

# 尾气颗粒对可变混流涡轮增压器喷嘴环 冲蚀磨损特性的数值模拟

於克良<sup>1</sup>,温华兵<sup>1</sup>,刘红丹<sup>2</sup>,刘 扬<sup>2</sup>

(1. 江苏科技大学 能源与动力工程学院,江苏 镇江 212000; 2. 重庆江增船舶重工有限公司,重庆 402263)

**摘 要:**可变涡轮增压器在运行过程中其涡轮喷嘴环会受到尾气颗粒的冲蚀磨损,造成喷嘴环叶片失效和涡轮运行效果下降。借助 CFD 软件对可变混流涡轮内部的气固两相流进行数值模拟计算,分析喷嘴环开度的变化和颗粒粒径对喷嘴环磨损规律的影响。结果表明:喷嘴环处于不同开度下时,磨损率和磨损区域均有所不同,磨损区域主要集中在喷嘴环压力面的中后段区域,随着开度的增大,磨损率和磨损区域均减小,压力面的磨损程度明显大于吸力面;尾气中的小颗粒因惯性较小对气流的跟随性较好,主要撞击喷嘴环前缘,且开度对喷嘴环前缘的磨损影响较小;尾气中大颗粒的运动轨迹趋于直线,主要撞击喷嘴环压力面的中后段区域;由于涡轮进气涡壳结构的周向不对称性,使得涡轮内部流场沿周向分布不均匀,导致不同周向位置的喷嘴环磨损率和磨损区域有所不同,且随着开度的增大,各喷嘴环之间的磨损差异也增大。

**关 键 词:**可变混流涡轮;尾气颗粒;气固两相流;冲蚀磨损;数值模拟

中图分类号:TK263.1 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.03.006

[引用本文格式]於克良,温华兵,刘红丹,等.尾气颗粒对可变混流涡轮增压器喷嘴环冲蚀磨损特性的数值模拟[J].热能动力工程,2023,38(3):41-50. YU Ke-liang, WEN Hua-bing, LIU Hong-dan, et al. Numerical simulation of erosion wear characteristics of nozzle ring of variable mixed flow turbocharger by exhaust particles [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(3):41-50.

## Numerical Simulation of Erosion Wear Characteristics of Nozzle Ring of Variable Mixed Flow Turbocharger by Exhaust Particles

YU Ke-liang<sup>1</sup>, WEN Hua-bing<sup>1</sup>, LIU Hong-dan<sup>2</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, China, Post Code:212000; 2. Chongqing Jiangjin Shipbuilding Industry Co., Ltd., Chongqing, China, Post Code:402263)

**Abstract:** The turbine nozzle ring of the variable turbocharger will be eroded and worn by exhaust particles in the process of operation, resulting in the failure of nozzle ring blade and the decline of turbine operation effect. With the help of CFD software, the gas-solid two-phase flow in the variable mixed flow turbine was numerically simulated, and the influence of the change of nozzle ring opening degree and particle size on the wear rule of nozzle ring was analyzed. The results show that the wear rate and wear area are different when the nozzle ring is at different opening degrees, and the wear area is mainly concentrated in the middle and rear regions of the pressure surface of the nozzle ring. With the increase of opening degrees, the wear rate and wear area decrease, and the wear degree of the pressure surface is obviously greater than that of the suction surface. The small particles in the exhaust gas have a good following effect on the airflow due to small inertia and mainly impact the leading edge of the nozzle ring, and the opening degree has little influence on the wear at the leading edge of the nozzle ring. The movement trajectory of

large particles in the exhaust gas tends to be straight line and mainly impacts the middle and rear regions of the pressure surface of the nozzle ring. Due to the circumferential asymmetry of the turbine inlet vortex shell structure, the flow field in the turbine is not evenly distributed along the circumferential direction, resulting in different wear rates and wear regions of nozzle rings at different circumferential positions. Moreover, with the increase of opening degree, the wear differences among nozzle rings also increase.

**Key words:** variable mixed flow turbine, exhaust particles, gas-solid two-phase flow, erode and wear, numerical simulation

引 言

涡轮增压器因能够增加发动机进气密度、提高发动机功率等优点,被广泛应用于汽车、船舶和航空等领域<sup>[1-2]</sup>。对于固定几何形状的涡轮增压器,存在涡轮响应迟缓和在发动机整个运行工况范围内不能实现良好匹配的问题,但可变几何涡轮增压器(VGT)在一定程度上可以解决这些问题<sup>[3-4]</sup>。

混流 VGT 通过电机驱动的推杆来调节喷嘴环的旋转角度,改变喷嘴环之间的喉口面积,匹配不同运行工况下的柴油机。但是船用柴油机运行时燃料燃烧产生的颗粒会随尾气一同进入涡轮,在涡轮中加速并撞击喷嘴环叶片,对叶片表面造成冲蚀磨损,导致叶片表面材质剥落,表面粗糙度增加,不仅缩短了叶片的使用寿命,同时还导致 VGT 运行效率下降。

在旋转机械领域中,固体颗粒对叶片表面的冲蚀磨损一直是比较严重的问题,相关的研究也较为深入。Cao 等人<sup>[5-6]</sup>基于欧拉-拉格朗日法和 Finnie 磨损模型,数值研究了阀门调节方式对汽轮机调节级叶片的冲蚀磨损以及叶片磨损类型对调节级效率的影响。Cai 等人<sup>[7]</sup>通过高温加速冲蚀试验得到叶片材料冲蚀速率和颗粒回弹模型,结合数值模拟,揭示了超临界汽轮机控制阶段叶片表面硬质涂层的冲蚀机理以及大的氧化铁颗粒所造成的影响。Li 等人<sup>[8]</sup>通过冲蚀磨损试验对航空压气机叶片材料的 Finnie 磨损模型进行参数化,结合气固两相流分析发现,动静叶的压力面和吸力面都有集中的磨损区域。Azimian 等人<sup>[9]</sup>研究了燃烧产生的颗粒对径向涡轮的磨损,分析了转子转速、输入质量流量和颗粒粒径等因素的影响,发现动叶压力面的磨损最严重。叶学民等人<sup>[10-11]</sup>对动叶可调轴流风机进行全三维数值模拟,分析了不同动叶安装角、颗粒

