

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.03.006

扫路机专用风机内部气固两相流场仿真分析^{*}

张 斌,滕新科,李 亮,万 军
(长沙中联重科环境产业有限公司,湖南 长沙 410013)

摘要:针对扫路机专用风机的磨损问题,采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型结合欧拉-拉格朗日方法的颗粒轨道模型,对某型号扫路机专用风机内部气固两相流场进行了数值仿真研究。首先分析了扫路机专用风机叶片吸力面上的分离流动情况及颗粒在叶轮内的流动规律;然后结合颗粒运动轨迹,探究风机叶片的主要磨损位置、磨损形状及蜗壳的磨损情况,获得了专用风机内部气固两相流磨损机理及磨损规律。结果表明:在分离流动的作用下,固体颗粒偏向叶片压力面运动,导致叶片压力面磨损;压力面的磨损呈条带状分布,叶片磨损最严重区域位于叶片与后盘接触区的 1/4 处;蜗壳表面存在周期性磨损区。

关键词:扫路机;离心风机;气固两相流;磨损率

中图分类号:TH442;U418.3⁺24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)03-0246-05

Numerical study of gas-solid two-phase flow field of road sweeper fan

ZHANG Bin, TENG Xin-ke, LI Liang, WAN Jun
(Changsha Zoomlion Environmental Industry Co., Ltd., Changsha 410013, China)

Abstract: Aiming at the abrasion of road sweeper fan, RNG $k-\varepsilon$ turbulence model combined with particle trajectory model of Euler Lagrange method was used to study inner flow field of fan. Firstly, the separation flow and the flow pattern of the particles in the impeller were analyzed. Then combining with the trajectory of particle motion, the main wear position and wear shape of the fan blade and the wear of the volute were investigated, and the abrasion mechanism and wear rule of gas-solid two-phase flow field of fan was obtained. The results indicate that under the action of the separation flow, the solid particles keep moving towards the pressure surface and colliding with the pressure surface, resulting in the wear of blade pressure surface. The wear of fan blade is mainly located on the pressure surface, and the wear of the pressure surface is a strip distribution. The most serious area of blade wear is located at 1/4 of the contact area between blade and hub. There is a periodic wear zone on the surface of the volute.

Key words: road sweeper; centrifugal fan; gas-solid two-phase flow; wear rate

0 引 言

扫路机专用风机是扫路机气力系统的关键部件,由于扫路机专用风机长期运行在含尘气流环境下,当粉尘在高速气流的携带作用下,以很高的速度对风机叶片表面进行碰撞、冲蚀、切削,以及擦伤式摩擦,易导

致风机叶片前缘、工作面出口端部产生磨损,引起叶片穿孔,使风机流动特性变差,缩短风机寿命^[1]。现阶段国内外针对扫路机专用风机的研究主要聚焦于不同颗粒特性(包括颗粒粒径、颗粒浓度等)对风机磨损程度影响及风机防磨措施的研究,但对颗粒在风机内部运动规律及风机气固两相流磨损机理、磨损规律和磨

收稿日期:2017-06-06

基金项目:湖南省科技计划项目经费资助项目(2016RS3011)

作者简介:张 斌(1983-),男,江西鄱阳人,博士,高级工程师,主要从事工程流体系统及其部件内流特性的机理研究、数值仿真与优化设计方面的研究。E-mail:sjtu2009@163.com

损区域的研究仍显不足。因此,开展扫路机专用风机气固两相流磨损分析是扫路机技术领域中亟待探索的关键研究方向。

本文将对某型号扫路机专用风机内部气固两相流场进行数值仿真研究。

1 几何模型

本文选取某型号扫路机专用风机进行研究,风机主要由叶轮、蜗壳、集流器、进口段、出口段等结构组成,叶片数目为11片。风机主要参数:叶轮进口直径176 mm,叶轮直径482 mm,叶轮宽度60 mm,叶片进口角43.6°,叶片出口角38°,蜗壳宽度186 mm。

