

船舶燃气轮机惯性级滤清器含盐液滴二次夹带形成与作用机理

阎安琪¹, 刘艳明¹, 费运达¹, 王建华²

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081; 2. 中国船舶集团有限公司系统工程研究院, 北京 100094)

摘要:船舶燃气轮机进气过滤部件内含盐液滴二次夹带问题严重影响进气品质以及燃气轮机的安全运行。采用气-液两相流数值模拟方法并耦合欧拉壁面液膜模型,研究了船用惯性级滤清器内含盐液滴二次夹带的形成与作用机理及海洋环境下不同进气流速对含盐液滴二次夹带的影响规律,对比纯水液滴,分析了含盐液滴物性参数改变对惯性级内液膜分布及液滴二次夹带的影响。结果表明:相较于纯水液滴,惯性级滤清器对含盐液滴的过滤效果更好,过滤效率相对提升20.6%;惯性级内含盐液滴二次夹带的主要形式为发生在疏水钩钩峰处的液膜剥离;随着进气流速由3 m/s增大至12 m/s,疏水钩处液膜厚度先增后减,进气流速大于6 m/s时发生二次夹带,液滴从液膜上剥落重新进入流场并撞击疏水钩后的壁面,叶片上表面尾缘附近及下表面迎风侧附近液膜厚度明显增大;滤清器内液膜剥离的临界气流速度为14.6 m/s。

关键词:燃气轮机进气系统;惯性级滤清器;含盐液滴;二次夹带;液膜

中图分类号:TK473 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.06.008

[引用本文格式] 阎安琪, 刘艳明, 费运达, 等. 船舶燃气轮机惯性级滤清器含盐液滴二次夹带形成与作用机理[J]. 热能动力工程, 2025, 40(6): 72-79. YAN Anqi, LIU Yanming, FEI Yunda, et al. Formation and mechanism of saline droplet re-entrainment in inertial stage filter for marine gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(6): 72-79.

Formation and Mechanism of Saline Droplet Re-entrainment in Inertial Stage Filter for Marine Gas Turbine

YAN Anqi¹, LIU Yanming¹, FEI Yunda¹, WANG Jianhua²

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, China, Post Code: 100081;

2. System Engineering Research Institute of China State Shipbuilding Corporation, Beijing, China, Post Code: 100094)

Abstract: Saline droplet re-entrainment in marine gas turbine intake filtration components seriously affects the gas intake quality and the safe operation of gas turbines. Combining with Euler wall liquid film model, the numerical simulation method of gas-liquid two-phase flow was adopted to investigate the formation and mechanism of saline droplet re-entrainment and the influence law of different inlet airflow velocities in real marine environment on saline droplet re-entrainment in marine inertial stage filter. The effect of changes in physical property parameters of saline droplets on the liquid film distribution and droplet re-entrainment in the inertial stage was analyzed compared with pure water droplet. The results show that compared with pure water droplets, the inertial stage filter has better filter effect on saline droplets, and the filter efficiency increases 20.6% relatively. The primary form of saline droplets re-entrainment in inertial stage filter is film stripping at the peak of draining hooks. As the inlet airflow velocity in-

收稿日期:2025-02-12; 修订日期:2025-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12372228);船舶动力基础科研项目

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (12372228); Marine Power Research and Development Program

作者简介:阎安琪(2000-),女,北京理工大学硕士研究生。

通信作者:刘艳明(1976-),女,北京理工大学副教授。

creases from 3 m/s to 12 m/s, the liquid film thickness at draining hooks increases first and then decreases. Re-entrainment occurs when the inlet airflow velocity exceeds 6 m/s, some droplets fall off from the liquid film and re-enter the flow field and impact the wall behind draining hook, so the thickness of the liquid films near the trailing edge of the upper surface of the blade and near the windward side of the lower surface increases significantly. The critical airflow velocity for film stripping in the filter is 14.6 m/s.

Key words: gas turbine intake system, inertial stage filter, saline droplet, re-entrainment, liquid film

引 言

船舶在高盐的海洋环境下航行时,海面气泡在海浪的冲击下破裂生成大量含盐液滴^[1],这些液滴随气流进入燃气轮机进气系统,严重威胁燃气轮机的安全运行。为保证进气气流的洁净度和均匀性,进气系统内部常设有多级过滤部件,其中惯性级滤清器是核心过滤部件。然而,在实际应用中,由于海况的变化,不可避免地会发生含盐液滴二次夹带现象,导致过滤器效率降低,甚至失效。因此,明确含盐液滴二次夹带的形成和作用机理,对于提高过滤部件的性能及保障船舶的安全运行具有重要意义。

