

固体颗粒含量对离心泵空化特性影响分析

王秀礼¹, 张俊杰², 朱荣生¹, 付强¹

(1. 江苏大学 流体机械工程技术研究中心 江苏 镇江 212013; 2. 新界泵业集团有限公司 浙江 台州 317525)

摘要: 为研究离心泵输送介质中固体颗粒含量对空化的影响, 采用数值计算与试验结果进行对比相结合的方式进行了深入地研究, 结果表明: 固体颗粒含量对空化的影响比较大, 空化随固体颗粒含量的增加而严重; 在相同进口压力工况下, 不同的固体颗粒含量对叶轮内部空泡流动轨迹及速度变化等因素的影响较大; 在相同空化工况下, 固体体积分数总体上是随固体颗粒含量的增加而增大, 但受空化影响在一些区域内的固体体积分数会减小; 在固体颗粒含量不变的情况下, 叶轮流道内的固体体积分数随着空化的发展而逐渐减小。由于空化非线性变化规律产生而引起叶轮流道内固体体积分数呈现非线性规律变化。

关键词: 离心泵; 固液两相; 空化; 数值模拟; 试验

中图分类号: TH311 文献标识码: A

引言

目前, 工程上对输送含固体颗粒的离心泵的选择、设计及试验都是按照输送清水的离心泵方式进行, 但在实际运行中, 由于固体颗粒的存在会影响离心泵的正常运行, 尤其是在发生空化时, 离心泵叶轮会遭受气蚀和磨损联合作用破坏, 导致与气蚀或磨损完全不同破坏模式, 破坏程度比单独作用下更为严重^[1-5]。

在汽蚀特性方面的研究, 潘中永等根据离心泵汽蚀余量的计算公式来分析影响泵汽蚀特性的因素^[6], 确定泵的汽蚀初生以及泵的容许汽蚀运行范围; 高传昌等根据汽蚀基本方程, 导出了离心泵必需汽蚀余量表达式, 研究了变阀调节和变速调节与离心泵汽蚀特性之间的理论关系^[7]; 刘宜等应用 Fluent 软件^[8], 对离心泵设计工况下的空化流场进行了数值模拟, 得到了空化两相的静态特征。崔宝玲等采用对带诱导轮的高速离心泵进行了汽蚀特性试验和数值模拟^[9-10]。为了研究输送含有其它介质对空化的影响, 国内外许多学者做了大量的工作。宋

宇、韩伟等通过对渗入气体时的空化特性进行了数值模拟与高速摄影试验^[11-12]; 杨娟丽等对黄河万家寨水电站含沙水样的初生空化与临界空化压力进行了监测^[13], 结果表明: 随着含沙量的增大, 初生空化与临界空化压力值均有所提高, 且接近线性关系。常近时等对不同含氯量的自来水初生空化与临界空化压力值进行监测^[14], 结果证实含氯量越多, 水体的初生空化与临界空化压力越高。

本研究采用 CFD(计算流体力学)数值模拟与试验相结合的方法对输送介质中含有固体颗粒对空化的影响及内部流动规律进行分析, 初步揭示固体颗粒量对离心泵空化的影响及发生空化时叶轮流道内部的流动轨迹及固相体积分数分布规律, 为输送含有固体颗粒的离心泵空化特性分析及其设计提供了参考。

1 数值模拟

1.1 计算模型与方法

1.1.1 基本假设

以含沙水为介质, 固液两相流离心泵内部流动为复杂的固液两相流动, 假设: (1) 液体相为不可压缩流体, 固体颗粒相为离散相。各相的物理特性均为常数。(2) 颗粒相为球形, 粒径均匀的泥沙颗粒, 不考虑相变。(3) 泵内流动为定常流动。

1.1.2 计算模型

模型泵性能参数: $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$, 扬程 $H = 35 \text{ m}$, 转速 $n = 1450 \text{ r/min}$, 叶片数 $Z = 6$, 叶片包角 $\varphi = 130^\circ$ 。为使水流充分发展而更接近真实情况, 分别在叶轮进口前加了一段 4 倍叶轮进口直径长的进水段, 蜗壳出口后加一段与进水段等长的出水段。计算区域包括进水段、叶轮、蜗壳、出水段。采用结构化网格离散各流体区域, 由网格生成软件 ICEM -

收稿日期: 2013-06-18; 修订日期: 2013-11-07

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAF14B04); 江苏省自然科学基金科技项目(BK20130516); 国家自然科学基金(51379091)

