

# 超高速离心叶轮中固体颗粒运动轨迹 的数值模拟与分析

郭爱华

(中冶南方工程技术有限公司,湖北 武汉 430081)

**摘要:**为解决和预测固体颗粒对超高速离心叶轮的冲击磨损问题,以多相流理论为基础,采用了雷诺应力模型结合颗粒轨道模型的方法,通过对超高速离心叶轮内气固两相湍流场的计算,得到了颗粒在叶轮中的运动轨迹;并用 CFX 对不同粒径的固体颗粒在超高速离心叶轮内部流场中的运动轨迹进行了数值模拟。模拟结果与已有实验结果吻合,说明采用雷诺应力湍流模型能准确描述超高速离心叶轮中固体颗粒的运动轨迹。

**关键词:**超高速离心叶轮;雷诺应力模型;颗粒;轨迹;数值模拟

中图分类号:TH117.1

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)08-0043-05

## Numerical simulation and analysis of the tracks of particles in the extra-high speed centrifugal impellers

GUO Ai-hua

(WISDRI Engineering & Research Incorporation Limited, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** Aiming to resolve and predict the impact wear of extra-high speed centrifugal impellers by particles, based on the theory of multi-phase flow, the Reynolds stress model and the particle track model were adopted to compute the flow field of the gas-solid two-phase flow in the extra-high speed centrifugal impellers, then the movement tracks of particles were obtained that passed through the impellers, and the tracks of particles were simulated by using the CFX. The results of numerical simulation fit well with the experimental values. The conclusions show that Reynolds stress model can be used to describe the tracks of particles in the extra-high speed centrifugal impeller accurately.

**Key words:** extra-high speed centrifugal impeller; reynolds stress model; particle; track; numerical simulation

## 0 引 言

离心叶轮机械运行中经常有固体颗粒渗入,有时长期在高浓度颗粒的环境中工作。固体颗粒以极高的速度运动并与叶轮表面碰撞、摩擦,致使叶轮磨损,尤其是叶片磨损最为严重。从而使其效率下降,寿命缩短,严重时会出现叶片断裂等重大事故。特别在转速高达数万 RPM 的超高速离心叶轮中,磨损问题尤为突出。

超高速离心叶轮的磨损是一个十分复杂的物理过程,它与流体速度、流动形式、碰撞过程、颗粒粒度和粒

形等因素都有关系。各因素之间相互影响,而且各因素内部又有诸多参数需加以考虑,因而给研究带来许多困难。其中,颗粒的运动轨迹与叶轮的磨损有着直接而重要的关系。因此,研究分析超高速离心叶轮内含尘气体中的颗粒在气动阻力作用下的运动规律问题对控制和解决磨损、优化设计、提高离心叶轮效率、延长寿命有着重要的意义。

超高速离心叶轮内部的流动是十分复杂的气-固两相湍流流动。许多学者对风机或泵叶轮内部湍流中粒子轨迹的数值模拟进行了研究,文献[1]提出了用三维有限元数值插值技术和 4 阶 Ruage-Kotta 法解高