目前,国内外学者在研究惯性级内液滴二次夹带影响机理时发现,液滴二次夹带与气液物理性质、液膜厚度、流动特性、过滤器几何形状等因素有关^[2-5]。但由于相关因素众多且复杂,现有研究大多把液滴视为纯水液滴。而在真实海洋环境中,随气流进入进气系统内的液滴并非纯水液滴,而是以气溶胶形式游离在空气中的含盐液滴。两种液滴的密度、表面张力系数、粘性系数等物性参数不同,物性参数的改变会影响液滴在过滤部件内部的运动特性^[6],进而影响液膜的厚度以及液滴二次夹带的特性。在以往针对船舶进气过滤部件的研究中,缺乏对液滴含盐的情况下惯性级内液膜分布和二次夹带的定量分析。

本文重点研究惯性级内含盐液滴二次夹带形成与作用机理以及不同进气流速对含盐液滴二次夹带的影响规律,对比分析了含盐液滴物性参数(密度,表面张力系数,粘性系数)的改变相较于纯水液滴对惯性级内液膜分布及液滴二次夹带的影响。

1 二次液滴来源分析

文献[7-9]通过对液滴和液膜运动的分析发

现,惯性级内二次液滴的来源包括:在高速气流的作用下惯性级通道内发生的液滴破碎、液滴碰撞滤清器壁面发生的变形破碎、液滴撞击壁膜发生的飞溅以及壁膜在剪切气流的作用下造成的液膜剥落。

船舶航行时,燃气轮机进气系统的来流速度通常在 2~12 m/s 范围内,本文计算了 3,6,9 和 12 m/s 4 个不同来流速度对惯性级滤清器内二次夹带的影响。针对上述 4 种情况,取最大气流速度 12 m/s,计算得到液滴韦伯数 $We_d=0.024$,远小于发生破裂的临界条件 13;液滴撞壁临界判据 $K\approx 14.3$,远小于液滴撞击壁面发生破裂的临界条件 57.7;液滴飞溅临界判据 $We_d/C=0.044$,远小于液滴撞击液膜发生飞溅的临界条件 1。其中,基于韦伯数的飞溅判据参数 C 为:

$$C=18^2 D \left(\frac{\rho_d}{\sigma}\right)^{1/2} \left(\frac{\mu_d}{\rho_d}\right)^{1/4} \left(\frac{u_d}{2D}\right)^{3/4} \tag{1}$$

式中: ρ_d —液滴密度, kg/m^3 ; u_d —液滴速度, m/s ; σ —液滴表面张力, N/m ; D —液滴直径, m ; μ_d —液滴动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

通过数值模拟获得液膜厚度及液膜表面速度等参数,计算求得惯性级滤清器叶片沿弦长方向未出现液膜韦伯数 $We_t > 1.5$ 的区域,而疏水钩钩峰处存在 $We_t > 0.15$ 的区域。因此,根据相关临界判据^[10-14]可知,在本文研究的船舶行驶来流速度范围以及液滴为含盐液滴的条件下,惯性级内二次液滴的来源为气流剪切液膜导致的液膜剥离,并且液膜剥离仅发生在疏水钩钩峰处。

2 计算模型与方法

2.1 模型设置

以某船用双钩惯性级叶片为研究对象,叶片模型及其几何参数如图 1 所示,其中疏水钩钩峰处由红色实线圈出。叶片沿 y 轴周期性放置,相邻叶间距为 50 mm。惯性级滤清器的几何结构如图 2 所

示。该滤清器由一系列叶片单元组成,由于各叶片间的流道具有相同的几何参数,因此,为了节省计算资源,选取单一流道开展研究。

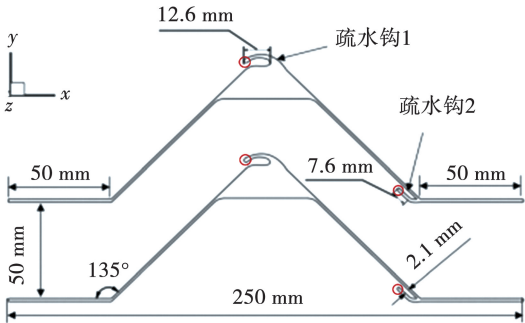


图 1 惯性级滤清器叶片几何模型

Fig.1 Geometry model of inertial stage filter blade

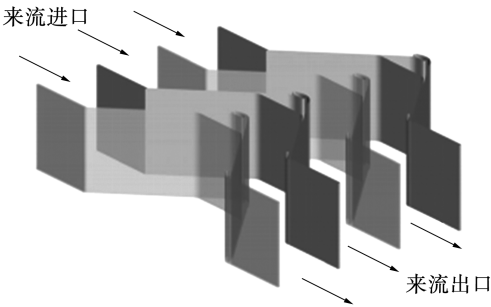


图 2 惯性级滤清器几何结构

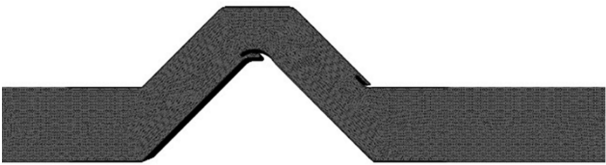
Fig.2 Geometry structure of inertial stage filter

