

航空发动机进气及叶栅通道内砂粒动力学特性分析

徐倩楠^{1,2}, 胡峰¹, 肖友洪¹, 张海¹

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 中国航空发动机集团有限公司 四川燃气涡轮研究院

高空模拟技术重点实验室, 四川 绵阳 621700)

摘 要: 为提高发动机的吞砂、防砂能力, 需要了解砂粒在发动机中运动规律及对发动机性能的影响。采用欧拉-拉格朗日法对E3发动机整流罩、风扇和增压级进行了砂粒与气流的耦合作用分析计算, 加入颗粒碰撞模型和侵蚀模型。仿真分析结果表明: 砂粒运动轨迹和侵蚀区域符合发动机使用规律。砂粒进入发动机与风扇叶片压力面发生碰撞, 砂粒发生碰撞后大部分进入了外涵流道。砂粒碰撞位置主要集中在风扇叶片压力面处, 风扇对颗粒运动轨迹的影响最显著, 碰撞后的颗粒有明显的径向运动趋势, 叶顶区域的颗粒富集程度较高。整流罩、风扇叶片压力面及外机匣壁面都发生较为严重的砂粒侵蚀现象, 而增压级叶片砂粒侵蚀现象不明显。

关 键 词: 吞砂; 压气机; 粒子吸入; 动力学; 发动机性能

中图分类号: V231

文献标志码: A

Analysis of dynamic characteristics of sand particles in air intake and compressor cascade of aero-engine

XU Qiannan^{1,2}, HU Feng¹, XIAO Youhong¹, ZHANG Hai¹

(1. College of Power and Energy Engineering,

Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Science and Technology on Altitude Simulation Laboratory,

Sichuan Gas Turbine Establishment,

Aero Engine Corporation of China, Mianyang Sichuan 621700, China)

Abstract: In order to improve the sand swallowing and sand control capabilities of the aero-engine, it is necessary to understand the law of sand movement in the engine and its impact on engine performance. The Euler-Lagrangian method was used to analyze and calculate the coupling effect of sand particles and airflow on the E3 engine fairing, fan and supercharger stage, and the particle collision model and erosion model were added. The simulation analysis results showed that the sand movement trajectory and erosion area conformed to the engine usage law. The sand particles entered the engine and collided with the pressure surface of the fan blades, and most of the sand particles entered the outer culvert flow channel after the collision. The collision position of sand particles was mainly concentrated at the pressure surface of the fan blades. The fan had

收稿日期: 2021-03-12

基金项目: 中国航空发动机集团有限公司四川燃气涡轮研究院国家财政稳定支持项目

作者简介: 徐倩楠(1988—), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事航空发动机整机试验技术研究。

引用格式: 徐倩楠, 胡峰, 肖友洪, 等. 航空发动机进气及叶栅通道内砂粒动力学特性分析[J]. 航空动力学报, 2021, 36(8): 1776-1782. XU Qiannan, HU Feng, XIAO Youhong, et al. Analysis of dynamic characteristics of sand particles in air intake and compressor cascade of aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(8): 1776-1782.

the most significant influence on the particle movement trajectory. The particles after collision had an obvious radial movement trend, and the particle concentration in the tip area was relatively high. The fairing, the pressure surface of the fan blades and the wall of the outer casing all had serious sand erosion, while the sand erosion of the booster stage blades was not obvious.

Key words: sand swallowing; compressor; particle ingestion; dynamic; engine performance

大型运输机或直升机在沙漠地带、近海区域等恶劣环境下起降,气流会诱导砂粒等杂质颗粒高速吸入发动机,受砂粒的冲击和磨蚀作用,风扇、压气机叶片外形和结构完整性遭到破坏,导致发动机性能衰减、寿命降低,严重影响作战性能和可靠性^[1]。据美国国防部统计:“沙漠风暴”行动中,军用运输机、直升机在恶劣的沙尘环境中耗油率和维修成本大幅提高,发动机实际使用寿命经常达不到设计寿命的两成^[2-3]。意识到沙尘吸入带来的危害,军用直升机开始在发动机前端进气装置中安装分离器以减少砂粒进入核心机,并通过在表面喷涂硬质涂层的方法提高叶片的抗颗粒冲击强度^[4]。

