

双钩波形板汽水分离器的数值研究

伍文明¹, 郑晓敏¹, 何开俊¹, 黄南云², 夏 潘², 贺 铸²

(1. 湖北迪峰换热器股份有限公司, 湖北 黄石 435106; 2. 武汉科技大学材料学部, 武汉 430081)

摘要: 对两种不同疏水钩结构的双钩波形板汽水分离器进行了数值研究, 运用计算流体力学方法构建了波形板内部的气液两相流动模型。采用剪切应力输运 k - ω (k - ω SST) 模型和离散相 (DPM) 模型, 在不同入口速度条件下, 对两种波形板的分离效率和压降进行了对比分析。结果表明: 大粒径液滴在惯性作用下会撞击分离器壁面直接被分离, 而小粒径液滴其惯性力较小, 运动轨迹与主流相近, 会随主流一起运动, 难以被捕捉; 疏水钩结构会产生一定的涡流, 从而对流场的局部气流流速有一定的影响, 主流气相会带入一部分液滴, 增加其脱除效率; 当 SH 型和 N 型波形板入口速度分别大于 4 m/s 和 6 m/s 时, 粒径大于 8 μm 的液滴的分离效率能达到 100%; 当两种波形板的总体分离效率达到 84% 时, N 型波形板损失的能量约为 SH 型波形板的 2 倍。综合对比了两种双钩波形板汽水分离器的压降和分离效率, 对其结构的异同、性能的优劣进行了综合分析。

关键词: 汽水分离器; 疏水钩; 波形板; 压降; 分离效率; 数值模拟

中图分类号: O359.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)04-0064-07

在工业生产过程中, 蒸汽的净化与分离是一个至关重要的环节, 直接关系到生产设备的运行效率、产品质量以及能源消耗。随着科技的进步和工业化进程的加速, 对蒸汽净化技术的要求也日益提高。波形板汽水分离器作为一种高效、紧凑的蒸汽净化设备, 在核电站^[1]、烟气脱硫^[2]、石油化工^[3]等领域得到广泛应用。尤其是随着核电站对蒸汽品质的要求越来越高, 很有必要开展波形板汽水分离器运行特性和性能优化的研究。

研究发现, 波形板汽水分离器的性能受到的板间距、折弯角度、每级的级数和长度等参数的显著影响^[4-8]。由于液滴的惯性, 液滴无法在弯道处改变方向, 导致液滴沉积在波形板表面上形成液膜, 在实践中, 沉积的液体可以在弯道处收集, 但可能被重新夹带到气流中, 导致液滴收集效率的降低。为了克服这个问题, 在沉积液体可能积聚的位置引入疏水钩, 以防止再次夹带^[9]。于是更多的国内外研究者开始关注带有疏水钩结构的波形板汽水分离器, 最早对波形板汽水分离器的研究主要是通过实验手段开展的。James 等^[10]研究了疏水钩对理想波形板汽水分离器性能的影响, 结果表明单钩波形

板分离器较无钩波形板分离器的分离效率提高了 25.00%, 但压降增 117.1 Pa; Wang^[11]和 Li 等^[12]通过冷态试验证明疏水钩结构能明显提高分离效率, 在试验范围内双钩波形板的压降最小; 徐旭辉等^[13]通过冷态试验研究了在不同入口湿度和速度条件下双钩波形板不同区段的疏水量。

近年来, 随着计算机技术的成熟, 数值模拟成为波形板汽水分离器研究的主要手段之一。许多的学者通过不同的湍流模型和细化近壁面处理对波形板汽水分离器进行了大量研究。Liu 和 Qu^[14]对无钩、单钩和双钩波形板进行了对比分析, 结果表明单钩波形板分离器分离效率最高, 但压降最大; 杜利鹏等^[15]研究了双钩波形板分离器的疏水钩结构尺寸对分离器分离效率的影响, 结果表明增加疏水钩的长度和宽度能明显提高较小粒径液滴的分离效率; 朱雁凌等^[16]研究了三种不同类型疏水钩的波形板分离器, 得到综合性能良好的双钩波形板分离器构型; 李茹等^[17]分析了双钩波形板临界流速的冷热态转换关系; 买丹婕等^[18]在不同工况下研究了堵塞沉积对双钩波形板运行特性的影响。

