

航空发动机积垢和在线清洗技术研究进展

王立文, 霍金鉴, 鲁鑫, 刘强, 唐杰
(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 随着中国民航事业的发展, 航空发动机的经济性与安全性至关重要。压气机积垢是造成航空发动机性能降低的主要因素之一, 发动机在线清洗是目前经济有效的除垢手段, 积垢的清除效果与清洗系统参数密切相关。系统总结了发动机积垢机理和清除技术研究现状, 分析评述了用于评估积垢效应的模型, 考虑垢质颗粒运动过程中的聚合、破碎和表面侵蚀, 进一步量化沉积效应和时间尺度, 改进数值模拟过程、提高模型精度等方面尚需优化。同时对在线清洗参数和清洗时机进行了深入讨论, 指出了不同在线清洗参数和清洗时机的清洗效果目前还处于初步研究阶段, 还应加强对射流系统的喷雾覆盖范围、液滴尺寸和清洗频率的研究, 建议在积垢程度、不同压气机尺寸和在线清洗经济性等方面进一步优化清洗工艺参数和清洗时机。

关键词: 航空发动机; 颗粒物沉积; 沉积模型; 在线清洗; 液滴尺寸; 射流系统

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.01.003

Research Progress on Aeroengine Fouling and Online Cleaning Technology

WANG Li-wen, HUO Jin-jian, LU Xin, LIU Qiang, TANG Jie

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: With the development of China's civil aviation industry, the economy and safety of aeroengines are crucial. Compressor fouling is one of the main factors contributing to aeroengine performance deterioration. Online washing of engines is currently an economical and effective method of descaling. The removal effect of fouling is closely related to the cleaning system parameters. This paper systematically summarizes the current research status of engine fouling mechanisms and removal technologies, and analyzes and reviews the models for fouling effects evaluation. Considering the aggregation, fragmentation, and surface erosion during the movement of foulant particles, the areas in need of optimization include further quantifying the deposition effect and time scale, improving the numerical simulation process, and improving the accuracy of the model, etc. Then the online cleaning parameters and cleaning timing are discussed in depth, and it is pointed out that the research on cleaning effects of different online cleaning parameters and cleaning timing are still in the preliminary stage. The research on the spray coverage, droplet size, and cleaning frequency of the jet system should also be strengthened. It is recommended to further optimize the cleaning process parameters and cleaning timing based on the degree of fouling, different compressor sizes, and online cleaning economy.

Key words: aeroengine; particle deposition; deposition model; online washing; droplet size; jet system

0 引言

随着中国民用航空事业的迅速发展, 对航空发动机的性能提出更高要求, 其健康状态对保证飞行安全具有重要影响^[1-2]。在中国西部靠近沙漠和东部沿海地区的机场, 飞机在恶劣的环境中工作, 沙子和盐雾水滴对发动机造成严重的积垢和侵蚀^[3]。

发动机在地面和空中长期运行过程中, 灰尘、烟尘、水滴、碳氢气体溶胶、花粉和盐等细小颗粒随着空气

进入压气机内部, 粘附在压气机叶片表面和内涵道, 增加了叶片和内涵道表面粗糙度, 使流通面积减小及攻角的改变, 导致压气机的流量和推力减小、效率降低。对于需要额定推力的发动机, 其控制系统通过增加燃料流量来弥补推力的减小, 导致排气温度升高和燃料流量增大, 排气温度裕度减小, 进而易引发喘振, 降低发动机运行的可靠性^[4-6]。李冬^[7]定量研究了积垢沉积引起叶片粗糙度增大对压气机性能衰退的影

收稿日期: 2020-09-09 基金项目: 国家自然科学基金(U1933202)资助

作者简介: 王立文(1962), 男, 博士, 教授。

引用格式: 王立文, 霍金鉴, 鲁鑫, 等. 航空发动机积垢和在线清洗技术研究进展[J]. 航空发动机, 2024, 50(1): 20-27. WANG Liwen, HUO Jinjian, LU Xin, et al. Research progress on aeroengine fouling and online cleaning technology[J]. Aeroengine, 2024, 50(1): 20-27.

响。在工业燃气轮机使用中,总体性能退化的 70%~80% 是由积垢造成的^[8-10]。工业燃气轮机和航空发动机的工作原理相同,在使用过程中发生的微颗粒粘附和维持过程中采用的积垢清除方式也基本类似,可相互借鉴,但由于工业燃气轮机有先进的过滤系统,通过过滤系统可除去引起侵蚀的大颗粒,而航空发动机没有过滤系统,较大的颗粒会吸入发动机内部,更易造成风扇和压气机叶片的侵蚀和机械损伤^[11]。Wensky^[12]指出在侵蚀和沉积效应相互叠加下使压气机叶片的报废率提高,加剧了发动机性能的恶化。随着市场竞争的愈发激烈,在保证发动机可靠性的前提下,航空公司尽可能地节约发动机的维护成本,延长其在翼使用时间。Brittain^[13]通过试验证明了在翼清洗可从叶片表面清除积垢颗粒,降低表面粗糙度,增加叶片间的有效面积,恢复发动机的气动性能,降低油耗成本。王悦阁^[14]将发动机清洗分为离线和在线 2 种清洗方式。离线清洗是将发动机拆下机翼采用人工清洗,清洗效果很好,但时间和经济成本很高;而在线清洗是发动机在机翼的情况下,启动马达带动发动机在进气口处安装喷嘴进行清洗。该清洗方式被多家航空公司作为定期维护发动机的基本程序^[15-16],可提高发动机的可靠性和经济性。

