

套圈材料对自润滑关节轴承热力学性能的影响

邱明^{1,2}, 张亚涛^{1,2}, 卢团良^{1,2}, 庞晓旭^{1,2}

(1. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003;

2. 河南科技大学 机械装备先进制造河南省协同中心, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 为研究套圈材料对自润滑关节轴承性能的影响,建立了基于 ABAQUS 有限元软件的热力耦合模型。在特定工况下分析了 2024 铝合金与 GCr15 两种材料的关节轴承等效应力的大小、摩擦副的热传导过程以及接触应力与温度的分布规律。结果表明:铝合金套圈的等效应力均小于屈服强度,能满足使用要求,与 GCr15 轴承钢相比,该轴承衬垫受到的等效应力降低了 35.4%,同时铝合金轴承的衬垫比 GCr15 轴承更快地达到热稳定状态;另外,铝合金轴承的摩擦面接触应力降低 15.4%,套圈温度降低 2℃,衬垫温度降低 15.7℃,且应力与温度分布更均匀。综上所述,2024 铝合金关节轴承在一定工况下比 GCr15 轴承磨损寿命更长具有更优异的性能。通过试验验证了 GCr15 轴承的温升过程与温度分布,与有限元结果具有很好的一致性。

关键词: 自润滑关节轴承; 铝合金; 衬垫性能; 热力耦合; 摩擦温度

中图分类号: V250.3; TH133.3

文献标志码: A

Influence of ring material on thermodynamic performance of self-lubricating spherical plain bearing

QIU Ming^{1,2}, ZHANG Yatao^{1,2}, LU Tuanliang^{1,2}, PANG Xiaoxu^{1,2}

(1. School of Mechatronics Engineering,

Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China;

2. Henan Collaborative Innovation Center for Advanced Manufacturing of Mechanical Equipment, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: In order to study the influence of ring material on the performance of self-lubricated spherical plain bearings, a thermo-mechanical coupling model based on ABAQUS software was established. The performance difference of spherical plain bearing of 2024 aluminum alloy and GCr15 was analyzed under certain working conditions, including the magnitude of equivalent stress, heat conduction process of friction pair, distribution of contact stress and temperature. Results showed that the equivalent stress of the ring of the aluminum alloy bearing was less than the minimum yield stress, which can meet the use requirements, meanwhile, the equivalent stress of the liner was reduced by 35.4%, and the liner of the aluminum alloy bearing reached the stable thermal state faster than the GCr15 bearing. In addition, the frictional contact stress of the aluminum alloy bearing was reduced by 15.4%, the temperature of ring was reduced by 2℃ the temperature of liner was reduced by 15.7℃, and the stress and temperature distributions of inner ring and liner were more uni-

收稿日期: 2020-03-17

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2000203); 河南省重大科技专项(161100210800)

作者简介: 邱明(1969—),女,教授、博士生导师,博士,主要从事轴承设计及理论研究。

引用格式: 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,ZHANG 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.

form. In summary, the 2024 aluminum alloy spherical plain bearings had longer wear life and better performance than GCr15 bearings in some cases. The temperature rise process and temperature distribution of the GCr15 bearing were verified by experiments, which were in good agreement with the results of finite element analysis.

Key words: self-lubricating spherical plain bearing; aluminum alloy; liner performance; thermo-mechanical coupling; friction temperature

自润滑关节轴承具有结构简单、承载能力大、抗冲击、耐腐蚀、自润滑等特点,广泛应用于高温、重载、污染等苛刻环境^[1-4]。在航空领域轻量化一直是产品设计的一项重要指标,铝合金自润滑关节轴承具有密度低、比强度高、导热性好、耐腐蚀等一系列优点,已在航空方面特别是飞机的鸭翼、尾翼、起落架等部位被陆续采用^[5-6]。例如国产 C919 有 3000 多个关节轴承,如果全部用铝合金材料替代钢制关节轴承,这将有益于飞机减轻质量。