粒径和颗粒质量浓度对叶片磨损特征和风机效率的影响。

目前,国内外的研究文献,尚未有对船用发动机可变涡轮叶片冲蚀磨损的研究。由于船用发动机功率大、所用燃油品质不高<sup>[12-13]</sup>,导致排放的尾气颗粒容易对叶片造成冲蚀磨损。本文基于欧拉-拉格朗日法和 Finnie 侵蚀模型,分析涡轮内部的气固两相流动,得出不同粒径颗粒对喷嘴环叶片冲蚀磨损的规律及开度变化对冲蚀磨损分布的影响。

1 数值计算

1.1 物理模型

采用商业软件 ANSYS CFX 对某型号的可变混流涡轮增压器的涡轮端进行数值模拟分析,其几何模型如图 1 所示。该涡轮包括进气道、涡壳、叶轮、喷嘴环叶片(按顺时针方向命名为 b1~b24,图 1 中只标注了喷嘴环 b1, b7, b13 和 b19),其主要几何参数如表 1 所示。可变涡轮的开度范围依次为 0, 25%, 50%, 75% 和 100%。其中,0 代表喷嘴环喉口面积最小的情况,即喉口之间的距离最短;100% 代表喷嘴环喉口面积最大时的情况。喷嘴环开度随着柴油机运行负荷增加而增大,匹配不同运行工况下的发动机。

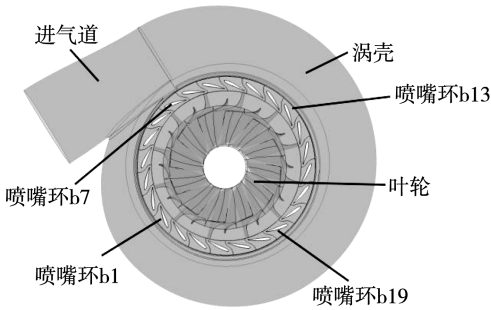


图 1 涡轮的几何模型

Fig. 1 Geometric model of turbine

表 1 涡轮主要几何参数

| 参数         | 数值  |
|------------|-----|
| 喷嘴环叶片      | 24  |
| 叶轮叶片       | 12  |
| 进气口半径/mm   | 64  |
| 出气口半径/mm   | 91  |
| 喷嘴环入口半径/mm | 132 |
| 喷嘴环出口半径/mm | 106 |
| 叶轮叶顶间隙/mm  | 1   |

1.2 网格划分

对喷嘴环叶片和叶轮叶片进行结构化网格划分,并对叶片表面和叶顶间隙进行局部加密处理,对进气管道和涡壳进行非结构网格划分。为了排除网格数对计算结果的影响,进行了网格的无关性验证,以 25% 开度为例,计算结果如表 2 所示。由表 2 可知,当网格数达到 240 万以上时,计算结果趋于稳定,因此选择 240 万左右的网格数进行计算。喷嘴环和叶轮的网格划分如图 2 所示。由于涡轮涡壳周向结构的不对称性,导致涡轮内部流场沿周向分布也不均匀,故模拟计算采用全流道模型计算。

表 2 网格无关性验证

| 网格数量/万 | 等熵效率/% | 出口流量/kg·s <sup>-1</sup> |
|--------|--------|-------------------------|
| 146    | 76.58  | 0.97                    |
| 194    | 75.83  | 0.97                    |
| 240    | 75.62  | 0.96                    |
| 305    | 75.65  | 0.96                    |

1.3 颗粒相基本假设与运动方程

船舶柴油机排放的颗粒物是不同种类颗粒的混合物,大小从 5 nm ~ 10 μm,粒径分布一般为对数正态分布,包括成核、堆积和粗粒 3 种模式<sup>[14-15]</sup>。其中,成核和堆积模式下颗粒粒径一般小于 1 μm,因此研究的颗粒主要为粗粒模式(1 ~ 10 μm),由碳质颗粒和矿物灰组成<sup>[16]</sup>。

对于气固两相流的研究一般有两种模拟方法,分别是欧拉-欧拉法和欧拉-拉格朗日法。由于船用柴油机运行过程中产生的尾气中所含颗粒较少,且颗粒体积分数远低于 10%,属于稀相流,故采用欧拉-拉格朗日法来模拟颗粒的运行情况。为了简化计算,假设如下:(1)采用单相耦合,由于固体颗粒质量浓度较小,属于稀相流,故颗粒对流场的作用可以忽略不计;(2)忽略颗粒的旋转、团聚和破裂以及颗粒间的相互碰撞;(3)模拟为稳态模拟,将颗粒视作球形颗粒,并且不考虑壁面因颗粒撞击造成的几何形状的变化。

颗粒的运动方程<sup>[17]</sup>为:

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} (v_f - v_p) + \frac{g(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} + F_x$$

(1)

式中: $v_p$ —颗粒速度,m/s; $\mu$ —动力粘度,Pa·s; $C_D$ —粘性阻力系数; $v_f$ —气体速度,m/s; $\rho_p$ —颗粒密度,kg/m<sup>3</sup>; $\rho_f$ —气体密度,kg/m<sup>3</sup>; $g$ —重力加速度,m/s<sup>2</sup>; $F_x$ —颗粒所受其他力之和,包括 Saffman 升力、布朗力及其他附加力。

由于本文气流所含颗粒较少,且气流与颗粒的密度相差较大,气流中这些力对颗粒相的影响很小,可以忽略不计。式(1)等号右边的第 1 项表示单位质量颗粒所受到的阻力,第 2 项表示单位质量颗粒所受重力与浮力之差。

