● 试验研究 Experimental Research ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4018

航空发动机用摩擦副 CrMo 铸铁/38CrMoAlA 瞬态磨损–摩擦热耦合仿真分析

魏建林[1,2,3],田 鑫[3],杨 勇[1,2],李永健[3]

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072; 2. 西北工业大学 先进润滑与密封材料研究中心,陕西 西安 710072; 3. 清华大学 高端装备界面科学与技术全国重点实验室,北京 100084)

摘 要:为探究航空发动机用摩擦副 CrMo 铸铁/38CrMoAlA 的摩擦磨损特性,利用 ANSYS 有限元软件建立了面–面接触的摩擦副模型,开展了瞬态磨损–摩擦热耦合仿真分析,阐明了摩擦副的磨损性能演化规律。仿真计算发现,静环 -CrMo 铸铁摩擦面的外径侧温度和体积磨损量较高。接触压力对摩擦应力的影响更为显著,在接触压力为 0.02~0.10 MPa,摩擦线速度 10~30 m/s 时,体积磨损量随接触压力的增大而增大,随摩擦线速度的增大而减小。体积磨损率的计算值与实验值有相同的变化规律,且数值差异较小,说明磨损模型能较好预测摩擦副的磨损情况。

关键词:CrMo 铸铁;ANSYS;瞬态仿真;Archard;摩擦磨损

中图分类号:TG143; TH117.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2024)06-0523-09

Transient Wear–friction–thermal Coupling Simulation Analysis of CrMo Cast Iron/38CrMoAlA Friction Pair for Aircraft Engines

WEI Jianlin[1,2,3], TIAN Xin[3], YANG Yong[1,2], LI Yongjian[3]

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Center of Advanced Lubrication and Seal Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. National Key Laboratory of High-end Equipment Interface Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To investigate the friction and wear characteristics of CrMo cast iron/38CrMoAlA friction pairs used in aircraft engines, a surface-to-surface contact friction pair model was established using ANSYS finite element software. Transient wear friction thermal coupling simulation analysis was carried out to elucidate the evolution law of the wear performance of the friction pairs. Simulation calculations reveals that the outer diameter side temperature and volume wear of the static ring CrMo cast iron friction surface are relatively high. The influence of contact pressure on frictional stress is more significant. When the contact pressure is 0.02~0.10 MPa and the friction line velocity is 10~30 m/s, the volume wear increases with increasing contact pressure and decreases with increasing friction line velocity. The calculated value of the volumetric wear rate has the same variation pattern as the experimental value, and the numerical difference is small, which indicates that the wear model can better predict the wear situation of the friction pair.

Key words: CrMo cast iron; ANSYS; transient simulation; Archard; frictional wear

航空发动机是一种高度复杂和精密的热力器械[1-2],作为飞机的核心部件[3],对飞机的性能有着重要的影响,然而航空发动机内部工况苛刻,多种摩擦副伴随着发动机主轴高速运转并产生大量摩擦热[4-5],摩擦副遭受不同程度的磨损会直接影响发动机的性能及寿命[6]。特别是在发动机运转初期,摩擦副的磨合阶段若出现异常磨损,会造成零部件的倾斜错位等风险[7-9],同时温度过高也会损害和烧坏零部件。对于发动机复杂的内部结构,摩擦副的检修难度极大,会耗费大量的人力、物力及财力,而摩擦副

收稿日期:2024-01-24

基金项目:凝固技术国家重点实验室(西北工业大学)自主研究课题(2022-QZ-03);国家科技重大专项(2019-IV-0020-0088)

作者简介:魏建林,1998 年生,硕士生.研究方向为航空发动机流体密封及结构减磨设计.Email: weijianlin@mail.nwpu.edu.cn

通讯作者:杨 勇,1987 年生,博士,教授.研究方向为功能密封材料.Email: yongyangfj@nwpu.edu.cn

李永健,1980 年生,博士,副教授.研究方向为密封技术.Email: liyongjian@tsinghua.edu.cn

引用格式:魏建林,田鑫,杨勇,李永健.航空发动机用摩擦副 CrMo 铸铁/38CrMoAlA 瞬态磨损–摩擦热耦合仿真分析[J].铸造技术,2024,45(6): 523-531.

WEI J L, TIAN X, YANG Y, LI Y J. Transient wear-friction-thermal coupling simulation analysis of CrMo cast iron/38CrMoAlA friction pair for aircraft engines[J]. Foundry Technology, 2024, 45(6): 523-531.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一旦发生失效，会对发动机造成不可逆转的破坏及严重的经济损失[10-12]。中国民航总局提到，由于机械磨损导致航空发动机发生机械故障的占比极高[13]，因此，预测和评估航空发动机内部摩擦副的磨损与发热情况，具有较高的研究价值[14-16]。针对航空发动机金属涨圈密封典型摩擦副 CrMo 铸铁/38CrMoAlA 开展相关的磨损预测研究。该摩擦副为金属材质且具有优良的耐高温、耐磨及耐蚀性能，并长时间工作在高速、高压及高温的恶劣工况中[17-19]，故无法直接观测其磨损、发热及变形情况，给航空发动机的维修和检测带来困难。掌握发动机内部关键摩擦副的摩擦磨损特性和规律能为航空发动机的结构设计和性能分析提供重要的理论指导。

目前，有关摩擦磨损类的研究报道多数是依靠实验的方法进行探究，对于航空发动机这类精密器械而言，需要花费更加高昂的成本以及大量的时间，随着仿真技术的迅速崛起，越来越多的工程磨损问题均优先采纳了模拟计算方法。贵永亮等[20]在高速高温摩擦磨损实验机上开展了铸铁的干摩擦实验，发现其摩擦系数随着转速的增大而减小；邱红[21]在 ANSYS 的瞬态热模块中利用有限元分析法对压铸模具的温度场进行了模拟分析；王阳阳等[22]利用 ANSYS 对超低温球阀进行了热力耦合分析，得到了温度分布和变形情况；张永辉[23]利用 Python 语言对 ABAQUS 软件进行二次开发，计算了 CrMo 铸铁覆盖件模具的磨损深度；卢黎明等[24]利用ABAQUS 软件对滚滑轴承进行了摩擦热仿真分析；张岫等[25]运用 ABAQUS 对橡胶密封件进行磨损模拟，计算了橡胶的磨损深度及接触压力。