阶常微分方程组的新方法,并利用此方法求解离心叶轮机械内三维粒子的运动轨迹方程。文献[2]采用欧拉-拉格朗日法对固体颗粒在离心风机中的轨迹进行了定性的分析。文献[3-6]等采用已得到普遍应用的  $k-\varepsilon$  双方程湍流模型,对风机内部的二维流场和二维粒子运动轨迹进行了模拟,但这种模型由于采用的是各向同性的湍动粘度来计算湍流应力口,因此难于考虑旋转流动及流动方向表面曲率变化的影响,用来模拟强旋流并不理想<sup>[7]</sup>。于是,很多研究者则多将由各相异性前提出发的雷诺应力方程模型(Reynolds Stress Model)应用于旋风分离器等有强旋流的流场<sup>[8-13]</sup>。Christian<sup>[14]</sup>采用标准  $k-\varepsilon$  模型、RNG  $k-\varepsilon$  模型和雷诺应力模型计算了几种典型的分离器内部流场,结果表明:3种模型中以雷诺应力模型的数值预报结果与实验最为接近。RNG  $k-\varepsilon$  模型能大致给出合理的分布,标准  $k-\varepsilon$  模型预报结果与实验偏差很大,说明这种模型不适合分离器内强旋流的计算。Hoekstra<sup>[15]</sup>采用雷诺应力模型中的 LRR<sup>[16]</sup>模型计算了旋风分离器中的强旋流场,并与标准的  $k-\varepsilon$  模型和 RNG  $k-\varepsilon$  模型计算结果同 LDV 实验的结果进行了比较,显示了 RSM 在求解各向异性尤其是有旋流场方面的突出优势。周力行<sup>[17-18]</sup>等采用雷诺应力模型及简化了的代数应力模型,计算强旋流气-固两相流,并推导出用于气-固、气-液两相流计算的统一 2 阶矩模型。通过模拟不同旋流数的旋转流动,得到了较合理的结果。梅丹等<sup>[19]</sup>基于雷诺应力模型采用结构化网格计算了离心风机内气固两相流场。

本研究采用雷诺应力模型结合颗粒轨道模型的方法,通过对超高速离心叶轮内气固两相湍流场的计算,得到颗粒的运动轨迹;并根据多相流理论,对不同粒径的固体颗粒在超高速离心叶轮内部流场中的运动轨迹进行了数值模拟。模拟结果与已有实验结果相符合,说明采用雷诺应力湍流模型能准确描述超高速离心叶轮内部固体颗粒的运动轨迹。

## 1 气固两相流体的计算模型

### 1.1 湍流模型—雷诺应力模型

雷诺应力模型的优点在于可以准确考虑各向异性效应(如浮力、旋转效应等),无须人为引用半经验的修正,对于有旋流场可以进行准确的计算和模拟<sup>[20]</sup>。为此,本研究采用雷诺应力模型对超高速离心叶轮内部湍流流场进行数值计算和模拟。

计算中采用的雷诺应力方程模型如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{U_k \rho u_i u_j}) = P_{ij} + \varphi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \mu \delta_{kl} + c_s \rho \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_k u_l} \right) \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_l} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$P = -\rho(\overline{u \otimes u}(\nabla U)^T + (\nabla U)\overline{u \otimes u}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho U_k \varepsilon) = \frac{\varepsilon}{k}(c_{\varepsilon 1} P - c_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \mu \delta_{kl} + c_s \rho \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_k u_l} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_l} \right] \quad (3)$$

$$\phi_{ij} = \phi_{ij1} + \phi_{ij2} \quad (4)$$

$$\phi_{ij1} = -\rho \varepsilon \left( C_{s1} a + C_{s2} \left( a a - \frac{1}{3} a \cdot a \delta \right) \right) \quad (5)$$

$$\phi_{ij2} = -C_{r1} P a + C_{r2} \rho S - C_{r3} \rho k S \sqrt{a \cdot a} + C_{r4} \rho k \left( a S^T + S a^T - \frac{2}{3} a \cdot S \delta \right) + C_{r5} \rho k (a W^T + W a^T) \quad (6)$$

$$a = \frac{\overline{u \otimes u}}{k} - \frac{2}{3} \delta \quad (7)$$

$$S = \frac{1}{2}(\nabla U + (\nabla U)^T) \quad (8)$$

$$W = \frac{1}{2}(\nabla U - (\nabla U)^T) \quad (9)$$

式中  $P$ —剪力和浮力产生项;  $\phi_{ij}$ —压强应变项;  $k$ —湍动能;  $\varepsilon$ —湍流脉动耗散率;  $a$ —各向异性张量;  $S$ —应变产生率;  $W$ —涡量; 带上横线的变量表示湍流时均值; 常数  $c_s = 0.22$ ,  $c_{\varepsilon 1} = 1.45$ ,  $c_{\varepsilon 2} = 1.9$ ,  $c_{s1} = 1.8$ ,  $c_{s2} = 0.0$ ,  $C_{r1} = 0.0$ ,  $C_{r2} = 0.8$ ,  $C_{r3} = 0.0$ ,  $C_{r4} = 0.873$ ,  $C_{r5} = 0.655$ 。