近几十年来,许多国家对发动机在线清洗技术进行了初步探索。本文在大量文献调研的基础上,介绍国内外学者在压气机垢质粘附机理和清除机理方面的研究进展,指出了压气机积垢粘附机理和清除技术的发展方向。

1 积垢形成机理

航空发动机积垢的主要来源是大气中存在的大量尘埃和气溶胶颗粒^[17]等悬浮的颗粒物,随气流进入压气机内部后在叶片表面沉积,在高温高压作用下逐渐形成积垢,如图 1 所示。空气中的气溶胶颗粒和发动机内部泄漏的润滑油使微颗粒更易粘附在叶片表面。污垢堆积导致发动机性能衰退,燃油消耗增加,甚至导致不必要的下发送修,使发动机在翼时间缩短约 50%。对积垢 X 光谱分析如图 2 所示,这些垢质主要由水溶性和非水溶性化合物组成^[18]。水溶性化合物含有氯化物,其具有吸湿性和腐蚀性;非水溶性化合物主要是土壤和有机化合物,其成分包括 Si、C 和 O 等。对航空发动机积垢形成机理研究为在线清洗提

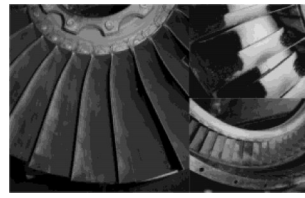


图 1 积垢叶片

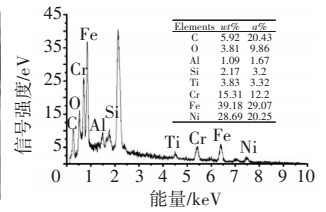


图 2 EDX 光谱分析

供了理论依据。

1.1 积垢颗粒运动

颗粒物与气流相互作用流经叶栅通道时,主要受惯性作用、湍流扩散、布朗扩散和外力作用等影响,理想情况下应随气流流动。当入口气流发生畸变时,颗粒受到的空气曳力一旦小于惯性力、离心力和科里奥利力,颗粒将偏离原始气流轨迹并与叶片和内涵道发生碰撞,导致颗粒物反弹或粘附。微颗粒在流场中沉积在圆柱体上,圆柱周围颗粒沉积机制如图 3 所示。

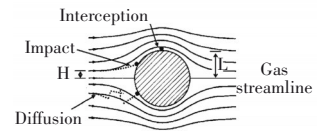


图 3 圆柱周围颗粒沉积机制

20 世纪 80 年代, Parker^[19]首次测试了叶片周围沉积颗粒的分布;在此基础上,Fuchs^[20]提出一种惯性机制,将气体路径和颗粒路径之间的偏差概括为气体加速度、颗粒尺寸和密度的函数。粒子行为由斯托克斯数获得

$$St = \frac{\rho_d d_p^2 U}{18\mu \cdot 2L} L = s \sin(\beta_b - \beta_1) \quad (1)$$

式中: ρ_d 为颗粒物密度, kg/m^3 ; d_p 为颗粒物直径, m ; U 为气流速度, m/s ; μ 为黏度系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; s 为弦长, m 。

叶片中的流动偏转将导致颗粒偏离流动路径,具有较大斯托克斯数的大颗粒将产生更大偏差,因此更容易到达叶片表面。随着计算流体力学的发展,开始使用数值模拟来预测颗粒沉积的概率。Slater 等^[21]于 2003 年采用全欧拉双流体方法预测颗粒物从 2 维气流到达叶片表面的沉积概率,考虑了叶片几何特征和颗粒惯性之间的相互作用;Song 等^[22]考虑压气机叶栅内真实流动情况,将叶栅简化为平板,发现低速时有更多的颗粒物偏离主流;Ghenaiet^[23]利用拉格朗日法模拟了涡扇发动机 PW-JT8-D17 压气机内的流场特性和粒子动力学,颗粒物在较大的惯性和离心力的作用下,一部分通过叶尖间隙穿过叶片,另一部分在压力作用下重新沉积在叶片表面,引起叶片表面的积垢;Saxena 等^[24]通过将颗粒形状因子结合到斯托克斯