图 2 喷嘴环和叶轮网格划分

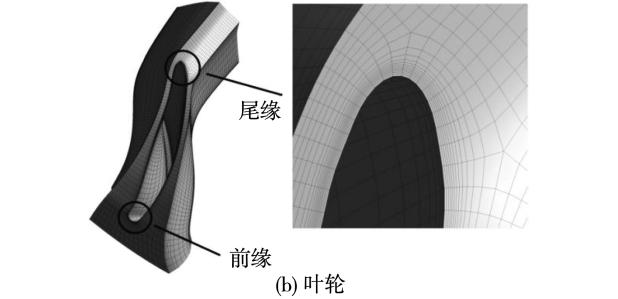


Fig. 2 Mesh division of nozzle ring and impeller

## 1.4 计算条件介绍

涡轮的工作介质为连续高速的可压缩空气,其中包含燃油燃烧产生的废气和颗粒物,其内部的流场为典型的湍流流动。采用雷诺时均 N-S 方程和 SST 湍流模型作为求解的湍流模型,因为 SST 模型考虑了湍流切应力,适用于含有逆压梯度的流动<sup>[18]</sup>。

根据涡轮增压器实际工作情况,设置如下边界条件:

连续相:涡轮入口设为总温、总压,出口为  $1.01 \times 10^5$  Pa;气流入口方向垂直于涡轮入口界面;湍流强度定义为湍流脉动速度与平均速度的比值,设为 5%;所有固体壁面均为无滑移速度边界且光滑绝热;涡轮内部静止和转动区域交界面处,采用冻结转子边界条件,其他交界面采用混合交界面。

颗粒相:在涡轮入口处,颗粒的滑移速度为 0,即颗粒的入射速度与气流的入口速度一致,颗粒垂直于涡轮入口进入,位置随机。颗粒为船用柴油机燃烧产生的烟灰颗粒,密度为  $2\ 000\text{ kg/m}^3$ ,直径分布范围为  $1 \sim 10\ \mu\text{m}$ ,入口颗粒质量浓度为  $1 \times 10^{-3}\text{ g/kg}$ ,指定颗粒的数量为 5 000 (5 000 并不是颗粒的实际数量,而是在空间分布的细化程度)。

## 1.5 磨损模型

固体颗粒对壁面的冲蚀磨损机理非常复杂。一方面,冲蚀率与颗粒的撞击速度、角度及物理性质有关;另一方面,冲蚀率与壁面材料的刚度、延性和粗糙度有关。本文选用 Finnie 模型<sup>[19]</sup>研究颗粒对叶片的冲蚀磨损,该模型反映了颗粒的撞击速度和角度与叶片表面冲蚀率的关系,其表达式为:

$$E = kv^2 f(\gamma) \quad (2)$$

式中: $E$ —无量纲质量; $k$ —常数; $v$ —颗粒撞击速度, m/s; $\gamma$ —颗粒撞击角度, ( $^\circ$ )。

$f(\gamma)$  为撞击角的无量纲函数:

$$f(\gamma) = \begin{cases} \frac{1}{3} \cos^2 \gamma, & \tan \gamma > \frac{1}{3} \\ \sin(2\gamma) - 3 \sin^2 \gamma, & \tan \gamma \leq \frac{1}{3} \end{cases} \quad (3)$$

壁面磨损量为:

$$M = EN_p m_p \quad (4)$$

式中: $m_p$ —颗粒质量流量, kg/s;  $N_p$ —撞击壁面的颗

粒数。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 流场模型验证

在进行涡轮气固两相流模拟之前,需要对所建模型的准确性和所选湍流模型的合理性进行验证。结合可变涡轮的台架试验数据,以 25% 开度时的情况为例,对所建模型进行验证。图 3 为喷嘴环开度为 25% 时,涡轮等熵效率和相似流量的模拟和试验结果对比。由图可知,模拟与试验的整体吻合度较好,等熵效率的最大相对误差为 3.93%,相似流量的最大相对误差为 4.63%。出现误差的原因主要是几何建模时对实体模型有一定的简化,并且模拟计算时假定壁面是绝热的,而实际情况是涡轮与周围环境一直存在换热,但是误差整体小于 5%,说明所建模型和所选方法可行。

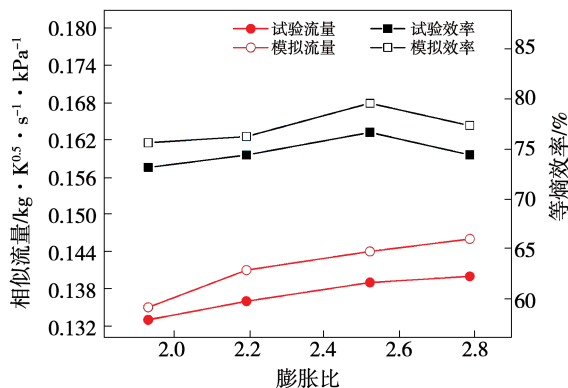


图 3 25% 开度下相似流量和等熵效率的模拟和试验结果对比

Fig. 3 Comparison of simulation and experimental results of similar flow rate and isentropic efficiency at 25% opening degree

### 2.2 磨损模型验证

为了验证所采用磨损模型的准确性,以文献[20]中冲蚀磨损试验所用  $90^\circ$  弯管为几何模型,采用 Finnie 模型对其进行气固两相流计算。弯管几何模型如图 4 所示。模拟条件与文献[20]实验条件一致。文献试验中以弯管磨损厚度与颗粒质量之比来衡量磨损率,为了更好地将模拟结果与实验结果进行对比分析,将两者分别进行归一化处理,结果如图 5 所示。所选取的位置为图 4 中 XZ 平面与弯管