风机结构如图1所示。

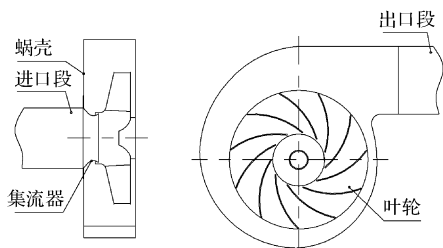


图1 风机结构示意图

2 数值求解

2.1 气固两相流控制方程

目前,研究多相流的方法,主要有欧拉-欧拉方法和欧拉-拉格朗日方法两种。本文研究垃圾颗粒在风机内部的运动规律及其对风机叶片、蜗壳等部件的磨损,是稀疏气固两相流。欧拉-拉格朗日法将流体作为连续相、颗粒作为离散相,通过计算流场中大量粒子的运动得到离散相运动规律,计算得出颗粒的运动轨迹^[2],尤其适用于研究稀疏气固两相流,因此,本文选用欧拉-拉格朗日方法的颗粒轨道模型分析垃圾颗粒的运动规律,研究垃圾颗粒对风机叶片、蜗壳等部件的磨损规律。颗粒轨道模型考虑了颗粒与连续相间的相互作用,能模拟颗粒流的复杂流动,且计算储存量相对较小^[3],适合于本文的气固稀疏两相流数值计算。

离心风机内部流场具有强烈的旋转和曲率效应,湍流模型采用工程上广泛应用,能较好地处理高应变率及流线弯曲程度较大流动问题的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型^[4]。

颗粒轨道模型进行气固两相流数值计算时,将气相作为连续相,在 Euler 坐标系中计算求解;在 Lagrangian 坐标系中计算求解颗粒相运动轨迹。

连续性方程如下式所示:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

N-S 方程如下式所示:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (3)$$

k 方程如下式所示:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(k \rho u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

ε 方程如下式所示:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon \rho u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) \quad (5)$$

式中: ρ —密度; p —压强; ν —运动粘度; f_i —体积力; μ_e —湍流粘性系数; μ —分子粘性系数; μ_t —涡粘性系数; k —湍动能; ε —湍流耗散率; G_k —湍流的产生项, $G_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$; $c, c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ —模型常数, $C_\mu = 0.09, C_{1\varepsilon} = 142, C_{2\varepsilon} = 168, \sigma_k = 10, \sigma_\varepsilon = 13$ 。

颗粒相运动方程如下:

$$\frac{du_p}{dt} = F_p(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (6)$$

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (7)$$

式中: u_p —颗粒相速度; u —连续相速度; F_p —颗粒所受曳力; g_x —颗粒重力加速度; ρ_p —颗粒密度; F_x —颗粒所受附加力,如压力梯度力、虚拟质量力、Basset 力、Magnus 力等。

2.2 磨损理论

固体颗粒对材料表面的磨损,与颗粒和壁面的碰撞角、碰撞速度、颗粒物性、颗粒直径、材料物性等因素有关。颗粒流对材料的磨损通常用磨损率来表征,磨损率指单位时间内,颗粒作用于单位面积材料表面所磨损的材料质量^[5],计算方程如下:

$$\varepsilon_p = K_1 \left[1 + C_k \left(K_{12} \sin \left(\frac{90}{\beta_0} \beta_p \right) \right) \right]^2 v_p^2 \cos^2 \beta_p$$

$$(1 - R_T^2) + K_3(v_p \sin \beta_p)^4 \tag{8}$$

$$R_T = 1 - 000\ 16 v_p \sin \beta_p \tag{9}$$

$$E_0 = \sum_{p=1}^N \frac{m_p \varepsilon_p}{A_{\text{face}}} \tag{10}$$

式中： E_0 —壁面磨损率， $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ； ε_p —单个颗粒对壁面的磨损量， kg/kg ； K_1, K_{12}, K_3, C_k —碰撞经验常数； β_p —碰撞角度； β_0 —最大碰撞角， $(^\circ)$ ； v_p —颗粒碰撞速度， m/s ； R_T —切向恢复比； m_p —颗粒质量流量， kg/s ； A_{face} —面积^[6-7]， m^2 。

