

燃气轮机惯性级分离装置的分离特性研究

陶健, 陆振华, 龚伟, 葛光宇

(上海交通大学动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 在 25 和 33 mm 两种导叶间距、进口流速分别为 2.5、3.0 和 3.5 m/s 的工况下, 对燃气轮机的惯性级导叶进行盐雾分离特性的研究。首先由实验得出该惯性级导叶的分离特性数据, 再通过离散相数值模拟定性分析装置流道内分离盐分的主要机理和影响分离特性的因素。比较实验数据和数值模拟结果得出: 该惯性级分离装置分离效率约为 97%, 最大值为 98.71%, 最小值为 95.90%, 接近完全分离效果; 导叶间距增大分离效率会有下降, 分离效率会随初始进口速度增加有提升。

关键词: 分离特性; 离散相; 惯性级; 实验研究

中图分类号: TK471 文献标识码: A
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.01.005

引言

众所周知, 海水中存在着丰富的盐分, 且主要以气溶胶形式存在。燃气轮机作为大功率发动设备, 其在工作时会吸入大量空气, 而带来大量含有盐分的气溶胶颗粒。一方面, 当燃机工作时会产生高温环境, 导致盐分腐蚀燃气轮机内部的热端零件; 另一方面, 颗粒本身也会在压气机的叶片上产生积垢并磨损叶片, 影响叶片的气动性能^[1-2]。舰船使用的燃气轮机需要有严格的除盐技术, 因而需要高效的滤清器来对燃气轮机进气部分进行除盐操作。

国内外对于滤清器均有着大量的研究, 主要采用惯性级与网垫级。惯性级即为曲折流道式惯性分离器, 其代表为 1940 年乌恰斯特金所制作的惯性气水分离设备^[3]。网垫级则为丝网滤清器。美国 GE 公司则将两者结合, 于 80 年代开发了多级组合船用气水分离器。

本研究主要探究惯性级分离器在实际除盐过程中的应用。其原理是利用气流急速冲击挡板然后迅速改变流动方向, 因为气体和液体的密度不同, 使得液滴的运行轨迹与气体的流动轨迹不重合, 从而达

到分离的效果^[4]。

通过对特定的实验器件流道进行分离实验, 从而获得不同工况下的盐雾分离特性。

1 惯性级几何模型

采用了某公司所提供的惯性分离实验件, 该实验件对照实物进行了一定比例的缩放, 实验件的厚度、相邻间距以及角度均保持不变, 实验件实物的流通面积也与实物保持一致。

本次试验中的气水分离装置为由多块惯性级导叶等间距排布所组成的流道。采用建模软件 CATIA 对该流场进行了等比例二维建模, 如图 1 所示。

图 1 中所显示的为相邻两个流道的横截面, 混合多相流从左侧流入, 从右侧流出。图 2 为惯性级导叶的实物图。

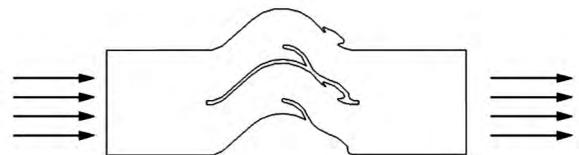


图 1 流道平面图

Fig. 1 Plane view of the flow passages

2 分离特性的实验研究

2.1 实验装置

实验装置采用吸气风洞的设计原理。气源为离心风机(型号 4-72-4.5 A, 空气流量为 5 712—105 62 m³/h, 风压为 2 554—1 673 Pa), 通过变频调速器来有效改变工况, 并在工况的流速范围内进行调节。

