

有限通道内热空气顺流掺混 NaCl 水溶液 喷射闪蒸的数值模拟

郑巨淦¹, 张丹¹, 袁洋¹, 王一笑¹, 杨庆忠²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 天津商业大学机械工程学院, 300134, 天津)

摘要: 为实现高浓度含盐废水的高效脱盐, 开展了对有限通道内 NaCl 水溶液在喷射闪蒸和顺流掺混热空气共同作用下的蒸发性能研究。在实验研究的基础上, 从该过程中过热度控制的非平衡蒸发到对流控制的平衡蒸发建立了贯通的数学物理模型, 计算结果与实验结果的主体偏差小于 5%。使用该模型在液滴群初始粒径为 30~110 μm 、初始温度为 120 $^{\circ}\text{C}$ 、初始盐质量分数为 0~0.1、初始速度为 20 m/s、掺混热空气速度为 5~15 m/s、温度为 100~200 $^{\circ}\text{C}$ 的范围内开展了数值模拟。结果表明: 液滴群的温度、速度、粒径以及盐质量分数的分布均呈现雾羽边缘变化快、喷射轴线处变化慢的特点; 随着喷射距离的增大, 液滴群粒径、速度、温度的截面平均值均降低, 而平均盐质量分数升高; 液滴初始盐质量分数的增大对上述参数的沿程变化无明显影响。定义蒸发效率为给定喷射距离内液滴群总蒸发质量与初始质量之比, 减小液滴初始粒径、提高掺混热空气温度的同时降低热空气流速是提高蒸发效率、强化液滴浓缩的有效途径。蒸发效率的半经验计算数值与模拟值主体误差小于 $\pm 15\%$ 。该研究结果可为工业脱盐装置的设计和运行提供一定的参考。

关键词: 喷射闪蒸; 顺流掺混; 有限通道; 雾羽流场; 蒸发效率

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202302018 **文章编号:** 0253-987X(2023)02-0173-11

Numerical Simulation of Aqueous NaCl in Parallel Hot Air Mixing and Spray Flashing within Finite Rectangle Tube

ZHENG Jugan¹, ZHANG Dan¹, YUAN Yang¹, WANG Yixiao¹, YANG Qingzhong²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: In order to improve desalination efficiency, aqueous NaCl solution is selected as the working fluid for investigation on its evaporation characteristics under the combined effect of spray flashing and parallel hot air mixing within finite rectangle tube. Based on experimental results, a comprehensive mathematical model is set up for the entire evaporation process from the non-equilibrium evaporation stage controlled by superheat to the equilibrium evaporation stage controlled by hot air convection. The relative error between the calculation and experimental results is mainly less than 5%. With this model, numerical simulations were carried out with initial droplet size between 30 and 110 μm , initial droplet temperature of 120 $^{\circ}\text{C}$, initial salt concentration between 0 and 10%, initial droplet speed of 20 m/s, initial mixing hot air speed between 5

收稿日期: 2022-08-09。 作者简介: 郑巨淦(1998—), 男, 硕士生; 张丹(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51976162)。

网络出版时间: 2022-09-29

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220928.1505.004.html>

and 15 m/s, and initial temperature between 100 and 200 °C. Results suggest that the droplet temperature, velocity, particle size as well as salt concentration all change rapidly at the edge of the spray plume, but slowly along the spray axis. With the increase of spray distance, the average droplet size, velocity as well as temperature decrease, but the average salt mass fraction increases. The increase of initial salt mass fraction shows no obvious effect on the evolution with distance of the aforementioned parameters. The evaporation efficiency is introduced as the ratio of the total evaporation mass of droplets to the initial mass of droplets within a given spray distance. Results suggest that reducing the initial droplet size, increasing the hot air temperature and at the same time reducing the hot air velocity are effective to improve the evaporation efficiency and enhance concentrating of droplets. A semi-empirical formula for evaporation efficiency is proposed, yielding a main error within $\pm 15\%$ between its calculated value and the simulation results. The research results above are applicable to design and operation of industrial desalination systems.

Keywords: spray flash; parallel flow mixing; finite channel; spray flow field; evaporation efficiency

淡水危机和水污染是制约我国国民经济可持续发展的突出矛盾之一。我国水资源的需求量巨大,但人均占有量约为世界平均水平的 24.8%;而与此同时,我国仅在煤炭、化工、造纸、纺织等工业生产中含盐废水排放量高达 710 亿吨^[1]。因此,针对含盐废水进行深度脱盐处理^[2],即将盐、水彻底分离,不仅可以减少环境污染,还能最大程度地回收水分,实现绿色可持续发展。

传统含盐废水处理工艺包括膜法、热法^[3-4],待处理废水盐浓度低。随着浓度的升高,热法处理中加热面极易出现腐蚀和结垢,膜法处理中析出晶体导致膜的污染和堵塞。而喷射闪蒸由于具有无需加热面、驱动温差小、蒸发比表面积大、析出晶体易于分离等优点,成为针对高浓度含盐废水提浓、析晶、分离的有效方法之一^[5-6]。喷射闪蒸是指将一定温度的液体喷入低于该温度所对应饱和压力的环境中,液相迅速破碎成液滴群并快速蒸发的过程,属于典型的气液两相流动。

Miyatake 等^[7-8]开展了纯水喷射闪蒸的实验研究,结果指出,过热度的提高不仅强化了液滴的非平衡蒸发,还可促使液滴破碎,从而获得更大的表面积,使得喷射闪蒸蒸发性能远高于膜状闪蒸。Owen 等^[9]研究了直径 1~3 mm 的单个过热纯水液滴的闪蒸过程,并发现在大气压下液滴能保持稳定蒸发的最大过热度约为 18 K;若过热度继续升高液滴内部会产生气泡导致液滴发生破碎。Zhou 等^[10-12]实验研究了 R134a 喷射闪蒸过程,提出了液滴表面蒸

发系数的实验关联式,建立了单个液滴的闪蒸蒸发模型,并将其应用于喷射闪蒸的数值模拟。高文忠等^[13-14]研究了单个静止 LiCl、CaCl₂ 水溶液液滴的真空闪蒸过程,实验发现闪蒸过程中液滴体积逐渐减小并在热电偶节点处发现白色结晶附着,并在实验基础上建立了液滴蒸发与晶体析出过程的耦合模型。季臻等^[15-16]实验研究了大型罐体内的纯水喷射闪蒸,发现闪蒸效率随液体初始温度或过热度的增大而提高,并给出了闪蒸效率与过热度的实验关联式。以上研究指出,喷射闪蒸能通过强化液滴破碎与非平衡蒸发实现含盐液滴的浓缩。