2.3 网格生成

在划分网格时，考虑到扫路机专用风机结构的复杂性以及网格生成质量，本研究采用分块划分网格，各个区域单独生成合适的网格，相邻的区域共用一个面。划分网格时首先进行了网格无关性计算，确保网格数量对计算精度不造成影响，确立了网格数约 $4.54 \times 10^6, 2.63 \times 10^6, 1.85 \times 10^6$ 的 3 种网格。

本研究采用不同网格数进行计算，所对应的性能曲线与试验性能曲线对比如图 2 所示。

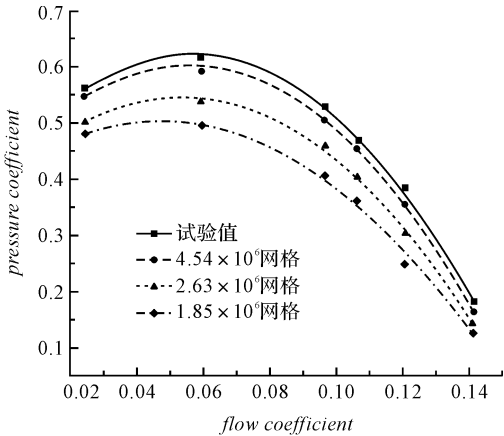


图 2 全压与流量关系曲线

考虑到数值预估的精度，本文选取网格数量约为 4.54×10^6 。蜗壳和叶轮采用适应性较强的非结构化四面体网格，并对曲率变化大的曲面进行加密处理^[8]，其中叶片表面第一层网格高度为 0.4 mm，边界层网格增长因子为 1.2，边界层网格层数为 6；蜗舌表面第一层网格高度为 0.5 mm，边界层网格增长因子为 1.2，边界层网格层数为 5，生成的网格如图 3 所示。

2.4 方程离散与求解

数值求解时，对叶轮-蜗壳区域这类具有相对旋转运动的流动，采用滑移网格模型进行数值求解。计算

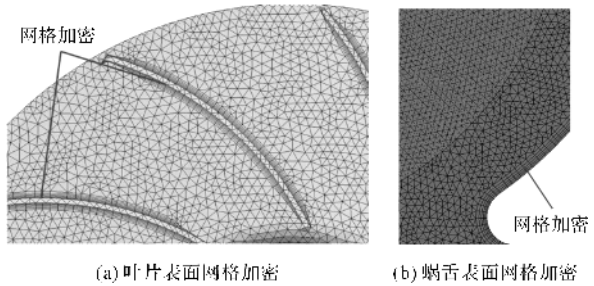


图 3 叶片和蜗舌表面网格

方程离散方法采用有限体积法，压力—速度耦合关系采用 SIMPLE 算法，动量方程、湍动能方程、耗散率方程采用二阶迎风格式离散。

气相边界条件为入口采用质量入口，流量为 1 kg/s；出口采用压力出口，为一个大气压；壁面采用无滑移边界。根据路面垃圾平均粒径为 75 μm 的特征^[9]，计算时颗粒直径选取为 75 μm ，密度为 1 800 kg/m^3 。颗粒相边界条件为入口和出口边界条件均是逃逸边界条件，壁面为自由碰撞，颗粒与壁面的碰撞为刚性碰撞，碰撞恢复系数为 0.9^[10]。颗粒源在集流器入口采用面释放方式释放，释放速度 22.3 m/s。

