

# 蒸汽中液滴的粒径和体积浓度测量实验研究

袁安利 苏明旭 李永明 蔡小舒

(上海理工大学 颗粒与两相流测量研究所 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室 上海 200093)

**摘要:** 利用简化 ECAH 理论模型进行数值计算并获得超声衰减和蒸汽中液滴的体积浓度、粒径对应关系。基于超声波衰减测量方法,设计了使用中心频率分别为 22、40 和 200 kHz 的超声波测量蒸汽中液滴粒径和体积浓度的实验系统,开展了温度为 371.3 K 的蒸汽液滴粒径和体积浓度超声法测量实验,同时进行了相同温度下蒸汽的多波长消光法对比实验。结果表明:超声衰减法测得的液滴粒径和体积浓度与消光法测量值接近,平均索太尔径在 3-5 μm 之间,体积浓度相对测量误差小于 2%。

**关键词:** 超声衰减;消光法;粒径;体积浓度;气液两相流  
中图分类号: TB559; TK261 文献标识码: A  
DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2015.05.006

## 引言

湿蒸汽粒径和体积浓度的测量方法主要有热力学法、光学法、微波法、电容法和静电测量方法等<sup>[1-3]</sup>。光散射法在湿蒸汽测量方法中相对较成熟、应用最广,但某些情况下汽轮机末级或风洞中湿蒸汽浓度过高及现场恶劣环境易致光学窗镜污染、光信号严重削弱而无法正常工作,影响测量精度。超声衰减法具有可实时在线测量、传感器抗污染能力强且无需精确对中的优点,同时强的透射能力使其可用于高浓度测量。文献[4]开展了低频声音在水雾中声衰减的研究;文献[5]基于声速与蒸汽湿度理论关系,开展了相关的实验研究及应用;文献[6]基于超声法对汽轮机中水蒸气湿度进行检测,其原理为声波在气液两相混合物中的传播速度明显小于纯液相与纯气相中的速度;文献[7]对悬浊液中颗粒粒度和浓度的超声测量进行了理论和实验研究。

本研究将湿蒸汽假设为液态水滴与水蒸气构成的气液两相流,蒸汽发生器产生高温的蒸汽,利用超

声衰减法测量管道内蒸汽中液滴的粒径、体积浓度。同时,采用消光法测量蒸汽中液滴颗粒的粒径分布与体积浓度,并比较了两种方法的测量结果。

## 1 理论模型及数值计算

### 1.1 声学模型及简化

超声衰减法颗粒测量利用了超声波在颗粒两相流介质中传播时,声与颗粒相互作用产生的声吸收、耗散和散射带来的声衰减来测量颗粒的粒径与体积浓度。

在气液两相流中,超声波的传播可用 ECAH 模型描述<sup>[8-9]</sup>,其考虑了 4 种最重要的衰减机制(黏性、热耗散、声散射以及吸收效应),并能预测在透过气液两相流中颗粒介质后产生的声衰减。

颗粒两相系的复波数表达式为:

$$\kappa^2 = k_c^2 + \frac{24C_v}{jk_c D^3} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)A_n \quad (1)$$

式中:  $j$ —虚数单位;  $D$ —液滴颗粒直径;  $C_v$ —液滴颗粒体积浓度;  $k_c$ —连续介质中的波数;  $\kappa$ —两相流中的复波数,

$$\kappa = \omega/c_s(\omega) + j\alpha_s(\omega) \quad (2)$$

式中:  $\alpha_s$ 、 $c_s$ —与频率有关的声衰减系数和声速。由式(1)知,声衰减和声速的预测取决于散射系数  $A_n$ <sup>[10]</sup>,对于气体中低频超声,可按 McClements 的长波极限简化即主要考虑黏性和热耗散效应<sup>[11]</sup>,且只须考虑系数  $A_n$  的前两项,即:

$$A_0 = -\frac{ik_1 D}{6} \left[ \frac{(k_1 D)^2}{4} - (k_2 D)^2 \frac{\rho_1}{4\rho_2} \right] - \frac{i(k_1 D)^3(\gamma_1 - 1)}{8b_1^2} \left( 1 - \frac{\beta_2 C_{p1} \rho_1}{\beta_1 C_{p2} \rho_2} \right)^2 H \quad (3)$$

收稿日期: 2014-09-29; 修订日期: 2015-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176128); 上海市科委科研项目(13DZ2260900); 上海市教委项目(12ZZ142); 上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1301)