随着航空发动机的发展,要求试验技术和设备也随之不断提高与发展,先进的试验技术在研究中起了关键作用。对于涡轮风扇发动机而言,沙尘颗粒被吞入发动机内部后,首先与风扇及压气机叶片发生碰撞。针对沙尘颗粒对叶片的撞击,Balan和Tabakoff^[5]利用一台单级轴流压缩机开展了试验研究,吞砂的过程持续了605 s,共计吸入25 kg沙尘。结果表明:吞砂后压气机载荷系数下降3.5%,并出现了4%的效率降低。Ghe-naïet、Tan、Elder^[6]对轴流风机进行了9 h的连续试验,研究发现吸入砂粒9 h后,压气机的绝热效率、总压比和喘振裕度分别降低了7.1%、9.5%和55%。Bammert和Sandstede^[7]利用叶栅风洞对叶片进行了吞砂试验,研究也发现砂粒的吸入会导致压气机工作点前移。

美国通用和英国罗·罗等公司分别进行了TF34、CF-6和奥林巴斯593等型号发动机的吞砂试验研究^[8]。研究在不同设计试验装置模拟的尘埃环境下进行试验,测得试验后压比、燃气涡轮排气温度和耗油率均恶化,在高海拔情况下容易发生喘振和熄火。

除试验研究外,数值研究也是航空发动机沙尘吞入领域的常用研究手段^[9-12]。在发动机吞砂过程的数值研究中,一般要首先构造砂粒的状态,

在保证固态砂粒含量的同时还要满足颗粒粒径和分布均匀度的要求,这就涉及到气-固两相流动过程。与气-液两相流动不同,吞砂的过程中是不涉及到颗粒的蒸发的。

在沙尘对压气机的影响方面,哈尔滨工程大学的孙海鸥等^[11]利用ANSYS-CFX对4级轴流压缩机进行了数值模拟研究。结果表明,颗粒对压气机叶片的磨损主要集中在前面级的动叶和各排叶片的50%叶高以上,并且磨损量沿叶高方向逐渐增大,且对压力面的磨损程度要大于对吸力面。侯圣文等^[12]对轴流压气机在吞砂工况下的性能变化展开了数值研究,研究表明总温比与吞砂量有着直接关联,且颗粒在运动过程中主要撞击叶片压力面,使转子叶片转矩增加。叶片的转矩和颗粒直径之间为单调递增关系。

通过对吞砂对发动机性能影响相关的国内外文献的梳理发现^[9-16],目前针对沙尘吞入对发动机影响的研究主要是基于发动机性能变化展开的,主要采用的是试验及数值模拟的方式。砂粒吸入发动机后的运动轨迹,直接影响其下一步走向,决定着有多少数量的颗粒能够进入核心机而对发动机产生影响。因此,想要准确地模拟砂粒对发动机性能的影响,首先就要准确地掌握颗粒被吸入后的运动轨迹。而这一点也正是目前研究中所欠缺的,是难点问题之一。本文主要通过研究砂粒在发动机压缩部件流道中的运动规律,以及砂粒对壁面侵蚀作用,为航空发动机进气道及压缩部件结构设计提供参考。

1 气固两相流数值研究方法

1.1 欧拉-拉格朗日法控制方程

欧拉-拉格朗日法对连续相和离散相的计算使用不同的控制方程,在欧拉坐标系下连续相的运动主要受经典的流体力学三大守恒方程控制,质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程;在拉格朗日坐标系下,离散相颗粒的运动主要受动量方程的控制,传热方程控制离散项砂粒与气流

间换热,两相间通过动量和能量源项进行耦合。

1.1.1 连续相控制方程

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = S_m \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{U}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \mathbf{F} \quad (2)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_t) + \nabla \cdot [\mathbf{U} (\rho h_t + p)] = \nabla \cdot [\lambda \nabla T + (\bar{\tau} \cdot \mathbf{U})] + \mathbf{U} \cdot \mathbf{F} + S_h \quad (3)$$

1.1.2 离散相运动方程

忽略重力、虚拟质量力和压力梯度力,砂粒主要受气动曳力和惯性力作用,在拉格朗日坐标系下,砂粒动量方程为

$$m_p \frac{d\mathbf{U}_p}{dt} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_r \quad (4)$$

式中 m_p 为颗粒的质量, $\mathbf{U}_p$ 为颗粒的速度, $\mathbf{F}_d$ 为颗粒受到的气动曳力, $\mathbf{F}_r$ 为颗粒受到的离心力和哥氏力的合力。

1.1.3 热传递方程

连续相与离散相之间的热传递方程为

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h_c A_p (T - T_p) \quad (5)$$

