

接触式石墨端面密封材料磨损行为预测*

胡文颖, 张生光, 李雯

(中国航空发动机研究院, 北京 101304)

摘要: 以航空发动机两种典型石墨端面密封材料配副 M234-9Cr18Mo 和 M234AO-9Cr18Mo 为研究对象, 开展干摩擦和油润滑条件下石墨端面密封材料磨损行为预测方法研究。采用 Archard 磨损模型并考虑材料磨损对润滑接触行为的影响, 建立干摩擦、油润滑状态下石墨密封材料磨损量化模型, 提出一种基于半解析的数值仿真方法, 针对不同材料及工况条件下磨损行为开展数值仿真分析。结果表明: 所发展的磨损模型及仿真方法具有较好计算精度, 试验与仿真结果对比显示, 最大磨损深度误差小于 10%; 材料、 pv 值、润滑条件对石墨端面密封材料磨损行为具有显著影响, M234 比 M234AO 具有更好的耐磨性能, 增加 pv 值会导致石墨密封材料的磨损更严重, 油润滑比干摩擦更有利于降低石墨材料磨损深度, 最大磨损深度降低约 28.5%。

关键词: 航空发动机; 端面密封; 石墨; 磨损; 数值仿真

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2022) 11-210597-10

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.210597

Prediction for Wear Behavior of Graphite Material in End Face Seal

HU Wen-ying, ZHANG Sheng-guang, LI Wen

(Aero Engine Academy of China, Beijing 101304, China)

Abstract: A numerical simulation method was proposed to predict the wear behavior of graphite end face seal materials in aero-engine under both dry-sliding condition and oil lubrication condition. M234-9Cr18Mo and M234AO-9Cr18Mo were selected as the typical experimental materials. The wear model was built based on the Archard model and the influence of material wear on lubrication behavior contact was considered, which was able to quantitatively predict the graphite's wear behavior under dry and oil lubrication. A semi-analytical numerical simulation method was developed. A series of numerical simulations of wear predictions for different graphite materials were conducted under various working conditions by using the proposed method. The accuracy of wear prediction method was evaluated by the comparison of experimental data and simulation results. The results show that the values of simulated maximal wear depth agree well with the experimental data and the error is less than 10%. The wear behavior of graphite end face seal is influenced by such factors significantly, including material, pv value and lubrication condition. Compared with M234AO-9Cr18Mo, M234-9Cr18Mo has a better anti-wear performance. The sever wear of graphite is observed under high pv value. The oil lubrication is more conducive to lower wear depth of graphite end face seal than the dry-sliding, and the maximal wear depth for oil lubrication re-

* 收稿日期: 2021-08-31; 修订日期: 2021-12-23。

基金项目: 国家科技重大专项 (J2019-IV-0020-0088); 国家自然科学基金 (51705490)。

作者简介: 胡文颖, 硕士, 工程师, 研究领域为机械传动与摩擦学。

通讯作者: 李雯, 博士, 研究员, 研究领域为机械传动与摩擦学。

引用格式: 胡文颖, 张生光, 李雯. 接触式石墨端面密封材料磨损行为预测[J]. 推进技术, 2022, 43(11):210597. (HU Wen-ying, ZHANG Sheng-guang, LI Wen. Prediction for Wear Behavior of Graphite Material in End Face Seal[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(11):210597.)

duces approximately 28.5%.

Key words: Aero-engine; End face seal; Graphite; Wear; Numerical simulation

1 引言

航空发动机传动与润滑系统中的密封装置是影响发动机寿命与性能的重要因素。接触式石墨端面密封装置由于具有结构紧凑、质量轻、易装配、破损安全性高等优点^[1],被广泛应用在航空发动机主轴承腔密封和辅助装置处。接触式石墨端面密封装置中,动环与静环间存在滑动摩擦,摩擦磨损及接触特性是密封装置性能和寿命的关键影响因素。密封端面磨损是导致密封装置泄漏、造成非计划返修的主要原因。先进密封技术的发展方向之一是在保证密封泄漏性能的前提下,有效控制端面磨损,使其处于最佳工作状态。研究和掌握密封端面磨损规律不但能够指导密封材料合理选配及结构优化设计,而且能够促进磨损抑制新技术新材料发展,对改善密封性能和寿命以及满足高推重比、低油耗、高可靠性、长寿命航空发动机技术发展的客观需要,都具有重要的研究意义。

迄今为止,国内外学者针对接触式石墨端面密封摩擦磨损及接触特性开展了大量试验研究和部分理论模型及预测方法研究。目前,密封材料标准摩擦磨损试验和密封台架试验是研究接触式石墨端面密封摩擦磨损及接触特性的主要手段,通过试验观测端面磨损行为,分析磨损机理,并根据经验公式估算磨损率。其中,具有代表性的工作有:闫玉涛等^[2]对石墨 M210 密封材料的高温摩擦磨损性能进行试验研究,分析材料的磨损机理,并通过灰色理论 GM(1,1)建立温度对摩擦因数和磨损率影响的预测模型。朱振国等^[3]在干摩擦条件下对传统炭石墨材料、浸树脂石墨复合材料、浸银石墨复合材料及各向同性热解石墨(IPG)等具有代表性的炭石墨材料的摩擦磨损性能进行试验对比研究,综合分析材料的摩擦磨损机理。倪成良等^[4]针对三种国产浸酚醛树脂石墨与 9Cr18 不锈钢材料配副,进行摩擦磨损正交试验研究。肖云鹏等^[5]进行干摩擦条件下不同石墨机械密封端面材料配对的端面温升、磨损率、摩擦功耗、泄漏率等参数测量。文献[6-7]通过环-盘端面摩擦磨损试验机分析了 IPG 与 GH4169 镍基高温合金、磷酸锌浸渍石墨(ZPIG)与 GH4169 镍基高温合金这两种材料配副在润滑油条件下的摩擦学行为,揭示了磨损机制和润滑机理,为其在航空发动机密封

