**文章编号:**1000-8608(2021)06-0593-08

# 基于液滴分析的喷雾闪蒸海水淡化模拟研究

周士鹤<sup>1,2</sup>,刘新宇<sup>3</sup>,冯 寅<sup>4</sup>, 下永宁<sup>1</sup>,沈胜强<sup>\*2,5</sup>

(1.大连理工大学海洋科学与技术学院,辽宁盘锦 124221;

2. 大连理工大学 辽宁省海水淡化重点实验室, 辽宁 大连 116024;

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江),广东 湛江 524025;

4.大连诚高科技股份有限公司,辽宁大连 116024;

5.大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**喷雾闪蒸海水淡化中液滴的闪蒸特性对于设备优化设计具有重要意义.建立了描述 盐水液滴闪蒸过程的数学模型,模型考虑了液滴内部温度梯度及液滴表面的辐射换热.通过 模拟计算,揭示了液滴闪蒸特性与空间距离的关系,分析了液滴初始速度、初始直径、初始盐 度、初始温度以及喷射方向等参数的影响.结果表明,减小液滴初始直径、增大液滴初始速度, 均有利于提高闪蒸速率;提高液滴初始温度,能够改善闪蒸效率;升高液滴初始盐度,闪蒸的 速率和效率均下降;向上喷射时液滴闪蒸临界距离更短,闪蒸效率更高.

#### 0 引 言

喷雾闪蒸是指过热液体经喷嘴喷射至低压环 境而发生的剧烈闪蒸现象.由于所需喷雾压力相 对较低且无须借助金属表面即可获得优良的雾化 效果和较高的传热传质速率,该技术在高效散 热<sup>[1]</sup>、油气掺混<sup>[2]</sup>等领域具有广泛的应用.近年 来,基于喷雾闪蒸的低温海水淡化技术也受到了 越来越多的关注<sup>[3]</sup>.与传统热法相比,其具有传热 传质速率高、腐蚀结垢风险小、投资成本低等优 点,因此在海洋温差能、太阳能等低品位热能利用 领域颇具发展潜力.

目前,针对喷雾闪蒸过程的实验和理论研究 都取得了一定的进展. Miyatake 等<sup>[4]</sup>、Ikegami 等<sup>[3]</sup>、季璨等<sup>[5]</sup>分别针对不同压力下喷雾闪蒸的 蒸发特性开展了实验研究. 然而实验研究较难获 得液滴闪蒸的详细信息,而液滴闪蒸特性对于喷 雾闪蒸设备的优化设计至关重要,因此,基于液滴 分析的喷雾闪蒸过程理论研究尤为必要. 国内外 学者针对液滴真空闪蒸结冰<sup>[6]</sup>、氯化锂溶液液滴 真空闪蒸<sup>[7]</sup>等过程建立了相应的数学模型.然而, 上述模拟研究均未考虑液滴内部的温度梯度.此 外,实验所测得的温度变化率明显高于液滴内部 按照分子热导率计算的理论预测值<sup>[8]</sup>.为此,程文 龙等<sup>[9]</sup>建立了考虑液滴内部温度梯度及对流效应 的液滴真空闪蒸模型,结果显示该模型相比于等 温模型的预测更为准确.Chen等<sup>[10]</sup>建立了非等 温液滴闪蒸数学模型,讨论了液滴初始直径、流速 和过热度对于闪蒸特性的影响,但该模型忽略了 液滴闪蒸过程中的尺寸变化.Cai等<sup>[11-12]</sup>通过数 值模拟方法对盐水液滴闪蒸特性开展研究,分析 了喷嘴直径、相对湿度、液滴初始直径、温度以及 量纲一特征数等参数的影响.

