文章编号:1000-8055(2024)07-20220061-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220061

低供油压下挤压油膜阻尼器空穴效应试验研究

陈亚龙1,马会防1,黄延忠2,张广辉2

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司,上海 200241;

2. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院,哈尔滨 150001)

摘 要:挤压油膜阻尼器(squeeze film damper, SFD)正常工作时避免不了会出现油膜空穴,为了研究
 SFD长时间运行时转子基频振动变化以及 SFD油膜空穴效应对 SFD内外环金属表面空化侵蚀情况,基于全尺寸航空发动机高压转子试验台开展了低供油压力(0.02~0.05 MPa)下 SFD空穴效应试验研究,考察 SFD在临界转速处长时间运行时转子基频振动变化,以及长时间运行后油膜空穴对 SFD内外表面形貌的影响,试验结果表明:长时间运行后 SFD油膜空穴会对 SFD内环表面产生侵蚀作用,形成水滴形、椭圆形以及形状不规则的凹坑群,证明了在临界转速附近考核 SFD空穴效应是 SFD低供油压力下安全运行必要的试验内容。
 关键 词:挤压油膜阻尼器;低供油压力;临界转速;空穴侵蚀;表面形貌
 中图分类号: V216.2⁺1; TK14

Experimental study on the effect of cavitation of squeeze film damper under low oil supply pressure

CHEN Yalong¹, MA Huifang¹, HUANG Yanzhong², ZHANG Guanghui²

(1. Commercial Aircraft Engine Company Limited,
Aero Engine Corporation of China, Shanghai 200241, China;
2. School of Energy Science and Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Oil film cavitation can't be avoided during normal operation of squeeze film damper (SFD). In order to study the change of rotor fundamental frequency vibration during long-term operation of SFD and the erosion of SFD oil film cavitation effect on the metal surface of inner and outer rings of SFD, experimental study of SFD cavitation effect under low oil supply pressure (0.02—0.05 Mpa) was carried out based on a full-scale aeroengine high-pressure rotor test rig to investigate the change of rotor fundamental frequency vibration during long-term operation of SFD at critical speed, and the effect of oil film cavitation on the internal and external surface morphology of SFD after long-time operation. The experiment results showed that the SFD oil film cavitation could erode the surface of the inner ring of SFD after long-time operation, forming water drop, oval and irregular pit groups, proving that assessing the SFD cavitation effect near the critical speed is a necessary experiment content for the operation safety of SFD under low oil supply pressure.

Keywords: squeeze film damper; low oil supply pressure; critical speed; cavitation erosion; surface morphology

收稿日期:2022-02-10

作者简介:陈亚龙(1985-),男,正高级工程师,硕士,主要从事航空发动机结构强度工作。E-mail:cylnpu@163.com

引用格式: 陈亚龙, 马会防, 黄延忠, 等. 低供油压下挤压油膜阻尼器空穴效应试验研究 [J]. 航空动力学报, 2024, 39(7): 20220061. CHEN Yalong, MA Huifang, HUANG Yanzhong, et al. Experimental study on the effect of cavitation of squeeze film damper under low oil sup-ply pressure [J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(7): 20220061.

第 39 卷

挤压油膜阻尼器(squeeze film damper, SFD) 常常会因为外界空气吸入或油膜区压力过低而发 生油膜空化,也叫"空穴效应",此种情况影响 SFD减振性能,同时还会对 SFD内外环金属表面 造成侵蚀,改变了表面形貌,降低了 SFD工作寿 命,任其发展还会导致结构的失效。