风机叶轮转速 2 600 r/min，根据风机叶轮转速、网格尺度等参数确定计算时间步长为 5×10^{-5} s，每个时间步迭代步数为 30。叶轮旋转两个周期，待气流场计算稳定后，在风机集流器入口处释放颗粒相进行气固两相流计算。

3 计算结果与分析

叶轮内部压力分布及流线如图 4 所示。

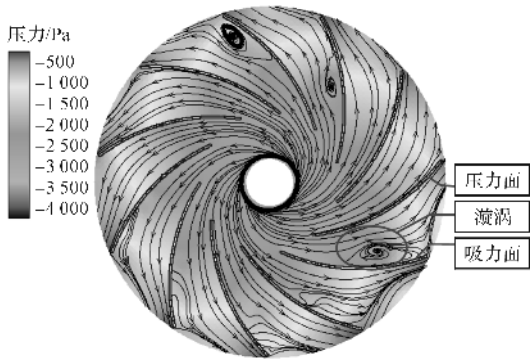


图 4 叶轮内部压力分布及流线图

专用风机叶片吸力面存在流动分离，该分离流动产生的漩涡阻塞了叶轮流道的通流截面，从而导致流线偏向压力面流动。

单个颗粒轨迹如图 5 所示。

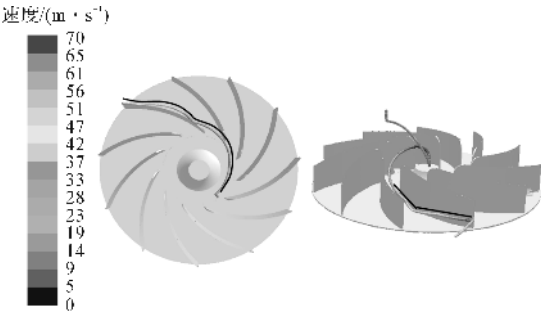


图 5 单个颗粒轨迹图

颗粒进入叶轮流道后,在气流的带动作用下,先与后盘碰撞降速、反弹继续向前加速运动。在气流带动作用下偏向叶片压力面运动,并再次与叶片碰撞降速、反弹、加速,继续运动进入蜗壳流道内,且在叶轮流道漩涡的阻滞作用下保持偏向叶片压力面的运动趋势。

叶片压力面、吸力面磨损分布如图 6 所示。

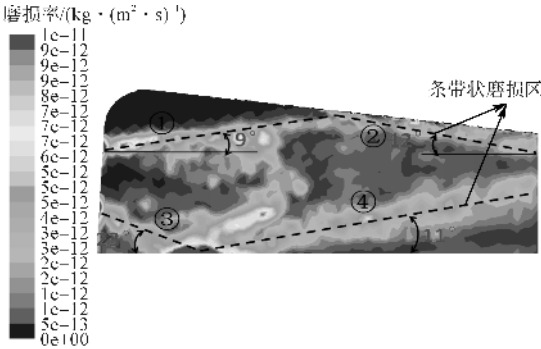


图 6 叶片压力面磨损分布图

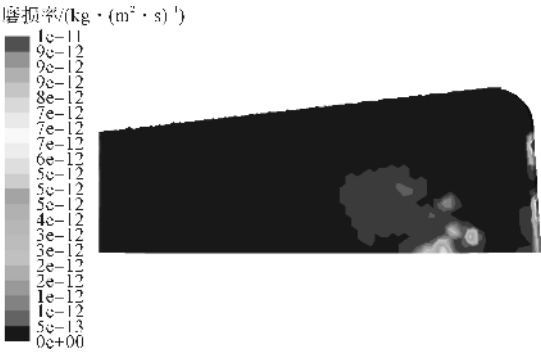


图 7 叶片吸力面磨损分布图

风机叶片的磨损^[11]主要发生在压力面上,吸力面上的磨损现象并不明显,只在局部区域有磨损现象,磨损率远小于压力面的磨损率,与文献[12]中的试验结果一致,表明本文的数值仿真方法的合理性。