领域的应用提供和积累了参考依据。谢尚翔等^[8]试验测量了干摩擦和油润滑条件下 SiC/石墨配副的磨损率和温升。彭旭东等^[9]通过标准摩擦磨损试验考察三种国产典型浸酚醛树脂石墨与 SiC 陶瓷配副的摩擦学特性,揭示浸酚醛树脂石墨在干摩擦和油润滑条件下的磨损机理。徐宇轩等^[10]利用高温摩擦磨损试验机对石墨密封材料在不同温度和载荷下的摩擦磨损性能进行评估。最近,国内外学者在石墨材料磨损机理和摩擦学特性试验研究基础上,逐渐深入地开展了理论模型和分析方法研究。具有代表性的工作有:Kim 等^[11]建立了针对石墨密封材料磨损率的数学模型,并进行了相关试验验证。李小彭等^[12]基于分形理论,对机械式密封的磨损率进行计算,并推导出计算模型。惠玉祥等^[13]运用 Archard 定量磨损模型,结合半解析方法得到近似固体接触力、流体承载力及膜厚分布情况,预测密封环磨损及泄漏参数。魏龙等^[14]、房桂芳等^[15]基于 Archard 黏着磨损理论,通过引入分形磨损系数和求解端面弹性和塑性变形微凸体体积,采用具有尺度独立性的分形参数表征磨损表面的形貌及其变化,建立机械密封端面磨损分形模型,用以预测碳石墨密封环端面磨损情况。Leefe^[16]将双高斯分层表面理论应用于机械密封,采用间断分离方法表征磨损表面的二维轮廓。

综上所述,接触式石墨端面密封摩擦磨损及接触特性研究目前仍以试验测量手段为主,国内外学者对不同炭石墨密封材料在干摩擦、乏油润滑、富油润滑、高温、高速等特定工况条件下开展了大量研究。但试验过程中,端面接触性状很难进行准确且实时的记录和监测,磨损行为的时变性以及磨损演化规律难以准确表征。为了解决上述问题,国内外学者开展了磨损理论模型及分析方法研究,旨在通过建立合理的磨损理论模型和发展行之有效的分析方法来定量评估密封材料在不同工况参数下的磨损规律,为密封结构合理设计、工况条件优化、材料评价选择等提供指导。由于接触式石墨端面密封的接触性状较为复杂,目前相关研究报道较少,并且在端面磨损模型研究中较多关注的是磨损前表面重构和磨损后表面表征,对于考虑接触润滑与磨损耦合关系的报道较少。

本文基于 Archard 磨损理论并考虑材料磨损对润滑接触行为的影响,建立针对石墨密封材料对偶件

的磨损预测仿真模型,将接触、润滑模型以及磨损模型有效耦合,基于半解析的数值仿真方法得到表面接触压力、表面磨损形貌及最大磨损深度随时间的变化规律,能够明确计算出任意位置磨损信息及模拟磨损形貌。所建模型及方法的合理性通过标准摩擦磨损试验予以验证。在此基础上,对 M234, M234AO 两种典型石墨材料与 9Cr18Mo 不锈钢配副磨损行为进行预测分析。

2 理论模型及数值算法研究

2.1 干摩擦理论模型

干摩擦模型计算接触压力时不考虑材料的粘连效应。通常弹性接触问题中,接触间隙为

$$g = h_0 - \gamma + \delta + \nu + d \quad (1)$$

式中 h_0 为初始间隙; γ 为刚体法向位移; δ 为表面粗糙度; ν 为弹性变形; d 为磨损深度,表示接触过程中,由于两表面摩擦接触导致的两个表面形貌磨损之和。

对于干摩擦接触,计算时,要将计算域离散成二维网格,在任意网格点处,接触压力(p_{ij}),与接触间隙(g_{ij})互为补余(下标 ij 表示划分网格后第 i 行、第 j 列网格节点位置):在接触区内, $g_{ij}=0, p_{ij} \geq 0$;而在非接触区, $g_{ij} > 0, p_{ij}=0$,并且接触压力与接触间隙不能同时为 0,故

$$p_{ij}g_{ij} = 0 \quad (2)$$

上述接触问题可基于最小余能原理结合共轭梯度法求解接触压力以及接触间隙,通过变分原理将接触模型的补余问题转换为二次函数的条件极值问题^[17],即寻找目标函数

$$f(\mathbf{p}) = \mathbf{g} \times \mathbf{p} + \mathbf{p}^T \mathbf{K} \mathbf{p} \quad (3)$$

在约束条件 $g_{ij} > 0, p_{ij} > 0$ 和 $g_{ij}p_{ij}=0$ 下的极值。其中 K 为压力对弹性变形的影响系数。

同时,接触问题还需要满足载荷平衡方程,即

$$W = \iint p(x,y) dx dy \quad (4)$$

式中 W 为法向接触载荷。

考虑磨损工况下,磨损模型采用 Archard 磨损模型^[18],磨损体积计算公式为

$$\Delta V = k_s S \frac{W}{3\sigma_s} \quad (5)$$

式中 ΔV 表示磨损体积, S 表示磨损距离, σ_s 表示软材料的受压屈服极限, k_s 表示黏着磨损系数。

在实际计算过程中,要将计算域离散成二维网格,对于每个网格上的磨损体积进行单独计算,随后用磨损体积除以磨损面积,即可得到此离散网格位

置的磨损深度,即

$$d_{ij} = k_s S \frac{p_{ij}}{3\sigma_s} \quad (6)$$

式中 d_{ij} 表示某网格节点的磨损深度, p_{ij} 表示该网格位置的压强。

由于本研究中主要针对钢-石墨接触副,上试件为钢球,固定不动,下试样为旋转石墨盘,石墨盘中每个位置在旋转一圈过程中只与钢球接触一次,发生一次磨损行为,每圈发生的磨损应是均匀的,而实际模拟中,运动方式为每次步进一个网格节点,距离为 Δx ,因此上式中,磨损距离应该是常数 Δx ,通过叠加各个时刻的磨损深度增量最终可获取磨损形貌。其中,磨损系数需要通过试验结果予以确定。

2.2 油润滑理论模型

考虑润滑油影响后,依托雷诺方程重新建立润滑模型,雷诺方程表示为^[19]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = u \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \quad (7)$$