作者简介: 王秀礼(1982-), 男, 山东烟台人, 江苏大学博士, 助理研究员。

CFD 生成结构化网格。计算区域的网格离散如图 1 所示。

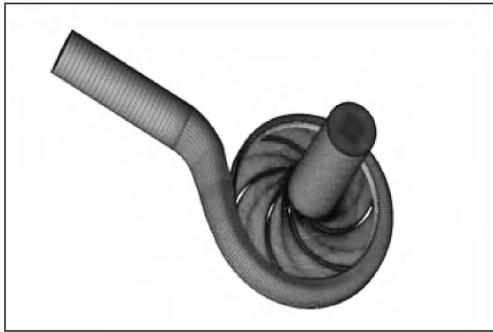


图 1 模型泵计算网格

Fig. 1 Grid for calculating the model pump

1.1.3 网格无关性分析

随着模型网格数的增加,由于网格引起的求解误差会逐渐缩小。但综合考虑计算机硬件配置与计算时间的关系,网格数不宜过多。针对实际情况采用 6 种不同网格数的方案进行网格无关性分析,对固体颗粒含量为 10%、设计流量 $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ 的定常流动工况进行数值模拟,结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,随着网格数的增加,扬程有减小的趋势,但其计算结果的数值波动越来越小。表 1 中的效率未考虑容积损失和部分机械损失。分析方案一和方案二的计算结果,两方案的扬程波动小于 0.1%,可认为满足网格无关性假设。综合考虑数值模拟时间和精度,最终确定方案二的网格划分方案进行相关后续研究。

表 1 网格无关性分析

Tal. 1 Analysis of the irrelavance of the grid

参数	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
进水段网格数	236 325	219 200	196 175	153 125	125 097	98 000
叶轮网格数	817 581	779 059	719 797	655 536	588 795	486 837
蜗壳网格数	685 658	647 753	599 760	527 312	474 126	406 504
出水段网格数	236 325	219 200	196 175	153 125	125 097	98 000
总网格数	1 975 889	1 865 212	1 711 907	1 489 098	1 313 115	1 089 341
扬程 H/m	35.458 0	35.469 7	35.526 1	35.551 2	35.558 0	35.543 1

1.1.4 数值计算方法

运用流场分析软件 ANSYS - CFX,采用混合模型与完整空化模型对固液两相流离心泵发生空化时的内部流场进行数值模拟,采用 SIMPLC 算法求解二阶迎风格式离散差分方程。考虑到相间拖拽力与滑移速度的影响,采用非均相流模型,对于连续流体,采用标准 $k - \varepsilon$ 湍流模型;对于分散颗粒相,采用离散相零方程模型。采用滑移网格模型对叶轮与蜗壳动静干涉进行数值模拟,将叶轮区域设置为滑移网格坐标系,进水段区域和蜗壳区域设置为静止坐标系。代数方程迭代计算采取亚松驰,设定收敛精度为 10^{-5} 。

1.1.5 边界条件

计算域的进口采用总压进口条件,并假定进口处颗粒体积分数均匀分布;出口采用总质量流量速率条件;全流道内与液体相接触的壁面,对于流体相采用无滑移壁面条件,对于固体颗粒相采用自由滑移壁面条件,壁面附近采用标准壁面函数,壁面粗糙度设为 $10 \mu\text{m}$;近壁面处选用标准壁面函数,壁面边界条件设为绝热无滑移壁面;气泡平均直径设为 $2 \times 10^{-6} \text{ m}$,进口处水的体积分数设为 1,气泡的体

积分数设为零。

2 计算结果与分析

以固体颗粒直径为 0.1 mm ,固体颗粒含量容积分别为 10%、20% 和 30% 为例分析了在不同空化工况下离心泵叶轮流道内流场内部变化规律。运用 CFD 软件对结果进行了必要的后处理,获得了所需要的计算结果。

2.1 不同固体颗粒含量对空化的影响

清水工况下空化的基本方程为:

$$NPSH_a = \frac{p_c - p_v}{\rho g} - h_g - h_c \quad (1)$$

$$NPSH_r = \frac{v_0}{2g} + \lambda \frac{\omega_0}{2g} \quad (2)$$

式中: $NPSH_a$ —装置空化余量; p_c —进口压力, kPa ; p_v —汽化压力, Pa ; h_g —液面到泵进口的高度, m ; h_c —液面到进口的管路损失; $NPSH_r$ —必须空化余量; v_0 —进口绝对速度, m/s ; ω_0 —进口相对速度, m/s ; λ —叶片进口扰流系数。