2.2 数值方法

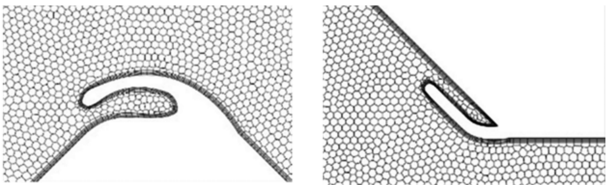
本文基于 Ansys Fluent 平台,采用离散相模型 (DPM) 耦合欧拉壁面液膜模型 (EWF) 求解含盐液滴撞击壁面形成液膜以及二次夹带的过程。采用六面体网格生成方式,制定网格数分别为 70 万、170 万、270 万和 580 万 4 种不同尺寸的网格方案,以验证网格无关性。惯性级滤清器网格划分如图 3 所示。进气流速为 12 m/s 时惯性级进出口面压力损失随网格数变化如图 4 所示。由图 4 可知,当网格数大于等于 170 万时,压力损失趋于平稳。综合考虑计算资源与求解精度等因素,最终选择 170 万网格进行后续计算。

计算域边界条件设置如图 5 所示。计算域的入口设为速度入口,出口设为压力出口。惯性级叶片设为无滑移壁面,计算域的进出口延伸部分设为周期性边界。液相设为直径均匀的球形水滴,以与气

相相同的速度从进口均匀注入,质量流率为 0.008 kg/s。将进、出口的 DPM 边界条件设为逃逸,液滴流过该表面时识别为从滤清器逸出。将滤清器叶片的 DPM 边界条件设为捕捉,即液滴撞击叶片表面后被捕捉。



(a) 惯性级滤清器z方向中间截面



(b) 疏水钩近壁面

图 3 惯性级滤清器网格划分

Fig.3 Grid division of inertial stage filter

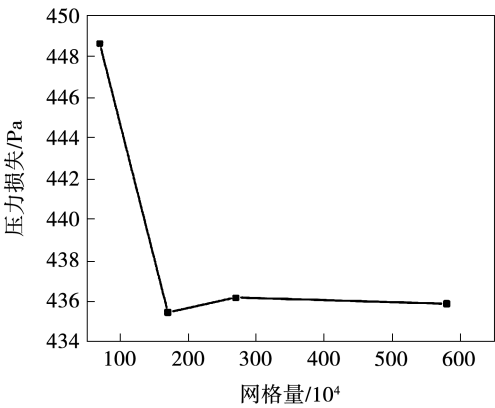


图 4 网格无关性验证

Fig.4 Grid independence verification

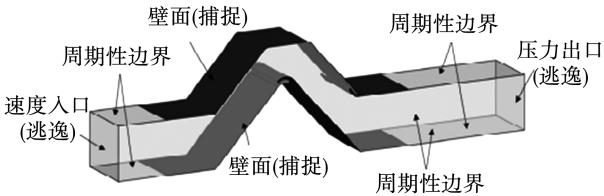


图 5 计算域边界条件设置

Fig.5 Boundary condition setting of computational domain

含盐液滴设置为常温常压条件下的海水液滴,相关物性参数如表 1 所示。

表 1 海水液滴与纯水液滴物性参数

Tab.1 Physical property parameters of seawater droplets and pure water droplets

参 数	海水	纯水
密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 025	998.2
表面张力系数/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	0.072 81	0.072 75
粘性系数/ $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$	0.001 2	0.001 0

2.3 算例验证

为了验证计算方法的可靠性,将不同来流速度工况下,惯性级进出口压降的数值计算结果与文献[15]进行比较,结果如图 6 所示。由图 6 可知,仿真结果与实验数据变化趋势基本一致,验证了本文所采用的数值模型的准确性及可靠性。

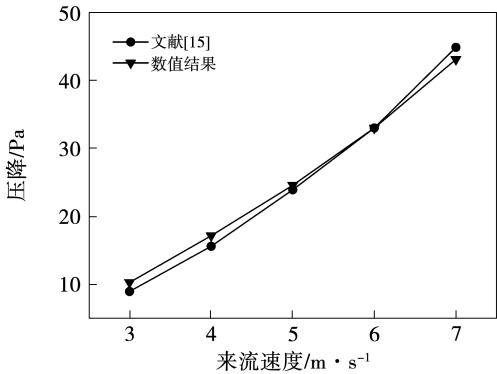


图 6 变流速下惯性级进出口压降结果对比
Fig.6 Comparison of inlet and outlet pressure drop results of inertial stage at variable flow velocity

2.4 方案设计

针对惯性级内含盐液滴二次夹带问题,重点研究二次夹带的关键影响参数进气流速对液膜分布及二次夹带的影响规律。为了比较含盐液滴物性参数改变对惯性级内流场结构及二次夹带的影响,选取海水和纯水两种液滴在进气流速 v 为 12 m/s 的相同工况下的结果进行对比分析。最终确定设计方案如表 2 所示。

表 2 惯性级滤清器方案设计

Tab.2 Inertial stage filter scheme design

方案	液滴类型	进气流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	液滴直径/ μm
1	海水	3	10
2	海水	6	10
3	海水	9	10
4	海水	12	10
5	纯水	12	10

