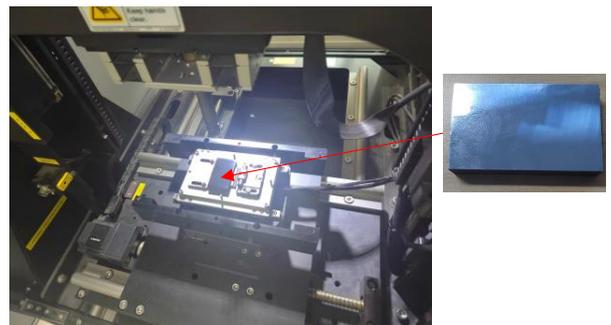


图 2 试验试样

Fig. 2 Test specimen

液态金属摩擦磨损试验机/LMT 可以对圆球和试样件直径提供一个固定压力,进行试验时,试

样夹具带动试样以一定的频率运动,液态金属摩擦磨损试验机/LMT进行磨损试验的原理如图3所示。

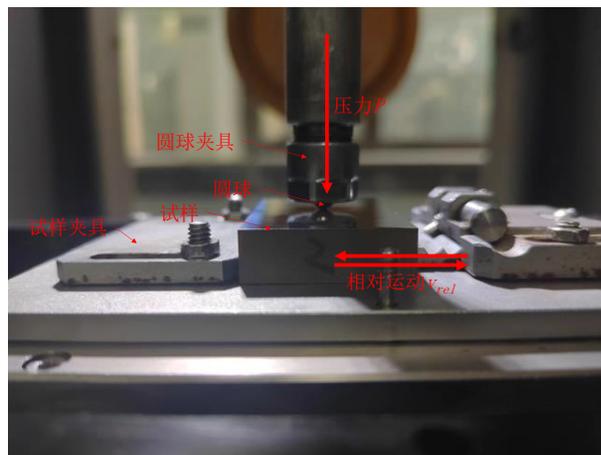


图3 磨损试验
Fig. 3 Wear test

试验时给定压力为 20 N, 试样运动频率为 5 Hz, 行程(运动幅值)为 1 mm, 试验时间为 20 min, 由此可得整个试验过程中圆球与试样相对运动距离 L 为 12 000 mm。

试验后使用三维光学轮廓仪测定试样的磨损体积, 为避免试验的偶然误差, 在试样三处不同位置分别进行了相同条件下的试验, 试验后试样被磨损出现的凹坑图片如图4所示。



图4 试验后试样
Fig. 4 Sample after Test

利用三维光学轮廓仪测定并计算得到的三处磨损体积, 三维光学轮廓仪如图5所示, 对三处磨损凹坑体积进行光学测量, 得到其三处磨损凹坑的体积分别为 12 129 074. 18、12 840 432. 64 和 14 367 823. 87 μm^3 , 求取平均值得磨损体积为 13 112 443. 56 μm^3 , 以 mm^3 作为体积磨损单位, 平均磨损体积为 0. 013 112 443 56 mm^3 , 将相关数据

代入 Archard wear 磨损公式中, 计算得到万向节磨损部位所用材料 BS S82 的 $K/H=5.463\ 52\times 10^{-8}$ 。



图5 三维光学轮廓仪
Fig. 5 Three dimensional optical profilometer

2 摩擦磨损仿真验证

2.1 计算模型

在 ANSYS Workbench 的 Design Modeler 建立与试验类似条件下的摩擦磨损模型。试样跟随试验机做简谐运动的行程为 1 mm, 为简化计算, 仅建立试验件磨损区域附近的模型, 如图6所示, 圆球为直径 6 mm 半球, 试验件以直径 6 mm 圆盘代替, 其厚度为 2 mm。球和圆盘均采用六面体网格, 网格数量为 21 868, 节点数为 95 995。