固液两相的伯努利方程为:

$$(1 - C_g) \frac{P_1}{\rho_m g} + \frac{v_{m1}^2}{2g} + z_1 = (1 - C_g) \frac{P_2}{\rho_m g} + \frac{v_{m2}^2}{2g} + z_2 + \Delta h_m \quad (3)$$

将式(3)带入式(1) - 式(2)中得到固液两相的空化基本方程为:

$$NPSH_a = (1 - C_g) \frac{P_c - P_v}{\rho g} - h_g - h_c \quad (4)$$

$$NPSH_r = \frac{v_0}{2g} + \lambda \frac{\omega_0}{2g} \quad (5)$$

式中: C_g —固液两相流中固体颗粒体积分数; ρ_m —固液两相流的密度, kg/m^3 ; v_m —固液两相流动速度,

m/s ; Δh_m —单位质量的固液两相混合物在两断面间的能量损失。

由此可知: 在密度不变情况下, 装置空化余量 $NPSH_a$ 随着固体颗粒含量的增加而降低, 而必须空化余量 $NPSH_r$ 仅与流量有关, 与固体颗粒含量无关。故随着固体颗粒含量的增加, 泵的空化越严重, 因而汽体体积分数随着固体颗粒含量的增加而增大。为直观地了解离心泵内固体颗粒含量对空化时汽泡的分布及发展变化的影响情况, 图 2 给出了不同固体颗粒含量时, 同一空化余量下汽泡的分布情况。

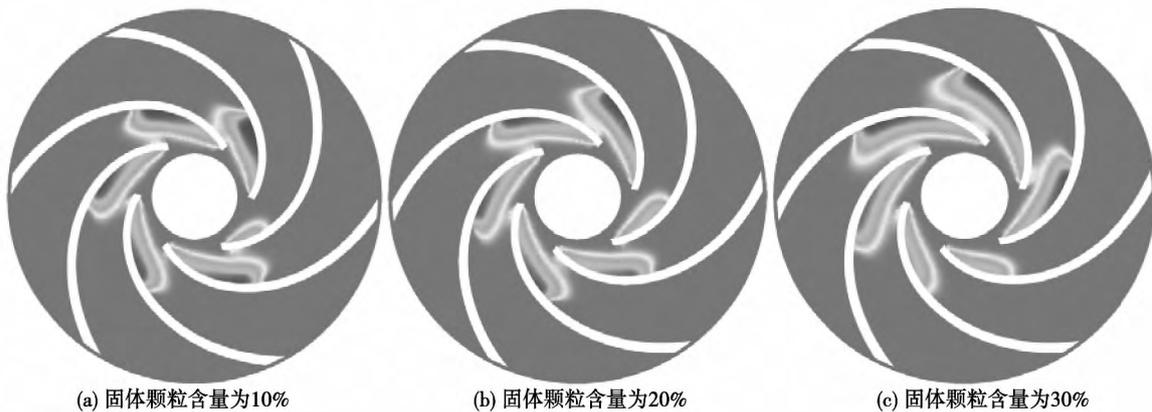


图 2 叶轮流道内液相体积分数分布

Fig. 2 Distribution of the liquid phase volumetric fraction inside the flow passage of the impeller

2.2 不同固体颗粒含量的空化对流动轨迹的影响

图 3 为不同固体颗粒含量时, 发生空化时叶轮内部流动轨迹, 从图中可以看出, 在相同进口压力工况下, 不同的固体颗粒含量对叶轮内部的流动轨迹及速度变化影响比较大: (1) 对漩涡的位置影响。当固体颗粒含量在 10% 时, 产生的漩涡比较靠近叶片的中间位置, 而随着固体颗粒含量的增加, 漩涡开始向出口方向移动, 当固体颗粒含量为 30% 时, 漩涡基本上已经接近叶轮出口处。(2) 对漩涡数量的影响。固体颗粒含量为 10% 时, 叶轮流道内有一大一小两个漩涡及一个初生漩涡, 当固体颗粒含量增加到 20% 时, 叶轮流道内增加了一个初生漩涡, 而当固体颗粒含量为 30% 时, 出现两大一小 3 个漩涡。(3) 对速度变化的影响。当固体颗粒含量为 10% 时, 叶轮流道内的速度变化规律比较均匀, 仅在叶轮进口处的速度变化比较大; 随着固体颗粒含量的增加及叶轮流道内漩涡的变化, 叶轮流道内的速度出现明显的不规律变化。