段壁面的相交线, $\alpha$  为弯管角度( $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ )。可以看出,模拟结果与实验结果整体吻合度较好,说明所采用磨损模型的计算结果是准确可信的。

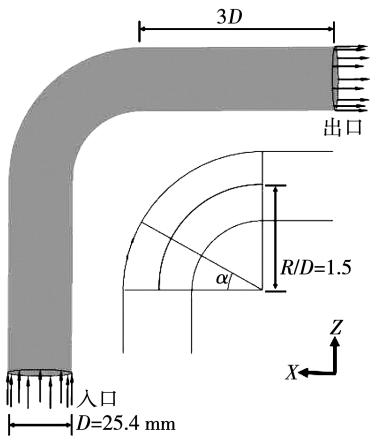


图 4 弯管几何模型  
Fig.4 Geometric model of elbow

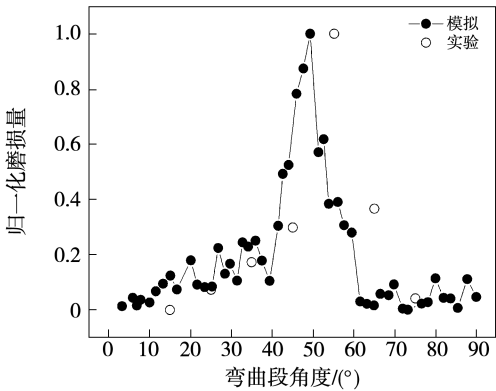


图 5 模拟与实验归一化磨损量对比  
Fig.5 Comparison of simulated and experimental normalized erosion

2.3 气流流场对喷嘴环磨损的影响

图 6 是零开度下叶片 50% 叶高处马赫数分布云图。可以看出,当气流进入喷嘴环时,由于流道面积减小,气流膨胀,速度增大,即气流的焓转化成了动能,使得气流加速并推动叶轮旋转做功,且气流在进入叶轮后会进一步膨胀。此外,在喷嘴环尾缘处可以观察到气流的减速和轻微的分

图 7 为喷嘴环开度在 0,50% 和 100% 时,喷嘴环和叶轮在 50% 叶高处的气流流线图。可以看出,随着开度的增大,气流在进入喷嘴环时的进气攻角由正攻角逐渐转变成负攻角,这会导致不同开度下

喷嘴环磨损情况有所不同。同时,气流在进入叶轮时,进气正攻角也有所减小,入口速度分布更加均匀,使气流在惯性作用下受到叶轮压力面的挤压,此时在吸力面形成的漩涡分离区有所减小甚至消失。

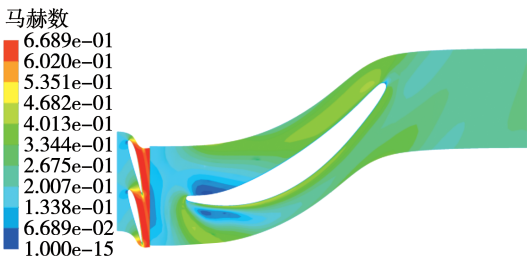


图 6 零开度时 50% 叶高处马赫数云图  
Fig.6 Mach number cloud chart of 50% blade height at 0 opening degree

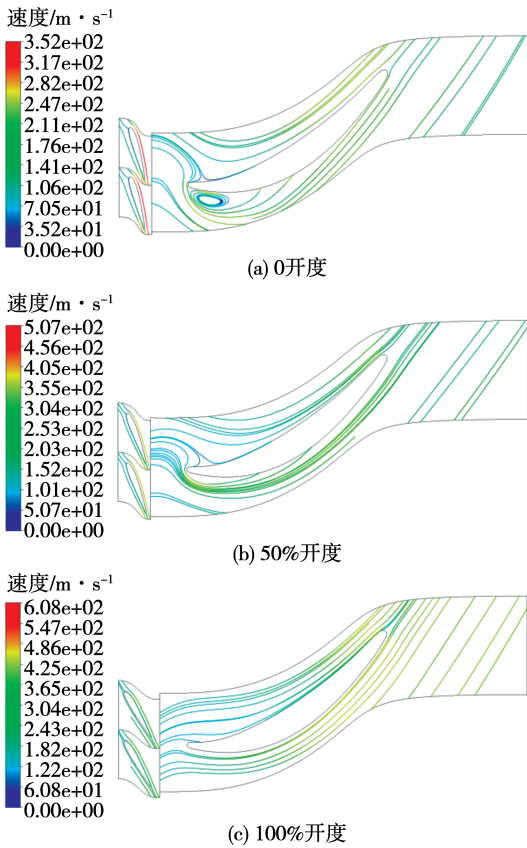


图 7 喷嘴环和叶轮在 50% 叶高处的气流流线  
Fig.7 Airflow streamline of nozzle ring and impeller at 50% blade height

图 8 为零开度时,喷嘴环 b1,b7,b13 和 b19 进口相对气流角沿叶高分布的对

轮内部的流场分布沿周向不同,这会导致不同周向位置喷嘴环的磨损情况存在区别。其他开度下,也存在相似的情况,即不同位置的喷嘴环磨损情况不同。

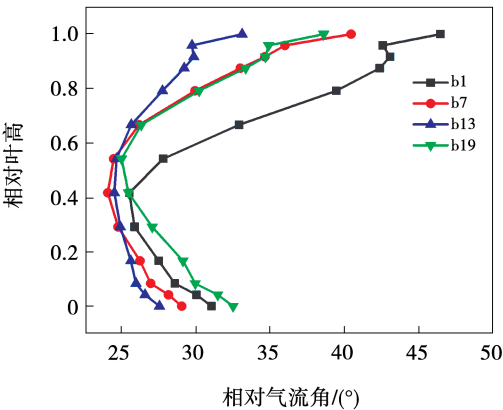


图 8 零开度时不同喷嘴环进口相对气流角沿叶高分布对比

Fig. 8 Comparison of relative airflow angles at the inlet of different nozzle rings along the blade height at 0 opening degree

