

文章编号: 0253-9993(2008)04-0444-05

# 应用超剪切技术提高水煤浆分散稳定性的数值模拟

叶申柱, 周 东, 张裕中

(江南大学 食品装备技术研究中心, 江苏 无锡 214122)

**摘 要:** 采用 Fluent 软件及 Realizable  $k-\varepsilon$  模型研究了水煤浆物料在剪切均质泵内的剪切均质过程, 分析了齿间周向与径向上的压力场、速度场、湍流应力场以及空化现象, 探讨了水煤浆物料受剪切力、摩擦力、撞击力、湍流应力和空化作用不断被剪切均质的过程. 表明采用超剪切技术对水煤浆进行剪切均质, 物料受剪切力、摩擦力、撞击力、湍流应力等作用能够达到微观上的混合, 且转速越高, 混合效果越好, 更有利于提高水煤浆物料剪切均质后的稳定性.

**关键词:** 水煤浆; 剪切均质; 稳定性; 数值模拟

中图分类号: TQ534.4 文献标识码: A

## Numerical simulation of application of super-shear technology in enhancing CWM's stability

YE Shen-zhu, ZHOU Dong, ZHANG Yu-zhong

(Technology & Research Center of Food Equipment, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** The process of the CWM being sheared and homogenized in homogenizer was investigated using Fluent software packaging with Realizable  $k-\varepsilon$  model, and the velocity-field, turbulent stress field and pressure-field in the circumference and radius direction between the rotor and stator as well as cavitation phenomenon were analyzed, the process of CWM being sheared and homogenized in a homogenizer as the result of huge forces of shear, friction, impact, turbulent stress and cavitation was also discussed. The results show that the effect of the super-shear technology is much better than traditional mixing model, it can be able to provide mirco-mixing because of the huge forces of shear, friction, impact and turbulent stress, and the higher the rotational speed, the better for the CWM's uniformity is, it's also propitious to enhance the stability of the CWM by using the super-shear technology.

**Key words:** CWM; shear and homogenize; stability; numerical simulation

在当今环保要求日益严格的情况下, 燃烧普通煤炭已经远远不能满足要求, 水煤浆成为首选燃料之一. 然而在水煤浆制备过程中, 煤颗粒间因疏水化作用严重影响煤粉与药剂的接触<sup>[1]</sup>, 在储存和长距离的运输过程中也不可避免的产生沉淀, 进入炉膛燃烧前必须经过搅拌以便消除沉淀, 因此, 搅拌剪切成了制浆、用浆过程中一个重要的环节. 目前传统的搅拌设备由于叶轮直径大、振动产生噪声多、有死角等情况存在, 并不能够提供微观上的混合搅拌, 且附加成本大. 国务院发展研究中心专家周宏春曾明确指出: “需加快水煤浆大型高剪切强化泵的研究与开发”. 采用无锡轻大食品装备有限公司自行研制开发的高剪切均质设备对水煤浆进行研究, 该设备最关键的部位就是一对定、转子结构. 图 1 为高剪切均质泵实验装置及定转子外形; 图 2 为定转子工作原理, 转子高速旋转, 在转子腔内形成负压区, 水煤浆物料在此区域不断被吸入, 在经过定、转子狭窄的间隙中受到强烈的机械力及液力剪切、离心挤压、液层摩擦、撞击等

收稿日期: 2007-07-09 责任编辑: 柳玉柏

作者简介: 叶申柱 (1982—), 男, 安徽庐江人, 硕士研究生. E-mail: yeshenzhu@163.com; 联系人: 张裕中. Tel: 0510-85918502, E-mail: zhang30398@163.com



图1 高剪切均质泵实验装置与定转子外形

Fig. 1 Experimental device of high shear homogenizer and the shape of rotor-stator