本文在实验的基础上，利用 ANSYS 有限元仿真平台对摩擦副的摩擦磨损行为进行多物理场耦合分析[26-28]，并通过编辑 APDL 特定语言调用 ANSYS Mechanical 子程序中的 Archard 磨损模型[29]，实现了摩擦副的磨损发热行为，从而得出该摩擦副在环境温度 22 ℃下随接触压力、摩擦线速度的磨损性能演化规律，最后与实验数据进行对比，验证了该仿真模型的有效性。

1 实验材料与方法

基于清华大学机械系设计工程研究所自主搭建的高参数摩擦磨损性能立式实验系统，该实验台采用动–静环摩擦副，摩擦形式为面–面接触，润滑条件可采用干摩擦、油润滑或油气润滑。根据材料特性，设计静环材料为 CrMo 铸铁，摩擦面外径D_1=136 mm、内径 D_2=130 mm，动环材料为 38CrMoAlA，摩擦面外径 D_3=138 mm、内径 D_4=118 mm，实验系统及实验件的实物如图 1 所示，所用实验件原材料的主要化学成分(质量分数，%)如表 1 所示。该摩擦副在航空发动机实际应用时，38CrMoAlA 表面通常会进行渗氮处理，提高表面硬度[30]，渗氮层深度为 0.30~0.55 mm。经过 HR-150A 型洛氏硬度计测试，静环 -CrMo 铸铁表面硬度为 HRC 26，动环 -38CrMoAlA 表面硬度为

表1 CrMo铸铁/38CrMoAlA摩擦副材料主要化学成分
Tab.1 Main chemical composition of the CrMo cast iron/38CrMoAlA friction pair materials

(mass fraction/%)

Materials	C	Si	Mn	Cr	P	Mo	Fe
CrMo cast iron	3.128	1.681	0.911	0.521	0.033	0.467	92.861
38CrMoAlA	0.379	0.265	0.447	1.494	0.016	0.222	95.880

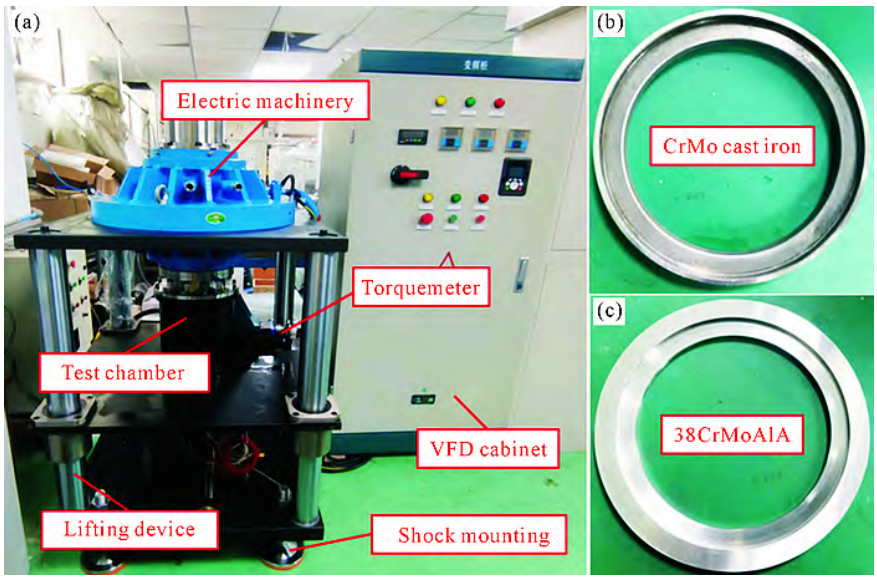


图 1 实验系统及实验件：(a) 实验系统；(b) 静环 -CrMo 铸铁；(c) 动环 -38CrMoAlA

Fig.1 Experimental system and physical diagram of the experimental samples: (a) experimental system; (b) static ring CrMo cast iron; (c) dynamic ring 38CrMoAlA

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

HRC 56。

实验在室温(20±5) ℃下进行,使用长城牌 4109 号合成航空润滑油作为润滑介质,实验前后利用三量数显外径千分尺采用多点测量计算平均值的方法记录 CrMo 铸铁实验件的磨损深度值,并根据下式计算体积磨损率。

$$\delta=\frac{\bar{h}S}{FL} \tag{1}$$

式中,δ 为体积磨损率,mm³/(N·m);h 为平均磨损深度,mm;S 为摩擦面接触面积,m²;F 为摩擦面接触力,N;L 为相对摩擦面相对滑动距离,m。其中 $S=\pi(D_1^2-D_2^2)/4$,为静环 -CrMo 铸铁的摩擦面面积。

根据航空发动机中的环境条件,选取的摩擦线速度为 10、15、20、25、30 m/s,接触压力 0.1 MPa,磨损时长 10 min,实验结果如表 2 所示。摩擦系数变化幅度不大,数值范围在 0.08~0.11 之间,说明该材料配副具有优良的摩擦稳定性,体积磨损率随着线速度的增大而减小。当线速度从 10 m/s 变化到 30 m/s 时,体积磨损率从 2.78 mm³/(N·m) 降低到 0.56 mm³/(N·m),说明摩擦副在较高线速度时具有更好的抗磨损性能,这是因为高速条件下摩擦面更容易形成一层连续稳定的润滑膜,阻止固体颗粒之间直接接触,从而降低磨损。当线速度为 10~30 m/s 时,虽然 CrMo 铸铁仅发生了微米级的高度磨损,但金属涨圈通常为轴向厚度较小的航空密封件,长时间磨损导致减薄,易造成安全隐患。

