

换能器半径对超声波除垢性能的影响

傅俊萍, 石沛, 曾照彬, 何叶从

(长沙理工大学 能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为研究换能器半径对除垢范围和除垢效率的影响, 推导出了适用于超声波换能器的非点声源声场分布函数和声强公式, 并进行实验与 MATLAB(矩阵实验室)仿真模拟。结果表明: 超声波声场分布将影响除垢范围, 声强大小决定除垢效率; 换能器中心垂直方向处的声强最大, 除垢效率最高, 随着角度向两边发散, 声强减弱, 除垢效率逐渐降低; 换能器半径越小, 声场分布越大, 除垢范围越大, 随着换能器半径的增大, 有效除垢范围逐渐向换能器中心垂直方向集中; 换能器半径为 50 mm 时, 换能器中心垂直方向处的除垢效率最高, 达 95.56%。

关键词: 超声波; 除垢; 换能器; 半径

中图分类号: TK124 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.04.002

引言

目前, 以水作为工艺流体的热交换器大都存在着结垢问题, 水垢的形成不仅影响换热效果, 还增大了设备运行成本, 造成了能源的浪费^[1~3]。

超声波除垢技术利用超声波的高频机械振动和超声空化作用达到除垢的效果, 因其具有成本低、除垢效率高、维护简单、自动化程度高以及无污染等优点, 从而被广泛应用于石油、化工、电力、暖通等行业^[4~8]。目前, 学者们对影响超声波除垢性能的因素做了大量的研究: 傅俊萍等通过实验研究了超声波功率对除垢及强化传热的影响^[9], 发现超声波功率超过 200 W 以上时有除垢效果, 在 300 W 时传热效果最佳; 余涛等通过实验发现适当提高超声波频率、功率及反应体系温度有利于提高除垢效率^[10]; 皇磊落等采用循环水模拟装置^[11], 研究了超声波功率、流体温度及流速对超声除垢效果的影响, 发现超声波功率及流速越大, 除垢效果越好, 水溶液的最佳

除垢温度约为 60 °C。Kim W 等研究了超声波声压振幅等对超声波清洗效果的影响^[12]; Niemczewski B 等通过研究发现水温影响超声波空化强度^[13], 从而影响超声波除垢效果; 赵阳等通过实验发现水温度及水硬度对超声波的阻垢性能有影响^[14]; 张艾萍等对除垢超声波的传播机理进行了理论研究^[15], 认为超声波衰减的主要原因是液体的黏滞性; 王巧真等通过建立数学模型^[16], 证明了超声波可用于换热器的防除垢和强化换热。但目前针对换能器半径对除垢性能影响的研究却很少。

本研究首先通过实验方法研究了换能器半径对超声波除垢性能的影响, 并在点声源的基础上, 利用贝塞尔函数的性质, 推导出了非点声源的声场分布函数和声强公式, 并通过 MATLAB 仿真模拟作了进一步的机理分析。

1 实验研究

1.1 实验内容及装置

水垢的形成机理: 当水流速较低或相对静止时, 在其热交换过程中, 一方面水中的一些钙镁盐类受热分解, 从溶于水的物质转变成难溶于水的物质形成水垢; 另一方面一些盐类溶解度达到过饱和, 在换热器内壁上析出固相结成水垢; 此外, 水中原溶解度较大的盐类与其它盐类、碱发生化学反应, 生成难溶于水的化合物, 从而也可形成水垢。

本实验目的在于研究换能器半径对超声波除垢范围和除垢效率的影响, 为模拟结垢环境, 本实验采用无水氯化钙和碳酸钠配置结垢溶液, 并利用温控系统将溶液温度控制在 50 °C。实验装置如图 1 所

收稿日期: 2015-03-30; 修订日期: 2015-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51406015); 湖南省科技厅基金资助项目(2013NK3003)

作者简介: 傅俊萍(1961-), 女, 湖北武汉人, 长沙理工大学教授。

通讯作者: 石沛(1991-), 男, 长沙理工大学硕士研究生, E-mail: 981016845@qq.com。

示,包括超声波除垢装置、温度控制系统、结垢试件及结垢溶液等部分,超声波除垢装置由超声波发生器和超声波换能器组成,超声波发生器将电能转换成与超声波换能器相匹配的高频交流电信号,超声波换能器将来自发生器的电信号转化为同频率的机械振动,产生超声波。