在 SFD 空穴研究方面国外学者研究颇多: Ku与Tichy^[1]对浸没式SFD中的空化现象进行 了试验研究,并提出了相对简单的空化预测模型 用试验验证了模型的正确性; Diaz 等^[2] 试验测试 了含有气泡的 SFD 油膜压力,试验结果表明油膜 压力峰峰值随着吸入空气量增加而降低,工程中 要竭力避免空穴产生; Zeidan 等^[3] 认为 SFD 性能 预估很大程度上取决于油膜空穴区域变化与类型, 并利用高速摄像机拍摄了空化现象,转子高速运 行下油膜内多为汽液两相共存状态,换句话说空 化普遍存在于 SFD 中; Wang 等^[4] 基于动网格法 仿真研究了带供油槽 SFD 的空化油膜压力,计算 了阻尼系数,并且与文献试验数据^[5]进行对比验 证了仿真的正确性; Laurentiu^[6] 阐述了 SFD 中常 见的空化类型,认为通过对油膜加压可以避免空 化产生; Fan 等^[7] 探究了考虑油膜惯性力时工作 在高转速下局部密封的 SFD 空化特性, 建立了空 化模型,基于有限长局部密封 SFD 模型整合了流 体惯性项,与试验数据对比表明流体惯性力很大 程度上影响了空化区域的扩展;崔颖等^{18]}基于 Mixture 与 Z-G-W 模型仿真了带中央槽及两端开 口的 SFD 流场空化特性, 仿真发现中心槽两侧产 生对称的条状负压带,周向进油孔分布会影响低 压区压力与气相体积分数; Yan 等¹⁹CFD 仿真了 SFD 中空化的问题并与试验数据进行对比,结果 表明 CFD 仿真可以较准确地预测 SFD 汽液两相 流情形,空气吸入最严重区域出现在 SFD 间隙最 大位置而非低压区; Iacobellis 等^[10]试验研究了 SFD 供油装置对 SFD 性能影响,试验过程中对转 子施加不同不平衡力,认为供油孔数量与位置会 影响 SFD 工作时的空气吸入程度。

在空化侵蚀研究方面已经取得了一系列的研究成果:Tul'Chinskii等^[11]总结了水轮机现场空化 侵蚀试验数据,叶片空化侵蚀位置一般出现在叶 片根部,运行 8 000 h 后损伤凹坑深度达到 25~ 28 mm,空化侵蚀凹坑尺寸与运行时间、温度都相 关;Okada等^[12]利用磁致伸缩振动装置进行了水 空化测试,测量了表面凹坑尺寸与气泡塌缩压力,

获得低碳钢表面凹坑电镜扫描结果,建立了气泡 塌缩压力与空化侵蚀程度关系模型; Chen 等[13] 试 验测试空化对抛光的40Cr钢表面的侵蚀,提出3 种损伤模式:微射流引起的表面完全蚀坑、冲击 波导致的不完全蚀坑、热损伤导致的热蚀坑; Oka 等^[14] 测试金属陶瓷复合材料的耐腐蚀性, 用 水流冲击进行测试,侵蚀范围宽度尺寸达到0.2 mm; Kazama 等^[15] 研究了液压油对沟槽表面的射流空 化侵蚀,用40℃下黏度等级32的液压油作为介 质, 空化数设定在 0.02~0.04, 试件表面被腐蚀出 现环状结构,最大侵蚀尺寸达到近15 mm; Dular 等^[16]进行铝箔空化试验,利用高速相机拍摄,提 出5种空化损伤机制:球形空化的云溃灭损伤、 马蹄形空化的云溃灭损伤、螺旋形空化的云溃灭 损伤; Romanov 等[17] 对水轮机叶片空化进行了研 究,发现侵蚀区域出现在叶片边缘,空化侵蚀范 围达到 0.071 m², 最大达到 0.225 m²; Abouel-Kasem 等^[18]对 SUS304 不锈钢进行空化侵蚀损伤试验, 利用扫描电子显微镜拍摄,形成的凹坑是被塑性 变形包围的形状不规则黑点,不仅存在单个凹坑, 还有凹坑群集、微孔群集; Zakrzewska 等^[19] 对空 化侵蚀期间的镍基镀层试件表面形貌进行了微观 辨识,评价镀层对侵蚀的阻碍作用。

调研国内外相关研究现状发现:对于 SFD 空 穴效应研究主要集中对空化气泡形态和空化压力 的探讨,阻尼器油膜空化对金属内外环的侵蚀情 况还未见研究,为了测试油膜空化对 SFD 结构侵 蚀影响程度,本文结合实际需求,基于带 SFD 的 全尺寸航空发动机转子试验台,开展了连续长时 间临界运行考核试验,研究了 SFD 在转子临界转 速处长时间运行时的减振性能,以及长时间运行 后 SFD 空穴效应对其结构表面形貌是否有影响, 为航空发动机 SFD 低油压下的安全运行提供 参考。

