

颗粒直径对向心透平冲蚀磨损的影响

段治强,李学敏

(华中科技大学 能源与动力工程学院 湖北 武汉 430074)

摘要:为了探讨不同直径颗粒对无导叶向心透平输送气固两相流过程中的冲蚀磨损问题,对颗粒与各过流部件的冲击速度与冲击角度进行数值模拟。结果表明:小直径颗粒在蜗壳和叶轮流道中分布相对均匀,几乎不与过流部件表面发生碰撞,对过流部件的冲蚀磨损率相对较小。大直径颗粒运动中更倾向于从蜗壳尾部进入叶轮,在叶轮流道中,颗粒轨迹易向叶片压力面靠拢,且易与叶片压力面发生碰撞。随着颗粒直径的增加,颗粒将以更大的角度和速率撞击叶片压力面,且存在多次撞击过程,造成压力面中部靠近前盘处和吸力面靠近出口区域严重磨损。

关键词:向心透平;冲蚀磨损;气固两相流;运动轨迹;数值模拟

中图分类号:TK263.1 文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2016.12.005

引言

向心透平作为小型燃气轮机的做功部件,叶片的性能和使用寿命对于日常的运行至关重要^[1]。微型燃气轮机主要以汽油、柴油和天然气为燃料,燃烧会产生一定的固体颗粒物,颗粒物随烟气进入烟气净化器。而烟气净化器只能过滤掉较大的颗粒物,较小的颗粒物仍将随烟气进入向心透平。以国外的标准为例,向心透平入口处最大颗粒不得大于 $10\ \mu\text{m}$,而浓度则远小于 $50\ \text{mg}/\text{Nm}^3$ ^[2]。微型燃气轮机的叶轮转速普遍在几万转每分钟,使得通过向心透平的气体拥有很大的速率,固粒易被高速气流带动对各过流部件表面造成冲蚀磨损。因此,对固粒在向心透平中的运行轨迹进行数值模拟,可为提高叶片抗冲蚀能力提供科学依据^[3-4]。

针对叶轮机械的冲蚀问题,张莉等人对汽轮机

内固体颗粒对过流部件的磨损特性进行了相关研究^[5],发现叶片压力面有树突状凹痕,这是典型的颗粒冲蚀磨损失效机制;周国义等人对涡轮增压机组燃气轮机内气固两相流进行了研究^[6],通过数值仿真手段,得出不同直径颗粒在叶片中的流动轨迹及叶片的易磨损部位;Lathabai等人研究固粒对使用不同涂层材料的叶轮的冲蚀磨损机理^[7],发现硬度高、密度大的颗粒对叶轮表面造成的磨损更严重。由于向心透平内气固两相流动的复杂性,叶片表面磨损的微观性试验可以通过PIV(粒子成像测速技术)测量技术完成,许洪元等人将PIV技术应用于叶轮机械中颗粒速度场的研究^[8],认为颗粒直径和形状影响其在叶轮中的运动轨迹。但PIV试验装置复杂、费用高,数值模拟是目前研究叶轮机械内部流动较为常用的方法^[9-12],数值模拟有研究周期短、投入资金小的优点。

微型燃气轮机实际运行过程中,进入到向心透平中颗粒的体积分数远远低于总体积的12%,故采用拉格朗日法计算颗粒的运动轨迹^[13]。考虑到气相存在旋转和旋流流动,气相采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,颗粒用离散的拉格朗日方程描述,实现对固粒在向心透平中的运动轨迹及固粒对过流部件的冲蚀磨损的数值模拟。

1 几何模型和数值方法

1.1 叶轮模型

研究的无导叶向心透平设计工况下性能参数为:质量流量 $Q=4.5\ \text{kg}/\text{s}$;入口总温 $T=1\ 123\ \text{K}$;入口总压 $P=396\ \text{kPa}$;转速 $n=25\ 148\ \text{r}/\text{min}$;透平压比 $n=3.96$,叶轮的主要设计参数如表1所示,其

收稿日期:2016-01-14; 修订日期:2016-02-03

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2015CFB628);华中科技大学自主创新基金资助项目(2015TS035)