2.3 不同固体颗粒含量空化对固体体积分数的影响

为进一步揭示离心泵在不同固体颗粒含量发生空化时的内部流动特征, 对比分析不同固体颗粒含量、不同进口压力下离心泵内部的固体体积分数的变化规律, 如图 4 所示。从图中总体可以看出, 不同固体颗粒含量及不同空化工况均对叶轮流道内的固体体积分数的分布产生影响: 在相同空化工况下, 固体体积分数总体上是随着固体颗粒含量的增加而增大, 但受空化的影响, 具体位置上的固体体积分数会减小; 在固体颗粒含量不变的情况下, 叶轮流道内的固体体积分数随着空化的发展而逐渐减小, 在进口压力为 0.35 kPa 时, 固体体积分数受到空化的影响出现下降, 从图 4 中就可以看出, 每个流道内的固体体积分数下降趋势呈非线性, 造成非线性变化现象的原因是由于空化非线性变化规律产生而引起的。随着固体颗粒含量的增加, 流道内固体体积分数的变化梯度相应增加, 可进一步验证固体颗粒含量对空化的影响及反过来对固体体积分数的影响。

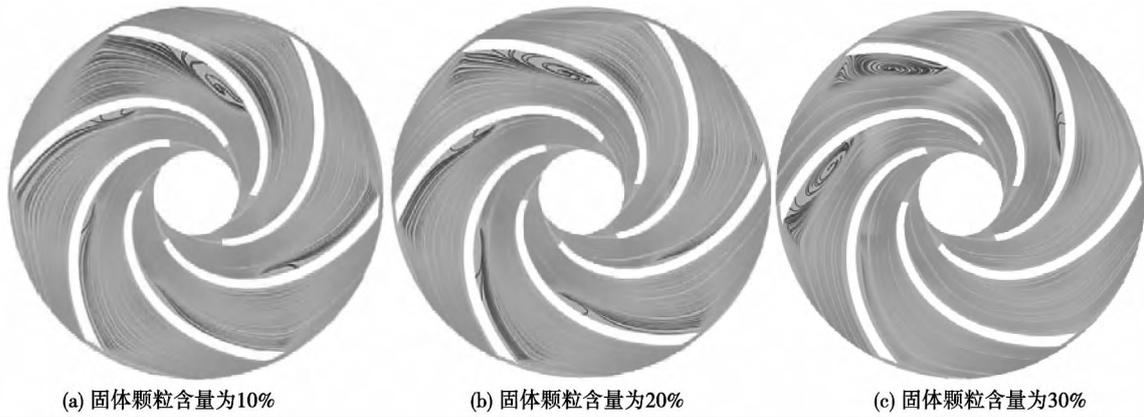


图 3 流动轨迹

Fig. 3 Flow trajectory

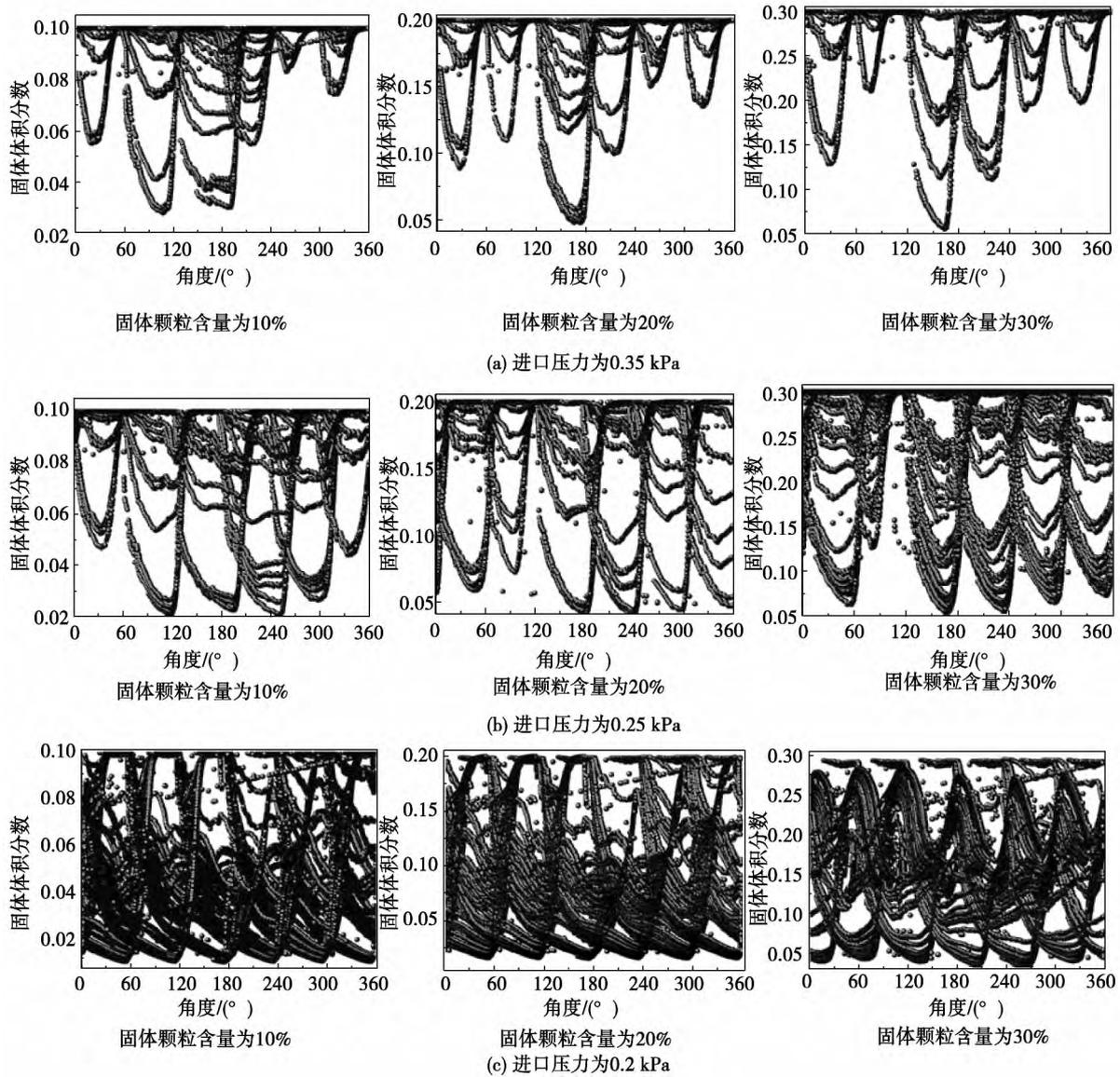


图 4 不同压力工况下固体体积分数分布

Fig. 4 Distribution of the solid volume fraction at various pressures