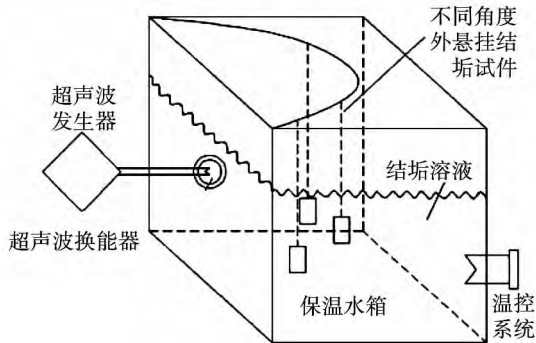


图 1 超声波除垢实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of ultrasonic descaling

实验采用的超声波发生器频率可控制在 20 ~ 40 kHz 范围内,精度为 0.1 kHz,额定功率为 1 500 W。保温水箱采用 500 mm × 500 mm × 500 mm 的不锈钢水箱,超声波换能器采用专用胶粘剂粘在水箱侧面中心处。保温水箱上放置支撑铁网,以换能器所在面的上边中点为圆心,在支撑铁网上画出一个直径为 500 mm 的半圆,从 -90°到 90°每隔 15°画一条线与半圆相交,在得到的 13 个相交点处悬挂结垢铜片,如图 2 所示。

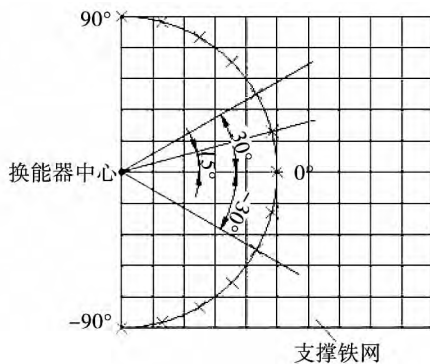


图 2 结垢试件悬挂位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hanging positions of scaling specimen

1.2 实验结果及分析

超声波在液体介质中传播时,液体某个区域会

形成负压,此时液体中将产生大量空穴和气泡。这些空穴或气泡由于压力的急剧变化会迅速膨胀,突然破裂时将会产生局部短时高温高压,并伴随产生激波,这种现象即为超声波的空化效应。超声波空化作用产生的能量不仅能成垢杂质被粉碎而悬浮在液体之中;还可促进水分子裂解析出 OH⁻离子,在溶液中形成大量的小沉淀颗粒,消除了溶液的过饱和度,从而缓解固体表面的成垢压力。

实验选择超声波频率为 28 kHz,对换能器半径分别为 15、30、40、50 mm 时的除垢范围和除垢效率进行实验。超声波除垢效率用抑垢率来表示,抑垢率越大,除垢效果越好。除垢范围则通过辐射角度来体现,辐射角度越大,除垢范围越广。实验结果如图 3 所示。