2.4 开度对喷嘴环磨损的影响

图 9 是各开度下喷嘴环压力面的磨损分布云图(其中放大的叶片分别为平均磨损率最大和最小的喷嘴环,其他开度下喷嘴环的轮缘侧、轮毂侧、前缘和后缘的位置均与零开度下标注的一样)。可以看出,不同开度下,压力面的磨损率大小和磨损区域分布区别较大。当喷嘴环处于 0, 25% 和 50% 的开度,磨损区域主要位于叶片压力面的中后段,且上、下两端的磨损情况比中间区域严重;当开度再次增大时,压力面后半段的磨损区域开始减小,并逐渐向前端移动,使得喷嘴环前缘的磨损程度开始增加,但依然小于后半段区域;当开度达到 100% 时,压力面的磨损区域主要集中在下端区域,且磨损面积有所减小。各开度下,不同喷嘴环的磨损情况也不同,随着开度的增大,磨损率和磨损位置的差异也增大。

图 10 为各开度下喷嘴环吸力面的磨损分布云图(放大的叶片分别为平均磨损率最大和最小的喷嘴环,其它开度下喷嘴环的轮缘侧、轮毂侧、前缘和后缘的位置均与零开度下标注的一样)。对比图 9

可以看出,吸力面的磨损率和磨损区域明显小于压力面。吸力面的磨损区域主要分布在喷嘴环前缘,有小部分磨损区域位于喷嘴环后缘,且不同开度下的磨损情况区别不大,只是随着开度的增大,磨损区域的面积略有减小。

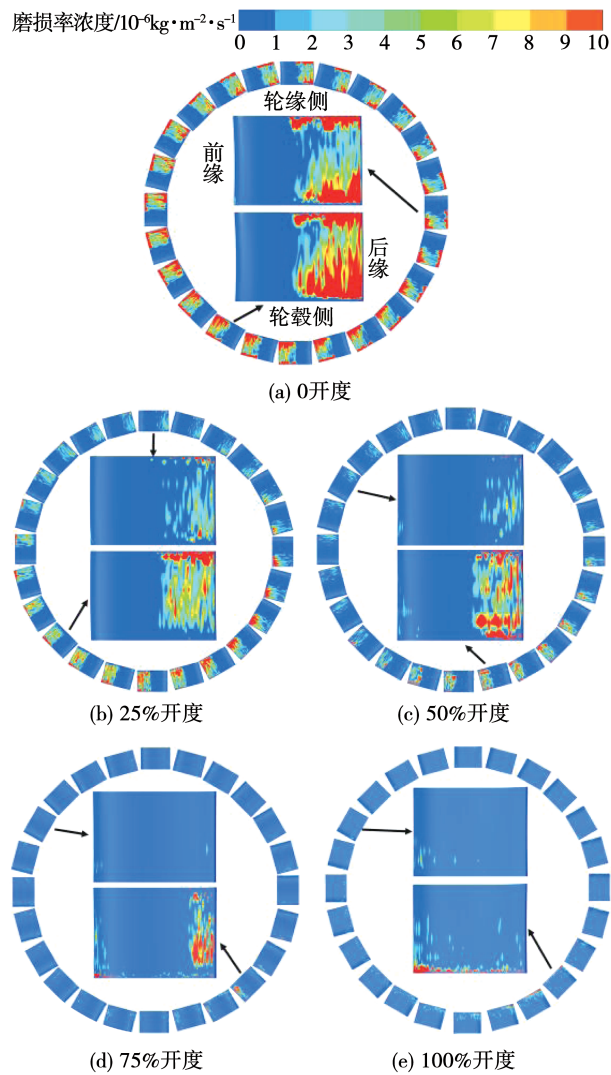


图 9 各开度下喷嘴环压力面磨损分布云图

Fig. 9 Distribution cloud chart of nozzle ring pressure surface wear at each opening degree

从图 9 和图 10 各喷嘴环的磨损情况可以看出,由于涡壳结构的周向不对称性,使得涡轮内部流场沿周向具有明显的不均匀性,导致颗粒在各喷嘴环流道内的运动情况有所不同,从而造成不同周向位置喷嘴环的磨损率和磨损区域各不相同,且各开度下各喷嘴环的磨损率和磨损区域也有所不同。涡轮内部流场周向分布的不均性可以用不同喷嘴环进口

相对气流角的差异来体现(如图 8 所示)。

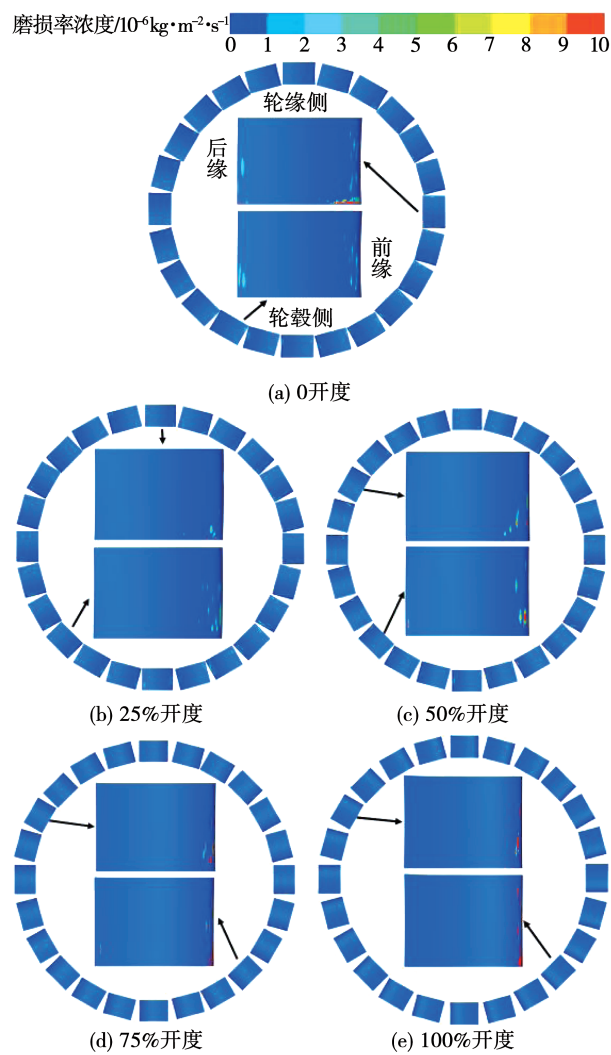


图 10 各开度下喷嘴环吸力面磨损分布云图  
Fig. 10 Distribution cloud chart of nozzle ring suction surface wear at each opening degree