3 结果与分析

3.1 流场结构分析

针对气相流场,图 7 为不同液滴类型下,滤清器在 z 方向中间截面的速度分布、湍动能分布以及湍流耗散率分布。

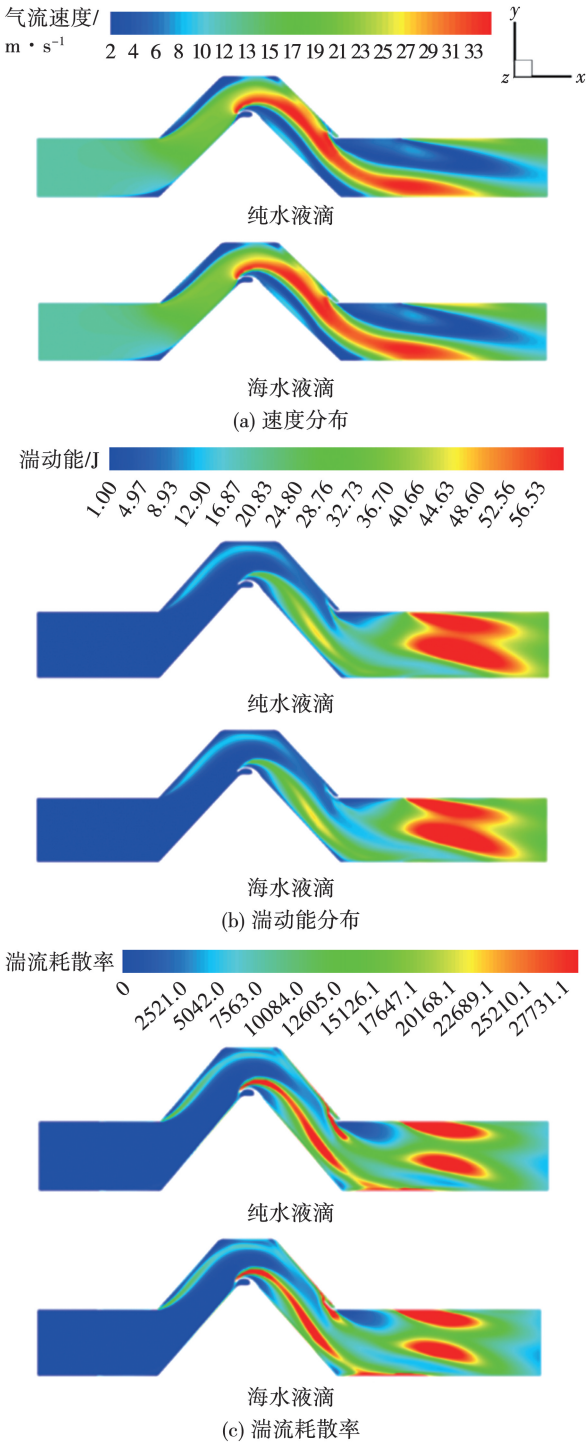


图 7 惯性级滤清器 z 方向中间截面分布云图 ($v=12\text{ m/s}$)
Fig.7 Contours of distribution on middle section of inertial stage filter in z -direction ($v=12\text{ m/s}$)

由图 7 可知,含盐液滴条件下的惯性级内部流场结构与纯水液滴的分布规律基本一致。分析原因可知,在本文的实际工程背景下,船舶工作的海洋环境中液滴占比较小,且滤清器进气流速整体较低,因此液滴含盐对气相流场产生的影响不显著。