作者简介:段治强(1990-),男,四川绵阳人,华中科技大学硕士研究生。

通讯作者:李学敏(1977-),男,湖北武汉人,华中科技大学副教授,博士。

中 轴向长度为 129.27 mm ,叶片厚度 1 mm ,叶顶间隙 1 mm ,叶片数 15。

表 1 叶轮的主要参数

Tab.1 Main parameters of impeller

参 数	入 口	出 口
叶高/mm	30.32	91.19
半径/mm	215.46	轮缘 136.02
		轮毂 44.82
相对气流角/(°)	96.5	轮缘 29.63
		轮毂 59.45
绝对气流角/(°)	14	90.94

1.2 网格划分

叶轮在 TurboGrid 中进行结构化网格的划分 ,其中叶片表面和顶部间隙进行了局部加密。进口段和出口段在 ICEM 中进行了结构化网格的划分 ,蜗壳则在 ICEM 中进行了非结构网格的划分。通过对比不同网格数下数值模拟的结果 ,进行了网格无关性的验证。最终确定计算域的最优网格数为 2 128 900 ,进口段、蜗壳、叶轮和出口段网格分别为 67 544 ,313 664 ,1 690 230 和 57 462。蜗壳和叶轮区域的网格如图 1 所示。

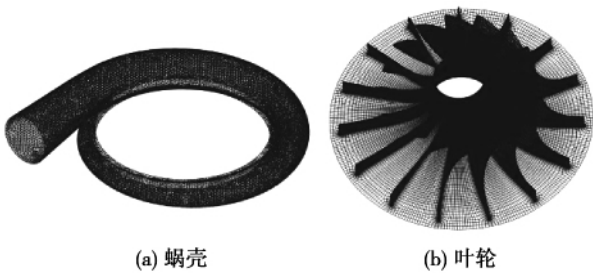


图 1 蜗壳和叶轮区域网格划分

Fig.1 Grid division of computing domain

1.3 离散项基本假设与控制方程

在 Fluent 中模拟气固两相流过程比较复杂 ,为了深入研究向心透平内部的气固两相流动及磨损机制 ,做出以下假设:(1) 连续相(理想气体)为可压缩气体 ,离散项为稀相颗粒 ,连续相和离散项的各物性参数均为常数;(2) 颗粒相的体积分数远远低于 12% ,忽略颗粒相中颗粒间的相互碰撞;(3) 颗粒表面光滑 ,为球形;(4) 颗粒受到气相作用力主要为粘滞阻力、压力梯度力、湍流扩散及重力。

微型燃气轮机实际工作过程中 ,进入向心透平中的固粒体积分数远小于 12% ,故 DPM(颗粒离散

相模型)适用于本模型的计算。在数值计算过程中 ,采用气固双向耦合计算 ,考虑气体与颗粒之间的相互作用 ,离散项的运动方程(以 X 方向为例)^[14]为:

$$\frac{dv_p}{dt} = F_D(u_f - u_p) + g \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} + F_x \quad (1)$$

式中: $g(\rho_p - \rho_f)/\rho_p$ —单位质量颗粒所受重力和浮力之差; $F_D(u_f - u_p)$ —单位质量颗粒受到的阻力; F_x —颗粒所受其它力之和 ,主要包括布朗力、Saffman 升力以及其它附加外力。但大部分外力对颗粒的作用非常小 ,可以忽略不计 ,故只考虑颗粒所受的粘性阻力、压力梯度力、湍流扩散及重力。

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \frac{24}{24} \quad (2)$$

式中: u_p —颗粒速度 ,m/s; ρ_p —颗粒密度 ,kg/m³; d_p —颗粒直径 ,m; g —重力加速度 ,m/s²; u_f —流体速度 ,m/s; ρ_f —流体密度 ,kg/m³; Re —颗粒雷诺数。

1.4 边界条件

根据向心透平实际的工作条件 ,设置边界条件如下:

连续相:入口处质量流量 4.5 kg/s ,入口压力 396 kPa ,给定合适的湍流强度和水利直径。各个壁面都设为固壁边界条件 ,即采用无滑移、无穿透壁面。

离散项:颗粒入口速度和气体的初始速度一致 ,以面源的方式从蜗壳入口处均匀释放。保证释放颗粒数目一定 ,根据颗粒直径的变化设置不同的颗粒质量流量 ,各组的颗粒体积分数分布在 0.001% ~ 1% 之间 ,较好的满足了 DPM 离散项模型的要求。