目前通过数值模拟进行的研究中, 多数使用的

收稿日期: 2024-09-09

作者简介: 伍文明(1987—), 男, 湖北大冶人, 硕士, 工程师, 研究方向为除雾装置的设计与优化; 郑晓敏(1984—), 女, 湖北天门人, 工程师, 研究方向为化工过程机械; 何开俊(1992—), 男, 湖北鄂州人, 工程师, 研究方向为机械结构设计; 黄南云(2000—), 女, 江西景德镇人, 硕士研究生, 研究方向为流体运动的物理神经网络方法; 夏潘(2002—), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 研究方向为内嵌物理神经网络方法; 通信作者贺铸(1979—), 男, 湖南望城人, 博士, 教授, 研究方向为多相流数值模拟与模型。

湍流模型为标准 k -epsilon 模型,而最新研究测试了剪切输运力 k -omega (k -omega SST) 和标准 k -epsilon 模型的性能,结果表明 k -omega SST 比标准 k -epsilon 模型表现的性能更好^[19]。本文基于双钩波形板汽水分离器,通过 Fluent 软件进行数值模拟,使用 k -omega SST 湍流模型,对两种不同疏水钩结构的波形板内部流场和液滴的运动轨迹进行分析,并对分离效率和压降进行综合分析后通过对比 $u_m \Delta p$ 与总体分离效率关系来评价两者的综合性能,旨在为更不同结构波形板使用的合理性提出建议和提供一种衡量其综合性能的考虑方向。

1 模型建立与验证

1.1 几何模型与物理描述

通过数值模拟对比研究 SH 型^[16]和 N 型双钩波形板汽水分离器,模型的几何结构如图 1 所示。采用空气-水的汽液系统,空气和水的性质从 fluent 软件材料库中获取,空气密度为 1.225 kg/m^3 ,黏度为 $1.79 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$;水密度为 998.2 kg/m^3 ,黏度为 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

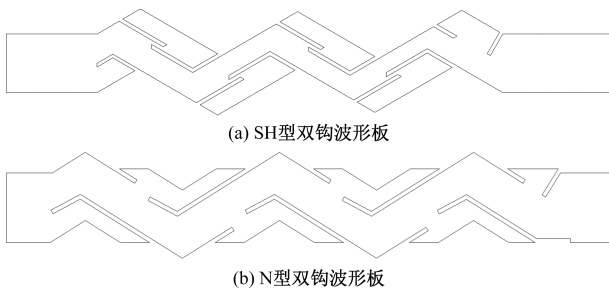


图 1 两种波形板的几何结构

将模型简化,提出以下假设:①由于波形板的高度远大于长度和宽度,因此将波形板简化成二维模型;②采用离散相模型,其中空气为连续相,水滴为离散相,忽略二次夹带,认为水滴接触壁面时被捕获;③流动过程为稳态,气相不可压缩;④忽略液滴间的相互作用;⑤忽略温度对流动过程的影响。

1.2 数值模型与控制方程

波形板内流场为湍流,采用剪切应力输运 k -omega (即 k -omega SST) 湍流模型^[20],该模型为二阶方程湍流模型,综合 k -omega 模型和 k -epsilon 模型优点,对壁面流固分离有较高计算精度。入口和出口分布为流速和压力边界,求解器方法选用 Coupled 方法,采用二阶迎风格式,控制方程的残差设置为 1×10^{-7} 。

控制方程采用连续性方程和二维不可压缩雷诺时均 Navier-Stokes 方程,分别为

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial t} + \frac{\partial \mu_i \mu_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} - \mu'_i \mu'_j \right) \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; ν 为运动黏度, m^2/s ; $i, j = 1, 2$ 。

忽略液滴对连续相流场的影响,在得到波形板的气相流场后,通过离散相(DPM)模型对液滴的运动分离行为进行数值模拟。进出口与壁面的离散相边界条件分别设置为逃逸和捕获。离散相运动的控制方程^[21]为

$$\frac{du_d}{dt} = F_D(u - u_d) + \frac{g(\rho_d - \rho)}{\rho_d} + F \quad (3)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_d D_d^2} \frac{C_D \text{Re}}{24} \quad (4)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}} + \frac{a_3}{\text{Re}^2} \quad (5)$$

式中: t 为时间, s ; F_D 为液滴的单位质量拖曳力, N ; F 为液滴所受的附加作用力, N ; u 为气相流速, m/s ; u_d 为液滴流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ρ_d 、 ρ 为液滴和气相密度, kg/m^3 ; μ 为气相动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; Re 为相对雷诺数; C_D 为拖曳力系数; a_1 、 a_2 、 a_3 为常数。