式中 A_p 为砂粒表面积, c_p 为砂粒比定压热容, h_c 为气流与砂粒颗粒尖的表面传热系数, T 和 T_p 分别为气流和砂粒表面的温度。

1.2 砂粒与壁面碰撞模型

一般情况下,砂粒与壁面碰撞后发生反弹,反弹后的砂粒存在一定的动量损失,其速度大小和运动方向发生改变,通常用砂粒撞击避免反弹恢复系数来衡量砂粒撞击壁面后速度的恢复程度,反弹系数对砂粒运动轨迹影响较大。

早期 Grabt、Balan 等^[17-18]利用高速摄像机对不同材质各种材质壁面撞击后的反弹速度和角度进行捕获,得到颗粒碰撞壁面后反弹系数与碰撞角度的关系曲线,舍弃误差选取反弹系数平均值,利用插值法拟合出法向反弹系数和切向反弹系数与碰撞角度的关系式

$$\frac{V_{\text{nom}2}}{V_{\text{nom}1}} = a_0 + a_1 \beta_1 + a_2 \beta_1^2 + a_3 \beta_1^3 \quad (6)$$

$$\frac{V_{\text{tan}2}}{V_{\text{tan}1}} = b_0 + b_1 \beta_1 + b_2 \beta_1^2 + b_3 \beta_1^3 \quad (7)$$

式中下标 nom 表示法向反弹系数、下标 tan 表示切向反弹系数, β 为颗粒碰撞角度, a 、 b 为系数,其

值与颗粒类型和碰撞壁面材料有关,此关系在颗粒运动研究中得到广泛应用。

1.3 砂粒侵蚀模型

砂粒对壁面的侵蚀程度一般用侵蚀速率来衡量,侵蚀速率定义为壁面材料在单位时间上损失的质量(单位:kg/s),在数值计算中,通过计算每一个颗粒对壁面的累计损伤来计算侵蚀速率。

$$E_f = \frac{1}{A_f} \sum \dot{m} e_r \quad (8)$$

式中 A_f 为壁面单元面积, $\dot{m}$ 为冲击壁面颗粒质量流量, e_r 为侵蚀率浓度(单位:kg/(m²·s)),侵蚀率浓度与颗粒的运动状态有关。

2 模型与网格

2.1 设计参数

本文基于商业软件 ANSYS CFX 软件,以 E³ 风扇、增压级为研究对象,采用欧拉-拉格朗日多相流模型,模拟航空发动机压缩部件的吞砂过程,分析砂粒在压缩部件中的运动规律以及砂粒对叶片、机匣壁面的侵蚀作用。

E³ 是 GE(通用)公司早期研制的一款大涵道比航空发动机。其中,设计的风扇进口轮毂比为 0.342,单位迎风面积流量为 208 kg/s,风扇转子有 32 片中等展弦比叶片,该叶片在 55% 叶高处有凸肩;风扇叶尖换算转速为 411.5 m/s,分流环把风扇气流分开,大约总流量的 22% 由增压级转子增压;在增压级转子下游,气流在一次分流,增压级 42% 的气流重新进入外涵管路,其余的气流通过核心管道进入核心机中,总涵道比为 6.8,核心流总压比为 1.67,风扇外涵总压比为 1.65。E³ 风扇、增压级主要设计参数见表 1。

表 1 E³ 风扇、增压级设计参数

Table 1 Design parameters of E³ fan and booster

参数	数值
设计转速/(r/min)	3 727.7
设计流量/(kg/s)	643.7
风扇叶片数	32
风扇叶尖速度/(m/s)	411.5
增压级静子叶片数	60
增压级转子叶片数	56
内涵风扇压比	1.67
外涵风扇压比	1.65

2.2 模型及网格

根据 E³ 风扇、增压级流道及叶形设计参数建立三维模型。利用网格划分工具软件 ICEM(integrated computer engineering and manufacturing) CFD 对单个叶片通道划分六面体网格,相邻流道作周向循环边界处理,叶片周围采用 O 网格,对叶片、流道端壁近壁区域网格进行加密,为便于网格划分忽略风扇叶片凸肩结构,最终划分网格数量为 320 万。E³ 风扇、增压级三维模型及网格结构如图 1~图 2 所示。