作者简介: 袁安利(1989-)男,江苏南通人,上海理工大学硕士研究生。

$$A_1 = \frac{i(k_1 D)^3 (\rho_2 - \rho_1) (1 + T + is)}{8(\rho_2 + \rho_1 T + i\rho_1 s)} \quad (4)$$

式中: 下标“1”表示连续相; 下标“2”表示离散颗粒相;  $\rho$ —密度  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\tau$ —导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\beta$ —热膨胀系数,  $\text{K}^{-1}$ ;  $C_p$ —定压比热;  $\gamma_1$ —比热比,  $\gamma_1 = (1 + T\beta_1^2 c_1^2 / C_{p1})$ ; 参数  $s, H$  的计算参见文献 [11]。

上述理论模型从物理上反映了超声波在气液两相流中的声波动特征, 并从数值上预测其声衰减系数, 作为粒径和体积浓度分析的理论基础。

### 1.2 数值计算

利用表 1 的物性参数(通过声学手册和水和水蒸汽热力性质国际工业标准 IAPWS - IF - 97 查得) 结合实验用换能器中心频率, 由简化 ECAH 模型计算频率为 22、40、60、100 和 200 kHz、不同体积浓度以及不同粒径大小下的气液两相流中的声衰减。

表 1 液态水、水蒸气的物性参数(371.3 K)

Tab.1 Physical parameters of liquid water and steam(371.3 K)

物性参数	液态水	水蒸气
密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	959.8	0.594
声速 $C/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1 544.8	471.3
声吸收系数 $\alpha_s/Np \cdot \text{m}^{-1}$	$6.95e^{-15}f^2$	$2.1e^{-12}f^2$
比热 $C_p/J \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	4 218	2 017
热导率 $\tau/\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	0.682	0.024 8
热膨胀系数 $\beta/\text{K}^{-1}$	$7.5 e^{-4}$	$2.328e^{-3}$
黏性系数 $\eta/\text{Pa} \cdot \text{s}$	-	$1.20e^{-5}$
剪切模量 $\mu/\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	$2.825e^{-4}$	-

图 1 给出蒸汽中液滴的体积浓度为 0.005% 时 5 种不同频率下声衰减随蒸汽中液滴粒径变化曲线, 可以看出, 粒径在 0.1 - 10  $\mu\text{m}$  区间时, 声衰减对颗粒粒径变化非常敏感, 数值变化超过 1 个数量级。粒径相同, 频率越高, 声衰减值越大。粒径不同则声衰减值亦会变化, 如测得蒸汽两相体系中多个频率下声衰减值, 将实验中多频率下的声衰减系数值进行相比, 代入声衰减 - 粒径的理论曲线, 根据两者的对应关系, 则可以获取液滴颗粒粒径平均值。本研究选择了 3 种不同频率开展实验, 此法较好地解决了测量结果的多值性, 提高了测量结果可靠性。此外, 由于颗粒粒径变化对于声衰减的影响较大, 实验中应根据可能的粒径范围和浓度, 考虑所用超声

波换能器频率、发射功率、接收增益和测量距离的选取。

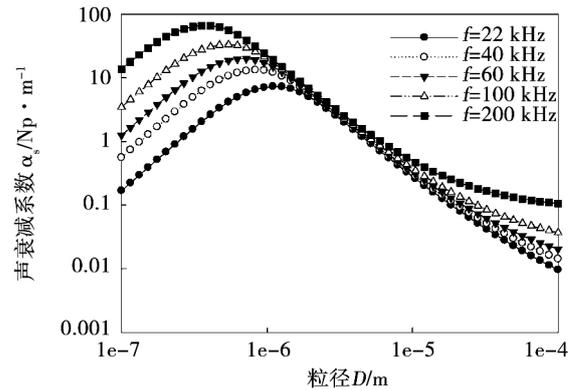


图 1 声衰减系数随蒸汽中液滴颗粒粒径变化曲线  
Fig. 1 The changing curve of acoustic attenuation coefficient varying by steam droplet particles size

图 2 给出了 5 种频率下超声衰减随体积浓度的变化, 体积浓度范围(0.000 1% - 0.04%) 覆盖了通常湿蒸汽工况, 声衰减系数随浓度呈线性递增, 不同频率下的声衰减值差异明显。值得注意的是, 即便在如此低的体积浓度下, 声衰减仍然明显, 这与气液两相间物性参数(如密度差较大) 有关, 这增加了信号敏感度, 但测量中需要选取合适的声频率和声程。

