

介质特性对脱硫浆液循环泵性能影响的数值分析

王树东, 胡三高, 曹 蕤, 梁双印

(华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

摘 要: 运用基于计算流体动力学的数值计算软件 Fluent 6.2 在选取合理的多相流模型以及控制方程的基础上, 对某 300 MW 火电机组混流式脱硫浆液循环泵的内部流场进行数值模拟, 研究介质特性如颗粒直径、固相体积分数以及浆液密度等因素对泵性能的影响, 进而对由于介质特殊性而引起的脱硫浆液循环泵在实际运行中存在水力性能差、过流部件磨损严重等现象进行机理分析, 以期对完善脱硫浆液循环泵的理论以及火电厂脱硫浆液循环泵的实际改造与运行提供参考。

关 键 词: 脱硫浆液循环泵; 介质特性; 多相流; 数值模拟; 水力性能

中图分类号: X701.3 文献标识码: A

引 言

混流式循环泵广泛应用于火电站湿法烟气脱硫系统, 其性能对机组安全性及经济性影响显著。混流式脱硫浆液循环泵输送介质为固体颗粒与液体混合形成的两相流体, 设计理论的不完善性导致目前普遍存在“单相泵作多相泵用”的现象, 并引起泵在运行时存在水力性能差、过流部件磨损严重等问题。

本研究运用数值计算软件 Fluent 6.2 以某 300 MW 火电机组混流式脱硫浆液循环泵为对象, 针对介质特性对泵性能的影响进行研究, 以期对完善脱硫浆液循环泵的理论及其实际设计改造提供参考依据^[1-2]。

1 模型选取及分析

混流式脱硫浆液循环泵内部流动为固液两相流体的流动, 根据流动实质及各模型适用范围, 以某 300 MW 火电机组湿法烟气脱硫系统卧式、混流式浆液循环泵为研究对象, 分别选取数值计算软件

Fluent 6.2 中的 Mixture 模型、多相流 Euler 模型以及目前应用广泛的单相流模型, 对泵内流场进行数值模拟。

1.1 模型定性分析

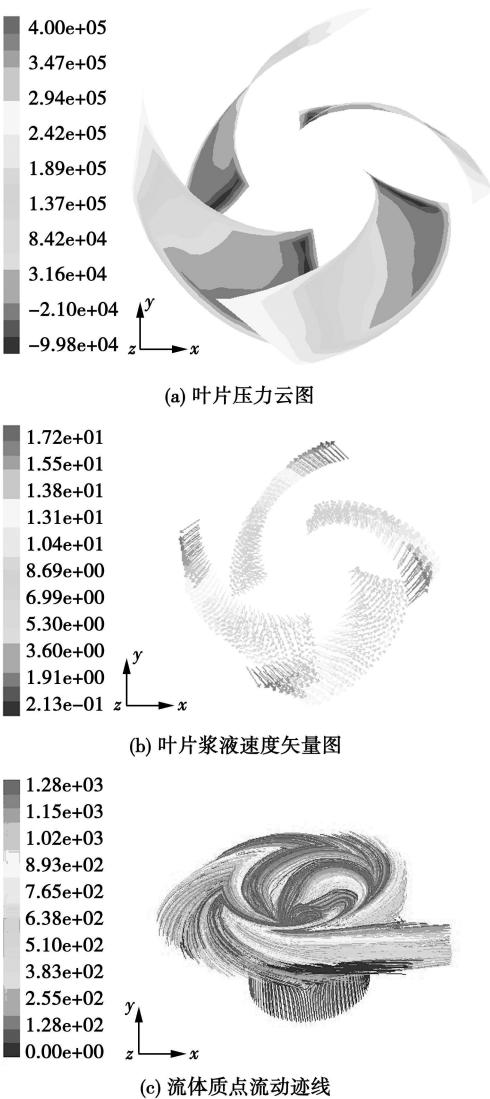


图 1 Euler 模型模拟结果

模型定性分析涉及泵内流体质点流动迹线、叶片压力、叶片速度分布。结果表明,选取多相流 Euler 模型具有更高的合理性,多相流 Euler 模型模拟所得结果如图 1 所示。

图 1 (a)叶片压力云图显示,叶片压力从叶片入口到叶片出口呈现逐渐增大趋势,在叶片出口处达到最大;(b)叶片速度矢量图表明,两相流体沿着叶片从叶片非工作面向叶片工作面方向运动并逐渐增大;(c)两相流体质点在蜗壳内部的流动迹线图也表明与实际流动的一致性^[3]。