尽管学者们已对喷雾闪蒸过程开展了卓有成效的研究,但仍然存在一些不足:所建立液滴闪蒸 模型的假设及考虑因素不尽相同,存在进一步完 善的空间;对液滴闪蒸特性与空间距离的依变关 系以及海水作为工作介质时浓度的影响关注较

**收稿日期**: 2021-04-20; 修回日期: 2021-09-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51936002,52106076).

作者简介:周士鹤(1987-),女,博士,讲师,硕士生导师,E-mail;zhoushihe@dlut.edu.cn;沈胜强\*(1961-),男,博士,教授,博士生导师,E-mail;zzbshen@dlut.edu.cn.

少,有待深入探究.因此,本文针对喷雾闪蒸海水 淡化中液滴闪蒸特性开展模拟研究,首先建立盐 水液滴闪蒸过程数学模型,模型考虑液滴内部的 温度梯度及对流传热强化效应、液滴与环境之间 的辐射换热以及液滴尺寸的变化.在此基础上,揭 示液滴闪蒸特性与空间距离的依变关系,研究主 要运行参数对于闪蒸特性的影响.

#### 1 数学模型

依据喷射方向的不同,喷雾闪蒸海水淡化主 要有向上喷射和向下喷射两种形式,如图1所示.



图1 喷雾闪蒸海水淡化示意

Fig. 1 Schematic of spray flash evaporation seawater desalination

针对运动盐水液滴的闪蒸过程建立数学模型,模型特点及假设如下:

(1)将液滴内部的导热视为沿着径向的一维导热,考虑液滴表面的对流换热以及与环境之间的辐射换热;

(2)液滴在运动和闪蒸的过程中始终维持球形,并考虑液滴的尺寸变化;

(3)蒸汽压力较低,视为理想气体;

(4)忽略盐水液滴之间传热传质现象;

(5)忽略盐水液滴内盐组分传质扩散;

(6)系统处于稳定运行状态,忽略各部件与外 界之间的散热损失.

#### 1.1 液滴运动方程

如图 2 所示,盐水液滴在运动过程中主要受 到重力 F<sub>g</sub>、浮力 F<sub>b</sub> 以及阻力 F<sub>d</sub> 的作用.

$$F_{\rm g} = \rho_{\rm l} V_{\rm l} g \tag{1}$$

$$F_{\rm b} = \rho_{\rm v} V_{\rm l} g \tag{2}$$



Fig. 2 The droplet force analysis

$$F_{\rm d} = C_{\rm d} \; \frac{\pi d_1^2}{4} \frac{\rho_{\rm v} u_1^2}{2} \tag{3}$$

式中:u1为液滴的速度,ρ,和ρ分别为水蒸气和 盐水液滴的密度,V1为盐水液滴体积,g为重力 加速度,d1为液滴直径,C4为阻力系数.

液滴向下喷射和向上喷射的力平衡方程如下:

$$\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{l}}}{\mathrm{d}t} = \left(1 - \frac{\rho_{\mathrm{v}}}{\rho_{\mathrm{l}}}\right)g - \frac{3}{4}\frac{C_{\mathrm{d}}\rho_{\mathrm{v}}}{d_{\mathrm{l}}\rho_{\mathrm{l}}}u_{\mathrm{l}}^{2} \tag{4}$$

$$\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{l}}}{\mathrm{d}t} = \left(\frac{\rho_{\mathrm{v}}}{\rho_{\mathrm{l}}} - 1\right)g - \frac{3}{4}\frac{C_{\mathrm{d}}\rho_{\mathrm{v}}}{d_{\mathrm{l}}\rho_{\mathrm{l}}}u_{\mathrm{l}}^{2} \tag{5}$$