式中 x, y 表示坐标方向, h 为润滑油膜厚度, p 为流体接触压力, u 为卷吸速度, t 为时间, η 和 ρ 为润滑油粘度与密度。

对于点接触工况,润滑油膜厚度方程为

$$h(x,y) = h_0 + f_g(x,y) + \delta(x,y) + v_e(x,y) + d(x,y) \quad (8)$$

式中 h_0 为两接触体未考虑变形时的相互接近位移, $f_g(x,y)$ 为两接触体间未考虑变形时的几何间隙, δ 为表面粗糙度, v_e 为表面弹性变形。

润滑油粘度按 Barus 粘压关系计算^[20]公式为

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p) \quad (9)$$

式中 η_0 表示环境粘度, α 为粘压系数。

此外,接触压力同样还需满足载荷平衡方程。

2.3 计算方法

以球-盘接触模型为例,发展了适用于干摩擦和油润滑条件下的石墨材料磨损预测方法。基于赫兹弹性接触理论,计算出在给定加载力下的赫兹接触半径 b 。在数值求解计算时,为使方程简化,引入无量纲参数,对各个控制方程做无量纲化处理,根据前期研究经验:对于干摩擦模型,计算域取 $\{-3 < x/b < 3, -3 < y/b < 3\}$;对于油润滑模型,计算域取 $\{-2.5 < x/b < 1.5, -2 < y/ab < 2\}$,并将计算域划分为 129×129 等距网格。在数值求解时,弹性变形的计算采用 DC-FFT 算法加速计算,压力求解采用 Gauss-Seidal 低松弛迭代逐行扫描法求解^[21]。干摩擦及油润滑的计算流程图如图 1,2 所示,图中 ω 为松弛迭代因子, ε_p 为压力迭代误差, ε_w 为载荷迭代误差。

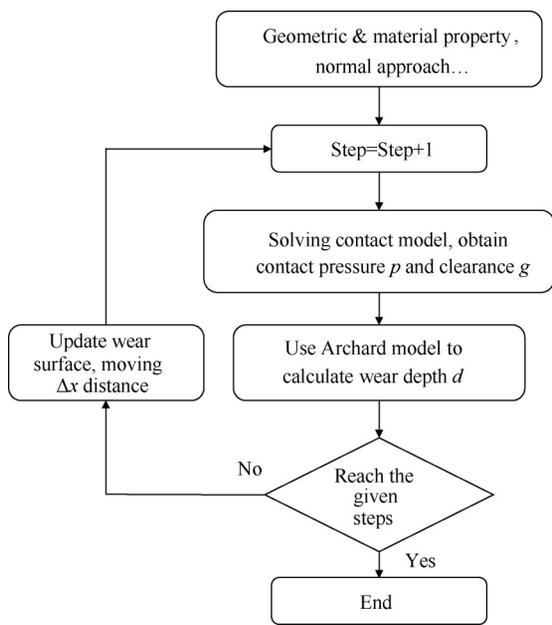


Fig. 1 Flow chart of wear prediction for dry-sliding condition

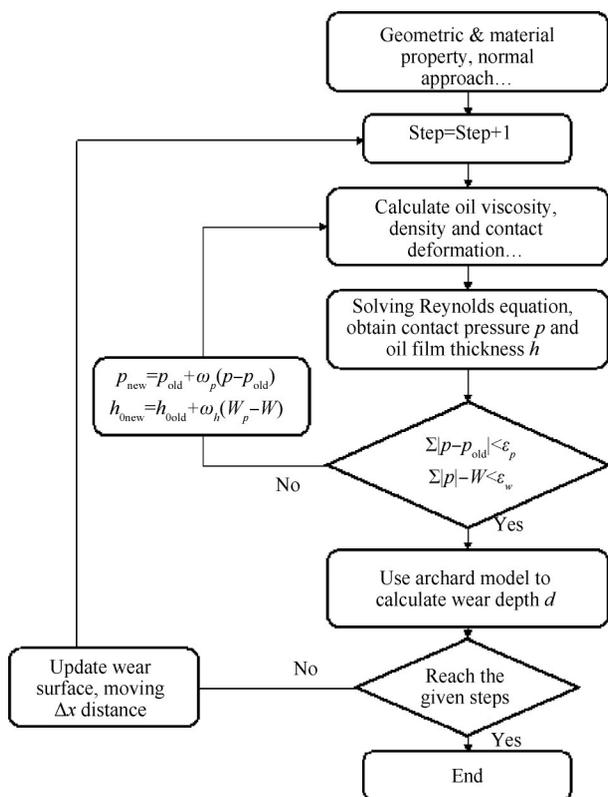


Fig. 2 Flow chart of wear prediction for oil lubrication condition

2.4 试验验证

为验证理论模型及数值计算方法的合理性,本文采用 UMT-TriboLab 多功能摩擦磨损试验机高速旋转模块及球-盘接触方式,装置如图 3 所示,以两种典型石墨密封材料电解石墨 M234、浸渍磷酸盐石墨 M234AO 配对 9Cr18Mo 不锈钢摩擦副为研究对象,开展常温、干摩擦与油润滑条件下的摩擦磨损试验,并通过试验与仿真结果对比分析,验证所发展模型及算法的合理性,材料的属性参数如表 1 所示。试验中,上试样为直径 9.5mm 的圆球,材料为 9Cr18 不锈钢;下试样为直径 70mm,厚 6.6mm 的圆盘,材料为石墨。由于 pv 值(接触点压力 p 与线速度 v 的乘积)常被用为密封方式选择的一项重要指标,其与材料磨损过程的摩擦功耗、界面温升和工况参数都息息相关^[22],因此本文选取 pv 值为 $1.6 \times 10^6 \text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})$,对应的转速和加载力分别为 500r/min 和 35N,测试时间设定为 1h。试验结果显示:相对于不锈钢材质,石墨为软材料,磨损主要发生在石墨表面,对于磨损形貌和深度的试验观察和测试主要集中在石墨表面。试验前后磨损位置表面如图 4 所示。未磨损前两种石墨试样表面平整分布均匀,而磨损后表面能明显看到出现了轻微的裂纹、剥落及擦伤的现象,M234 表面的完整性高于 M234AO。添加油介质后表面磨损的剧烈程度有所下降。