关节轴承的性能评价指标有变形量、启动力矩、磨损量和温度等^[7]。温度是影响关节轴承摩擦学性能的主要因素之一,温度过高过低都会加速润滑介质的失效,温度又可分为环境温度和摩擦温度。刘建、张永振等^[8]研究了环境温度对 PTFE(聚四氟乙烯)衬垫摩擦学性能的影响,试验表明:不同环境温度范围,摩擦温度与摩擦因数具有不同的规律。李彦伟等^[9]在分析影响自润滑关节轴承寿命因素时发现:在低于常温时,随温度的升高寿命增加;在高于常温后,温度的升高寿命减小。影响摩擦温度的因素包括工况条件、结构参数和材料。Qiu 等^[10]研究了在阶梯载荷下自润滑关节轴承的摩擦学性能。结果表明,载荷比、摆频和载荷周期对材料的磨损、温升和成膜性能均有影响。文献^[11]通过顺序热力耦合对关节轴承进行了分析,与试验测量值对比,均达到了理想的结果。Ma 等^[12]在研究衬垫纬密度对衬垫性能影响时发现,转速与载荷对摩擦副的热流率有很大影响,转移膜的形成以及稳定性又与热流率的大小有很大的关系。

材料是影响摩擦热的主要因素之一,选用不同的对偶材料对轴承摩擦热的分配、传递与散热都有很大的影响。2024 铝合金是一种高强度硬铝具有优良的力学性能,主要用于制作各种高负荷的零件和构件,在航空领域倍受青睐,如飞机上的骨架零件、蒙皮、隔框、翼肋、翼梁、铆钉等零件。在关节轴承中,当套圈材料为铝合金时,摩擦副的热稳定状态会与 GCr15 套圈有很大不同,这将直接影响轴承的摩擦磨损性能,目前对该型号铝合金

的研究主要在力学性能^[13-14],成型加工方面^[15-16],以及焊接性能^[17-18]等,如李娜等^[19]通过研究得到 3 种铝合金应力-应变关系和失效应变,以及温度对材料性能的影响规律,并拟合出较好的用于预测铝合金塑性流动应力的数学模型。Krymskiy 等^[20]研究了 Zr 对严重变形 2024 铝合金组织和抗晶间腐蚀性能的影响,得出了影响合金合金腐蚀行为的主要结构因素。因此探究铝合金关节轴承与钢制关节轴承之间的摩擦学性能差别将对实际应用中关节轴承的选择具有重要的指导作用。

本文基于 ABAQUS 有限元分析软件的热力耦合模型,针对 T851 态 2024 铝合金和 GCr15 两种套圈材料自润滑关节轴承的摩擦热开展了研究。最后通过关节轴承摩擦磨损性能试验验证了关节轴承的使役性能。

1 关节轴承摩擦生热有限元模型的建立

1.1 摩擦生热方程

关节轴承摩擦副热载荷矢量计算公式为^[21]

$$Q = \mu p \omega r \tag{1}$$

式中 Q 为热流密度 (W/m^2); μ 为摩擦因数; p 为衬垫与内圈的接触应力 (MPa); ω 为关节轴承内圈摆动的角速度 (rad/s); r 为内圈外球面距旋转轴线距离 (mm)。

摩擦副热流分配系数 K 由材料的密度 ρ (kg/m^3)、比热容 c ($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$) 和导热系数 κ ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$) 决定。设内圈和衬垫的热流密度分别为 Q_1 、 Q_2

$$Q = Q_1 + Q_2 \tag{2}$$

$$K = \frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{c_1 \rho_1 \kappa_1}{c_2 \rho_2 \kappa_2}} \tag{3}$$

式中 c_1 、 ρ_1 、 κ_1 分别为内圈的比热容、密度和导热系数; c_2 、 ρ_2 、 κ_2 分别为衬垫的比热容、密度和导热系数。

1.2 热力耦合分析模型

本文对 GE30UK-2RS 型号关节轴进行完全

热力耦合分析,图 1 为轴承几何结构和有限元模型,基本结构尺寸:外径 $D=47\text{ mm}$,外圈宽 $C=18\text{ mm}$,内径 $d=30\text{ mm}$,球径 $d_k=40.7\text{ mm}$,内圈宽 $B=22\text{ mm}$ 。为了更加真实模拟轴承实际运行状态,在模型中添加了杆端体和芯轴两个部件,为简化计算忽略了轴承的一些结构细节,并把对计算结果影响较小的芯轴设定为刚体。文献[22]在对 GX25S 油润滑关节轴承的有限元分析中发现,考虑轴承游隙可以提高温度场计算精度,因此,本文所建立有限元模型的游隙值设定为 $50\text{ }\mu\text{m}$ [23]。