1.2 模型定量分析

模型定量分析为模拟所得参数与实际运行参数的比较。改变泵入口流量,对泵内流场进行模拟、计算,绘制扬程—流量特性曲线。

对实际流量 5 600 m³/h 扬程 22.5 m 的某 300 MW 机组浆液循环泵和实际流量 8 500 m³/h 的某 600 MW 机组脱硫浆液循环泵,分别选取单相流模型、Mixture 模型和 Euler 模型进行模拟计算,计算结果及计算误差如表 1 所示。

表 1 模型计算结果误差比较

		单相流 模型	Mixture 模型	Euler 模型
300 MW 机组	计算出口压力 /MPa	0.389	0.404	0.371
浆液循环泵	计算误差 /%	22.4	27.1	16.7
600 MW 机组	计算出口压力 /MPa	0.348	0.357	0.335
浆液循环泵	计算误差 /%	23.5	26.4	18.9

由表 1 可以看出,300 MW 机组脱硫浆液循环泵的计算误差分别为 22.4%、27.1%和 16.7%;600 MW 机组脱硫浆液循环泵的计算误差分别为 23.5%、26.4%和 18.9%。可见,选取 Euler 模型进行计算误差最小,Euler 模型具有较高精度。

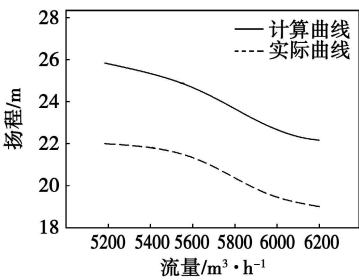


图 2 Euler 模型所得扬程—流量特性曲线与实际的特性曲线比较

而成的扬程—流量特性曲线与实际的特性曲线比较。曲线走势与实际相符合,并且精度最高^[4]。

2 模型建立及数值计算

2.1 模型建立

某 300 MW 火电机组脱硫系统混流式浆液循环泵,叶轮为闭式,设计参数:扬程 22.5 m,流量 5 600 m³/h,泵轴转速 985 r/s,叶片数为 5。

依据现场测绘数据,对蜗壳、叶轮及吸入室进行三维绘图,然后运用前处理软件 Gambit 2.2 进行非结构化网格划分,网格单元数为 298 932。同时,进行边界条件定义^[5]。

2.2 数值计算

数值计算步骤为求解器选取、模型及控制方程定义以及迭代运算等。

2.2.1 求解器选取

选取分离、隐式求解器 (Segregate Implicit)。

2.2.2 模型及控制方程

最终选取三维 Euler 多相流模型进行模拟计算。控制方程为:

①相连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n m_{pq} \tag{1}$$

式中: $\vec{v}_q$ —q 相的速度; m_{pq} —从 p 相到 q 相的质量传递。

②相动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla P + \nabla \cdot \left(\tau_q + \sum_{p=1}^n (R_{pq} + m_{pq} \vec{v}_{pq}) \right) + \alpha_q \rho_q (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift\ q} + \vec{F}_{vm\ q}) \tag{2}$$

式中: τ_q —q 相的压力应变张量; $\vec{F}_q$ —外部体积力; $\vec{F}_{lift\ q}$ —升力; $\vec{F}_{vm\ q}$ —虚拟质量力; R_{pq} —相之间的相互作用力; P —所有相共享的压力; $\vec{v}_{pq}$ —相间速度。