对于 NaCl 水溶液,即使过热度达到 100 K,液滴完全由自身显热引起的蒸发量(忽略物性变化)也仅约为初始质量的 18%,粒径变化约为 7%,即液滴过热度蕴含的显热不足以将自身完全蒸发,说明仅依靠闪蒸不能实现盐、水的彻底分离,当闪蒸结束后,液滴继续蒸发所需的热量可通过掺混热空气予以提供。

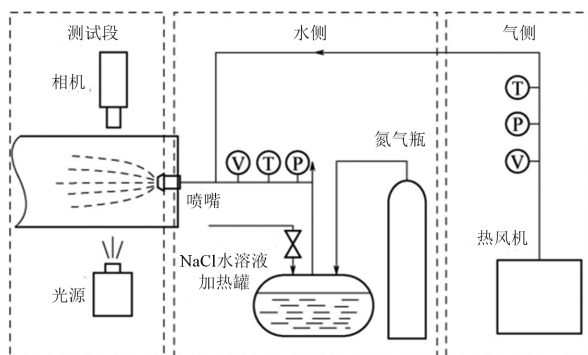
Bai 等^[17-19]研究了横向气流掺混对雾化后液滴群蒸发的影响,结果表明,气液间的相对速度是影响液滴群运动蒸发特性的主因。陈磊^[20]实验研究了高浓度盐水的喷雾蒸发过程,发现向蒸发室内掺混热空气可以强化液滴的蒸发,增加热空气流量及温度均能提高脱盐效率。柴峰^[21]开展了雾化脱硫废水与高温烟气掺混蒸发的实验研究,结果指出,烟气温度及流量的提高有助于脱硫废水的蒸发,当脱硫废水流量增大到临界值时蒸发率迅速降低。

现有针对喷射闪蒸和热空气掺混喷雾蒸发的研究是分别开展的,而以深度脱盐为背景,在有限通道内将盐溶液喷射闪蒸与热空气掺混喷雾蒸发相结合的研究鲜有开展。该过程是由过热度控制的非平衡蒸发和由掺混热空气控制的平衡蒸发共同作用的复杂两相流过程。本课题组就此搭建了实验系统,实验研究了不同喷射条件以及热风掺混条件下雾场液滴群速度、粒径分布以及雾羽的总体蒸发性能^[22-23],但对闪蒸和热空气掺混蒸发共同作用下雾场细部特征与整体蒸发效能缺乏系统的认识。因此,本文在课题组实验研究的基础上:①建立液滴群从非平衡蒸发到平衡蒸发贯通的数学物理模型;②通过数值模拟探析不同喷雾和掺混条件下雾场的细部特征;③建立对液滴群总体蒸发效果的评估方法。

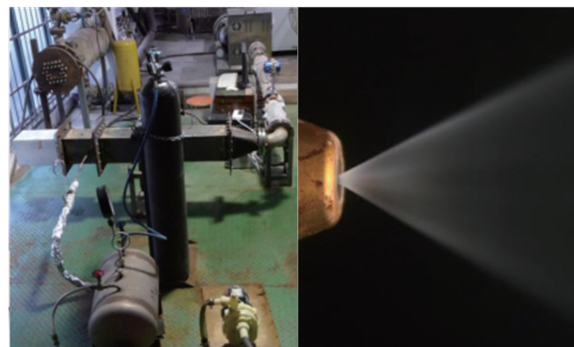
1 实验系统与计算模型

1.1 实验系统简介

本课题组搭建了有限通道热空气顺流掺混喷雾蒸发实验系统^[22],如图1所示。该系统由气侧、水侧和掺混测试段组成,气侧包括热风机、风管、空气流量计等,水侧包括氮气瓶、减压阀、盐溶液加热罐以及 DanFoss 喷嘴,测试段为横截面 200 mm×200 mm 透明方腔,喷嘴布置于测试段轴线。实验中,首先将 NaCl 水溶液加热至给定温度,将高压氮气由减压阀调制至不同压力为水侧施压,使 NaCl 水溶液雾化并沿轴线喷入测试段;气侧通过调节风机流量及加热功率获得不同的风速、风温,使之在测试段与雾羽顺流掺混。此时,通过在透明测试段外布置高速摄影、马尔文粒度仪等可实现对雾羽形态、速度场^[23]以及粒径分布的测量。该实验系统为本文数值模拟模型的建立及可靠性验证提供了依据。



(a) 实验系统流程图



(b) 实验系统实物图 (c) 顺流掺混喷雾雾羽

图1 有限通道空气顺流掺混喷雾蒸发实验系统

Fig. 1 Experimental system of parallel hot air mixing with spray flashing of aqueous NaCl within finite rectangle tube

1.2 计算模型

NaCl 水溶液在有限通道内的喷射闪蒸与热空气顺流掺混蒸发是由过热度控制的非平衡蒸发和由热空气对流传热控制的平衡蒸发共同作用的动量、能量交换过程。该过程中,离散相液滴群的温度、速度、粒径以及盐质量分数不断变化,连续相也由热空气逐渐转变为具有一定含湿量的湿空气。

本文针对上述蒸发过程建立计算模型。该模型以气侧热空气温度、速度以及水侧 NaCl 水溶液的温度、粒径、盐质量分数和初始速度为输入,以液滴群的温度、速度、粒径和盐质量分数,及连续相的温度、速度、水蒸气质量分数分布为计算目标。为简化计算,该模型有如下假设:①液滴群中液滴始终呈球形、粒径均一,且液滴之间无相互作用;②忽略液滴与环境的辐射传热;③盐分均匀分布在液滴中;④忽略喷嘴处液相射流的初始破碎,即认为喷射工质一旦离开喷嘴就雾化为液滴。

计算区域与实验掺混测试段一致,为横截面 200 mm×200 mm、长 400 mm 的长方体。喷嘴设置在距离入口 50 mm 处的截面中心,入口热空气流动方向与喷射方向一致,计算模型如图2所示

1.2.1 控制方程

上述蒸发过程中连续相满足基本守恒定律。其中质量守恒可表示为

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla(\rho_g U_g) = S_{m,g} \quad (1)$$

式中: $S_{m,g}$ 为气液相互作用源项,来自液滴的蒸发。

动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g U_g) + \nabla(\rho_g U_g U_g) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho_g g + F \quad (2)$$