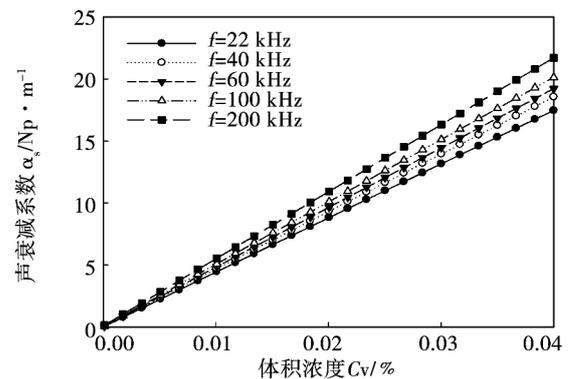


图 2 声衰减系数随蒸汽中液滴颗粒体积浓度变化曲线

Fig. 2 The changing curve of acoustic attenuation coefficient varying by steam droplet particles volume concentration

由于声衰减系数对于蒸汽液滴颗粒粒径以及体积浓度变化非常敏感, 因此可通过衰减值获得颗粒相信息, 又由于声衰减与液滴颗粒的浓度呈线性关

系 忽略复散射影响 通过多个频率下的声衰减测量值即可确定蒸汽中液滴粒径 再代入式(1)得液滴颗粒体积浓度。

### 1.3 消光法测量的基本原理

多波长消光法通过测量经过颗粒离散介质后的消光谱 并由此谱信息反演得到颗粒分布 其理论核心是 Lambert - Beer 定律 式(5) 即 Lambert - Beer 定律的一般表述形式。如图 3 所示 当一束强度为  $I_0$  的单色平行光通过含有均匀悬浮颗粒介质 由于颗粒对入射光的散射和吸收 出射光强  $I$  会一定程度地衰减:

$$I = I_0 \exp(-\tau L) \tag{5}$$

式中:  $\tau$ —浊度(即单位体积内颗粒的总消光截面);  $L$ —测量区光程。

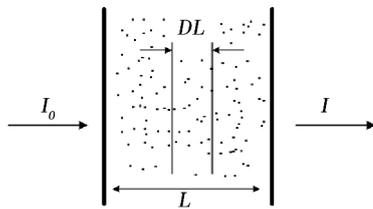


图 3 消光法测量原理

Fig. 3 The measurement principles of the light extinction method

实际情况下 被测颗粒大多为一定尺寸分布范围的多分散颗粒系 则浊度:

$$\tau = \frac{\pi}{4} \int_a^b N(D) D^2 K_{\text{ext}} dD \tag{6}$$

代入式(5)后得到式(7):

$$\ln(I/I_0)_\lambda = -\frac{\pi}{4} L \int_a^b N(D) D^2 K_{\text{ext}_\lambda} dD \tag{7}$$

式(7)等号左边即为消光谱  $a$  和  $b$ —颗粒尺寸分布的下限和上限,  $\lambda$ —光波长,  $K_{\text{ext}}$ —消光系数,  $K_{\text{ext}_\lambda}$ —不同波长下对应的消光系数;  $N(D)$  是以颗粒数计的 尺寸分布函数或频度函数。由此 通过测量透射光和入射光的强度比  $I/I_0$  并已知入射光波长  $\lambda$  光程  $L$  和被测颗粒的折射率  $m$  即可得颗粒尺寸分布函数  $N(D)$  以及体积浓度<sup>[12]</sup>。

## 2 实验

超声衰减法和消光法的蒸汽测量实验系统如图

4 所示 包括了蒸汽产生和流动装置、超声测量装置、消光测量装置 3 部分。蒸汽通过高温蒸汽发生器(浙江佳先机械制造有限公司, LDR3 - 04 型)产生 蒸汽发生器出口连接一段不锈钢管道 测量区布置在直管段 其中蒸汽温度为 371.3 K(热电偶测量)。