2.2.3 迭代运算

首先进行流场初始化,然后进行迭代运算直至计算收敛,得出不同介质特性对泵性能的影响^[6]。

3 介质特性对脱硫浆液循环泵性能影响分析

3.1 颗粒直径对泵性能的影响

颗粒直径是影响脱硫浆液循环泵性能的重要因

素之一, 颗粒直径的变化导致其运动轨迹发生变化, 从而影响泵的水力效率以及磨损状况。

现场实测的脱硫浆液中固相颗粒直径约为

0.20 mm, 因此, 在其余边界条件均不变的条件下, 选颗粒直径分别为 0.10、0.20 和 0.30 mm 并进行计算^[7]。

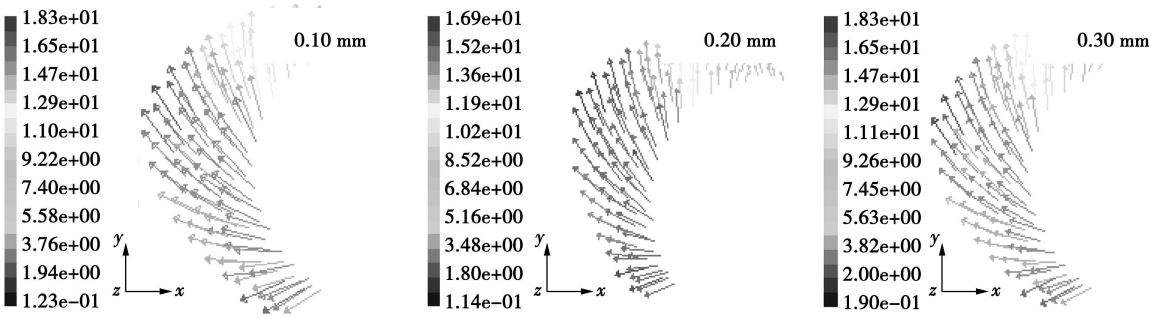


图 3 不同颗粒直径时叶片之间固体颗粒速度矢量图

图 3 为不同颗粒直径时叶片之间固体颗粒的速度矢量图。当颗粒直径增加时, 其运动方向趋于靠近叶片工作面。固体颗粒的运动轨迹靠近叶片工作

面将导致叶片工作面磨损和因摩擦引起的水力损失加剧, 导致泵水力效率降低。

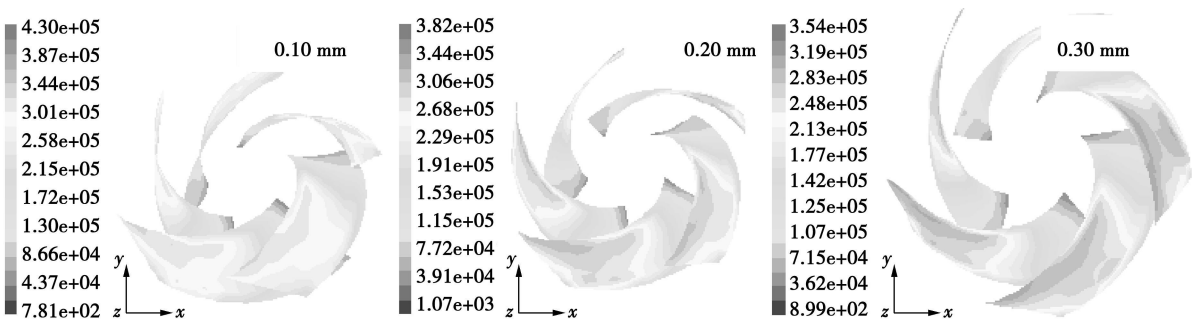


图 4 不同颗粒直径时叶片工作面压力分布云图

图 4 为不同颗粒直径时叶片工作面压力分布云图。叶片工作面出口处压力集中的现象随着颗粒直径的增大而趋于严重。压力集中将导致相应部位磨损的加剧, 同时还将引起泵内流场不稳定以及流动损失和局部损失增大, 导致泵效率降低。

针对不同颗粒直径, 分别改变泵入口流量, 对不同工况下泵内部流场进行模拟。根据计算结果绘制成扬程—流量特性曲线, 如图 5 所示。当颗粒直径由 0.10 mm 增加至 0.30 mm 时, 泵的扬程降低约 0.05% ~ 0.08%。

模拟结果表明, 随着颗粒直径增大, 泵的扬程降低, 同时颗粒的运动方向趋向于叶片工作面, 在叶片工作面和非工作面的压力集中现象趋于严重。此现象导致汽蚀产生以及流场的不稳定, 引起水力性能降低以及磨损加剧^[8~10]。

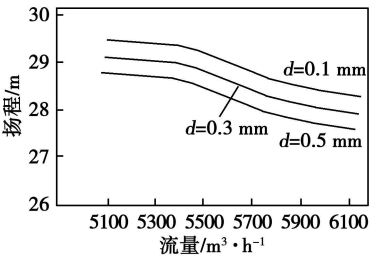


图 5 不同颗粒直径时扬程—流量特性曲线

3.2 固相体积分数对泵性能的影响

固相体积分数是影响脱硫浆液循环泵性能的另一因素。现运行的脱硫浆液中固相体积分数约为 0.16%, 因此在其余参数均不变的条件下, 仅改变固相体积分数, 针对固相体积分数分别为 0.08%、0.16% 和 0.24% 时泵内流场进行数值模拟。