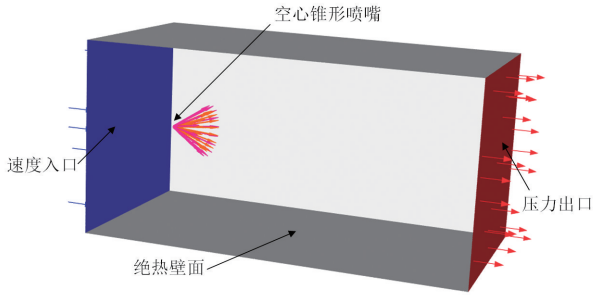


图 2 计算模型

Fig. 2 Geometric structure in CFD simulation

$$\tau = \mu \left[(\nabla U_g + \nabla U_g^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U_g I \right] \quad (3)$$

式中: τ 为应力张量; μ 为分子黏度; I 为单位张量。

能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g T) + \nabla(\rho_g U_g T) = \nabla \left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad} T \right) + S_T \quad (4)$$

式中 S_T 为来自传热模型的源项。

组分守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho U_g Y_i) = -\nabla J_i + S_{\text{evap},i} \quad (5)$$

式中: Y_i 为组分 i 的质量分数; J_i 为组分 i 的扩散通量; $S_{\text{evap},i}$ 为来自喷雾蒸发产生的源项。

雾羽中液滴群为离散相,根据假设忽略液滴的相互作用,单个液滴在气流的运动中主要受曳力、重力、浮力等影响^[24],故其运动方程可表示为

$$m_d \frac{du_d}{dt} = F_{\text{drag}} + F_g + F_{\text{other}} \quad (6)$$

1.2.2 液滴蒸发模型

由液滴蒸发过程的能量守恒关系可表示为

$$\frac{d(mc_{pd} T_d)}{dt} = -hA_d(T_d - T_\infty) - \dot{m}_i h_{fg} \quad (7)$$

式中: c_{pd} 为液滴的比热容; T_d 、 T_∞ 分别为液滴、周围环境温度; A_d 为液滴的表面积; h_{fg} 为液滴的蒸发潜热。

Nu 由文献[25]得到

$$Nu = 2 + 0.6Re^{1/2}Pr^{1/2} \quad (8)$$

当液滴处于非平衡蒸发阶段时($T_d > T_{\text{sat}}$),蒸发速率 $\dot{m}_i$ 由液滴的过热度控制,采用基于气体动力学理论的 Hertz-Kundsen-Schrage 方程^[26],计算式为

$$\dot{m}_i = \frac{2}{2 - k_c} A_d \sqrt{\frac{M_v}{2\pi R}} \left(k_e \frac{P_{v,s}}{\sqrt{T_d}} - k_c \frac{P_{v,\infty}}{\sqrt{T_\infty}} \right) \quad (9)$$

式中: k_c 、 k_e 分别为冷凝、蒸发系数; M_v 为水蒸气摩尔质量; R 为理想气体常数; $P_{v,s}$ 为液滴表面蒸汽压; $P_{v,\infty}$ 为环境中水蒸气分压。

当液滴处于平衡蒸发阶段时($T_d \leq T_{\text{sat}}$),蒸发速率由对流和扩散控制,采用经典的 D^2 模型^[25]计算

$$\dot{m}_i = 2\pi r \rho_g D_{gs} Sh \ln(1 + B_m) \quad (10)$$

$$B_m = \frac{Y_{v,s} - Y_{v,\infty}}{1 - Y_{v,s}} \quad (11)$$

$$Sh = 2 + 0.6Re^{1/2}Sc^{1/3} \quad (12)$$

式中: ρ_g 为气相边界层内湿空气密度; D_{gs} 为水蒸气在空气中的传质扩散系数; B_m 为 Spalding 传质数; Sh 为 Sherwood 数; $Y_{v,s}$ 为液滴表面蒸气质量分数; $Y_{v,\infty}$ 为周围环境中蒸气质量分数; Sc 为 Schmidt 数。

由于液滴含有非挥发性溶质会降低液滴表面蒸气压^[27],需对非平衡蒸发阶段的液滴表面蒸气压及平衡蒸发阶段液滴表面蒸气质量分数进行修正

$$\alpha_w = \frac{1}{1 + M_w/M_s(f_m/(1 - f_m))} \quad (13)$$

$$P_{v,s} = \alpha_w P_{\text{sat}} \quad (14)$$

$$X_{v,s} = \frac{P_{v,s}}{P_\infty} \quad (15)$$

$$Y_{v,s} = \frac{X_{v,s}}{X_{v,s} + M_a/M_v(1 - X_{v,s})} \quad (16)$$

式中: α_w 为液滴中水的摩尔分数; f_m 为液滴中 NaCl 的质量分数; M_a 为空气的摩尔质量; M_w 为水的摩尔质量; M_s 为 NaCl 的摩尔质量; P_{sat} 为饱和蒸汽压力; P_∞ 为环境压力。

考虑到蒸发过程中传热传质导致的 Stefan 流的影响,采用 Abramzon 等^[28]所提修正公式对 Nu 、 Sh 进行修正

$$B_t = c_p \frac{T_\infty - T_d}{h_{fg}} \quad (17)$$

$$F_t = (1 + B_t)^{0.7} \frac{\ln(1 + B_t)}{B_t} \quad (18)$$

$$F_m = (1 + B_m)^{0.7} \frac{\ln(1 + B_m)}{B_m} \quad (19)$$

$$Nu' = 2 + \frac{Nu - 2}{F_m} \quad (20)$$

$$Sh' = 2 + \frac{Sh - 2}{F_t} \quad (21)$$

式中: B_t 为 Spalding 传热数; F_t 、 F_m 分别为传热修正系数、传质修正系数。

1.2.3 计算方法与模型验证

本文通过 ANSYS Fluent 及自定义 UDFs 实现上述计算模型,采用 Euler-Lagrange 方法进行喷雾蒸发模拟研究,湍流模型选取在喷雾模拟研究中广泛使用的 RNG $k-\epsilon$ 模型^[29]。液滴阻力和表面张力之比 We 为 0.013~0.456,属于低 We 范围($We < 100$),采用经典的 TAB(Taylor analogy breakup)模型^[30]。计算区域采用全六面体结构化网格进行网格划分,生成网格总数分别约为 25、43、85 万。网格无关性验