阻力系数  $C_d$  的表达式如下<sup>[10]</sup>:

$$C_{\rm d} = \frac{24}{Re_1} (1 + 0.125 Re_1^{0.72}) \tag{6}$$

$$Re_1 = \frac{\rho_v u_1 d_1}{\mu_v} \tag{7}$$

其中 Re<sub>1</sub>为液滴雷诺数,μ、为水蒸气的动力黏度. 由液滴运动方程,可以获得任意时刻液滴相 对于喷嘴出口的垂直距离 s:

$$\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = u_1 \tag{8}$$

#### 1.2 液滴闪蒸控制方程

考虑到盐水液滴内部的温度梯度,建立球坐 标下的一维非稳态导热微分方程:

$$\rho_{1}c_{p,1}\frac{\partial T_{1}}{\partial t} = k_{1,\text{eff}}\frac{1}{r^{2}}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^{2} \frac{\partial T_{1}}{\partial r}\right) \tag{9}$$

式中: $T_1$ 为液滴温度, $c_{p,1}$ 为液滴的比定压热容,  $k_{1,eff}$ 为液滴的有效导热系数<sup>[9]</sup>.

初始条件以及边界条件如下:

ć

$$T_1(0,r) = T_{1,0} \tag{10}$$

$$\left. \frac{\partial T_1}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \tag{11}$$

$$-k_{1,\text{eff}}\frac{\partial T_{1}}{\partial r}\Big|_{r=a}=h(T_{1}-T_{v})+h_{m}(\rho_{v,a}-\rho_{v})\lambda_{v}+$$

$$\sigma \varepsilon (T_1^4 - T_v^4) \tag{12}$$

式中:T1,0和 T,分别为液滴初始温度和蒸汽温

度;r和a分别为液滴半径和初始值; $\lambda_v$ 为水的汽 化热; $\rho_{v,a}$ 为液滴边界蒸汽密度; $\sigma$ 和 $\varepsilon$ 分别为玻尔 兹曼常数和液滴发射率;h和 $h_m$ 分别为液滴表面 传热和传质系数<sup>[10]</sup>,根据努塞尔数(Nu)和舍伍 德数(Sh)来计算:

$$Nu = \frac{hd_1}{k_v} = 2 + 0.495 Re_v^{0.55} Pr_v^{0.33}$$
(13)

$$Sh = \frac{h_{\rm m}d_1}{D_{\rm v}} = 2 + 0.495 Re_{\rm v}^{0.55} Sc_{\rm v}^{0.33} \qquad (14)$$

其中 k, 为水蒸气导热系数, Pr 为普朗特数, Sc 为 施密特数, D, 为水蒸气在空气中的扩散系数.

液滴表面的质量蒸发率为

$$\dot{m} = -4\pi r ShD_v(\rho_{v,r} - \rho_v)$$
 (15)  
液滴半径随时间的变化率为

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} = \frac{\dot{m}}{4\pi r^2 \rho_{\mathrm{l}}} \tag{16}$$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} = -\frac{2h_{\mathrm{m}}}{\rho_{\mathrm{l}}}(\rho_{\mathrm{v},r} - \rho_{\mathrm{v}}) \tag{17}$$

1.3 评价指标

液滴量纲一温度 $\theta$ ,即液滴温度偏离平衡温度的程度:

$$\theta = \frac{T_{1,\text{ave}} - T_{\text{v}}}{\Delta T} \tag{18}$$

其中 $T_{1,ave}$ 为液滴的平均温度, $\Delta T$ 为初始液滴的过热度,计算式如下:

$$T_{1,\text{ave}} = \frac{3}{4\pi r_z^3} \int_0^{r_z} T_1(t_z, r) 4\pi r^2 dr \qquad (19)$$

$$\Delta T = T_{1,0} - T_{v} \tag{20}$$

其中 t<sub>2</sub> 和 r<sub>2</sub> 分别为液滴闪蒸最终时刻和相应半径.