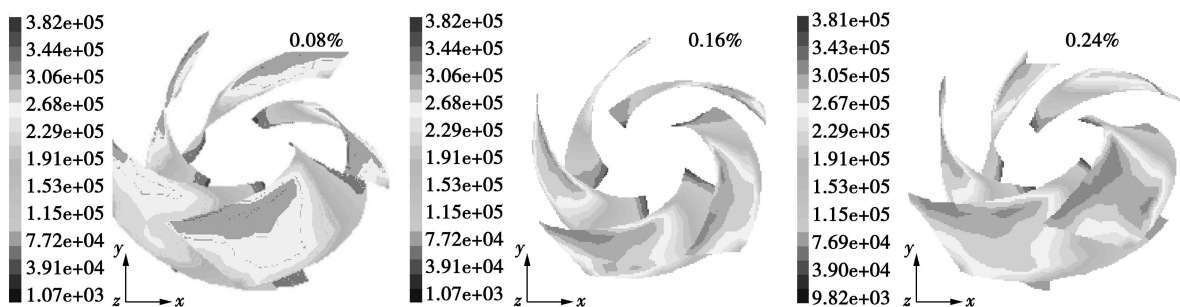


图 6 不同固相体积分数的叶片工作面压力分布云图

图 6 为 3 种固相体积分数的叶片工作面压力分布云图。该图表明, 当固相体积分数增加时, 叶片压力分布趋于不均匀, 在叶片出口处局部压力集中的现象趋于明显。产生这种现象的原因是: 固相体

积分数增加时, 固液两相之间的相互作用力增强, 导致流场扰动加剧以及固相分布不均匀, 从而引起叶片压力分布的不均匀。

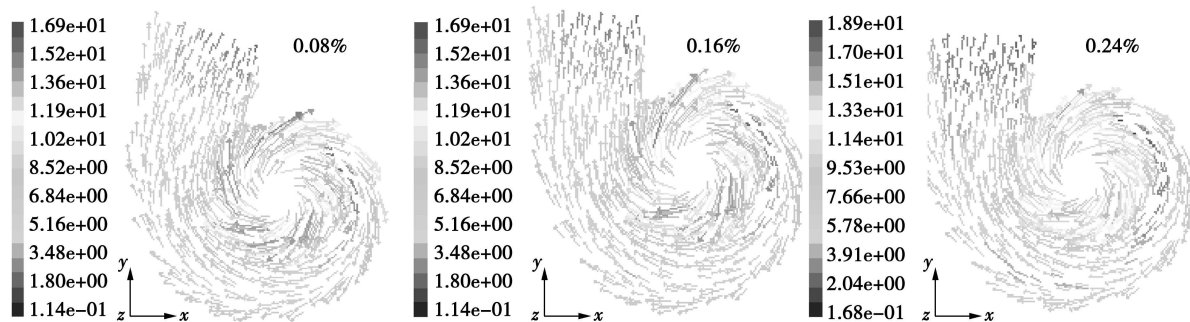
图 7 不同固相体积分数的等值面 $Z=220\text{ mm}$ 上流体质点速度矢量图

图 7 为等值面 $Z=220\text{ mm}$ 上流体质点速度矢量图(泵的旋转轴为 Z 轴), 监测此面上流体质点的速度矢量可知泵内流场。针对不同固相体积分数的计算结果表明, 当固相体积分数由 0.08% 增加至 0.24% 时, 泵的扬程降低约 $0.06\% \sim 0.12\%$ 。

图 8 为固相体积分数不同时泵的扬程变化。

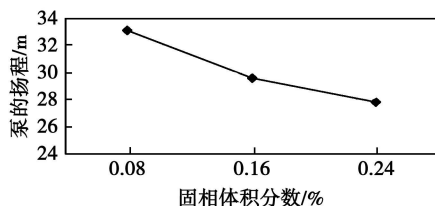


图 8 不同固相体积分数的泵的扬程

模拟结果表明, 固相体积分数增加时泵的扬程降低, 泵的水力效率及磨损都将受到影响^[11~14]。

3.3 浆液密度对泵性能的影响

石灰石纯度的差别导致浆液密度变化, 因此浆液密度成为影响泵性能的又一因素。现运行的脱硫

浆液密度为 $1\,300\text{ kg/m}^3$, 在其它因素不变时, 仅改变浆液密度, 对浆液密度分别为 $1\,100$ 、 $1\,300$ 和 $1\,500\text{ kg/m}^3$ 的 3 种情况的泵内流场进行数值模拟。