1.3 网格划分与无关性验证

通过 Ansys Mesh 对波形板二维模型进行网格划分,由于波形板疏水钩结构中存在锐角,因此采用四边形-三角形混合网格,其适应性更好,计算结果也更准确。对近壁面处的网格进行加密处理,通过调整 $y^+ \approx 1$ ^[20] 细化近壁面处的网格,设置第一层网格高度为 0.064 mm ,边界层数为 3。

入口速度为 2 m/s 时,SH 型波形板的压降和出口截面平均流速与网格数目的关系如图 2 所示。当网格数目大于 12 万时,计算结果相差不大,压降和出

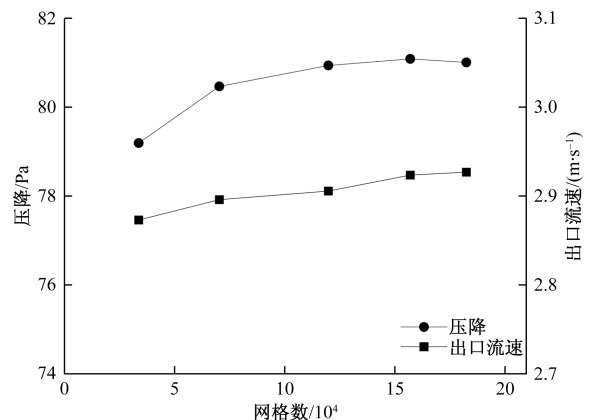


图 2 网格无关性验证

口流速随网格数量增加的变化量均小于 1%，考虑到计算能力等因素，故选取网格数量约为 15.6 万。

1.4 模型验证

通过与 GHETTI^[22]测得的单钩波形板实验数据和 GALLETTI 等^[23]的 CFD 模拟结果进行对比，以此验证模型的准确性。给定粒径的分离效率 η 的计算公式为

$$\eta = \frac{1 - N_{\text{escape}}}{N_{\text{track}}} \quad (6)$$

式中： N_{escape} 为逃逸的液滴数； N_{track} 为追踪的液滴总数。

入口速度为 3 m/s 时，单钩波形板的数值模拟结果与参考文献结果对比如图 3 所示。由图 3 可知，数值模拟结果与参考文献结果相吻合经计算最大相对误差为 9.16%，说明本文所用模型的合理与可靠性。

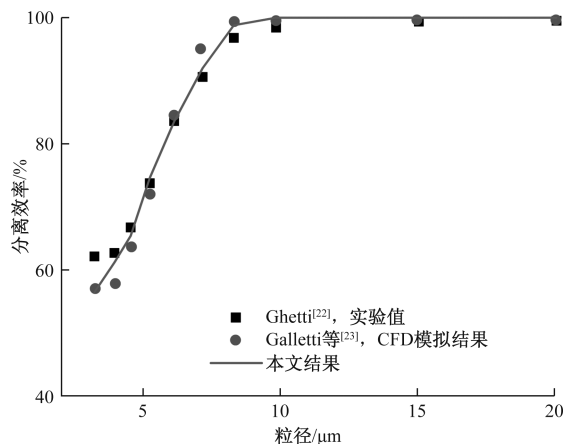


图 3 数值模拟与文献结果对比

2 结果与分析

2.1 气体流场分析

当入口速度为 2 m/s 时，SH 型和 N 型波形板内部的速度云图如图 4 所示。从图 4 中可以看出，疏水钩结构处通道的有效流通面积减小，增加了局部流速，形成了局部高速区。在疏水钩入口的后端及其弯道处的速度峰值呈上升趋势，最大速度出现在最后一个弯道附近。这些高速区会对液滴轨迹产生很大的影响，导致液滴在疏水钩及其弯道处沉积而被收集。

值得注意的是，图 4 还显示流场中存在较多的低速区，这些低速区出现在疏水钩、弯道附近以及通道内从弯道到弯道的直线区，这些低速区都表现为再循环区域形成涡流，局部速度矢量如图 5 所示。此外由于 N 型波形板疏水钩入口宽度更