本研究所提出算法依赖于计算域的划分,实际试验过程中钢球在圆盘上摩擦轨迹为直径约 50mm 的圆,整个圆周方向磨损情况基本一致,因此为减少

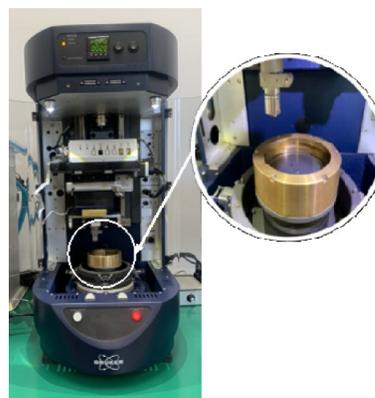
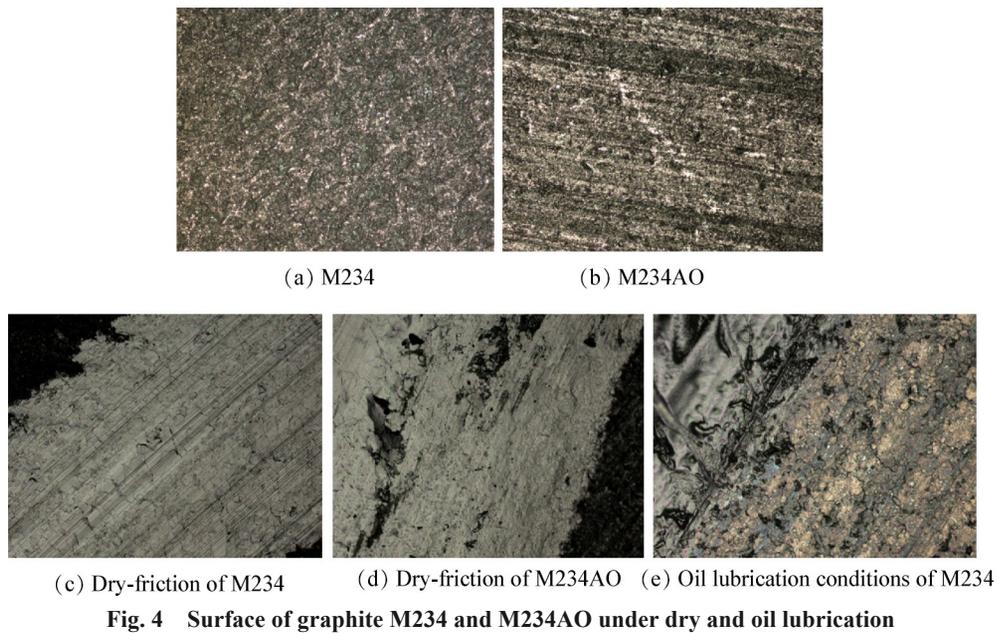


Fig. 3 UMT-TriboLab

Table 1 Physical and mechanical properties of samples

No.	Density/(kg/m^3)	Compressive strength/MPa	Rockwell hardness/(HR10/1470)	Young modulus/GPa	Poisson's ratio
M234	1800	245	87	22	0.2
M234AO	1800	98	80 ~ 125	20.5	0.2
9Cr18Mo	7850	746	58	210	0.3



计算量,本研究以钢球重复通过计算域的循环次数来模拟实际时间。

垂直于运动方向二维轮廓的试验与仿真结果对比如图5所示,图中黑色虚线为仿真结果,蓝色实线为形貌检测仪检测的实际形貌,试验结果仿真结合吻合性较好,但是由于实际试验中表面粗糙度、石墨存在孔隙等因素影响,导致磨损形貌曲线并非光滑曲线,因此仿真计算形貌与试验形貌并非完全吻合,

通过对磨损位置数据进行二次拟合选取最高点与最低点差值作为试验测得最大磨损深度。如图5(a), (b)所示,干摩擦条件下,试验测得的M234, M234AO两种石墨盘表面磨损最大深度分别为 $20.4\mu\text{m}$, $24.5\mu\text{m}$, 仿真计算结果分别为 $19.4\mu\text{m}$, $26.4\mu\text{m}$, 误差分别为4.9%和7.8%;如图5(c)所示,油润滑条件下,试验测得的M234石墨盘表面磨损最大深度为 $14.1\mu\text{m}$, 仿真计算结果为 $12.8\mu\text{m}$, 误差为9.2%。仿真与试验结果对比发现:所发展的模型和分析方法较为合理,最大磨损深度预测误差值不大于10%,并且磨损表面轮廓形状的仿真与试验结果也基本吻合。

3 结果与讨论

3.1 不同石墨材料对磨损形貌的影响

用于密封的石墨材料品种繁多,在传统炭石墨的基础上,研发出了浸渍树脂石墨、浸渍磷酸盐石墨、电解石墨以各向同性热解石墨等^[3]。不同的石墨材料在摩擦磨损性能上具有差异,本文对电解石墨M234和浸渍磷酸盐石墨M234AO的磨损特性展开研究。

转速500r/min,法向力35N,干接触,运转时长1h,通过仿真模型对两种石墨材料磨损行为进行预测,计算得到的磨损形貌和最大磨损深度随时间变化情况如图6所示。图6(a), (b)为M234和M234AO两种材料在垂直于运动方向的二维仿真形貌,最终磨损形貌呈现抛物线型, M234AO的磨损程度比M234严重。图6(c), (d)为最大磨损深度随时间变化规律,随着磨损时间的增加,最大磨损深度逐渐