收稿日期: 2014-02-28; 修订日期: 2014-05-08

作者简介: 陶健(1990-)男, 江苏南通人, 上海交通大学硕士研究生。



图 2 惯性级导叶实物图

Fig. 2 Real object photo of guide blades in the inertial stage

图 3 为本次气水分离实验装置简图, 在实验装置的前端进口安装了流量测量管, 可以测量进气流

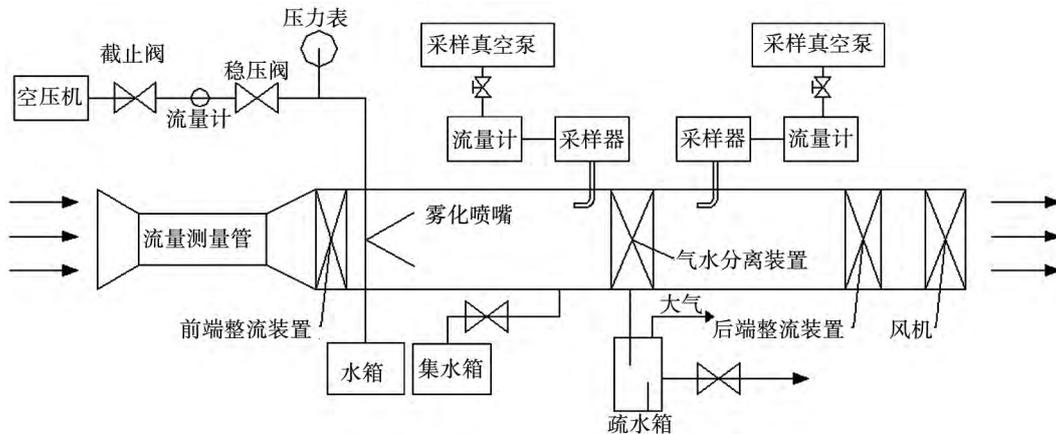


图 3 实验装置简图

Fig. 3 Sketch of the test device

表 1 测量仪器参数表

Tab. 1 Table of parameters of the measuring instruments

名称	型号	精度
数显钠离子浓度计	DWS-51A	Na ⁺ : ±0.23 g/L
Na 功能电极	6801-01	
甘汞电极	6802-01	
采样转子流量计	LZB-10	±0.04 L/h
架盘药物天平	HC.TP12B.10	0.2 g

图 4 为实际实验的燃气轮机进气实验装置实物图。

2.2 实验数据处理及结果

盐雾分离效率实验首先要得到进气装置在不同流速工况, 不同进口含盐浓度下的装置出口含盐浓

量, 同时测量大气温度、压力以及湿度等数据。气水分离装置前后则布置有盐雾采样管与静压采集点。

由图 3 所示, 造雾系统位于前端整流装置和气水分离装置之间, 其可以将人造海水转化成气溶胶状态。在气水分离装置的进口改变气压和水压, 可获得不同含盐浓度的气溶胶雾。

实验需要测量气水分离装置进口段与出口端的气溶胶含盐浓度。采样器利用等速采样原理控制采样空气量, 收集含盐气溶胶空气, 使空气中的 NaCl 溶于容器内的无钠水样, 再利用离子选择电极分析技术测定其中的钠离子浓度, 通过换算, 获得气水分离装置进出口气流中的含盐浓度值^[5]。在本次实验中, 在分离装置进出口各配备一套采样系统和分析仪器, 同时对该装置的进出口气溶胶浓度采样。盐雾分离效率实验测量仪表如表 1 所示。

度的实验数据, 通过计算得出盐雾的分离效率, 气水分离装置的盐雾分离效率为:

$$\eta = \left(\frac{W_{air\ in} - W_{air\ out}}{W_{air\ in}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $W_{air\ in}$ —气水分离装置进口气流中的含盐浓度, mg/L; $W_{air\ out}$ —出口气流中的含盐浓度, mg/L。

