航空发动机离心通风器金属海绵芯体改进与验证

侯宏建[1],胡兴龙[1],苏 壮[1],谷智赢[1],赵 鹏[2]

(1. 中国航发沈阳发动机研究所 中国航空发动机集团航空发动机动力传输重点实验室,沈阳 110015;2. 北京钢研高纳科技股份有限公司 高温合金新材料北京市重点实验室,北京 100081)

摘 要: 针对航空发动机装配的金属海绵式超高转速离心通风器试验时出现的金属海绵芯体及销钉变形问题,对该离心通风器的金属海绵芯体及销钉结构开展强度计算。结果表明,金属海绵芯体结构强度不足是导致金属海绵芯体及销钉变形的主要原因。为提高离心通风器结构强度,通过优化金属海绵芯体材料的合金成分,以及强化金属海绵芯体的制备工艺,提升了芯体的屈服强度和弹性模量。对改进后的金属海绵芯体开展仿真计算和试验验证,结果表明改进后的金属海绵芯体及销钉应力明显减小,改进芯体后的金属海绵式超高转速离心通风器寿命满足发动机使用要求。

关键词: 航空发动机;润滑系统;离心通风器;金属海绵;强度计算;制备工艺

中图分类号: V263.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620(2026)01-0119-08

DOI: 10.3724/j.GTER.20260002

Improvement and validation of metal foam core for aero-engine centrifugal ventilator

HOU Hongjian[1], HU Xinglong[1], SU Zhuang[1], GU Zhiying[1], ZHAO Peng[2]

(1. Key Laboratory of Power Transmission Technology on Aero Engine Corporation of China, AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China; 2. Beijing Key Laboratory of Advanced Superalloy Materials, Beijing Gaona Aero Material Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: In view of the deformation problem of metal foam core and pin during the test of the metal foam ultra-high speed centrifugal ventilator assembled in aero-engines, the strength calculation of the metal foam core and pin structure of the centrifugal ventilator was carried out. The results show that insufficient structural strength of the metal foam core is the main cause of the deformation of the metal foam core and pin. To improve the structural strength of the centrifugal ventilator, the yield strength and elastic modulus of the core were enhanced by optimizing the alloy composition of the metal foam core material and strengthening its preparation process. Simulation calculations and test verifications were conducted on the improved metal foam core. The results indicate that the stress of the improved metal foam core and pin is significantly reduced, and the service life of the metal foam ultra-high speed centrifugal ventilator with the improved core can satisfy the operational requirements of aero-engine.

Key words: aero-engine; lubrication system; centrifugal ventilator; metal foam; strength calculation; preparation process

收稿日期: 2025-05-21

基金项目: 企业委托科技项目(横20240404)

作者简介: 侯宏建(1988−),男,河北秦皇岛人,高级工程师,硕士,主要从事航空发动机润滑系统设计工作。

引用格式: 侯宏建,胡兴龙,苏 壮,等. 航空发动机离心通风器金属海绵芯体改进与验证[J]. 燃气涡轮试验与研究,2026,39(1):119−126. HOU Hongjian,HU Xinglong,SU Zhuang,et al. Improvement and validation of metal foam core for aero-engine centrifugal ventilator[J]. Gas Turbine Experiment and Research,2026,39(1):119−126.

0 引言

离心通风器是航空发动机润滑系统的重要组成部分[1],安装于发动机附件机匣内。其主要功能为依靠离心力的作用,分离通风管路中的油气混合物,并收集滑油,降低发动机排气系统中的滑油含量,保证滑油消耗量满足发动机续航要求[2]。离心通风器属于旋转构件,对发动机安全影响较大,为此需开展相关计算及试验,以确保其结构的可靠性。

目前,国内外针对离心通风器的研究以性能分析为主。EASTWICK等[3]对通风器内部流场进行了数值计算,并分析了相关结构对性能的影响;ELSAYED[4]、GLAHN[5-6]等对离心通风器在油气两相流条件下的速度、阻力以及分离效率进行了研究;蔡毅等[7]为获取航空发动机离心通风器性能,通过试验模拟了通风器的油雾工作环境,综合运用测质量法与光学测量方法,获取了分离效率、粒径分布与压降数据,发现空气质量基本不影响粒度分布,压降随质量流量、转速增加而增加;徐让书[8]、韩金在[9]、荆帅[10]等采用CFD等仿真软件对通风器性能进行了数值计算,得到了不同工况条件下通风器的压力分布、分离效率、液相轨迹等;陈会敏[11]运用FloEFD软件对金属泡沫离心通风器内部流动进行了三维数值仿真,制定了金属泡沫离心通风装置阻力特性分析方案。针对离心通风器故障分析,可成河等[12]根据离心通风器故障件的破坏形貌分析结果以及光弹性试验结果建立了离心通风器壳体力学模型,确定了离心通风器可靠性降低的原因,并提出了相应的解决措施;赵宏达[13]针对某型离心通风器断裂故障进行了结构分析以及断口金相检查,并开展了动应力试验,确定通风器断裂的主要原因为离心通风器齿轮轴在工作转速范围内发生了共振。