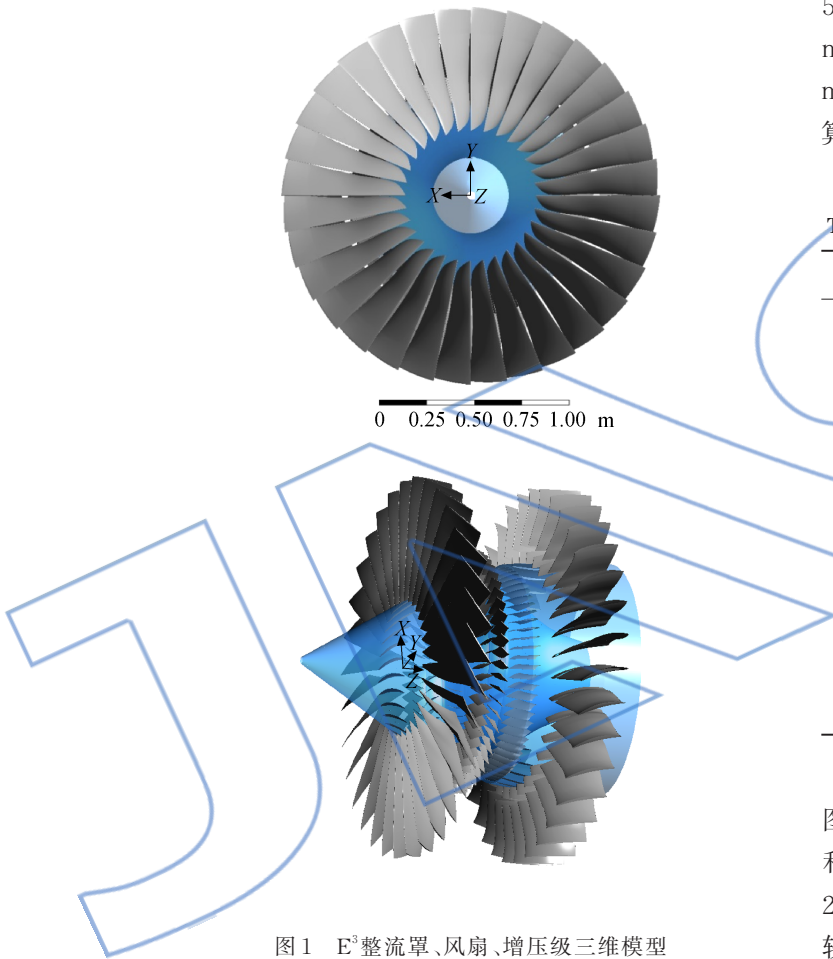


图 1 E³整流罩、风扇、增压级三维模型
Fig.1 Three-dimensional model of E3 fairing, fan, booster stage

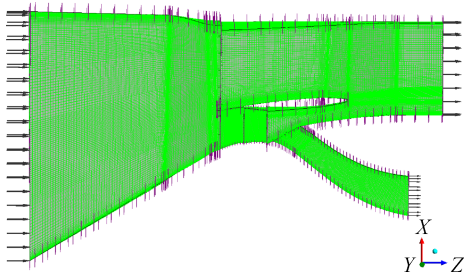


图 2 E³风扇、增压级计算域网格划分
Fig.2 Mesh of E³ fan and supercharger stage

影响颗粒两相流计算精度的主要原因是颗粒与壁面撞击后的运动轨迹,而在数值分析软件中影响运动轨迹的主要参数是颗粒碰撞及反弹系数。本文中计算所用到的颗粒碰撞及反弹系数是前期经过试验校核的,同时也与文献[19]进行了比对,因此能够保证数值模拟的精度。

2.3 计算条件

与试验要求(GJB2026)的砂粒浓度进行比较,本文设置的是高浓度吞砂条件(0.3%、1.0%吞砂量)。不同环境条件下,砂粒颗粒直径也有所差异,本文设置不同的砂粒直径(20、100、270、500 μm),数值计算中砂粒直径服从 Rosin Rammler 分布规律;本文设置的砂粒初始速度为 50 m/s,表 2 给出了计算域具体的边界条件。流体计算采用 $k-\epsilon$ 湍流模型,壁面函数为 Scalable 方程。

表 2 计算域边界条件		
Table 2 Boundary conditions of computational domain		
条件	参数	数值及说明
进口条件	总温/K	288.15
	总压/Pa	101 325
	转速/(r/min)	3 727.7
砂粒条件	吞砂质量分数/%	0.004, 0.3, 1.0
	砂粒平均直径/μm	20, 270, 500
	砂粒初始速度/(m/s)	50
	砂粒初始温度/K	300
外涵出口	平均静压/Pa	给定
内涵出口	平均静压/Pa	给定