闪蒸效率 η 的定义式如下:

$$\eta = \frac{m_{\rm v}}{m_0} \tag{21}$$

$$m_{\rm v} = \frac{m_0 c_{p,\rm I} (T_{\rm I,0} - T_{\rm I,ave})}{\lambda_{\rm v}}$$
(22)

式中:m<sub>0</sub>为液滴初始质量,m<sub>v</sub>为生产淡水质量. 闪蒸速率 S<sub>ste</sub>的定义式如下:

$$S_{\rm sfe} = \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} \tag{23}$$

#### 1.4 模型验证

为验证模型准确性,将模型结果与文献实验数据进行了比较,具体实验工况如表1所示.如图3所示,模拟结果与实验数据吻合良好,最大相对误差为2.77%.因此,该模型可用于预测喷雾闪

蒸海水淡化中液滴闪蒸特性.

#### 表1 实验工况

数据 来源	初始 温度/K	初始直 径/μm	过热 度/K	初始速度/ (m•s <sup>-1</sup> )	喷射 方向	喷嘴直 径/mm
文献[3]	303.15	329	12	2.21	向下喷射	20
文献[4]	333.15	249	12	9	向下喷射	8.15



图 3 实验数据与模拟结果对比



#### 2 液滴闪蒸特性分析

基于所建立的数学模型,以量纲一温度、闪蒸 效率和闪蒸速率为评价指标,对影响液滴闪蒸的 主要因素包括液滴初始速度、直径、盐度、温度以 及喷射方向,开展了敏感度分析,各参数的研究范 围如表2所示.

表2 参数取值范围

c

0 0

	Tab. 2 Data range of parameter					
项目	液滴初 始速度/ (m・s <sup>-1</sup> )	液滴初始 直径/μm	液滴初 始盐度/ (g・kg <sup>-1</sup> )	液滴初始 温度/K		
范围	$2 \sim 12$	$150\!\sim\!400$	$0\!\sim\!40$	333.15~353.15		
基本工况	8	250	32	333.15		

基本工况下盐水液滴向下喷射的闪蒸特性如 图 4 所示.由图 4(a)可知,随着垂直距离增加,液 滴速度线性下降,而液滴尺寸变化相对较小.由图 4(b)可知,在液滴闪蒸初期,液滴中心和边界存





Fig. 4 Variation of flash evaporation characteristics of droplet along the vertical distance under fundamental working condition

在着较大的温度梯度.随着液滴的不断下移,闪蒸 持续进行,液滴内部的温度梯度逐渐减小,液滴逐 渐从不稳定的过热态趋向于稳定的饱和态.

从量纲一温度的变化(图 4(c))来看,闪蒸过 程可分为 3 个阶段.前期(0~32 mm)由于存在较 大的 过热度,闪蒸速率保持在很高的水平 (图 4(d)).随着闪蒸的进行(32~256 mm),液滴 表面与环境之间温度差和密度差不断减小,使得 闪蒸过程的传热传质速率显著下降.最后(256~ 500 mm),当量纲一温度从 0.1逐渐趋于 0 时,闪 蒸速率也趋于 0,这意味着要达到完全平衡( $\theta$ = 0)需要相当长的时间.在工程应用中,考虑到设备 的尺寸和成本,通常将在有限的时空范围内达到 的 $\theta$ =0.1视为闪蒸完成的临界点,所对应的时间 和距离分别称为临界时间和临界距离,二者可为 喷雾闪蒸设备的优化设计提供参考.

#### 2.1 液滴初始速度

液滴初始温度为 333.15 K、闪蒸室饱和压力 为 15.76 kPa 工况下,液滴初始速度 *u*<sub>1.0</sub> 对闪蒸特 性的影响如图 5 所示.