某型航空发动机创新性地采用了滑油附件与附件机匣一体化的结构设计,将原本需多个附件实现的功能集成在一个附件上。该设计减少了附件机匣的传动轴数量,缩短了传动链,缩小了附件的体积和占用空间,但大幅提高了离心通风器传动轴转速,随之提高了对离心通风器可靠性的要求。本文针对该型发动机离心通风器试验时出现的内部金属海绵芯体及销钉变形问题,建立了强度计算模型,并结合仿真结果对金属海绵芯体材料的合金成分及制备工艺进行了改进;随后对改进后的芯体开展了仿真计算与试验验证。本研究可为后续通风器的优化设计提供借鉴。

1 离心通风器及金属海绵芯体结构

离心通风器主要由通风器转子、通风器外罩、金属海绵芯体(3件)以及销钉(3件)构成,如图1所示。附件机匣内的油气混合物由通风器外罩进入金属海绵芯体(图2),通过转子旋转离心作用,混合物中的绝大部分滑油被甩至通风器外罩内壁面,并通过回油孔流回机匣腔内;混合物中的空气以及少量滑油由转子轴心排出至发动机外。图3示出了离心通风器的工作原理。通风器中的金属海绵芯体由销钉固定于通风器外罩,避免串动。

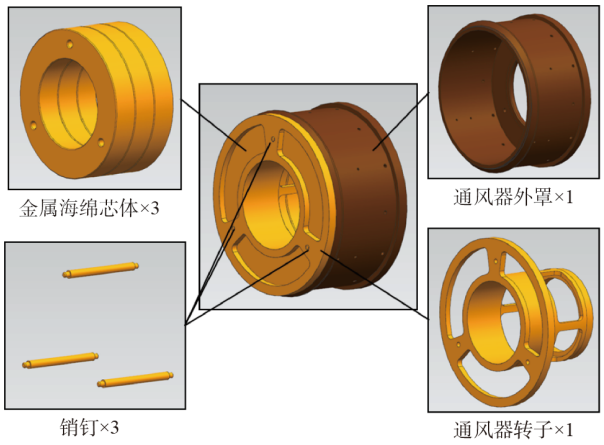


图1 离心通风器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the centrifugal ventilator structure

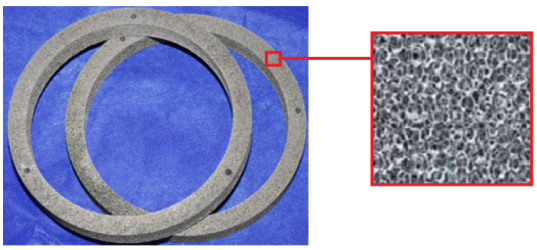


图2 金属海绵芯体结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the metal foam core structure

2 问题概况及分析

2.1 问题概况

在离心通风器随附件机匣开展寿命试验(通风器运转时间约240 h)后,对金属海绵芯体进行CT扫描,发现金属海绵芯体内径有所增加,通风器转子与芯体不再贴合。对其进行分解检查,发现金属海绵

芯体和销钉均出现轻微变形。具体如图4、图5所示。

2.2 问题分析

由图5可以看出,通风器内部的金属海绵内环与转子外壁面出现了分离,且靠近外罩位置的海绵芯体出现了轻微堆积。这表明通风器在超高转速(最高稳态转速为27 000 r/min)条件下长时间工作时产生了变形,固定金属海绵芯体的销钉也随之发生变形。