根据吞砂试验要求的砂粒直径及分配比例,图 3 给出了 Rosin Rammler 模型拟合的砂粒直径和累计质量分数分布曲线,当砂粒特征直径 d_c 为 270 μm,指数 γ 为 1.8 时,砂粒直径和分配比例能较好吻合试验要求。

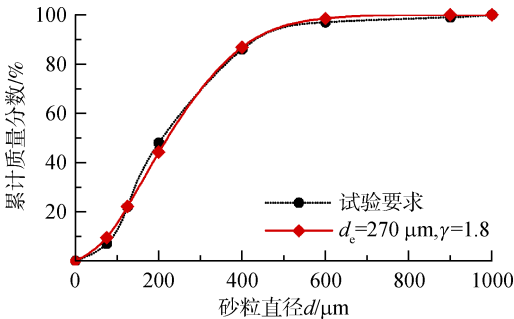


图 3 不同砂粒直径 d 的质量分数分布
Fig.3 Distribution of mass fraction of sand with different d

3 计算结果分析

3.1 砂粒运动轨迹

图4给出了设计工况下,平均直径为 $270\text{ }\mu\text{m}$,初始速度为 50 m/s 的砂粒在 E^3 风扇、增压级中的运动轨迹视图。图中显示,砂粒进入发动机后一部分与整流罩发生碰撞反弹,另一部分直接与风扇叶片压力面发生碰撞;砂粒发生一次或多次碰撞后通过风扇,大部分进入外涵流道,少部分进入内涵,砂粒运动速度也有所降低。

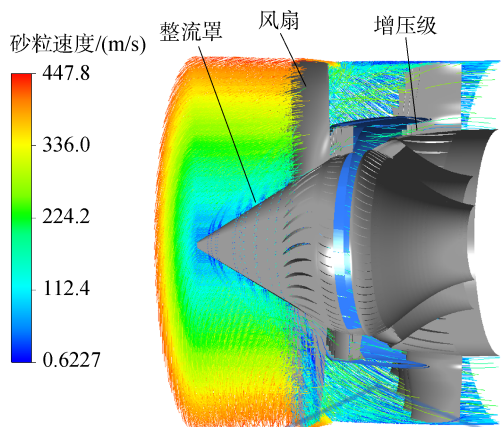


图4 砂粒在风扇、增压级中的运动轨迹
Fig.4 Trajectory of sand particles in the fan and booster

砂粒的运动轨迹是砂粒碰撞和所受惯性力、气动力等力综合作用的结果。图4显示,大部分的砂粒与风扇叶片发生碰撞,碰撞位置主要集中在风扇叶片压力面处,可见风扇转子对砂粒运动轨迹影响较大。为进一步分析砂粒的运动特性,图5给出了风扇压力面附近出砂粒运动轨迹。可以看出,大部分砂粒会与风扇叶片压力面发生多次碰撞,砂粒与叶片碰撞后有明显的径向运动趋势,导致大部分砂粒集中在叶顶区域,少部分砂粒分经过碰撞反弹后又与分流环或增压级静子发生碰撞,最后进入内涵流道。

砂粒碰撞壁面后,切向反弹恢复系数要整体上大于法向反弹恢复系数,说明砂粒在与壁面发生碰撞后法向速度衰减要高于切向速度衰减;当砂粒与压力面发生碰撞反弹后,切向运动趋势增加,即砂粒更趋于叶片平行的方向运动,由于风扇叶片高速旋转,砂粒受到较强的离心力作用,增大砂粒径向运动的趋势;砂粒还受到轴向气动力作用,最终导致砂粒沿着叶片表面向径向斜上方运动。