表 2 静环–CrMo 铸铁实验结果

Tab.2 Experimental results of the static ring CrMo cast iron

Friction and wear properties	Friction line velocity/(m·s⁻¹)				
	10	15	20	25	30
Frictional coefficient	0.08	0.11	0.10	0.10	0.09
Average wear depth/×10⁻³ mm	1.67	1.00	1.18	1.34	1.01
Volume wear rate/×10⁻⁶ mm³	2.78	1.11	0.98	0.89	0.56

2　仿真计算

2.1　Archard 磨损模型

采用广泛使用的 Archard 磨损模型计算摩擦副表面损伤,该模型阐述了体积损耗与压力、速度及材料表面硬度之间的关系,在 ANSYS Mechanical 中,Archard 模型基本计算原理如下:

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}=K\frac{P^m v^n}{H} \tag{2}$$

式中,K 为磨损系数;P 为接触压力,MPa;v 为摩擦线速度,m/s;H 为摩擦副中较软材料的表面硬度,HRC;m 和 n 分别为压力指数和速度指数,可用于Archard 计算模型的修正。通常金属与金属之间在无润滑的条件下[31],K=1.5×10⁻⁵~1.5×10⁻³;有润滑的条件下,K=3.0×10⁻⁸~3.0×10⁻⁴,考虑到 CrMo 铸铁/38CrMoAlA 摩擦副处于通有润滑油的腔体环境中,结合磨损系数的取值范围并参考 Lee 等[32]的研究,K 的取值为 2×10⁻⁵。在一定条件下,材料磨损往往会经历 3 个阶段,分别是跑和(磨合)、稳定磨损和剧烈磨损阶段[33],文中仿真计算中接触压力及磨擦速度均为定值,因此仅考虑稳定磨损阶段,即磨损率为常数。当 m,n=1 时,磨损率与接触压力及摩擦线速度均成线性相关,对 m 和 n 进行修正后可实现更贴合实际的非线性磨损规律,磨损率与接触压力及摩擦线速度成非线性曲线关系。

2.2　摩擦热计算

ANSYS 通过有限元法计算各节点的温度,对摩擦副进行瞬态热分析,摩擦副接触面的热流密度 q 可表示为[34]:

$$q=\mathrm{FHTG}\times\mathrm{FWGT}\times\tau\times\nu \tag{3}$$

式中,FHTG 为摩擦生热的能力转化因子;FWGT 为接触面与目标面的热量分配权因子;τ 为摩擦应力,MPa。在有限元计算中,假设接触面任意接触节点为 i,则任意接触节点的热流密度 q_i 可表示为:

$$q_i=\mathrm{FHTG}\times\mathrm{FWGT}\times\tau_i\times\nu_i \tag{4}$$

式中,τ_i 为任意节点的摩擦应力;ν_i 为任意节点相对目标面的滑移速率。

2.3　有限元模型的建立

根据实验用到的动静环结构参数,做适当的简化后,动静环均取环形摩擦面进行建模,得到图 2所示的摩擦副模型。其中静环材料为 CrMo 铸铁,动环材料为 38CrMoAlA,动静环的轴向厚度均为 3 mm。为降低计算机资源的消耗,静环 -CrMo 铸铁取 1/24作为计算单元的最小周期,并利用 Mechanical 对模型进行网格划分,用于模拟摩擦副的摩擦磨损行为。

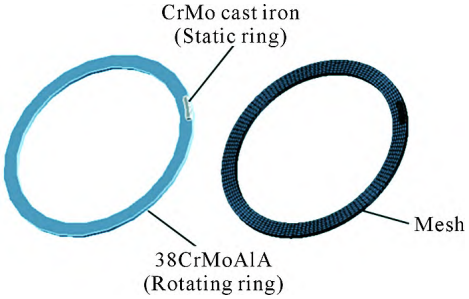


图 2 摩擦副模型及网格划分

Fig.2 Friction pair model and mesh division

2.4　磨损–摩擦热耦合模型

ANSYS Mechanical 不能直接使用 Archard 理论模型,需要通过编辑 APDL 特定语言调用,同时定义模型连接处的接触方式,给定合理的摩擦系数,从

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

而实现摩擦副的摩擦磨损行为。通常结构钢与普通铸铁的滑动摩擦系数在无润滑时 μ=0.16~0.18，而有润滑时 μ=0.05~0.15[35]，根据摩擦系数的取值范围以及实验对摩擦系数的测量结果，保守计算 μ 取 0.1。图 3 为磨损–摩擦热耦合仿真的简化流程。

考虑计算机资源限制的同时，也要保证耦合求解器能够正常收敛计算，需要对其进行相关的设置。表 3 为耦合求解器的部分相关设置，其余选项设置保持默认。增广拉格朗日方法是求解约束优化问题的一类算法，有利于提升瞬态计算的收敛性，文中应用不对称模型，仅对接触单元的磨损情况进行分析，即只考虑 CrMo 铸铁的磨损，采用自动时间步，并开启时间积分，计算瞬态磨损–摩擦生热时间为 0.001 s。图 4 为摩擦副模型约束示意图，动环 -38CrMoAlA 模型以圆心处 z 轴作为旋转轴，旋转方向为顺时针，并将摩擦线速度换算为对应的转速大小。静环 -CrMo 铸铁模型的上表面被施加与法线方向相同的均匀载荷，并利用远程位移约束使其只发生 z 方向上的移动。对模型未施加任何温度约束条件，初始环境温度为 T=22 ℃(默认值)。

表3 耦合求解器设置
Tab.3 Coupling solver settings

Formulation	Settings
Formulation	Augmented lagrange
Behavior	Asymmetric
Detection method	Nodal-normal from contact
Auto time stepping	On
Time integration	On
Step end time	0.001 s