综合作用,使水煤浆两相混合物瞬间得到分散均质,最终达到微观上的混合。



图2 定转子工作原理

Fig. 2 Working principle of rotor-stator

## 1 数学模型分析

两相流或者多相流动问题都因受到两相物性、操作条件、过程环境等的微弱影响而大不相同,不同的流型有不同的流动规律,一般同一种流型下得到的流动规律不能够随意推广到别的流型<sup>[2]</sup>,因此,本研究中简化了药剂对煤粉和水以及煤粉颗粒之间的耦合作用,水煤浆在流动过程中,水与煤粉之间没有速度的滑移,所以可以作为单相流来处理<sup>[3]</sup>,流体为定常稳态流动且不考虑剪切过程中的重力加速度项以及温度与能量问题。目前对于流体流动的数值模拟不外乎2种方法,即Lagrange法和Euler法<sup>[4]</sup>,本文采用Euler法进行湍流模拟,然后采用布辛涅斯克的涡黏性模型来使方程组封闭。涡黏模型选用适用于旋转剪切流动的Realizable  $k-\varepsilon$ 模型<sup>[5]</sup>。

统观模拟中,单位控制体积内单位质量的特性量 $\varphi$ 的瞬时输运公式用Einstein求和记号表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu}{\sigma_\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right] + S_\varphi. \quad (1)$$

对于质量、动量方程,特性量分别为 $\varphi=1, u_i$ ;源项分别为 $S_\varphi=0, -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$ ;  $u_i, u_j$ 分别为 $x, y$ 坐标方向 $x_i, x_j$  ( $i, j=1, 2$ );  $\sigma_\varphi$ 为湍流黏性修正系数。忽略密度脉动量,对式(1)进行Reynolds时间平均后,得湍流流动的Reynolds时均方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{\varphi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u_j \varphi}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu}{\sigma_\varphi} \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u'_j \varphi'}) + S_\varphi.$$

$\bar{\varphi}$ 为各变量的时均值。该方程是未封闭的,含有未知的Reynolds应力 $\rho \overline{u'_i u'_j}$ 有待于在Realizable  $k-\varepsilon$ 的模型使之封闭,因此采用布辛涅斯克提出的涡黏假设,引入湍动黏度和涡黏系数,有 $-\rho \overline{u'_i u'_j} =$

$\mu_1 \overline{D_{ji}} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$ ,  $\mu_1$ 为湍动黏度;  $\overline{D_{ji}} = \left( \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x'_i} + \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right)$ ;  $\delta_{ij}$ “Kronecker Delta”符号<sup>[6]</sup>,且当 $i=j$ 时,  $\delta_{ij}=1$ ; 当

$i \neq j$ 时,  $\delta_{ij}=0$ ;  $k$ 为湍动能,  $k = \frac{\overline{u_i u_i}}{2} = \frac{1}{2} (\overline{u'_1} + \overline{u'_2} + \overline{u'_3})$ 。据上述,建立下面的Realizable  $k-\varepsilon$ 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_1 + \mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_1 \left( \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_j} - \rho \varepsilon,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_1 + \mu}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}},$$

式中,  $\sigma_k=1.0$ ;  $\sigma_\varepsilon=1.3$ ;  $C_2=1.92$ ;  $C_1 = \max \left( 0.43, \frac{\eta}{\eta+5} \right)$ ;  $\eta = (2E_{ij}E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$ ;  $E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right)$ ,

湍动黏度  $\mu_1 = \rho C_\mu k^2 \varepsilon$ , 旋涡黏度  $C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s U^* k / \varepsilon}$ ;  $A_0 = 4.04$ ,  $A_s = \sqrt{6} \cos \varphi$ ;  $\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1} \sqrt{6W}$ ;  $W =$

$\frac{E_{ij}E_{jk}E_{ki}}{(E_{ij}E_{ij})^{1/2}}$ ;  $U^* = \sqrt{E_{ij}E_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}$ ;  $\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k$ ;  $\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k$ , 这里的  $\overline{\Omega_{ij}}$  是柱坐标系下带有角速度的  $\omega_k$  层流旋度带来的影响.

## 2 数值模拟

### 2.1 物理模型的建立

物理模型选定的剪切均质机关键结构参数: 叶轮直径 70 mm, 转子内径 90 mm, 定子内径 100 mm, 外壳直径 124 mm, 定转子齿厚 8 mm, 处理量为  $Q$ , t/h. 选定水煤浆物料的物理参数: 水煤浆密度  $1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 动力黏度  $\mu \approx 1.2 \sim 1.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .

### 2.2 计算区域、网格划分以及边界条件

在 Auto CAD 中, 生成面域几何模型导入 Gambit 中. 模拟选取整个定转子系统, 包括定转子区域、叶轮区域、转子至外壳的流动区域作为计算区域, 选用三角形网格单元, 网格外形如图 3 所示. 针对含有旋转运动的流动问题, Fluent 提供了多重参考坐标系 (MRF)<sup>[7]</sup>, 它的基本思想是将转子区域的流场简化成转子固定在某一位置时的瞬时流场, 使用旋转坐标系分析转子内流体的流动(相对运动), 固定坐标系分析泵内其余区域的流动(绝对运动), 选取速度进口边界条件和压强出口边界条件; 采用 Fluent 默认的无滑移固壁条件; 选用 Fluent 默认的方程欠松弛因子.

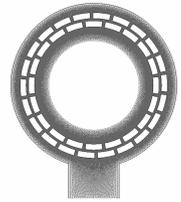


图 3 定转子网格划分

Fig. 3 Grid division of rotor and stator

## 3 数值模拟结果与分析

### 3.1 叶轮区域的吸入流场

叶轮高速旋转, 在转子中心形成很强的负压区, 水煤浆物料在叶轮腔体内被高速旋转的叶片产生的强大离心力场而源源不断的吸入, 实现从中心向四周扩散. 从图 4 的压强等值线可以看出, 转子中心存在很强的负压, 正是该负压区的存在产生了巨大的压差, 从而能够将外界的浆体不断吸入. 从图 4 的速度矢量中可以清晰看出该吸入流场的存在.

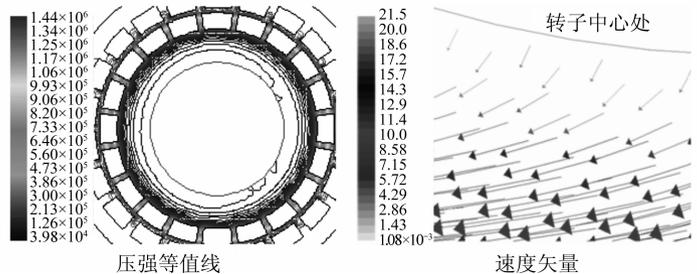


图 4 转子中心处的压强等值线和速度矢量

Fig. 4 Pressure isoline and velocity vector in the center of rotor

水煤浆物料被高速旋转的叶轮源源不断的吸入定转子齿中, 不需要外界的附加泵便可以吸入和输送水煤浆物料, 节省了成本, 这是该设备的一大特点.

### 3.2 周向流场解析

水煤浆在叶轮腔内被吸入以后, 在离心力的作用下, 水煤浆物料向四周扩散. 从图 5 的速度等值线和速度矢量中可以看出, 沿着箭头指向相反的方向, 速度大大降低, 产生了速度损失, 引起动能大大降低, 转化为强大的剪切摩擦能等形式的能, 从而使得浆体在该处受到强烈的剪切作用而达到均质稳定细化的目的. 由图 5 的壁面剪切应力可以证明, 定转子壁面处确实存在着巨大的剪切应力, 且越靠近壁面处, 剪切应力越大.

由图 6 可以看出, 随着转子转速的提高, 剪切应力也越来越大. 剪切应力的存在, 能够对水煤浆浆体进行一般搅拌混合工艺难以达到的高效剪切和熟化, 使浆体更加均一、稳定, 从而有效地延长了水煤浆不