阻力方程中,利用 ANSYS CFX 多相流求解器模拟了颗粒形状对运动的影响,表明非球形颗粒比球形颗粒受到更大的阻力。

在叶片表面和自由流之间形成的边界层中,最初是层流边界层,逐渐过渡到湍流边界层。边界层内流速较低,通过扩散可实现垂直于流线的粒子输送。在轴流压气机的流速下,湍流可以认为是各种不同尺度的漩涡,使垂直流线的粒子传输大大增加,通常湍流的扩散比层流中的扩散大几个数量级^[25]。Levine^[26]发现积垢的主要影响因素是亚微米级颗粒,其沉积机制不是惯性机制,而是与原始浓度成比例扩散,通过湍流大大增强了颗粒向表面的传输;Suman 等^[27]在仿真模拟压气机积垢过程中发现,小颗粒物通过扩散沉积可覆盖叶片两侧,而较大的颗粒主要集中在压力侧和叶片前缘。总之,积垢的形成机理尚未成熟,对于颗粒物沉积主要作用机制还需进一步验证。

1.2 垢质颗粒与壁面粘附机理

通过了解颗粒粘附在壁面上的条件,对垢质清除机理有重要的指导作用。颗粒在压气机叶片表面粘附的问题复杂,涉及到材料属性、表面条件、颗粒尺寸等多方面。颗粒是否粘附主要取决于颗粒与壁面之间的粘附力和边界层中的剪切力^[28]2种因素。Hinds^[29]发现微米级颗粒的粘附力是其他作用力的很多倍,即使在干燥表面,颗粒的粘附力也非常大。而大气气溶胶液体撞击在叶片表面,液滴变形并在表面铺展,产生一层黏性薄膜,这些物质类似“胶水”,为小液滴粘附提供了更有利条件。压气机内部泄漏的润滑油,通过离心力和空气动力进入气流通道,并在叶片表面形成油膜,产生了更大的粘附力,使更大的颗粒附着在叶片表面^[30-32]。

在颗粒物沉积过程中,受气流剪切力作用并在叶片表面产生位移应力。初始时颗粒与叶片表面间的粘附力大于位移应力,随着叶片表面的沉积层变厚,流动通道变窄,气流流速增加,颗粒间的粘附力减小,粘附力和位移应力达到平衡,形成稳定沉积层。Mezheritsky^[30]的研究表明稳定沉积层厚度约为 0.8~1.5 mm;Suman 等^[33-34]利用数值模拟方法研究了超细粉末和叶片表面的相互作用,发现撞击叶片表面的颗粒百分比随直径的增大而增加,较小颗粒(0.15 μm)和较大颗粒(1.50 μm)的组合决定了压气机翼型前缘上最大的沉积量,颗粒直径和流速最终影响积垢

程度。

一般用于评估积垢效应的模型旨在定义粘附系数,用该系数估算颗粒物的表面粘附概率。早期用于预测粘附概率的沉积模型主要有基于临界粘附的沉积模型和基于临界速度的沉积模型2种。Sreedharan^[35]基于临界粘附的沉积模型,粘附系数与颗粒物的黏度相关,而黏度主要取决于颗粒物的温度和化学成分,应用该沉积模型的数值模拟结果显示,粘附概率随温度呈指数增加;Singh^[36]在此基础上,考虑颗粒撞击壁面的能量损失,提出了一种改进的沉积模型来预测沉积概率;而 Brach 等^[37]根据碰撞力学和赫兹理论建立了基于临界速度的沉积模型,根据壁面材料的弹性不同,颗粒物撞击表面的冲击速度也不同,粘附概率随着材料刚度的增加而降低。因此,基于临界黏度和临界速度的沉积模型缺乏通用性。Casari 等^[38]于 2017 年提出了一种全新的粘附概率预测模型,利用颗粒的能量来估算粘附概率,建立了颗粒速度、温度和尺寸的函数,跟踪流场中的粒子并求解每个粒子的动量和温度方程,对叶片的几何形状根据积垢程度进行相应的修正,更新计算流场;Döring 等^[39]提出另一种新的沉积模型,该模型量化了飞机发动机中沉积效应的大小和时间尺度,为预测发动机整体性能的影响提供依据。总之,用于评估积垢效应的模型越来越准确完善,能够量化沉积效应和时间尺度对在线清洗时机和射流参数的确定有重要意义,成为目前沉积效应评估的研究热点。

1.3 垢质颗粒沉积位置

每级压气机的空气动力学性能取决于前一级空气动力学性能,当入口叶片和前几级的产生结垢时,压气机性能急剧降低。假设粒子以均匀分布的粒径进入压气机内部,较大的颗粒在惯性机制的作用下,脱离主气流到达叶片表面,发生碰撞反弹或粘附,部分颗粒反弹后以较低的动量再次进入主气流,在湍流扩散的机制下,被卷入下游深处,如图4所示。

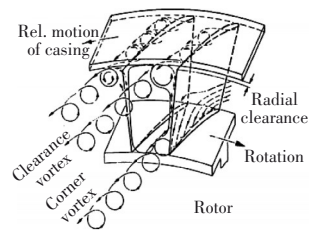


图4 颗粒物的二次流动

由于航空发动机没有过滤系统,因而发动机在工作中,前几级叶片充当了后几级的过滤器,导致压气机的前几级叶片比后级叶片污染更严重。Syverud 等^[40]针对 GEJ85-13 喷气发动