气流中含盐浓度 W_{air} 可由下式表达:

$$W_{air} = G_{NaCl} / G_{air} \quad (2)$$

式中: G_{NaCl} —溶于无钠水样中的含盐量, mg; G_{air} —采样的空气量, kg。

式(2)中水样中的含盐量 G_{NaCl} 为:

$$G_{NaCl} = \mu_{NaCl} \times L \quad (3)$$

式中: L —无钠水样量, L; μ_{NaCl} —溶于水样中的 NaCl

溶液浓度 $\mu\text{g/L}$ 。

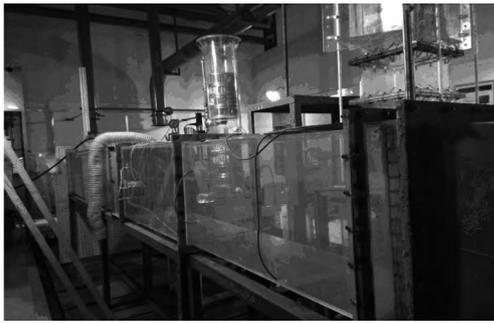


图 4 实验装置实物图

Fig.4 Real object photo show of the test device

溶解于无钠水样中的 NaCl 溶液浓度是采用离子选择电极分析法,先测出无钠水中的钠离子 (Na^+) 浓度 再进一步按照 Na^+ 与 NaCl 的分子量关系计算 NaCl 浓度 其计算式为:

$$\mu_{\text{NaCl}} = \mu_{\text{Na}^+} \times \left(\frac{M_{\text{NaCl}}}{M_{\text{Na}^+}} \right) \quad (4)$$

式中: μ_{Na^+} — Na^+ 溶液浓度 mg/L ; M_{NaCl} —NaCl 的分子量; M_{Na^+} — Na^+ 的分子量。

式(2)中采样的空气量 G_{air} 为:

$$G_{\text{air}} = (\pi d^2 VT\rho) / 4 \quad (5)$$

式中: d —等速采样管进口直径 m ; V —采样气流速度 m/s ; ρ —采样气流密度 kg/m^3 ; T —采样时间 s 。

利用两套钠离子浓度计测量进口与出口钠离子溶液浓度 根据上述计算步骤 获得气流在进出口的含盐浓度 从而计算盐雾分离效率。

本次实验分别进行 25 和 33 mm 两组导叶间距下的盐雾分离效率实验 每一组根据 3.6 和 10 mg/L 两种气溶胶浓度进行实验 总共获得 4 组实验数据。

导叶间距为 25 mm 的分离效率如表 2 和表 3 所示。导叶间距为 33 mm 的分离效率如表 4 和表 5 所示。

表 2 进气气溶胶 NaCl 浓度(3.6 mg/L)

Tab.2 Sodium chloride concentration of the aerosol in the gas at the inlet (3.6 mg/L)

实验风速 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	进口 NaCl 浓度 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	出口 NaCl 浓度 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	分离效率/%
2.5	3.66	0.15	95.90
3	3.63	0.05	98.62
3.5	3.76	0.1	97.34

表 3 进气气溶胶浓度(10 mg/L)

Tab.3 Sodium chloride concentration of the aerosol in the gas at the inlet (10 mg/L)

实验风速 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	进口 NaCl 浓度 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	出口 NaCl 浓度 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	分离效率/%
2.5	10.08	0.28	97.22
3	10.09	0.13	98.71
3.5	10.18	0.23	97.74

表 4 进气气溶胶 NaCl 浓度(3.6 mg/L)

Tab.4 Sodium chloride concentration of the aerosol in the gas at the inlet (3.6 mg/L)

实验风速 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	进口 NaCl 浓度 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	出口 NaCl 浓度 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	分离效率/%
2.5	3.64	0.12	96.70
3	3.52	0.1	97.16
3.5	3.73	0.1	97.32

表 5 进气气溶胶 NaCl 浓度(10 mg/L)

Tab.5 Sodium chloride concentration of the aerosol in the gas at the inlet (10 mg/L)

实验风速 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	进口 NaCl 浓度 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	出口 NaCl 浓度 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	分离效率/%
2.5	10.28	0.14	98.64
3	9.91	0.24	97.58
3.5	10.36	0.17	98.36