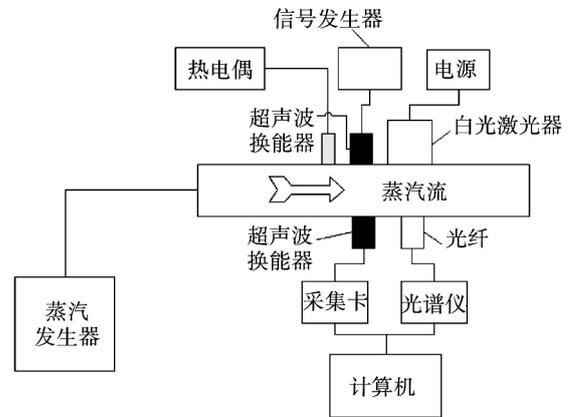


图 4 实验系统图

Fig. 4 The schematic diagram of the experiment

### 2.1 超声衰减测量

如图 4 所示 自行制作的 600 V<sub>pp</sub> 电压的信号源用于激励安装于管道两侧的超声波换能器(中心频率 22、40 和 200 kHz) 为保证在实验温度下正常工作 换能器采用耐高温复合振子结构 黏性耦合材料布置在换能器与隔热贴面保护层之间 减小阻抗差 保证信号的有效传播 隔热贴面保护层保护超声波复合振子 减少其受高温蒸汽的影响(超声波换能器需进行温度特性试验及修正) 接收信号经滤波后由 4 通道数据采集卡(北京双诺测控, MP424 USB 采样率 1MS/s) 送到电脑。

实验时 首先校准超声波换能器位置 良好对中 并采集原始信号 之后开启并调整蒸汽发生器 待蒸汽均匀通过测量区且流动稳定后 测量并保存信号。自行编制了多通道采集程序 程序包括了信号采集、频谱分析、特征信息提取、内嵌模型、粒径和体积浓度计算功能。

### 2.2 消光谱测量

消光谱测量同样在图 4 所示实验系统中进行<sup>[13-14]</sup>。光源采用法国 LEUKOS 公司 SM - 5 - HE 高脉冲能量超连续谱激光器 美国 Ocean Optics 公司 HR - 4000 型光纤光谱仪作为接收器 波长响应

范围 200 - 1 100 nm。

实验前调整激光器以及接收光纤使两者位于同一高度。消光谱测量可与超声测量同步进行, 打开白光激光器, 信号稳定后, 由光谱仪采集并保存原始光谱。开启并调整蒸汽发生器, 达到实验条件后测量对应的衰减光谱, 信号由光谱仪自带软件采集后由自行编制程序按 1.3 节介绍方法进行处理得到液滴粒径分布与体积浓度。

### 3 测量结果与讨论

#### 3.1 超声衰减法

图 5 为 3 种频率的超声波透过蒸汽两相流后的时域波形。声衰减系数  $\alpha_s$  按照式 (8) 计算, 声程  $L$  即发射换能器与接收换能器的距离,  $A_0$  和  $A_1$  分别表示测量区域原始信号和蒸汽液滴通过测量区时换能器接收信号经过傅立叶变换处理后幅值信号。由于水蒸气本身的声吸收较为微弱, 在声衰减计算中无需计入。基于理论模型, 根据声衰减比值 - 粒径值的对应关系确定蒸汽中液滴的粒径, 同时根据声衰减 - 体积浓度的对应关系得到蒸汽中液滴的体积浓度。将得到的声衰减比值等信息代入编写的程序中计算得到表 2 的结果。

$$\alpha_s = \frac{\ln(A_0/A_1)}{L} \quad (8)$$

表 2 汇总了经 50 组重复测量后得到的声信号幅值、声衰减系数、液滴粒径和体积浓度。由于实验过程中, 受到蒸汽流的干扰, 会产生一定的偏差, 对实验数据进一步分析, 选取了 5 次平行实验 (每两次平行实验间隔 30 min, 每次实验持续约 5 min), 每次实验随机选取 10 组数据, 共选取 50 组数据加以分析, 通过多次平均减小干扰和随机误差影响。表 2 中衰减信号  $A_1$  即为 50 组实验平均值, 并采用标准偏差 ( $S$ ) 与平均值 ( $\bar{X}$ ) 的比算出相对标准偏差 ( $RSD$ ):

$$RSD = (S/\bar{X}) \times 100\% \quad (10)$$

超声频率为 22 kHz 时的衰减信号  $A_1$  的相对标准偏差为 9.19%, 频率 40 kHz 时为 10.75%, 频率 200 kHz 时 2.66%。