1 SFD 空穴效应的机理及影响

1.1 SFD 空穴效应的机理

Zeidan 等^[20] 对空穴效应有较多的研究,空穴 效应的空穴形态与阻尼器端封情况(无端封、带 端封)、供油压力与流量、SFD内环涡动频率、激 励动载荷引起的偏心幅度等因素有关。

空穴根据成因分为两大类,即"蒸汽空穴"(蒸 汽气蚀)和"空气空穴"(空气气蚀),蒸汽空穴是负 压比液化临界压力还低时,液体直接汽化形成的 气泡,空气空穴是一定负压下溶解在液体中的空 气从液体析出形成气泡。另外如果 SFD 端封效 果不好,负压区也会从环境中直接吸入气体进来, 形成空气气穴。

Diaz 等^[21] 定义了一个评估是否有空气进入 油膜的无量纲系数:

$$r = \frac{q_{\rm oil}}{Le\omega} \tag{1}$$

由于 SFD 轴向两端泄油, 此处 qoil 表示轴向两 端单位弧长上的 SFD 滑油流量:

$$q_{\rm oil} = \frac{Q_{\rm oil}}{\pi D} \tag{2}$$

式中 Q_{oil} 为 SFD 滑油总泄漏量, L/h; D为 SFD 滑 油总泄漏量, m; L为 SFD 油膜长度, m; e为 SFD 内环涡动半径, m; ω 为 SFD 内环涡动频率, rad/s。

公式原理基于供油体积与运动偏心形成的油 膜区体积比值r,如果r < 1,即供油体积大于运动 偏心体积,供油充分,无空气进入;如果r>1,即 供油体积大于运动偏心体积,供油不充分,空气 进入。后续结合试验数据分析,探讨该方法的应 用限制。

张微等^[22]研究了 SFD 中气体分数对阻尼效 果的影响,当气体体积超过一定程度时,阻尼器 的阻尼效果将明显降低。根据空穴效应形成机理, 可采取相应的措施减弱空穴效应,例如:增加端 封、避免负压区从空气中吸入气体、增加供油压 力、降低负压区的负压值、减少滑油中的气体析 出等。

1.2 SFD 空穴效应的影响

在航空发动机中, SFD 供油压力与发动机转 子转速正相关,在航空发动机转子通过低阶临界 转速时,发动机转子转速较低,此时 SFD 供油压 力较低,不利于抑制空穴效应。基于质量、成本 等因素考虑,不能采用实现提高 SFD 供油压力来 降低空穴程度的措施,因此需要研究低供油压力 下 SFD 长时间工作时的表现, 但国内外尚未见到 相关报道。由于 SFD 关于气穴效应尚未有公认 可行的理论分析方法,本文采用了试验方法对 SFD 长时间工作时低供油压力下的表现开展了试 验研究。

试验设计及试验过程 2

2.1 试验方案设计

1) 试验方案主要根据某型航空发动机的研

制条件进行设计,主要条件包括:

① 过临界转速时的时长约 20 s;

② 过临界转速时的 SFD 供油压力约为 0.02~ 0.05 MPa;

③暂以3000个飞行循环为一个检修周期。 2) 根据已有条件设计试验:

①供油压力:试验中选择的供油压力尽可能 的低,以模拟低油压下的气穴效应,确定供油压 力 0.02 MPa:

②试验时长:单轮试验总时长约为 16 h (20 s×3000=16.7 h, 取整), 共计进行两轮次的 16 h 试验:

③ 试验转速: 选择振动较大的模拟转子一阶 临界转速附近。

3) 试验测量参数:

主要包括转子振动位移响应、SFD 内外环的 表面形貌变化、SFD 供油压力和流量、回油温度。 2.2 试验装置设计

试验装置主要由驱动系统、转子系统、支承 系统、测试系统、滑油系统等组成,其中,SFD 位 于转子前轴承座(靠近驱动电动机端),远离驱动 电动机的一端为后轴承座,转子前后轴承座均配 置了两个电涡流位移传感器,互成90°布置,如 图1所示。



图 1 试验装置示意图 Fig. 1 Schematic of experimental rig

SFD 的具体结构如图 2 所示, SFD 为由弹性 鼠笼支承座支承的定心 SFD, SFD 位于棒轴承处, 油膜内环材料为1Cr11NI2W2MoV,外环材料为 40Cr_o