在计算颗粒运动轨迹时 ,需要考虑颗粒与壁面的碰撞问题 ,因为反弹后颗粒的动能有部分损失 ,颗粒速度的大小和方向都会发生变化。在叶片和盖板两处需要设置反弹边界条件 ,给出法向速度和切向速度的恢复系数 ,使磨损结果与实际情况更加接近。采用 Tabakoff, W 提出的半经验冲击反弹关系模型:

$$\begin{cases} \frac{u_{pn2}}{u_{pn1}} = 1.0 - 0.4159\alpha_1 - 0.4994\alpha_1^2 + 0.29\alpha_1^3 \\ \frac{u_{pt2}}{u_{pt1}} = 1.0 - 2.12\alpha_1 + 3.0775\alpha_1^2 - 1.1\alpha_1^3 \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_{pn} —颗粒的法向速度 ,m/s; u_{pt} —颗粒的切向速度 ,m/s; α_1 —入射角。

在叶轮流道的尾端即压力出口处 ,设置为逃逸

边界条件。

1.5 磨损模型

在进行气固两相流磨损计算时,过流部件材料选用不锈钢。用单位面积材料在单位时间内的磨损率 $W/(kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$ 来表征不同直径颗粒对材料的冲蚀磨损规律,质量磨损率定义为^[15]:

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{m_p c(d_p) f(\alpha) v b^{(v)}}{A_{face}} \quad (4)$$

$$f(\alpha) = \begin{cases} \frac{1}{3} \cos^2 \alpha \tan \alpha > \frac{1}{3} \\ \sin(2\alpha) - 3 \sin^2 \alpha \tan \alpha \leq \frac{1}{3} \end{cases} \quad (5)$$

式中: n —单位时间内撞击材料表面的颗粒数; m_p —颗粒质量; $C(d_p)$ —颗粒直径的函数表达式; $f(\alpha)$ —入射角 α 的函数表达式; $b^{(v)}$ —撞击速度 v 的函数表达式。

2 计算结果及分析

2.1 模型验证

在模型进行气固两相流计算之前,有必要对设计好的模型进行气动性能分析,确保设计的准确性以及湍流模型选择的合理性。因理想气体运动过程中压缩性较大,故选择隐式求解器以及耦合算子,湍流模型使用 RNG $k-\epsilon$ 模型,采用标准壁面函数。将重要位置的主要参数进行比较,并给出误差大小,具体结果如表 2 所示。

表 2 叶轮气动输出比较

Tab. 2 Comparison of rotor blade outputs

参 数	设计值	计算值	误差/%
叶轮入口:			
静温/K	962.06	967.37	0.56
静压/kPa	219.17	213.13	-2.76
绝对速度/ $m \cdot s^{-1}$	568.62	560.16	-1.49
相对速度/ $m \cdot s^{-1}$	138.49	143.68	3.75
绝对流动角/(°)	14	13.83	-1.21
叶轮出口:			
静温/K	791.20	798.10	0.87
静压/kPa	100	99.48	-0.52
绝对速度/ $m \cdot s^{-1}$	205.72	211.67	2.89
相对速度/ $m \cdot s^{-1}$	334.10	325.89	-2.46
绝对流动角/(°)	90.94	89.98	-1.06

通过对比表 2 中叶轮进出口的各项重要参数,得知这些重要参数的气动计算值与设计值的误差都在 5% 以内,较好地满足了设计要求。证明了设计的准确性以及湍流模型选择的合理性,为下一步进行气固两项流的计算奠定了基础。

2.2 颗粒对蜗壳的磨损

本研究的目的在于分析不同直径颗粒在向心透平中的运动规律以及对各过流部件造成的冲蚀磨损。首先需要验证加入颗粒后的模型气动性能,经比较发现,加入颗粒的各气动参数值与未加入颗粒的气动参数值相差无几。这是因为颗粒的体积分数很小,颗粒对气体总体的作用相对较小。由国外厂商的标准得知,进入向心透平中的颗粒直径不超过 $10 \mu m$,但是可能有极少数超过 $10 \mu m$ 的颗粒进入向心透平中。为了与实际情况结合得更加紧密,本研究采用的颗粒直径分别为 $1, 5, 10$ 和 $20 \mu m$,其它设置保持一致,每组追踪 80 个颗粒的运行轨迹。