图 11 为不同开度下各喷嘴环的平均磨损率对比。对于零开度,喷嘴环的磨损最为严重,但各喷嘴环之间的磨损差异不如其他开度下的情况明显,此时喷嘴环的平均磨损率在  $4.09 \times 10^{-6} \sim 5.98 \times 10^{-6}$   $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  之间。随着开度的增大,虽然颗粒对喷嘴环的磨损减轻,但各喷嘴环之间的差异却增大。当开度为 50% 时,喷嘴环的平均磨损率在  $0.21 \times 10^{-6} \sim 2.56 \times 10^{-6}$   $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  之间。当开度达到 100% 时,喷嘴环的平均磨损率在  $0.01 \times 10^{-6} \sim 2.98 \times 10^{-6}$   $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  之间。由此可见,随着开度的增大,各喷嘴环间的磨损差异也增大。另外,零开

度下喷嘴环的整体平均磨损率分别是 50% 开度和 100% 开度的 5.83 和 13.95 倍,说明开度对喷嘴环的磨损影响较大,随着开度的增大,磨损率和磨损区域面积都有明显的减小。

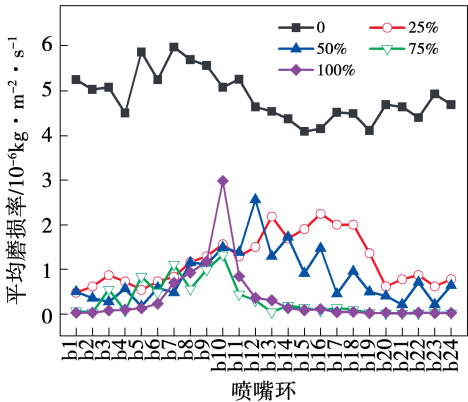


图 11 各开度下各喷嘴环的平均磨损率  
Fig. 11 Average wear rate of each nozzle ring at each opening degree

图 12 为增压器在装机运行一段时间后停机拆检时喷嘴环的磨损情况,可以看出,各叶片的磨损情况并不相同,且喷嘴环压力面的磨损量和磨损区域明显大于吸力面。

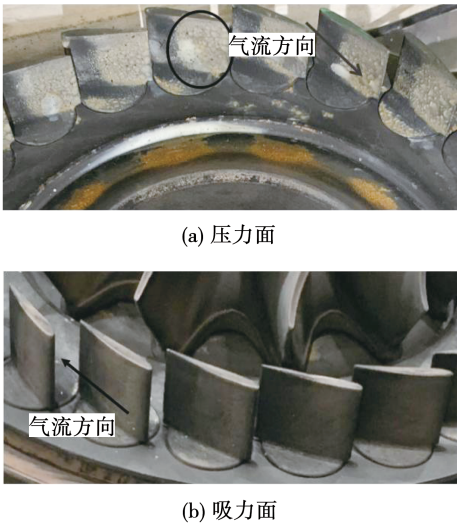


图 12 涡轮喷嘴环磨损实物图  
Fig. 12 Real image of turbine nozzle ring wear

### 2.5 颗粒粒径对喷嘴环磨损的影响

由于不同粒径的颗粒在流场中的受力情况有所不同,导致其运动轨迹以及对喷嘴环磨损的影响也



不同。为了分析比较不同粒径颗粒对喷嘴环磨损的影响,图 13 ~ 图 15 分别给出了喷嘴环在 0,50% 和 100% 开度下压力面不同粒径的颗粒轨迹图(所展示的叶片为对应开度下平均磨损率最大的喷嘴环),选取 1,5 和 10  $\mu\text{m}$  粒径的颗粒进行比较分析。