机进气道射流雾化的盐水雾滴,通过对盐层厚度和分布规律分析,发现盐晶体主要沉积在叶片压力侧和叶片前缘上,且主要集中在前4级定子叶片上;Tarabrin等^[41]同样得出相似结论,发现容易产生污垢的主要是压气机前5、6级,积垢程度从压气机第1级叶片到第6级叶片逐渐递减;Igie等^[42]发现定子叶片上的沉积物质量大约是转子上沉积物的2倍,认为离心力对颗粒物的作用,对转子叶片产生了一定的清洁效果。

基于对航空发动机积垢形成机理的研究,分析了积垢的主要成分,了解垢质和叶片表面的作用机理以及压气机叶片易积垢部位,更有针对性地选择清洗液及清洗工艺参数,为颗粒物清除提供了理论基础。随着民航运输业的飞速发展,精准及快速除垢将带来巨大经济效益。

2 在线清洗技术

发动机在线清洗为冷转转速运行,其清洁效果和经济效益与射流参数及清洗频率紧密相关。现代大型发动机给在线清洗系统带来了新的设计挑战,由于大型发动机显著增加了气流、风速、叶片长度和进气室尺寸,导致液滴轨迹过早偏转,使压气机叶片清洁效果较差^[43]。

2.1 射流系统

在线清洗喷嘴的正确定位和设计对实现均匀润湿和高清洗效率至关重要。喷嘴的设计是将少量的细雾化清洗液注入气流中,在空气气流中将其充分混合并均匀地输送到压气机内部,从而获得更好的润湿性,使清洗液更好地渗透和软化积垢。发动机转子受到离心力,叶片旋转产生较强干燥效果,其需要足够流量使叶片完全湿润。射流系统的设计直接影响压气机的清洗效率。

国内外学者设计了不同射流系统,以保证液滴更好地进入主气流,如图5所示。从图中可见,喷嘴架固定在发动机进气唇,采用4喷嘴结构,包括3个主喷嘴和1个辅助喷嘴,主喷嘴能够完全覆盖压气机内

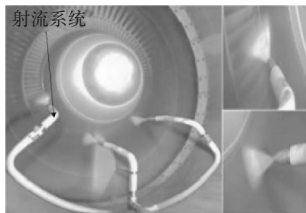


图5 在翼清洗射流系统

涵道^[44-46]。李本威等^[47-48]通过试验和有限元数值模拟确定喷嘴雾化角为 18° ,以及喷嘴在喷嘴架上的安装角;Syverud^[49]采用在线水洗系统,喷嘴位于进口导叶

前0.77 m,使用2个不同的集合管使液滴良好地覆盖环形空间,一个安装12个空气辅助的扁平喷嘴,液滴尺寸为 $25\ \mu\text{m}$,另一个配备18个全锥形喷嘴,液滴尺寸为 $75\sim 200\ \mu\text{m}$;Oosting等^[50]设计了0.4 MPa低压低流量系统,喷嘴采用空气辅助型设计,水流夹在2个高速扁平喷气中,喷气保护水滴进入主气流,避免液滴过早偏转,从而实现了更长的运动轨迹及良好的液滴分布。

2.2 液滴尺寸

射流系统仅为液滴提供初始动量,较高的压力有助于液滴的初始速度,使液滴速度更快地调整到气流速度,随后的轨迹会受到气流速度场的强烈影响^[51-52]。一旦进入压气机流场,液滴是否经过离心到达壁面取决于液滴的大小和速度,同时也决定撞击叶片时的冲击力。较小的液滴有更好地气流跟随性,更易被气流偏转,无法穿透边界层到达叶片表面。而较大的液滴,受到重力的影响,会在到达压气机叶片前从气流脱落,掉向压气机的底部。因此,射流系统必须产生合适的液滴速度并得到合适的液滴尺寸,才能保证液滴的清洗效果。

通过选择不同孔径的喷嘴,在不同注入压力下得到不同液滴尺寸,对不同试验和仿真使用的液滴尺寸见表1。Syverud^[49]使用 $25、75\ \mu\text{m}$ 的液滴清洗压气机,发现 $25\ \mu\text{m}$ 的液滴在压气机第6级会造成大量的沉积,导致其性能恶化;而 $75\ \mu\text{m}$ 的液滴在发动机整体性能恢复中最有效。Agbadede等^[53]对 $55.1、80.2\ \mu\text{m}$ 液滴的洗涤效果与污损情况进行比较,发现 $80.2\ \mu\text{m}$ 的液滴清洗叶片出口气流角恢复最好,认为较大尺寸液滴的洗涤效果比较小液滴的更好,但没有给出具体的液滴尺寸范围。蒋科艺等^[54]利用流场仿真技术,对清洗系统进行了参数优选。对于液滴穿越叶栅的效果,认为 $300\ \mu\text{m}$ 的液滴能更好地进入压气机叶栅通道。综上所述,国内外学者对液滴参数的选择研究尚未成熟,因此,开展液滴尺寸跟随风扇直径与压气机