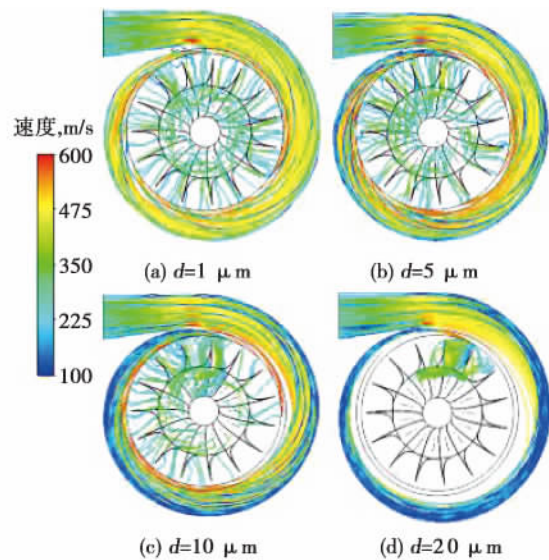


图 2 不同颗粒直径条件下固体颗粒运动轨迹图

Fig. 2 Trajectories of solid particles with different diameters

图 2 为颗粒直径 d 分别为 $1, 5, 10$ 和 $20 \mu m$ 时的相对速度运行轨迹图。由图 2 可知,当颗粒直径较小时,颗粒从蜗壳入口到出口过程中速度均匀增加,且在蜗壳出口处达到最大值。颗粒在蜗壳中的流动较为均匀,在蜗壳出口沿圆周方向均匀进入叶道。这是因为粒径较小时,颗粒运动过程中所受离心力较小,气体黏性作用的影响相对较大,颗粒对气

体的跟随作用较强。随着粒径的增加,颗粒进入蜗壳后,越来越多的颗粒贴着蜗壳外径最大处的壁面运动,从蜗壳中后段进入叶道。这是因为高速运动下的颗粒,粒径的增加会使颗粒所受离心力的增长速度远大于气体粘性力的增长速度。当粒径 $d = 20 \mu\text{m}$ 时,这种运动规律达到了一种极端,几乎全部颗粒贴着蜗壳外壁面运动到蜗壳尾部进入叶道,导致蜗壳尾部颗粒浓度较高,可以假设蜗壳尾部可能是颗粒冲蚀磨损较为严重的部位之一。

图3为不同直径颗粒对蜗壳的质量磨损率图。由图3可知,当粒径直径较小时,蜗壳的磨损相对均匀,没有密集的磨损区域。

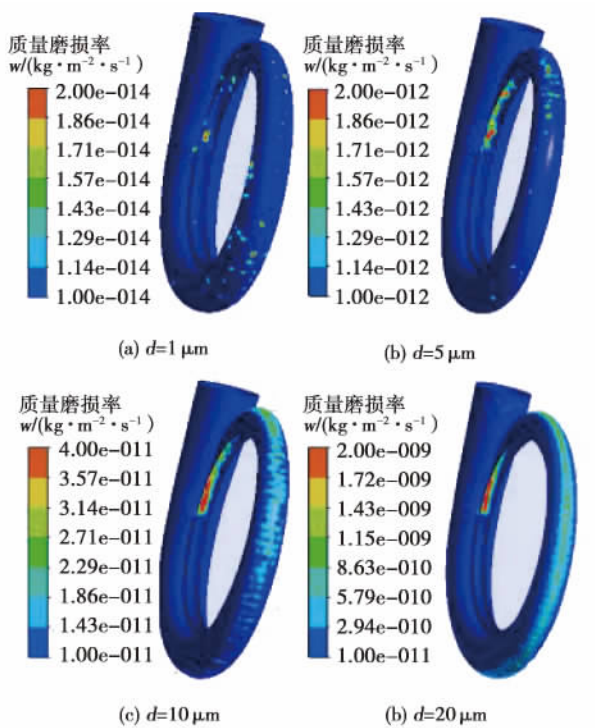


图3 不同直径颗粒对蜗壳壁面的磨损率对比

Fig. 3 Comparison of volute wall ware rates with different particle diameters

由图2中颗粒轨迹线可以看出,颗粒较小时的运动轨迹线分布均匀,与蜗壳壁面发生碰撞的颗粒较少。随着粒径的逐步增大,磨损率峰值出现在蜗壳尾部区域,蜗壳外壁面磨损也较为严重。这是因为颗粒轨迹线密集地分布于蜗壳外壁面,颗粒以较高速率从蜗壳尾部进入叶道。根据颗粒的运动轨迹还可以看出,蜗壳的磨损主要是颗粒在壁面滚动滑行造成的擦伤式磨损。且随着粒径的增加,蜗壳的