在进口压力为 0.25 kPa 时,从图 4 中可以看出:不同固体颗粒含量对叶轮流道内的汽体体积分数的影响也是比较明显的,尤其是固体颗粒含量为 30% 时的固体体积分数的变化规律非常明显。当进口压力为 0.2 kPa 时,固体颗粒含量为 10% 和 20% 时,固体体积分数在 360° 上的分布主要集中在固体颗粒含量的 10% - 60% 之间,而固体颗粒含量在 30% 时,固体体积分数主要集中在 30% - 90% 之间,其差别还是比较大的。造成这种现象的原因主要是由于空化。

3 试验结果及分析

按 GB/T3216—2005 《回转动力泵水力性能验收试验 1 级和 2 级》在 2 级精度闭式试验台上对不同固体颗粒含量的离心泵样机进行空化试验,试验用泵如图 5 所示。空化试验时,保持流量不变,通过调节进口水封阀来增加进口阻力,逐渐降低泵入口压力,改变 $NPSH$ 值直至扬程降低量达 3%,此时的 $NPSH$ 即为临界空化余量。计算结果及试验结果如图 6 所示,从图中可以看出,清水空化试验所得的性能曲线与数值计算结果的变化趋势相同,误差在 3% 范围内。



图 5 试验用泵

Fig. 5 Pump under the test

对比图 6 中不同固体颗粒含量对空化性能曲线的影响可知,随着固体颗粒含量的增加对空化的影响也随之增大,其中固体颗粒含量为 10% 与 20% 的变化规律相似且差异不大,但固体颗粒含量为 30% 与前两者的变化差异比较大,这也进一步验证了前面的分析结果。