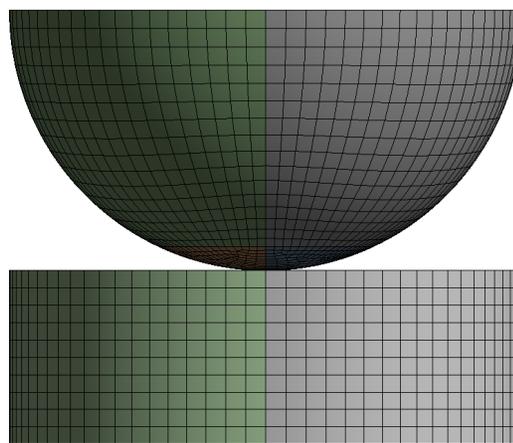


图6 模型验证网格模型
Fig. 6 Model validation mesh model

按照试验条件对半球—圆盘摩擦磨损模型施加边界条件,按照试验条件,在球顶部沿 Z 方向施加大小为 20 N 的恒定荷载;球-盘相对运动幅值为 1 mm,运动频率是 5 Hz,认为初始相位为 0,对圆盘施加正弦函数位移:

$$x = 0.5\sin(360 \times 5 \times time) \quad (4)$$

球与圆盘直径接触关系为摩擦接触,摩擦系数为 0.1,由于摩擦力的作用,圆球会跟随圆盘而运动使两者之间的相对位移消失,因此要限制圆球的运动,以位移边界条件对圆球的运动进行限制,即设置圆球 X 方向的位移为 0。

2.2 计算结果

磨损仿真的过程十分缓慢,如果完全模仿实际磨损过程的每一步,将耗费大量的资源和时间。本研究中仿真 1 s 内圆盘的磨损量,其余模拟条件均与实际试验条件进行。真实试验进行了 20 min,所以真实的磨损量应为仿真计算结果的 20×60 倍,即 1 200 倍。求解完后,提取圆盘总体积磨损随时间的变化曲线,如图 7 所示,仿真 1 s 时,圆盘的总体积磨损量为: $1.1263 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$,因而可得在 20 min 内试样的磨损体积为: $1.351 56 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$,试验试样磨损 20 min 的平均磨损量为 $1.311 244 356 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$,两者之间的相对误差为 3.0%,数值模拟结果与试验结果之间良好的一致性验证了采用 Archard wear 磨损模型进行摩擦磨损计算的合理性。

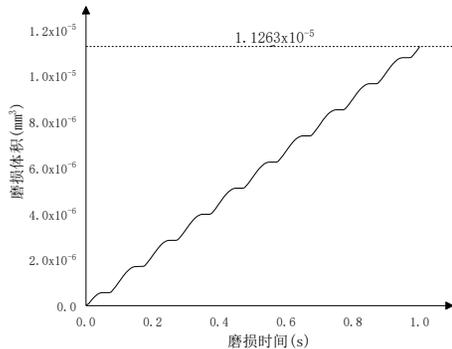


图 7 圆盘磨损体积随时间的变化
Fig. 7 Changes in disc wear volume over time

3 万向节摩擦磨损

万向节扭力管组件安装在高升力系统襟翼传动系统和缝翼传动系统中,用于连接传动部件和

作动部件,主要功能为传递动力驱动装置(PDU)的驱动功率,同时调整由于安装、机翼变形及热变形所带来的轴向和角度误差。十字轴扭力管万向节示意图如图 8 所示,数值磨损时取万向节结构进行研究。

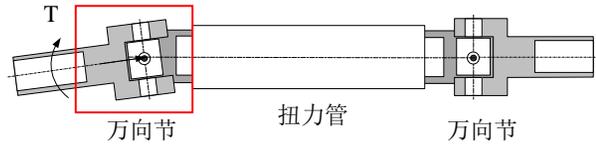


图 8 十字轴扭力管万向节示意图
Fig. 8 Schematic diagram of cross shaft torque tube universal joint

3.1 数值模型

本研究通过数值模拟方法对该万向节在实际载荷谱下的接触应力和磨损情况进行分析,预测该产品全寿命磨损程度。某型飞机襟翼传动系统万向节三维结构如图 9(a) 所示,该万向节组成零件如图 9(b) 所示。