磨损程度和范围都逐步加大。

2.3 颗粒对叶片的磨损

图4为粒径 d 分别为1、5、10和20 μm 时颗粒在叶道中的运行轨迹图。由图4可知,当颗粒直径较小时,颗粒在叶道前端运动相对均匀,但在叶道后端有贴向叶片吸力面的运动趋势。随着粒径的增加,所受离心力迅速增大,使颗粒与叶片压力面靠近出口区域发生碰撞。粒径越大,颗粒向叶片压力面靠拢越迅速,与叶片压力面撞击的位置向叶片中部区域移动,并且碰撞角度和反弹角度也越大。粒径较大时,可以看到颗粒与叶片压力面的多次碰撞过程,且第2次碰撞角度小于第一次的碰撞角度,这是因为第1次碰撞后颗粒的动能有所损失。当粒径 $d = 20 \mu\text{m}$ 时发生了一种极端现象,颗粒在叶轮入口处经过旋转后以较大角度与叶片压力面靠近出口区域发生碰撞,然后以较大反弹角向叶片吸力面运动。这是因为此时在蜗壳尾部的颗粒浓度较大,颗粒局部受力相对复杂。

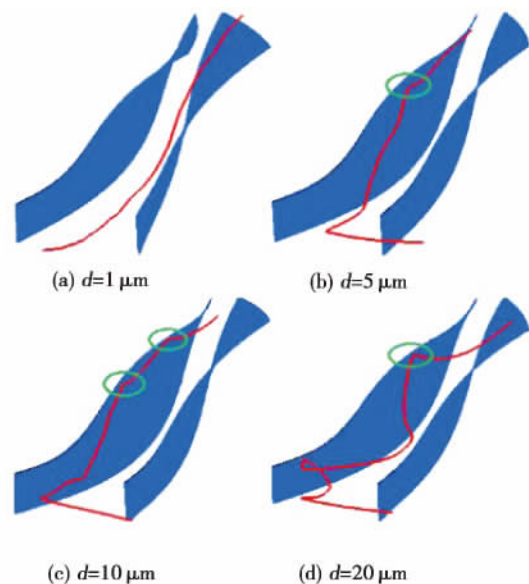


图4 不同直径颗粒在流道中的运动轨迹

Fig. 4 Trajectories of solid particles in impeller flow passage with different particle diameters

由图5可知,粒径较小时,叶片最大磨损率位于叶片吸力面靠近出口区域,这是因为小直径颗粒在叶道后端易于向叶片吸力面靠拢。粒径增大到5 μm 后,叶片最大磨损峰值出现在叶片压力面出口端靠近前盖板区域,这与图4(b)的颗粒轨迹线正好契合。随着粒径的进一步加大,易磨损位置没有变

化,但磨损范围进一步扩大至叶片压力面中部区域。当粒径为 $d = 20 \mu\text{m}$ 时,最大磨损峰值出现在叶片压力面出口端靠近前盖板区域,叶片吸力面尾部区域也有较大磨损。比较 4 种粒径对应的磨损率取值范围,发现磨损率随着碰撞角度的增大而增大。还可以看出,当颗粒直径较大时,磨损最严重叶片与相邻叶片在磨损率和磨损范围存在一定差距,这是因为粒径较大时,进入不同叶道中的颗粒数存在较大差距,颗粒更多的选择从蜗壳尾部进入对应叶道。