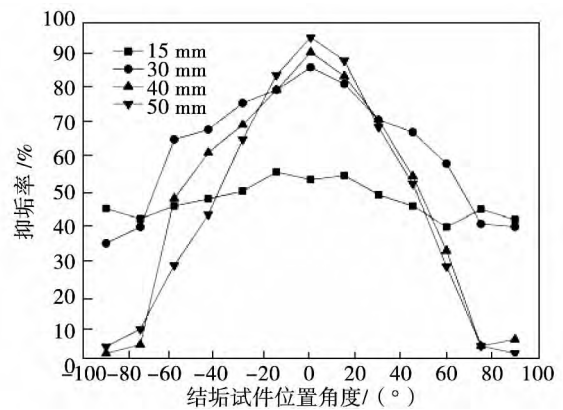


图 3 不同半径换能器作用下的抑垢率曲线

Fig. 3 Descaling rates with transducers of different radii

从图 3 可知,换能器半径为 15 mm 时,各角度抑垢率均在 40% ~ 50% 之间,除垢效率均匀,除垢范围最大,但除垢效果不理想。对于半径为 30、40、50 mm 的换能器,抑垢率大于 70% 的区域集中在 -30° ~ 30° 之间,在这一区域,除垢效率较高,半径为 50 mm 时,除垢效率最大可达 95.56%。此时除垢效率已基本达到饱和,而在其它角度区域,除垢效率则下降很快,40、50 mm 半径的换能器在 75° ~ 90° 区域的抑垢率只有 2% ~ 6%,这一区域处于结垢件的角落,超声波声强几乎为零,形成了除垢死角。

2 MATLAB 仿真模拟

2.1 非点声源声场分布函数及声强公式

点声源的声源尺寸半径远远小于声波波长,而

本研究中的声源为超声波换能器,其声波波长与换能器半径相差不大,不满足点声源的条件,因此,这就需要对非点声源的声场分布函数和声强公式进行研究。

非点声源超声波换能器声场模型如图 4 所示,超声波换能器的半径为 R ,将圆面微分为无限个小面元,每一份小面元 ds 都可以看做是点声源, φ 是 ds 与 X 轴的夹角, P 为远场观测点,其与换能器中心 O 的距离为 r , θ 为矢量 \vec{r} 与 z 轴的夹角, P 到 ds 的距离为 h 。

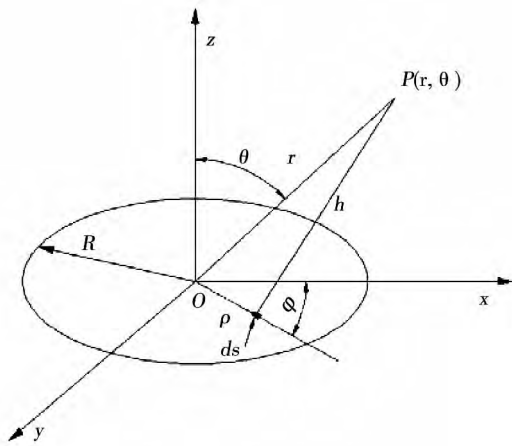


图 4 超声波换能器声场模型图

Fig. 4 Sound field model of ultrasonic transducer

则位移直径为 ρ 极角为 φ 处的 ds 面元在观察点 P 产生的声压表达式为:

$$dp = j \frac{k\rho_0 c_0}{2\pi h} u_a ds e^{j(\omega t - kh)} \quad (1)$$

式中: k —波数, $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$, λ —波长; ρ_0 —媒质的密度, kg/m^3 ; c_0 —波速, m/s ; u_a —振源的振幅, m 。

利用数学积分原理,将所有的面元辐射的声波叠加起来,可以得到整个换能器面的辐射声压,

$$P = \iint dp = \iint_s \frac{k\rho_0 c_0}{2\pi h} u_a e^{j(\omega t - kh)} ds \quad (2)$$

式中: $ds = \rho d\rho d\varphi$; 对于 $r \gg R$ 的区域,式(2)中振幅部分的 h 可近似用换能器中心到观察点的距离 r 来代替,而位相部分,则 h 可表示为 ρ 和 φ 的函数,

$$h \approx r - \rho \cos(\vec{\rho} \wedge \vec{r}) = r - \rho \sin\theta \cos\varphi \quad (3)$$

带入式(2)进行积分,得:

$$P = j \frac{w\rho_0 u_a}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \int_0^R \rho d\rho \int_0^{2\pi} e^{jk\rho \sin\theta \cos\varphi} d\varphi \quad (4)$$

由于采用 MATLAB 软件模拟时可直接调用贝塞尔函数库,为节省计算时间,故可利用贝塞尔函数的性质对式(4)进行简化,结果如式(5)所示,

$$P = jw \frac{\rho_0 u_a R^2}{\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \frac{J_1(kR \sin\theta)}{kR \sin\theta} \quad (5)$$

超声波的声场分布指的是超声波在媒介中的传播和分布范围,一般用声源的指向性函数来表示。根据指向性函数性质,当 $x = 0$ 时, $J_1(x)/x = 1/2$,从而可得到半径为 R 的圆形超声波换能器的指向性函数,如式(6)所示,