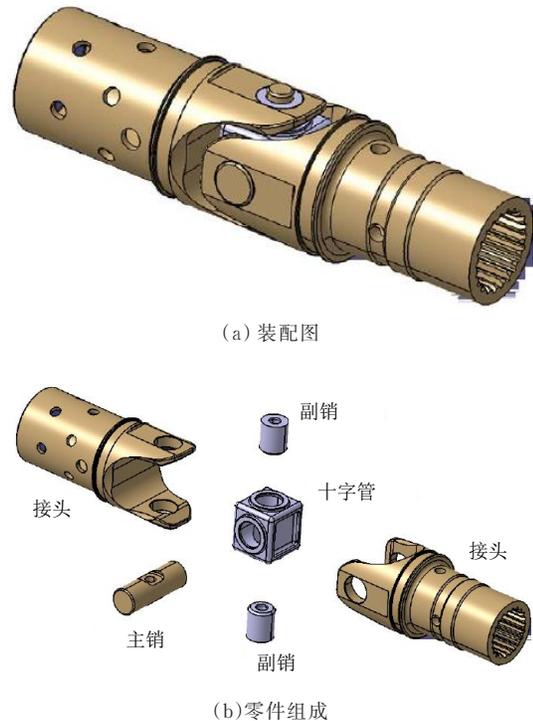


图 9 某型万向节三维结构图
Fig. 9 Three-dimensional structural diagram of a certain type of universal joint

按照万向节实际使用经验,磨损主要发生在万向节的接头耳片与连接销之间,尤其是接头耳

片的磨损相对明显,因而在数值模拟过程中尤为关注这些位置的磨损情况。对磨损不显著的其余位置,进行适当的几何简化以提高网格质量,几何简化主要是针对圆孔、倒角、圆角等对磨损结果影响较小的几何特征,简化的几何结构如图 10 所示。

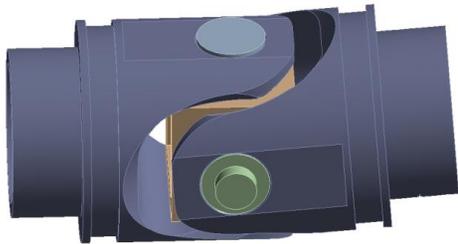


图 10 万向节简化几何模型

Fig. 10 Simplified geometric model of universal joint

对简化模型中易发生磨损的位置进行了网格细化,万向节的网格模型如图 11 所示。接触位置单元类型为 CONTA174。

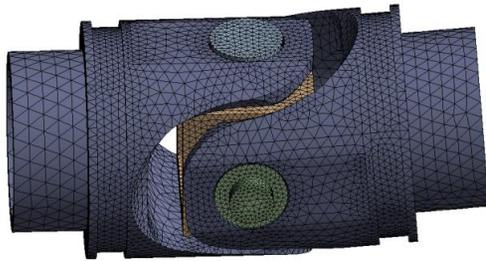


图 11 万向节网格模型

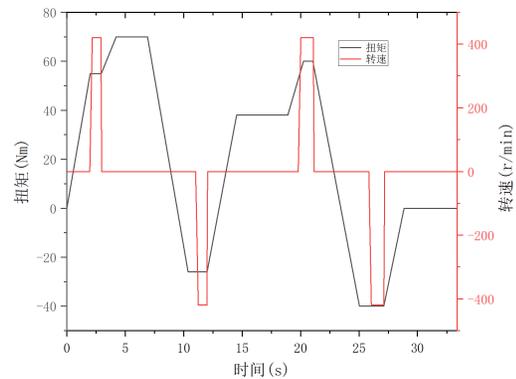
Fig. 11 Universal joint mesh model

3.2 载 荷

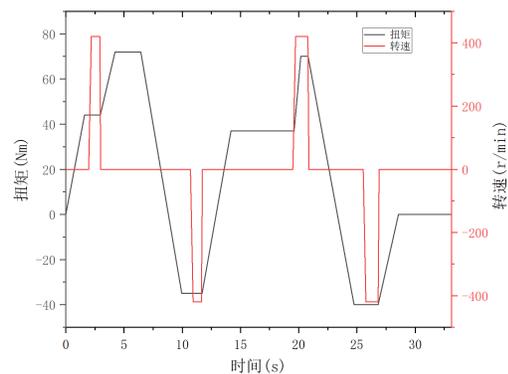
该型扭力管万向节实际工作状态下的载荷谱的简化载荷谱如图 12 所示,简化载荷谱相对于实际载荷谱进行了平滑处理,同时由于磨损计算效率相对较低,为增加计算效率将加载总时间缩减为原来的 1/10 进行计算,得到计算结果后,将该部分时间缩减因素考虑到计算结果中进行处理。