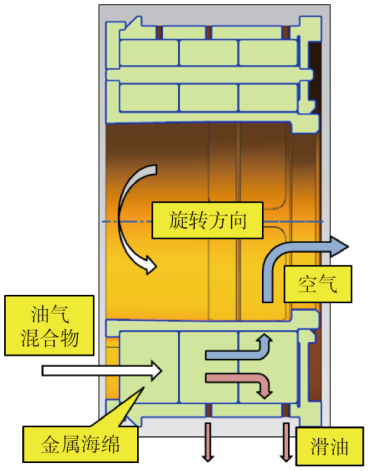


图3 离心通风器原理

Fig.3 Principle of the centrifugal ventilator

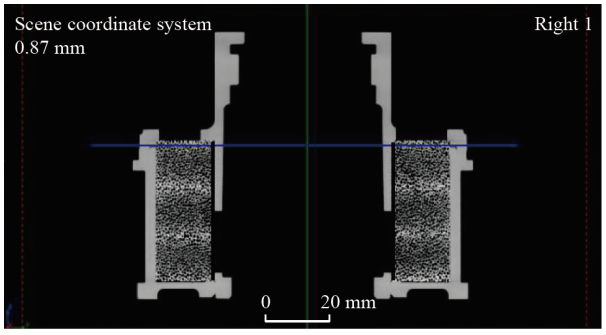


图4 金属海绵芯体CT扫描结果

Fig.4 CT scan results of the metal foam core



图5 金属海绵芯体及销钉分解检查照片

Fig.5 Inspection photos of the metal foam core and pins

对该批次离心通风器金属海绵芯体材料的屈服强度$\sigma_{p1.0}$、弹性模量E_C进行复查,结果如表1所示。其中,$\sigma_{p1.0}$定义为海绵材料非比例压缩率为1%时的应力。

表1 金属海绵芯体材料参数

Table 1 Material parameters of the metal foam core

件号	$\sigma_{p1.0}$/MPa	E_C/MPa
1	5.10	566
2	5.05	429
3	4.69	548
4	4.20	444
5	3.96	383

对离心通风器开展应力分析计算,建立如图6所示的有限元模型。计算工况为:转速27 000 r/min,环境温度150 ℃,材料参数取各试验件的平均值。金属海绵芯体以及销钉的强度计算结果分别如图7、图8所示[14]。由图可知,金属海绵芯体在离心力作用下产生径向变形,导致金属海绵芯体与销钉结合处产生了较大应力;销钉在自身离心力以及金属海绵芯体压力的共同作用下,其应力处于较高水平,导致自身发生弯曲变形。

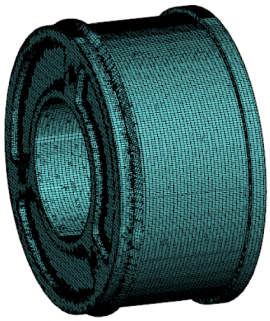


图6 离心通风器模型

Fig.6 Model of the centrifugal ventilator

2.3 改进措施

在不显著增加材料密度的前提下,采取了以下改进措施:对金属海绵芯体材料合金成分进行优化,采用NiCrAl三元合金体系替代原NiCr二元合金体系;将材料强化方式由单纯合金固溶强化,改为固溶强化与沉淀强化相结合,提升材料比强度及比模量;开展金属海绵芯体材料显微结构分析及晶粒尺寸研究,制定结构优化工艺验证方案,确定提升材料强度最优的金属海绵三维网格结构。通过大量工艺试

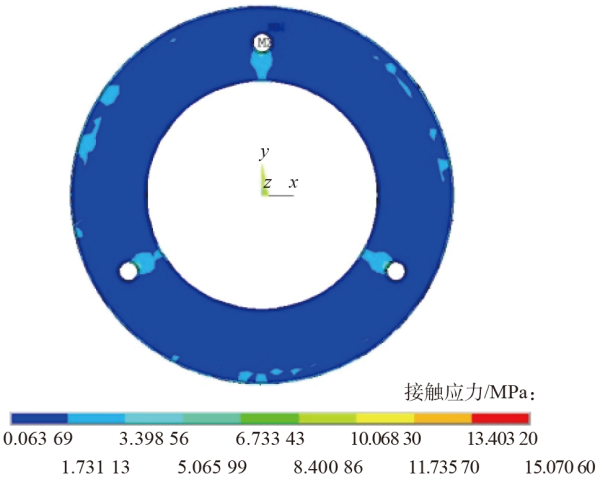


图7 金属海绵芯体应力分布

Fig.7 Stress distribution of the metal foam core

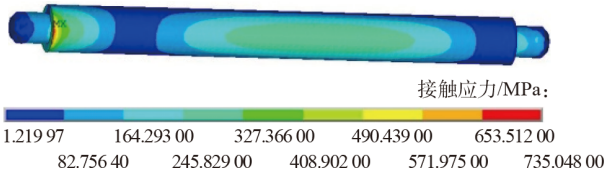


图8 销钉应力分布

Fig.8 Stress distribution of the pin

验，最终明确了Ni、Cr、Al成分分层覆膜及长时固溶合金化的制备工艺方法。采用万能试验机分别测试改进前后金属海绵芯体材料的室温准静态压缩性能。不同成分金属海绵芯体材料的压缩应力−应变曲线如图9所示。