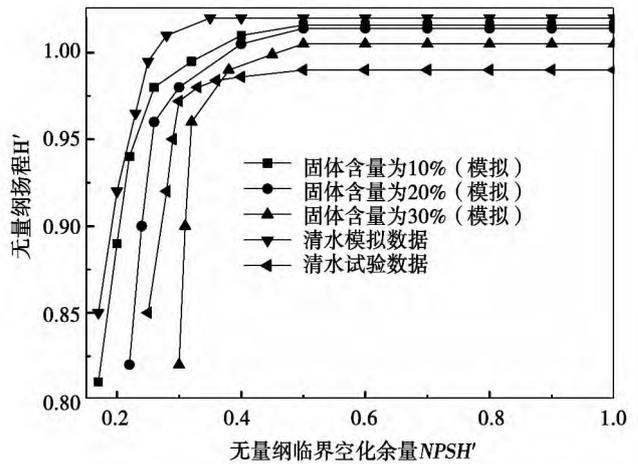


图 6 空化性能曲线

Fig. 6 Cavitation performance curves

4 结 论

- (1) 固体颗粒含量对空化的影响比较大,空化随着固体颗粒含量的增加而严重。
- (2) 在相同进口压力工况下,不同的固体颗粒含量对离心泵叶轮内部空化所产生漩涡的位置、漩涡数量及速度变化等因素的影响较大。
- (3) 在相同空化工况下,固体体积分数总体上是随固体颗粒含量的增加而增大,但受空化的影响在一些区域内的固体体积分数会减小。
- (4) 在固体颗粒含量不变的情况下,叶轮流道内的固体体积分数随着空化的发展而逐渐减小,由于空化非线性变化规律产生而引起叶轮流道内固体体积分数呈现非线性规律变化。
- (5) 通过试验验证得知,通过数值模拟所得的数据与试验所得数据误差不大,因此,建立的数值模型和是可信的。

参考文献:

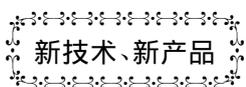
[1] 铁占续,黄建德.含沙水汽蚀对离心泵损伤的试验研究[J].化工设备与管道,2000,37(3):42-44.
TIE Zhen-xu, HUANG Jian-de. Experimental study of the damage of sand-contained water cavitation to a centrifugal pump [J]. Chemical Industry Equipment and Pipelines, 2000, 37(3): 42-44.

[2] Dungan P J. Cavitation enhancement of silt Erosion Numerical studies [J]. Wear, 2010, 268(7/8): 946-954.

[3] Borkenk B M, Arora M, Ohl C D, et al. The acceleration of solid particles subjected to cavitation nucleation [J]. Journal Fluid Mechanics, 2008, 610: 157-182.