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P}{P_{\theta=0}} = \left| 2 \frac{J_1(kR \sin\theta)}{kR \sin\theta} \right| \quad (6)$$

根据声强的定义,声强可以用单位时间内、单位面积的声波向前进方向毗邻的媒质所作的功来表示,其表达式为:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T \text{Re}(p) \text{Re}(v) dt \quad (7)$$

式中: Re —取函数实部; p —声压, Pa ; v —声音在介质中的传播速度, m/s 。

根据式(7),可求得声强为:

$$I = \frac{1}{8} \rho_0 c_0 u_a k^2 \frac{R^4}{r^2} \left[\frac{2J_1(kR \sin\theta)}{kR \sin\theta} \right]^2 \quad (8)$$

为便于计算,公式推导过程中,忽略了流体粘性、热传导吸收、空化阻力等的影响,式(6)和式(8)是在点声源的基础上求出的,因此,它们同时适用于非点声源和点声源。

2.2 不同半径换能器作用下,声场空间分布的仿真模拟

由式(6)可知,换能器半径 R 影响超声波的声场分布,本研究使用 MATLAB 软件进行编程,模拟不同半径换能器作用下的声场空间分布。

程序以超声波频率 $f = 28 \text{ kHz}$,工作环境为水,温度为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。根据声速计算经验公式,此时声速为 1615 m/s 。程序中半径的数值可以变动,分别对超声波换能器半径为 15 、 30 、 40 和 50 mm 4 种情况下的声场空间分布进行模拟,结果如图 5 所示,在不同辐射角 θ 处指向性函数 D 在 X 、 Y 、 Z 方向的分量满足: $X^2 + Y^2 + Z^2 = D^2$ 。辐射角 θ 是声波辐射方向与换能器垂直方向的夹角。

由图 5 可以看出,换能器半径为 15 mm 时,超声波的空间分布近似于半球体,此时分布范围最大,随着换能器半径的增大,超声波的声场空间分布范

围逐渐缩小, 当其半径为 50 mm 时, 空间分布范围最小, 近似于圆柱体。根据此规律可推知, 当换能器

半径足够大时, 超声波近似于直线传播, 此时只有中心区域分布有超声波, 其它区域是超声波空白区。

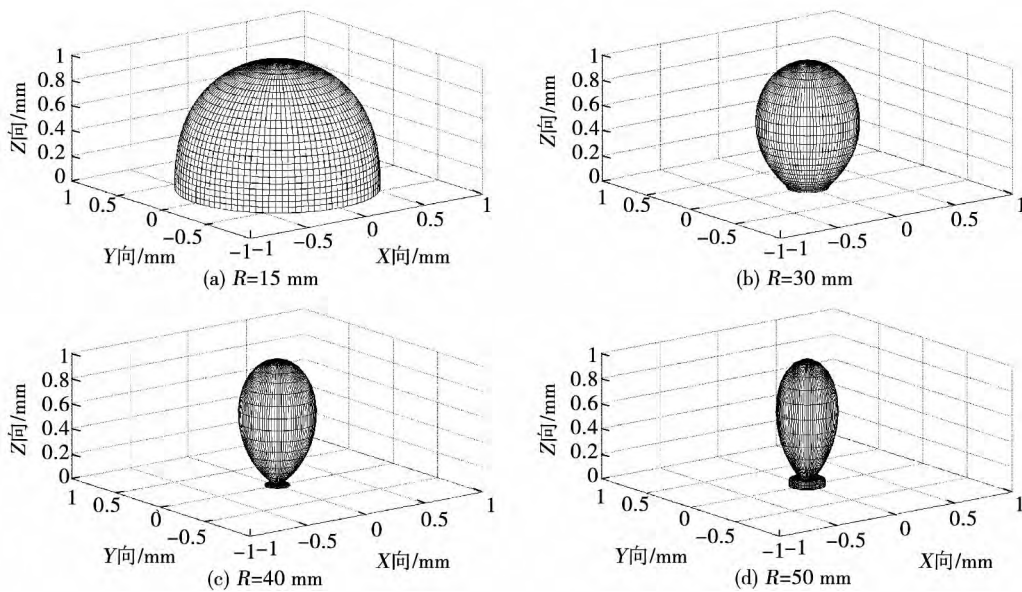


图 5 不同半径换能器作用下超声波的声场空间分布

Fig. 5 Space distributions of ultrasonic sound field using different transducer radii