从图 5(a)可知, $u_{1,0}$ 越小,达到闪蒸完成的临 界点所需的距离越短.当 $u_{1,0} = 2$  m/s 时液滴闪蒸 的临界距离为 97.7 mm,远远小于 $u_{1,0} = 12$  m/s 时所对应的 376.8 mm.此外,当液滴运动相同距 离 s 时, $u_{1,0}$ 越小,液滴在闪蒸室内停留时间越长, 液滴达到的量纲一温度 $\theta$ 越低,闪蒸效率越高 (图 5(b)).如图 5(c)所示,随着 $u_{1,0}$ 增大,液滴瞬 时闪蒸速率升高.这是因为虽然 $u_{1,0}$ 较大时单位 距离内量纲一温度变化量较小(如图 5(a)所示), 但所需要的时间也更短.由图 5(d)可知,达到相 同 $\theta$ 时, $u_{1,0}$ 越大的液滴消耗的时间越短,因此其 平均闪蒸速率越大.

综上,若偏重于设备的紧凑性设计,推荐采用 较小的初始速度,有利于缩小闪蒸室的尺寸并获 得较高的闪蒸效率;若闪蒸室高度足够(以本文计 算范围为例,>350 mm),则推荐较高的初始速 度,因为在此高度下,闪蒸效率相差无几,更高的 初始速度可获得更高的闪蒸速率以及更大的产水 量(喷嘴直径不变时进料海水量随速度增大而增 大).

#### 2.2 液滴直径

图 6 显示了在初始温度为 333.15 K、闪蒸室 饱和压力为 15.76 kPa、喷射速度为 8 m/s 工况 下,不同初始直径的液滴闪蒸特性.如图 6(a)所 1.0

0.8

0.6

0.4

θ

 $u_{1,0}=2 \text{ m/s}$ 

 $u_{1.0} = 4 \text{ m/s}$ 

 $u_{1,0} = 8 \text{ m/s}$ 

 $u_{1,0} = 10 \text{ m/s}$ 

 $\cdot u_{1.0} = 6 \text{ m/s}$ 

液滴初始直径对于瞬时闪蒸速率的影响因垂 直距离而异. 如图 6(c)所示,当 s<50 mm 时, d1.0









示,由于闪蒸驱动温差一定,液滴的初始直径 d<sub>1,0</sub> 对于液滴闪蒸终态的量纲一温度 θ 和闪蒸效率没 有影响,但对达到闪蒸完成临界点(θ=0.1)的距 离具有显著影响. 以 d<sub>1,0</sub>为 150 μm 和 400 μm 为 例,其临界距离分别为 112.7 mm 和 686.5 mm. 这是因为 d<sub>10</sub>越小,液滴比传热面积越大,导热热 阻越小,从液滴内部传至液滴表面的热量越多.此



越小,液滴瞬时闪蒸速率越快.这是因为 $d_{1,0}$ 的变 化对于运动速度的影响相对较小,但 $d_{1,0}$ 越小的 液滴在闪蒸初期的 $\theta$ 变化越大,相同 $\theta$ 变化量所 需要的时间和移动距离都更短,因此瞬时闪蒸速 率更大.当s > 50 mm时, $d_{1,0}$ 较小的液滴进入闪 蒸中后期,而 $d_{1,0}$ 较大的液滴闪蒸进程有所延迟, 所以瞬时闪蒸速率相对更高.由图6(d)可知, $d_{1,0}$ 越小,达到相同量纲一温度所需的时间越短,即液 滴平均闪蒸速率越大.

通过上述分析可以发现:*d*<sub>1.0</sub>的减小加快了液 滴的闪蒸速率,从而缩短了所需的临界时间和距 离.因此,尽量选用雾化能力较高的喷嘴有助于实 现闪蒸设备的紧凑性设计,同时也应考虑 *d*<sub>1.0</sub>减 小可能会造成蒸汽夹带量增加,对产品淡水水质 产生不利影响.

#### 2.3 液滴初始温度与喷射方向

闪蒸室压力为 15.76 kPa 工况下,液滴初始 温度 T<sub>1.0</sub>以及喷射方向对液滴闪蒸特性的影响如 图 7 所示.