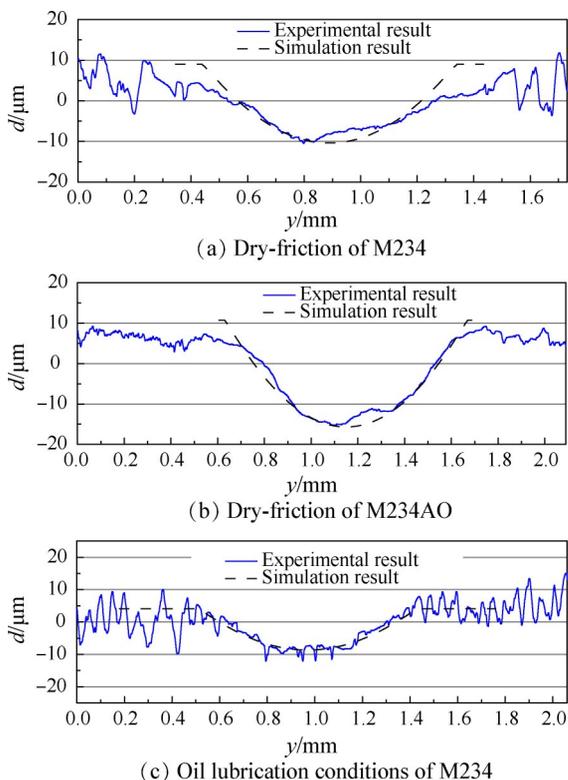


Fig. 5 Comparison of experiment and simulation profiles

增加,增加速度先快后慢,呈非线性变化规律,最终M234AO的最大磨损深度达到 $26.4\mu\text{m}$,相比于比M234材料的最大磨损深度 $19.4\mu\text{m}$,增加了36%。由于石墨材料的硬度相对较小,在磨损过程中界面掉落的固体颗粒会进入摩擦副端面起到研磨剂的作用,发生磨粒磨损,接触位置出现减材,M234AO材料为浸渍磷酸盐的石墨材料,磷酸盐在高载荷、高转速的条件下大量析出,并且很快被磨成粉末,随着不断挤压,将粉末排出接触面,而电解石墨中不含磷酸盐,因此其表现出更好的抗磨特性。

图7以M234材料为例,展示磨损开始时与最终磨损形貌的二维轮廓图以及对应的压力云图,通过磨损形貌轮廓图7(a),(b)观察发现,由于接触形式为点接触,中间接触压力较大,边缘位置接触压力较小,所以接触中心区域磨损严重,磨损形状类似于抛物线形状,随着磨损时间的增加,磨损深度以及磨损范围均明显增加。接触压力 p 云图如图7(c),(d)可见,在开始时刻,接触压力中心位置较大,边缘位置较小,由于磨损较小,与赫兹接触行为类似,随着时间的推移,表面磨损越来越严重,磨损形貌与钢球形状进一步匹配,接触压力逐渐平均,由于接触边缘存在接触尖角,最大接触压力逐渐由中心位置移动到接触边缘,至最后时刻,在接触边缘位置存在较大的应力集中。M234AO的分时形貌图变化趋势与M234基本一致,但最终深度和整体磨损区域大于M234,此

处不再进行展示。

通过对M234和M234AO材料在点接触下磨损形貌分析,可以看出,M234的抗磨性能优于M234AO,在最大磨损深度和磨损区域宽度上,M234性能更好,因此后续研究均以M234与9Cr18Mo材料的摩擦副为研究对象。

3.2 pv 值对磨损形貌的影响

不同的 pv 值对石墨密封材料的磨损情况也不相同,通过选取低 pv 值与高 pv 值,研究表面形貌和最大磨损深度的变化。 pv 值选取 $1.6\times 10^6\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 低转速轻载和 $9.8\times 10^6\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 高转速重载。磨损形貌和最大磨损深度随时间变化如图8所示。考虑到高 pv 值下接触点应力较大且相对滑动速度较快,材料失效较快,因此将接触时间变为5min。

图8(a),(b)为两种 pv 值下,垂直于运动方向的二维仿真形貌,由图可见,高 pv 值工况下的最大磨损深度以及磨损宽度明显高于低 pv 值工况下的结果,在较短时间内就发生了较大磨损。图8(c),(d)为两种 pv 值下最大磨损深度随时间变化规律,由图可见,随着磨损时间的增加,最大磨损深度逐渐增加,对于低 pv 值工况,变化曲线呈现出类似线性的变化规律,而对于高 pv 值工况,变化曲线呈现出非线性的变化规律,这是由于磨损时间较短,低 pv 值工况磨损量小,尚未体现出线性规律。磨损5min后,两种工况的最大磨损深度分别为 $2.5\mu\text{m}$ 和 $13.1\mu\text{m}$,可见,M234材料在高 pv 值下,在较短时间内的磨损深度已达到

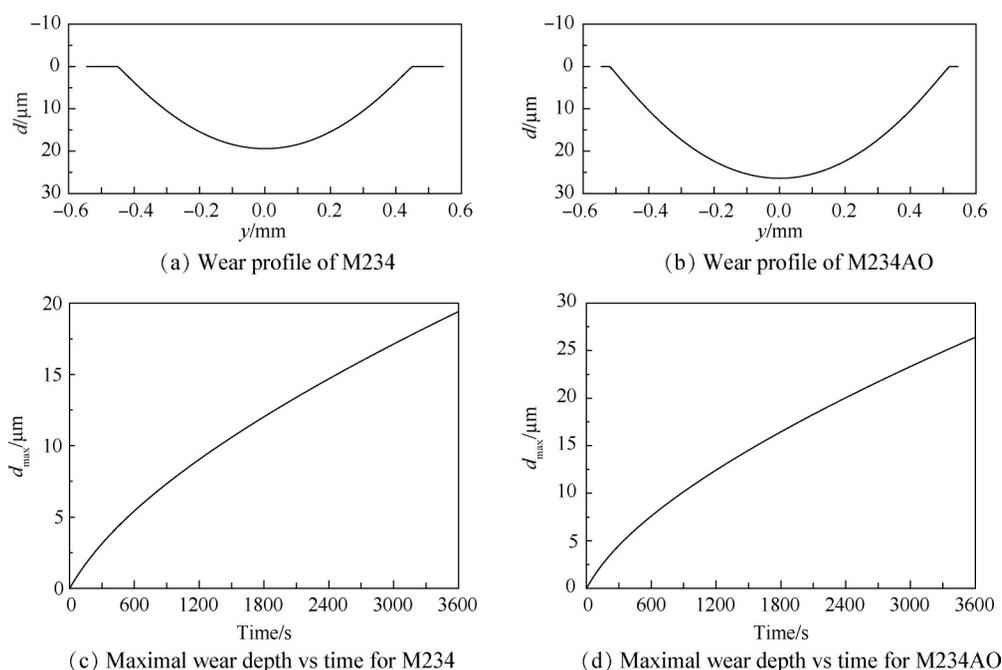


Fig. 6 Changes of wear profile and maximal wear depth vs time for different materials

低 pv 值工况下的 5.2 倍,可能出现严重的材料剥落和损坏,即材料表面失效。由于石墨表面存在一定的吸附水分,在磨损初期会形成一层润滑膜,减缓界面间的磨损,低 pv 值下,润滑膜损坏和重构的速度基本一致,磨损相对轻微,而高 pv 值下,试验件工作

面温度、载荷和接触频率明显上升,磨损跑道上水分消失,磨粒明显变大增多,解吸附的速率明显大于润滑膜的重构速率,所以润滑膜被破坏,转为残膜润滑,导致摩擦表面的磨屑磨损加快,发生较严重减材。