磨损过程各工况对磨损结果均会产生影响,在仿真过程中综合考虑各工况载荷,将综合载荷施加到万向节结构上。载荷谱百分比的含义是载荷谱在 60 000 次完整循环中所占比例,即 2.5%、7.5%、10%、12.5%、30%、37.5% 载荷谱的循环次数分别为 1 500、4 500、6 000、7 500、18 000、22 500 次。维护载荷谱循环次数为 4 500 次,则 2.5%、7.5%、10%、12.5%、30%、37.5% 及维护

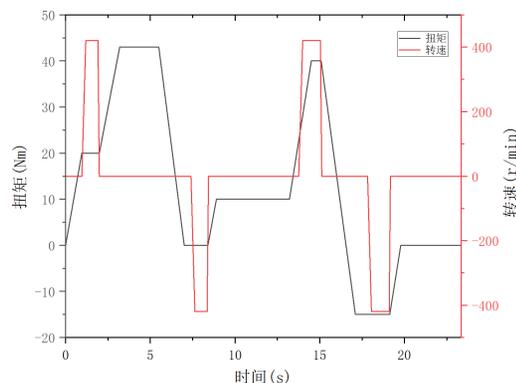
载荷谱在循环次数上的比例为 1:3:4:5:12:15:3,综合载荷按照上述时间比例进行施加,即施加 1 次 2.5% 载荷,3 次 7.5% 载荷,4 次 10% 载荷,5 次 12.5% 载荷,12 次 30% 载荷,15 次 37.5% 载荷,3 次维护载荷,则一个完整加载周期的加载时间为 116.67 s。



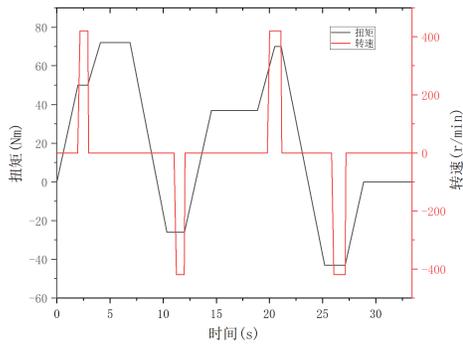
(a) 2.5% 载荷谱



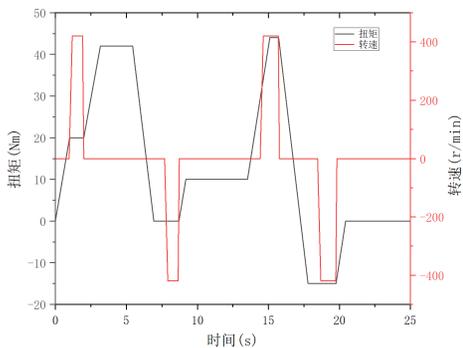
(b) 7.5% 载荷谱



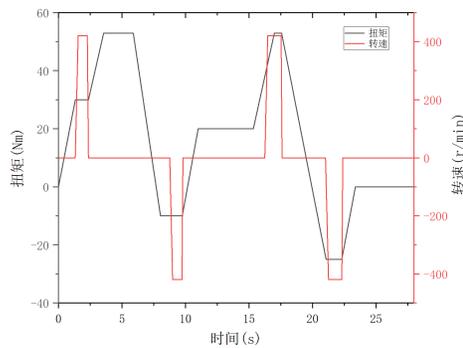
(c) 10% 载荷谱



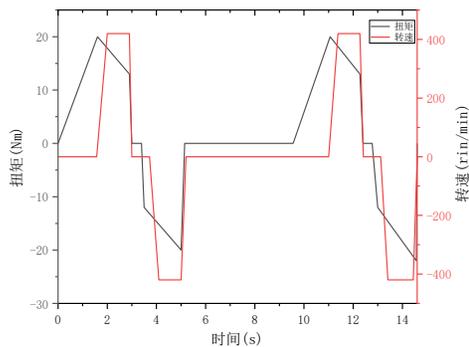
(d) 12.5% 载荷谱



(e) 30% 载荷谱



(f) 37.5% 载荷谱



(g) 维护载荷谱

图 12 简化载荷谱

Fig. 12 Simplified load spectrum

载荷施加位置如图 13 所示,将图 12 简化载荷谱分别施加在万向节的两个接头上,转速旋转方向和扭矩的扭转方向分别绕各自局部坐标系的 Z 轴,即转速和扭矩分别绕各自的中心线。