证如图3所示,不同网格误差较小,综合考虑计算效率及计算精度,选取网格数为25万的网格进行计算。

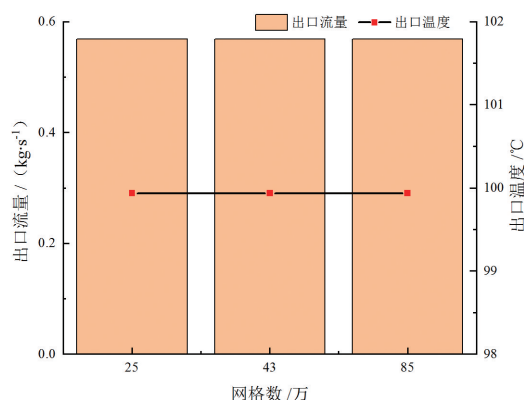
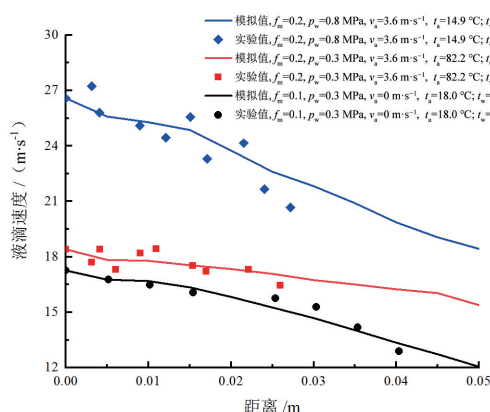


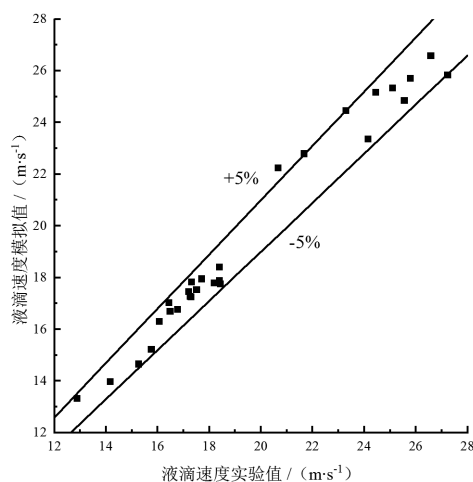
图3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

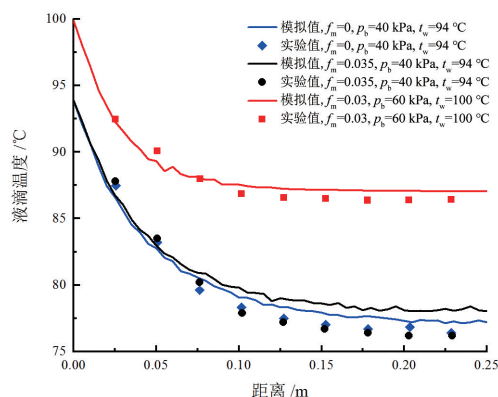
为验证本文模型准确性,将模拟结果与本课题组^[31]及Guo等^[32-33]的实验数据进行比较。图4对比了相同初始条件下液滴截面平均速度、平均温度的计算值与实验值随喷射距离的变化,可知模拟结果与实验值的变化趋势一致,两者的相对误差主体小于5%,验证了本文模型及计算结果的可靠性。



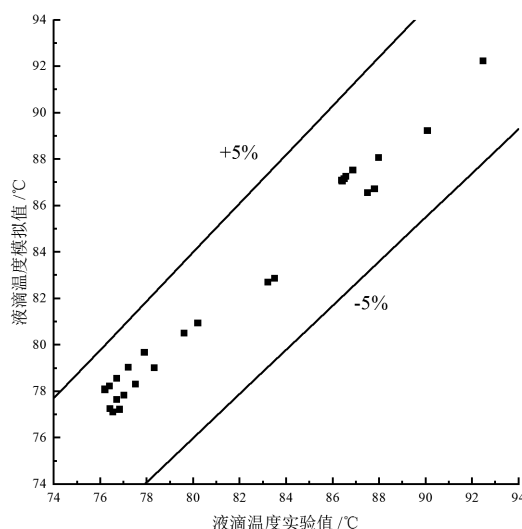
(a)液滴速度实验值^[32]和模拟值



(b)速度误差对比



(c)液滴温度实验值^[33-34]和模拟值



(d)温度误差对比

图4 实验数据与模拟结果对比

Fig. 4 Comparison between experimental and simulation results

根据上述模型,结合本课题组前期实验范围,本文在表1所示的参数范围内开展数值模拟。

表1 基本参数及模拟工况范围

Table 1 Basic parameters and range of simulation conditions

参数	数值
喷嘴类型	空心锥形喷嘴
雾化锥角/(°)	53.8
喷雾初始速度 $v_w/(m \cdot s^{-1})$	20
液滴初始温度 $t_w/°C$	120
液滴初始粒径 $d_0/\mu m$	30~110
过热度 $\Delta T/K$	20
环境压力 p_b/MPa	0.1
喷雾工质	NaCl 水溶液
液滴盐质量分数 f_m	0~0.1
喷雾质量流率/($kg \cdot s^{-1}$)	0.006
掺混空气流速 $v_a/(m \cdot s^{-1})$	5~15
掺混空气温度 $t_a/°C$	100~200

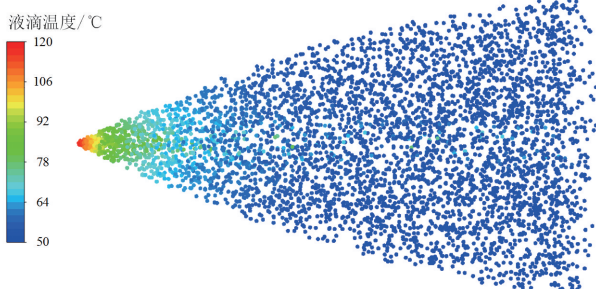
该范围内,液滴中 NaCl 质量分数最高为 0.12,远低于 NaCl 水溶液饱和和质量分数 0.26,因此本文不考虑结晶过程对液滴蒸发的影响。

2 结果与分析

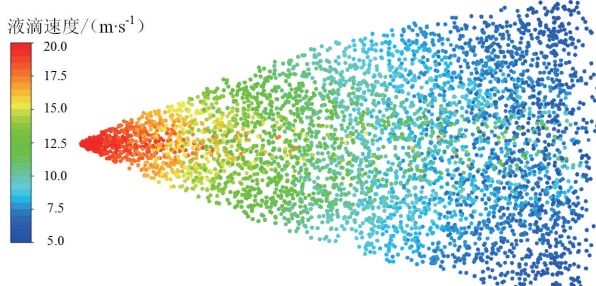
根据数值模拟结果,本文从雾羽流场、雾羽参数的沿程变化以及蒸发效能 3 个层面展开讨论。