为了将不同半径换能器在 XOZ 平面的声场分布与点声源进行对比, 本程序引入了点声源在 XOZ 平面的声场分布。如图 6 所示, 生成的是声场分布函数在 XOZ 平面上随不同偏角 θ 变化的二维图形, 角度 θ 为正表示辐射方向在 X 轴上方, 角度为负则表示在 X 轴下方。

从图 6 可以看出, 点声源的声场在不同角度 θ 处的指向性函数值都相同, 说明点声源声场没有指向性。不同半径的换能器均有明显的指向性, 而且半径越大, 指向性越明显。不同半径换能器发出的超声波声场分布随角度的变化有所不同, 但有一个共同点, 在 θ 为零度处, 指向性函数值最大, 且主声场在这个区域最集中。

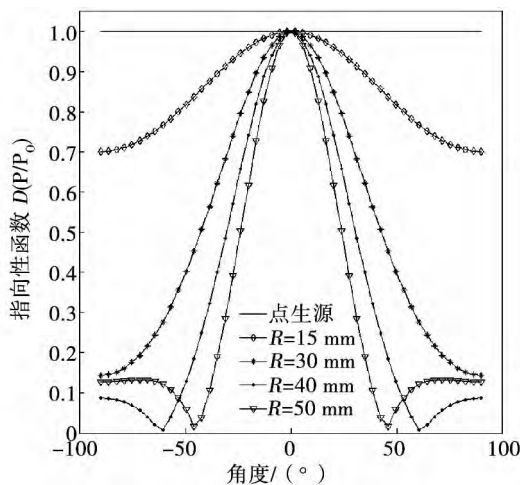


图 6 不同半径换能器作用下的声场分布随角度变化示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sound field distribution variation with angles using different transducer radii

2.3 不同半径换能器作用下, 超声波在不同角度处的声强仿真模拟

在式 (8) 中, 将角度 θ 、波数 k 及半径 R 以外的量视为恒量, 令 $K = \rho_0 c_0 u_a / 8r^2$, 则式 (8) 可表示为: $I/K = k^2 R^4 \left[\frac{2J_1(kR \sin\theta)}{(kR \sin\theta)} \right]^2$, K 为常数, 进而利用 MATLAB 软件编程, 模拟不同半径换能器作用下的超声波在不同角度处的声强情况。

程序取超声波频率为 28 kHz, 声速为 1 615 m/s, 换能器半径分别为 15、30、40 和 50 mm 时产生的超声波声强随角度的变化情况如图 7 所示。

图 7 中, 纵坐标为声强与常数 K 的比值, 可以看出声强在换能器中心垂直方向处最大。换能器半径为 15 mm 时, 声强随角度的变化影响不大, 各角度处声强均很小; 换能器半径为 50 mm 时, 换能器

中心处声强最大,随着角度向两边发散,声强均减小。声强的峰值随着换能器半径的增大而增大,这种增大集中在换能器圆心处。可以得出结论,换能器半径很小时,各角度处的声强变化不大,但值偏小;换能器半径增大,声强在各个角度处的值差异增大,声强峰值集中在换能器中心处,半径越大,声强峰值越大。