2.5 计算模型假设

对摩擦副的瞬态磨损–摩擦热耦合仿真分析进行如下假设：

(1)摩擦副的材质均匀，不考虑特殊结构或缺陷对计算结果的影响。

(2)摩擦副具有各向同性弹塑性，瞬态模型计算时间内热膨胀系数、热导率及比热值为常数。

(3)摩擦过程符合库伦定律，瞬态磨损条件下摩擦系数为定值。

(4)摩擦副做功全部转化为摩擦热，瞬态模型计算时间内与外界不发生能量交换，边界为绝热条件。

(5)摩擦副约束条件不发生改变，即摩擦线速度以及载荷值不随磨损过程发生改变，动环与静环接触面不发生分离。

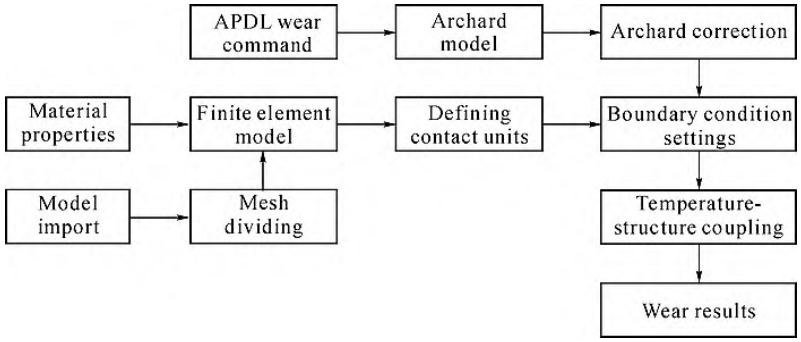


图 3 磨损–摩擦热耦合仿真流程
Fig.3 Wear-friction thermal coupling simulation process

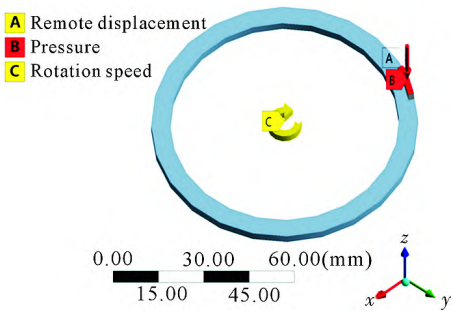


图 4 摩擦副约束示意图
Fig.4 Schematic of friction pair constraints

2.6 计算参数与网格检验

本模型重点探究接触压力、摩擦线速度对摩擦磨损及摩擦热的影响规律，模拟 CrMo 铸铁/38CrMoAlA 摩擦副在航空发动机中的服役行为，仿真模型计算参数如表 4 所示。

表4 摩擦副计算参数
Tab.4 Friction pair calculation parameters

Physical properties	Numerical values
FHTG	1
FWGT	0.5
m	0.83
n	-0.52
Average friction radius/mm	65.5
Frictional coefficient	0.1
Wear coefficient	2×10^{-5}
Ambient temperature/℃	22
Contact pressure/MPa	0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1
Friction line velocity/(m·s^{-1})	10, 15, 20, 25, 30

网格的数量和质量会对计算结果有直接影响，

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

通常网格达到一定的数量或密度后，计算结果不会出现较为明显的变化[36-38]。网格数量太多或过于密集时，会大量占用计算机资源，若网格质量太差，计算会难以收敛并存在较大误差。该模型利用扫掠及面网格剖分方法，动静环结构均以六面体结构网格划分，生成网格单元类型为 SOLID 226，接触单元类型为 CONTA 174，单元数量 2565，节点数 14526，平均单元质量 0.6。

模型计算前，对模型进行网格无关性检验边界条件接触压力 0.1 MPa、摩擦线速度 10 m/s，以摩擦能耗和 CrMo 铸铁最大变形量的计算值为评估标准。图 5 为网格无关性检验计算结果，当网格数量大于 2000 时，摩擦能耗和最大变形量的计算值波动不超过 5%，本模型中网格数量为 2565，此时认为完成了网格无关性检验。

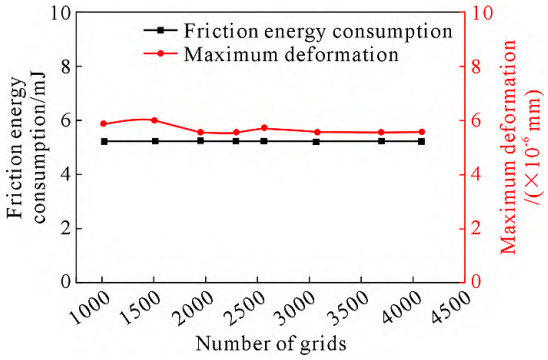


图 5　摩擦副网格无关性检验

Fig.5　Grid independence test for friction pairs

3　仿真结果与分析

图 6 为静环 -CrMo 铸铁在接触压力 0.1 MPa、摩擦线速度 30 m/s 工况下的温度变化云图。显而易见，由于摩擦而产生的摩擦热使接触面温度随计算时间增加逐渐升高。任意时刻静环 -CrMo 铸铁摩擦面外径侧温度较高，这是因为在旋转摩擦过程中，转速一定的条件下，外径侧的线速度高于内径侧，有更大的磨损行程。而在实际的工程应用中，大量的摩擦热导致温度过高会引发零部件的加剧磨损，因此，材料具备优良的耐高温性能是航空发动机选取摩擦副的关键。

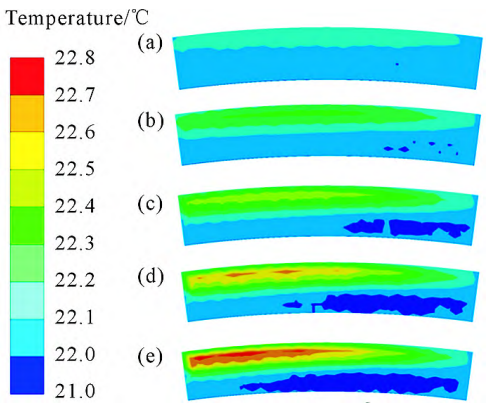


图 6　静环 -CrMo 铸铁温度随时间变化：(a) 0.000 2 s; (b) 0.000 4 s; (c) 0.000 6 s; (d) 0.000 8 s; (e) 0.001 s