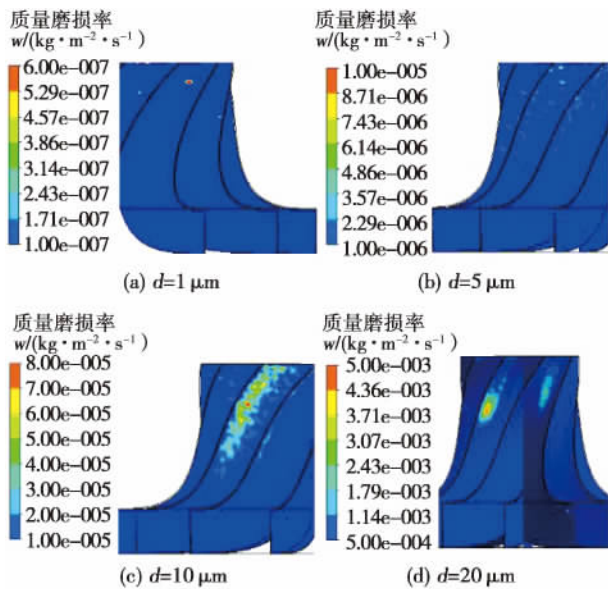


图 5 不同直径颗粒时叶片磨损率对比
Fig. 5 Comparison of blade wear rate with different particle diameters

2.4 颗粒对盖板的磨损

通过对比不同直径颗粒对前后盖板的磨损情况发现,当颗粒直径处于 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间时,颗粒在蜗壳中分布相对均匀,颗粒对盖板造成的磨损只是简单的磨损率大小的变化,磨损位置和分布并没有发生太大变化。当粒径 $d = 20 \mu\text{m}$ 时,从图 4 (d) 颗粒运动轨迹线可以看出,颗粒在叶轮入口处流动较为复杂,对盖板造成的磨损位置相对杂乱。因此仅取直径 $d = 5 \mu\text{m}$ 的颗粒来探讨颗粒对前后盖板造成较大磨损的位置。图 6 (a) 中前盖板磨损率最大的部位为前盖板入口靠近叶顶间隙区域。这是因为有部分颗粒从压力面通过叶顶间隙运动到相邻叶道中去,颗粒从叶片压力面运动到相邻流道叶片吸力面过程还是一个加速过程,这就使得颗粒对前盖板的磨损相对较大。图 6 (b) 中后盖板磨损率最大的位

置为后盖板靠近出口区域,且磨损分布相对均匀。这是因为颗粒流向出口时有贴近后盖板运动的趋势,部分颗粒与后盖板出口区域发生了碰撞。从磨损率来看,前盖板的磨损率是后盖板磨损率的 20 倍左右,主要是因为叶轮入口处颗粒的速度远大于叶轮出口端颗粒的速度。

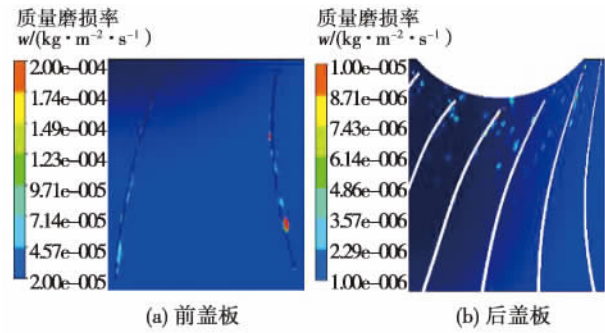


图 6 颗粒对盖板的磨损

Fig. 6 The wear of hub and shroud with solid particles

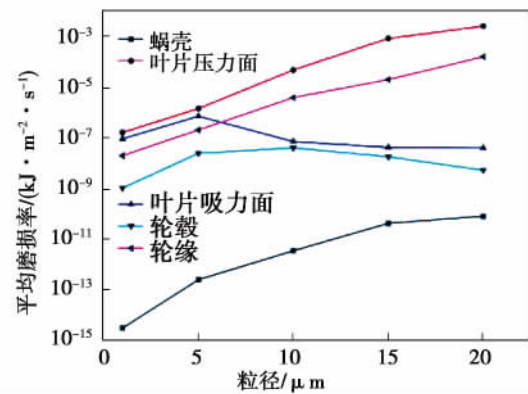


图 7 不同颗粒直径条件下各过流部件的平均磨损率情况

Fig. 7 Average wear rate of different components with different particle diameters

2.5 各过流部件磨损率比较

图 7 为各过流部件磨损率均值随固粒直径变化曲线,可以看出随着固体颗粒直径的增加,叶片压力面和叶轮前盖板磨损率大小几乎成线性增长,且平均磨损率都较大。而叶片吸力面和叶轮后盖板的磨损率随着粒径的增加呈现先增长后下降的趋势,这是因为颗粒所受离心力随着粒径增加而逐步增大,颗粒有靠向叶片压力面和叶轮前盖板的运动趋势,靠近叶片吸力面和叶轮后盖板区域的颗粒浓度逐渐