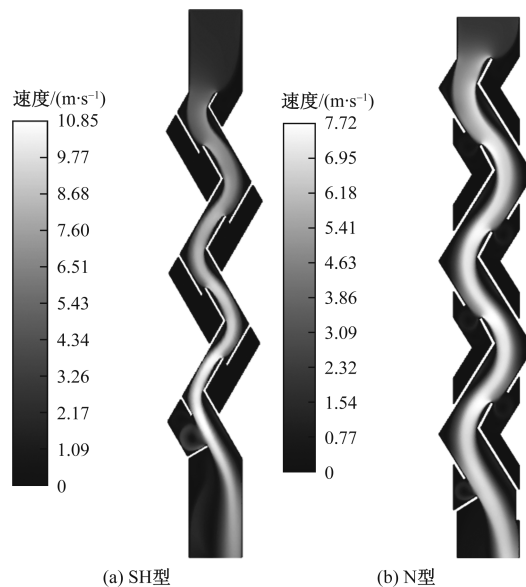


图 4 波形板内的速度云图

大，气流更容易进入疏水钩，疏水钩内部的涡流更明显。

2.2 液滴运动轨迹

波形板汽水分离器中气-液两相的分离主要受惯性作用，气相和液相因密度的不同而导致惯性力不同。当速度剧烈变化时，由于惯性大，液相不能及时改变运动方向，会径直撞向壁面，从而被收集。因此，速度的频繁变化有利于气液分离。

根据 Nakao 等^[24]对波形板内液滴运动的受力分析，液滴的运动行为计算公式为

$$F_I / F_D \propto \frac{\rho_d D_d^2 u_d^2}{18 \mu r_d (u - u_d)^2} \quad (7)$$

式中： F_I 为液滴惯性力，N； r_d 为液滴运动轨迹的曲率半径，m。

由式(7)可知，当液滴直径越大时，惯性力作用越显著；当液滴运动速度越大、轨迹曲率半径越小时， F_I / F_D 越大，液滴越容易分离。疏水钩的存在增加了拐弯处的局部流速，同时，疏水钩的物理阻挡作用减小了液滴运动的曲率半径，使得惯性力作用相对于拖曳力作用更加明显，从而增强了分离效果。

当入口流速为 2 m/s 和 6 m/s 时两种波形板内不同粒径液滴的运动轨迹如图 6 和图 7 所示。由图 6 和图 7 可知，大粒径液滴主要受惯性力控制，在流场中运动时容易脱离气相主流，从而撞向壁面；小粒径液滴惯性力较小主要受拖曳力控制，容易随气相主流运动，难以碰撞壁面被捕获。