金属海绵芯体材料的表观密度定义为海绵质量与其所占空间体积之比；应力−应变曲线初始线性阶段的斜率定义为点阵材料的弹性模量。

由图9可以看出，NiCrAl合金海绵芯体材料在压缩过程中曲线平滑、应力平台区平缓稳定，与NiCr合金海绵芯体材料的压缩曲线类似。同时，在材料密度水平保持不变的情况下，NiCrAl合金海绵芯体材料的$\sigma_{p1.0}$和E_C，均较NiCr合金的有较大提升，如表2所示。密度为0.63 g/cm^{3}的NiCr合金海绵芯体材料的压缩强度为4.6 MPa，弹性模量为474 MPa，对应的比强度为7.3 MPa·g^{-1}·cm^3，比模量为0.75 GPa·g^{-1}·cm^3。密度为0.66 g/cm^{3}的NiCrAl合金海绵芯体材料的压缩强度为10.1 MPa，弹性模量为803 MPa，对应的比强度为15.3 MPa·g^{-1}·cm^3，比模量为1.22 GPa·g^{-1}·cm^3。改进后的金属海绵芯体材料的比强度提升了110%，比模量提升了63%。力学性能获得了大幅提升，表

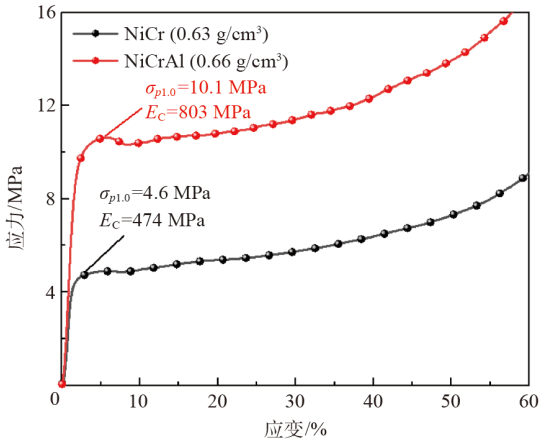


图9 不同成分金属海绵芯体材料的压缩应力−应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves under compression for metal foam cores of varying compositions

表2 改进前后金属海绵芯体材料强度对比

Table 2 Comparison of strength of the metal foam core materials before and after improvement

状态	$\sigma_{p1.0}$/MPa	E_C/MPa
改进前	4.6	474
改进后	10.1	803

明材料的抗变形能力得到了有效改善。

针对改进后的金属海绵芯体及销钉开展强度计算[14]，计算所采用的转速及环境温度工况与改进前的保持一致，计算结果见图10、图11。可以看出，由于改进后金属海绵芯体的弹性模量提高，其变形量有效降低。金属海绵芯体的最大应力由改进前的15.0 MPa降至5.4 MPa，满足屈服强度要求；销钉的