衬垫由聚四氟乙烯和芳纶纤维混编而成,属于各向异性材料,因此,本文通过建立局部球坐标系来定义各个方向上的弹性模量 E 、切变模量 G 和泊松比。在分析过程中对材料性能参数均设定为常数,表 1 和表 2 是各部件材料的力学参数和

热学参数, E_1 、 E_2 、 E_3 表示 3 个主方向上的弹性模量, G_{12} 、 G_{13} 、 G_{23} 和 ν_{12} 、 ν_{13} 、 ν_{23} 分别表示 3 个平面内的切变模量和泊松比。

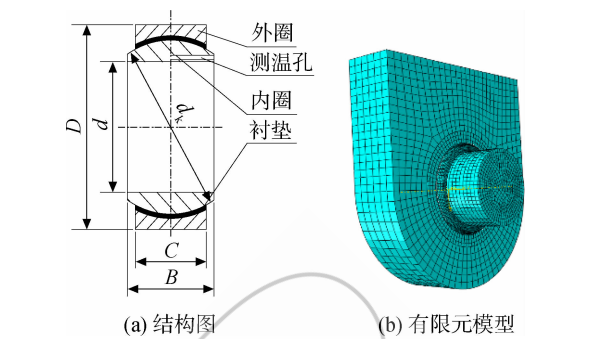


图 1 自润滑关节轴承几何结构与有限元模型
Fig.1 Self-lubricating spherical plain bearing geometry and finite element model

表 1 材料热学参数
Table 1 Material thermal parameters

材料	密度/(kg/m ³)	比热容/(J/(kg·℃))	导热系数/(W/(m·℃))	膨胀系数/10 ⁻⁴ (m/℃)	表面传热系数/(W/(m·℃))
衬垫	1640	1490	1.13	0.28	10
GCr15	7820	460	45	1.2	10
2024	2820	900	130	2.36	10
45#钢	7810	450	45	1.2	10

表 2 材料力学参数
Table 2 Material mechanical parameters

材料	弹性模量/GPa			切变模量/GPa			泊松比		
	E_1	E_2	E_3	G_{12}	G_{13}	G_{23}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
衬垫	52.04	4.71	4.71	3.45	1.84	1.84	0.37	0.37	0.28
GCr15		212			84.23			0.3	
2024		71.5			26.88			0.33	
45#钢		193			74.23			0.3	

1.3 边界条件的设置

设定初始温度场为 $10\text{ }^\circ\text{C}$,衬垫和外圈的黏接状态由绑定约束实现,对耦合面摩擦因数取 0.05,假设摩擦做的功全部转化成内能被摩擦副吸收,有限元模型表面与外界表面传热系数设为 $20\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 。由式(2)、式(3)可知 2024 和 GCr15 两种材料与衬垫之间的热流分配系数分别为 10.9 和 7.7,即分配到衬垫上的热量分别 11.5% 和 28.57%,在运行中更多热量分配到铝合金材料上。整个分析过程分为 3 步,第 1 步先

给杆端体施加一个小位移使衬垫和内圈接触;第 2 步在杆端体上施加一个延轴承径向方向的载荷实现对轴承的加载;第 3 步内圈进行旋转摆动,控制轴承内圈旋转摆动的正弦幅值曲线如下式:

$$\theta = A\sin(2\pi ft) \tag{4}$$

式中 θ 为角位移, A 为摆动幅值, f 为摆动频率。

2 有限元结果分析

2.1 套圈材料对应力的影响

不改变衬垫材料,对上述有限元模型中的套

圈分别赋予 2024 铝合金和 GCr15 两种材料属性,在径向载荷为 30 kN、摆动频率为 2 Hz 和摆角为 $\pm 6^\circ$ 的工况条件下进行完全热力耦合分析。图 2 是关节轴承各部件的等效应力云图,其中图 2(a)为铝合金外圈等效应力云图,最大值为 86.47 MPa;图 2(b)是铝合金内圈等效应力云图,最大应力在套圈内部为 78.67 MPa;图 2(c)、图 2(d)分别为铝合金关节轴承与 GCr15 轴承衬垫的等效应力云图,最大值分别为 114.8 MPa 和 177.8 MPa,对比发现 2024 关节轴承的衬垫受到的应力比 GCr15 轴承降低 35.4%。2024 铝合金材料的屈服强度为 325 MPa 以上,所以轴承未发生屈服变形。通过上述分析可知,铝合金套圈不仅能满足上述工况要求还可以降低关节轴承衬垫受力,改善轴承运行状况。