2.1 雾羽流场

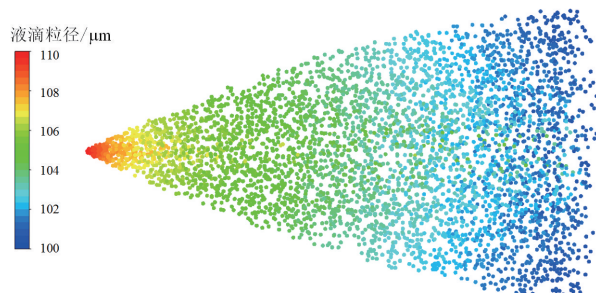
雾羽流场包含了离散相与连续相各个流场参数的空间分布,图 5 展示了离散相,即液滴群流场参数空间分布。由图 5 可以看出:随着喷射距离的增大,液滴群的温度、粒径逐渐降低;液滴群速度逐渐减小至掺混热空气的流速;液滴群的温度、速度、粒径以及盐浓度的变化速率均呈现雾羽边缘变化快,喷射轴线处变化慢的特点。



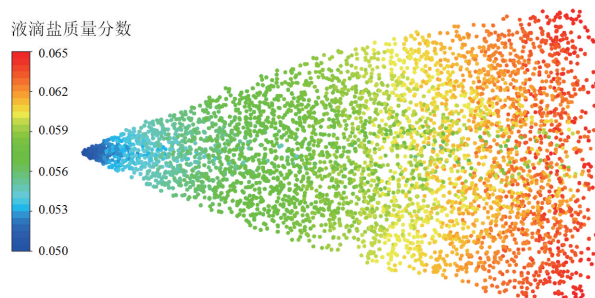
(a) 液滴温度分布



(b) 液滴速度分布



(c) 液滴粒径分布

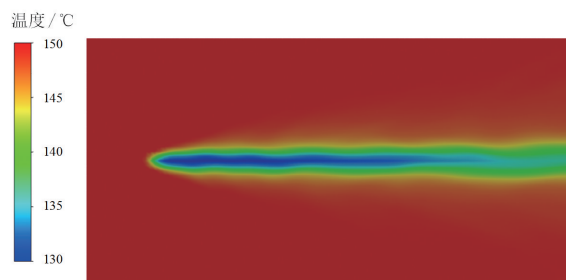


(d) 液滴盐质量分数分布

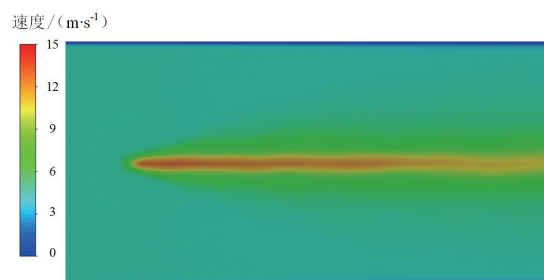
图 5 喷雾雾羽分布特征云图($f_m=0.05$, $v_a=5$ m/s, $t_a=150$ °C, $t_w=120$ °C, $d_0=110$ μm)

Fig. 5 Distribution of droplets characteristics

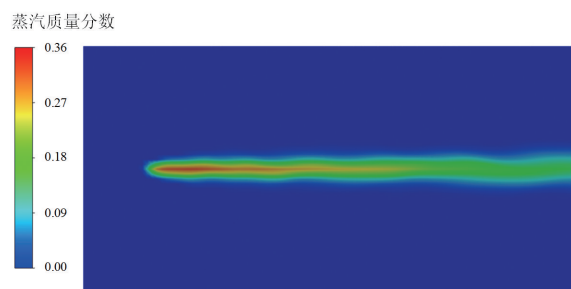
图 6 给出了连续相,即掺混热空气流场参数的分布特征。由图 6 可以看出:喷射轴线处连续相的温度明显降低,这是因为喷射轴线处液滴分布密度大、数量多,单位体积内液滴群蒸发需要从顺流掺混的热空气中吸收更多的热量;此外,蒸发产生的大量蒸气温度亦低于来流空气温度并与其继续发生能量交换,进一步降低了轴线处连续相的温度;喷射轴线处连续相速度有显著升高,这是由于本文工况中液滴群初始速度高于掺混空气速度,在黏性作用下,液滴群速度的降低提高了周边连续相的速度,其中喷嘴出口轴线处具有最大的液滴分布密度,使得该处连续相速度增幅最大;喷射轴线处蒸汽质量分数高于雾羽边缘,这是因为喷射轴线处液滴分布密度大、数量多、单位体积蒸气产量大,喷射轴线处气液相对速度小,抑制了水蒸气向雾羽外部的扩散。



(a) 温度分布



(b) 速度分布



(c) 蒸气质量分数分布

图6 掺混热空气流场分布特征云图

Fig. 6 distribution of hot air characteristics

2.2 液滴群截面平均参数的沿程变化

在深度脱盐的背景下,工业生产更加关注的是雾羽中离散相,即液滴群的截面速度、粒径等动力学参量及截面温度、盐浓度等热力学参量随喷射距离的变化。

2.2.1 截面平均粒径

图7对比了不同工况下液滴截面平均粒径随喷射距离的变化。由图7可以看出:液滴群平均粒径均随喷射距离的增加而减小;热空气温度的增加加速了液滴粒径的减小;随着热空气流速的增加,液滴群滞留时间减少,导致粒径减小速率放缓;现有研究范围内,改变初始盐质量分数对液滴群粒径变化无显著影响。

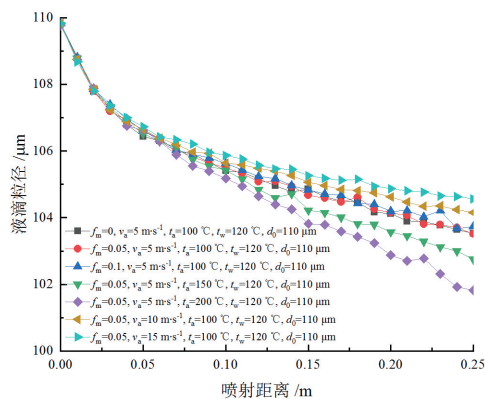


图7 液滴截面平均粒径随喷射距离的变化

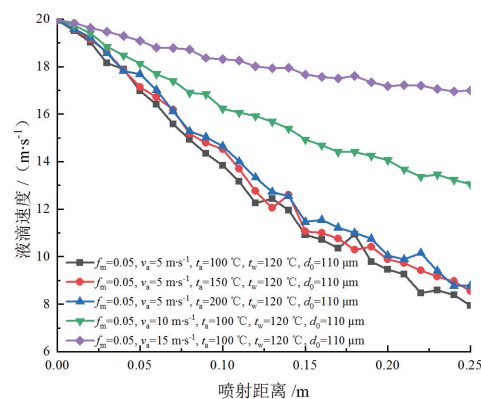
Fig. 7 Variation of droplet cross-section average size with spray distance