试验件实物如图3所示。

便于后续试验过程分析不同测点位置数据, 图 4 给出了转子径向振动位移测量测点布置方案, 即分别在前后轴承座布置涡流位移传感器,共计 4个数据通道:前轴承支座x方向、前轴承支座y 方向、后轴承支座x方向、后轴承支座y方向。



图 2 SFD 结构示意图 Fig. 2 Diagram of SFD structure



图 3 试验装置照片 Fig. 3 Photos of experimental rig

通过对 SFD 回油与贮油装置布置冷却风扇, 对供油系统式中进行风冷,以避免长时运转油温 变化过大影响试验振动基频测试结果。





2.3 试验过程

由于是首次在临界转速附近长时间停留,所 以第1次试验迅速跨越临界转速,然后降速,如 图5所示,升降速曲线几乎重合,同时在1900





r/min 附近基频振幅最大,且在1891 r/min 后轴承 座 y 方向达到峰值 36.83 μm,后续试验测试均在 1891 r/min 处定速运行。

同时考虑到试验安全,分多次进行,逐次增加 运行时间。第1轮试验分9次完成,第9次转子 在临界转速附近定速连续运转300 min,试验振动 结果如图6所示。

由图 6 可知,随着转速接近临界转速 1 891 r/min,试验曲线左端振幅缓慢增加,在这个定速



运行过程中, SFD 回油温度由 32 ℃ 增加至 38 ℃, 转子基频振动增加幅度先快后慢,这与阻尼器回 油温度升高趋势相同,经过测试阻尼器回油随着 转子运行时间增加变化越来越小。将第1轮共 计9次的试验4个通道基频振动幅值数据按每 15 min 取一个数据点,绘制在图7中,数据曲线中 的断点是第1轮相邻两次试验间歇检查点。





Fig. 7 Results of experiment for four channels after the first round of operation for 16 h

由图 7 可知,每次试验都存在 SFD 回油温度 升高的问题,在第 2 轮试验布置了冷却风扇对整 个试验过程的供油系统进行冷却,避免油温变化 过大,油温的影响明显改善。

同时基于第1轮试验经验,第2轮试验中除 了第1次测试持续时间(45 min)较短,后续几次 考核试验单次运行时长均在3h以上,分为5次 完成第2轮考核试验,如图8所示为实测的第2 轮第2次连续长时间(4h)运行4个通道基频振 动峰值。

由图 8 实测试验结果可知:较第1轮试验中 振动峰值有所降低,这是由于两轮次试验间歇需 要拆解阻尼器拍照,导致前后两次试验台装配对 中度、阻尼器一周间隙大小不同。 将第2轮16h长时间运行考核试验共计5次的4个通道基频振动试果数据按15min取一个 点,绘制在图9中。



图 8 第 2 轮第 2 次试验振动实测结果(定速运行 4 h)







Fig. 9 Results of experiment for four channels after the second round of operation for 16 h

由图9可知,5次试验中每次试验的4个通道 振动响应几乎不变,对SFD回油进行风冷在一定 程度上缓解了基频振动峰值随持续增加的问题, 这为今后的长时间考核试验具有借鉴意义。

3 试验数据分析

3.1 振动数据

根据前述分析,两支承座 x、y 方向振动相差 较大,为了对比前后轴承座测得的振动规律,将 图 7、图 9 中的 x、y 方向振动合成为总的振幅:

 $u = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{3}$

即转子在前后支座基频振动幅值取对应的两 正交通道数值的平方和,然后再开方,得到每个 支座总振幅。

第1轮、第2轮前后轴承座测点总振动幅值 结果如图10、图11所示。

由图 10、图 11 可知,前后轴承座测点振动是 不同的,这与前后的支承结构有关,前轴承采用 弹性鼠笼支承+滚珠轴承、弹性鼠笼支承+棒轴承 (SFD 结构)的双支承形式,后轴承采用弹性鼠笼 支承-棒轴承支承形式,导致前后测点支承刚度与 阻尼不同,振动幅值上体现的就是前后支座测点 振幅不同。



图 10 第 1 轮运行 16 h 前后测点试验结果

Fig. 10 Experiment results of measuring points before and after the first round of operation for 16 h