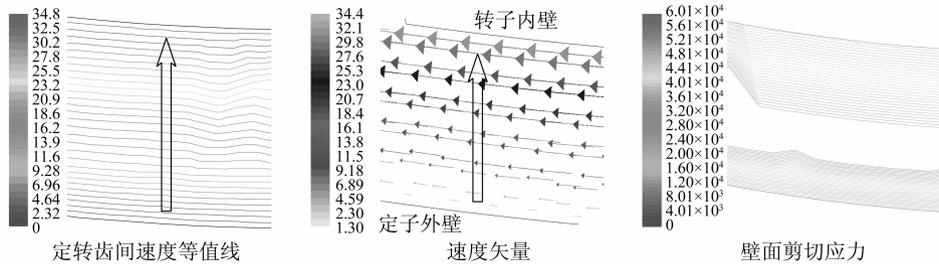


图 5 定转子齿间的速度等值线、速度矢量和壁面剪切应力

Fig. 5 The scheme of velocity isoline, velocity vector and wall shear stress between rotor and stator

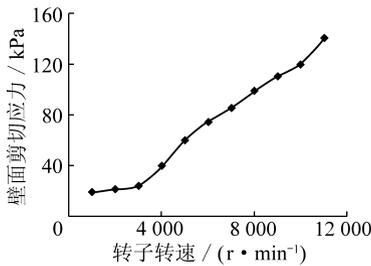


图 6 转子转速与定转齿壁面剪切应力的关系  
Fig. 6 The relation between rotor velocity and wall shear stress

所以固定定子间隙内的浆体将产生非常大的动能，当水煤浆浆体运动到定子间隙区域②时，速度由最大突然降至最小，动能转化为转子间隙强烈的剪切能、摩擦能、撞击能和热能等形式的能量。由压强等值线图可以看出，水煤浆浆体在定子开口槽①处压强突增，浆体在此高压作用下受到流场作用而产生强烈的碰撞以及受到定子齿强烈的剪切作用，并且产生了强烈的回流旋涡现象，由速度矢量图可以看出，旋涡的产生使得浆体颗粒与颗粒之间、颗粒与齿之间的碰撞更为激烈，更有利于水煤浆物料的进一步混合，这与文献 [11] 等所描述的相符合，证实了超剪切技术能够达到一般搅拌混合机械所不能够达到的微观上的混合，有效地延长了水煤浆不发生硬性沉淀的时间。

### 3.4 湍流应力与空化现象

定转子工作区域中存在着巨大的湍流应力场，由图 8 可知，水煤浆物料在定转子周向齿间湍动能最大，在巨大湍动能的作用下，浆体中的颗粒能够快速的混合均匀，达到微观的混合效果，进一步提高浆体稳定性。

水煤浆物料在定转子腔内被均质的另外一个重要原因就是空化作用<sup>[12]</sup>。定转齿在外缘附近局部区域产生了极大负压，且随着转子转速的提高，负压越来越大，当负压低于浆体的饱和蒸气压的时候，水煤浆浆体便在定转子局部区域产生了

发生硬性沉淀的时间，同时也证明了其带来的剪切应力要高于普通水煤浆的搅拌器<sup>[8,9]</sup>，由文献还可以得知，随着转速的提高，也大大降低了水煤浆的黏度，增强了浆体流动性<sup>[10]</sup>。但随着转速的提高，定转子的变形加大，系统的稳定性也会变差，所以选择设计时要同时考虑这 2 个方面的因素。

### 3.3 径向流场解析

剪切均质过程中，浆体在离心力作用下穿过定转子开口槽。由图 7 的速度等值线可以看出，水煤浆浆体在转齿槽①中速度非常大，由于水煤浆自身密度大，

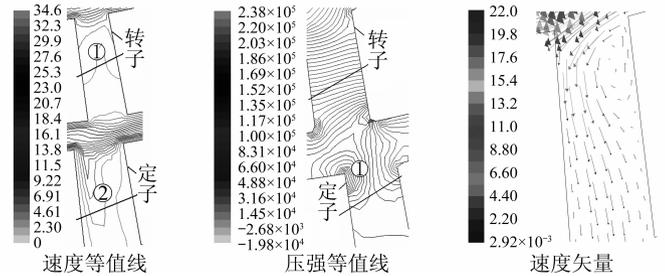


图 7 定子开口槽处的速度等值线、压强等值线和速度矢量  
Fig. 7 The scheme of the velocity isoline, pressure isoline and velocity vector in the groove direction of stator