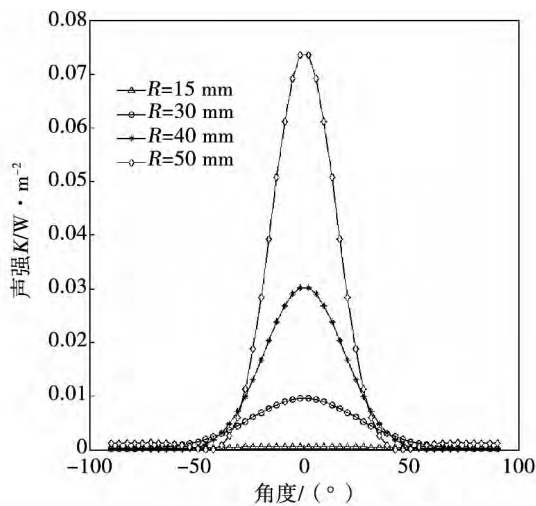


图7 不同半径换能器作用下超声波在不同角度处的声强

Fig.7 Intensities of ultrasonic sound at different angles using different transducer radii

对比前者实验结果与模拟得出的声场及声强分布图,可以发现,超声波声场分布越大,实验得出的除垢范围越大,超声波声强越大,实验得到的除垢效率越高,且声强峰值处的除垢效率最高。而不同半径换能器作用下的声强模拟得到的图形中,半径40与50 mm换能器中心处的声强相差很大,而实验数据中,半径40 mm中心处抑垢率为91%,50 mm中心处抑垢率为95.56%,两者相差却并不大,分析认为这可能与抑垢率达到饱和有关,当声强达到一定程度,再增大声强,对抑垢率的影响不大,甚至会影响到超声波的空化作用,产生大空化泡,形成声屏蔽,影响了超声波的传播。

3 结论

通过实验及 MATLAB 仿真模拟,得出以下结论:

(1) 超声波频率保持 28 kHz 不变, MATLAB 中

模拟得出的超声波声场分布和声强大小分别与实验得出的除垢范围和除垢效率呈正比;

(2) 换能器半径越小,声场分布范围越大,除垢范围越大,随着换能器半径的增大,有效除垢范围逐渐向换能器中心垂直方向集中;不同半径换能器声强峰值均出现在换能器中心垂直方向处,此处除垢效率最高,随着角度向两边发散,声强减弱,除垢效率逐渐降低;

(3) 当换能器半径为 50 mm 时,声场分布范围类似于半径为 50 mm 的圆柱体,声强峰值出现在换能器垂直方向处,此时的除垢效率最高,达 95.56%。

参考文献:

[1] 徐茂. 凝汽器阻垢除垢的意义及方法探讨[J]. 中国井矿盐, 2014, 45(1): 30-32.
 XU Mao. Brief discussion on the meaning and methods of scale removal and scale inhibition of condenser [J]. China Well and Rock Salt 2014, 45(1): 30-32.

[2] 朱永强. 换热器的超声波除垢技术[J]. 黑龙江科技信息, 2013(15): 142.
 ZHU Yong-qiang. Ultrasonic scale removal technology in the application of heat exchanger [J]. Heilongjiang Science and Technology Information 2013(15): 142.

[3] 徐志明, 张艾萍, 张仲彬, 等. 凝汽器超声波防除垢效果在线评价方法研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(7): 1201-1204.
 XU Zhi-ming, ZHANG Ai-ping, ZHANG Zhong-bin, et al. Research of In-line evaluation method about ultrasonic descaling effect for the condenser [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(7): 1201-1204.

[4] 张强, 孙昱东, 王雪, 等. 超声波技术在石油加工中的应用[J]. 石化技术与应用, 2013, 31(3): 235-239.
 ZHANG Qiang, SUN Yu-dong, WANG Xue. Application of ultrasonic technique in petroleum processing [J]. Petrochemical Technology & Application 2013, 31(3): 235-239.

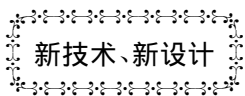
[5] Lima JF, Vilar EO. The use of ultrasound to reduce cathodic incrustation [J]. Ultrasonics Sonochemistry 2014, 21: 963-969.

[6] Bhasarkar J B, Chakma S, Moholkar V S. Investigations in physical mechanism of the oxidative desulfurization process assisted simultaneously by phase transfer agent and ultrasound [J]. Ultrasonics Sonochemistry 2015, 24: 98-106.