Fig. 11 Experiment results of measuring points before and after the second round of operation for 16 h

经过两轮总计 32 h 的考核, SFD 在考核期内 对转子振动影响比较小, 这与文中第 3.2 节拆解 发现的 SFD 损伤情况相符合。

3.2 SFD 内外环表面状态

在未开展第1轮试验之前,用95%工业酒精

对 SFD 内外环表面进行清洁处理,避免杂质影响 后续形貌损伤分析,用工业相机拍摄初始时 SFD 内外环油膜区照片作为对比组。表1给出了所使 用工业相机型号与参数。

完成第1轮16h考核试验后,对SFD进行拆

分辨率/10⁶ 像素

水平/垂直像素尺寸

感光芯片尺寸

表 1 工业相机详细参数				
Table 1 Detailed param	neters of industrial camera			
参数	数值及说明			
品牌	BASLER			
型号	acA2440-75 μm			
像素位深/位	12			
感光芯片供应商	Sony			
感光芯片	IMX250			

解,利用工业相机对 SFD 内外环进行拍照,然后 重新装配,调整转子对中度,开展第2轮考核试验。

5

 $3.45 \ \mu m \times 3.45 \ \mu m$

 $8.4 \text{ mm} \times 7.1 \text{ mm}$

为了保证3次拍摄的照片可以进行对比,拍 摄位置要相同,首次拍摄前对鼠笼笼条进行了编 号,共计36个笼条,见图12,按照图中黑色箭头 方向依次标记,即笼条编号1~36,每次拍摄都朝 同一方向旋转,在第1次拍摄后鼠笼端部对应编 号1和2的笼条位置粘贴标记,避免再次拆解后



图 12 拍摄区域编号示意图 Fig. 12 Schematic of photography area number

拍摄顺序混乱。

由于试验件拍摄区域均为圆弧形,所以根据 实际情况将 SFD 内环分为 72 个区域(笼条居中 的照片36张,两个笼条之间对应的油膜区照片 36张, SFD 外环分为 21 个区域, 为了防止区域漏 拍,相邻位置照片彼此会有重复部分,但这不影 响对其表面分析,此处作如下说明:

(1) 区域编号 N(N=1, 2, 3, …, 36) 表示编号 第N个笼条居中对应的油膜区照片;

(2) 区域编号 N~N+1(N=1, 2, 3, …, 37)表示 编号第N与第N+1个笼条间隙对应的油膜区照片。

对第1轮与第2轮试验后的照片进行分析发 现 SFD 内环损伤严重,将 SFD 内环空穴侵蚀损伤 的检查结果汇总在表 2,图 13~图 18 对应表 2 中 的6个损伤区域。区域编号18损伤最为严重,出 现1mm 深的凹坑,可参见图 15。

表 2 表面损伤情况汇总 Table 2 Summary of surface damage

区域编号	对比组	运行 16 h 后	运行 32 h 后	最终凹坑 深度/mm
9~10	×	\checkmark		0.8
12~13	×	\checkmark	\checkmark	0.2
18	×	\checkmark	\checkmark	1
27~28	×	\checkmark	\checkmark	0.1
29~30	×	×	\checkmark	< 0.1
34	×	×	\checkmark	0.2

注:表中×代表无凹坑,√代表有凹坑。SFD外环经过对比 发现油膜区域损伤不严重,第1轮试验后仅发现一处较 为明显的凹坑,第2轮试验后没有新增凹坑,最终凹坑 深度远远小于 0.1 mm。

推测损伤情况主要与结构材质有关,未来可 进一步研究影响损伤的具体因素,包括涂层对损 伤的影响和防护、SFD 半径间隙对损伤的影响等。





图 14 区域编号 12~13 处的损伤图片 Fig. 14 Damage picture at area No. 12—13



图 15 区域编号 18 处的损伤图片

Fig. 15 Damage picture at area No. 18



图 16 区域编号 27~28 处的损伤图片 Fig. 16 Damage picture at area No. 27—28



图 17 区域编号 29~30 处的损伤图片 Fig. 17 Damage picture at area No. 29—30

20220061-8



图 18 区域编号 34 处的损伤图片 Fig. 18 Damage picture at area No. 34

图 13~图 18 给出了 SFD 内环各损伤区域的 对比照片,每个图中都包括对比组形貌(第1轮试 验开始之前)、第1轮试验(总计运行 16 h)结束 时形貌以及第2轮试验(总计运行 32 h)结束时形 貌, SFD 轴向两端安装了端封环,见图中上方与 下方红色虚线框标注,上方为远离鼠笼固定端的 外侧端封环,下方为内侧端封环,中央为油膜区, 每个图中最右侧子图给出了每个区域最终损伤凹 坑的局部放大图,便于对其空化侵蚀的形状进行 对比。