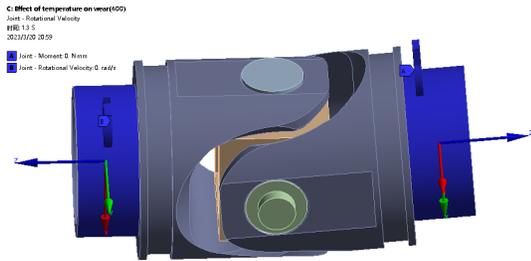


图 13 载荷施加位置

Fig. 13 Load application position

3.3 接触设置

在为了研究扭力管加载端的磨损问题,定义接头和连接销的接触:销表面为目标面,接头耳片表面为接触面,接触算法选用纯罚函数的方式,可在保证精度的同时提高模型的收敛性,如图 14 所示。

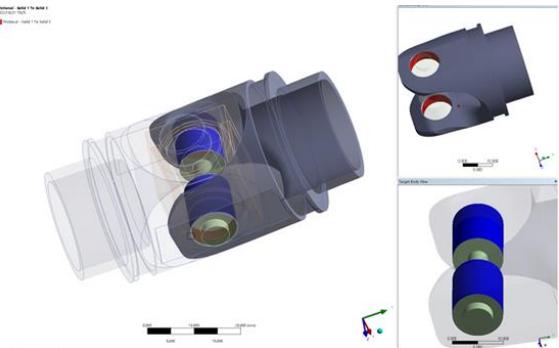


图 14 接触位置

Fig. 14 Contact Position

纯罚函数接触方式基于罚函数方程判别接触力的接触方式($F_{normal} = k_{normal} \times x_{penetration}$)。纯罚函数接触方式是一种非线性实体表面接触方式,相较于增强的拉格朗日法($F_{normal} = k_{normal} \times x_{penetration} + \lambda$),两种方式都允许小的穿透量,增强拉格朗日法引入了拉格朗日乘子 λ 使其对罚函数刚度 k_{normal} 变得不敏感,但是要消耗更多的计算代价,纯罚函数方式可通过接触刚度和穿透量之间计算得到,对于摩擦磨损这种非常消耗计算资源的模拟,采用纯罚函数接触方式,计算效率更高。

本研究所采用 Archard wear 磨损模型在第 1

章中已做了简要介绍,此磨损模型已纳入 Ansys 数据库中,可以通过 APDL 程序直接调用,调用方法如图 15 所示,直接在需要考虑磨损的接触下插入命令。命令流中 TB 行的含义是调用 Archard wear 模型, tid 和 cid 分别对应接触从面和接触主面。TBDATA 行的含义为“磨损材料 ID, K , H , m , n , 磨损算法(C5)”,本探究将 K/H 视为定值,测定了接头耳片材料的 K/H 值,因此在数据输入时输入 K 为测定的数值, H 为 1。接头和主销的材料相同均为 BS S82,但采用了不同的热处理方式导致主销的硬度更大,接头耳片的硬度为 HRC35~39,连接销的硬度为 HRC60~64,按照硬度关系计算了连接销的 K/H 值。

```

TB,WEAR,tid,,ARCD
TBDATA,1,3.30455E-08,1,1,1,0

TB,WEAR,cid,,ARCD
TBDATA,1,5.46352E-08,1,1,1,0

```

图 15 Archard wear 磨损 APDL 命令

Fig. 15 Archard wear APDL command

3.4 计算结果

两处磨损位置在 116.67s 内的最大磨损深度-时间变化的关系图如图 16 所示。本文中温度对磨损结果的影响主要考虑温度对材料弹性模量的影响,对于室温环境下万向节材料的弹性模量为 200 GPa,400 °C 环境条件下,考虑到材料的软化效应,其弹性模量设置为 180 GPa,以此考察温度对万向节磨损的影响。

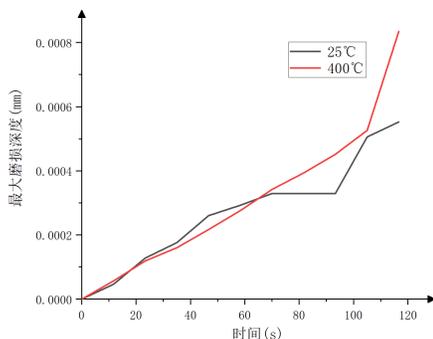
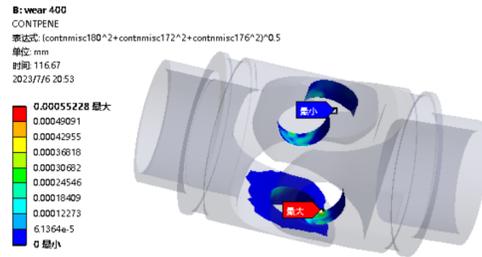