降低。蜗壳的平均磨损率随着粒径增加而增大,但相对磨损率相对较小。

3 结 论

(1) 采用气固两相流的离散项模型,对不同直径条件下颗粒的运动轨迹及磨损结果进行了数值模拟,结果较好地揭示了颗粒在过流部件中的流动规律以及对各过流部件表面造成的磨损情况;

(2) 在蜗壳内,小直径颗粒运动轨迹分布非常均匀,磨损率相对较小且磨损位置分布均匀。随着颗粒直径的增加,颗粒越来越趋向于从蜗壳尾部进入叶道,磨损率较大位置为蜗壳外径最大处的壁面和蜗壳尾部区域;

(3) 在叶轮内,小直径颗粒有靠近叶片吸力面的运动趋势,最大磨损位置为叶片吸力面靠近出口区域。随着颗粒直径的增加,颗粒运动轨迹迅速贴向叶片吸力面,压力面中部靠近前盘处和吸力面靠近出口区域严重磨损;

(4) 随着粒径的增加,盖板的磨损位置不发生改变。前盖板磨损率最大的部位为前盖板入口靠近叶顶间隙区域,后盖板磨损率最大的位置为后盖板靠近出口区域。

参考文献:

- [1] 奚忠,付经伦,刘建军等.小型离心透平一维和三维设计分析[J].航空动力学报,2012,27(7):1493-1502.
XI Zhong,FU Jing-lun,LIU Jian-jun,et al. The design and analysis of macro radial flow turbine in single and three dimensions[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(7):1493-1502.
- [2] BOHNET M. Particle Separation from hot gases-possibilities and limits//Smith,3rd European Symposium on Separation of Particle from Gases[C]. Nuernberg:Duchesne,1995:51-55.
- [3] 王剑平,周国义,孙丰瑞.大气温度对涡轮增压机组性能影响的分析[J].燃气轮机技术,2005,18(1):35-37.
WANG Jian-ping,ZHOU Guo-yi,SUN Feng-rui. Influence analysis of atmospheric temperature on performance of turbo charger set[J]. Gas Turbine Technology,2005,18(1):35-37.
- [4] 岳彭,王加庆,王磊等.船用锅炉增压燃烧与传热计算方法研究[J].锅炉制造,2008(2):8-11.
YUE Peng,WANG Jian-qing,WANG Lei,et al. The research on the marine boiler's pressurized combustion and heat transfer[J]. Boiler Manufacturing,2008(2):8-11.
- [5] 张莉,郝玉婷.汽轮机调节级固体颗粒冲蚀的数值模拟[J].汽轮机技术,2013(1):31-34.
ZHANG Li,ZHENG Yu-ting. Numerical simulation of solid particle erosion of the steam turbine governing stage[J]. Gas Turbine Tech-

nology,2013(1):31-34.