叶片压力面的磨损呈 4 条条带状磨损区,条带

磨损区 1 与后盘成 9° 夹角,条带磨损区 2 与后盘成 12° 夹角,条带磨损区 3 与后盘成 23° 夹角,条带磨损区 4 与后盘成 11° 夹角。叶片磨损最严重区域在叶片与后盘接触区的 1/4 处。根据图 6 颗粒的运动轨迹可知,颗粒由风机入口的轴向运动向叶轮流道变向做径向运动后^[13-14],相对于叶轮后盘,以一定角度从叶片前缘向下入射,与叶片压力面接触、碰撞,运动一段距离后与叶轮后盘碰撞反弹后,再次以某一向上的角度向叶片后段运动,并与叶片压力面发生碰撞,在颗粒与叶片压力面碰撞的条带区域,叶片产生条带状磨损。因此,在对叶片进行设计时,该区域需进行防磨损处理。

颗粒在风机内部的轨迹如图 8 所示。

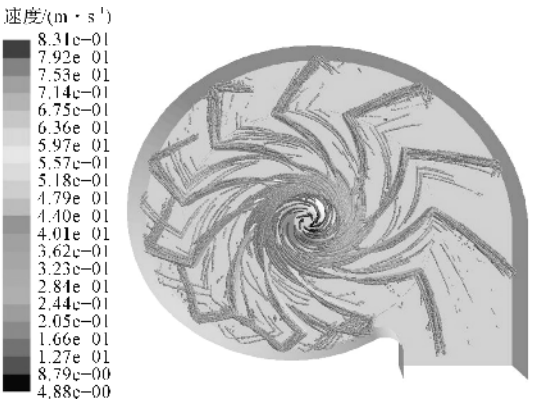


图 8 颗粒在风机内部的轨迹图

颗粒从叶轮流道流出后,由于惯性,在叶轮出口处颗粒沿出口气流速度方向直接冲撞到蜗壳侧周面并产生反弹,然后跟随气流由风机出口排出。

颗粒对蜗壳的磨损分布如图 9 所示。

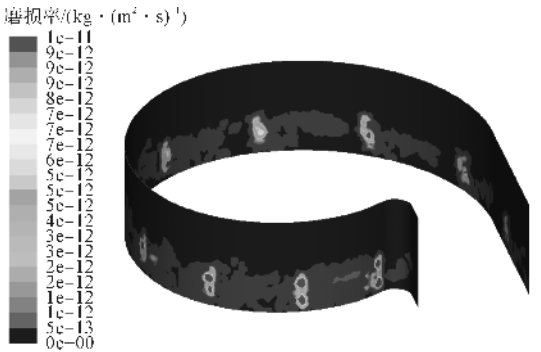


图 9 颗粒对蜗壳的磨损分布图

由于颗粒周期性冲撞到蜗壳侧周面,对蜗壳表面产生了周期性磨损区,蜗壳上越靠近蜗舌的区域,磨损越严重,这是由于靠近蜗舌区域,流道截面积变小,气流流速增大。

风机流道速度如图 10 所示。

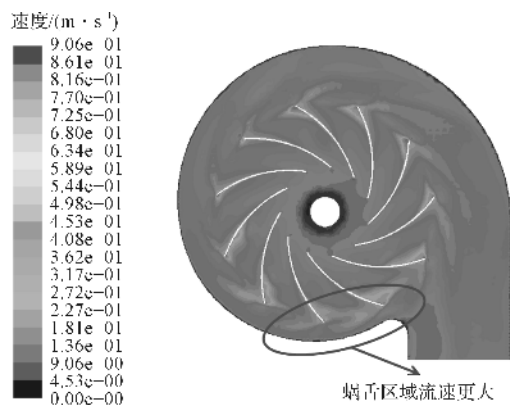


图 10 风机流道速度云图

在气流的作用和颗粒自身惯性的作用下,与蜗壳的碰撞速度更大,颗粒与壁面的碰撞速度越大,壁面受到的刮擦力越大,磨损也越严重。

4 结束语

本研究采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型结合欧拉-拉格朗日方法的颗粒轨道模型,对某型号扫路机专用风机内部气固两相流场进行了数值仿真研究。