随着  $T_{L_0}$ 降低,达到准静态时量纲一温度升高(图 7(a)),对应的临界距离和时间(图 7(a)、7(d))均增加.  $T_{L_0}$ 越大的液滴,闪蒸初期的瞬时闪蒸速率(图 7(c))越大,随着闪蒸进行,过热度减小,瞬时闪蒸速率降低得更快.由式(21)、(22)可知,相同饱和压力下, $T_{L_0}$ 增加可为液滴提供更多热量用于闪蒸,因此闪蒸效率升高(图 7(b)).然而,即使  $T_{L_0}$ 升高到 353.15 K,最高闪蒸效率也仅有 4%左右.

喷射方向的影响要远小于液滴初始温度.相 比于向下喷射,向上喷射能在更短的距离(图 7(a))达到闪蒸完成的临界点,但差异并不显著. 以 $T_{1,0}$ =333.15 K为例,向上喷射液滴的临界距 离为267 mm,向下喷射时是284 mm.这是因为 喷射方向主要影响液滴的运行速度.向下喷射时 液滴速度更快,达到相同垂直距离时停留时间更 短,因此瞬时闪蒸速率更快(图 7(c)).此外,当运 动距离相同时,由于更长的停留时间,向上喷射液 滴的量纲一温度 $\theta$ 变化量更大,所以闪蒸效率更 高(图 7(b)).

#### 2.4 液滴初始盐度

由图 8(a)可知,随着液滴初始盐度  $x_0$  的增 加,液滴达到准静态时的量纲一温度  $\theta$  增大,纯水 液滴 ( $x_0 = 0$  g/kg)的  $\theta$  已趋于 0,而当  $x_0 =$ 40 g/kg时,其 $\theta$ 仍为 0.1.这是由于沸点升高,导



- 图 7 液滴初始温度与喷射方向对液滴闪蒸特 性的影响
- Fig. 7 Effects of droplet initial temperature and jet direction on flash evaporation characteristics of droplet

致相同饱和压力下液滴闪蒸的驱动力减小,阻碍 了液滴的汽化进程.同时,沸点升高幅度随着盐度 增加而增大,其闪蒸效率(图 8(b))降低.如图 8(c)所示,瞬时闪蒸速率随 x。增加而减小.这是 因为 x。越高,闪蒸过程中液滴表面和闪蒸室中水



(d) 闪蒸时间



Fig. 8 Effect of the droplet initial salinity on flash evaporation characteristics of droplet

蒸气的浓度差越小,闪蒸速率越慢.根据图 8(d) 可知, $x_0$  越小的液滴,其达到相同 $\theta$ 所需要的时 间越短,平均闪蒸速率更快,且 $\theta$ 越低,盐度的影 响越显著.

x<sub>0</sub> 越大,闪蒸完成对应的临界距离越长.因此,在实际应用中,当海水初始盐度较高时,为了确保闪蒸效率,应相应增加闪蒸室高度.

### 3 结 论

(1)随垂直距离增大,液滴速度呈线性下降, 液滴内部温度梯度趋于平缓,液滴尺寸仅有微小 变化,量纲一温度、闪蒸效率和瞬时闪蒸速率根据 变化由急到缓可划分为3个阶段.

(2)较小的初始速度有利于缩小闪蒸室的尺 寸并获得较高的闪蒸效率,而若闪蒸室高度足够 (以本文计算范围为例,>350 mm),则推荐较高 的初始速度,可获得更高的闪蒸速率及更大的产 水量.

(3)减小液滴初始直径能够提高闪蒸速率,从 而缩短所需的临界时间和距离.

(4)提高液滴初始温度可改善闪蒸效率.相比 于向下喷射,向上喷射时液滴达到闪蒸完成的临 界距离更短,闪蒸效率更高,但差异并不显著.

(5)喷雾闪蒸海水淡化中液滴盐度会对闪蒸 产生阻碍作用.初始盐度升高,闪蒸的速率和效率 均下降,且量纲一温度越低,盐度的影响越显著.