从图 6 和图 7 中可以看出，疏水钩结构对液滴的运动行为有着影响，一方面疏水钩结构形成的局

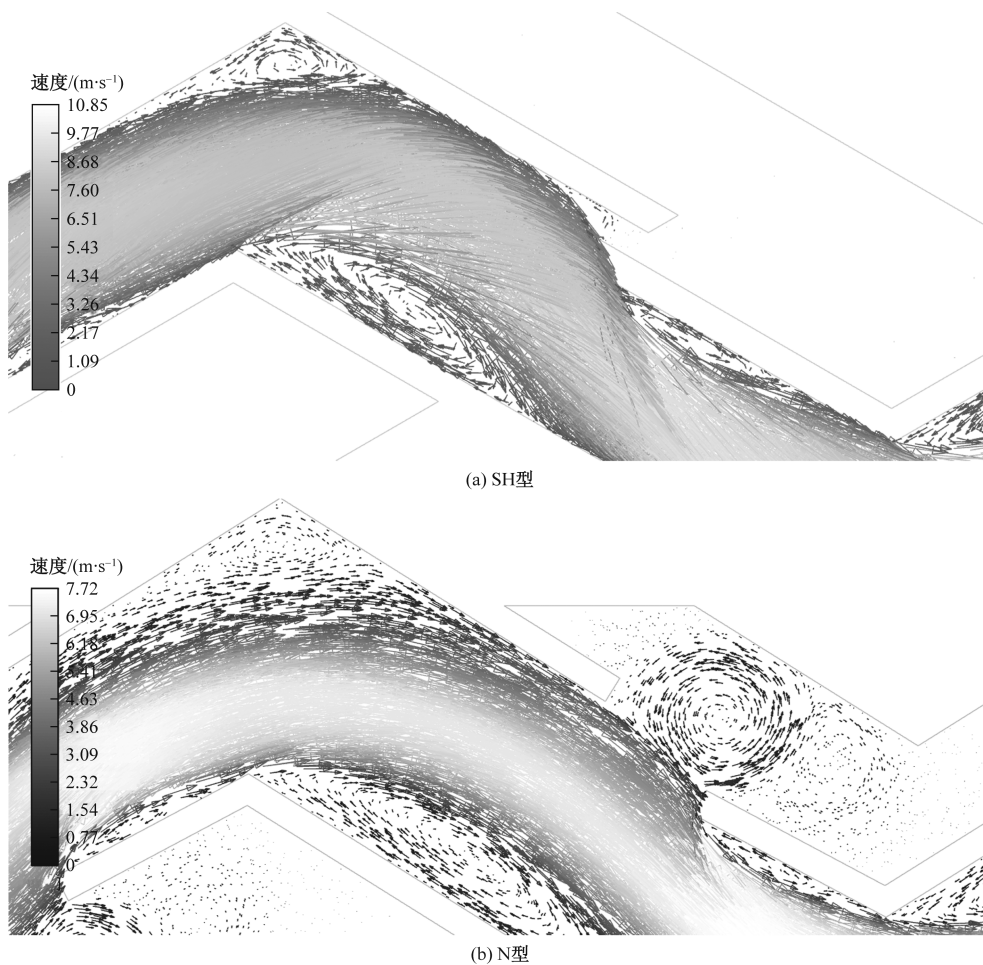


图5 流场局部速度矢量

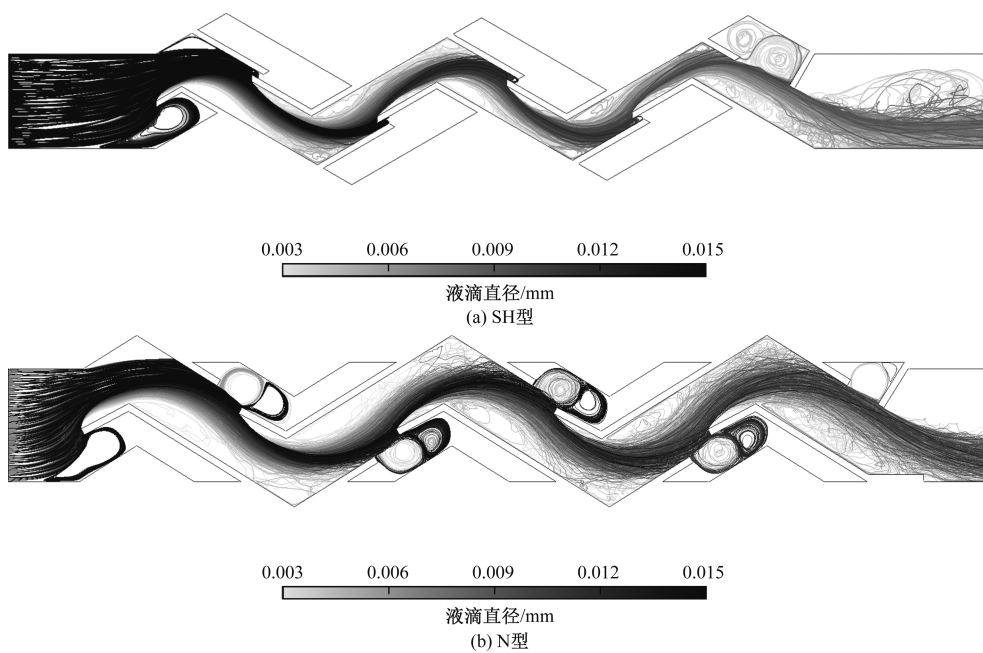


图6 入口速度为 2 m/s 时不同粒径液滴的运动轨迹

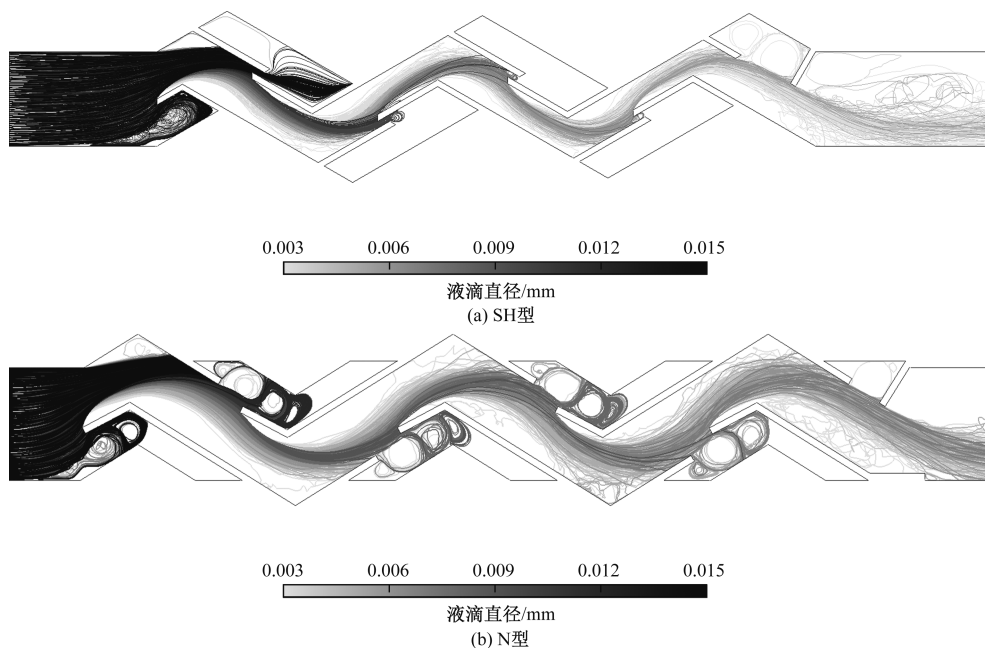


图 7 入口速度为 6 m/s 时不同粒径液滴的运动轨迹

部高速区导致大量液滴在疏水钩后端迎风面处沉积,主要是大粒径液滴;另一方面,疏水钩结构形成的涡流卷吸了许多小粒径液滴进入疏水钩,不过正如前文所述,由于 SH 型波形板疏水钩入口宽度较小,小粒径液滴随主流运动不易进入其疏水钩。

当入口速度不同时,对比波形板内液滴的运动轨迹可以发现,速度增大,液滴所受惯性作用增强,更难以随气流流动改变方向,导致大粒径液滴会在流道内更前段碰撞壁面;同时,速度增大导致气流湍流扩散效应增强,液滴运动轨迹的发散状态更加显著,增大了小粒径液滴与壁面的碰撞概率;此外,速度增大导致疏水钩内部的涡流增加,更多的小粒径颗粒被涡流卷吸进入疏水钩。

2.3 分离效率