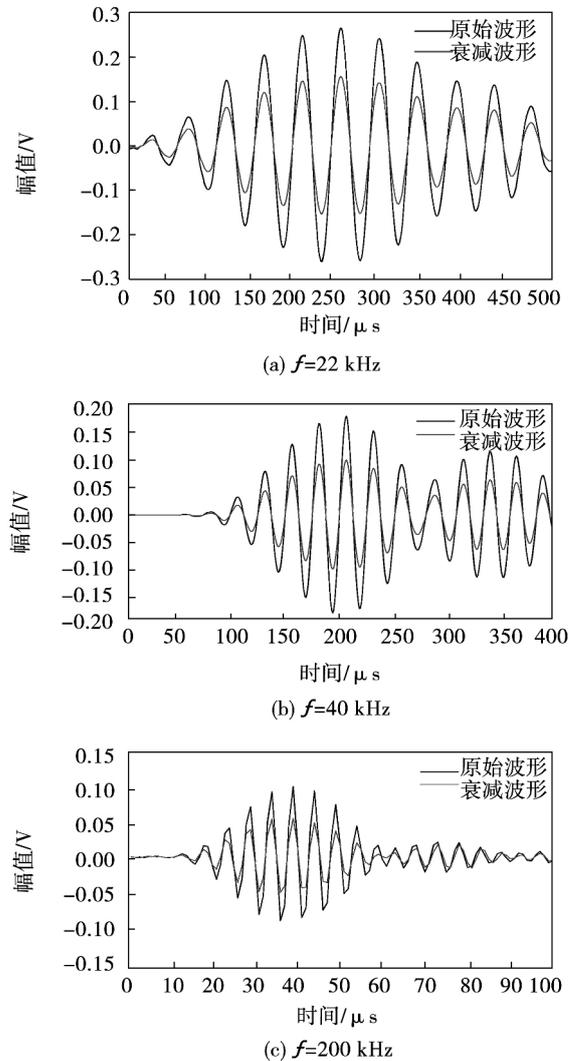


图 5 3 种频率下的超声原始波形与衰减波形  
Fig. 5 Ultrasound original waveforms and attenuated waveforms at three kinds of frequencies

表 2 超声法测得液滴粒径与体积浓度 ( $T=371.3$  K)

Tab. 2 Particle sizes and volume concentrations measured by ultrasonic attenuation methods

频率 $f$ /kHz	背景信号值 $A_0$ /V	衰减信号值 $A_1$ /V	相对标准 偏差 $RSD$	声程 $L$ /m	衰减 $\alpha_s$ /Np · m <sup>-1</sup>	衰减比 $\alpha_{s200k}/\alpha_{s22k}$	衰减比 $\alpha_{s200k}/\alpha_{s40k}$	索太尔径 $D_{32}$ /μm	体积浓度 $C_v$ /%
22	0.0987	0.0643	9.19%	0.157	2.73				
40	0.0573	0.0309	10.75%	0.139	4.44	2.03	1.25	4.16	0.006 17
200	0.0338	0.0182	2.66%	0.112	5.53				

### 3.2 消光法测量结果

图 6 为多波长消光法测量时光谱仪采集得到的原始光强与蒸汽通过时获得的衰减光强。可见蒸汽通过严重削弱了原始光强,光谱衰减明显。分析粒径前,图中光谱曲线中毛刺通过多次实验平均或数据光滑消除,并扣除光谱仪暗值。

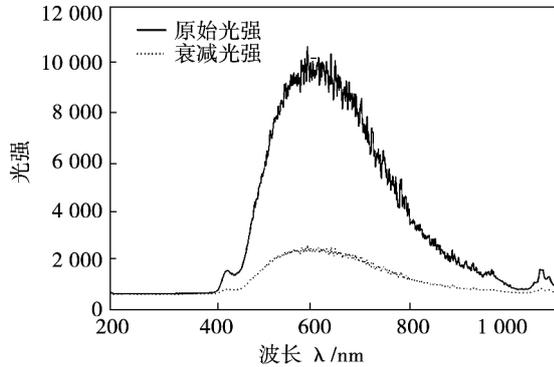


图 6 被测蒸汽的原始光强和衰减光强  
Fig. 6 The original light and the attenuated light of measured steam

经计算得液滴粒径分布,如图 7 所示。其中频率分布指对应粒径的液滴体积占液相总体积的份额,累积分布则为其对应累积值。蒸汽中液滴的体积浓度和液滴颗粒索太尔径,如表 3 所示。

表 3 消光法测得液滴粒径与体积浓度

Tab. 3 Particle sizes and volume concentrations measured by light extinction method