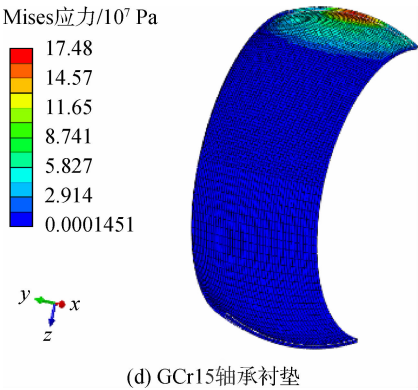
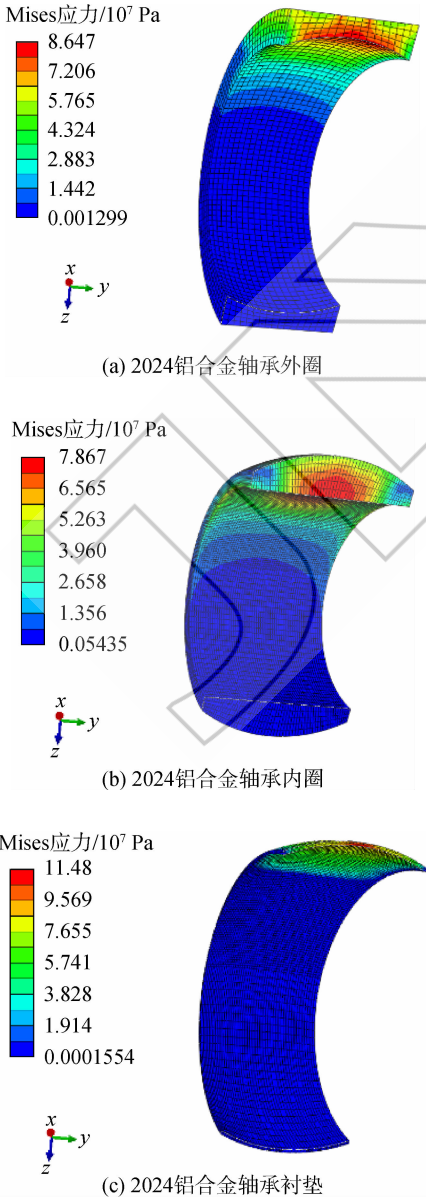


图 2 关节轴承 Mises 应力分布
Fig. 2 Mises stress distribution of spherical plain bearing

2.2 套圈材料对摩擦温度的影响

图 3 是两种轴承内圈和衬垫接触表面的温升过程,其中 A 表示 2024 铝合金轴承,B 表示 GCr15 轴承。从图中可知两种轴承的衬垫初始阶段温升很快,先达到稳定状态,这是由于轴承运行中每个周期产生的热量一定,而衬垫导热性差且处于封闭环境,分配到衬垫上的热量传递和散失较慢,导致温升很快。另外,2024 铝合金轴承衬垫达到稳定状态需要 1 min 左右,而 GCr15 轴承为 2 min,由此可知在运行中铝合金轴承温度响应快,能够更快地达到稳定运行状态。由于 2024 铝合金轴承分配到衬垫上的热量是 GCr15 轴承的 2.5 倍,所以前者稳定后的温度高于后者。2024 铝合金的热传导系数是 GCr15 的 3 倍,热量能够迅速传递到低温区,所以运行过程中铝合金套圈分到的热量多,但温度一直低于 GCr15 轴承。