Fig.6　Temperature variation of static ring-CrMo cast iron with time: (a) 0.000 2 s; (b) 0.000 4 s; (c) 0.000 6 s; (d) 0.000 8 s; (e) 0.001 s

通过设定求解结果 User Defined Result，并添加 contnmisc 189 表达式，便可生成对应的磨损结果云图。静环 -CrMo 铸铁在工况 0.1 MPa、摩擦线速度 30 m/s 时的体积磨损量随时间的变化如图 7 所示。由图可知，任意时刻的体积磨损总量应为该时刻各个单元的体积磨损量之和，体积磨损总量随时间不断增加。通过对瞬态磨损结果云图分析发现，静环摩擦面发生的磨损并不均匀，在静环 -CrMo 铸铁外径侧有较大的磨损量。

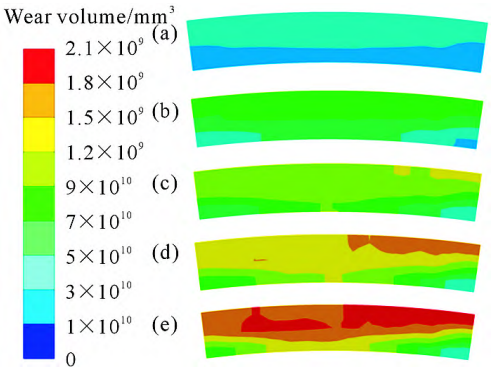


图 7　静环 -CrMo 体积磨损量随时间变化：(a) 0.000 2 s; (b) 0.000 4 s; (c) 0.000 6 s; (d) 0.000 8 s; (e) 0.001 s

Fig.7　Variation in the volume of the static ring-CrMo alloy with time: (a) 0.000 2 s; (b) 0.000 4 s; (c) 0.000 6 s; (d) 0.000 8 s; (e) 0.001 s

在磨损时长一定的条件下，探究了不同接触压力及不同摩擦线速度对摩擦发热和摩擦能耗的影响。图 8a 为摩擦线速度 10 m/s 时，不同接触压力对摩擦副发热的影响，CrMo 铸铁的最大温升与摩擦能耗随接触压力的增大而增大，当接触压力从 0.02 MPa 变化到 0.1 MPa 时，最大温升由 0.046 ℃增加到 0.218 ℃，摩擦能耗由 1.048 mJ 增加到 5.233 mJ；图 8b 为接触压力 0.1 MPa 时不同摩擦线速度对摩擦副发热的影响，最大温升与摩擦能耗随摩擦线速度的增大而增大，当摩擦线速度从 10 m/s 变化到 30 m/s 时，最大温升由 0.218 ℃增加到 0.758 ℃，摩擦能耗由 5.233 mJ 增加到 15.760 mJ。可以看出，接触压力和摩擦线速度均在不同程度上影响摩擦副的发热能力，且最大温升、摩擦能耗与接触压力及摩擦线速度均成线性相关。该摩擦副通常在航空发动机中的高压、高温环境内长时间运转，由于摩擦引起的发热严重，因此发动机摩擦副部位必须具备良好的

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

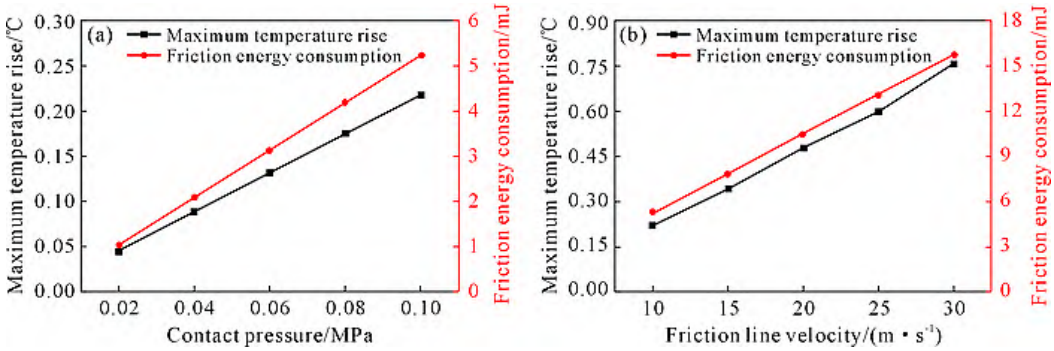


图 8 接触压力、摩擦线速度对摩擦热的影响:(a) 接触压力;(b) 摩擦线速度

Fig.8 Influence of contact pressure and friction line velocity on frictional heat: (a) contact pressure; (b) friction line velocity

散热条件或冷却条件,从而避免温度过高造成的零件损伤。

由式(2)可知,摩擦应力能够直接影响摩擦副接触面的热流密度值,掌握不同时刻或不同工况下摩擦应力的变化规律也是评估摩擦副磨损性能的重要手段之一。此外,该摩擦副在航空发动机中作为密封结构的重要部件,在服役过程中的变形情况也是航空密封重点关注的方面。摩擦应力值及变形量在磨损过程中会随接触状态发生改变,仿真计算的结果中能同时得到摩擦副在不同时刻的摩擦应力及变形量,为评估磨损性能提供重要的参考依据。本文对不同工况下摩擦副的平均摩擦应力以及最后时刻的 CrMo 铸铁最大变形量进行探究。图 9a 展示了不同接触压力下平均摩擦应力以及 CrMo 铸铁最大变形量的变化规律,当摩擦线速度为 10 m/s 时,接触压力从 0.02 MPa 变化到 0.1 MPa 时,平均摩擦应力由 0.005 3 MPa 增加至 0.0254 MPa,随着接触压力的增大,平均摩擦应力与接触压力成正相关,CrMo 铸铁最大变形量随接触压力的增大而增大。图 9b 展示了不同摩擦线速度下平均摩擦应力以及 CrMo 铸铁最大变形量的变化规律,当接触压力为 0.1 MPa 时,摩擦线速度从从 10 m/s 变化到 30 m/s 时,平均摩擦应力值略微增大,说明摩擦线速度的变化对摩擦应力影响较小,CrMo 铸铁最大变形量随着摩擦线速度的增加而逐渐增大。若摩擦副在航空发动机主轴旋转密封服役过程中发生的变形过大,往往会造成动密封结构的严重磨损,接触压力对摩擦应力的影响更为显著。