表1 在翼清洗射流参数

作者	压力/MPa	流量/(L/min)	尺寸/ μm
Patterson	0.38	0.94	80~200
Engdar	7	4.20	0~150
SyverudE	2.40	9.10	25~200
Jiang	0.50	10.80	100~300
Agbadede	9	4	55.12~80.20

级数变化的研究十分必要,需要明确液滴尺寸范围,为射流系统设计提供基础条件。

2.3 水气比

水和空气的比例(即水气比)对表面润湿影响很大。较低的水气比无法有效地润湿叶片表面;而较高的水气比会出现叶片侵蚀等现象。Roumeliotis^[55]研究了水气比为2%时对压气机性能和稳定性的影响,发现注水对压气机效率有明显影响,建议水气比不超过2%。

Syverud^[49]考虑在水气比分别为1.7%、0.43%情况下注入等质量的水,发现在较低流量下延长注入时间并不能提高水洗效果。水气比低至0.43%时,液滴对表面的浸泡效果并不明显,对于压气机后段性能恢复,最好在更短的时间内注入水,推荐的水气比为0.8%~2%。在此基础上,Madsen^[56-57]认为在在线清洗过程中,水气比应该增大。在J85-13喷气发动机上进行在线水洗测试,表明与传统清洗系统的水气比相比,在高达3%的水气比下,在线水洗后的性能恢复显著。

2.4 清洗频率

发动机在线清洗为航空公司带来很大的经济效益,而清洗频率是发动机在线水洗收益的主要影响因素。不同航线的飞机经过的地理环境不同,积垢的程度也不同。过早清洗发动机会大大提高水洗成本,而未能及时清洗发动机,积垢对发动机性能影响较大,从而提高了燃油成本。

清洗频率由航空公司决定,中国航空公司通常规定每年春秋2季定期进行发动机水洗。发动机厂商在维修手册中也给出一些建议,GE公司在CF6-80C2发动机维修手册中建议每500次循环进行1次水洗。Basendwah等^[58]分析了压气机在线清洗导致的停机损失和材料成本的提高,将这些损失和积垢造成的燃油成本提高进行比较,以找到最佳的压气机水洗间隔;Giesecke等^[59]在此基础上,根据1990~2010年的燃油价格,指出了飞机发动机清洗间隔与经济收益的关系,如图6所示。从经济层面看,对发动机每500次循环清洗1次可降低成本,而每250次循环清洗1次的维护成本过高,导致利润降低;如果燃油的价格进一步上涨,则每250次循环清洗1次的收益更大。总之,清洗频率的确定与诸多因素相关,目前尚未有循环次数和在线清洗经济性的模型,有待进一步研究。

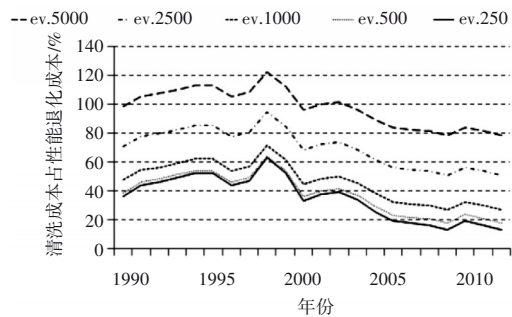


图6 清洗间隔与经济收益

2.5 清洗液

清洗液可使用脱矿水、水基清洗剂 and 溶剂清洗剂。由于压气机内部会有微量润滑油泄漏,需要添加化学清洗剂才能有效地清洗压气机。溶剂清洗剂对去除油脂沉积物方便且更有效,但考虑到环境和安全方面的因素,其受欢迎程度已降低。而新一代的水基清洗剂经特殊配制具有相同效果,且多数水基产品还具有生物降解的优点。2种类型的产品通常作为浓缩物提供,并现场用水稀释制作清洗液。发动机制造商建议在清洗后用抗静电液体清洗发动机,避免颗粒物堆积^[60]。添加化学清洗剂的清洗液对某些金属有腐蚀性,需多次冲洗才能在清洗后彻底清除,清洗排出的废水还需回收再处理。

对于很多航空发动机压气机叶片表面涂覆的渗铝层和硅酸盐涂层,王坚等^[61]研制的多功能清洗液具有有效保护,且还有较优的除油除锈效果;张晓云等^[62]经过试验研究,研制的水基清洗剂的性能指标可达到美国军用标准MIL-C-85704B的要求,具有良好的清洗和缓蚀性能;Roupa等^[63]使用脱矿水和含水基洗涤剂,对于面粉污垢的清洗二者达到的效果类似,而对原油污垢的清洗,使用含水基洗涤剂清洗后压气机性能恢复更好;Brun等^[64]采用5种不同纯度的脱矿水和含洗涤剂的清洗液清洗叶片,发现大部分清洁发生在最初的几秒内,此后液体渗透到污垢内,5种清洗液的清洁能力无显著差异,叶片清洁的主要通过机械去除积垢,而非化学过程;一些发动机厂商尝试使用热水清洗,通过软化沉积物及增加溶解度来提高清洗效率。