针对液相流场,如图 8 绘制了方案 4 和方案 5 叶片上、下表面的液膜厚度云图。

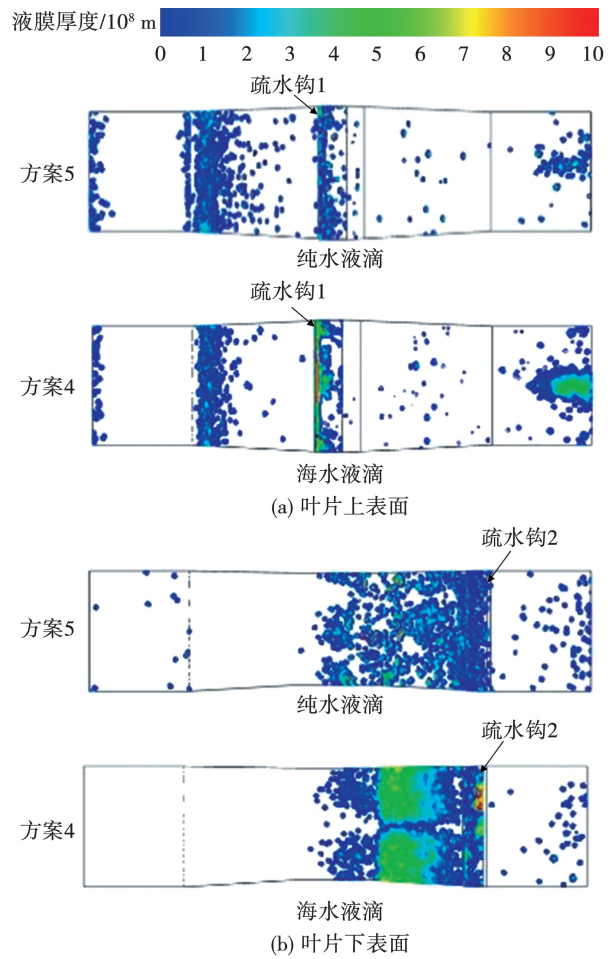


图 8 惯性级滤清器叶片液膜厚度分布云图
Fig.8 Contours of liquid film thickness distribution on the blade of inertial stage filter

由图 8 可以看到,进气流速相同时,两种液滴形成的液膜厚度分布趋势基本一致,叶片上、下表面均在疏水钩位置达到液膜厚度峰值,且出现二次夹带。液滴从液膜上脱落重新进入流场,撞击疏水钩后的叶片上表面尾缘以及下表面迎风侧壁面,导致这两个位置液膜厚度增大。

两种方案下的液膜剥离质量和过滤效率如表 3 所示。惯性级滤清器的过滤效率为被捕获液滴质量流量与进入滤清器液滴质量流量之比。由表 3 可

知,相较于纯水液滴,惯性级滤清器对含盐液滴的过滤效果更好,过滤效率提升 20.6%。一方面是因为液滴含盐后密度增加,气液两相间密度差增大,使液滴更容易受惯性力作用撞击壁面被捕集;另一方面是因为含盐液滴表面张力和粘性大,液膜更稳定。方案 4 在疏水钩 1 和疏水钩 2 处的液膜剥离质量均小于方案 5,说明在相同来流速度的工况下,惯性级滤清器内含盐液滴更不易发生二次夹带。

表 3 两种方案下液膜剥离质量和过滤效率
Tab.3 Liquid film stripping mass and filter efficiency in two cases

方案	液膜剥离质量/ 10^{-10} kg		过滤效率/%
	疏水钩 1	疏水钩 2	
4	1.38	3.65	46.4
5	12.60	9.72	25.8

3.2 二次夹带机理研究

3.2.1 不同进气流速对液膜厚度分布及二次夹带的影响

含盐液滴二次夹带与液膜的厚度以及分布位置密切相关,因此首先分析叶片表面液膜厚度的分布特性。沿惯性级叶片弦长方向,每间隔 0.01 m 监测不同进气流速下惯性级叶片沿弦长方向相对位置的液膜厚度分布,如图 9 所示。图中横坐标 x/l 表示惯性级叶片沿弦长方向的相对位置,其中 x 表示叶片沿弦长方向位置, l 表示叶片弦长;纵坐标 H^* 为无量纲液膜厚度, $H^* = h/D$,其中 h 为液膜厚度, D 为液滴直径。由图 9 可以看到,无论是否发生二次夹带,液膜厚度在叶片表面的分布和变化趋势均未发生明显改变,滤清器捕集液滴的壁面主要为 $x/l = 0.24$ 附近(图 9(a),对应叶片上表面第一个弯折处)、 $x/l = 0.46$ 附近(图 9(a),对应疏水钩 1)、 $x/l = 0.9$ 附近(图 9(a),对应叶片上表面尾缘)、 $x/l = 0.6$ 附近(图 9(b),对应叶片下表面迎风侧)以及 $x/l = 0.76$ 附近(图 9(b),对应疏水钩 2)。随着进气流速的不断增大,疏水钩位置液膜厚度呈现先增后减的变化趋势。疏水钩处液膜厚度在进气流速由 3 m/s 增大至 6 m/s 时逐渐增加,当进气流速继续增大时,疏水钩表面液膜厚度逐渐回落。当进气流速大于 6 m/s 时,开始发生二次夹带现象,液滴受到气流剪切作用从液膜上脱落重新进入流场,撞击疏水

钩后的叶片上表面尾缘($x/l=0.9$)以及下表面迎风侧($x/l=0.7$)壁面,相较于未发生二次夹带的工况,发生二次夹带工况的叶片上表面尾缘附近以及下表面迎风侧附近液膜厚度明显增大。