3 分离特性的数值模拟

利用建模软件 CATIA 对实物流道进行二维建模 并利用数值模拟软件来分析分离装置内部的分离特性。

使用数值模拟软件 Ansys14.5 自带的 ICM 网格划分工具^[6]对该二维流道进行网格划分 并进行适当的加密网格的操作 从而使得后处理能得到更准确的计算结果。其具体网格划分如图 5 所示。

其整体网格质量如图 6 所示。只有极小部分区域的网格质量小于 0.4,可认为满足数值模拟计算要求。

利用离散相模拟工具 将盐雾所形成的气溶胶颗粒设定为离散相,空气为连续相。根据文献[7],设定气溶胶颗粒的粒子直径范围为 1-30 μm ,由于实验条件限制,所达到的颗粒粒子直径较大,取理论

值的最大直径 30 μm 。惯性级边界条件设定为 $es\text{-}cape$ (完全捕集)。分别改变盐雾的进口流速和导叶间距,计算气溶胶颗粒在流道内部的运动轨迹,从而分析其内部分离特性。

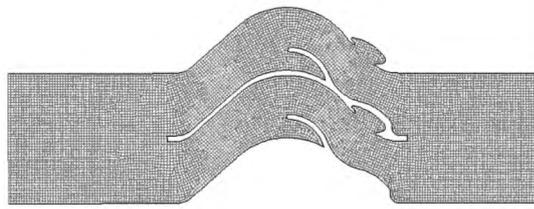


图 5 流道整体网格图

Fig. 5 Diagram of the grid of the flow passage as a whole

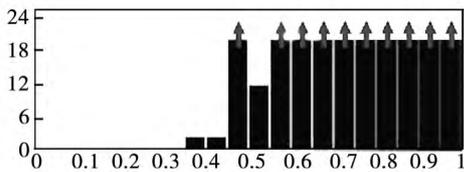


图 6 网格质量图

Fig. 6 Chart showing the grid mass

以导叶间距为 25 mm,初始气溶胶浓度为 3.6 mg/L,进口速度 2.5 m/s 的工况为例分析。

根据图 7 和图 8,当粒子撞击转角区域,会在粒子碰撞的壁面形成高速低压区,而在另一处弯折区域则形成低速高压区。高速低压区的存在,会导致漩涡回流区的产生,从而进一步增强分离效果。

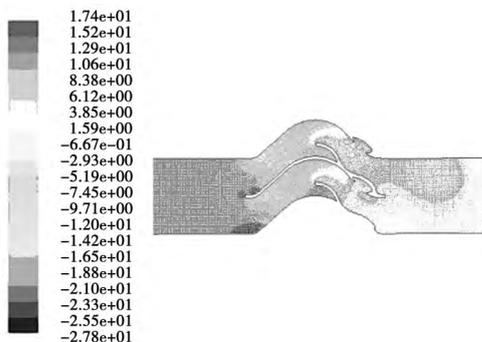


图 7 2.5 m/s 进口流速流道压力云图(Pa)

Fig. 7 Atlas showing the pressure in the flow passages at a flow speed of 2.5 m/s at the inlet (Pa)

由图 9 中粒子轨迹图得出,本次分离的主要区

域在通道第一转弯处的上半区和第二转弯处的下半区。由于盐雾的气溶胶颗粒惯性大于气体,其在弯折区域所受离心力过大,导致颗粒无法随气流通过转弯处,从而产生分离,撞击到壁面后被捕捉。

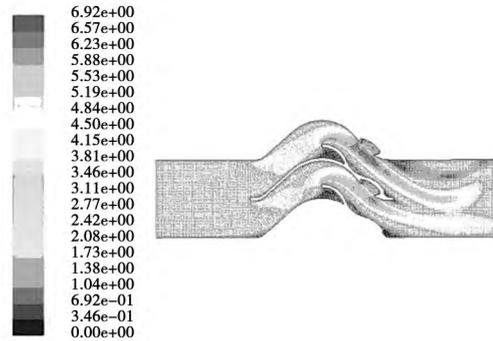


图 8 2.5 m/s 进口流速流道速度云图(m/s)

