

颗粒粒径对除尘洗气机的磨损分析

李 玢 玢, 许 勤, 赵佳斌, 洪 远

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 利用 FLUENT 数值模拟软件, 先用 DPM 离散相模型对不同粒径的粉尘颗粒在除尘洗气机的叶轮叶片中的运动轨迹进行了模拟, 选取并分析了 3 种有典型粒径的粉尘颗粒对除尘洗气机造成的冲蚀磨损情况, 发现磨损最严重区域出现在叶片吸力面尾缘、导流片及筒体与排风口的夹角处, 得出粉尘颗粒粒径大小对洗气机磨损的影响规律。

[关键词] 除尘洗气机, 叶片, 磨损, 数值模拟

[中图分类号] TD714.4 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2017)03-0051-06

Particle Diameter on Erosion Resistance of Dust Removing and Washing Machine

Li Binbin, Xu Qin, Zhao Jiabin, Hong Yuan

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: FLUENT software is used to carry out the numerical simulation on the motion trajectory of different-diameter solid particles in the dust removing and washing machine with discrete phase model. Three representative different-diameters solid particles are chosen to consider erosion of dust removing and washing machine after analysis results. Most serious erosion areas are found to be in trailing edge of blade suction surface, inducer, and the angle between the cylinder and the exhaust surface, and the erosion laws of different-diameters particles on the dust removing and washing machine are obtained, which is useful for determining more effective anti-wear measures.

Key words: dust removing and washing machine, blade, erosion, numerical simulation

由于湿式除尘器是在含尘空气环境下工作, 常有报道称湿式除尘器出现漏水现象^[1], 这很可能是由于粉尘颗粒对壁面造成了磨损。目前对湿式除尘器的研究主要集中在除尘效率及结构优化等方面, 对由于粉尘颗粒对壁面所造成影响的研究几乎没有。本文研究对象为除尘洗气机的关键部件叶轮叶片, 含尘空气的净化主要是在该区域实现, 因此粉尘颗粒对其带来的磨损不能忽视。本文主要分析研究不同粒径的粉尘颗粒对除尘洗气机的磨损情况, 并对提高其耐磨性提出了建议。

1 叶轮叶片的冲蚀磨损

含尘气流进入洗气机的叶轮区域时其流动方向会在叶轮的带动下发生由轴向开始向径向的小于 45° 的偏转。含尘气流进入叶片流道后, 由于粉尘颗粒的密度比空气大, 在自身惯性作用下, 大部分粉尘颗粒跟随气流向叶片压力面偏转, 并与其表面发生碰撞, 最后沿流道流出。粉尘颗粒与叶片材料表面碰撞而产生的损伤就是典型的冲蚀磨损^[2]。颗粒进入叶轮机械后的流动有别于气流的运动, 其不可避免会对叶轮叶片表面造成一定程度的损伤, 而某些含有一定活性化学成分的洗涤液雾滴在对叶片表面带来冲蚀的同时还会给叶片表面造成腐蚀。叶轮叶片的磨损问题几乎是所有风机及水力机械中最常见的故障^[3]。

对叶轮叶片的磨损部位及其磨损程度的研究主要集中在可视化研究, 主要采用实验研究和数值预测这两种方法。实验研究最典型的代表是陈汝刚的叶轮涂漆实验^[4]、杨树柏和陈康民等人^[5]采用高速摄影技术拍摄粉尘颗粒运动轨迹的研究以及 Salaita 与 Tate^[6]通过采用多种表面成像技术方法来研究叶轮叶片的整个磨

损腐蚀过程. 采用数值预测研究方法的主要有梅丹、幸福堂^[7]在基于雷诺应力湍流模型及 Tabakoff 磨损模型的基础上对叶片磨损实现了可视化研究预测. 目前在抗磨损研究方面可视化研究也起着极其重要的作用, 例如戈超对抗磨损仿生叶片^[8]的研究也是通过对 CFD 数值研究和对比来实现可视化分析.

2 数值模拟

2.1 FLUENT 磨损模型

FLUENT 可以监测与粉尘颗粒发生碰撞并产生冲蚀的所有网格的磨损情况. 冲蚀率是指在单位面积上所有与之发生碰撞的粉尘颗粒产生的冲蚀量的总和. 在计算粉尘颗粒对材料表面冲击引起的冲蚀时, 只有在相间耦合的前提下, FLUENT 才能在不断更新颗粒轨道过程中计算粉尘颗粒对材料表面带来的冲蚀. 对于所有需要考虑冲蚀磨损状况的壁面给定适当的冲蚀磨损率计算模型, 国内外学者对此进行了大量的研究. 而针对多相流中粉尘颗粒对材料表面的冲蚀磨损模型, 应用最多的是 Tabakoff 模型^[9].