2.2.2 截面平均速度

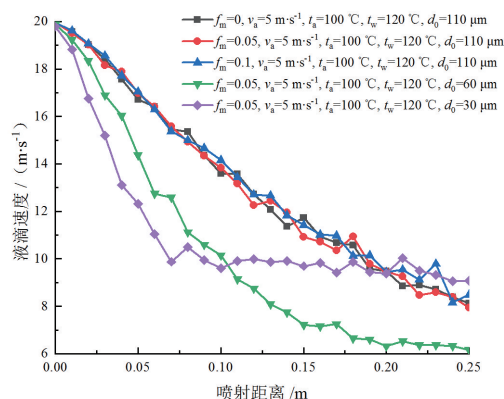
图8(a)对比了不同气侧条件下液滴群截面平均速度随喷射距离的变化。可以看出:不同工况下液滴群截面平均速度随喷射距离的增大均降低;提高掺混热空气的流速可显著减缓液滴群速度降幅,但这会导致液滴在有限通道内停留时间减少,同

时减小了气液相对速度;随着热空气温度的增加,液滴群速度的降幅略有减缓。这是由于热空气温度的提高强化了蒸发,减小了同一喷射距离处液滴的粒径,使其所受阻力减小,速度下降减缓。

图8(b)对比了不同液侧初始条件下液滴群截面平均速度随喷射距离的变化。可以看出:初始盐质量分数对液滴群平均速度的沿程变化几乎无影响;随着初始粒径的降低,液滴初始动量越小,导致液滴群速度降低越快。



(a) 不同气侧条件



(b) 不同水侧条件

图8 液滴截面平均速度随喷射距离的变化

Fig. 8 Variation of droplet cross-section average velocity with spray distance

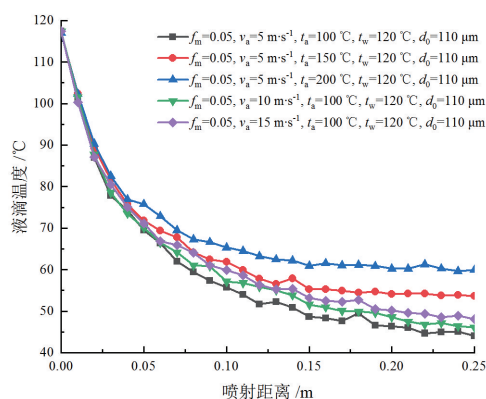
2.2.3 截面平均温度

在热空气顺流掺混喷射闪蒸脱盐过程中,蒸发所需的热量由盐水液滴自身显热及热空气对流传热共同提供。随着液滴蒸发过程的进行,液滴的温度会逐渐下降,直至蒸发所需热量与热空气对流传热量相平衡。

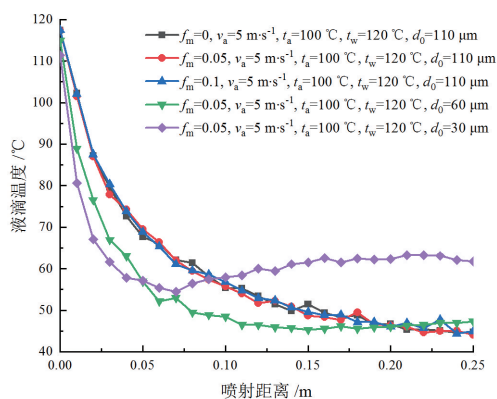
图9(a)对比了不同气侧条件下液滴群截面平均温度的沿程变化。可以看出:液滴群平均温度均随喷射距离的增大而降低,并最终趋于定值;随着热空气温度增大,液滴群的温降速率减缓,且最终平衡

温度提高;随着热空气流速增大液滴群平均温度降速略有减缓。因为空气流速的增大,不仅减小了液滴在相同喷射距离内的滞留时间,还通过减小气液相对速度削弱了掺混蒸发中热空气对流传热的强度。

图 9(b)对比了不同水侧条件下液滴群截面平均温度的沿程变化。可以看出:现有研究范围内,初始盐质量分数的变化对液滴群温降过程几乎没有影响;随着液滴初始粒径的减小,液滴的比表面积增大,蒸发更剧烈,导致蒸发初期温度下降更快,蒸发后期,热空气持续提供热量,此时较小的粒径亦强化了热空气向液滴的对流传热,使得液滴群平均温度再度回升。



(a) 不同气侧条件



(b) 不同水侧条件

图 9 液滴截面平均温度随喷射距离的变化

Fig. 9 Variation of droplet cross-section average temperature with spray distance

2.2.4 截面盐质量分数

图 10 对比了不同工况下液滴群截面平均盐质量分数随喷射距离的变化。可以看出:液滴盐质量分数均随喷射距离的增大而升高;热空气温度的提高强化了掺混蒸发,使得液滴群盐质量分数的增幅

有所提高;热空气流速的提高缩短了相同喷射距离内液滴群的滞留时间,盐质量分数的增幅下降;随着液滴初始粒径的减小,盐质量分数的增幅显著提高。以上结果说明,在有限长的距离内,降低液滴初始粒径、提高热空气温度的同时降低热空气速度是强化液滴蒸发浓缩的有效手段。