Fig. 8 Atlas showing the flow speed in the flow passages at a flow speed of 2.5 m/s at the inlet (m/s)

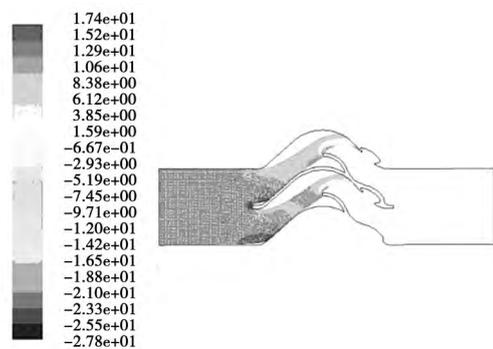


图 9 2.5 m/s 进口流速气溶胶颗粒运动轨迹图

Fig. 9 Chart showing the movement trajectory of the aerosol particles at a flow speed of 2.5 m/s at the inlet

导叶间距为 25 mm,气溶胶初始浓度为 3.6 mg/L,在不同的进口流速下,颗粒轨迹变化如图 10 所示。

图 10 中,不同流速下分离装置的分选效率均达到了 100%。当流速增大,图中到达分离器后半部分的粒子轨迹宽度变窄,分离完成区域提前,说明其整体分离效果增强。因为初始速度的增加,流道内部会形成更大的压力损失,进一步强化内部的漩涡回流作用,从而提升分离效果。

导叶间距为 33 mm,气溶胶初始浓度为 3.6 mg/L,其它实验条件不变,在不同进口流速下,颗粒

轨迹变化如图 11 中所示。

例 其数值模拟数据与实验数据总结如表 7 所示。

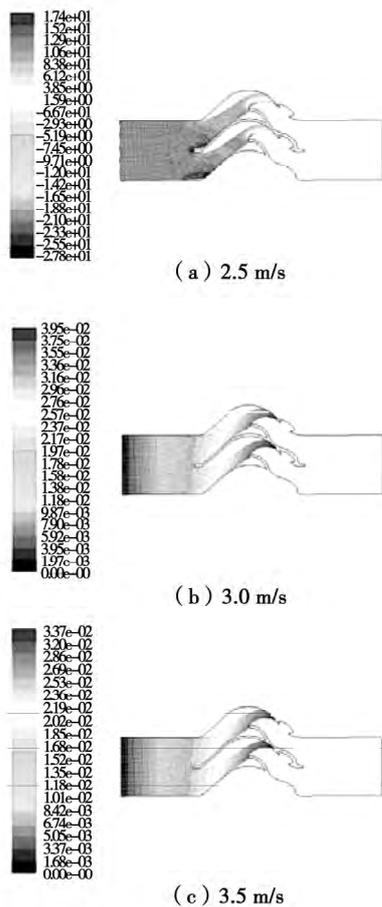


图 10 25 mm 导叶间距 不同进口流速下气溶胶颗粒轨迹图

Fig. 10 Chart showing the trajectory of the aerosol particles at various inlet flow speeds at a spacing of 25 mm between any two guide blades