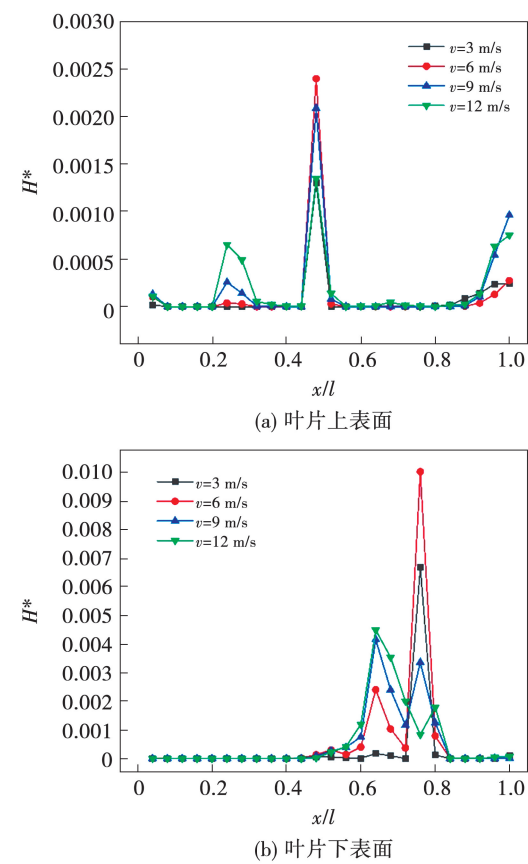


图 9 不同进气流速下惯性级滤清器叶片沿弦长方向液膜厚度分布

Fig.9 Distributions of liquid film thickness along chord length of inertial stage filter blade under different inlet airflow velocities

为进一步研究液滴二次夹带对疏水钩表面液膜厚度分布的影响,对比分析发生二次夹带的方案 4 与未发生二次夹带的方案 2 疏水钩处的液膜厚度分布,如图 10 所示。由图 10 可知,受滤清器几何结构的影响,气流速度在叶片疏水钩钩峰位置达到峰值,然而在低进气流速下,峰值速度仍低于该位置液膜受气流剪切破裂的临界速度值,因此钩峰位置液膜分布完整且厚度较大(图 10(b))。而在高进气流速下,气流剪切导致液膜破裂产生二次液滴,气流剪切程度最剧烈的位置为疏水钩钩峰处(图 10(a))。

图 11 为方案 2 和方案 4 惯性级叶片沿弦长方向相对位置的液膜韦伯数分布。可以看出,方案 4

的液膜韦伯数整体大于方案 2,且仅有方案 4 的 $x/l=0.46$ 附近(图 11(a),对应疏水钩 1)以及 $x/l=0.76$ 附近(图 11(b),对应疏水钩 2) $We_l > 0.15$ 。而方案 2 疏水钩处液膜韦伯数虽大于叶片其余部位,但仍未达到发生二次夹带的条件。相较于方案 2,方案 4 在叶片上表面尾缘 $x/l=0.9$ 附近以及下表面迎风侧 $x/l=0.7$ 附近液膜韦伯数较大。这是由于相较于未发生二次夹带的工况,发生二次夹带工况的叶片上表面尾缘附近以及下表面迎风侧液膜厚度较大,导致液膜韦伯数也较大。

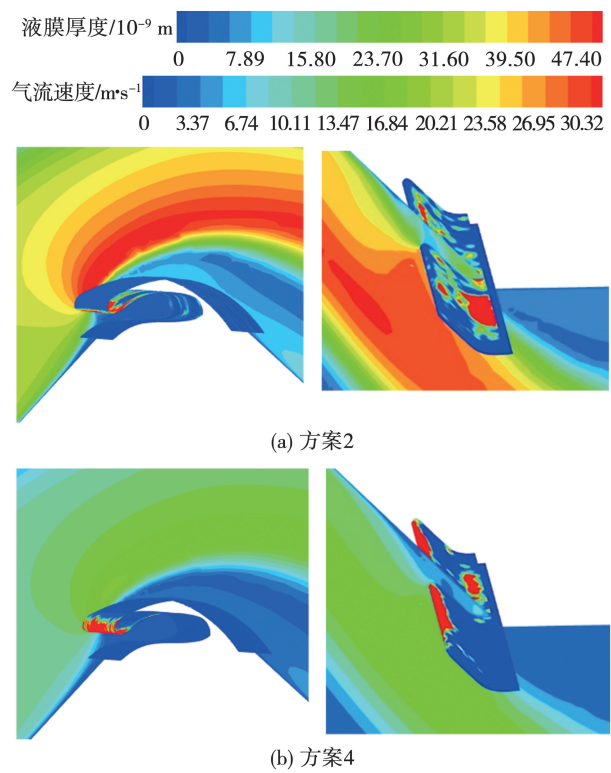
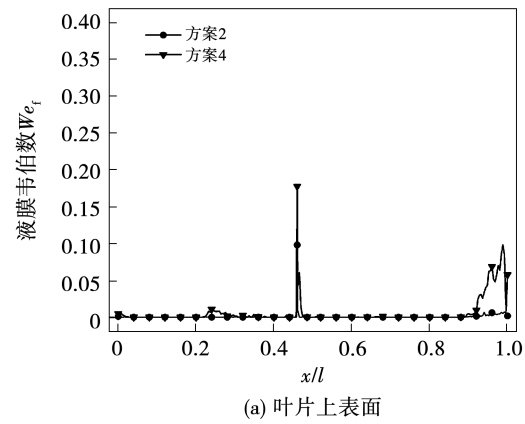


图 10 方案 2 和方案 4 疏水钩处液膜厚度分布对比

Fig.10 Comparison of liquid film thickness distributions between case 2 and case 4 at draining hooks