2.2 洗气机物理模型

由于除尘洗气机的结构较复杂, 直接在 GAMBIT 中建立模型很困难, 故根据除尘洗气机的实际尺寸建立 Solidworks 三维几何模型, 其主要由叶轮叶片、喷淋装置、固定导流片、排污口、电机及支撑装置组成. 叶片有 16 个, 形状为直板型. 固定导流片的个数与叶片个数相同, 安装方向与叶片方向相反. 将建好的三维模型导入到 Workbench 中提取流场域. 由于电机部分是固体区域, 为简便模型将其隐去. 对于其他部分, 则先堵住入口和出口, 采用 fill 命令, 将洗气机的整个流体域填充出来, 最后隐去外壳部分. 由于该物理模型包含动区域, 为精确划分模型网格, 将流体域划分为 4 个部分. 加长进风口长度是为了使气流在进入叶轮区域就已达到湍流状态. 三维几何模型及提取的流场域如图 1 所示.

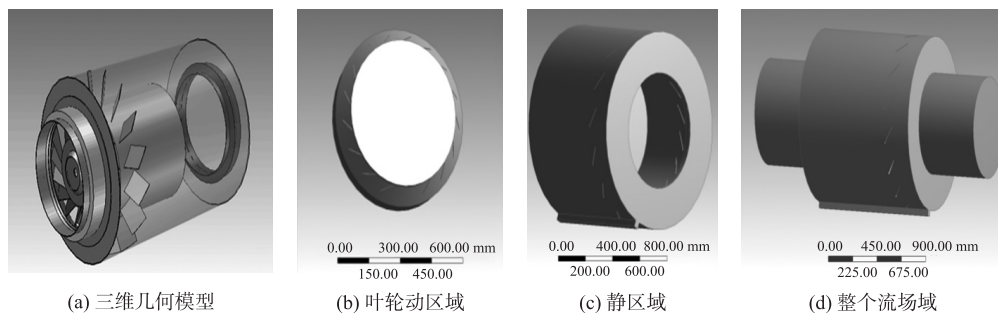


图 1 除尘洗气机的三维几何模型及流场域

Fig. 1 Three-dimensional model and flow field of west dust fan

2.3 网格划分

对模型流场域的网格划分是整个数值模拟过程中极其重要的环节, 网格质量的好坏直接影响计算结果的精度及电脑的运算速度. 对除尘洗气机的流场域进行网格划分时采用混合性网格划分方法, 叶轮旋转区域采用非结构网格, 剩下部分采用结构化网格, 这样既可保证计算结果精度又可加快收敛速度.

将提取好的流场域导入到 Meshing 中进行网格划分, 采用 interface 连接 4 个区域, 分别命名为 Part-a、Part-b、Part-c 及 Part-d. 如图 2 所示, 各部分的网格信息为:

(1) Part-a: 洗气机的叶轮旋转区域. 在该区域气流由原来的轴向运动向径向偏转. 采用非结构四

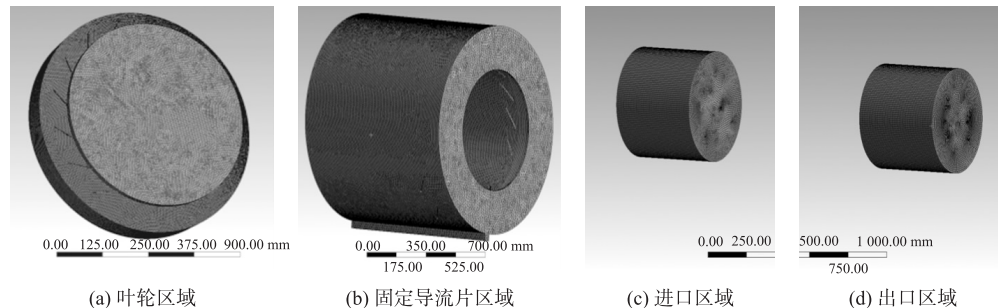


图 2 除尘洗气机网格划分

Fig. 2 Mesh generation of west dust fan

面体网格进行划分,网格数量为 123 万。

(2) Part-b: 固定导流片流道静区域。流体从叶轮区域流出到达固定导流片流道静区域,经固定导流片改变运动方向后向出口运动。此部分采用结构化四面体网格,数量为 465 万。