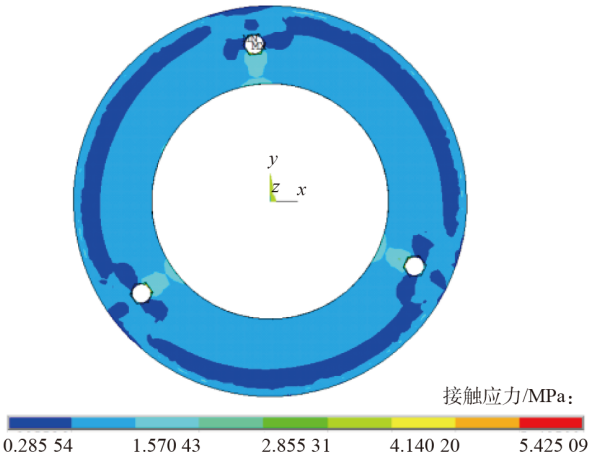


图10 改进后金属海绵芯体应力分布

Fig.10 Stress distribution of the metal foam core after the improvement

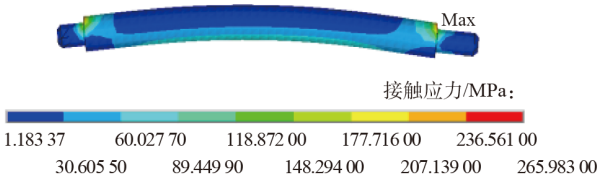


图11 改进后销钉应力分布

Fig.11 Stress distribution of the pin after the improvement

最大应力由改进前的735 MPa降至245 MPa,低于材料的屈服强度(674 MPa),亦满足屈服强度要求。

3 试验验证

为验证改进后的金属海绵芯体是否满足要求,对配装改进金属海绵芯体的离心通风器分别开展超转试验和寿命试验。

3.1 超转试验验证

3.1.1 试验前检查

试验前,对离心通风器进行CT扫描,结果见图12。可以看出,金属海绵芯体组织均匀,销钉装配正常。

3.1.2 试验工况

超转试验器无法开展高温环境试验,因此需确定合适的温度修正系数,以实现在常温环境(20 ℃)下模拟金属海绵芯体在高温环境(150 ℃)下的工作状态。金属海绵芯体材料为NiCrAl合金,20 ℃下的抗拉强度为700 MPa,150 ℃下的抗拉强度为630 MPa[15]。离心通风器的最高转速为28 350 r/min(最高稳态转速的105%),工作温度与发动机附件机匣腔温度接近,取平均温度150 ℃。温度修正系数见表3。

表3 超转试验温度修正系数

Table 3 Temperature correction coefficients for overspeed test

温度/℃	抗拉强度/MPa	温度修正系数
20	700	1.054 1
150	630	

超转转速设为最高转速的115%,结合温度修正系数计算结果,确定离心通风器超转试验的转速为34 366 r/min(28 350 r/min×1.054 1×115%)。超转试验要求在此转速下稳态运转5 min。