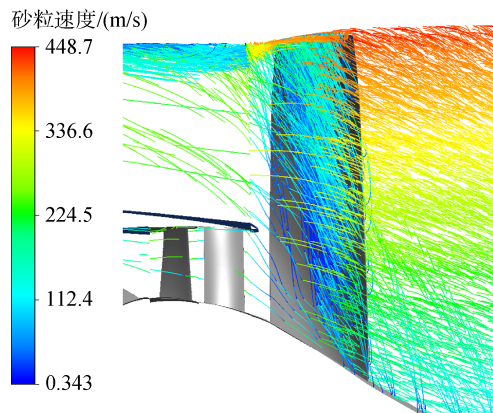


图5 风扇压力面附近砂粒运动轨迹

Fig.5 Trajectory of sand particles near the pressure surface of the fan

3.2 砂粒对壁面的侵蚀

砂粒在运动过程中会与叶片、机匣壁面发生碰撞,并对其产生一定侵蚀作用,图6给出了特征直径为 $270\text{ }\mu\text{m}$,吞砂量为 0.004% 的砂粒对风扇、增压级侵蚀率浓度分布云图。结果显示,风扇叶片受砂粒侵蚀最为严重,在叶顶区域最大侵蚀率浓度为 $0.192\ 893\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,为对比不同区域砂粒侵蚀情况,云图显示的砂粒侵蚀率浓度范围为 $0\sim 1.0\times 10^{-5}\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。可以看出,整流罩、风扇叶片压力面及外机匣壁面都发生较为严重的砂粒侵蚀现象,而增压级叶片、整流罩砂粒侵蚀现象不明显,这与砂粒碰撞位置相对应,受到砂粒碰撞

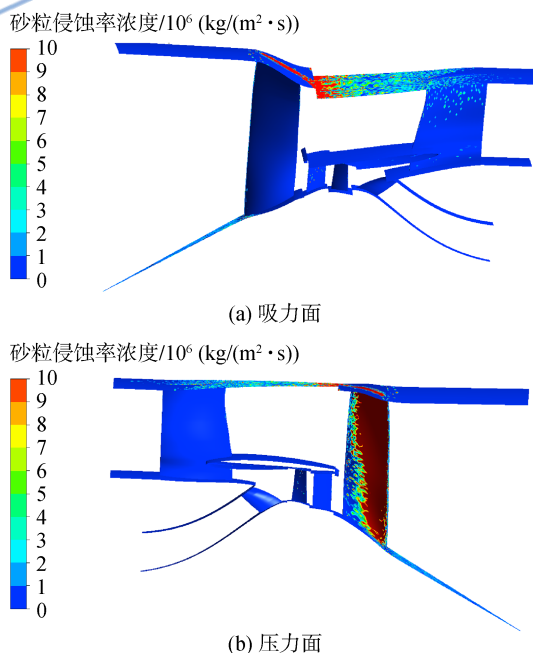


图6 砂粒对整流罩风扇、增压级侵蚀率浓度分布云图
Fig.6 Cloud map of erosion rate density distribution of sand to fan and booster

的区域主要为整流罩、风扇叶片和叶顶外机匣壁面。

图 7 给出了不同直径砂粒对风扇压力面侵蚀率浓度分布云图,为比较砂粒大小对叶片的侵蚀情况,云图显示的侵蚀率浓度范围为 $0\sim 1.0\times 10^{-4}$ $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。可以看出,叶片压力面受侵蚀区域主要分布在靠近前缘和叶顶部分,从叶根至叶顶,主要侵蚀范围也从前缘逐渐向尾缘延伸;当颗粒直径较大时($500\text{ }\mu\text{m}$),叶片压力面受侵蚀区域更为集中,侵蚀率浓度也更大;当颗粒直径较小时

($100\text{ }\mu\text{m}$ 和 $20\text{ }\mu\text{m}$),叶片压力面受侵蚀区域相对均匀,侵蚀率浓度也较小。

图 8 给出了不同吞砂条件下整流罩壁面侵蚀率云图分布情况,云图显示的侵蚀率浓度范围为 $0\sim 1.0\times 10^{-5}$ $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。可以看出,砂粒对整个整流罩壁面产生侵蚀作用,侵蚀区域相对均匀,这是由于砂粒在进口区域分布均匀,位于中心区域的砂粒首次碰撞发生在整流罩壁面;砂粒对整流罩的侵蚀作用随着砂粒直径和砂粒浓度的增大而增强。