当入口流速为 2 m/s、4 m/s、6 m/s 和 8 m/s, SH 型和 N 型波形板分离效率与液滴直径的关系如图 8 所示。由图 8 可知,随着入口流速的增大,小粒径液滴的分离效率增加,分离效率等于 100% 的液滴直径临界值逐渐减小,分离器理想分离效果的粒径范围增大。值得注意的是,从图 4 可知,SH 型波形板结构导致其内部的局部高速区流速大于 N 型波形板;并且由图 6 和图 7 的对比可以发现,N 型波形板的出口处有更多的较大粒径液滴逃逸,SH 型波形板对较大粒径液滴的分离效果更好。综上所述,入口流速增加,波形板整体的分离效率提高;总体来说,SH 型波形板分离效率高于 N 型波形板,

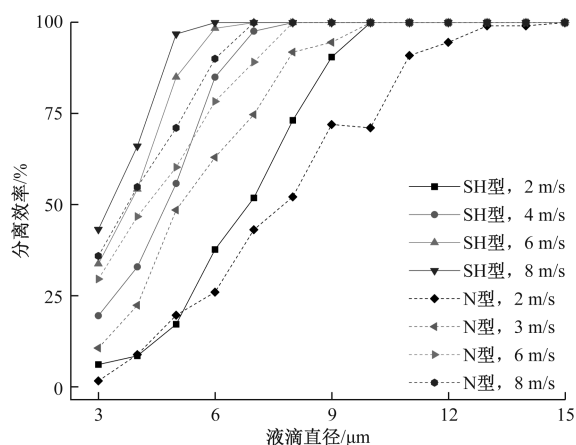


图 8 波形板分离效率

SH 型波形板分离效果更佳。

2.4 压降

除了分离效率,压降也是影响汽水分离器性能优劣的重要因素之一,对分离器的压降进行评估也很重要。两种波形板压降随入口流速变化的关系曲线如图 9 所示。从图 9 可以发现,波形板的压降随速度增加呈抛物线型增长,由 Galletti^[23]引入的压降计算公式可知:

$$\Delta p \propto \rho u_m^2 \quad (8)$$

式中: u_m 为入口速度, m/s。由式(8)可以发现数值计算结果符合理论计算。值得注意的是,SH 型比 N 型波形板通道的有效流通面积减小地更剧烈,其内部流速增加地更大,导致 SH 型波形板整体的压降高于 N 型波形板。