3.1.3 试验结果

超转试验后,对离心通风器进行CT扫描,结果见图13。可以看出,超转试验后金属海绵芯体结构依旧均匀,与壳体内外圆、上下端面以及销钉贴合紧密,未发生明显变形和掉块。

3.2 寿命试验验证

3.2.1 试验前检查

为进一步验证金属海绵芯体的持久运行能力,在旋转试验器上开展寿命试验。试验前对离心通风器进行CT扫描,结果见图14。可以看出,金属海绵芯体组织均匀,销钉装配正常。

3.2.2 试验工况

结合发动机实际运行转速情况,制定了通风器寿命试验程序,其最高转速为28 350 r/min,如图15所示。整个试验程序共计10 h,最终需运行200个循环。

3.2.3 试验结果

在离心通风器完成600、1 500、2 000 h试验后,分别对其进行CT扫描,结果见图16。可以看出,经长时间寿命试验后,金属海绵芯体与销钉接触部位

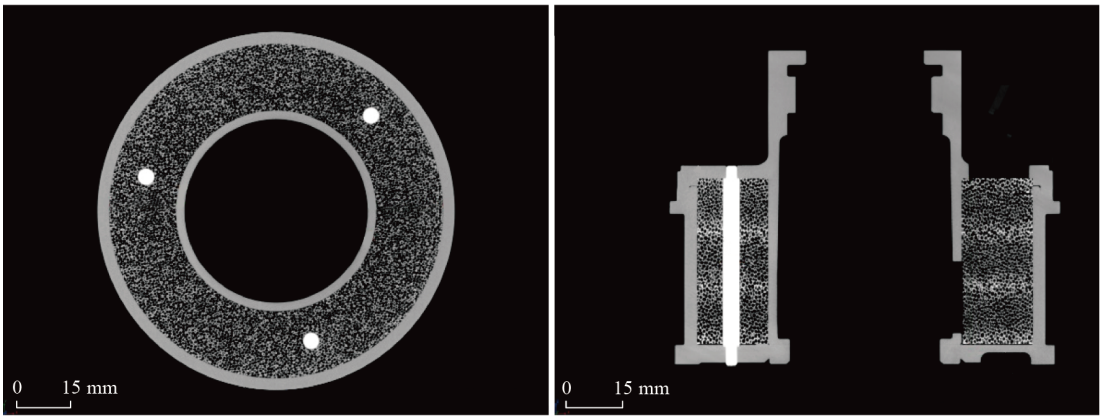


图12 超转试验前离心通风器CT扫描结果

Fig.12 CT scan results of the centrifugal ventilator before overspeed test

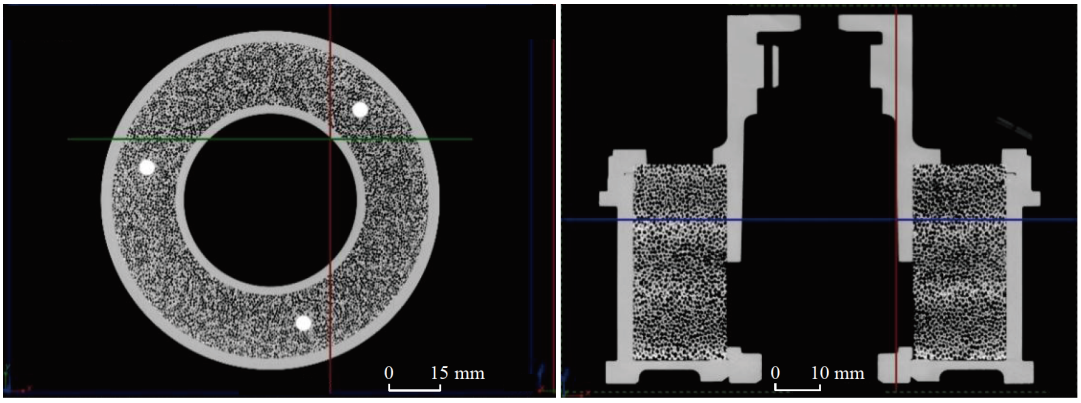


图13 超转试验后离心通风器CT扫描结果

Fig.13 CT scan results of the centrifugal ventilator after overspeed test

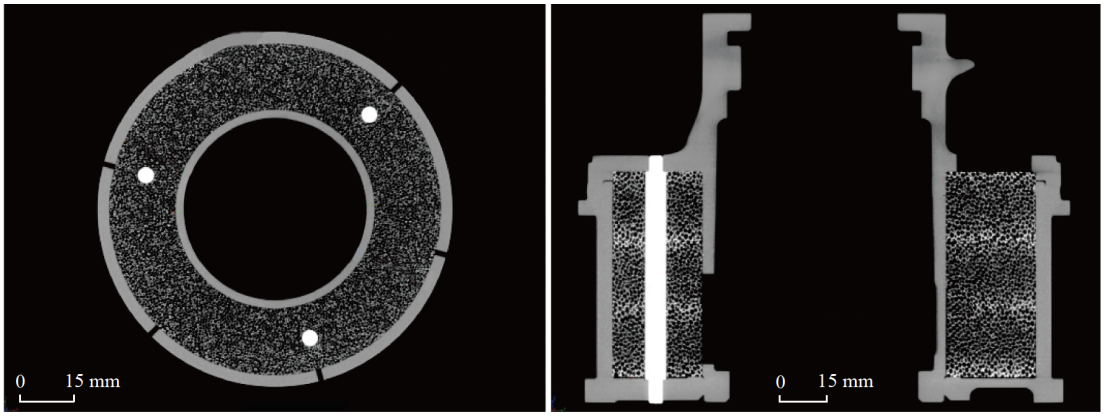


图14 寿命试验前离心通风器CT扫描结果