### 1.2 颗粒轨道模型

流动于超高速离心叶轮的介质具有气、固两相,根据不同情况和不同的问题特征,这两相可以看作是统一混合物的连续介质。同时,也可以看作:一是连续介质;一是离散介质。把流体相视作连续介质,把固相相视作离散介质处理,通常称之为颗粒轨道模型,在拉格朗日坐标系中颗粒轨道模型可以完整地考虑颗粒与流体间的相互作用,该模型适用于颗粒浓度较低的情况<sup>[21]</sup>。所以本研究采用此模型模拟颗粒运动轨迹。

#### 1.2.1 基本假设

在颗粒轨道模型中设:①颗粒为与流体有滑移的离散群,即  $v_{ki} \neq v_i$ ,  $T_k \neq T$ ;②不考虑颗粒的湍流扩散,粘性及导热;③颗粒按初始尺寸分布分组,各组只有其自身的质量变化,互不相干;④各组颗粒由一定的初始位置出发沿各自的轨道运动,互不相干;⑤颗粒对流体的作用按等价地散布于流体单元内来考虑。

#### 1.2.2 基本守恒方程

按以上的基本假定,忽略颗粒相自身各变量的脉

动,并且忽略流体相的密度脉动及变质量源脉动,则可得到确定轨道模型的湍流两相流基本方程组。

颗粒相连续方程:

$$N_k = \int_A n_k v_{kn} dA = const \quad (10)$$

颗粒相动量方程:

$$\frac{dv_{ki}}{dt} = g_i + \frac{(v_i - v_{ki})}{\tau_{rk}} + \frac{F_{k,Mi}}{n_k m_k} + \frac{(v_i - v_{ki}) \dot{m}_k}{m_k} \quad (11)$$

流体组分方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_s) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j Y_s) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_Y} \frac{\partial Y_s}{\partial x_j} \right) \quad (12)$$

式中 下标  $k$ —颗粒相的变量; $v$ —速度; $n_k$ —颗粒的数密度; $m_k$ —每个颗粒的质量; $v_{kn}$ —颗粒流速垂直于流管断面的分量; $\tau_{rk}$ —驰豫时间; $F_{Mi}$ —Magnus 力; $\mu_e$ —有效粘性系数; $\sigma$ —常数; $Y_s$ — $s$  组分质量分数。

## 2 超高速离心叶轮内流场的数值计算

### 2.1 超高速离心叶轮几何建模、网格划分

超高速离心叶轮外形如图 1(a) 所示,由外壳、叶片和叶轮通道组成,其中长、短叶片各 8 片,如图 1(b) 所示。

考虑到计算精度和计算时间的综合要求以及叶片复杂的外形,本研究采用非结构化网格,自适应生成原始的网格,然后对局部加密处理以改善网格的质量,共生成 276 860 个单元。在计算中,将模型分成旋转流场部分和非旋转流场部分,如图 2、图 3 所示。

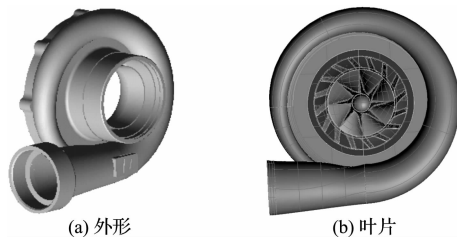


图 1 超高速离心叶轮结构

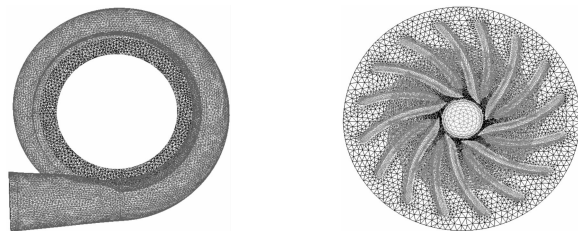


图 2 旋转流场域网格

图 3 非旋转流场域网格

### 2.2 边界条件设置

计算边界条件设置如下:

- (1) 边界条件,包括进口流速、转速、流量、外界大气压力和出口压力;
- (2) 物性参数,包括固相颗粒和标准状态下空气密度、动力粘滞系数并选取 5 种颗粒粒径;
- (3) 考虑相间相互作用阻力系数;
- (4) 无滑移壁面条件。

颗粒粒径取为 5、30、50、80、100  $\mu\text{m}$ ;颗粒入口浓度分别取为 0.05、0.15、0.25、0.35、0.5  $\text{g}/\text{m}^3$ 。即取 5  $\times$  5 个工况进行不同粒径、不同浓度下的模拟研究。不同质量浓度对应的数量浓度如表 1 所示。

表 1 不同粒径的质量浓度和数量浓度的对应关系

质量浓度/ $(\text{g}/\text{m}^3)$	0.05	0.15	0.25	0.35	0.5
5 $\mu\text{m}$ 数量浓度/ $(\text{个}/\text{m}^3)$	$2.1 \times 10^{14}$	$8.9 \times 10^{14}$	$15.2 \times 10^{14}$	$21.5 \times 10^{14}$	$28.3 \times 10^{14}$
30 $\mu\text{m}$ 数量浓度/ $(\text{个}/\text{m}^3)$	$1.17 \times 10^{12}$	$5.05 \times 10^{12}$	$7.12 \times 10^{12}$	$1.08 \times 10^{13}$	$1.32 \times 10^{13}$
50 $\mu\text{m}$ 数量浓度/ $(\text{个}/\text{m}^3)$	$2.41 \times 10^{11}$	$9.13 \times 10^{11}$	$1.42 \times 10^{12}$	$2.21 \times 10^{12}$	$2.85 \times 10^{12}$
80 $\mu\text{m}$ 数量浓度/ $(\text{个}/\text{m}^3)$	$5.65 \times 10^{10}$	$2.21 \times 10^{11}$	$3.56 \times 10^{11}$	$5.07 \times 10^{11}$	$7.01 \times 10^{11}$
100 $\mu\text{m}$ 数量浓度/ $(\text{个}/\text{m}^3)$	$0.32 \times 10^{11}$	$1.24 \times 10^{11}$	$1.95 \times 10^{11}$	$2.8 \times 10^{11}$	$3.41 \times 10^{11}$

### 2.3 数值离散方法及收敛性

本研究采用高精度有限元方法离散偏微分方程组。计算收敛控制条件是:当每一个节点上的物理量前后计算值残差小于 0.1 则视为计算收敛;最大迭代次数设定为 300 次。

## 3 计算结果及颗粒轨迹分析

### 3.1 超高速离心叶轮内的流场

超高速离心叶轮内的流场分别用速度矢量线图和流线图表示,如图 4 和图 5 所示。叶轮转速在 50 000  $\text{r}/\text{min}$  时,叶轮内部流速范围在 130 ~ 590  $\text{m}/\text{s}$ 。其分布大致