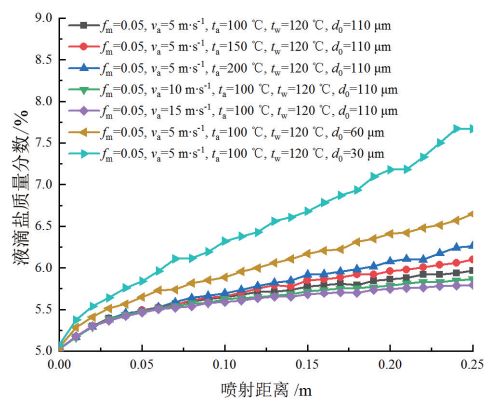


图 10 不同工况下液滴盐质量分数的变化特性

Fig. 10 Variation characteristics of droplets salinity versus spray distance

2.3 蒸发效率

为了衡量喷射闪蒸与热空气掺混蒸发共同作用下液滴群在给定喷射距离内的蒸发程度,定义蒸发效率为给定喷射距离内液滴群总蒸发质量与初始质量的比值

$$\eta = \frac{m_{v,x}}{m_0} = 1 - \frac{m_{d,x}}{m_0} \quad (22)$$

图 11 对比了不同工况下蒸发效率的沿程变化。可以看出,随喷射距离的增大,蒸发效率先迅速增大,而后增速趋于稳定。这是由于蒸发初期,液滴群过热度大、以喷射闪蒸为主,蒸发剧烈;蒸发后期以掺混蒸发为主,气液相对速度逐渐减小,热空气向液滴群的对流传热趋缓,蒸发效率的增幅减缓。热空气温度的提高或速度的减小强化了掺混蒸发,蒸发效率有所提高;液滴的初始盐质量分数的提高会导致蒸发效率的减小;液滴初始粒径的减小将显著增加液滴的蒸发效率。在相同工况下,当液滴初始粒径由 110 μm 减小到 30 μm 时,液滴群在喷射距离为 0.25 m 处的蒸发效率可由 15.7% 提高到 32.9%。这意味着减小液滴初始粒径是提高蒸发效率最有效的方法。

根据上述变化规律,提出横流掺混条件下含盐液滴蒸发效率的半经验计算式

$$\eta = A \ln[B(\ln x^* - 1.6)] \quad (23)$$

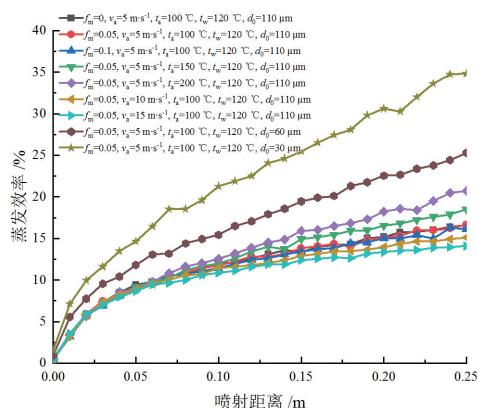


图 11 不同工况下蒸发效率的变化特性

Fig. 11 Variation of evaporation efficiency versus spray distance

$$A = -278 \frac{Sh_0^{0.42} \theta_0^{0.51} Re_0^{-0.8}}{1 + 1.2 f_{m0}} \quad (24)$$

$$B = -0.33 Sh_0^{0.22} \theta_0^{0.27} Re_0^{-0.24} \quad (25)$$

式中: Sh_0 为液滴初始 Sherwood 数; $\theta_0 = t_{a0}/t_{w0}$ 为掺混空气无量纲初始温度; $Re_0 = \rho_g v_0 d_0 / \mu_g$ 为液滴初始雷诺数; f_{m0} 为液滴初始盐质量分数; $x^* = x/H$ 为无量纲距离。

计算值与模拟值误差如图 12 所示,在本文研究范围内,该式的计算值与模拟值的相对误差主体小于 15%。

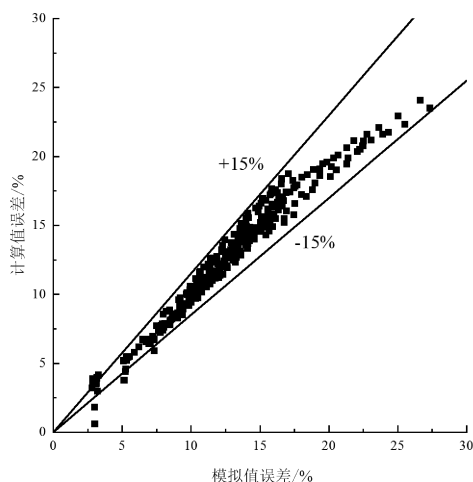


图 12 蒸发效率式(23)计算值与模拟值误差

Fig. 12 Relative error of evaporation efficiency between formula (23) and the simulation value

3 结 论

本文在课题组前期实验研究的基础上,对 NaCl 水溶液喷射闪蒸与热空气顺流掺混蒸发的耦合过程开展了数值模拟。

(1)计算模型方面:针对由液相过热度导致的非平衡蒸发和热空气掺混导致的平衡蒸发建立了贯通的数学物理模型。该模型计算结果与课题组及相关文献实验结果的相对误差主体均小于 5%,验证了模型的可靠性。

(2)雾羽流场方面:喷射轴线处气液相对速度小、蒸发产生的水蒸气不易扩散,导致雾羽内部的蒸发强度弱于雾羽边缘;液滴群的温度、速度、粒径以及盐质量分数的分布均呈现雾羽边缘变化快,喷射轴线处变化慢的特点。

(3)液滴群截面平均参数的沿程变化方面:随喷射距离增大,液滴群粒径、轴向速度、温度的截面平均值均降低,而平均盐质量分数升高;提高掺混热空气温度或减小初始粒径可显著提高液滴群盐质量分数增速;而现有研究范围内,液滴初始盐质量分数的增加对上述参数的沿程变化几乎没有影响。

(4)蒸发效果评估方面:定义蒸发效率为给定喷射距离内液滴群总蒸发质量与初始质量的比值;结果指出降低液滴初始粒径、提高掺混热空气温度的同时降低热空气流速是提高蒸发效率的有效手段。最后,提出了蒸发效率的半经验计算式,其计算值与模拟值的主体误差在 $\pm 15\%$ 之内。

参考文献:

- [1] 国家统计局,环境保护部. 中国环境统计年鉴: 2017 [M]: 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [2] 严俊杰,王金华,邵树峰,等. 多级闪蒸海水淡化系统的改进研究 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(11): 1165-1168, 1181.
YAN Junjie, WANG Jinhua, SHAO Shufeng, et al. Improvement of multi-stage flash seawater desalination system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(11): 1165-1168, 1181.
- [3] 张金菊. 海水淡化的重要性及其淡化方法 [J]. 山西化工, 2018, 38(6): 94-96.
ZHANG Jinju. Significance of seawater desalination and desalination methods [J]. Shanxi Chemical Industry, 2018, 38(6): 94-96.
- [4] 孙珊,金晓杰,于潇潇,等. 海水淡化发展利用状况分析与启示 [J]. 工业水处理, 2022, 42(2): 45-50.
SUN Shan, JIN Xiaojie, YU Xiaoxiao, et al. Analysis and enlightenment on development and utilization of seawater desalination [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(2): 45-50.
- [5] 成怀刚,高从塔. 喷雾蒸发海水淡化技术研究进展 [J]. 现代化工, 2008, 28(6): 19-22, 24.