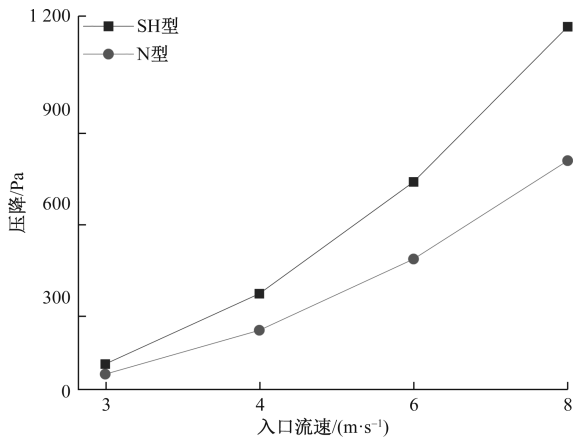


图9 压降随入口流速变化曲线

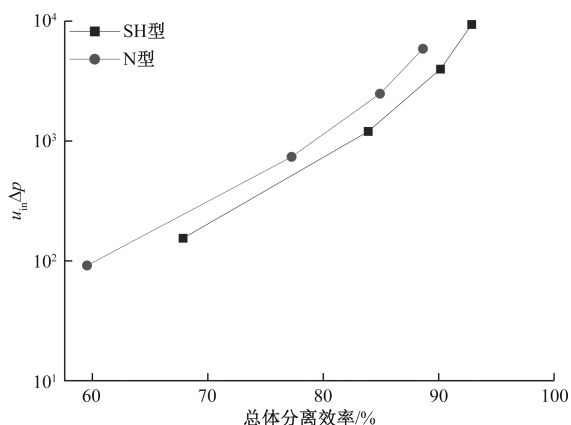
2.5 综合性能对比

虽然 SH 型波形板的分离效果更好但也具有更大的压降,因此需要对波形板的综合性能进行对比。

Zamora 和 Kaiser^[20]给出了单位时间波形板损失的能量公式为

$$P \propto u_{in} \Delta p \quad (9)$$

为了得到最佳综合性能(分离效率更高和压降更小)的波形板,通过 $u_{in} \Delta p$ 以及波形板总体分离效率(被捕获的液滴总数与被追踪的液滴总数之比)来综合评价波形板的性能,两种波形板的 $u_{in} \Delta p$ 与总体分离效率的关系如图 10 所示。当达到相同总体分离效率时,SH 型波形板损失的能量比 N 型波形板低,当达到 84% 的分离效率时,N 型波形板损失的能量约为 SH 型波形板的 2 倍。由此可见,SH 型波形板的综合性能更佳。

图10 $u_{in} \Delta p$ 与总体分离效率的关系

3 结论

本文通过数值模拟方法对两种不同疏水钩结构的波形板汽水分离器内部流场和液滴的运动轨迹进行研究,在不同入口流速下,对两种波形板的

分离效率和压降进行综合分析来评价两者的综合性能,主要结论如下。

(1)大粒径液滴主要受惯性力,在气相主流中难以改变运动方向,容易与主流分离,从而与壁面及疏水钩碰撞被分离;小粒径液滴主要受拖曳力,容易随主流运动,从波形中逃逸。当 SH 型和 N 型波形板入速度分别大于 4 m/s 和 6 m/s 时,粒径大于 8 μm 的液滴的分离效率能达到 100%。

(2)疏水钩结构的存在会影响流场以及分离效率,部分气流会进入疏水钩形成涡流,涡流会卷吸部分液滴进入疏水钩,从而提高分离效率。

(3)通过对比 $u_{in} \Delta p$ 与总体分离效率关系来综合评价 SH 型和 N 型波形板的综合性能,当两种波形板的总体分离效率达到 84% 时,N 型波形板损失的能量约为 SH 型波形板的 2 倍,SH 型的综合性能更佳。

参考文献

- [1] PADOVAN L. Design of an innovative moisture separator technology for use in nuclear power plants: numerical approach; part 1[C]//International Conference on Nuclear Engineering Collocated with the ASME 2020 Power Conference, Los Angeles: 2020; 83761.
- [2] NOH S Y, KIM M W, YOON S J. Performance investigation of a vertical wave-plate mist eliminator with perforated plates[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2020, 20(12): 2681-2689.
- [3] YU Z, SUN C, FANG J, et al. Water recovery efficiency improvement using the enhanced structure of the mist eliminator[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 154: 433-446.
- [4] 于瑞侠, 张志俭, 庞凤阁. 波形板汽水分离器的实验研究[J]. 核动力工程, 1992(6): 21-25.
- [5] 肖立春, 李强, 丁志江, 等. 汽水分离器分离效率的冷态实验研究[J]. 热能动力工程, 2010, 25(2): 177-179.
- [6] KOOPMAN H K, KÖKSOY Ç, ERTUNÇ Ö, et al. An analytical model for droplet separation in vane separators and measurements of grade efficiency and pressure drop[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 276: 98-106.
- [7] HAMED E M H, RAFEE R. Effects of wavelength and number of bends on the performance of zigzag demisters with drainage channels[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(2): 685-699.
- [8] 郝斌. 汽水分离器的仿真建模研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [9] TAKAHASHI M, UCHIDA S, KASAHARA Y. Design study on reactor structure of Pb - Bi-cooled direct contact boiling water fast reactor(PBWFR)[J]. Progress in Nuclear Energy, 2008, 50(2): 197-205.