- [6] 周国义,王为清,李忠根.涡轮增压机组燃气轮机内气固两相流的数值模拟[J].海军工程大学学报,2011,23(2):80-86.
ZHOU Guoyi,WANG Weiqing,LI Zhonggen. Numerical simulation of gas-solid two phase flow of turbo charger set[J]. Journal of Naval Engineering University,2011,23(2):80-86.
- [7] LATHABAI S,OTTMÜLLER M,FERNANDEZ I. Solid particle erosion behaviour of thermal sprayed ceramic,metallic and polymer coatings[J]. Wear,1998,221(2):93-108.
- [8] 许洪元,卢达榕.离心泵流道中固体颗粒速度场的粒子成像测速(PIV)分析与研究[J].农业工程学报,1998,14(3):112-116.
XU Hong-yuan,LU Da-rong. Particle image displacement velocity (PIV) and velocity field of solid particles in centrifugal pump[J]. Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering,1988,14(3):112-116.
- [9] MAZUR Z,CAMPOS-AMEZCUA R,URQUIZA-BELTRÁN G,et al. Numerical 3D simulation of the erosion due to solid particle impact in the main stop valve of a steam turbine[J]. Applied Thermal Engineering,2004,24(13):1877-1891.
- [10] 刘娟,许洪元,唐澍等.离心泵内固体颗粒运动规律与磨损的数值模拟[J].农业机械学报,2008,39(6):54-59.
LIU Juan,XU Hong-yuan,TANG Shu,et al. Numerical simulation of erosion and particle motion trajectory in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(6):54-59.
- [11] 吴波,严宏志,徐海良等.渣浆泵内固相颗粒冲蚀特性的数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(1):119-124.
WU Bo,YAN Hong-zhi,XU Hai-liang,et al. Numerical simulation about erosion characteristics of solid particle in slurry pump[J]. Journal of Central South University: Science and Technology,2012,43(1):124-129.
- [12] 盛振国,李陈峰,任慧龙等.基于CFD的大型风力发电机组叶片气动性能研究[J].哈尔滨工程大学学报,2012,33(5):595-600.
SHENG Zhen-guo,LI Chen-feng,REN Hui-long,et al. Investigation on the aerodynamic performance of large wind turbine blade based on CFD[J]. Journal of Harbin Engineering University,2012,33(5):595-600.
- [13] 梅丹,向晓东,幸福堂等.颗粒浓度对离心风机磨损的影响规律数值研究[J].流体机械,2010(1):15-18.
MEI Dan,XIANG Xiao-dong,XING FU-tang,et al. Numerical simulation about effect rules of particles concentration on erosion of the centrifugal fan[J]. Fluid Machinery,2010(1):15-18.
- [14] BOZZINI B,RICOTTI M E,BONIARDI M,et al. Evaluation of erosion-corrosion in multiphase flow via CFD and experimental analysis[J]. Wear,2003,255(1):237-245.
- [15] ANSYS CFX. Release 13.0 [J]. ANSYS CFX-Solver Theory Guide,ANSYS,2010,213(1):20-60.

(单丽华 编辑)

els. The dynamic simulation results indicate that the gas turbine dynamic model can accurately simulate the dynamic performance and be applied to the design of corresponding control systems of gas turbines. **Key words:** gas turbine ,simulation model ,high precision ,dynamic model

颗粒直径对向心透平冲蚀磨损的影响 = Effect of Particle Diameter on Erosion Wear Performance of Radial Flow Turbine [刊 汉] DUAN Zhi-qiang ,LI Xue-min (School of Energy and Power Engineering ,Huazhong University of Science and Technology ,Wuhan ,China ,Post Code : 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(12). - 25 ~ 30

In order to investigate the influence of particle diameter on erosion performance of radial flow turbine delivering solid-gas two-phase flow medium ,the impinging velocity ,impact angle and other parameters between solid particle and the surface of flow-passing parts were evaluated numerically. According to simulation results ,the particles with small diameters were distributed relatively homogeneously in the flow path of volute and blade ,and almost had no collision with the surface of flow-passing parts ,so the erosion wear of flow-passing parts was relatively weak. By contrary ,the solid particles with large diameters tended to pass into the flow pass of the impeller in the tail of the volute in the flow pass of the impeller ,and the particle was apt to move forward to the pressure surface and impacted the pressure surface of the blade. With the increase of particle diameter ,the particle would impact the pressure surface with a larger angle and velocity ,and there are multiple collisions with the pressure surface ,resulting exacerbated erosion wear of the middle of the pressure surface near the shroud and the suction surface near the exit. **Key words:** radial flow turbine ,erosive wear ,solid-gas two-phase flow ,motion trajectory ,numerical simulation

叶片前缘微小圆柱诱导涡对低压轴流风机气动性能的影响分析 = Influences of Vortex Caused by the Micro-cylinder in the Blade Leading Edge on the Aerodynamic Performance of Low-pressure Axial Fan [刊 , 汉] CHEN Xiao-Fei ,HUANG Dian-Gui (School of Energy and Power Engineering ,University of Shanghai for Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code : 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(12). - 31 ~ 37

In order to improve the performance of axial fan ,this paper presented a flow control method by installing a micro-cylinder in the leading edge of the axial fan blade ,and investigated the corresponding performance by using CFD. The results show that the micro-cylinder can improve the fan performance within a certain range of operating conditions. By comparing the flow field and the distribution of the boundary vorticity flux between the axial fans with and without the micro-cylinder ,the improvement of the axial fan performance was analyzed. **Key words:** flow separation ,