- CHENG Huaigang, GAO Congjie. Progress in spray evaporation desalination technology [J]. Modern Chemical Industry, 2008, 28(6): 19-22, 24.
- [6] 陈磊, 费学宁, 季民, 等. 喷雾蒸发处理浓盐水分离效率研究 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(5): 96-99.
- CHEN Lei, FEI Xuening, JI Min, et al. Study on separation efficiency of concentrated brine in spray evaporation process [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(5): 96-99.
- [7] MIYATAKE O, TOMIMURA T, IDE Y, et al. Effect of liquid temperature on spray flash evaporation [J]. Desalination, 1981, 37(3): 351-366.
- [8] MIYATAKE O, TOMIMURA T, IDE Y, et al. An experimental study of spray flash evaporation [J]. Desalination, 1981, 36(2): 113-128.
- [9] OWEN I, JALIL J M. Heterogeneous flashing in water drops [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1991, 17(5): 653-660.
- [10] ZHOU Zhifu, LU Guanyu, CHEN Bin. Numerical study on the spray and thermal characteristics of R404A flashing spray using OpenFOAM [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 117: 1312-1321.
- [11] ZHOU Zhifu, LU Guanyu, ZHU Dongqing, et al. The performance of droplet evaporation model in predicting droplet dynamics and thermal characteristics for R134a single isolated droplet and two-phase flashing spray [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 93: 105363.
- [12] ZHOU Zhifu, HU Mengyuan, XIN Hui, et al. Experimental and theoretical studies on the droplet temperature behavior of R407C two-phase flashing spray [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 136: 664-673.
- [13] 高文忠, 时亚茹, 曹丹. 氯化钙溶液液滴真空闪蒸再生的实验研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(9): 900-904.
- GAO Wenzhong, SHI Yaru, CAO Dan. Concentrating CaCl_2 droplets by fast evaporation of water in vacuum [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(9): 900-904.
- [14] 高文忠, 时亚茹, 曹丹, 等. 氯化锂溶液液滴真空闪蒸过程温度分布特性研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(3): 197-203.
- GAO Wenzhong, SHI Yaru, CAO Dan, et al. Temperature distribution of LiCl droplets in vacuum flash evaporation [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(3): 197-203.
- [15] 季琛, 王乃华, 崔峥, 等. Jakob 数在高温高压闪蒸过程中的作用及影响 [J]. 化工学报, 2016, 67(10): 4153-4159.
- JI Can, WANG Naihua, CUI Zheng, et al. Role and influence of characteristic Jakob number in high-temperature and high-pressure flash evaporation process [J]. CIESC Journal, 2016, 67(10): 4153-4159.
- [16] 季琛, 王乃华, 崔峥, 等. 高温高压喷雾闪蒸的蒸发特性 [J]. 化工学报, 2016, 67(5): 1771-1777.
- JI Can, WANG Naihua, CUI Zheng, et al. Evaporation characteristics of spray flash evaporation at high temperature and high pressure [J]. CIESC Journal, 2016, 67(5): 1771-1777.
- [17] BAI Bofeng, ZHANG Haibin, LIU Li, et al. Experimental study on turbulent mixing of spray droplets in crossflow [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(6): 1012-1020.
- [18] BAI Bofeng, SUN Huijuan, ZHANG Haibin, et al. Numerical study on turbulent mixing of spray droplets in crossflow [J]. Journal of Propulsion and Power, 2011, 27(1): 132-143.
- [19] 张海滨, 刘利, 孙慧娟, 等. 横流中单喷嘴雾化形态与两相掺混特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 104-108.
- ZHANG Haibin, LIU Li, SUN Huijuan, et al. Study on single-nozzle spray pattern in crossflow and two-phase mixing characteristics [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(7): 104-108.
- [20] 陈磊. 介观喷雾蒸发分离高浓度盐水处理系统的构建及性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2015: 113.
- [21] 柴峰. 脱硫废水蒸发的调控与机制研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2016: 67.
- [22] 牛照程, 张丹, 王辉辉, 等. 有限截面通道内喷雾顺流掺混动力学特征的实验研究 [J]. 化工学报, 2019, 70(Z2): 117-122.
- NIU Zhaocheng, ZHANG Dan, WANG Huihui, et al. Experimental study on mixing dynamic characteristics during down-flow spray within finite section channel [J]. CIESC Journal, 2019, 70(Z2): 117-122.
- [23] 王辉辉, 张丹, 牛照程, 等. 喷射闪蒸中液滴群速度场的测量 [J]. 工程热物理学报, 2019, 40(10): 2340-2344.
- WANG Huihui, ZHANG Dan, NIU Zhaocheng, et al. Measurement of atomization velocity field in spray flash [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(10): 2340-2344.
- [24] 阮一逍, 薛绒, 赖欢, 等. 单液氮液滴在气流中的蒸发运动特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51

- (6): 147-152.
- RUAN Yixiao, XUE Rong, LAI Huan, et al. Evaporation and movement characteristics of single liquid nitrogen droplet in high-speed gas flow [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(6): 147-152.
- [25] SAZHIN S S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(2): 162-214.
- [26] MAREK R, STRAUB J. Analysis of the evaporation coefficient and the condensation coefficient of water [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(1): 39-53.
- [27] 刘璐, 王荣, 刘琰, 等. 盐水液滴降压蒸发析盐过程传热传质特性 [J]. 化工学报, 2015, 66(7): 2426-2432.
- LIU Lu, WANG Mo, LIU Yan, et al. Heat and mass transfer characteristics of evaporation and salt crystallization process of a saline droplet during depressurization [J]. CIESC Journal, 2015, 66(7): 2426-2432.
- [28] ABRAMZON B, SIRIGNANO W A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1989, 32(9): 1605-1618.
- [29] BASHA S A, RAJA GOPAL K. In-cylinder fluid flow, turbulence and spray models [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(6/7): 1620-1627.
- [30] OROURKE P J, AMSDEN A A. The tab method for numerical calculation of spray droplet breakup [C]// 1987 SAE International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exhibition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 1987: 872089.
- [31] 王辉辉. NaCl 水溶液喷射闪蒸雾化蒸发特性的实验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2021.
- [32] GUO Guangyu, ZHANG Bo, ZHU Chao, et al. Thermal non-equilibrium in spray flash with vacuum vapor extraction [J]. Desalination, 2021, 507: 115023.
- [33] GUO Guangyu, DENG Hongling, ZHU Chao, et al. Spatially dependent salinity effect in actively vacuumed spray flash desalination [J]. Desalination, 2022, 537: 115868.

(编辑 赵炜 亢列梅)