[7] 聂祐川, 聂日丛. 超声波防除垢技术在换热设备上的应用[J]. 氯碱工业, 2012(6): 34-38.
 NIE Hu-chuan, NIE Ri-cong. Application of ultrasonic antiscaling

- and descaling technology on heat exchange equipment [J]. Chlor-Alkali Industry 2012(6): 34-38.
- [8] 黄文周, 章颖欣, 吴金辉. 超声波防除垢技术在乙烯装置上的应用[J]. 乙烯工业 2013 25(2): 17-19.
HUANG Wen-zhou, ZHANG Yin-zhou, WU Jin-hui. Application of ultrasonic antifouling technology in ethylene plant [J]. Ethylene Industry 2013 25(2): 17-19.
- [9] 傅俊萍, 李录平, 刘泽利, 等. 超声波除垢与强化传热实验研究[J]. 热能动力工程 2006 21(4): 355-357.
FU Jun-ping, LI Lu-ping, LIU Ze-li et al. An experimental study of incrustation removal and intensified heat transfer by ultrasonic techniques [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2006 21(4): 355-357.
- [10] 余涛, 傅俊萍. 超声波在线防垢、除垢与强化传热的实验研究[J]. 湖南冶金职业技术学院学报 2005 5(3): 327-329.
YU Tao, FU Jun-ping. Experimental research on antiscaling, scale removal and enhancement of heat transfer of ultrasound [J]. Journal of Hunan Metallurgical Professional College 2005 5(3): 327-329.
- [11] 皇磊落, 张明铎, 牛勇, 等. 超声波参数对除垢效果的影响[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版) 2011, 39(1): 38-40.
HUANG Lei-luo, ZHANG Ming-duo, NIU Yong et al. Influence of ultrasonic parameters on the descaling effect [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition) 2011, 39(1): 38-40.
- [12] Kim W, Park K, Oh J. Visualization and minimization of disruptive bubble behavior in ultrasonic field [J]. Ultrasonic, 2010, (50): 798-802.
- [13] Niemczewski B. Observations of water cavitation intensity under practical ultrasonic cleaning conditions [J]. Ultrasonics Sonochemistry 2011, 14: 13-18.
- [14] 赵阳, 陈永昌, 孟陶, 等. 超声波阻垢性能的实验研究[J]. 工程热物理学报 2013 34(11): 2144-2146.
ZHAO Yang, CHEN Yong-chang, MENG Tao. Experimental study of ultrasonic antifouling performance [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2013 34(11): 2144-2146.
- [15] 张艾萍, 刘超, 徐志明, 等. 除垢超声波传播影响因素的理论研究[J]. 工程热物理学报 2012 33(3): 469-472.
ZHANG Ai-ping, LIU Chao, XU Zhi-ming et al. A theoretical research on the affective factors of the transmission of ultrasonic used in descaling [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012 33(3): 469-472.
- [16] 王巧真, 赵晓彤, 程金明, 等. 超声波抑垢强化换热实验研究[J]. 电力设备 2006 7(12): 38-40.
WANG Qiao-zhen, ZHAO Xiao-tong, CHENG Jin-ming et al. Experiment and research study on the scale inhibition and heat transfer enhancement of ultrasonic [J]. Electrical Equipment, 2006 7(12): 38-40.

(刘瑶 编辑)



新技术、新设计

Ansaldo Energia 关于“十月六日”电站循环转换的谅解备忘录

据《Gas Turbine World》2015年7~8月刊报道,意大利 Ansaldo Energia 已经与埃及电力股份公司签订“十月六日”电站从简单循环转换成联合循环的谅解备忘录。

通过增加4台余热锅炉、1台340 MW 额定功率的汽轮机和相关空气冷凝器,该公司的工作范围包括电站转换设计和总承施工。从合同签订之日起24个月内,将完成该电站的循环转换。

位于开罗市郊工业区的“十月六日”电站归属于开罗电力生产公司,同时又被政府电力机构—埃及电力股份公司拥有。

根据合同 SACE 已经支付给 Ansaldo Energia 2 亿 1 千万欧元(2 亿 3 千 3 百 5 拾万美元)的合同款。

(吉桂明 摘译)