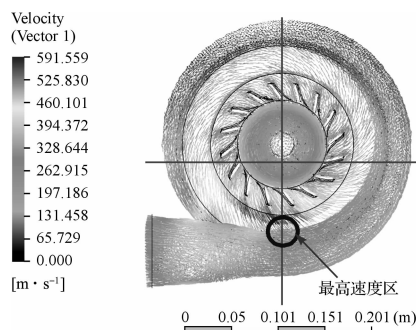


图 4 叶轮内速度分布矢量线图

可分为上半部分的低速区和下半部分的高速区,如图 4 所示。最高速度距中心约 55  $\text{mm}$  处的叶片端部前

缘。从图 5 可以看出,在叶轮与蜗壳内壁交界区有较强的湍流。

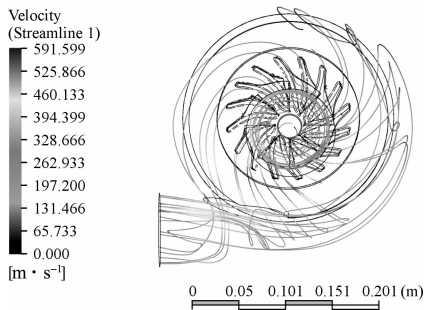
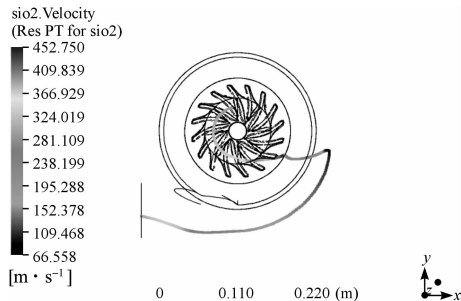


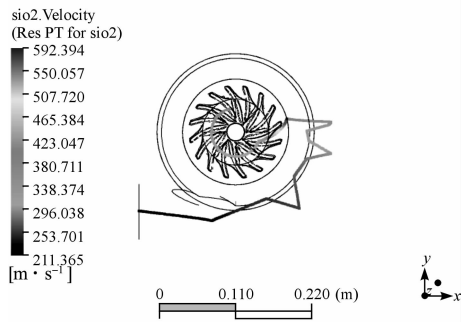
图 5 叶轮内气流速度分布流线图

### 3.2 不同粒径颗粒轨迹的变化规律

本研究对粒径分别为 5 μm ~ 100 μm 共 5 种不同粒径的颗粒在叶轮中运动轨迹进行了模拟。这里仅以 D = 5 μm 和 D = 100 μm 为例讨论,如图 6 所示。



(a) D=5 μm 的颗粒运动轨迹



(b) D=100 μm 的颗粒运动轨迹

图 6 粒径为 D = 5 μm 和 D = 100 μm 的颗粒运动轨迹

对于轨迹特征,不论固体颗粒粒径大小,在整个运动过程中,都会向叶片工作面靠近,但靠近的速度和位置有所不同。对于较小颗粒,如粒径 D = 5 μm 时,由于惯性作用较小,其轨迹更接近流线,颗粒轨迹较短。在出气管段几乎完全随气流运动。小颗粒向工作面靠近的速度较慢,一般集中在叶片出口区域和叶片相撞。随着粒径的增大,颗粒向工作面靠近的速度加快,与叶片相撞的位置向叶片进口移动。对于较粗的颗粒,如粒径 D = 100 μm 时,运动轨迹较长,大都与叶片进口部位相撞,而且在出气管段呈锯齿状运动,表明与出气

管壁有反复碰撞。这些计算结果与文献[22-23]的实验现象相吻合。

对于速度特征,在叶片的前半部分,粒子以较高的速度撞向叶片表面,粒径大的颗粒每碰撞一次后速度就降低,而粒径小的颗粒碰撞一次后,很快就由气流的作用使速度变得与气流相当,与工作面发生多次碰撞。在叶片的后半部分,颗粒运动的方向基本与叶片平行,在叶片出口处,颗粒以接近叶片安装角的出射角沿压力面飞出流道。无论颗粒大小,颗粒在离开叶轮的瞬间,速度达到最大。从图 6 可看出,粒径 D = 5 μm 时,离开叶轮时的最大速度范围在 400 ~ 450 m/s 之间,当 D = 100 μm 时,最大速度在 550 ~ 590 m/s 之间。表明在离开叶轮前,较粗的颗粒速度较大。

随着粒径的增大,颗粒与后盖的碰撞角越来越大,文献[1]建立了如图 7 所示的粒子反弹关系,其中  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为颗粒的入射、反射角,  $V_1$ 、 $V_2$  分别为颗粒的入射、反射速度,  $N$  为曲面的法向量,并给出了反射角及反射速度的相应计算公式<sup>[24-25]</sup>。