Fig.14 CT scan results of the centrifugal ventilator before endurance test

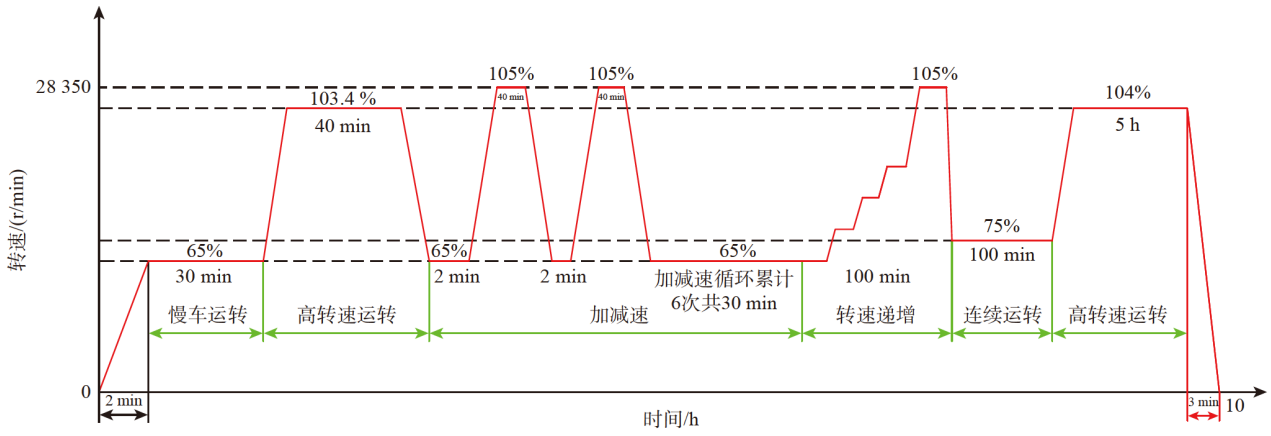


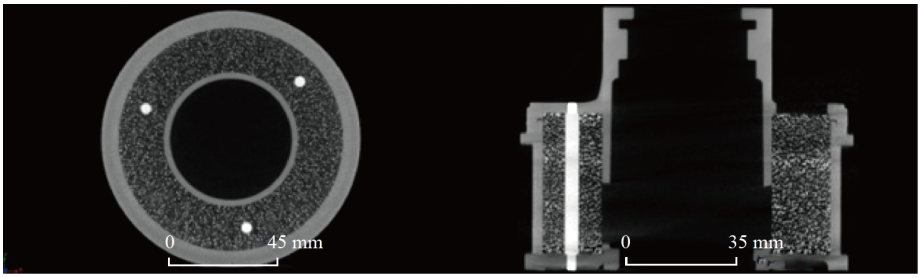
图15 通风器寿命试验转速图谱

Fig.15 Endurance test speed curve of the centrifugal ventilator

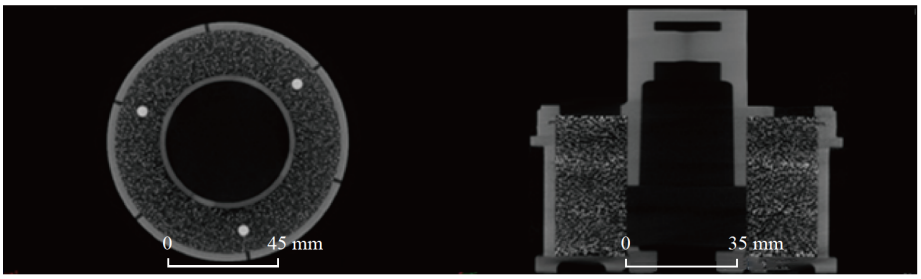
未见异常;与壳体外壁接触部位未见密集堆积现象;与壳体内壁贴合良好,未见塑性变形导致的分离。以上试验结果表明,改进后的金属海绵芯体具备优异的抗变形能力。

4 结论

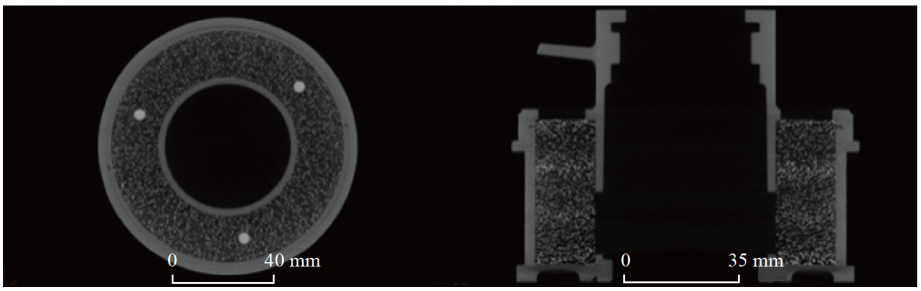
针对通风器内金属海绵芯体及销钉变形问题,开展了问题原因分析,并采取了相应的改进措施;随后对改进后的通风器完成了试验验证。主要结论



(a) 600 h



(b) 1 500 h



(c) 2 000 h

图16 寿命试验后离心通风器CT扫描结果

Fig.16 CT scan results of the centrifugal ventilator after endurance test

如下:

(1) 离心通风器内金属海绵芯体及销钉变形原因为金属海绵芯体材料结构强度不足,在高转速下发生了变形。

(2) 针对金属海绵芯体材料结构强度不足问题,对金属海绵芯体材料成分及制备工艺进行了优化,使其弹性模量达到了803 MPa,压缩屈服强度达到了10.1 MPa,满足了使用要求。