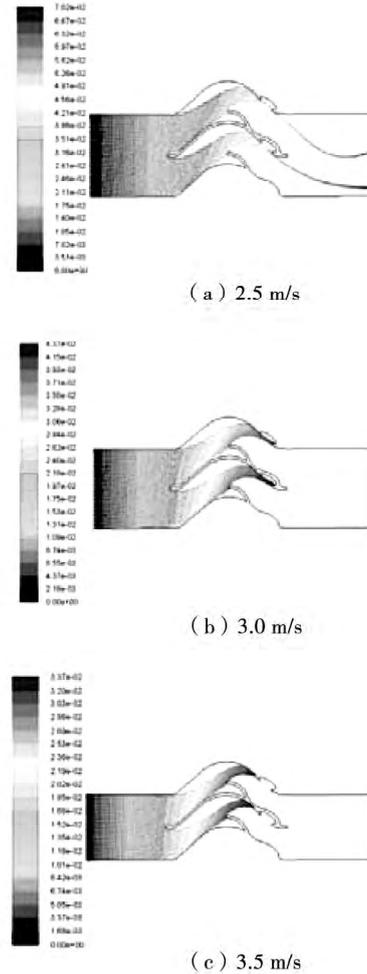


图 11 33 mm 导叶间距 不同进口流速下气溶胶颗粒轨迹图

Fig. 11 Chart showing the trajectory of the aerosol particles at various inlet flow speeds at a spacing of 33 mm between any two guide blades

图 11 中,当间距增加时,其初始分离效率会有所降低,一部分气溶胶颗粒可以到达出口面,随着初始进口速度的增加,分离效率显著提升至 100%,但完全分离区域延伸至第三转弯处的下半区,这是因为导叶间距变大,导致离散相在折板流道中的流动面积相应增大,气流速度方向会变得相对平缓,导致气溶胶颗粒和气流之间保持较好的同步性,不会轻易与气流分离而撞击到内侧壁面,导致分离效率降低。

表 7 数值模拟结果与实验数据总结表
Tab. 7 Summing - up of the numerical simulation results and the test data

进口风速 / $m \cdot s^{-1}$	25 mm 间距分离效率 / %		33 mm 间距分离效率 / %	
	实验	模拟	实验	模拟
2.5	95.90	100	96.70	89.1
3.0	98.62	100	97.16	100
3.5	97.34	100	97.32	100

4 模拟结果和实验分析结果比较

初始 NaCl 浓度为 3.6 mg/L 的气溶胶颗粒为

对实验数据和数值模拟数据绘制趋势图,如图 12 所示。

由图 12 得出,数值模拟所得出的分离效率与实验所得的实际分离效率均较高。在 25 mm 导叶间距下,实验分离效率约为 97%,最大可以达到 98.62%。33 mm 导叶间距下,实验分离效率均超过 96%,而接近模拟所得出的完全分离效果。

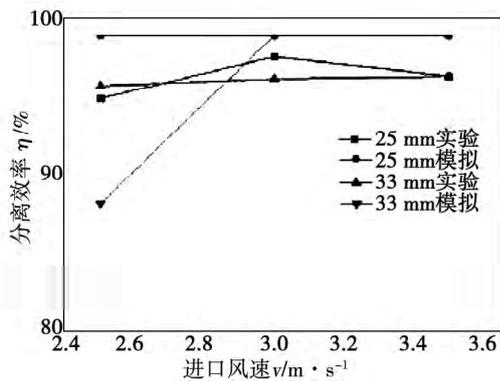


图 12 数值模拟和实验数据趋势图

Fig. 12 Chart showing the variation tendency of the numerical simulation and test data

由于本次实验测量步骤和实验调试的影响,初始进口速度为 2.5 m/s,间距为 25 mm 时,浓度测量值的偏差相对较大。所以选择较高进口风速下不同间距的分离效率值进行比对。根据表 7,可以发现当风速为 3 m/s 和 3.5 m/s 时,25 mm 间距的分离效率值比 33 mm 间距下的值分别高 1.46% 和 0.02%。这与图 10 与图 11 的不同间距比对分析一致。说明导叶间距增大,会削弱整体分离装置的分离效果。

为得出进口风速和分离效率的关系,可以增大导叶间距,降低其对分离效率的影响。根据表 7,比对 33 mm 间距下的进口速度和对应分离效率值,当进口速度增大,分离效率值随之增大,这与图 10 的模拟情况吻合。初始进口速度增加导致内部漩涡回流区的强化,从而进一步提升分离装置的整体分离效率。