3 总结与展望

(1)国内外对于积垢形成机理的研究集中于建立评估积垢效应的模型,为简化模型通常假设为球形颗粒物,而忽略颗粒物在运动过程中的聚合、破碎和表

面侵蚀。因此需进一步探讨颗粒物的沉积模型,改进数值模拟过程,对模型的精度提出更高的要求。

(2)国内外对液滴尺寸的研究仅限于对不同液滴尺寸进行试验和数值模拟,缺乏对实际不同的压气机级数、积垢程度的液滴尺寸研究。建立最优的尺寸范围是在线清洗的重要课题。

(3)目前中国对在线清洗的射流参数、清洗频率已有了初步探索,还应加强在射流系统的喷雾覆盖范围、液滴尺寸和清洗频率的研究。结合颗粒物的沉积位置和发动机水洗的经济效应,进一步优化清洗时机和射流工艺参数。

参考文献:

- [1] 付旭云,钟诗胜,姜海波.民用航空发动机水洗效果量化评价方法[J].航空工程进展,2015,6(3):347-353.
FU Xuyun, ZHONG Shisheng, JIANG Haibo. Quantitative evaluation method of civil aero-engine water wash[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(3): 347-353. (in Chinese)
- [2] 李磊,左洪福,蔡景.基于使用可靠性的民用航空发动机水洗间隔优化方法研究[J].航空计算技术,2014,44(3):47-52.
ZHU Lei, ZUO Hongfu, CAI Jing. Optimization method of civil engine washing interval based on operational reliability[J]. Aeronautical Computing Technique, 2014, 44(3): 47-52. (in Chinese)
- [3] Igie U, Goiricelaya M, Nalianda D, et al. Aero engine compressor fouling effects for short-and long-haul missions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2016, 230(7): 1312-1324.
- [4] Kurz R, Brun K. Degradation in gas turbine systems[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123(1): 70-77.
- [5] Gbadebo S A, Hynes T P, Cumpsty N A. Influence of surface roughness on three-dimensional separation in axial compressors [J]. Journal of Turbomachinery. 2004, 126(4): 455-463.
- [6] Bammert K, Woelk G U. The influence of the blading surface roughness on the aerodynamic behavior and characteristic of an axial compressor[J]. Journal of Engineering for Power, 1980, 102(2): 283-287.
- [7] 李冬,樊照远,张娟等.压气机叶片粗糙度对其性能衰退的影响研究[J].航空发动机,2009,35(5):32-35.
LI Dong, FAN Zhaoyuan, ZHANG Juan, et al. Influence of blade roughness on compressor performance deterioration[J]. Aeroengine, 2009, 35(5): 32-35.
- [8] Sallee G P. Performance deterioration based on existing (historical) data; JT9D jet engine diagnostics program[R].NASA-CR-78-135448.
- [9] Suder K L, Chima R V, Strazisar A J. The effect of adding roughness and thickness to a transonic axial compressor rotor[J]. Journal of Turbomachinery, 1995, 117(4): 491-505.
- [10] Kurz R, Brun K. Fouling mechanisms in axial compressors[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power: Transactions of the ASME, 2012, 134(3): 032401.
- [11] 雷达.计及硬件损伤的航空发动机拆发预测方法及其应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
LEI Da. Study on the forecasting methods and its application for aeroengine removal considering hardware damage[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [12] Wensky T, Winkler L, Friedrichs J. Environmental influences on engine performance degradation[C]//ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. Glasgow: American Society of Mechanical Engineers, 2010: 249-254.
- [13] Brittain D. Cleaning gas turbine compressors: some service experience with a wet-wash system[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 1983, 55(1): 15-17.
- [14] 王悦阁.发动机水洗流程优化及决策的研究[D].天津:中国民航大学,2016.
WANG Yuege. Research on aeronautical engine water washing process optimization and decision[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016. (in Chinese)
- [15] 付尧明.民用涡扇发动机在使用和维护中的EGT裕度管理[J].航空维修与工程,2005,1(1):44-45.
FU Xiaoming. Management of EGT margin of civil turbofan in the use and maintenance[J]. Aviation Maintenance, 2005, 1(1): 44-45. (in Chinese)
- [16] 彭鸿博,王悦阁,刘孟萌.民航发动机水洗对延长在翼时间的估算方法研究[J].科学技术与工程,2015,15(34):268-273.
PENG Hongbo, WANG Yuege, LIU Mengmeng. Study on the estimation method of civil aviation engine water washing to prolong the time on the wing[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(34): 268-273. (in Chinese)
- [17] Zwebek A I. Combined cycle performance deterioration analysis[D]. United Kingdom: Cranfield University, 2002.
- [18] 于海峰,陈卫,程礼,等.航空发动机压气机叶片表面积垢行为[J].中国表面工程,2021,34(5):188-197.
YU Haifeng, CHEN Wei, CHENG Li, et al. Fouling behavior of aero-engine compressor blades surface[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(5): 188-197. (in Chinese)
- [19] Parker G J, Lee P. Studies of the deposition of sub-micron particles on turbine blades[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1972, 186(1): 519-526.
- [20] Fuks N A, Charles N D. The mechanics of aerosols[M]. New York: Dover Publications, 1989: 171-172.
- [21] Slater S A, Leeming A D, Young J B. Particle deposition from two-dimensional turbulent gas flows[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2003, 29(5): 721-750.
- [22] Song T W, Sohn J L, Kim T S, et al. An analytical approach to predicting particle deposit by fouling in the axial compressor of the industrial gas turbine[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical

- Engineers Part A: Journal of Power and Energy, 2005, 219(3): 203–212.
- [23] Ghenaiet A. Study of sand particle trajectories and erosion into the first compression stage of a turbofan[J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(5): 051025–1–17.
- [24] Saxena S, Jothiprasad G, Bourassa C, et al. Numerical simulation of particulates in multistage axial compressors[J]. Journal of Turbomachinery, 2017, 139(3): 031013–1–9.
- [25] Jacobs G, Don W S, Dittmann T. High-order resolution eulerian – lagrangian simulations of particle dispersion in the accelerated flow behind a moving shock[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2012, 26(1–4): 37–50.
- [26] Levine P, Angello L. Axial compressor performance maintenance guide [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Reno: American Society of Mechanical Engineers, 2005: 47276–1–8.
- [27] Suman A, Morini M, Kurz R, et al. Estimation of the particle deposition on a subsonic axial compressor blade[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2017, 139(1): 012604–1–10.
- [28] Chen F, Lai A C K. An eulerian model for particle deposition under electrostatic and turbulent conditions[J]. Journal of Aerosol Science, 2004, 35(1): 47–62.
- [29] Hinds W C. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles[M]. New York: Wiley-Interscience, 2012: 89–92.
- [30] Mezheritsky A D, Sudarev A V. The mechanism of fouling and the cleaning technique in application to flow parts of the power generation plant compressors[C]//ASME 1990 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. Brussels: American Society of Mechanical Engineers, 1990: V004T11A003–1–13.
- [31] Meher-Homji C B, Chaker M, Bromley A F. The fouling of axial flow compressors: causes, effects, susceptibility, and sensitivity[C]//ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. Orlando: American Society of Mechanical Engineers, 2009: 571–590.
- [32] Agengitürk M, Sverdrup E F. A theory for fine particle deposition in 2-D boundary layer flows and application to gas turbines[C]//ASME 1981 International Gas Turbine Conference and Products Show. Houston: American Society of Mechanical Engineers, 1981: V002T05A003–1–10.
- [33] Suman A, Kurz R, Aldi N, et al. Quantitative CFD analyses of particle deposition on a subsonic axial compressor blade[C]//ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. Montreal: American Society of Mechanical Engineers, 2015: V009T24A008–1–15.
- [34] Suman A, Morini M, Kurz R. Estimation of the particle deposition on a transonic axial compressor blade[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(1): 012604–1–10.
- [35] Sreedharan S S, Tafti D K. Composition dependent model for the prediction of syngas ash deposition with application to a leading edge turbine vane[C]//ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. Glasgow: American Society of Mechanical Engineers, 2010: 615–626.
- [36] Singh S, Tafti D. Particle deposition model for particulate flows at high temperatures in gas turbine components[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2015, 52(2015): 72–83.
- [37] Brach R M, Dunn P F. A mathematical model of the impact and adhesion of microspheres[J]. Aerosol Science and Technology, 1992, 16(1): 51–64.
- [38] Casari N, Pinelli M, Suman A, et al. An energy-based fouling model for gas turbines: EBF0G[J]. Journal of Turbomachinery, 2017, 139(2): 021002–1–8.
- [39] Döring F, Staudacher S, Koch C, et al. Modeling particle deposition effects in aircraft engine compressors[J]. Journal of Turbomachinery, 2017, 139(5): 051003–1–10.
- [40] Syverud E, Brekke O, Bakken L E. Axial compressor deterioration caused by saltwater ingestion[C]//ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. Reno: American Society of Mechanical Engineers, 2005: 327–337.
- [41] Tarabrin A P, Schurovsky V A, Bodrov A I, et al. Influence of axial compressor fouling on gas turbine unit performance based on different schemes and with different initial parameters[C]//ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. Stockholm: American Society of Mechanical Engineers, 1998: V004T11A006–1–6.
- [42] Igie U, Pilidis P, Fouflias D, et al. Industrial gas turbine performance: compressor fouling and on-line washing[J]. Journal of turbomachinery, 2014, 136(10): 101001–1–13.
- [43] Schneider E, Demircioglu B S, Franco S, et al. Analysis of compressor on-line washing to optimize gas turbine power plant performance [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(6): 062001–1–7.
- [44] Stalder J P. Gas turbine compressor washing state of the art: field experiences[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123(2): 363–370.
- [45] Burdick G M, Berman N S, Beaudoin S P. Describing hydrodynamic particle removal from surfaces using the particle Reynolds number[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2001, 3: 453–465.
- [46] Kumar K, Chaudhari V, Sahu S, et al. Investigation on flat-fan spray characterization in high-speed air coflow for gas turbine online water washing application[C]//Gas Turbine India Conference. Online: American Society of Mechanical Engineers, 2021, V001T04A009–1–8.
- [47] 李本威, 伍恒, 沈伟. 某型涡扇发动机在线流道清洗喷射参数选择与试验[J]. 航空动力学报, 2018, 33(5): 1025–1032.
- LI Benwei, WU Heng, SHEN Wei. Online washing injection parameters selection and experiments for a certain type of turbofan engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(5): 1025–1032. (in