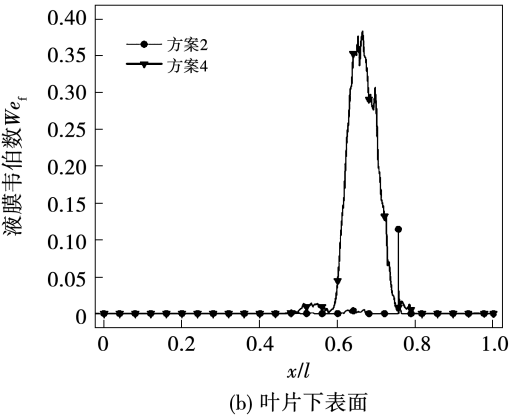


图 11 方案 2 和方案 4 惯性级叶片沿弦长方向液膜韦伯数分布

Fig. 11 Distributions of liquid film Weber number along chord length of inertial stage blade between case 2 and case 4

3.2.2 液膜剥离临界气流速度分析

从方案 3 开始出现惯性级滤清器内含盐液滴二次夹带现象,因此通过分析方案 3 可得到惯性级滤清器内液膜剥离的临界气流速度。方案 3 对应的疏水钩处液膜剥离质量分布如图 12 所示。由图 12 可知,疏水钩钩峰位置液膜剥离质量呈规则带状分布,带状边界将疏水钩钩峰分为无液膜剥离和液膜剥离两个区域。因此,通过确定疏水钩 1 和疏水钩 2 的带状边界 1 和带状边界 2 处液膜表面流速 V_{b1} 和 V_{b2} 即可确定疏水钩液膜剥离的临界风速。

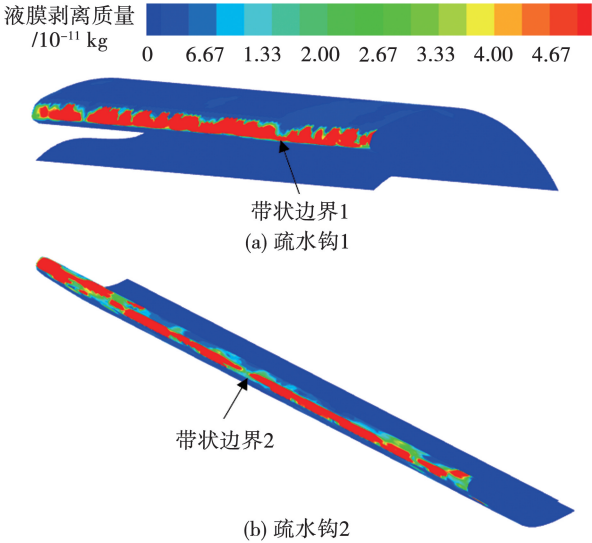


图 12 疏水钩处液膜剥离质量分布

Fig. 12 Liquid film stripping mass distributions at draining hooks

疏水钩钩峰处沿叶片高度方向,即 z 方向的液膜表面气流速度 V_{b1} 和 V_{b2} 如图 13 所示。图中横坐标 z/H_b 表示沿惯性级叶片高度方向的相对位置,其中 z 表示叶片沿高度方向位置, H_b 表示叶片高度。由图 13 可知,疏水钩 1 处来流均匀,因此 V_{b1} 变化较平缓。而疏水钩 2 位于流道下游,受几何结构扰动影响较大,流动愈发紊乱,因此 V_{b2} 沿叶片高度方向波动范围较大。通过对 V_{b1} 和 V_{b2} 的最小值进行比较,得到液膜剥离边界速度的最小值为 14.6 m/s,即惯性级滤清器内液膜剥离的临界气流速度为 14.6 m/s。

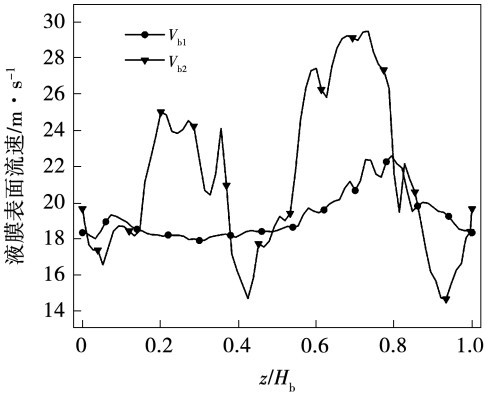


图 13 沿叶片高度方向液膜表面气流速度

Fig. 13 Airflow velocity on liquid film surface along blade height direction

不同进气流速对应叶片疏水钩位置近壁面最大流速如图 14 所示。由图 14 可知,在进气流速 $V = 3$ 和 6 m/s 时,疏水钩近壁面速度最大值小于上述液膜剥离的临界气流速度 14.6 m/s,因此该工况下不会发生液膜剥离现象,与数值计算结果一致。