(3) Part-c: 进口区域。采用结构化网格,数量为 24 万。

(4) Part-d: 出口区域。采用结构化网格,数量为 20 万。

全部流场区域共含有 632 万网格,经检查网格的畸变率,最大畸变率为 0.75,其值小于 0.9,因而可进行数值计算。

2.4 模型及边界条件设定

由于粉尘颗粒是稀疏分布且体积比小于 10%,故采用 DPM 模型进行数值模拟。对洗气机的冲蚀磨损研究采用单相耦合方式,并开启 RNG k -epsilon 湍流模型。FLUENT 设置如下:

(1) Part-a 区域设置成转速为 151.77 rad/s 的逆时针旋转区域,其余区域均为固定静止区域;

(2) 动区域的所有壁面均设置为旋转壁面与 Part-a 同步旋转,其他壁面均为固定壁面,壁面均采用无滑移边界条件,粗糙度为 0.5。所有壁面均为 reflect 表面,每个壁面均对法向反弹系数、切向反弹系数、冲击角函数、粒径函数以及速度指数函数进行设置;

(3) 喷射物料为 coal-hv,密度为 1 500 kg/m³,采用面喷射方式,进口面设置为喷射表面,速度设置为 13 m/s,质量流量为 2 kg/s。

(4) 将进口边界条件设置为速度入口,速度为 13 m/s,escape 边界条件;

(5) 将两个出口均设置为压力出口,压强为 0 Pa,escape 边界条件;

(6) 离散格式设置为二阶迎风,残差标准全部设置为 1×10^{-5} 。

3 不同粒径粉尘颗粒在叶片流道中的流动分析

在额定工况下,图 3(h) 中未进入叶片流道前的叶轮中某位置设置单颗粒发射源,每一次都发射不同粒径的粉尘颗粒,对其在叶轮叶片流道中的流动情况进行数值模拟,并观察颗粒在叶片表面的运动情况。粉尘颗粒的粒径 d_p 分别设置为 1、2、5、8、10、15 及 20 μm ,通过随机发射 N 次得到其在叶片流道中的运行轨迹图如图 3 所示。

从图 3 可知,随着粉尘颗粒粒径不断增大,其对气流的跟随性也越差,与叶片的碰撞点位置分布变化越小。当粒径为 1、2、5 和 8 μm 时,其运动轨迹具有相似性;当粒径增加到 15 和 20 μm 时,其与叶片碰撞点分布具有相仿性,且较集中;粒径为 10 μm 时,运动状况介于以上两类之间。

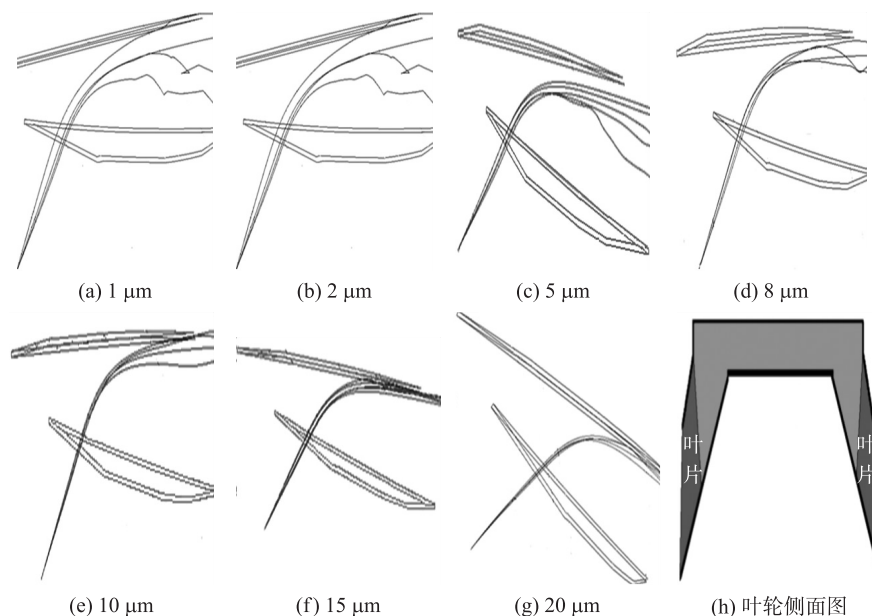


图 3 不同粒径的粉尘颗粒在叶轮的运行轨迹及叶轮侧面图

Fig. 3 Motion trajectory of different-diameters paraticles shot in impeller and side view of impeller