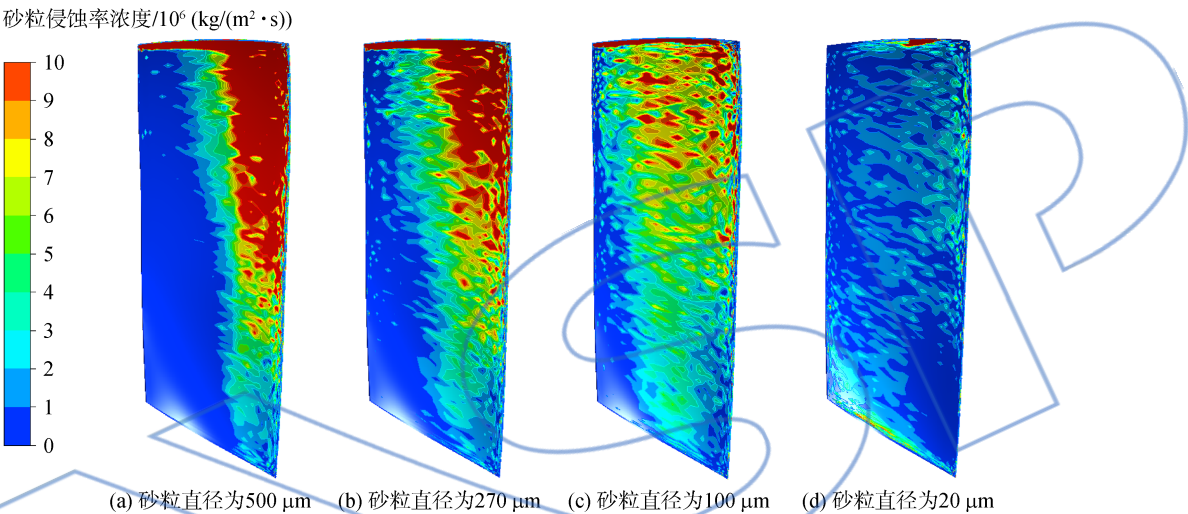


图 7 不同直径砂粒对风扇叶片压力面侵蚀率浓度分布云图

Fig.7 Cloud map of the erosion rate density distribution of the fan pressure surface with different diameters sand particles

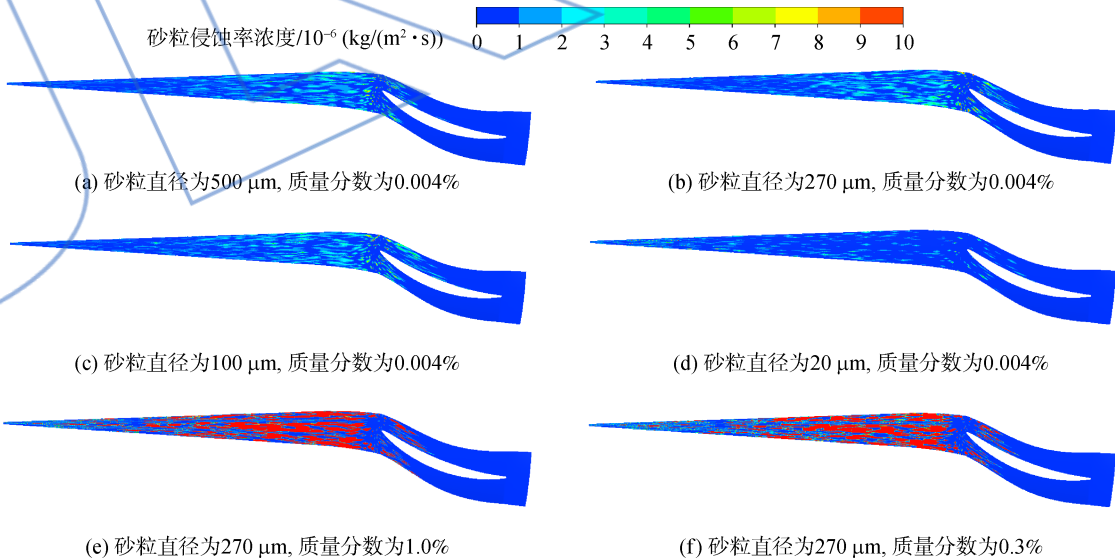


图 8 不同吞砂条件对风扇叶片压力面侵蚀率浓度分布云图

Fig.8 Cloud map of the erosion rate density distribution of the fan blade pressure surface by different conditions

4 结 论

本研究基于商业软件 ANSYS CFX,采用欧

拉-拉格朗日法对 E³进气整流罩、风扇、增压级进行了吞砂计算,考虑了砂粒与气流的耦合作用,并加入颗粒碰撞模型和侵蚀模型。结果显示,砂粒

运动轨迹和侵蚀区域符合一般规律。根据本文研究结果,得出以下结论:

1) 砂粒进入发动机后一部分与整流罩发生碰撞反弹,另一部分直接与风扇叶片压力面发生碰撞。砂粒发生一次或多次碰撞后,大部分进入了外涵流道。

2) 砂粒碰撞位置主要集中在风扇叶片压力面处,风扇对颗粒运动轨迹的影响最显著。砂粒会与风扇叶片压力面发生多次碰撞,碰撞后的颗粒有明显的径向运动趋势,导致叶顶区域的颗粒富集程度较高。