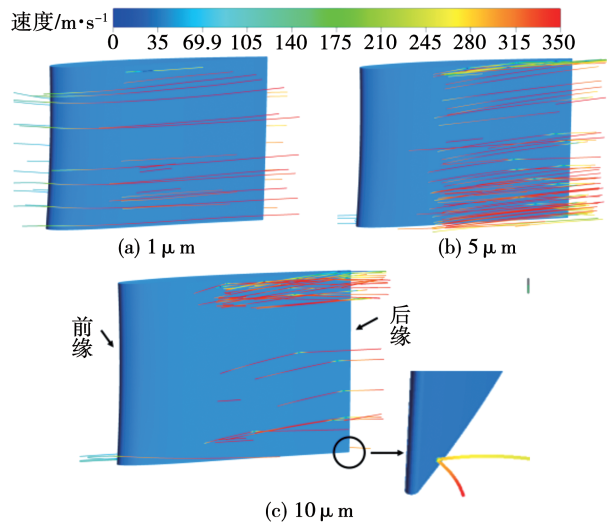


图 13 零开度下压力面颗粒轨迹

Fig. 13 Particle trajectory on pressure surface at 0 opening degree

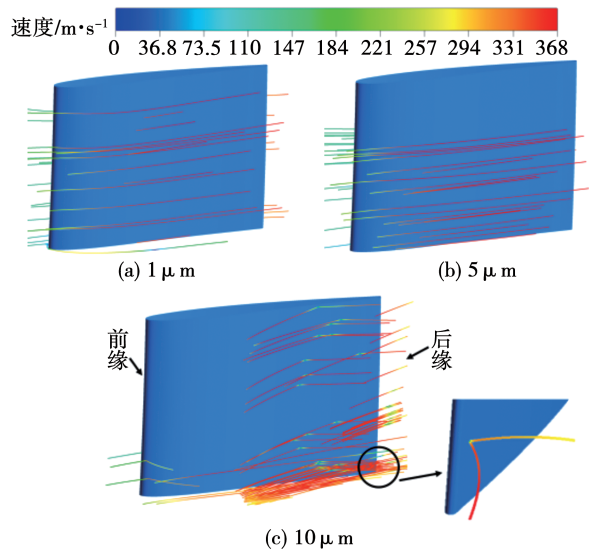


图 14 50% 开度下压力面颗粒轨迹

Fig. 14 Particle trajectory on pressure surface at 50% opening degree

由图 13 ~ 15 可知,对于粒径 1  $\mu\text{m}$  的小颗粒,由于其本身惯性较小,受气流携带作用较大,在任何开

度下,其运动轨迹都与气流的运动方向基本一致。大部分 1  $\mu\text{m}$  的颗粒都随气流通过喷嘴环,只有小部分在喷嘴环入口处随气流撞击叶片前缘。对于粒径 5  $\mu\text{m}$  的颗粒,当开度处于零时,主要撞击喷嘴环压力面的后半段,随着开度的增大,喉口面积增大,使得颗粒对气流的跟随性改善,颗粒逐渐倾向于在喷嘴环入口处撞击叶片前缘,而进入喷嘴环的颗粒基本不再撞击叶片。由于粒径为 10  $\mu\text{m}$  的颗粒惯性较大,受气流的携带作用较小,运动轨迹趋于直线,主要撞击喷嘴环压力面的后半段区域。当喷嘴环处于小开度时,受喉口面积的限制,10  $\mu\text{m}$  的颗粒倾向于撞击叶片压力面的上、下端区域。随着开度的增大,10  $\mu\text{m}$  的颗粒趋向于均匀撞击喷嘴环压力面的后半段区域。当开度处于最大时,重力对颗粒的影响作用增强,10  $\mu\text{m}$  的颗粒主要从喷嘴环下端流过,同时主要撞击该区域,使得 100% 开度下该位置的磨损最为严重。另外,粒径大于 5  $\mu\text{m}$  的颗粒,在所有开度下都会有小部分随气流撞击叶片前缘,此时颗粒的撞击角度较大,且这部分颗粒惯性较大,受气流携带作用较小,反弹后会撞击相邻喷嘴环吸力面的后缘位置,如图中圆圈标注并放大的区域所示。这就是部分喷嘴环吸力面后缘会有小区域磨损的原因。

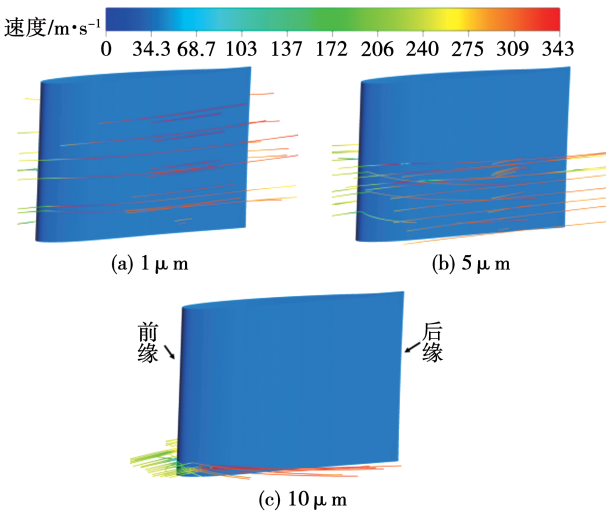


图 15 100% 开度下压力面颗粒轨迹

Fig. 15 Particle trajectory on pressure surface at 100% opening degree

图 16 为零开度时不同粒径颗粒在压力面沿弦向位置的撞击速度分布图(以平均磨损率最大的喷嘴环为例)。可以看到,撞击喷嘴环前缘颗粒的撞击速度小于撞击压力面中后段的颗粒,这是因为气流速度沿着压力面弦向在逐渐增大,颗粒的撞击速度也随之增大。 $1\text{ }\mu\text{m}$  的颗粒主要撞击压力面前缘,  $5$  和  $10\text{ }\mu\text{m}$  的颗粒主要撞击压力面的中、后段,速度大多都在  $300\text{ m/s}$  以上。图中也包含了部分撞击吸力面前缘的颗粒以及反弹后撞击吸力面后缘的颗粒(图中左下角的颗粒),其撞击速度明显小于压力面的颗粒。

通过比较喷嘴环压力面和吸力面两侧颗粒的运动情况发现,撞击喷嘴环吸力面的颗粒数量远少于撞击压力面的颗粒,且颗粒撞击速度也小于压力面(如图 16 所示),所以吸力面的磨损率和磨损区域面积都明显小于压力面。

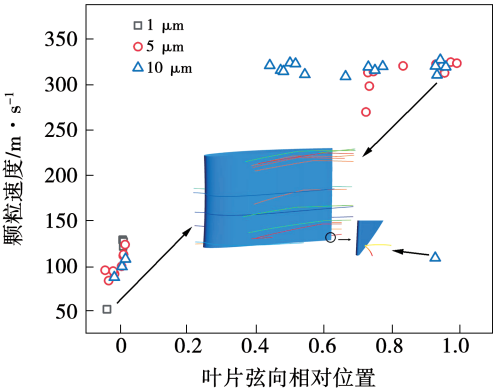


图 16 零开度下颗粒撞击速度

Fig. 16 Impact velocities of particles at 0 opening degree

3 结 论

以船用可变混流涡轮为研究对象,应用气固两相流模型研究了船用柴油机尾气颗粒对涡轮喷嘴环的冲蚀磨损现象,得到了不同粒径颗粒对喷嘴环叶片的冲蚀磨损规律和开度变化对冲蚀磨损分布的影响,结论如下:

(1) 随着喷嘴环开度的增大,气流在喷嘴环进口处的进气攻角由负攻角转变为正攻角,使得涡轮内部流场的分布情况发生了变化,影响了颗粒在流场中的运动,导致不同开度下喷嘴环的磨损情况有

所不同。

(2) 小粒径颗粒主要撞击喷嘴环的前缘区域,开度对其影响较小;较大颗粒主要撞击喷嘴环压力面的中后段,但是当开度达到最大时,颗粒的撞击区域更偏向于喷嘴环的下端和前端区域。喷嘴环压力面的磨损率和磨损区域明显大于吸力面,喷嘴环的整体磨损情况随开度的增大有所减轻。

(3) 由于涡轮进气涡壳结构的周向不对称性,使得内部流场沿周向分布不均匀,导致不同周向位置喷嘴环的磨损率和磨损区域均有所不同。而且随着开度的增大,各喷嘴环之间的磨损差异也增大。

参考文献:

[1] FENELEY A J, PESIRIDIS A, ANDWARI A M. Variable geometry turbocharger technologies for exhaust energy recovery and boosting-a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 71: 959 – 975.

[2] GAO J, LIU Y, ZHENG Q, et al. Advances in aerodynamics, structure design and test technology of variable geometry turbines[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2021, 236(2): 364 – 390.

[3] KOZAK D, MAZURO P, TEODORCZYK A. Numerical simulation of two-stage variable geometry turbine [J]. Energies, 2021, 14(17): 1 – 34.

[4] 王智慧, 马朝臣, 祝 飞. 脉冲进气条件下弹性约束导叶可变几何涡轮性能研究[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(7): 706 – 712, 780.

WANG Zhi-hui, MA Chao-chen, ZHU Fei. Performance of a variable geometry turbine with elastically restrained guide vanes under pulsating conditions[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(7): 706 – 712, 780.

[5] CAO L H, TU C Y, HU P F, et al. Influence of solid particle erosion (SPE) on safety and economy of steam turbines[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 150: 552 – 563.

[6] CAO L H, LIU S, LI Y C, et al. Influence of valve governing mode on solid particle erosion and efficiency in governing stage of steam turbine[J]. Energy, 2020, 191: 116581. 1 – 116581. 10.

[7] CAI L X, MAO J R, WANG S S, et al. New features of solid particle erosion damage of control stage blades in supercritical steam turbine[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2016, 230 ( A1 ): 76 – 85.

[ 8 ] LI C,BIN G F,LI J,et al. Study on the erosive wear of the gas-solid flow of compressor blade in an aero-turboshaft engine based on the Finnie model[J]. Tribology International,2021,163:1-14.

[ 9 ] AZIMIAN M,BART H J. Computational analysis of erosion in a radial inflow steam turbine[J]. Engineering Failure Analysis,2016,64:26-43.

[ 10 ] 叶学民,张 丹,李春曦. 动叶可调轴流风机叶片磨损对其性能的影响[J]. 动力工程学报,2017,37(4):285-292.

YE Xue-min,ZHANG Dan,LI Chun-xi. Effects of blade erosion on performance degradation of a variable-pitch axial flow fan[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2017,37(4):285-292.

[ 11 ] 李春曦,张 丹,叶学民. 动叶可调轴流风机叶片磨损的仿真研究[J]. 系统仿真学报,2018,30(5):1762-1771.

LI Chun-xi,ZHANG Dan,YE Xue-min. Simulation of blade erosion of variable-pitch axial flow fan[J]. Journal of System Simulation,2018,30(5):1762-1771.

[ 12 ] CORBIN J C,MENSAH A A,PIEBER S M,et al. Trace metals in soot and PM2.5 from heavy-fuel-oil combustion in a marine engine[J]. Environmental Science and Technology,2018,52(11):6714-6722.

[ 13 ] KUITTINEN N,JALKANEN J P,ALANEN J,et al. Shipping remains a globally significant source of anthropogenic PN emissions even after 2020 sulfur regulation[J]. Environmental Science and Technology,2020,55:129-138.

[ 14 ] ZHANG F,CHEN Y,SU P,et al, Variations and characteristics of carbonaceous substances emitted from a heavy fuel oil ship engine under different operating loads [ J ]. Environmental Pollution, 2021,284:1-8.

[ 15 ] ZHANG F,GUO H,CHEN Y,et al. Size-segregated characteristics of OC,EC and organic matters in PM emitted from different types of ships in China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020,20(3):1549-1564.

[ 16 ] 周金喜. 船舶柴油机颗粒物排放特性及其控制技术研究 [ D ]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.

ZHOU Jin-xi. Characterization of particulate matter emissions from marine diesel engines and study on control [ D ]. Harbin: Harbin Engineering University,2019.

[ 17 ] HAMED A A,TABAKOFF W,RIVIR R B,et al. Turbine blade surface deterioration by erosion [ J ]. Journal of Turbomachinery, 2005,127(3):445-452.

[ 18 ] SMIRNOV P E,MENTER F R. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term [ J ]. Journal of Turbomachinery, 2009, 131(4):1-8.

[ 19 ] BIGLARIAN M,MOMENILARIMI M,GANJI B,et al. Prediction of erosive wear locations in centrifugal compressor using CFD simulation and comparison with experimental model [ J ]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019,41(2):1-10.

[ 20 ] CHEN X H. Application of computational fluid dynamics (CFD) to flow simulation and erosion prediction in single-phase and multiphase flow [ D ]. Oklahoma:The University of Tulsa,2004.

( 刘 颖 编 辑 )