颗粒进入叶轮之后,受气体切向阻力的影响,由轴向运动转向径向运动,颗粒的轴向速度相同。但随着粒径、质量的增大,其受气流运动的影响减弱,因此大粒径颗粒获得的切向速度  $V_{DT}$  比小粒径颗粒的切向速度  $V_{dT}$  小。速度合成矢量如图 8 所示,下标  $D, d$  分别表示大、小粒径,下标 1, 2 分别表示入射、反射合速度,  $V_N$  表示轴向速度,  $V_T$  表示径向速度。  $V_{D1} < V_{d1}$ ,  $\alpha_{D1} > \alpha_{d1}$ , 因此反弹后  $\alpha_{D2} > \alpha_{d2}$ , 所以粒径大的颗粒将会以大碰撞角与后盖发生碰撞。

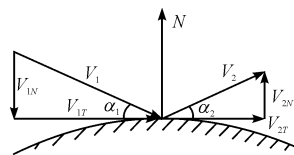


图 7 粒子反弹关系示意图

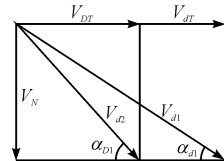


图 8 速度合成矢量图

## 4 结束语

根据上述颗粒轨迹计算和数值模拟分析,可以得到以下几点结论:

(1) 随着颗粒增大,轨迹线变长,颗粒与叶轮间的相对速度增大。颗粒在运动到叶片端部时速度达到最大,最高速度在叶片末端前缘;

(2) 粒径小的颗粒集中于叶片出口区域和叶片相撞。随着颗粒粒径的增大,其向工作面靠近的速度加快,与叶片相撞的位置向叶片进口移动。对于粒径大的颗粒,大都与叶片进口部位相撞。

(3) 粒径大的颗粒将会以大碰撞角与后盖发生碰撞;粒径小的颗粒随气流运动趋势明显,与工作面发生多次碰撞,表现为滑动或滚动;粒径越大,与叶轮的碰撞速度越小。

(4) 数值模拟计算结果与文献[22-23]的试验现象相吻合。表明采用雷诺应力湍流模型计算的结果能准确描述超高速离心叶轮中固体颗粒的运动轨迹,有利于对超高速离心叶轮磨损问题做进一步研究。

### 参考文献(References):

- [1] 潘应康,陈康民. 离心风机叶轮内气固两相流动的理论及数值解法[J]. 华东工业大学学报,1996,18(2):27-34.
- [2] 胡桂荣,李意民,贾晓娜. 离心风机内气固两相流的数值模拟[J]. 煤矿机械,2008,29(3):37-39.
- [3] 潘海波,郭宏伟,虞维平,等. 离心除尘风机气固两相流动的数值模拟[J]. 流体机械,2005,33(6):11-13.
- [4] 吴俊峰,朱晓农,陈启明,等. 通风机内部流场和性能的数值模拟及其分析[J]. 流体机械,2009,37(9):19-22.
- [5] 崔晓钰,翁建华,陈善年. 离心通风机内气固两相流动计算[J]. 风机技术,2001(4):44-47.
- [6] 陈慎宇,眭曦,王灿星. 离心式通风机内部流场的数值模拟[J]. 流体机械,2007,35(9):22-25.
- [7] 陆耀军,周力行,沈熊. 不同湍流模型在液-液旋流分离管流场计算中的应用及比较[J]. 清华大学学报:自然科学版,2001,41(2):28-33.
- [8] 王海刚,刘石,姜凡. 用雷诺应力模型计算旋风分离器中气-固两相流动[C]. 中国工程热物理学会燃烧学学术会议,2003:232-239.
- [9] 魏新利,张海红,王定标,等. 旋风分离器内颗粒轨迹的数值模拟[J]. 郑州大学学报:工学版,2004,25(3):14-17.
- [10] BRUNO C. Reynolds stress transport modeling for high-lift airfoil flows[J]. *AIAA Journal*,2006,44(10):2390-2403.
- [11] COKLJAT D, SLACK M. Reynolds-stress model for eulerian multiphase[J]. *Progress in Computational Fluid Dy-*