图 10a 和 b 分别展示了不同接触压力及摩擦线速度时体积磨损量变化规律。在相同磨损时间下,当

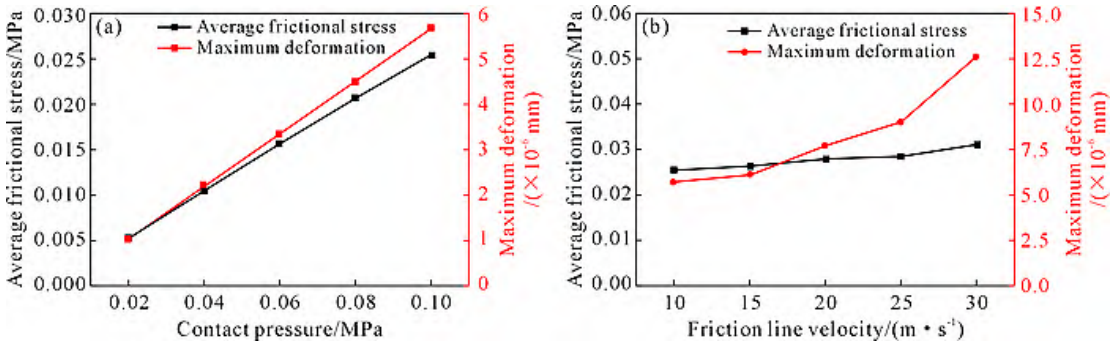


图 9 接触压力、摩擦线速度对摩擦应力及变形的影响:(a) 接触压力;(b) 摩擦线速度

Fig.9 Impact of contact pressure and friction line velocity on frictional stress and deformation: (a) contact pressure; (b) friction line velocity

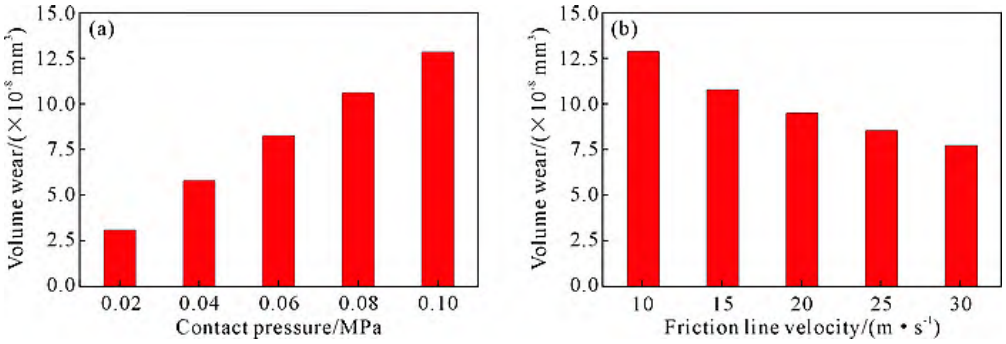


图 10 不同接触压力、摩擦线速度的体积磨损量:(a) 接触压力;(b) 摩擦线速度

Fig.10 Volume wear under different contact pressures and friction line velocities: (a) contact pressure; (b) friction line velocity

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

摩擦线速度为 10 m/s 时，接触压力从 0.02 MPa 变化到 0.1 MPa，CrMo 铸铁的体积磨损量随接触压力的增大而增大，从 3.13×10^{-8} mm³ 增至 1.29×10^{-7} mm³；当接触压力为 0.1 MPa 时，摩擦线速度从 10 m/s 变化到 30 m/s，CrMo 铸铁的体积磨损量随摩擦速度的增大而减小，从 1.29×10^{-7} mm³ 降至 7.73×10^{-8} mm³。

磨损率对于评估摩擦副的寿命极为重要，特别是对航空发动机内部的复杂结构而言，通过计算磨损率来预测摩擦副的使用寿命，能够大量降低人力、物力及财力的消耗。ANSYS 有限元仿真能记录摩擦副模型体积磨损量随时间的变化趋势，对于具有 n 个单元的有限元模型，体积磨损率可以表示为：

$$\delta=\frac{\lambda\Sigma_{i=1}^{n}\Delta V_i}{PSvt} \tag{5}$$

式中，λ 为计算模型的周期数量；$\Sigma_{i=1}^{n}\Delta V_i$ 为任意时刻体积磨损总量，mm³；t 为摩擦副磨损时长，s。通过计算体积磨损率，并将仿真所得到的数值与实验值进行对比，结果如图 11 所示。观察发现，体积磨损率计算值与实验值有相同的变化趋势，且数值差异较小，说明在给定的工况范围内，磨损模型能够较好的预测摩擦副的磨损情况，并为摩擦副或航空发动机的寿命预测提供理论参考。

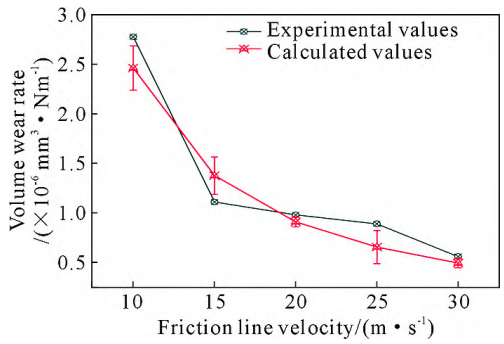


图 11 计算值与实验值对比

Fig.11 Comparison of the calculated and experimental values

4 结论

(1)瞬态磨损过程中，静环 -CrMo 铸铁摩擦面外径侧温度较高，且随时间变化温度逐渐升高，仿真得到的体积磨损分布云图并不均匀，静环 -CrMo 铸铁外径侧有较大的磨损量，这与实验现象相符合。