图 9 为不同浆液密度时叶片之间固体颗粒速度矢量图。随着浆液密度的增加, 其运动方向逐渐偏离叶片工作面。理论分析表明, 浆液密度越大, 与叶轮一起作旋转运动时受到沿叶轮径向的离心力越大, 因此在运动时逐渐脱离叶片工作面。流体偏离流道运动将导致水力损失增加, 从而引起泵效率降低。

图 10 为不同浆液密度时等值面 $Z=220\text{ mm}$ 上流体质点速度矢量图(泵旋转轴为 Z 轴)。由图可知, 浆液密度增加时, 泵内流场趋于不稳定。产生这种现象的原因是当固相密度增大时, 固液两相之间的剪切压力增大, 同时速度滑移趋于严重, 引起流场不稳定及流动损失增加。

对不同浆液密度的计算表明, 当浆液密度由 $1\,100\text{ kg/m}^3$ 增加至 $1\,500\text{ kg/m}^3$ 时, 泵的扬程降低约 $0.12\% \sim 0.15\%$ 。图 11 为颗粒密度不同时泵的

扬程变化。

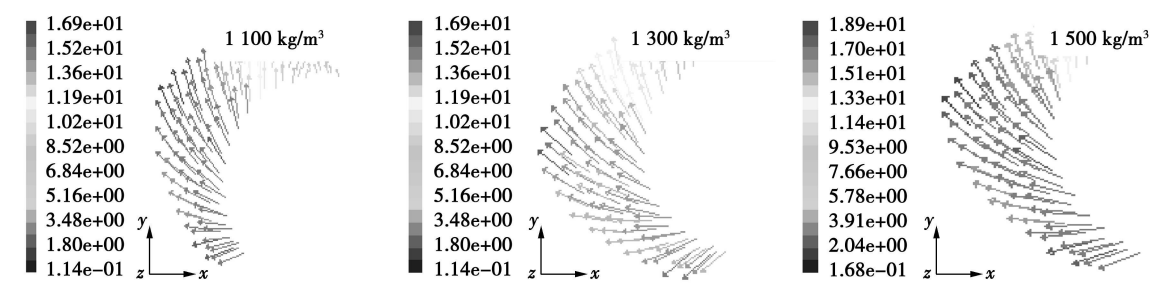


图 9 不同浆液密度叶片之间固体颗粒速度矢量图

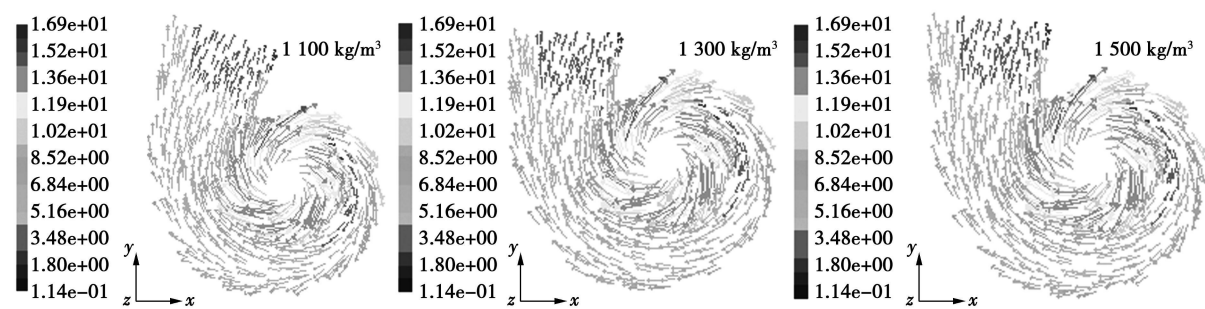


图 10 不同浆液密度等值面 $Z=220\text{ mm}$ 上流体质点速度矢量图

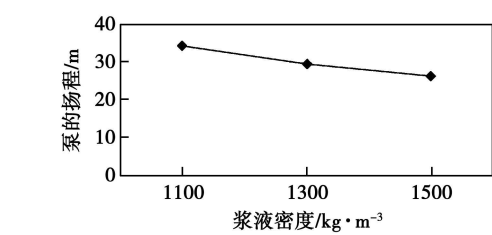


图 11 不同浆液密度泵的扬程

模拟及分析结果表明, 固体浆液密度增加时, 泵的扬程降低, 同时流体质点因受到更大的离心力而偏离流道流动, 而且由于固液两相之间的剪切压力增大, 速度滑移趋于严重, 上述现象将引起流动损失增加以及泵效率的降低^[15~17]。

4 结 论

运用计算流体动力学软件 Fluent6.2 选用多相流 Euler 模型, 研究颗粒直径、固相体积分数和浆液密度等因素对混流式脱硫浆液循环泵性能的影响, 结论如下:

(1) 当颗粒直径由 0.10 mm 增加至 0.30 mm 时, 泵的扬程降低约 0.05%~0.08%; 固体颗粒的

运动方向趋向于叶片工作面, 同时在叶片工作面出口处和非工作面出口处的压力集中现象趋于严重, 在叶片入口处逐渐形成局部低压区, 导致流场不稳定以及压力分布不均匀, 引起泵水力性能的降低以及叶轮磨损加剧。

(2) 当固相体积分数由 0.08% 增加至 0.24% 时, 泵的扬程降低约 0.06%~0.12%; 泵内固液两相之间的相互作用增强, 因而叶片压力不均匀的现象趋于严重, 导致泵水力效率的降低以及磨损的加剧。

(3) 当浆液密度由 1100 kg/m³ 增加至 1500 kg/m³ 时, 泵的扬程降低约 0.12%~0.15%; 流体质点因受到更大的离心力而偏离流道流动, 同时固液两相之间的剪切压力增大并且速度滑移趋于严重, 导致流动损失增加以及泵效率降低。

参考文献:

[1] 高学林, 袁新清. 叶轮机械全三维粘性气动优化设计系统[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 88-92.
[2] 王红生. 渣浆泵技术现状与发展展望[J]. 选煤技术, 2006(1): 60-63.
[3] SIEHANE V. Local mesh refinement and penalty methods dedicated to the Direct Numerical Simulation of incompressible multi-