(1) 扫路机专用风机叶片的吸力面存在分离流动,该分离流动的存在恶化了风机的内部流动,使流线贴向压力面流动,在气流的带动作用,进入叶轮流道的颗粒也保持偏向叶片压力面运动的趋势,并导致风机压力面磨损;

(2) 风机叶片的磨损主要发生在压力面上,吸力面上磨损现象并不明显,压力面的磨损呈 4 条带状磨损区分布,叶片磨损最严重区域在叶片与后盘接触区的 1/4 处;

(3) 在叶轮出口处颗粒沿出口气流速度方向直接冲撞到蜗壳侧周面,从而对蜗壳表面产生了周期性磨损区,蜗壳上越靠近蜗舌的区域,磨损越严重,蜗壳型线的设计是影响蜗壳磨损的关键因素之一。

参考文献 (References):

- [1] 刘爱军,刘德顺,周知进. 矿井风机叶片磨损机理与抗磨技术研究进展[J]. 中国安全科学学报,2008,18(11): 169-176.
- [2] 吴 倩,李意民. 颗粒直径对离心式通风机磨损影响规律的分析[J]. 矿山机械,2012,40(1):21-23.
- [3] 梅 丹,幸福堂. 气固两相流风机磨损率的数值预测研究[J]. 流体机械,2007,35(10):25-28.
- [4] 李 亮,张 斌,付 玲,等. 扫路车用风机内部涡流特性与压力脉动分析[J]. 中国工程机械学报,2015,13(6): 486-491.
- [5] 梅 丹. 离心风机叶轮内气固两相流动及叶片磨损研究[D]. 武汉:武汉科技大学机械自动化学院,2006.
- [6] GRANT G, TABAKOFF W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles[J]. *Journal of Aircraft*,1975,12(5):471-479.
- [7] TABAKOFF W, KOTWAL R, HAMED A. Erosion study of different materials affected by coal ash particles[J]. *Wear*, 1979,52(1):161-173.
- [8] TAJADURAR B, SUAREZSV, CRUZ J P H, et al. Numerical calculation of pressure fluctuations in the volute of a centrifugal fan[J]. *Journal of Fluids Engineering*,2006,128(2):359-369.
- [9] 刘春华,岑 况. 北京市街道灰尘粒度特征及其来源探析[J]. 环境科学学报,2007,27(6):1006-1012.
- [10] 李晓光,徐德龙,范海宏,等. 大颗粒流化床中颗粒受力的数值模拟[J]. 西安交通大学学报,2006,40(7):836-840.
- [11] 马 睿,刘淑莲,郑水英. 轴承支座对轴流风机性能试验的影响[J]. 轻工机械,2016,34(4):83-86.
- [12] 卞庆飞,李意民. 离心式通风机叶片气固两相流变工况磨损试验研究[J]. 矿山机械,2014,42(3):13-15.
- [13] 罗宝杰,华 路,杜宁江,等. 双吸双流道泵气固液三相流动特性分析[J]. 流体机械,2017(7):47-51.
- [14] 杨国来,张婧芳,叶建中. 黑水调节阀固液两相流数值模拟及内流场分析[J]. 液压气动与密封,2016(12):4-7.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

张 斌,滕新科,李 亮,等. 扫路机专用风机内部气固两相流场仿真分析[J]. 机电工程,2018,35(3):246-250.

ZHANG Bin, TENG Xin-ke, LI Liang, et al. Numerical study of gas-solid two-phase flow field of road sweeper fan[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018,35(3):246-250.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>