(3) 对装配改进金属海绵芯体的通风器开展了超转及寿命试验,验证了改进方案的可行性。

(4) 针对金属海绵芯体改进的数值计算方法、温度修正系数确定方法以及试验参数确定方法,可为离心通风器优化设计提供技术支持。

参考文献:

[1] 胡兴海. 某型发动机滑油系统设计说明书[R]. 沈阳:中国航发沈阳发动机研究所,2005.
HU Xinghai. Design specification for lubricating oil system of a certain type of engine[R]. Shenyang:AECC Shenyang Engine Research Institute,2005. (in Chinese)

[2] 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,2002:511-512.
LIN Jishu. Aircraft engine design manual (volume 12): transmission and lubrication system[M]. Beijing:Aviation Industry Press,2002:511-512. (in Chinese)

[3] EASTWICK C N,SIMMONS K,WANG Y,et al. Study of aero-engine oil-air separators[J]. Journal of Power and Energy,2006,220(7):707-717.

[4] ELSAYED K,LACOR C. Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations[J]. Chemical Engineering Science,2010,65(22):6048-6058.

[5] GLAHN A,BUSAM S,BLAIR M F,et al. Droplet generation by disintegration of oil films at the rim of a rotating disk[J]. Journal of Engineering for Gas

Turbines and Power,2002,124(1):117−124.

[6] GLAHN A,BLAIR M F,ALLARD K L,et al. Disintegration of oil jets emerging from axial passages at the face of a rotating cylinder[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2003,125(4):1003−1110.

[7] 蔡 毅,杨家军,马 磊. 航空发动机离心通风器性能试验[J]. 航空动力学报,2021,36(12):2683−2688.
CAI Yi,YANG Jiajun,MA Lei. Aero-engine centrifugal separator performance test[J]. Journal of Aerospace Power,2021,36(12):2683−2688. (in Chinese)

[8] 徐让书,邵长浩,牛 玲,等. 结构因素对离心通风器性能影响的数值研究[J]. 航空发动机,2014,40(6):18−23.
XU Rangshu,SHAO Changhao,NIU Ling,et al. Numerical study on efficiency of centrifugal breather's performance by structural factors[J]. Aeroengine,2014,40(6):18−23. (in Chinese)

[9] 韩金在,陈聪慧,徐让书. 超高转速离心通风器性能仿真分析[J]. 航空动力学报,2016,31(3):685−691.
HAN Jinzai,CHEN Conghui,XU Rangshu. Simulation analysis on performance of a high speed centrifugal oil-air separetor[J]. Journal of Aerospace Power,2016,31(3):685−691. (in Chinese)

[10] 荆 帅,谷 俊,马庆岩,等. 辐板式通风器阻力计算方法及影响因素分析[J]. 航空发动机,2021,47(5):55−61.
JING Shuai,GU Jun,MA Qingyan,et al. Resistance calculation method and influence factors analysis of the separator with blades[J]. Aeroengine,2021,47(5):55−61. (in Chinese)

[11] 陈会敏. 金属泡沫离心通风器内流体流动阻力特性研究[J]. 现代制造技术与装备,2019,(4):17−18.
CHEN Huimin. Characteristics of fluid flow resistance in metal foam centrifugal ventilator[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment,2019,(4):17−18. (in Chinese)

[12] 可成河,董本涵,高鹏飞,等. 离心通风器壳体失效分析[J]. 航空发动机,2002,28(3):21−26.
KE Chenghe,DONG Benhan,GAO Pengfei,et al. The structure failure analysis of centrifugal ventilator shell [J]. Aeroengine,2002,28(3):21−26. (in Chinese)

[13] 赵宏达. 航空发动机离心通风器断裂故障分析与排除[J]. 航空发动机,2019,45(3):65−69.
ZHAO Hongda. Fracture failure analysis and improvement research of an aeroengine centrifugal ventilator [J]. Aeroengine,2019,45(3):65−69. (in Chinese)

[14] 张洪才. ANSYS 14.0理论解析与工程应用实例[M]. 北京:机械工业出版社,2012:504−532.
ZHANG Hongcai. Theoretical analysis and engineering application examples of ANSYS 14.0[M]. Beijing:China Machine Press,2012:504−532. (in Chinese)

[15] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册:第1卷[M]. 北京:中国标准出版社,1988:721−800.
China Aeronautical Materials Handbook Editorial Committee. China aeronautical materials handbook: volume 1 [M]. Beijing:China Standard Press,1988:721−800. (in Chinese)