数值模拟所得出的分离效率比实验结果高,为完全分离效果。数值模拟根据理想情况下的离散相模拟进行计算,而实验则是在实际环境下进行。首先,实际颗粒本身直径呈高斯分布,存在一定数量难以分离的小直径粒子。其次,实际实验中壁面颗粒碰撞后会有一小部分被反弹回流道并到达出口,因而无法达到完全吸收的效果。

本次实验由于对流速有使用范围限制,没有对进口风速高于 3.5 m/s 的工况进行研究。

综上所述,数值模拟与实验均得出该惯性级分离装置的分离特性,实验与模拟的趋势符合,偏差较

小,符合理论分析结果。

5 结 论

从实验研究与离散相数值模拟两个方面,对燃气轮机气水分离装置中惯性级导叶的分离特性进行了考察,得出结论:

(1) 本次实验的整体分离效率较高,约为 97%,最高值达到 98.7%,最小值为 95.90%,接近模拟得出的完全分离效果。证明本次实验所使用的惯性级导叶分离特性较好。

(2) 导叶间距和初始进口速度是本次实验影响该惯性级气水分离装置分离效率的两个影响因素。当导叶间距增大时,其实验分离效果会有削弱,与模拟得出的不同间距下的趋势一致。初始进口速度增加,分离装置的分离效率增大,与模拟得到的颗粒轨迹图的变化规律吻合。

参考文献:

- [1] 石宝龙. 高性能海船盐雾分离技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
SHI Bao-long. Study of the salt mist separation technology for high-performance sea-going vessels[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [2] 王小玲. 船用发动机进气滤清装置的设计探讨[J]. 船舶工程, 1997(2): 37-41.
WANG Xiao-ling. Exploratory study of the design of inlet gas filtration and cleaning devices for marine engines[J]. Ship, 1997(2): 37-41.
- [3] 丰三民. 船用燃气轮机进气滤清装置惯性级性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院, 1992.
FENG San-min. Research of the performance of the inertial stage in the inlet gas filtration and cleaning device of a marine gas turbine[D]. Harbin: Harbin Engineering University.
- [4] 杨 静. 折板除沫分离性能研究[D]. 天津: 天津大学化工学院, 2012.
YANG Jing. Study of the foam-removal and separation performance of a baffle plate[D]. Tianjin: School of Chemical Engineering, Tianjin University, 2012.
- [5] 杜书贵, 张 虞. 船用燃气轮机进气滤清器盐雾分离效能测试方法[J]. 船舶工程, 2013(35): 75-77.
DU Shu-gui, ZHANG Yu. Method of salt mist separation efficiency for marine gas turbine intake filter[J]. Ship Engineering, 2013(35): 75-77.
- [6] 纪兵兵, 陈金瓶. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
JI Bing-bing, CHEN Jin-ping. Detailed explanations to the cases adopting the ANSYS ICEM CFD grid division technology[M]. Beijing: China Water Conservation and Hydropower Press, 2012.
- [7] 崔佃飞. 高性能船用燃机进气滤清性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
CUI Dian-fei. Study of the performance of the high performance inlet gas filter of a marine gas turbine[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.

(丛 敏 编辑)

涡轮叶片端壁表面温度相似性研究 = **Study of the Similarity of the Temperatures on the Surfaces of End Walls of Turbine Blades** [刊, 汉] WANG Xiao-chun, WANG Jian-hua, LIU Ming-xin (Department of Thermal Science and Energy Source Engineering, College of Engineering Science, China University of Science and Technology, Hefei, China, Post Code: 230027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(1). - 1 - 5