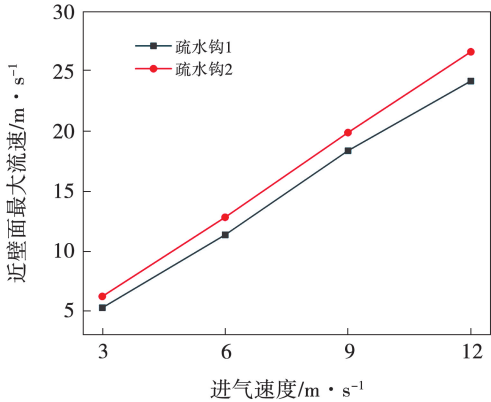


图 14 不同进气流速对应疏水钩近壁面最大流速

Fig. 14 Maximum airflow velocity near the wall of draining hooks under different inlet airflow velocities

4 结 论

本文采用气 – 液两相流数值模拟方法并耦合欧拉壁面液膜模型对惯性级滤清器内含盐液滴二次夹带形成与作用机理进行了研究,具体结论如下:

(1) 相较于纯水液滴,惯性级滤清器对含盐液滴的过滤效果更好,过滤效率提升了 20.6%。这是由于液滴含盐后密度增加,使液滴更易受惯性力作用撞击壁面形成壁膜,同时含盐液滴表面张力和粘性较大,形成的壁膜更稳定,不易发生二次夹带。

(2) 惯性级滤清器仅在进气流速大于 6 m/s 时发生二次夹带,其主要形式为液膜剥离,且液膜剥离仅发生在疏水钩钩峰处。

(3) 随着进气流速由 3 m/s 增大至 12 m/s,疏水钩位置液膜厚度呈先增后减的趋势。二次夹带发生后,疏水钩液膜厚度逐渐回落,液滴受到气流剪切从液膜上脱落重新进入流场并撞击疏水钩后的壁面,叶片上表面尾缘附近及下表面迎风侧附近液膜厚度明显增大。滤清器内液膜剥离的临界气流速度为 14.6 m/s。

参考文献:

[1] WOOLF D K. The sea surface and global change: Bubbles and their role in gas exchange[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

[2] FEI Yunda, WANG Jianhua, LIU Yanming, et al. Study on characteristics and mechanism of re-entrainment in intake filtration components of the gas turbine[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2024, 19: 1 – 17.

[3] KASATKIN I, EGOROV M, RAKOV N. Numerical investigation of a moisture wave-type vane separator[J]. E3S Web of Conferences, 2019, 140: 06011.

[4] LI Shunyang, WANG Pengfei, LUO Xiangyu, et al. Numerical analysis of chevron demisters with drainage hooks in optimizing separation performance [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 152: 119522.

[5] MAO Feng, TIAN Ruifeng, CHEN Yixuan, et al. Re-entrainment in and optimization of a vane mist eliminator[J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, 120: 656 – 665.

[6] 刘晓华,赵一鸣,王开珉,等. 粘性力和表面张力对液滴撞击超疏水管壁动力学特性的影响研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 1 – 7.

LIU Xiaohua, ZHAO Yiming, WANG Kaimin, et al. Research on effect of viscosity force and surface tension on dynamic characteristics of droplet impact on super-hydrophobic tube[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(10): 1 – 7.

[7] 杨雪龙,王 永,冯 靖,等. 单钩波形板分离器内二次携带机理分析[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(5): 805 – 811.

YANG Xuelong, WANG Yong, FENG Jing, et al. Analysis of re-entrainment mechanism in single-hooked wave-plate separator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(5): 805 – 811.

[8] 张 博,巩时尚,何远正. 除雾器内二次携带液滴的数值模拟[J]. 发电设备, 2019, 33(1): 1 – 5.

ZHANG Bo, GONG Shishang, HE Yuanzheng. Numerical simulation of the re-entrainment phenomenon in a demister[J]. Power Equipment, 2019, 33(1): 1 – 5.

[9] 毛 峰. 波形板干燥器分离特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.

MAO Feng. Study on separation characteristics of corrugated plate dryer[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.

[10] NAKAO T, NAGASE M, AOYAMA G, et al. Development of simplified wave-type vane in BWR steam dryer and assessment of vane droplet removal characteristics[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1999, 36(5): 424 – 432.

[11] BRANDRISS M E, O’NEIL J R, EDLUND M B, et al. Multi-dimensional modeling of thin liquid films and spray-wall interactions resulting from impinging sprays[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(20): 3037 – 3054.

[12] STANTON D W, RUTLAND C J. Multi – dimensional modeling of thin liquid films and spray wall interactions resulting from impinging sprays[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41: 3037 – 3054.

[13] PARK K, WATKINS A P. Comparison of wall spray impaction models with experimental data on drop velocities and sizes[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1996, 17(4): 424 – 438.

[14] OWEN I, RYLEY D J. The flow of thin liquid films around corners [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1985, 11: 51 – 62.

[15] LIU Yilin, YU Dunxi, JIANG Jingkai, et al. Experimental and numerical evaluation of the performance of a novel compound demister[J]. Desalination, 2017, 409: 115 – 127.

(刘 颖 编辑)