图 16 最大磨损深度-时间

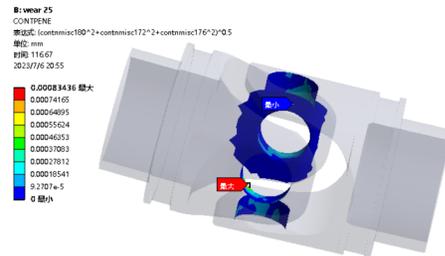
Fig. 16 Maximum wear depth-time

万向节两个接头耳片一个载荷循环后的体积磨损量云图如图 17 所示,磨损主要发生在耳片外侧边缘位置,与万向节发生的过度磨损情况类似。

造成体积磨损量较大的原因是万向节运转过程中,接头耳片外侧区域应力较大,在载荷作用过程中该处的接触压力也要超过其它区域。



(a) 25 °C



(b) 400 °C

图 17 磨损深度云图

Fig. 17 Cloud map of wear depth

3.5 游隙分析

十字轴万向节磨损导致接头耳片材料减少,进而导致连接销在接头耳片处的游隙角度增大。磨损致使十字轴万向节游隙增加,是导致十字轴万向节传动精度降低的最主要原因。万向节磨损深度云图如图 17 所示,可以看出:4 处耳片圆孔的出现磨损区域比较集中,造成万向节产生游隙的原因也主要是由于圆孔被磨损而影响到连接销与耳片的配合关系。因此本研究提出了对万向节全寿命游隙估计模型,游隙预测模型如图 18 所示,取磨损严重位置区域的多个节点的平均磨损深度作为 dh ,产生的游隙角度可按下述表达式进行描述:

$$\alpha = \arctan \frac{dh}{L}$$

25 °C 时,对磨损严重位置的结点磨损深度取平均值,得到平均磨损深度为 1.61×10^{-4} mm,连接销长度 $L=30$ mm,由于分析时将载荷时间缩短为实际时间的 1/10,全寿命循环下循环次数为所施加载荷的 1500 倍,故可预测全寿命下平均磨损深度为 2.42 mm,因此预测全寿命下游隙角度为

4.602°。

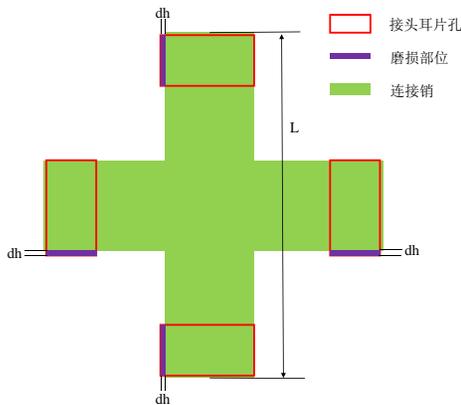


图 18 磨损游隙分析模型

Fig. 18 Analysis model of wear clearance

400 °C时,对磨损严重位置的结点磨损深度取平均值,得到平均磨损深度为 2.17×10^{-4} mm,故可预测全寿命下平均磨损深度为 3.26 mm,因此预测全寿命下游隙角度为 6.192°。

3.6 优化分析

根据 Archard 磨损模型,产生摩擦磨损的因素主要来源于材料属性(H/K),摩擦接触面的法向压力(P),以及摩擦面的相对运动(v_{rel})。一个可有效降低万向节磨损程度方式是提高磨损位置材料的抗磨损性能,反映在 Archard 磨损模型中就是降低材料的 H/K ,不改变万向节本身材料类型,可考虑增加接头接触位置硬度,同时考虑到接头硬度增加引起主销磨损量增加同样会使万向节游隙变大,为此建议将接头磨损位置硬度经热处理达到与主销相似的硬度,取主销轴硬度(HRC60~64)的平均值,即 HRC=62,接头硬度 HRC=62 时最大磨损深度随时间变化图形如图 19 所示。