3) 整流罩、风扇叶片压力面及外机匣壁面都发生较为严重的砂粒侵蚀现象,而增压级叶片砂粒侵蚀现象不明显,这与砂粒碰撞位置相对应,受到砂粒碰撞的区域主要为整流罩、风扇叶片和叶顶外机匣壁面。

致谢:

本课题研究来源于中国航空发动机集团有限公司的四川燃气涡轮研究院国家财政稳定支持项目,感谢该项目的支持。

参考文献:

- [1] SAXENA S, JOTHIPRASAD G, BOURASSA C, et al. Numerical simulation of particulates in multi-stage axial compressors[R]. ASME Paper GT-2016-67917, 2016.
- [2] HAMED A, TABAKOFF W, WENGLARA R. Erosion and deposition in turbomachinery[J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 22(2):350-360.
- [3] GHENAIET A, TAN S C, ELDER R L. Numerical simulation of the axial fan performance degradation due to sand ingestion[R]. ASME Paper GT-2002-30644, 2002.
- [4] PEPI M, SQUILLACIOTI R, PFLEDDERER L, et al. Solid particle erosion testing of helicopter rotor blade materials [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2012, 12(1): 96-108.
- [5] BALAN C, TABAKOFF W. Axial flow compressor performance deterioration[R]. AIAA 84-1208, 1984.
- [6] GHENAIET A, TAN S C, ELDER R L. Particle trajectories through an axial fan and performance degradation due to sand ingestion[R]. ASME Paper GT-2001-0497, 2001.
- [7] BAMMERT K, SANDSTEDT H. Measurement of the boundary layer development along a turbine blade with rough surface[J]. Journal of Engineer for Gas Turbines and Power, 1983, 102(4):978-983.
- [8] DUNN M G, PADOVA C, MOLLER G E. Performance deterioration of a turbofan and a turbojet engine upon exposure to a dust environment[J]. Gas Turbines Power, 1987, 109(3): 336-343.
- [9] GHENAIET A. Simulation of particle trajectories and erosion in a centrifugal compressor[J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(5):051022.1-051022.19.
- [10] GHENAIET A. Study of sand particle trajectories and erosion into the first compression stage of a turbofan[J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(5):051025.1-051025.17.
- [11] 孙海鸥,王萌,王忠义,等.轴流压气机气固两相流及磨损特性数值模拟[J].哈尔滨工程大学学报,2018,39(2):310-316. SUN Haiou, WANG Meng, WANG Zhongyi, et al. Numerical research on two-phase flow and erosion characteristic of axial compressor[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(2):310-316. (in Chinese).
- [12] 侯圣文,吴锋,张海.轴流压气机吞沙工况的性能变化研究[C]//中国航天第三专业信息网第四十届技术交流会暨第四届空天动力联合会议论文集:S04航空燃气涡轮推进技术.昆明:中国航天第三专业信息网,2019:95-102.
- [13] BOULANGER A, PATEL H. Preliminary experimental investigation of initial onset of sand deposition in the turbine section of gas turbines[R]. ASME Paper 2016-GT-56059, 2016.
- [14] BOJDO N, FILIPPONEA A, PARKES B, et al. Aircraft engine dust ingestion following sand storms[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 106:106072.1-106072.10.
- [15] 常鸿雯,李艳军.航空发动机吞砂试验技术浅析[J].机械工程师,2019(8):126-127. CHANG Hongwen, LI Yanjun. Technical analysis of sand ingestion test on aero-engine[J]. Mechanical Engineer, 2019(8): 126-127. (in Chinese)
- [16] 曾林,程礼,李宁,等.航空发动机吞砂试验标准砂与典型沙粒形貌对比分析[J].航空发动机,2019,45(1):101-106. ZENG Lin, CHENG Li, LI Ning, et al. Comparison and analysis of morphology of standard sand and typical sand particle in aeroengine sand swallowing test[J]. Aeroengine, 2019, 45(1): 101-106. (in Chinese)
- [17] GRANT G, TABAKOFF W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental particles[J]. Journal of Aircraft, 1975, 12(5):471-478.
- [18] BALAN C, TABAKOFF W. Axial compressor performance deterioration[J]. AIAA 84-1208, 1984.
- [19] 孙见忠,姜衡,陈颖达.航空发动机砂尘吸入静电监测仿真实验[J].航空动力学报,2018,33(12):2913-2923. SUN Jianzhong, JIANG Heng, CHEN Yingda. Aero engine sand dust ingestion electrostatic monitoring simulation experiment[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12): 2913-2923. (in Chinese)

(编辑:张雪)