Phase flows//Proceedings of the ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference [C]. Hawaii: ASME/JSME, 2003. 1290—1305

[4] 刘小云,樊建人,岑可法,等. 三维混合层的直接数值模拟和实验验证[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 183—186

[5] 郑勤红,盛剑霓,解福瑶,等. 二维涡流分析的多极理论[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(2): 73—77

[6] 邓东升,刘 军,朱红耕. 混流泵模型及装置特性的比较与分析[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(5): 10—13

[7] 甘加业,薛永飞,吴克启. 混流泵叶轮内空化流动的数值计算[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(1): 165—168

[8] JOSE GONZALEZ, JOAQUIN FEMANDEZ, EDUARDO BLANCO et al. Numerical simulation of the dynamic effects due to impeller-volute interaction in a centrifugal pump[R]. ASME—FEDSM—00—11297, 2004

[9] 王春林,李婷婷,马庆勇,等. 叶片式渣浆泵叶轮中浆体浓度分布数值模拟[J]. 排灌机械, 2007, 26(2): 16—19

[10] 李仁年,徐振法,韩 伟,等. 渣浆泵内部流场数值模拟与磨损特性分析[J]. 排灌机械, 2007, 25(2): 5—8

[11] 李文君,李要锋,魏 娟. 离心式渣浆泵叶轮磨损机理研究及强度的有限元分析[J]. 仪器仪表用户, 2007, 14(4): 101—103

[12] 林 恺,曹树良,祝宝山,等. 用于高比转速混流泵设计的流场计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 23(2): 219—223

[13] ABBA A, CERCIGNANI C, VALDETTARO L. Analysis of sub-grid scale models[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2003, 46(4): 521—535

[14] 袁春元. 混流泵叶轮流场计算与性能试验[J]. 农业机械学报, 2008, 17(3): 52—55

[15] 张勤昭,曹树良,祝宝山,等. 高比转速混流泵叶轮正反问题计算[J]. 中国电机工程学报, 2007, 24(9): 1435—1438

[16] 赵永亮,杨丽辉,任晓炎,等. 渣浆泵运行流量的测定方法[J]. 河北工业科技, 2007, 26(02): 81—83

[17] 魏绍凯,谢 明. 叶型曲线的自适应分段回归[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(4): 52—56