光程 $L/m$	索太尔径 $D_{32}/\mu m$	体积浓度 $C_v/\%$
0.080 0	3.52	0.006 09

### 3.3 测量结果比较和分析

结合表 2 与表 3 中的实验结果,超声衰减法测得蒸汽中液滴粒径、体积浓度与消光法的结果接近,液滴平均粒径  $D_{32}$  在 3 - 5  $\mu m$  间,两种测量方法测得体积浓度相对偏差小于 2%。两种方法对比:(1)多波长消光法容易实现颗粒粒径分布的测量,超声衰减法,目前的实验仅测出了平均粒径;(2)多波长消光法也存在劣势,现场光路不易对中,同时受浓度影响较大,如图 7 中光谱信号衰减严重,同等条件下超声衰减则更小,且波形信号信噪比高,系统较简单,更适合现场复杂恶劣的条件。

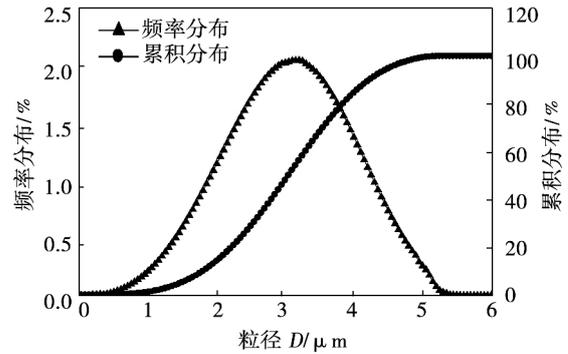


图 7 液滴粒径的频度和累积分布  
Fig. 7 Frequencies and cumulative size distributions of steam droplets

## 4 结 论

(1) 利用三频率超声衰减法测量蒸汽两相流中液滴颗粒的平均粒径与体积浓度,同时采用多波长消光法测量蒸汽两相流中液滴,获得液滴的粒径分布和体积浓度,所测量的粒径分布范围为 1 - 10  $\mu m$ 。

(2) 两种方法所测液滴平均粒径在 3 - 5  $\mu m$  之间,两种方法测得体积浓度约为 0.006%,相对偏差小于 2%。

(3) 超声衰减法装置简单,更适应高浓度测量条件,开展超声方法进行后续的湿蒸汽的在线测量研究具有重要意义。

### 参考文献:

[1] Xiaoshu Cai ,Lili Wang ,Yongzhi Pan ,Xin Ouyan ,Jianqi Shen. A novel method for measuring the coarse water droplets in two phase wet steam flow in steam turbine [J]. Journal Of Engineering Thermal Science 2001 ,10( 2) : 123 - 126.

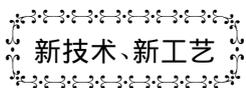
[2] 宁德亮 ,高 雷 ,刘新全. 流动蒸汽湿度测量方法的研究与比较 [J]. 热能动力工程 2009 24( 2) : 149 - 153. NING De-liang ,GAO Lei ,LIU Xin-quan. Study and comparison of flowing-steam wetness measurement methods [J]. Journal of Engineering For Thermal Energy And Power 2009 24( 2) : 149 - 153.

[3] 韩中合 ,杨 昆. 汽轮机中蒸汽湿度测量方法的研究现状 [J]. 华北电力大学学报 2002 29( 4) : 44 - 47. HAN Zhong-he ,YANG Kun ,Reviews on wetness measurement methods of wet steam in turbine [J] Journal of North China Electric Power University 2002 29( 4) : 44 - 47.

[4] 魏荣爵 ,田裕人. 水雾中声波传播衰减问题的实验研究 [J]. 中国科学 A 辑 ,1986 3( 3) : 285 - 292. WEI Rong-jue ,TIAN Yu-ren. The study of attenuation of acoustic