基于熵值法的风电机组运行状态综合评价 = **Entropy-based Comprehensive Evaluation for the Operating Conditions of Large-Scale Wind Turbine** [刊, 汉] LI Da-zhong, XU Bing-kun, CHANG Cheng (North China Electric Power University, Baoding, Hebei, China, Post Code: 071000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(4). -1~5

In order to achieve the operation safety and economy of large-scale wind turbines, a comprehensive and accurate evaluation of the turbine operation is desired. In this paper, such an evaluation method was proposed based on entropy. By summarizing the status parameters that affect wind turbines through analytic hierarchy process (AHP) and introducing the intermediate indexes on the basis of positive and negative indexes of the traditional entropy method to calculate the entropy and the weighting factor for each subsystem, the unit operating status can be comprehensively evaluated based on the field data. Verification results show that the presented method can better track and evaluate the unit operating status, and can detect the potential problems timely, providing a reference for the operation safety and economy of large-scale wind turbines. **Key words:** large-scale wind turbines, entropy, operating status, comprehensive evaluation

换能器半径对超声波除垢性能的影响 = **Influence of Transducer Radius on Ultrasonic Descaling Performance** [刊, 汉] FU Jun-ping, SHI Pei, ZENG Zhao-bin, HE Ye-cong (College of Energy and Power Engineering under Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, Post Code: 410114) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(4). -6~11

To study the influences of ultrasound transducer radius on descaling scope and descaling efficiency, the sound field distribution function and sound intensity expression of non-point source applicable for ultrasonic transducer were derived, and both the experimental analysis and MATLAB simulation were conducted in this paper. The results show that the sound field distribution impacts descaling scope and the sound intensity determines descaling efficiency. In the vertical direction of ultrasound transducer center, the sound intensity is the strongest and descaling efficiency is the highest. With the angle diverging to both sides, the sound intensity weakens and the descaling efficiency decrea-

ses gradually. A smaller transducer radius results in a larger sound field distribution and descaling scope. As transducer radius increases ,the effective descaling scope gradually focuses on the area perpendicular to transducer center. When ultrasound transducer radius is 50mm ,the descaling efficiency at the area perpendicular to transducer ultrasound center reaches the maximum of 95.56% . **Key words:** ultrasonic ,descaling ,ultrasound transducer ,radius

节能量计算的第二定律方法及其应用 = **An Energy-saving Calculation Method Using the Second Law of Thermodynamics and its Applications** [刊 汉]ZHOU Shao-xiang ,KONG Wei-ying ,LIU Hao(School of Energy , Power and Mechanical Engineering ,North China Electric Power University ,Beijing ,China ,Post Code: 102206) , LIU Yu-me(Beijing Xing You Engineering Project Management Co. ,Ltd ,Beijing ,China ,Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(4) . -12 ~ 16

In view of the problems related to the energy conservation analysis using the first law of thermodynamics ,a general method of energy-saving calculation was deduced based on the second law of thermodynamics in this paper. It was demonstrated that the energy-saving is essentially proportional to the reduction of the total entropy production from the improved energy utilization system. Specifically for the thermal power unit ,the corresponding calculation model of the total entropy production was given. For an ultra-supercritical unit with constant fuel input ,the calculation formula of energy-saving through reusing the exhaust waste heat to heat the condensed water was deduced ,and it further showed that the reduction of the total entropy production of the unit is proportional to the reduction of the total heat loss. It implies that the energy-saving calculation based on the second law of thermodynamics can be made through comparing the overall thermal balances of the system before and after the energy-saving improvement is applied. Case analyses have verified the validity and the practicability of the method proposed. **Key words:** energy-saving ,entropy production ,waste heat utilization ,fuel specific consumption analysis

气固两相流中 90° 竖直弯管肋条防磨的数值试验研究 = **Numerical Simulation for Protecting 90° Vertical Elbows from Erosion in Gas-particle Flow by Adding Ribs** [刊 汉]GUO Ren-ning ,ZHAO Li-zhu ,MA Ye ,DU-AN Le-le (Liaoning Technology University ,Mechanical Engineering ,Fuxin ,Liaoning ,China ,Post Code: 123000) //