- namics*,2006,6(1):168-178.
- [12] GEROLYMOS G A, VALLET I. Wall-normal-free feynolds-stress model for rotating flows applied to turbomachinery[J]. *AIAA Journal*,2002,40(2):199-208.
- [13] GEROLYMOS G A, NEUBAUER J. Improved prediction of turbomachinery flows using near-wall reynolds-stress model[J]. *Journal of Turbomachinery*,2002,124(1):86-99.
- [14] FREDRIKSSON C. Exploratory Experimental and Theoretical Studies of Cyclone Gasification of Wood Powder[D]. Luleå: Luleå Tekniska University,1999.
- [15] HOEKSTRA A J, DERKSEN J J. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclone[J]. *Chemical Engineering Science*,1999,54(4):2055-2065.
- [16] HANJALIC K. Advanced turbulence closure models: a view of current status and future prospects[J]. *Heat Fluid Flow*,1994,15(3):178-203.
- [17] 周力行,廖昌明,陈涛. 强旋气-粒两相湍流的统一二阶矩封闭模型[J]. 工程热物理学报,1994,15(3):327-330.
- [18] ZHOU L X. Theory and Numerical Modeling of Turbulent Gas-particle Flows and Combustion[M]. Florida: Science press and CRC press. INC,1993.
- [19] 梅丹,幸福堂. 颗粒在离心风机内运动轨迹可视化预测的实现[J]. 武汉科技大学学报:自然科学版,2007,30(5):518-521.
- [20] 柏占伟,裴江红,杨川. 6-u 式离心流场的数值模拟[J]. 机械,35(12):24-26,48.
- [21] 王红利,宋鹏云,赵龙. 固液旋流泵固体颗粒分布的数值模拟研究[J]. 机械,2008,35(12):9-12,40.
- [22] 田爱民,田爱杰,许洪元,等. 离心泵叶轮中颗粒轨迹与磨损的关系[J]. 水利电力机械,2000,2:48-50.
- [23] 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.
- [24] 王冠军,袁丹青,刘吉春,等. 叶片形状对旋涡泵性能的影响[J]. 轻工机械,2009,27(2):27-31.
- [25] 刘路,姜献峰. 多翼离心风机主要部件对风机流动特性影响的研究现状[J]. 轻工机械,2009,27(5):4-7.

[编辑:张翔]

(上接第42页)

- [3] 张洪亮,邹继斌. 考虑旋转磁通的 PMSM 铁心损耗数值计算与分析[J]. 电机与控制学报,2007,11(4):340-344,348.
- [4] 邹继斌,张洪亮,江善林,等. 电磁稳态条件下的力矩电机三维暂态温度场分析[J]. 中国电机工程学报,2007,27(21):66-70.
- [5] 刘志珍,励庆孚,王美琴. 解析法计算任意形状薄钢板的涡流损耗[J]. 电工技术学报,1999,14(4):69-72.
- [6] 陈存武,杨超君. 磁力泵隔离套中的有限元分析及优化设计[J]. 排灌机械,2003,21(1):9-11.
- [7] 施卫东. 磁力驱动泵的功率损失分析[J]. 水泵设计,1992(2):10-13.
- [8] 刘芳,任振林. 磁力驱动离心泵隔离套的设计[J]. 甘肃科学学报,2007,15(2):114-116.
- [9] 魏永田,孟大伟,温嘉斌. 电机内热交换[M]. 北京:机械工业出版社,1998.

- [10] 杨超君,马宏亮,蒋生发. 电磁感应式磁力联轴器中隔离套的涡流分析与计算[J]. 机械设计与研究,2005,21(5):63-65.
- [11] 付敏,邹继斌,魏静薇,等. 基于三维有限元法 U 型单相自启动永磁同步电机涡流场与温度场的分析计算[J]. 上海交通大学学报,2006,40(4):572-576.
- [12] YOSHIDA K, HITA Y, KESAMARU K. Eddy-current loss analysis in PM of surface-mounted-PMSM for electric vehicles[J]. *IEEE Trans. Magn.*,2004,36(2):1941-1944.
- [13] FU W N, LIU Z J. Estimation of eddy-current loss in permanent magnets of electric motors using network-field coupled multislice time-stepping finite-element method[J]. *IEEE Trans. Magn.*,2002,38(2):1225-1228.

[编辑:柴福莉]