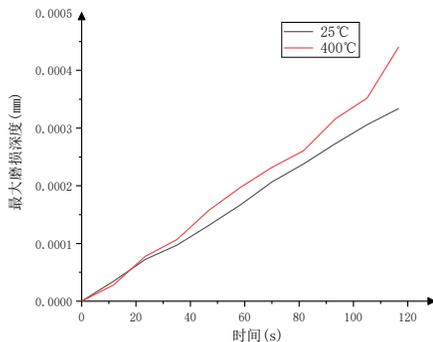


图 19 优化后最大磨损深度-时间

Fig. 19 Maximum wear depth-time after optimization

按照 3.6 节所考虑的游隙分析模型,25 °C 时,平均磨损深度为 1.21×10^{-4} mm,全寿命平均磨损深度为 1.82 mm,全寿命下游隙角度为 3.472°,游隙角度相对降低 24.5%;400 °C 时,平均模型深度为 1.72×10^{-4} mm,全寿命平均磨损深度为 2.58 mm,全寿命下游隙角度为 4.915°,游隙角度相对降低 20.6%。

4 结论

1) 本文首先对 Archard wear 磨损模型进行了介绍,并利用液态金属摩擦磨损试验机/LMT 开展了摩擦磨损试验,利用三维光学轮廓仪测量到了试样的体积磨损量,进而获得了基于 Archard wear 模型的摩擦磨损计算所需数据。而后在 Ansys workbench 平台下建立了与试验条件相当的数值模型,对比了试验结果与数值模拟结果,两者误差为 3.0%,从而验证了本文采用的数值计算方法在进行摩擦磨损计算时的合理性。

2) 基于经过合理性验证的计算模型,对万向节摩擦磨损进行的数值模拟预测,在 60 000 次的全寿命循环下,预测了万向节 25 °C 时由于磨损而产生的游隙角度大约为 4.6°,400 °C 时由于磨损而产生的游隙角度大约为 6.2°。通过数值模拟方法,大幅缩短了试验周期。

3) 基于 Archard 磨损理论,给出了降低万向节服役过程中磨损的优化建议,即增加接头耳片易发生磨损处的硬度。并对优化后的万向节进行了数值模拟预测,研究发现在 25 °C 时全寿命磨损游隙角度相对降低 24.5%,400 °C 时全寿命磨损游隙角度相对降低 20.6%。

参考文献

- [1] 喻琴,刘小涛,马咪娜,等.某扭力管万向节组件及支撑轴承的正弦振动疲劳研究[J].航空工程进展,2019(s1):44-49,81.
YU Qin, LIU Xiaotao, MA Mi'na, et al. Study on sinusoidal vibration fatigue of a torsion tube universal joint assembly and supporting bearing [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019(s1): 44-49,81. (in Chinese)
- [2] 陈刚.十字轴万向节式章动减速器的设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
CHEN Gang. Design and research of universal joint nutation reducer with cross shaft [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [3] 高云峰.理论力学教具DIY系列(二)十字轴万向节及转角