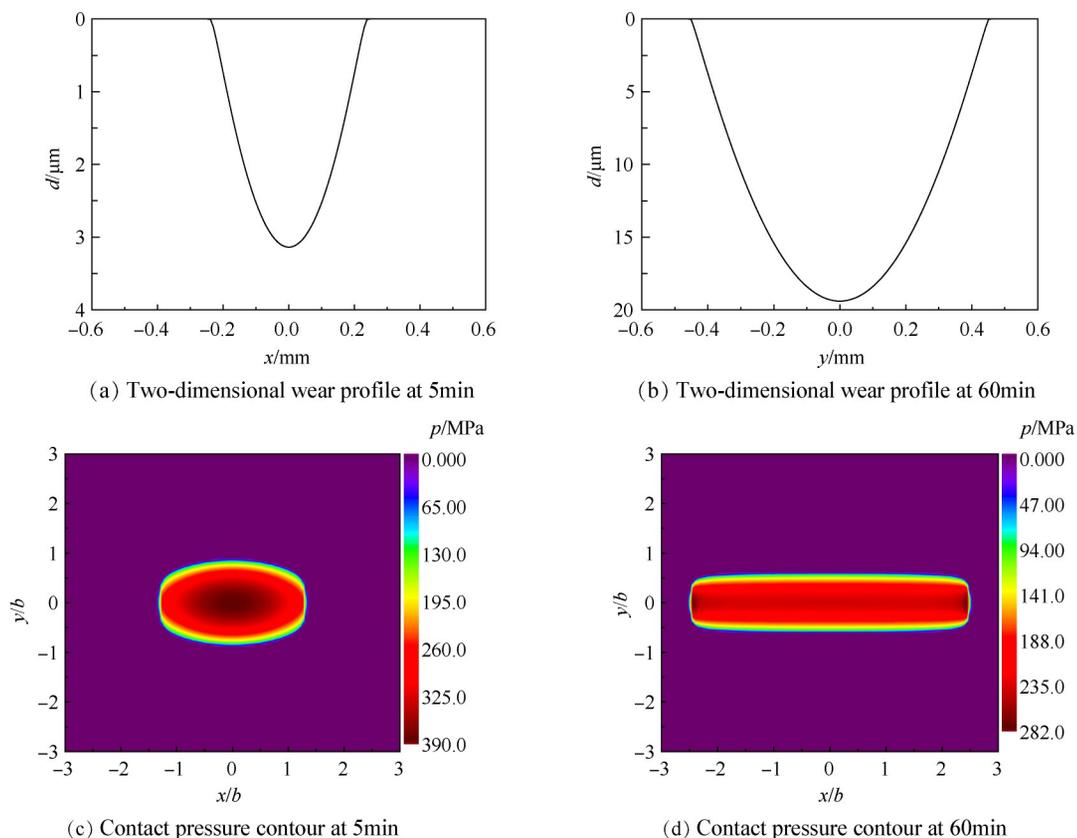


Fig. 7 M234 two-dimensional wear profile and contact pressure contour

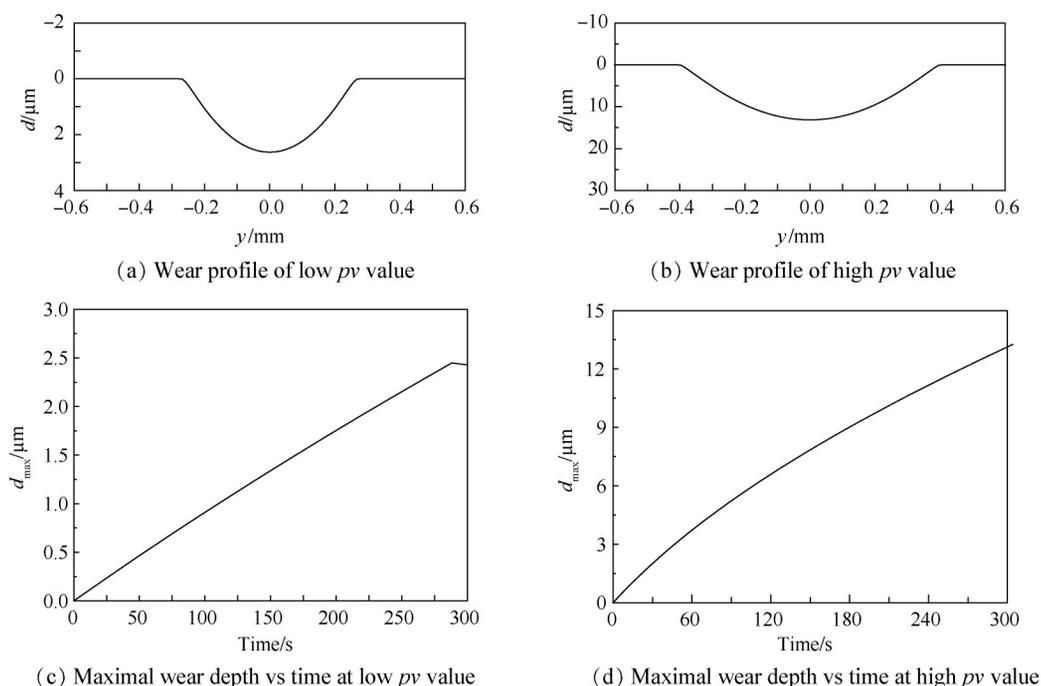


Fig. 8 Changes of wear profile and maximum wear depth vs time at different pv values

图 9 为不同 pv 值, 磨损 5min 后接触压力云图, 图 9(a) 为低 pv 值时的仿真结果, 此时磨损量较少, 接触压力类似于赫兹接触压力, 接触中心压力较大。图 9(b) 为高 pv 值时的仿真结果, 由于磨损量较大, 因此接触宽度较大, 类似于滚动轴承钢球与滚道接触情况, 在 x 方向接触压力较平均, 并且由于接触宽度的增加, 最大接触压力也明显减少。