损伤图片中的损伤位置用圆圈标注,同样在 损伤位置对应的各对比组照片中同一位置也进行 标注。对比图 13~图 18 可知,凹坑深浅不一,且 损伤形状多为近似圆形,但是边界并不圆滑。图 13、 图 14、图 17 中凹坑形状类似水滴形,图 16 为椭 圆形凹坑,而图 15 和图 18 中空化损伤形态以凹 坑集群的形式存在,这与文献 [18] 中的空化侵蚀 结果类似,损伤边缘多为锯齿状,图 15 要比图 18 的损伤情况严重的多。

由上述照片对比还可以发现, 空化侵蚀的损 伤部位多位于油膜区中央或者偏下, 靠近内侧端 封环位置, 这一方面与油膜区油膜压力变化有关, 还与进油孔带入空气量和端封环处反流入 SFD 内部的空气量有关, 各影响因素所占权重还有待 进一步深入探究。

3.3 空气是否进入的评估应用问题

转子运转时 SFD 供油流量 Q_{oil}较转子静止时 要大,由 14.4 L/h 增加至 36 L/h,利用公式进行计 算来评估空气是否进入 SFD,计算参数如表 3。

将表 3 中参数代入式(1)与式(2)中,计算得到: 当 *e*=0.015 mm 时, *r* = 0.137

当 *e*=0.02 mm 时, *r* = 0.183

即r=0.137~0.183 < 1, 有空气吸入 SFD 中,

进气情况与转子振动响应密切相关,空穴效应明显,且产生的空穴效应以空气气穴为主。

enters SFD		
Table 3	Necessary parameters to evaluate whether air	
表 3	评估空气是否进入 SFD 所需必要参数	

参数	数值
转子工作时的滑油流量 Q_{oil}	36 L/h(0.01 L/s)
SFD 直径 D/mm	235
油膜区长度 L/mm	25
转子涡动半径e/mm	0.015~0.02
转子工作转速 $\Omega/(r/min)$	1 891

4 结 论

本文基于某型全尺寸航空发动机压气机-涡 轮转子试验台,前支承中采用了 SFD 结构,考核 阻尼器低油压下(0.02~0.05 MPa),转子在临界转 速附近长时间运行时,转子振动变化以及 SFD 内 油膜空化对金属表面的影响,获得了如下结论与 经验:

1) 在临界转速附近 SFD 长时间运行, 空穴效 应将对 SFD 结构造成侵蚀, 且 SFD 内环损伤程度 与外环不同, 原因可能与金属材质及表面镀层 有关;

2)在 SFD 内环金属表面的轻微损伤(侵蚀凹 坑最大深度≤1 mm)时对转子振动几乎无影响;

3) 在对 SFD 结构表面侵蚀损伤探究的同时,可以结合经验公式^[20] 判断空穴效应的程度 强弱;

4) 工程实践中,发动机检修期间有必要对 SFD 结构表面进行检查,确保发动机运行可靠性。

基于本文研究内容,后续可进一步研究影响 空化侵蚀程度的因素以及预防措施等。

参考文献:

- KU C P, TICHY J A. An experimental and theoretical study of cavitation in a finite submerged squeeze film damper[J]. Journal of Tribology, 1990, 112(4): 725-732.
- [2] DIAZ S E, SAN ANDRES L A. Measurements of pressure in a squeeze film damper with an air/oil bubbly mixture[J]. Tribology Transactions, 1998, 41(2): 282-288.
- [3] ZEIDAN F Y, VANCE J M. Cavitation leading to a two phase fluid in a squeeze film damper[J]. Tribology Transactions, 1989, 32(1): 100-104.
- [4] WANG Zhenlin, ZHANG Guanghui, WEN Jianquan, et al. Numerical modeling of the flow in the squeeze film dampers with oil feed groove by computational fluid dynamic analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017, 231(6): 693-707.
- [5] SAN ANDRÉS L, DELGADO A. Identification of force coefficients in a squeeze film damper with a mechanical end seal—centered circular orbit tests[J]. Journal of Tribology, 2007, 129(3): 660-668.
- [6] LAURENTIU M. A brief discussion regarding types of cavitation in squeeze film dampers and cavitation effects[J]. INCAS BUL-LETIN, 2017, 9(1): 71-76.
- [7] FAN Tieshu, HAMZEHLOUIA S, BEHDINAN K. The effect of lubricant inertia on fluid cavitation for high-speed squeeze film dampers[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(8): 6122-6134.
- [8] 崔颖,李婷,江齐,等.基于两相流模型的挤压油膜阻尼器 空化流场特性数值模拟[J].航空动力学报,2019,34(8):1781-1787.
 CUI Ying, LI Ting, JIANG Qi, et al. Numerical simulation on cav-

itation flow field characteristics of squeeze film damper based on two-phase flow model[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(8): 1781-1787. (in Chinese)

- [9] YAN W, LI X, LI Y. CFD simulation of air ingestion in a squeeze film damper: GT2019-91285 [R]. Phoenix, US: ASME, 2019.
- [10] IACOBELLIS V, BEHDINAN K, CHAN D, et al. Effect of hole feed system on the response of a squeeze film damper supported rotor[J]. Tribology International, 2020, 151: 106450.
- [11] TUL'CHINSKII G A, PANKRATOV G A. Experience of on-site

investigations of the cavitation erosion of hydraulic turbines[J]. Hydrotechnical Construction, 1988, 22(2): 120-123.

- [12] OKADA T, IWAI Y, AWAZU K. A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion part 1: a method for measurement of collapse pressures[J]. Wear, 1989, 133(2): 219-232.
- [13] CHEN Haosheng, LI Jiang, CHEN Darong, et al. Damages on steel surface at the incubation stage of the vibration cavitation erosion in water[J]. Wear, 2008, 265(5/6): 692-698.
- [14] OKA Y I, HAYASHI H. Evaluation of erosion resistance for metal-ceramic composites and cermets using a water-jet testing apparatus[J]. Wear, 2011, 271(9/10): 1397-1403.
- [15] KAZAMA T, KUMAGAI K, OSAFUNE Y, et al. Erosion of grooved surfaces by cavitating jet with hydraulic oil[J]. Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, 2015, 3(2): 41-50.
- [16] DULAR M, PETKOVŠEK M. On the mechanisms of cavitation erosion-coupling high speed videos to damage patterns[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 68: 359-370.
- [17] ROMANOV A, EVDOKIMOV S, SELIVERSTOV V. Cavitation research results of hydroturbine impeller blades and their analysis[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 196: 02006.
- [18] ABOUEL-KASEM A, OSMAN O O, KARRAB S A, et al. The limited role of pit formed by microjet in evolution of cavitation erosion in the incubation period[J]. Journal of Tribology, 2022, 144(4): 041702.
- [19] ZAKRZEWSKA D E, BUSZKO M H, KRELLA A K, et al. Damage development on the surface of nickel coating in the initial period of erosion[J]. Materials, 2021, 14(11): 3123.1-3123.14.
- [20] ZEIDAN F, VANCE J. Cavitation and air entrainment effects on the response of squeeze film supported rotors[J]. Journal of Tribology, 1990, 112(2): 347-353.
- [21] DIAZ S, SAN ANDRE'S L. A model for squeeze film dampers operating with air entrainment and validation with experiments[J]. Journal of Tribology, 2001, 123(1): 125-133.
- [22] 张微, 王浩洁, 丁千, 等. 极低压下两相流挤压油膜阻尼器 油膜参数特性[J]. 航空动力学报, 2020, 35(3): 560-568. ZHANG Wei, WANG Haojie, DING Qian, et al. Oil film characteristic of two-phase flow squeeze film damper under extremely low oil supply pressure[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(3): 560-568. (in Chinese)

(编辑:张 雪)