#### 参考文献:

- [1] 陈 斌,周致富,辛 慧.制冷剂瞬态闪蒸喷雾冷却研究进展[J].化工学报,2018,69(1):57-68.
  CHEN Bin, ZHOU Zhifu, XIN Hui. Cryogen transient flashing spray cooling: state of art [J].
  CIESC Journal, 2018,69(1):57-68. (in Chinese)
- [2] 吕继组,白敏丽,周 龙. 初始条件及喷雾对柴油 机缸内流动影响研究[J]. 大连理工大学学报, 2008,48(3):344-350.
  LV Jizu, BAI Minli, ZHOU Long. Research into effect of initial situation and fuel spray on cylinder flow [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008,48(3):344-350. (in Chinese)
- [3] IKEGAMI Y, SASAKI H, GOUDA T, et al.
   Experimental study on a spray flash desalination [J]. Desalination, 2006, 194(1/2/3): 81-89.
- [4] MIYATAKE O, TOMIMURA T, IDE Y, et al.
   Experimental study of spray flash evaporation [J].
   Desalination, 1981, 36(2): 113-128.
- [5] 季 璨,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. (in Chinese)

- [6] SHIN H T, LEE Y P, JURNG J. Spherical-shaped ice particle production by spraying water in a vacuum chamber [J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20(5): 439-454.
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] MUTAIR S, IKEGAMI Y. On the evaporation of superheated water drops formed by flashing of liquid jets [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 57: 37-44.
- [9] 程文龙,胡 磊,陈 华,等.真空闪蒸喷雾冷却

中非等温液滴闪蒸特性的研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2015, **35**(4): 399-404.

CHENG Wenlong, HU Lei, CHEN Hua, *et al.* Influence of characteristics of non-isothermal flashing droplet on vacuum flash-spray cooling [J]. **Chinese Journal of Vacuum Science and Technology**, 2015, **35**(4): 399-404. (in Chinese)

- [10] CHEN Q, THU K, BUI T D, et al. Development of a model for spray evaporation based on droplet analysis [J]. Desalination, 2016, 399: 69-77.
- [11] CAI Benan, TUO Xiaobing, SONG Zichen, et al. Modeling of spray flash evaporation based on droplet analysis [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 1044-1051.
- [12] CAI Benan, YIN Yongguang, ZHENG Yulong, et al. Mathematical study of spray flash evaporation in a spray-assisted seawater desalination chamber [J].
   Desalination, 2019, 465: 25-37.

## Simulation study of spray flash evaporation seawater desalination based on droplet analysis

ZHOU Shihe<sup>1,2</sup>, LIU Xinyu<sup>3</sup>, FENG Yin<sup>4</sup>, BIAN Yongning<sup>1</sup>, SHEN Shengqiang<sup>\*2,5</sup>

- (1. School of Ocean Science and Technology, Dalian University of Technology, Panjin 124221, China;
  - 2. Key Laboratory for Desalination of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
  - 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524025, China;

4. Dalian Chenggao Technologies Limited Company, Dalian 116024, China;

5. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** The flash evaporation characteristics of droplets in spray flash evaporation seawater desalination are of great significance for the optimal design of equipment. A mathematical model is developed to describe the flash evaporation process of a brine droplet. The model takes into account the temperature gradient inside the droplet and the radiation heat transfer between the droplet and the environment. The relationship between droplet flash evaporation characteristics and space distance is revealed by simulation, and the influences of operating parameters such as droplet initial velocity, initial diameter, initial salinity, initial temperature, jet direction, etc. are analyzed. The results show that decreasing the droplet initial diameter and increasing the droplet initial velocity can improve the flash evaporation rate. Increasing the droplet initial temperature can improve the flash evaporation efficiency. With the increase of droplet initial salinity, both the flash evaporation rate and efficiency.

Key words: seawater desalination; spray flash evaporation; droplet analysis; mathematical modeling