- [4] Dular M, Stoffel B, Sirok B. Development of a cavitation erosion model [J]. *Wear* 2006, 56(261): 642 - 655.
- [5] 张涛, 陈次昌, 吕东莉, 等. 含沙水流中空化促进磨损破坏机理 [J]. *排灌机械工程学报* 2011, 29(4): 297 - 302.
ZHANG Tao, CHEN Ci-chang, LU Dong-li, et al. Mechanism governing the wear and destruction accelerated by cavitation formed in the center of a sand-contained water flow [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2011, 29(4): 297 - 302.
- [6] 潘中永, 倪永燕, 李红, 等. 离心泵汽蚀特性分析 [J]. *排灌机械*. 2008, 26(4): 35 - 39.
PAN Zhong-yong, NI Yong-yan, LI Hong, et al. Analysis of the cavitation characteristics of a centrifugal pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery* 2008, 26(4): 35 - 39.
- [7] 高传昌, 张长富, 周兵. 离心泵汽蚀特性与调节工况的理论研究 [J]. *流体机械* 2001, 29(5): 16 - 19.
GAO Chuan-chang, ZHANG Chang-fu, ZHOU Bing. Theoretical study of the cavitation characteristics and operating condition regulation of a centrifugal pump [J]. *Fluid Machinery* 2001, 29(5): 16 - 19.
- [8] 刘宜, 张文军, 杜杰. 离心泵内部空化流动的数值预测 [J]. *排灌机械* 2008, 26(3): 19 - 21, 29.
LIU Yi, ZHANG Wen-jun, DU Jie. Numerical prediction of the cavitation flow inside a centrifugal pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery* 2008, 26(3): 19 - 21, 29.
- [9] 郭晓梅, 朱祖超, 崔宝玲, 等. 诱导轮内流场数值计算及汽蚀特性分析 [J]. *机械工程学报* 2010, 46(4): 122 - 128.
GUO Xiao-mei, ZHU Zu-chao, CUI Bao-ling, et al. Numerical calculation of the flow field inside an induction wheel and analysis of its cavitation characteristics [J]. *Journal of Mechanical Engineering* 2010, 46(4): 122 - 128.
- [10] 崔宝玲, 万忠, 朱祖超, 等. 具有诱导轮的高速离心泵汽蚀特性试验 [J]. *农业机械学报* 2010, 41(3): 96 - 99.
CUI Bao-ling, WAN Zhong, ZHU Zu-chao, et al. Experiment of the cavitation characteristics of a high-speed centrifugal pump installed with an induction wheel [J]. *Journal of Agricultural Machinery* 2010, 41(3): 96 - 99.
- [11] 宋宇, 曹树良. 考虑不可凝结气体的空化流模型及数值模拟 [J]. *排灌机械工程学报* 2012, 30(1): 1 - 5.
SONG Yu, CAO Shu-liang. Cavitation flow model with the non-condensable gases being considered and its numerical simulation [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(1): 1 - 5.
- [12] 韩伟, 董志勇, 俞小伟, 等. 掺气条件下空化特性的高速摄影分析 [J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2010, 25(3): 352 - 358.
HAN Wei, DONG Zhi-yong, YU Xiao-wei, et al. High-speed camera shooting analysis of the cavitation characteristics under the condition of mixing-dilution with gases [J]. *Hydrodynamic Research and Advances* 2010, 25(3): 352 - 358.
- [13] 杨娟丽, 王钧, 常近时. 万家寨水电站水中含沙对空化压力的影响 [J]. *水利水电技术* 2005, 36(5): 64 - 67.
YANG Juan-li, WANG Jun, CHANG Jin-shi. Effect of sand-contained water on the cavitation pressure in Wanjiashai Hydropower Station [J]. *Water Conservation and Hydropower Technology*, 2005, 36(5): 64 - 67.
- [14] 常近时, 李连超. 自来水厂含氯水对供水泵空化特性的影响 [J]. *中国农业大学学报* 2002, 7(2): 94 - 98.
CHANG Jin-shi, LI Lian-chao. Influence of chlorine-contained water on the cavitation characteristics of a water supply pump in a running water plant [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2002, 7(2): 94 - 98.

(孙显辉 编辑)



新技术、新产品

三菱重工升级 50 Hz M701F/J 系列燃气轮机

据《Gas Turbine World》2013 年年度手册报道,三菱重工将最新高效燃气轮机设计技术融入超大型燃气轮机生产线。

升级和改进了输出功率接近 360 MW 的 M701F5 和额定输出功率为 470 MW 的简单循环 M701J 高温燃气轮机,两型机组都用于 50 Hz 发电。

两型燃气轮机的基本设计和结构十分类似:单轴转子、轴向排气、冷端驱动、双轴承转子支承、多管环形燃烧室、4 级涡轮和水平中分面机匣。

先进技术的“J”型燃气轮机涡轮喷嘴入口温度高达 1 600 ℃。简单循环 ISO 基本负荷下额定输出功率为 470 MW,效率为 41%。

(下转第 212 页)

ters such as the diameter in the cross section of the spherical boss ($D = 5 \text{ mm}$, 6 mm and 7 mm) and arrangement spacing ($S = 10 \text{ mm}$, 15 mm and 20 mm) the fouling quantity in a unit area of the test piece can be obtained, thus the anti-fouling rate can be calculated and then curves showing the variation law governing the weight added in a unit area and anti-fouling rate of the test piece with time can be plotted respectively. The research results show that as compared with those of a flat plate, the weight added in a unit area of the test piece with spherical dents/bosses and its foul growth asymptotic value will obviously go down. When the influence of the arrangement spacing on the foul weight is being observed separately, the arrangement spacing of 15 mm is deemed as the optimum arrangement spacing in the range of the test, at which the foul weight in a unit area of the test piece is minimum, thus attaining an optimum anti-fouling effectiveness. If the diameter in the section of the spherical boss changes, the foul weight in a unit area of the test piece will assume a tendency of first decrease and then increase with an increase of the diameter above mentioned. In the range of the test, the anti-fouling effectiveness is considered as the best when the diameter of the spherical boss is 6 mm . As a result, the spherical vortex generator with a combined structure of spherical dents/bosses can be regarded as an effective element for resisting and prohibiting the foul and has a good prospect for applications. **Key words:** spherical dent/boss, crystallization foul, direct weighing, anti-fouling rate