图 4 为铝合金关节轴承温度分布云图,为更清晰对比套圈材料对轴承摩擦温度分布的影响,

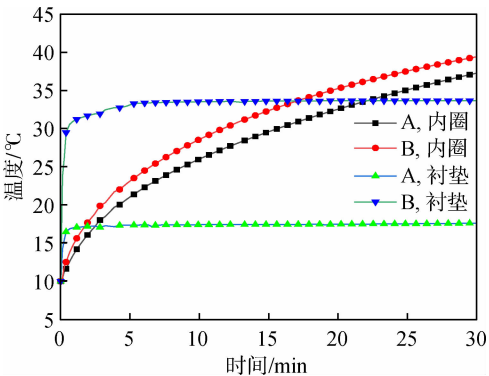


图 3 两种关节轴承温升过程
Fig. 3 Temperature rise process of two kinds of spherical plain bearings

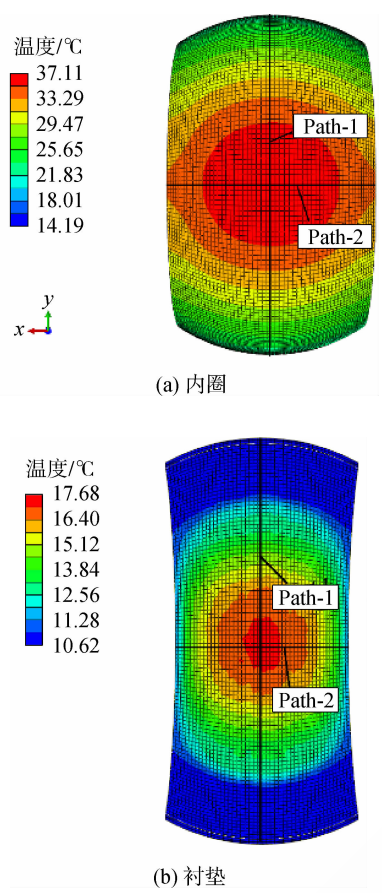


图 4 铝合金关节轴承温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of aluminum alloy spherical plain bearing

分别在内圈与衬垫接触面上建立圆周方向(path-1)和宽度方向(path-2)两条路径。提取 30 min 时两条路径上的温度与接触应力值,得到两种关节轴承温度与接触应力分布曲线。图 5(a)、图 5(b)为内圈 path-1 和 path-2 上的温度与接触应力分布曲线,从图中可以看出,两种轴承温度与接触应力分布规律相同,从接触中心向两侧降低,其中 2024 铝合金轴承接触应力与温度分布更均匀,相对 GCr15 轴承接触应力降低 15.4%,温度降低约 2 °C。图 6(a)、图 6(b)是衬垫两条路径上的温度分布曲线,分布规律同内圈类似,且稳定状态下 2024 铝合金轴承衬垫温度最大值为 17.7 °C,比 GCr15 轴承低 15.7 °C。

套圈材料对关节轴承摩擦温度影响的机理如下:

1) 相同工况下铝合金关节轴承衬垫与内圈的接触面积大于 GCr15 轴承,因此,在轴承产热功率相等时摩擦面积大的轴承能加快热量的传递与散失;同时接触面积增大会降低触应力集中,由此减小摩擦副在应力最大处产生的热量,避免