新技术、新工艺

燃气涡轮叶片保护涂层的腐蚀寿命

据《Теплоэнергетика》2010年 1月号报道,燃气涡轮工作的可靠性在很大程度上取决于它们的叶片装置的工作能力。燃气涡轮的动叶和静叶需经受高温和含有氧及各种腐蚀性成分,特别是含硫化合物的燃气流的腐蚀。

硫化物、氧化物腐蚀对燃气涡轮叶片的腐蚀是最危险的,它可导致叶片叶型部分相当大的破坏并降低叶片寿命。

为了提高叶片的寿命,应用了使用各种不同方法涂敷的表面涂层。涂层具有不同的化学成分和结构,它们的保护性能就取决于这些成分和结构。

介绍了 НПО «ЦКТИ» (俄罗斯《中央锅炉涡轮机研究所》)科研生产联合体)在确定利用不同方法涂敷的燃气涡轮叶片保护涂层腐蚀寿命方面多年研究的结果。确定了涂层的基本组分和合金元素、陶瓷层厚度和合金底层的耐蚀性等级对涂层寿命的影响。

有关试验数据允许确定各种合金元素对金属的 (MCrAlY)和铝化物涂层影响的性质和程度。相对于铝化物涂层进行的比较表明,给它们加入合金元素: Si(硅)、Cr(铬)和 Pd(钯),增加了涂层的寿命。

(吉桂明 摘译)

介质特性对脱硫浆液循环泵性能影响的数值分析 = Numerical Analysis of the Influence of the Medium Characteristics on the Performance of a Desulfurization Slurry Circulating Pump [刊, 汉] / WANG Shudong HU Sanguo CAO Rui et al Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control North China University of Electric Power Beijing China Post Code 102206 // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(6). — 657 ~ 662

By using numerical calculation software Fluent 6.2 which is based on the philosophy of computational fluid dynamics and on the basis of choosing a rational multiphase flow model and control equation, numerically simulated was the flow field inside a hybrid flow type desulfurization slurry circulating pump in a 300 MW thermal power plant. The influence of such medium characteristics as particle diameter, solid phase volumetric points and slurry density etc. on the pump performance was studied. Then, a mechanism analysis was conducted of such phenomena as poor hydraulic performance and serious abrasion of the flow path components etc. existing in the practical operation of the desulfurization slurry circulating pump due to the particularity of the medium in hoping to provide reference for improving the theory of the pump under discussion and for its practical modification and operation in thermal power plants. Key words: desulfurization slurry circulating pump; medium characteristics; multiphase flow; numerical simulation; hydrodynamic performance

基于 QFT 的加热炉温度控制系统的设计与仿真 = Design and Simulation of a Temperature Control System for a Heating Furnace Based on the Quantitative Feedback Theory [刊, 汉] / ZUO Weiheng WANG Yan (National Key Laboratory on Power Transmission and Distribution Equipment System Safety and New Technology Chongqing University Chongqing China Post Code 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(6). — 663 ~ 667

The temperature control system for heating furnaces is characterized by such features as a big inertia, a long delay and time variation etc. It is difficult to achieve satisfactory control effectiveness for a temperature control system by adopting the conventional control methods. By making use of respective advantages of the quantitative feedback theory, fuzzy control and traditional PID (proportional, integral and differential) control, a controller was designed. The simulation results show that the controller being designed can solve very well the robust design problem of the control system resulting from the uncertainty of the parameters of the control system for the heating furnace and can also obtain satisfactory dynamic and static control characteristics in compliance with the requirement for changes of operating conditions of the object under control. Key words: QFT (quantitative feedback theory), heating furnace, fuzzy control, robust control, PID (proportional, integral and differential), uncertainty system

波纹通道内充分发展层流流动的简化分析 = Simplified Analysis of the Laminar Flow Fully Developed Inside the Corrugated Passages [刊, 汉] / SHI Jinsheng (College of Mechanical Engineering Tianjin University of Science and Technology Tianjin China Post Code 300222) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(6). — 668 ~ 671

Perturbed was the fixed type laminar flow in the passages formed by two corrugated plates having different ampli-