- Chinese)
- [48] 李本威, 伍恒, 张勇. 某型发动机在线清洗喷射架强度计算与振动分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2017, 32(2): 235-240.
LI Benwei, WU Heng, ZHANG Yong. Strength calculation and vibration analysis of online washing spray frame of a certain engine[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2017, 32(2): 235-240. (in Chinese)
- [49] Syverud E, Bakken L E. Online water wash tests of GE J85-13[C]//ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. Reno : American Society of Mechanical Engineers, 2005: 339-347.
- [50] Oosting J, Boonstra K, Haan A D, et al. On line compressor washing on large frame 9-FA gas turbines: erosion on R0 compressor blade leading edge-field performance with a novel on line wash system[C]//ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air. Montreal: American Society of Mechanical Engineers, 2007: 775-784.
- [51] Mund F C, Pilidis P. Online compressor washing: a numerical survey of influencing parameters[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2005, 219(1): 13-23.
- [52] Mund F C, Pilidis P. Gas turbine compressor washing: historical developments, trends and main design parameters for online systems [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(2): 344-353.
- [53] Agbadede R, Pilidis P, Igie U L, et al. Experimental and theoretical investigation of the influence of liquid droplet size on effectiveness of online compressor cleaning for industrial gas turbines[J]. Journal of the Energy Institute, 2015, 88(4): 414-424.
- [54] 蒋科艺, 沈伟, 李本威. 基于流场仿真的涡扇发动机清洗系统参数优化设计[J]. 航空动力学报, 2011, 26(3): 481-488.
JIANG Keyi, SHEN Wei, LI Benwei. Parameters optimizing for a turbofan engine cleaning system using flow field simulation[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(3): 481-488. (in Chinese)
- [55] Roumeliotis I, Mathioudakis K. Water injection effects on compressor stage operation[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129(3): 778-784.
- [56] Madsen S, Bakken L E. Gas turbine operation offshore: online compressor wash operational experience[C]// Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Düsseldorf: American Society of Mechanical Engineers, 2014: V03BT25A008-1-11.
- [57] Madsen S, Bakken L E. Gas turbine fouling offshore: effective online water wash through high water-to-air ratio[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(4): 041015-1-8.
- [58] Basendwah A A, Pilidis P, Li Y G. Turbine off-line water wash optimization approach for power generation[C]//ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air. Barcelona : American Society of Mechanical Engineers, 2006: 65-76.
- [59] Giesecke D, Igie U, Pilidis P, et al. Performance and techno-economic investigation of on-wing compressor wash for a short-range aero engine[C]//ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. Copenhagen: American Society of Mechanical Engineers, 2012: 235-244.
- [60] Ackerman J F, Stowell W R, Johnson R A. Methods and apparatus for washing gas turbine engines: US, 6630198[P]. 2003-10-7.
- [61] 王坚, 黄选民, 幸泽宽. 航空发动机压气机叶片表面清洗技术研究 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(4): 78-81, 86.
WANG Jian, HUANG Xuanmin, XING Zekuan. The research on cleaning technique for aero-engine compressor blade[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(4): 78-81, 86. (in Chinese)
- [62] 张晓云, 李斌, 司徒振民. 燃气轮机水基清洗剂的研制[J]. 清洗世界, 1999, 15(4): 5-8.
ZHANG Xiaoyun, LI Bin, SITU Zhenmin. Development of water based cleaning agent for gas turbine[J]. Chemical Cleaning, 1999, 15(4): 5-8. (in Chinese)
- [63] Roupa A, Pilidis P, Allison I, et al. Study of wash fluid cleaning effectiveness on industrial gas turbine compressor foulants[C]//ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. San Antonio: American Society of Mechanical Engineers, 2013: V05AT20A003-1-10.
- [64] Brun K, Foiles W C, Grimley T A, et al. Experimental evaluation of the effectiveness of online water-washing in gas turbine compressors [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines Power, 2015, 137(4): 042605-1-15.

(编辑: 贺红井)