4 磨损结果分析

4.1 粒径为 5 μm 的粉尘颗粒的磨损结果

图 4 给出了粒径为 5 μm 的粉尘颗粒对洗气机的磨损结果. 从图 4 可知, 叶片吸力面的磨损范围很大, 除叶片前缘外, 其中部和出口处都有不同程度的损伤, 磨损最严重的地方出现在叶片中部, 对轮廓的磨损也较为严重; 对叶片压力面的磨损主要集中在叶片出口区域, 其磨损程度低于吸力面的磨损. 对吸力面的最大磨损出现在叶片中部, 主要是由于该叶轮的独特结构造成的, 含尘气流在进入叶片流道前其速度方向就已发生了偏转, 有了进入叶片流道的趋势. 气流在叶片吸力面发生二次流的地方相比于通风机位置偏后, 故其磨损出现位置偏后. 对于箱体的磨损最严重的区域是固定导流片, 且磨损面积较大, 对于后半部分箱体几乎未磨损, 排污口主要出现在前半段. 洗气机的冲蚀磨损率为 $1.228\ 9\times 10^{-6}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 叶轮区域的最大冲蚀率为 $3.686\ 9\times 10^{-6}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 箱体的最大冲蚀率为 $2.457\ 9\times 10^{-6}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

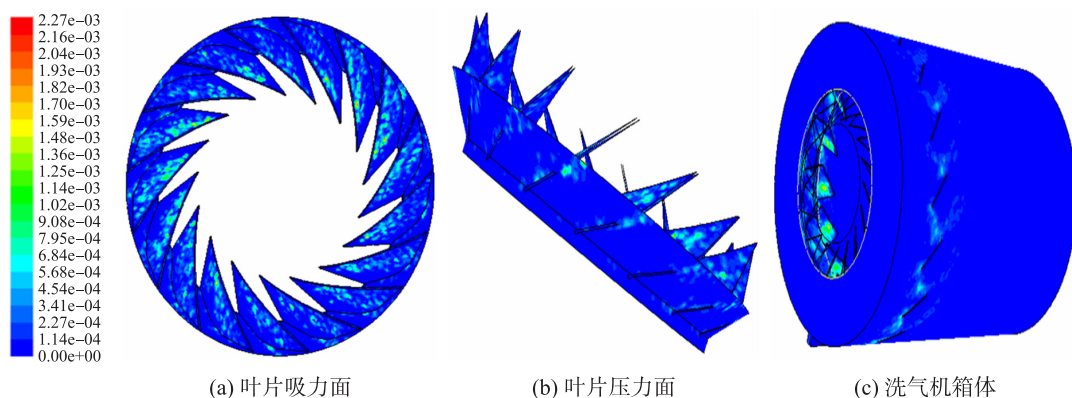


图 4 粒径为 5 μm 的粉尘颗粒对洗气机的磨损

Fig. 4 Particle 5 μm -iameter on erosion of wet dust fan

4.2 粒径为 10 μm 的粉尘颗粒的磨损结果

图 5 给出了粒径为 10 μm 的粉尘颗粒对洗气机的磨损结果. 通过对比 5 μm 粉尘颗粒的磨损结果可以看出, 叶片吸力面的磨损范围减少很多, 前缘也无任何损伤, 磨损主要出现在吸力面中部及尾缘的下半部分; 对叶片压力面的磨损主要集中在叶片出口区域, 其磨损程度相比于 5 μm 的粉尘颗粒要严重; 对箱体的磨损最严重的区域是固定导流片处, 磨损程度与 5 μm 不相上下, 对后半部分箱体的磨损主要出现在电机尾部与排风口之间的区域, 这是由于 10 μm 的粉尘颗粒对气流的跟随性小于 5 μm , 在流场忽然变大的情况下, 其速度变化程度小于气流, 故碰撞到箱体上对其造成磨损, 整个排污口都出现了不同程度的磨损. 洗气机的冲蚀磨损率为 $1.1865\times 10^{-6}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 叶轮区域的最大冲蚀率为 $3.258\ 8\times 10^{-6}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 箱体的最大冲蚀率为 $2.907\ 3\times 10^{-6}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