With the air film cooling characteristics of the end walls of blades in a gas turbine serving as the object of study, on the basis of meeting the similarity conditions of the fluid-solid coupled heat exchange temperature field, the authors put forward for the first time a new method for predicting the temperature distribution on the surface of the end walls cooled by the air film. Furthermore, they also believed that the conditions for the similarity of the above-mentioned end wall surface temperature field are as follows: to change the temperature of the cooling air at the inlet under the condition of maintaining a same Reynolds number and blowing air ratio in the main stream and keeping the temperature in the main stream constant or to change the temperature of the main stream under the condition of keeping the temperature of the cooling air at the inlet constant. For the first time, they adopted a quantitative method for depicting the phenomena of similarity on the fluid-solid coupled heat exchange temperature distribution chart and discovered that when the temperature of the cooling air at the inlet is kept constant at 750 K, a relatively good similarity can be obtained only when the temperature difference between the main stream and the cooling air is greater than 150 K. When the main stream temperature is kept constant at 1 700 K, a relatively good similarity can be obtained only when the temperature difference between the main stream and cooling air is greater than 250 K. The prediction method necessitates two groups of known temperature field. When the temperature difference above-mentioned between the operating condition predicted and known is in a range between -400 K and 200 K, the prediction deviation will be less than 5.5%. The use of the prediction method proposed by the authors can extremely reduce the work load and cost spent in the experimental study and numerical simulation of a complex air film cooling member.

Key Words: end wall, air film cooling, similarity atlas, similarity, numerical simulation

燃气轮机惯性级分离装置的分离特性研究 = **Study of the Separation Characteristics of the Inertial Stage Separation Device in a Gas Turbine** [刊, 汉] TAO Jian, LU Zhen-hua, GONG Wei, GE Guang-yu (Education Ministry Key Laboratory on Power Machinery and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(1). - 6 - 11

Under the operating condition of two guide blade intervals being 25 mm and 33 mm and the flow speed at the inlet being 2.5, 3.0 and 3.5 m/s respectively, a study of the salt mist separation characteristics was performed of the in-

ertial stage of a gas turbine. Firstly through the test obtained were the separation characteristic data of the inertial stage and then through a numerical simulation of the discrete phase a qualitative analysis was made of the main mechanism controlling the separation of salt content in the flow passages of the device and factors influencing the separation characteristics. A comparison of the test data with the numerical simulation ones show that the separation efficiency of the separation device in the inertial stage can reach approximately 97% the maximal value being 98.71% and the minimal value being 95.90% nearing to the full separation. To increase the guide blade interval can somewhat reduce the separation efficiency and to increase the initial speed at the inlet can somehow increase the separation efficiency. **Key Words:** inertial stage experimental study separation characteristics discrete phase numerical simulation

微通道轴向导热的拉曼测温实验研究及数值模拟 = **Experimental Study of the Raman Temperature Measurement of the Axial Heat Conduction Inside a Micro-channel and Its Numerical Simulation** [刊, 汉] LIN Ying (College of Mechanical Engineering ,Shanghai Applied Technology College ,Shanghai ,China ,Post Code: 201418) ,YU Xin-hai (Education Ministry Key Laboratory on Pressurized Systems and Safety ,College of Mechanical and Power Engineering ,East China University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200237) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(1) . -12 -18

Proposed was a method for micro-scale measuring water temperature based on the confocal microscopic Raman spectrum and used was the method in question in the convection heat transfer test of single-phase water. In combination of the test with the numerical simulation the authors studied the influence of the heat conduction in the axial direction inside a micro-channel on the heat transfer of the fluid. It has been found that the heat flux on the wall surfaces at the inlet of the micro-channel is maximal and the liquid and wall temperature all assume a nonlinear development. A singular point will locally appear on Nu number curves and its location will shift to the outlet with an increase of the Reynolds number. In addition the Nusselt number will increase with an increase of the Reynolds number. **Key Words:** micro-channel Raman spectrum axial heat conduction

双侧强化管池沸腾传热试验及数据处理方法 = **Pool Boiling Heat Exchange Experiment of a Tube Intensified at Both Sides and Its Data Processing Method** [刊, 汉] OUYANG Xin-ping ,LIN Meng ,YUAN Dao-an (Refrigeration Technology Research Institute ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(1) . -19 -23