3.3 润滑条件对磨损形貌的影响

对于油润滑点接触工况, 添加油润滑介质(选用飞马二号润滑油), 转速 500r/min, 法向力 35N, 接触时间 1h, 对 M234 材料在油润滑条件下的磨损情况进行仿真分析, 磨损形貌图和最大磨损深度随时间变化如图 10 所示, 通过与图 6(a), (c) 干摩擦工况对比发现, 添加油介质后, 材料磨损得到明显改善, 干磨下最大磨损深度达 $17.9\mu\text{m}$, 油润滑下减小为 $12.8\mu\text{m}$, 最大磨损深度降低约 28.5%, 磨损形貌的形状与干摩擦工况相似, 均为类似抛物线的形状。在添加油介质后, 接触表面存在一层润滑油膜, 在磨损前期, 油膜的存在起到了很好的缓冲作用, 使得两个表面没有直接接触, 在接触过程中, 滑油可以快速地带走摩擦产生的热量和磨屑, 并起到隔绝

氧气减缓试验件氧化的作用, 很大程度上降低了摩擦剧烈程度。随着时间的增加, 磨损趋势和磨损深度的变化与干摩擦趋势基本一致, 呈非线性变化规律。

图 11 为油润滑下, 不同时刻垂直于运动方向的磨损形貌的二维轮廓图及对应的计算域内接触压力云图, 磨损形貌的二维轮廓图如图 11(a), (b) 所示, 油润滑条件下磨损形貌轮廓与干摩擦工况相似, 中间区域磨损严重, 形状类似于抛物线形状, 随着磨损时间的增加, 磨损的深度以及范围均明显增加, 但是通过对比发现, 考虑润滑后最大磨损深度明显小于干摩擦情况, 磨损区域宽度变化较小。接触压力云图如图 11(c), (d) 所示, 在开始时刻, 磨损较小, 接触压力与和赫兹接触相似, 中心压力较高, 边缘压力较低, 由于存在润滑油, 产生流体动压效应, 润滑油出口位置也具有部分压力。随着磨损时间的延长, 与干摩擦工况相似, 石墨表面磨损越来越严重, 磨痕宽度增加, 因此接触区域宽度也逐渐增加, 接触压力分布逐渐平均, 但是由于边缘效应, 在接触边缘位置存在部分应力集中。

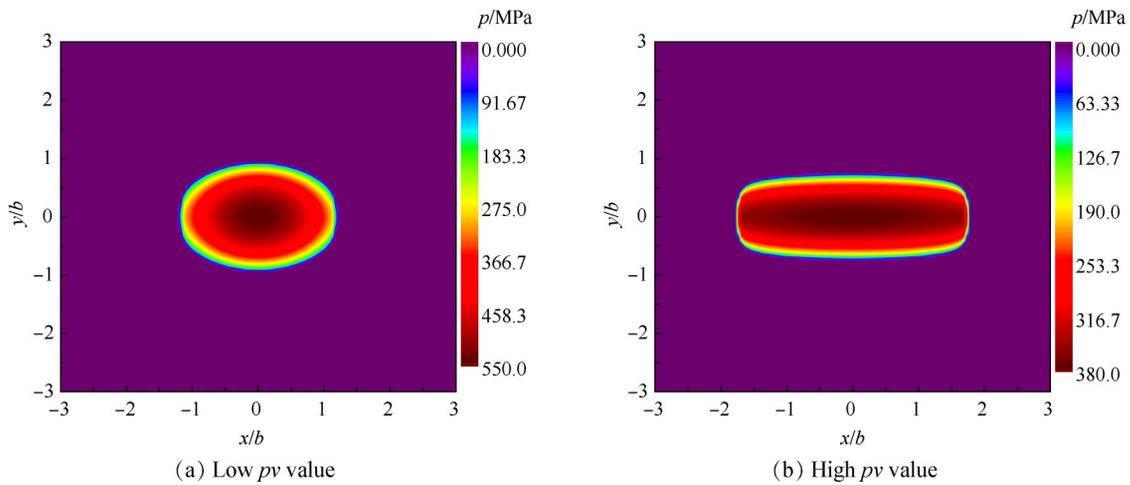


Fig. 9 Contact pressure contour in 5min of different pv values

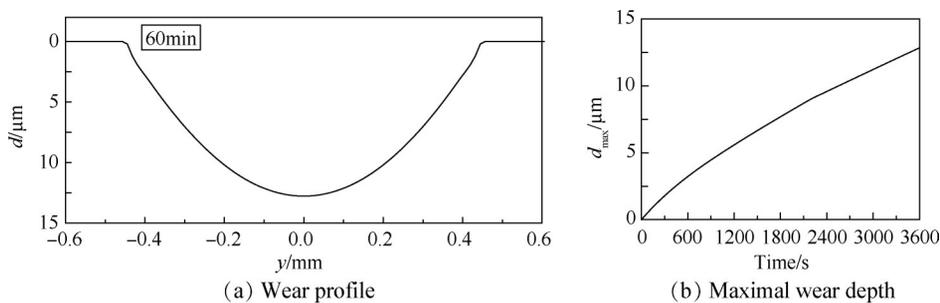


Fig. 10 Changes of wear profile and maximal wear depth vs time at oil lubrication condition