(2)接触应力对摩擦应力的影响更为显著，摩擦线速度对摩擦应力的影响较小，摩擦应力及 CrMo 铸铁的最大变形量均随接触应力和摩擦线速度的增大而增大。

(3)在接触压力为 0.02~0.10 MPa，摩擦线速度 10~30 m/s 时，体积磨损量随接触压力的增大而增大，随摩擦线速度的增大而降低；通过计算体积磨损率并将计算值与实验值进行对比，验证了仿真模型的有效性。

参考文献：

[1] 彭友梅. 苏联/俄罗斯/乌克兰航空发动机的发展[M]. 北京：航空工业出版社，2015.
PENG Y M. A history of Soviet Union/Russian/Ukrainian aero engine[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2015.

[2] 陈欢，归文强，孙浩尧，张一西. 航空发动机核心部件技术研究概况与展望[J]. 中国设备工程，2023(17): 236-238.
CHEN H, GUI W Q, SUN H Y, ZHANG Y X. Overview and prospects of research on core component technology of aircraft engines[J]. China Plant Engineering, 2023(17): 236-238.

[3] 侯廷红，周平，何黎明，韩昌富. 航空发动机维修技术进展与展望[J]. 航空工程进展，2023, 14(5): 29-34, 60.
HOU T H, ZHOU P, HE L M, HAN C F. Research progress and prospect of aero-engine maintenance technology[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(5): 29-34, 60.

[4] 崔成根，田朋溢，田煜. 滑动摩擦过程中摩擦热分配的实验及有限元仿真研究[J]. 润滑与密封，2017, 42(3): 23-27, 101.
CUI C G, TIAN P Y, TIAN Y. Experimental and finite element aralysis of frictional heat distribution during sliding friction[J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(3): 23-27, 101.

[5] 吴彼，张振波，李曙. 航空发动机材料摩擦学研究进展[J]. 摩擦学学报，2023, 43(10): 1099-1117.
WU B, ZHANG Z B, LI S. Advances in tribology of aero-engine materials[J]. Tribology, 2023, 43(10): 1099-1117.

[6] ZHENG B, GAO F, MA X, ZHANG X Q. Intelligent prediction of aeroengine wear based on the SVR optimized by GMPSO[J]. Applied Sciences, 2021, 11(22): 10592.

[7] 麦海波. 航空活塞发动机胀圈异常磨损原因分析[J]. 机械工程师，2013(7): 247-248.
MAI H B. Analysis of abnormal wear causes of expansion rings in aviation piston engines[J]. Mechanical Engineer, 2013(7): 247-248.

[8] ZHANG H B, HU D Y, YE X B, CHEN X, HE Y H. Experimental and analytical modelling on aeroengine blade foreign object damage[J]. International Journal of Impact Engineering, 2024, 183: 104813.

[9] QIAN S L, GUO W, CHEN M, LU K L, ZHANG L, WU Y X, WANG F. Analysis of fatigue fracture incident of centrifugal compressor blades in a small turbojet engine[J]. Vibroengineering Procedia, 2023, 51: 147-152.

[10] MALOZEMOV A A, KOZMINYKH D V, MALOZEMOV G A, Shavlov A V. Simulation model for predicting reciprocating internal combustion engine wear[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1047: 012010.

[11] 蔡旭，刘武，张祥. 航空发动机直接维修成本预计研究[J]. 航空动力，2023(4): 69-72.
CAI X, LIU W, ZHANG X. Direct maintenance cost prediting for aero engine[J]. Aerospace Power, 2023(4): 69-72.

[12] 赵庆伟. 航空发动机小时包修费率研究[D]. 广汉：中国民用航空飞行学院，2021.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

ZHAO Q W. Research of the aeroengine power-by-the-hour rate [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2021.

[13] 徐幸超. 航空发动机机械磨损故障的评估诊断 [J]. 河南科技, 2019(31): 116-118.
XU X C. Causes and preventive measures of aviation equipment mechanical accidents[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2019(31): 116-118.

[14] WANG M M, GE Q B, JIANG H Y, YAO G. Wear fault diagnosis of aeroengines based on broad learning aystem and ensemble learning[J]. Energies, 2019, 12(24): 4750.

[15] QU C Q, PENG H B. Study on the life estimation of civil aviation engine[J]. Chemical Engineering Transactions, 2015, 46: 1087-1092.

[16] PENG H B, DAN M, QU H C. Research of aero-engine life prediction based on take-off EGTM[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 99-100: 286-292.

[17] 林基恕. 航空发动机设计手册. 第 12 册; 传动及润滑系统[M]. 北京:航空工业出版社, 2002.
LIN J S. Aeroengine design manual(volume 12): Transmission and lubrication systems[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002.

[18] 张云凤, 闫玉涛, 孙志礼. 铸铁 CrMo 表面激光熔覆 Ni 基高温合金粉末的磨损特性[J]. 润滑与密封, 2007, 32(7): 108-110, 117.
ZHANG Y F, YAN Y T, SUN Z L. Wear characteristics of Ni-base super-alloy onto CrMo cast iron by laser cladding [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(7): 108-110, 117.

[19] 周秀岭. CrMo 铸铁表面激光熔覆 Ni 基合金摩擦磨损特性研究[D]. 沈阳:东北大学, 2007.
ZHOU X L. The study of wear resistance of laser nickel-based alloy cladding on CrMo cast iron surface[D]. Shenyang: Northeast University, 2007.