- wave propagating in water mist [J]. Science China A ,1986 3(3) : 285 - 292.
- [5] J. J. S. Shen. A new method of steam quality measurement based on ultrasound [J]. Journal of Energy Resources Technology ,1999 ,121 (3) : 172 - 175.
- [6] 李 锴 ,尚德敏. 超声波检测汽轮机中水蒸气湿度方法的探讨 [J]. 热能动力工程 2002 ,17(6) : 559 - 560 564.  
LI Kai SHANG De-min. Exploratory study of an ultrasonic method for detecting steam wetness in a steam turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power ,2002 ,17(6) : 559 - 560 564.
- [7] 苏明旭 ,蔡小舒 ,徐 峰 等. 超声衰减法测量悬浊液中颗粒粒度和浓度 [J]. 声学学报 2004 29(5) : 440 - 444.  
SU Ming-xu ,CAI Xiao-shu ,XU Feng ,et al. The measurement of particle size and concentration in suspensions by ultrasonic attenuation [J]. ACTA ACUSTICA 2004 29(5) : 440 - 444.
- [8] Epstein P S ,Carhart R R. The absorption of sound in suspensions and emulsions: I. water fog in air [J]. Acoust Soc Am ,1953 ,25 (3) : 553 - 565.
- [9] Allegra J R ,Hawley S A. Attenuation of sound in suspensions and emulsions: Theory and experiments [J]. Acoust Soc Am ,1972 ,51 (5) : 1545 - 1564.
- [10] 苏明旭 ,沈建琪 ,徐 峰 等. 一种颗粒系超声衰减谱的改进计算方法 [J]. 声学技术 2010 29(6) : 591 - 594.  
SU Ming-xu ,SHEN Jian-qi ,XU Feng ,et al. A modified method in calculating attenuation spectra for particle system [J]. Technical Acoustics. 2010 29(6) : 591 - 594.
- [11] McClements D J. Ultrasonic characterisation of emulsions and suspensions [J]. Advances in Colloid and Interface Science ,1991 ,37: 33 - 72.
- [12] 蔡小舒 ,苏明旭 ,沈建琪 等. 颗粒粒度测量技术及应用 [M] ,北京: 化学工业出版社 ,ISBN: 9787122089076 2010 年 9 月.
- CAI Xiao-shu ,SU Ming-xu ,SHEN Jian-qi ,et al. Technology and Applications of Particle Size Measurement [M]. Beijing: Chemical Industry Press ,ISBN: 9787122089076 2010 9.
- [13] 郑 刚 ,李孟超 ,刘铁英 等. 颗粒粒度在线测量的多对波长消光法 [J]. 仪器仪表学报 2000 21(4) : 434 - 436.  
ZHENG Gang ,LI Meng-chao ,LIU Tie-ying ,et al. On-line Particle Size Measurement Using Multi-wavelengths Light Extinction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument ,2000 ,21(4) : 434 - 436.
- [14] 徐 峰 ,蔡小舒 ,苏明旭 等. Jean Marc Dorey. 光谱消光法测量高压湿蒸汽的研究 [J]. 动力工程学报 2009 29(3) : 254 - 260 291.  
XU Feng ,CAI Xiao-shu ,SU Ming-xu ,et al. Jean Marc Dorey. Research on the measurement of high pressure wet steam by spectral light extinction method [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering 2009 29(3) : 254 - 260 291.
- [15] 汪丽莉 ,蔡小舒 ,欧阳新. 汽轮机内湿蒸汽两相流流场的实验研究 [J]. 动力工程学报 2003 23(2) : 2270 - 2274.  
WANG Li-li ,CAI Xiao-shu ,OU Yang-xin. Experimental Study of the Wet Steam Flow Field in LP Steam Turbine [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering ,2003 ,23(2) : 2270 - 2274.
- [16] 杜功焕 ,朱哲民 ,龚秀芬. 声学基础 [M]. 南京大学出版社 2012.  
DU Gong-huan ,ZHU Zhe-min ,GONG Xiu-fen. Acoustics [M] ,Nanjing University Press 2012.
- [17] SuMingxu ,Cai Xiaoshu ,Xue Minghua ,Dong Lili ,Xu Feng. Particle sizing in dense two-phase droplet systems by ultrasonic attenuation and velocity spectra [J]. Sci china Ser E-Tech Sci 2009 52 (6) : 1502 - 1510.

(丛 敏 编辑)



新技术、新工艺

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.007

## 关于转子联轴节连接的强度计算

据《Электрические станции》2013 年 3 月刊报道, 乌拉尔联邦大学的专家探讨了汽轮机转子联轴节连接强度计算问题。

文章的结论指出, 用来计算法兰易变形性系数的比尔盖尔公式是根据弹性理论的一个最重要原理推导出的。该公式的正确性已经被许多成功经验和很多试验数据所证实。当然, 通过更精确地处理边界条件和更复杂的求解可以改进该方法。

所进行的数值研究结果证实了比尔盖尔公式用于法兰连接计算和用于哈尔科夫汽轮机厂的 K - 300 - 240 汽轮机组高压转子 - 中压转子联轴节连接计算的正确性。