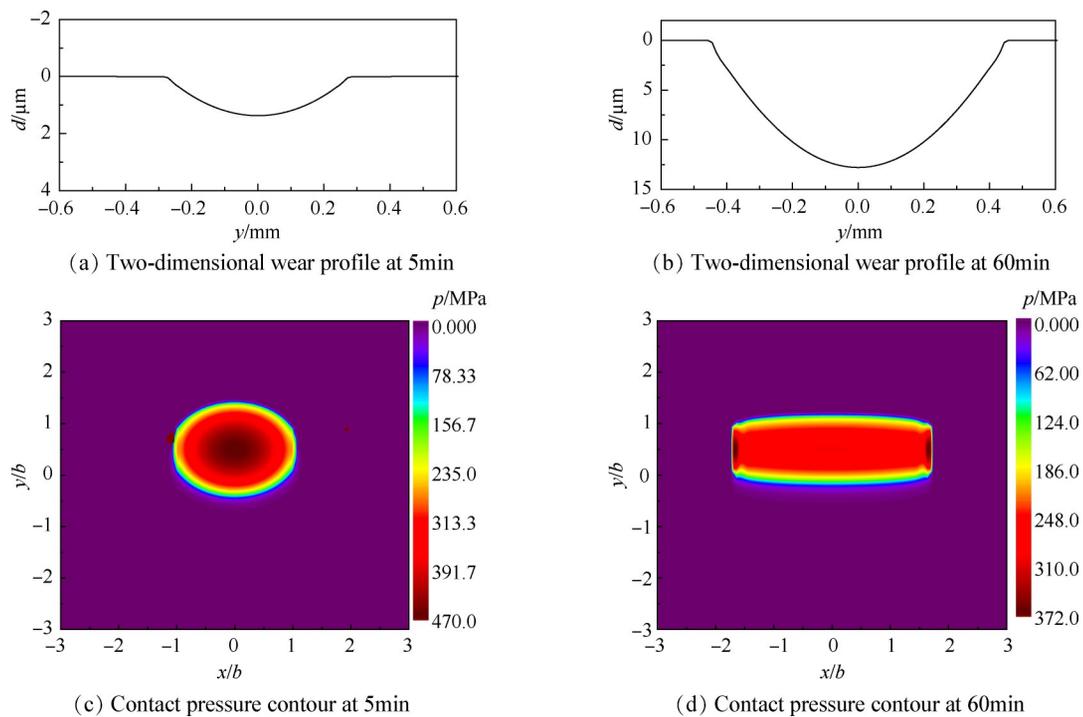


Fig. 11 Two-dimensional wear profile and contact pressure contour in oil lubrication condition

4 结论

针对航空发动机接触式石墨端面密封磨损问题,本文以两种典型石墨密封材料配副为例,开展磨损预测模型及仿真方法研究,并通过数值仿真分析,考察了石墨密封材料主要影响因素,研究结论如下:

(1)提出的基于半解析的数值仿真方法经试验验证具有较好预测精度,最大磨损深度误差不大于10%。

(2)仿真方法分析了干摩擦条件下石墨密封典型材料磨损性能。研究结果显示,相同工况条件下,M234的抗磨性能优于M234AO;M234在高 pv 值工况条件下的磨损程度明显高于低 pv 值工况,并且有发生材料失效的风险。

(3)油润滑条件下仿真分析了石墨密封典型材料磨损性能。研究结果显示,添加油介质,M234磨损程度较干摩擦条件得到明显改善,最大磨损深度降低约28.5%,磨损区域宽度明显变小。由此可见,油介质可以很大程度上改善石墨磨损的剧烈性。

致谢:感谢国家科技重大专项、国家自然科学基金的资助。

参考文献

[1] 胡广阳, 闫玉涛, 郑力胜, 等. 航空发动机石墨圆周密封接触特性分析[J]. 润滑与密封, 2018, 43(11): 102-107.

[2] 闫玉涛, 李雪娟, 胡广阳, 等. 石墨密封材料高温摩擦磨损行为及预测[J]. 航空动力学报, 2014, 29(2): 314-320.

[3] 朱振国, 王 硕, 任 勇, 等. 机械密封用炭石墨材料摩擦磨损性能研究[J]. 炭素技术, 2017, 36(6): 34-37.

[4] 倪成良, 江锦波, 彭旭东, 等. 浸酚醛树脂石墨与9Cr18不锈钢配副的摩擦磨损正交试验研究[J]. 流体机械, 2019, 47(4): 1-18.

[5] 肖云鹏, 李双喜, 李庆展, 等. 干摩擦机械密封端面材料配对性能的台架试验研究[J]. 润滑与密封, 2020, 45(2): 99-104.

[6] 陈建行, 高祺洋, 王 鹏, 等. 油润滑条件下各向同性热解石墨/GH4169的摩擦学行为[J]. 中国表面工程, 2021, 34(4): 107-116.

[7] Chin K J, Zaidi H, Mathia T. Oxide Film Formation in Magnetized Sliding Steel/Steel Contact Analysis of the Contact Stress Field and Film Failure Mode[J]. *Wear*, 2005(259): 477-481.

[8] 谢尚翔, 白少先. SiC/石墨配副密封端面织构低速磨损特性[J]. 润滑与密封, 2018, 43(7): 48-51.

[9] 彭旭东, 何良杰, 江锦波, 等. 浸酚醛树脂石墨/SiC密封材料摩擦学特性研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(11): 1283-1292.

[10] 徐宇轩, 谭 姣, 涂川俊, 等. 温度、载荷变化对密封用炭石墨材料摩擦磨损性能的影响[J]. 炭素, 2021, 186: 3-10.

[11] Kim Y W, Kim J H, Seo B H, et al. Mathematical Mod-

- el to Evaluate Wear Rate of Graphite as Sealing Materials [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 871: 200-205.
- [12] 李小彭, 杨泽敏, 潘五九, 等. 接触式机械密封端面的分形磨损模型[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(5): 841-846.
- [13] 惠玉祥, 刘莹, 王悦昶, 等. 考虑磨损的接触式端面密封模型及试验[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(3): 316-324.
- [14] 魏龙, 顾伯勤, 张鹏高. 接触式机械密封端面磨损预测[J]. 南京工业大学学报, 2012, 34(4): 16-21.
- [15] 房桂芳, 滕文锐, 刘其和, 等. 机械密封端面黏着磨损分形模型[J]. 流体机械, 2013, 41(1): 35-40.
- [16] Leefe S E. "Bi-Gaussian" Representation of Worn Surface Topography in Elastic Contact Problems[J]. *Tribology Series*, 1998, 34: 281-290.
- [17] 王文中, 胡元中, 王慧. 基于快速傅里叶变换和共轭梯度法求解干接触问题[J]. 机械工程学报, 2006, 42(7): 14-18.
- [18] 王观民, 张永振, 杜三明, 等. 不同气氛环境中钢/铜摩擦副高速干滑动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(7): 346-351.
- [19] Hu Y Z, Zhu D. A Full Numerical Solution to the Mixed Lubrication in Point Contacts [J]. *ASME Journal of Tribology*, 2000, 122(1): 1-9.
- [20] 温诗铸, 黄平, 田煜, 等. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- [21] Liu Y C, Wang Q J, Wang W Z, et al. Effects of Differential Scheme and Mesh Density on EHL Film Thickness in Point Contacts [J]. *ASME Journal of Tribology*, 2006, 128(3): 641-653.
- [22] 顾永泉. 机械密封的PV值(一)[J]. 流体机械, 1981(5): 54-62.

(编辑:朱立影)