- [10] JAMES P W, WANG Y, AZZOPARDI B J, et al. The role of drainage channels in the performance of wave-plate mist eliminators[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2003, 81(6): 639-648.
- [11] 王晓墨, 黄素逸. 新型高效汽水分离器的试验研究[J]. *工程热物理学报*, 2005, 26(S1): 97-100.
- [12] 李嘉, 黄素逸, 王晓墨. 波形板汽-水分离器分离效率的实验研究[J]. *核动力工程*, 2019, 19(4): 126-130.
- [13] 徐旭辉, 王伟, 施少波. 双钩波形板汽水分离特性的试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(4): 126-30.
- [14] LIU Y, QU Z. Numerical investigation of moisture separators with corrugated plates[J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 1501-1506.
- [15] 杜利鹏, 张文超, 金光远. 疏水钩对波形板汽水分离器性能影响的研究[J]. *东北电力大学学报*, 2020, 40(6): 67-72.
- [16] 朱雁凌, 王啸宇, 游尔胜, 等. 双钩波形板汽水分离器疏水钩优化研究[J]. *原子能科学技术*, 2021, 55(10): 1780-1787.
- [17] 李茹, 温济铭, 陈博文, 等. 波形板干燥器临界流速的冷热态转换[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022(4): 516-521.
- [18] 买丹婕, 赵富龙, 刘庆祝, 等. 堵塞沉积对波形板汽水分离器运行特性的影响规律及机理[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2024, 45(5): 982-988.
- [19] ORUC M, SALIH M, YAYLA S, et al. Numerical studies on the oil-water mixture separation by corrugated plates with hooks and holes in various shapes and configurations[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2024, 123: 1-12.
- [20] ZAMORA B, KAISER A S. Comparative efficiency evaluations of four types of cooling tower drift eliminator, by numerical investigation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(6): 1232-1245.
- [21] LI S, WANG P, LUO X, 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.
- [22] GHETTI S. Investigation of entrainment phenomena in inertial separators[D]. Pisa: University of Pisa, 2003.
- [23] GALLETTI C, BRUNAZZI E, TOGNOTTI L. A numerical model for gas flow and droplet motion in wave-plate mist eliminators with drainage channels[J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(23): 5639-52.
- [24] NAKAO T, SAITO Y, SOUMA H, et al. Droplet behavior analyses in the BWR dryer and separator[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1998, 35(4): 286-293.

Numerical Study of Corrugated Plate Moisture Separator with Double Hook

WU Wenming¹, ZHENG Xiaomin¹, HE Kaijun¹, HUANG Nanyun², XIA Pan², HE Zhu²

(1. Hubei Defon Heat Exchanger Co. Ltd., Huangshi 435106, Hubei, China;

2. School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Two kinds of double-hooked corrugated plate moisture separators with different draining hook structures were numerically investigated, and the gas-liquid two-phase flow model inside the corrugated plates was constructed by using computational fluid dynamics methods. The separation efficiency and pressure drop of the two corrugated plates were comparatively analyzed using the shear stress transport $k-\omega$ (SST $k-\omega$) model and the discrete phase model (DPM) under different inlet velocity conditions. The results show that large-size droplets will be separated directly by impacting the separator wall under the effect of inertia, while small-size droplets with smaller inertia force and similar trajectory to the main stream will move with the main stream and are difficult to be captured. The draining hook structure will produce a certain amount of vortex, which will have a certain effect on the local gas flow rate of the flow field, and the main stream gas phase will bring in a portion of the droplets to increase its removal efficiency. When the inlet velocities of the SH-type and N-type corrugated plate are greater than 4 m/s and 6 m/s, respectively, the separation efficiency of the droplets with a particle size larger than 8 μm can reach 100%. When the overall separation efficiency of the two types of corrugated plates reaches 84%, the energy loss of the N-type corrugated plate is about twice as much as that of the SH-type corrugated plate. Comprehensive comparison of the pressure drop and separation efficiency of the two types of corrugated plate moisture separators with double hook, the similarities and differences in their structures, performance advantages and disadvantages were studied and analyzed.

Keywords: moisture separator; draining hook; corrugated plate; pressure drop; separation efficiency; numerical simulation