(吉桂明 摘译)

of the temperature field, heat exchange coefficient and flow field of the working medium for heat transfer. On this basis, the flow and heat transfer characteristics of the Cu-water nano-fluid inside a plate type heat exchanger were analyzed and the simulation results were compared with the test ones. It has been found that the heat exchange effectiveness of the plate type heat exchanger with Cu-water nano-fluid serving as the cold fluid is obviously superior to that with pure water serving as the cold fluid, however, at the same time of increasing the flow speed and concentration of the nano-fluid, full attention should be paid to the influence of the increase of the pressure drop arisen from an increase of the viscosity on the performance of the heat exchanger. **Key words:** nano-fluid, numerical simulation, heat transfer, flow

R290 微通道内沸腾换热实验研究 = **Experimental Study of the Boiling Heat Exchange of R290 Inside a Micro-channel** [刊, 汉] GE Qi-lin, LIU Jian-hua, ZHANG Liang, ZHANG Hui-chen ( College of Energy Source and Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(5). -672-677

Experimentally studied were the boiling heat exchange characteristics of R290 in a horizontal stainless steel micro channel with an inner diameter of 2 mm. The mass flow rate was 200 to 600 kg/m<sup>2</sup>s, the heat flux density ranged from 20 to 40 kW/m<sup>2</sup>, the dryness fell in a range from 0.1 to 0.8 and the saturated temperature was 14 and 24 °C. It has been found that with a rise in heat flux density or dryness, the boiling heat exchange coefficient will increase notably and with an increase of the mass flow rate, the heat exchange coefficient will also increase by a small margin and to increase the saturated temperature will also result in a rise by a small margin of the heat exchange coefficient. The influence of the dryness and heat flux density on the heat exchange coefficient will be most remarkable.

**Key words:** micro channel, R290 boiling heat exchange, heat exchange coefficient

蒸汽中液滴粒径和浓度测量实验研究 = **Experimental Study of the Measurement of Particle Diameters and Concentration of Steam Droplets** [刊, 汉] YUAN An-li, SU Ming-xu, LI Yong-ming, CAI Xiao-shu ( Shanghai City Key Laboratory on the Multi-phase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Particle and Two-phase Flow Measurement Research Institute, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(5). -678-683

By using the simplified ECAH ( Epstein-Carhart-Allegra-Hawley) theoretical model ,a numerical calculation was made and the corresponding relationship among the ultra-sonic attenuation ,steam density and particle diameters was obtained. Based on the ultra-sonic wave acoustic attenuation measurement method ,an ultra-sonic steam particle diameter and concentration measurement and test system with its central frequency being 22 kHz ,40 kHz and 200 kHz respectively was designed and a steam liquid droplet particle diameter and concentration ultra-sonic method-based measurement test was carried out when the temperature was 371.3 K. In the meanwhile ,at the same temperature ,a contrast test was performed of the steam by using the multi-wave length light extinction method. It has been found that the particle diameter and concentration measured by using the ultra-sonic attenuation method approach to those measured by using the light extinction method and the mean Sauter diameter is between 3 and 5 microns. The relative measurement error of the concentration is less than 2% . **Key words:** ultra-sonic ,light extinction method ,particle diameter measurement ,concentration measurement ,gas-liquid two-phase flow

耦合跨临界有机朗肯循环和蒸汽压缩制冷循环分析 = **Analysis of a Trans-critical Organic Rankine Cycle Coupled With a Steam Compression Refrigeration Cycle** [刊 汉] MO Dong-ming ( School of Mechanical Engineering ,Chongqing Industrial and Vocational Polytechnic College ,Chongqing ,China ,Post Code: 401120) ,HU Lei-ming ( State Power Grid Chongqing Electric Power Company ,Chongqing ,China ,Post Code: 400015) ,ZHU Xiao-ying ( Construction Preparation Office ,Guangming Gas Turbine Power Station ,Shenzhen Energy Source Group ,Shenzhen ,China ,Post Code: 518031) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2015 ,30( 5) . – 684 – 688

Through coupling a trans-critical organic Rankine cycle ( TORC) with a steam compression refrigeration cycle ,a cooling and power cogeneration composite system driven by low temperature flue gases was set up. With R22 ,R134a ,R227ea and R290 serving as the working medium in the cycles ,under various operating conditions with different cooling energy demands ,the above-mentioned composite system can effectively convert the low temperature flue gas waste heat to electric energy and cooling energy output. The analytic results of the thermodynamic performance of the cooling and power cogeneration composite system show that under the condition of a certain heat source ,with a rise of the pressure at the inlet of the expander ,the total refrigeration coefficient of the system will first increase and then decrease ,existing an extremely big value and the heat exchange area corresponding to the unit net output power which reflecting the cost-effectiveness of the composite system existing an extremely small value.