- 差异的演示模型[J]. 力学与实践, 2020, 42(4): 475-477.
GAO Yunfeng. Demonstration model for universal-joint cross trunnion and the angle difference[J]. Mechanics in Engineering, 2020, 42(4): 475-477. (in Chinese)
- [4] 范景峰, 梅二召, 董振波. 汽车传动轴轴颈断裂分析与优化[J]. 机械, 2020, 47(7): 7-14.
FAN Jingfeng, MEI Erzha, DONG Zhenbo. Fracture analysis and optimization of axle journal of automobile transmission shaft[J]. Machinery, 2020, 47(7): 7-14. (in Chinese)
- [5] Department of Education and Science, Lubrication (Tribology) Education and Research. Tribology [R]. London, Department of Education and Science, Lubrication (Tribology) Education and Research, 1966.
- [6] 姜涛, 钱征文. 美国空军装备全寿命保障工作分析与思考[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 59-63.
JIANG Tao, QIAN Zhengwen. Analysis and thinking on life cycle support of american air force military equipment [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 59-63. (in Chinese)
- [7] PATIL S P, CHILAKAMARRI S H, MARKERT B. A novel nonlinear nano-scale wear law for metallic brake pads [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2018, 20(17): 12027-12036.
- [8] 高恒强, 蔡红娟, 蔡苗. 基于 Archard 修正模型的角接触球轴承磨损有限元分析[J]. 机床与液压, 2018, 46(15): 159-164.
GAO Hengqiang, CAI Hongjuan, CAI Miao. Finite element analysis on wear of angular contact ball bearing based on archard revision model[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(15): 159-164. (in Chinese)
- [9] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8): 981-988.
- [10] WEI W, YUAN C L, WU R D, et al. Wear of a crossing under dynamic wheel impact[J]. Wear, 2019, 436-437(1/2): 202997.
- [11] BORTOLETO E M, ROVANI A C, SERIACOPI V. Experimental and numerical analysis of dry contact in the pin on disc test[J]. Wear, 2013, 301(1/2): 19-26.
- [12] BEHRENS B A, SCHAEFER F. Prediction of wear in hot forging tools by means of finite-element-analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2): 309-315.
- [13] PARK D, KOLIVAND M, KAHRAMAN A. Prediction of surface wear of hypoid gears using a semi-analytical contact model[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 52: 180-194.
- [14] BRIEN S O, LUO Y. Computational development of a polyethylene wear model for the articular and backside surfaces in modular total knee replacements[J]. Tribology International, 2013, 59: 284-291.
- [15] MUKRAS S, KIM N H, MAUNTLER N A, et al. Analysis of planar multibody systems with revolute joint wear[J]. Wear, 2010, 268(5/6): 643-652.
- [16] 谢鲲, 刘征宇, 郭常宁, 等. 七沟道球笼式等速万向节磨损及仿真分析[J]. 汽车工程, 2019, 10(41): 1164-1171.
XIE Kun, LIU Zhengyu, GUO Changning, et al. friction loss and simulation analysis of seven channel road rzeppa constant velocity universal joint [J]. Automotive Engineering, 2019, 10(41): 1164-1171. (in Chinese)
- [17] PEI Xin, PU Wei, YANG Jialong. Wear law in mixed lubrication based on stress-promoted thermal activation [J]. Friction, 2021, 9(4): 710-722.
- [18] HOU Yu, ZHANG Ming, NIE Hong. Wear analysis of finger locks with different design parameters for landing gear [J]. Science Process, 2020, 103(3): 1-24.
- [19] TABRIZI A T, AGHAJANI H, SAGHAFIAN H. Correction of archard equation for wear behavior of modified pure titanium[J]. Tribology International, 2021, 155: 106772.
- [20] 林丹益, 孙晓萌, 章伊华. 球笼式等速万向节接触应力有限元分析[J]. 煤矿机械, 2016, 37(5): 80-82.
LIN Danyi, SUN Xiaomeng, ZHANG Yihua. Contact stress analysis of ball-cage type constant velocity joint by finite element method [J]. Coal Mine Machinery, 2016, 37(5): 80-82. (in Chinese)
- [21] 张辉辉, 孙军帅, 张光炯, 等. 高升力系统十字轴万向节自润滑技术试验研究[J]. 机械科学与技术, 2019, 37(7): 1143-1148. (in Chinese)
SUN Huihui, SUN Junshai, ZHANG Guangjiong, et al. Experimental study on self-lubricating technology of cross axis universal joint for high lift system [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 37(7): 1143-1148. (in Chinese)
- [22] 赵广, 李盛翔, 郭梅, 等. 航空花键振动磨损预测与实验[J]. 航空动力学报, 2018, 33(12): 2954-2964. (in Chinese)
ZHAO Guang, LI Shengxiang, GUO Mei, et al. Prediction and experiment of vibration wear of aviation spline [J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12): 2954-2964. (in Chinese)
- [23] 葛薇, 王少萍. 航空液压泵磨损状况预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(11): 1410-1414.
GE Wei, WANG Shaoping. Prediction and experiment of vibration wear of aviation spline [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 37(11): 1410-1414. (in Chinese)
- [24] 刘彬, 李晟, 毛玉刚. 航空 TA15 钛合金高温摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术, 2023, 52(10): 151-159. (in Chinese)
LIU Bin, LI Cheng, MAO Yugang, et al. Study on tribological properties of TA15 aviation titanium alloy at different high temperatures [J]. Surface Technology, 2023, 52(10): 151-159. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)