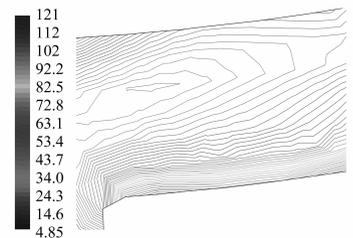


图 8 定转齿之间的湍动能  
Fig. 8 Scheme of turbulent kinetic energy between rotor and stator

空穴, 当空穴初始值达到一定值后, 便产生了空化现象, 且随着转速的提高, 定转子齿间的能量耗散越来越高, 空化现象也越来越明显<sup>[13]</sup>. 空化产生的大量气泡经过定转齿的剪切摩擦等作用瞬间溃灭, 溃灭时, 气泡中心会形成一股微射流, 射流速度很高, 强大的冲击力能够使煤粉颗粒之间混合更加均匀, 颗粒与水之间的接触更加充分, 更有利于水煤浆物料的进一步混合, 使浆体更加均匀、稳定.

## 4 结 论

采用 Fluent 软件及 Realizable  $k-\varepsilon$  模型对水煤浆物料在剪切均质泵中剪切均质过程进行了模拟, 模拟结果显示了水煤浆物料在高剪切泵内被剪切均质的过程, 分析了叶轮进口区域、周向与径向上的压力场、速度场及空化现象, 证明水煤浆物料能够被强大的剪切力、摩擦力、撞击力、射流等力剪切均质, 使浆体更加均一、稳定, 进一步延缓了运输及储存过程中沉淀发生的时间, 且随着转速的提高, 剪切力越来越大, 剪切效果越来越好. 其强大的剪切力、摩擦力、撞击力是普通的水煤浆搅拌混合机械所难以达到的. 但是实际上的流体比本文所描述的要复杂的多, 当考虑耦合作用、系统的稳定性、定转子变形等问题时将更加复杂, 这些工作都有待于进一步研究.

## 参考文献:

- [1] 孙成功, 尉迟唯, 曹变英, 等. 水煤浆制备过程中浆体抗搅拌性能的研究 [J]. 燃料化学学报, 1996, 6 (3): 233 ~ 238.
- [2] 张 政, 谢灼力. 流体 - 固体两相流的数值模拟 [J]. 化工学报, 2001, 52 (1): 1 ~ 9.
- [3] 刘大有. 两相流体动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [4] Durst F, Milojevic D, Schonung B. Eulerian and lagrangian predictions of particulate two-phase flows: a numerical study [J]. Appl. Math. Modelling, 1984 (8): 101 ~ 115.
- [5] 王福军. 计算流体力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 228 ~ 232.
- [6] 黄克智, 薛明得, 陆明万. 张量分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [7] Dong L, Johansen S T, Engh T A. Flow induced by an impeller in an unbaffled tank - II. Numerical modeling [J]. Chem. Eng. Sic., 1994, 49: 3 511 ~ 3 518.
- [8] Paul E L, Kresta S M, Atiem-obeng V A, et al. Handbook of industrial mixing: Science and practice [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2004. 470 ~ 505.
- [9] Cohen D. How to select rotor-stator mixers [J]. Chemical Engineering, 1998, 105 (8): 76 ~ 79.
- [10] Nadina Muller-Fischer, Erich J. Windhab. Influence of process parameters on microstructure of food foam whipped in a rotor-stator device within a wide static pressure range [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 2005, 263: 353 ~ 362.
- [11] Fabien Barailler, Mourad Heniche, Philippe A Tanguy. CFD analysis of a rotor-stator mixer with viscous fluids [J]. Chem. Eng. Sic., 2006, 61: 2 888 ~ 2 894.
- [12] 杨诗斌, 徐 凯, 张志森. 高剪切及高压均质机理研究及其在食品工业中的应用 [J]. 粮油加工与食品机械, 2002 (4): 33 ~ 35.
- [13] Kumar P S, Pandit A B. Modeling hydrodynamic cavitation [J]. Chem. Eng. Technol., 1999, 22 (12): 1 010 ~ 1 026.