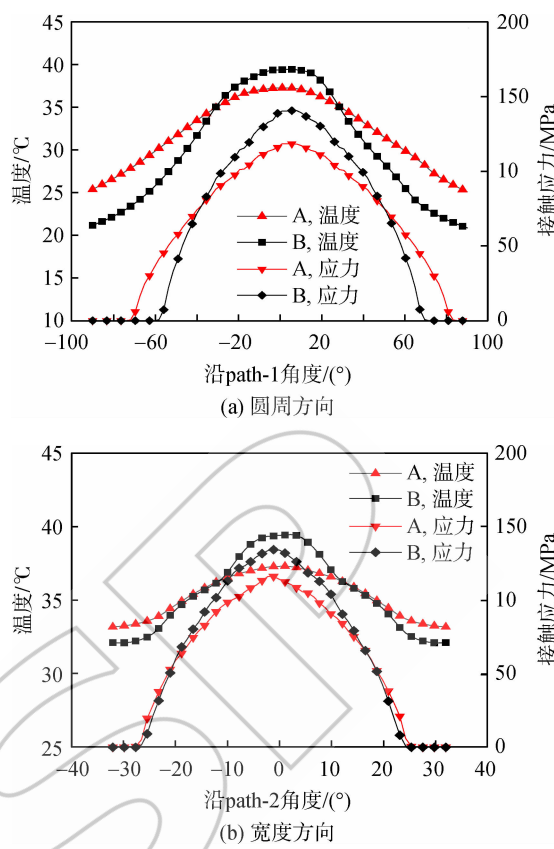


图 5 两种材料内圈温度与接触应力分布

Fig. 5 Temperature and contact stress distribution of two materials inner rings

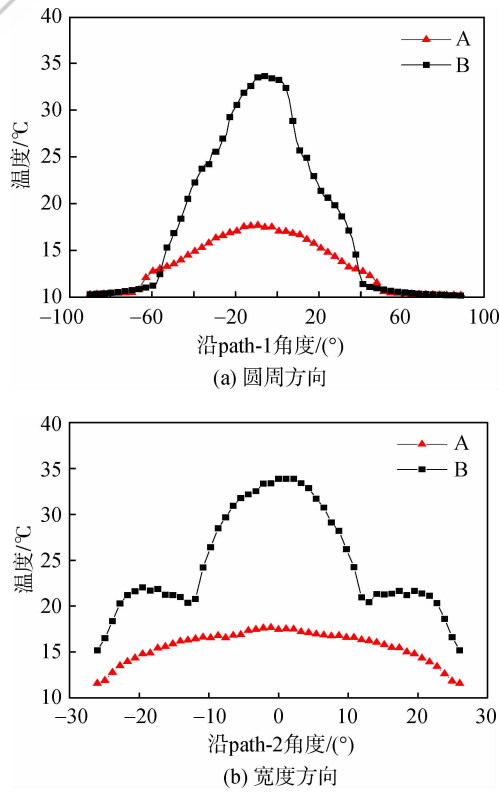


图 6 衬垫温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of liner

局部温度的激增。铝合金关节轴承受力面积大的原因一方面是铝合金强度低, 受载变形大; 另一方面是铝合金热膨胀系数大, 内圈受热后能更大程度上缩小轴承的游隙, 使内圈与衬垫接触面积增大。

2) 铝合金的导热性是 GCr15 钢材的 4 倍, 能使热量更快地往低温处传递, 快速降低摩擦面温度, 由此可以延长关节轴承的磨损寿命。

2.3 试验验证

在相同工况下利用关节轴承试验机对有限元模型进行验证, 选用 GCr15 轴承进行试验。为得出内圈上温度分布, 在轴承内圈端面 1/4 圆周上加工 3 个直径为 1.5 mm 的测温孔, 如图 7 所示, 通过温度传感器对内圈测温孔内温度进行测量, 试验时间为 60 min。图 8(a) 为试验与仿真温升过程的对比, 图 8(b) 为相同时刻内圈圆周方向上仿真与试验温度分布。从图中看出仿真结果与试验结果温升趋势相同, 温度分布基本一致, 但是在数值上有所差别, 造成的原因可能有: 仿真设置的材料参数与真实值之间有差别、有限元模型与实际夹具有差异等, 综上所述, 可以验证上述关节轴承热力耦合模型与结果的正确性。