[20] 贵永亮, 宋春燕, 杨丽, 张伟. 烧结机台车用铸铁材料摩擦磨损性能的研究[J]. 铸造技术, 2013, 34(7): 793-796.
GUI Y L, SONG C Y, YANG L, ZHANG W. Study on friction and wear properties of cast iron materials for sintering machine trolley [J]. Foundry Technology, 2013, 34(7): 793-796.

[21] 邱红. 基于 Ansys 的压铸模具温度场数值模拟研究[J]. 铸造技术, 2014, 35(7): 1575-1577.
QIU H, Simulation study of temperature field in die-casting mould based on ANSYS[J]. Foundry Technology, 2014, 35(7): 1575-1577.

[22] 王阳阳, 贾晨, 贾磊. 基于 ANSYS Workbench 超低温球阀热力耦合分析 [J]. 铸造技术, 2018, 39(7): 1603-1606.
WANG Y Y, JIA C, JIA L. Thermal-mechanical coupled analysis of cryogenic ball valve by ANSYS Workbench[J]. Foundry Technology, 2018, 39(7): 1603-1606.

[23] 张永辉. CrMo 铸铁覆盖件模具激光淬火工艺参数优化及模具寿命预测[D]. 石家庄:河北科技大学, 2023.
ZHANG Y H. Parameter optimization of laser quenching and die life prediction for CrMo cast iron covering part die[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2023.

[24] 卢黎明, 卢晋夫, 李夫. 滚滑轴承的摩擦热仿真分析[J]. 机床与液压, 2022, 50(5): 143-148.
LU L M, LU J F, LI F. Friction thermal simulation analysis of rolling-sliding bearing[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50 (5): 143-148.

[25] 张岫, 吴振, 尚闫, 钱征华, 柯玉超, 夏迎松. 旋转轴唇形密封件磨损仿真分析[J]. 润滑与密封, 2021, 46(3): 119-123.
ZHANG S, WU Z, SHANG Y, QIAN Z H, KE Y C, XIA Y S. Wear simulation of rotary shaft lip seal[J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(3): 119-123.

[26] SLAVIK D C, MCCLAIN R D, LEWIS K. Stress intensity predictions with ANSYS® for use in aircraft engine component life prediction[M]//HALFORD G R, GALLAGHER J P. Fatigue and fracture mechanics: 31st volume, ASTM STP 1389. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 2000: 371-390.

[27] 吴涛, 唐晓敏, 李林波. 基于 ANSYS 软件的二维地铁轮轨滑移摩擦热分析[J]. 现代城市轨道交通, 2021(1): 59-64.
WU T, TANG X M, LI L B. Thermal analysis of two-dimensional wheel-rail sliding friction based on ANSYS software[J]. Modern Urban Transit, 2021(1): 59-64.

[28] 安先龙, 王佳, 赵诚, 高超. 粗糙面滑动摩擦热–应力–磨损耦合仿真分析[J]. 装备制造技术, 2022(7): 38-42.
AN X L, WANG J, ZHAO C, GAO C. Simulation analysis of thermal stress wear coupling in sliding friction of rough surfaces[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2022(7): 38-42.

[29] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8): 981-988.

[30] WIDOMSKI P, KASZUBA M, SOKOŁOWSKI P, LANGE A, WALCZAK M, DŁUGOZIMA M, GIEREK M, CHOCYK D, GŁADYSZEWSKI G, BORYCZKO B. Nitriding of hardfaced layers as a method of improving wear resistance of hot forging tools [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2023, 23: 241.

[31] 桂长林. Archard 的磨损设计计算模型及其应用方法[J]. 润滑与密封, 1990(1): 12-21.
GUI C L. The Archard design calculation model and its application methods[J]. Lubrication Engineering, 1990(1): 12-21.

[32] LEE G A, IM Y T. Finite-element investigation of the wear and elastic deformation of dies in metal forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 89-90: 123-127.

[33] 何奖爱, 王玉玮. 材料磨损与耐磨材料[M]. 沈阳:东北大学出版社, 2001.
HE J A, WANG Y W. Material wear and wear-resistant materials [M]. Shenyang: Northeast University Press, 2001.

[34] 徐建生, 王仕仙, 卢霞, 王馨. 滑动摩擦热 - 结构耦合的有限元分析[J]. 润滑与密封, 2009, 34(3): 24-27, 31.
XU J S, WANG S X, LU X, WNAG X. Finite element analysis of thermal-structural couple field of sliding friction [J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(3): 24-27, 31.

[35] 林纯景. 基于 HyperMesh 的有限元网格划分技术[A]. 2021Altair 技术大会论文集[C]. 上海:澳汰尔工程软件(上海)有限公司, 2021. 42-50.
LIN C J. Finite element mesh dividing technology based on hypermesh[A]. Proceedings of the 2021 altair technology conference[C]. Shanghai: Aotide Engineering and Software(Shanghai) Co., Ltd., 2021. 42-50.

[36] 王瑞, 陈海霞, 王广峰. ANSYS 有限元网格划分浅析[J]. 天津工业大学学报, 2002, 21(4): 8-11.
WANG R, CHEN H X, WANG G F. Analysis of ANSYS finite element mesh dividing[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2002, 21(4): 8-11.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[37] 机械工程手册、电机工程手册编辑委员会. 机械工程手册 第 22 篇:摩擦、磨损与润滑[M]. 北京:机械工业出版社,1978.
Mechanical Engineering Handbook and the Electrical Engineering Handbook editorial board. Mechanical Engineering manual, chapter 22: Friction, wear, and lubrication[J]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1978.

[38] 杜宸宇,孙丹,刘永泉,战鹏,信琦. 刷式密封吹下效应诱发机理流固耦合数值研究[J]. 航空动力学报,2021, 36(2): 310-319.
DU C Y, SUN D, LIU Y Q, ZHAN P, XIN Q. Numerical investigation on induced mechanism of blow-down effect of brush seals with fluid-structure interaction [J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(2): 310-319.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net