基于传热理论的疏水阀门内漏量计算方法 = **Method for Calculating the Inner Leakage Flow Rate of a Steam Trap Based on the Heat Transfer Theory** [刊, 汉] LIU Yang, LI Lu-ping (College of Energy Source and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, Post Code: 410014), KONG Hua-shan, DENG You-cheng (Hunan Hongyuan High Pressure Valve Co. Ltd., Zhuzhou, China, Post Code: 412100) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(2). - 196 - 201

Based on the heat transfer theory, through programming and operating by using the software Matlab, the authors obtained the data of the characteristic parameters of a valve under various leakage flow rates, i. e. tube wall temperature before the valve. By making use of the least square method, the data of the tube wall temperature before the valve were analyzed and processed with the law governing changes of the tube wall temperature before the valve with the leakage flow rate, tube diameter and length. Finally, a quantitative correlation formula was obtained by performing a fitting of the tube wall temperature and the leakage flow rate. The test data from the literature [4] was used to verify the calculation results. The fitting formula can be employed to diagnose any fault of a steam trap. **Key words:** valve, leakage flow rate, tube wall temperature, least square method

固体颗粒含量对离心泵空化特性影响分析 = **Analysis of the Influence of the Solid Particle Content on the Cavitation Characteristics of a Centrifugal Pump** [刊, 汉] WANG Xiu-li, ZHU Rong-sheng, FU Qiang (Re-

search Center for Fluid Machinery Engineering Technologies ,Zhenjiang ,China ,Post Code: 212013) ,ZHANG Jun-jie (Xinjie Pump Industry Group Co. Ltd. ,Taizhou ,China ,Post Code: 317525) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 ,29(2) . -202 -207

To study the influence of the solid particle content of the working medium conveyed by a centrifugal pump on its cavitation characteristics ,a method combining the numerical calculation and a comparison with the test results was used to perform a study in depth. It has been found that the solid particle content has a relatively big influence on the cavitation characteristics and the cavitation will be worsened with an increase of the solid particle content. Under the operating conditions having a constant pressure at the inlet ,the solid particle content has a relatively big influence on such factors as changes in the flow trajectory and speed of the vacuoles etc. inside the impeller. Under the operating conditions having a same degree of cavitation ,the solid volumetric fraction will increase with an increase of the solid particle content but will decrease in some areas affected by the cavitation. The solid volumetric fraction in the flow passages of the impeller will assume a nonlinear variation law as a result of the same variation law of the cavitation. **Key words:** centrifugal pump ,solid and liquid two-phase ,numerical simulation ,test

循环流化床中糠醛渣与煤混燃特性的试验研究 = **Experimental Study of the Blended Combustion Characteristics of Furfural Residue and Coal in a Circulating Fluidized Bed** [刊 ,汉] PAN Zhi ,LU Xiao-feng ,MEI Lin ,WANG Quan-hai(Education Ministry Key Laboratory on Low-grade Energy Source Utilization Technologies and Systems ,Chongqing University ,Chongqing ,China ,Post Code: 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 ,29(2) . -208 -212

On a circulating fluidized bed test stand with the dimensions of its furnace being 150 mm x 150 mm x 2 500 mm ,a blended combustion experiment was conducted of furfural residue and coal to study the combustion characteristics and flying ash and flue gas emissions characteristics in the tail portion. It has been found that all the coal fuels mixed and diluted with furfural residue in a mass proportion from 10% to 50% can produce stable combustion in the circulating fluidized bed. With an increase of the mixing-dilution proportion of furfural residue ,the temperature at the top of the furnace will increase and the carbon content of flying ash in the tail portion will decline while the particle emissions concentration will increase. With an increase of the fluidized air speed ,the temperature at the top of the furnace will increase. The temperature in the dense phase zone will increase ,the CO emissions concentration will decline and SO₂ and NO_x emissions concentration will increase. With an increase of the mixing-dilution proportion of furfural residue ,the CO emissions concentration will increase and SO₂ and NO_x emissions concentration will decrease. **Key words:** circulating fluidized bed ,furfural residue ,coal ,blended combustion