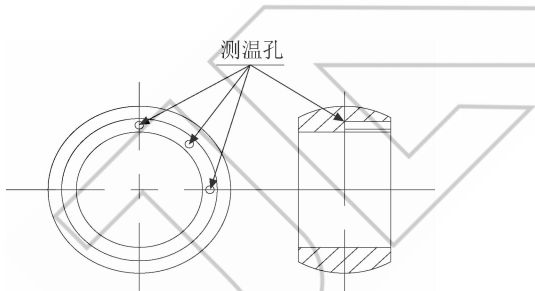
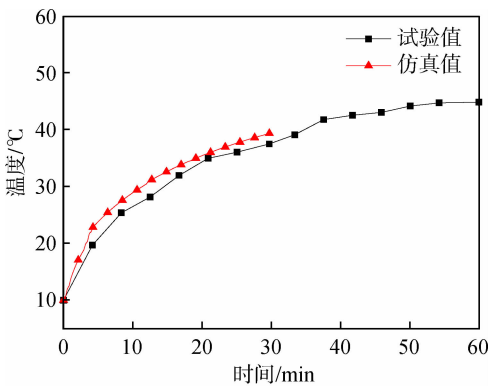
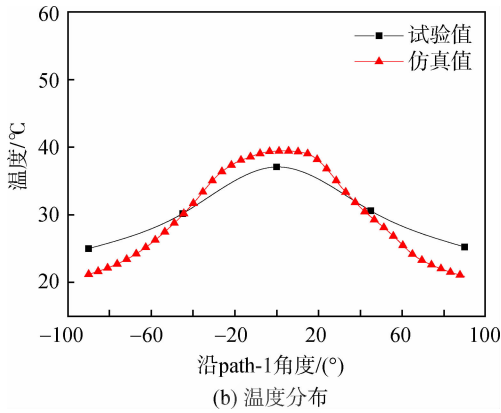


图 7 轴承内圈测温孔位置

Fig. 7 Location of temperature measuring hole in bearing inner ring



(a) 温升过程



(b) 温度分布

图 8 仿真与试验对比

Fig. 8 Comparison between simulation and experiment

3 结 论

本文在径向载荷为 30 kN、摆动频率为 2 Hz 和摆角为 $\pm 6^\circ$ 的工况条件下对自润滑关节轴承进行完全热力耦合分析, 并通过试验对分析结果进行了验证, 主要得出以下结论:

- 1) 相同工况下铝合金关节轴承衬垫受到的等效应力相比 GCr15 轴承更小。
- 2) 铝合金关节轴承衬垫的温度达到稳定状态需要的时间比 GCr15 轴承短, 温度响应快。
- 3) 铝合金轴承摩擦副接触应力分布比 GCr15 轴承均匀, 且应力集中现象明显降低, 具有更长的磨损寿命。
- 4) 铝合金轴承的套圈和衬垫温度分布更均匀, 相比 GCr15 轴承, 铝合金轴承套圈温度与衬垫稳定状态温度均有所降低。

参考文献:

[1] 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, YAN Zhengjun. Friction and wear behavior of polytetrafluoroethylene fabric composite spherical bearing in swaying[J]. Tribology, 2003, 23(1): 72-75. (in Chinese)

[2] GERMANEAU A, PEYRUSEIGT F, MISTOU S, et al. 3D mechanical analysis of aeronautical plain bearings: validation of a finite element model from measurement of displacement fields by digital volume correlation and optical scanning tomography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(6): 676-683.

[3] KIM B C, PARK D C, KIM H S, et al. Development of composite spherical bearing [J]. Composite Structures, 2006, 75(1/2/3/4): 231-240.

[4] 邱明, 梁霞, 李迎春. 注塑改性尼龙杆端关节轴承的摩擦学

性能[J]. 兵工学报, 2017, 38(10): 206-211.

QIU Ming, LIANG Xia, LI Yingchun. Tribological properties of rod end spherical plain bearings with modified injection molding nylon[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(10): 206-211. (in Chinese)

[5] 刘兵, 彭超群, 王日初, 等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(9): 1705-1715.

LIU Bing, PENG Chaoqun, WANG Richu, et al. Recent development and prospects for giant plane aluminum alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(9): 1705-1715. (in Chinese)

[6] 杨吟飞, 张峥, 李亮, 等. 7085 铝合金残余应力及加工变形的数值仿真与试验[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 574-581.

YANG Yinfei, ZHANG Zheng, LI Liang, et al. Numerical simulation and test of bulk residual stress and machining distortion in aluminum alloy 7085[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(2): 574-581. (in Chinese)

[7] AGUIRREBEITIA J, ABASOLO M, VALLEJO J, et al. Methodology for the assessment of equivalent load for self-lubricating radial spherical plain bearings under combined load[J]. *Tribology International*, 2017, 105: 69-76.

[8] 刘建, 张永振, 杜三明, 等. 聚四氟乙烯编织复合材料摩擦温度与磨损特性[J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 90-94.