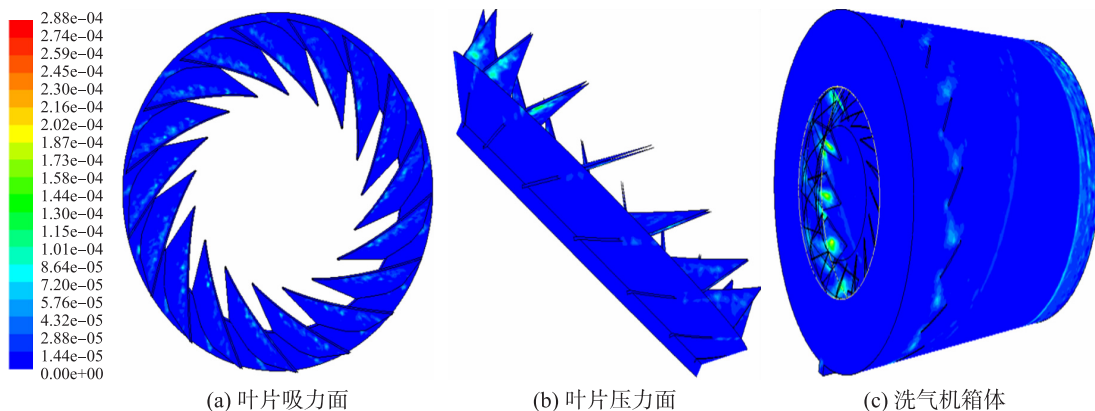


图 5 粒径为 10 μm 的粉尘颗粒对洗气机的磨损

Fig. 5 Particle 10 μm -iameter on erosion of wet dust fan

4.3 粒径为 15 μm 的粉尘颗粒的磨损结果

图 6 给出了粒径为 15 μm 的粉尘颗粒对洗气机的磨损结果. 与前两种粒径粉尘磨损结果对比可发现,叶片吸力面的磨损区域很小,几乎没有磨损;对叶片压力面的磨损还是集中在叶片出口处,其磨损程度最严重;对箱体的磨损最严重的区域出现在后半部分临近排风口处,尤其是交界面处,排污口也是整个范围都出现磨损,对导流片的磨损小于前两种粒径的颗粒. 洗气机的冲蚀磨损率为 $1.176\ 7\times 10^{-6}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 叶轮区域的最大冲蚀率为 $5.883\ 5\times 10^{-6}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 箱体的最大冲蚀率为 $4.706\ 8\times 10^{-6}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

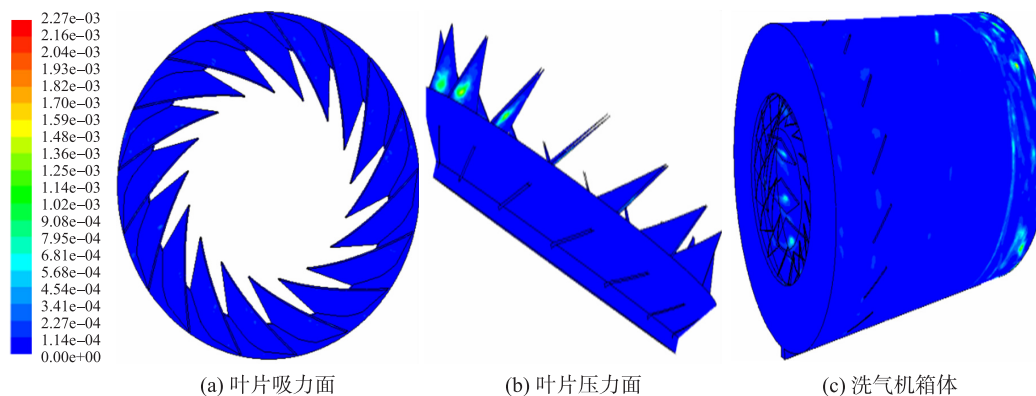


图 6 粒径为 15 μm 的粉尘颗粒对洗气机的磨损

Fig. 6 Particle 15 μm -iameter on erosion of wet dust fan

5 结语

本文采用 CFD 相关模拟软件,对除尘洗气机内流场建立三维几何模型,分析了不同粒径在叶片流道中运动轨迹,并选取粒径为 5、10 及 15 μm 的粉尘颗粒来研究其对除尘洗气机的磨损. 经过数值模拟计算后得出以下结论:

- (1) 不论粒径大小,粉尘颗粒都不会对该洗气机叶片吸力面前缘造成磨损;
- (2) 粉尘颗粒的粒径越小对叶片吸力面的磨损越严重,磨损最大值出现在吸力面中间部分;随着粒径增加,对叶片吸力面的磨损量及区域减小;
- (3) 对于叶片压力面尾缘的磨损则随着粒径的增加而越加严重;
- (4) 固定导流片的磨损随着粒径的增加而减小,但不会消失;
- (5) 对洗气机筒体的磨损主要出现在电机尾部与排风口之间以及排污口,最严重区域在交界面处;
- (6) 小粒径粉尘颗粒对洗气机造成的冲蚀磨损根本不能忽视,其磨损程度在某种程度上几乎与大粒径粉尘颗粒带来的磨损持平. 就冲蚀磨损机理分析,大粒径粉尘与叶片表面主要发生碰撞磨损,而小粒径粉尘颗粒发生碰撞磨损的同时还会产生由于其在叶片表面滚动而造成的切削磨损^[10],其带来的磨损占很大部分.

由于在进行数值计算时已采用了小粒径粉尘颗粒研究其对洗气机造成的磨损,要提高该洗气机的耐磨性,延长使用寿命,不能仅从粉尘颗粒的数量及粒径出发而必须要对其材料表面硬度及结构进行改进.

[参考文献] (References)

- [1] 李祥松. 国内外某型号湿式除尘器性能对比分析[J]. 煤矿机械, 2016, 37(1): 54-56.
LI X S. Wet dust collector performance contrast test analysis at home and abroad[J]. Coal mine machinery, 2016, 37(1): 54-57. (in Chinese)
- [2] JAHODA M, TOMASKOVA L, MOSTEK M. CFD prediction of liquid homogenization in a gas-liquid stirred tank[J]. Chemical engineering research and design, 2009, 87: 460-467.
- [3] 游振江, 林建忠, 邵雪明, 等. 气固两相流叶轮机械磨损问题研究综述[J]. 流体机械, 2000, 28(3): 33-37.
YOU Z J, LIN J Z, SHAO X M, et al. Review on the erosion research of gas-solid flow turbo machinery[J]. Fluid machinery, 2000, 28(3): 33-37. (in Chinese)
- [4] 陈汝刚, 张春梅, 金立文, 等. 含尘离心风机不同叶型磨损特性的可视化实验研究[J]. 流体机械, 2000, 28(1): 5-8.

- CHEN R G,ZHANG C M,JIN L W,et al. Visualization experiment research erosive of different blade shape of dust centrifugal blower[J]. Fluid machinery,2000,28(1):5-8.(in Chinese)
- [5] 杨树柏,陈康民,蒋旭平. 旋转离心风机叶轮内两相流动的高速摄影研究[J]. 工程热物理学报,1999,20(4):496-500.
- YANG S B,CHEN K M,JIANG X P. High-speed photography research two phase flow of revolve centrifugal blower[J]. Journal of engineering thermophysics,1999,20(4):496-500.(in Chinese)
- [6] HAN Z W,ZHANG J Q,GE C,et al. Gas-solid erosion on bionic configuration surface[J]. Journal of Wuhan university of technology(materials science edition),2011,26(2):306-311.
- [7] 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.
- MEI D,XING F T. Numerical simulation research oil erosive problem of gas-solid two phase flow fan[J]. Fluid machinery,2007,35(10):25-28.(in Chinese)
- [8] 戈超. 离心风机叶片抗冲蚀磨损仿生研究[D]. 长春:吉林大学,2011.
- GE C.Bionic Investigation on Erosion Resistance of Centrifugal Fan Blades[D]. Changchun:Jilin University,2011.(in Chinese)
- [9] 侯树强,林建忠. 叶轮机械内部流场数值模拟研究综述[J]. 流体机械,2005,33(5):30-34.
- HOU S Q,LIN J Z.Summary of Numerical Simulation of the internal flow in the turbo machinery[J]. Fluid machinery,2005,33(5):30-34.(in Chinese)
- [10] 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.
- LIU A J,LIU D S,ZHOU Z J. The abrasion mechanism of mine fan blade sand the development of anti-abrasion technology[J]. China safety science journal,2008,18(11):169-176.(in Chinese)

[责任编辑:严海琳]