LIU Jian, ZHANG Yongzhen, DU Sanming, et al. Temperature and friction characteristics of ptfe braided composites[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(23): 90-94. (in Chinese)

[9] 李彦伟, 林品, 赵颖春, 等. 自润滑关节轴承磨损寿命影响因素分析[J]. 轴承, 2017(9): 49-51.

LI Yanwei, LIN Jin, ZHAO Yingchun, et. Analysis on influencing factors of wear life for self-lubricating spherical plain bearings[J]. *Bearing*, 2017(9): 49-51. (in Chinese)

[10] QIU Ming, YANG Zhuopei, LU Jianjun, et al. Influence of step load on tribological properties of self-lubricating radial spherical plain bearings with PTFE fabric liner[J]. *Tribology International*, 2017, 113: 344-353.

[11] CAO L, SHEN X J, LI R Y. Three-dimensional thermal analysis of spherical plain bearings with self-lubricating fabric liner[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 97/98/99/100/101: 3366-3370.

[12] MA Jian, YANG Yulin, QI Xiaowen. Tribological performances of fabric self-lubricating liner with different weft densities under severe working conditions[J]. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 2015, 40(3): 293-300.

[13] KHANI-MOGHANAKI S, KAZEMINEZHAD M. Effects of non-isothermal annealing on microstructure and mechanical properties of severely deformed 2024 aluminum alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(1): 1-9.

[14] 赵云龙, 杨志卿. 时效时间对冷轧 2024 铝合金组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(3): 136-139.

ZHAO Yunlong, YANG Zhiqing. Effects of aging time on microstructure and mechanical properties of cold rolled 2024 aluminum alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2015, 40(3): 136-139. (in Chinese)

[15] 张小伟. 金属增材制造技术在航空发动机领域的应用[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 10-16.

ZHANG Xiao. Application of metal additive manufacturing in aero-engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(1): 10-16. (in Chinese)

[16] 邹凯丽, 李宝福, 刘红宇. 铝合金关节轴承外圈滚轧整形有限元分析[J]. 轴承, 2015(7): 21-24.

ZOU Kaili, LI Baofu, LIU Hongyu. Finite element analysis on rolling rounding for outer rings of joint bearings made of aluminum alloy[J]. *Bearing*, 2015(7): 21-24. (in Chinese)

[17] BOŞNEAG A, CONSTANTIN M A, NIȚU E, et al. Friction stir welding of three dissimilar aluminium alloy used in aeronautics industry[J]. *Materials Science and Engineering*, 2017, 252(1): 1-8.

[18] QIN D Q, FU L, SHEN Z K. Visualisation and numerical simulation of material flow behaviour during high-speed FSW process of 2024 aluminium alloy thin plate[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102: 1901-1912.

[19] 李娜, 李玉龙, 郭伟国. 3 种铝合金材料动态性能及其温度相关性对比研究[J]. 航空学报, 2008, 29(4): 903-908.

LI Na, LI Yulong, GUO Weiguo. Comparison of mechanical properties and their temperature dependencies for three aluminium alloys under dynamic load[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(4): 903-908. (in Chinese)

[20] KRYMSKIY S, ILYASOV R, AVTOKRATOVA E, et al. Effect of Zr on structure and resistance to intergranular corrosion of severely deformed 2024 aluminum alloy[J]. *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, 2019, 31: 35-42.

[21] 李辉, 杜建华, 王浩旭, 等. Effects of Carbon 碳纤维织物结构对摩擦材料温度分布的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(4): 87-93.

LI Hui, DU Jianhua, WANG Haoxu, et al. Fiber fabric structure on temperature distribution of friction materials[J]. *China Surface Engineering*, 2017, 30(4): 87-93. (in Chinese)

[22] 俞建卫, 王礼飞, 魏巍. 关节轴承摩擦温度场计算方法[J]. 中国机械工程, 2015, 26(10): 1284-1288.

YU Jianwei, WANG Lifei, WEI Wei. Calculation method of spherical plain bearing friction temperature field[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(10): 1284-1288. (in Chinese)

[23] 段闯. 编织衬垫关节轴承热分析与试验研究[D]. 河南洛阳: 河南科技大学, 2015.

DUAN Chuangchuang. Thermal analysis and experimental research of woven liner spherical plain bearing[D]. Luoyang Henan: Henan University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)