

# 内部温度及浓度梯度对液滴蒸发模型精度的影响

董世贺<sup>1</sup>, 卓建坤<sup>1\*</sup>, 姚强<sup>2</sup>

- (1. 热科学与动力工程教育部重点实验室(清华大学), 北京市 海淀区 100084;
2. 新疆大学电气工程学院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐市 830046)

## Effects of Internal Temperature and Concentration Gradient on the Precision of the Droplet Evaporation Model

DONG Shihe<sup>1</sup>, ZHUO Jiankun<sup>1\*</sup>, YAO Qiang<sup>2</sup>

- (1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education (Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;
2. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

**ABSTRACT:** To study the effect of internal temperature and concentration gradient on the evaporation rate calculation, a rapid mixing model and an effective diffusion model are established. The evaporation process under different conditions are calculated using the two models, and the relative error of the rapid mixing model is presented. It shows that the internal temperature gradient has an impact on the evaporation rate calculation in the initial stage, but it has little effect on the calculation of droplet lifetime. For the evaporation of saline water droplets, although there may exist large concentration gradient inside droplets before salt crystallize, the error of calculated evaporation rate is small. In general, the rapid mixing model can be used to calculate the lifetime of pure water droplets evaporating in an environment below 700°C. When dealing with the evaporation of saline water droplets, the effective diffusion model can calculate the salt crystallizing process more precisely.

**KEY WORDS:** droplet evaporation; pure water droplets; salt-containing droplets; internal temperature gradient; internal concentration gradient; numerical simulation; evaporation model

**摘要:** 为研究液滴蒸发过程中内部温度及浓度梯度对蒸发速率计算的影响, 该文建立快速混合模型及有效扩散模型。采用两种模型分别计算不同工况下的蒸发过程, 得到快速混合模型的相对误差。结果表明, 内部温度梯度对蒸发速率计算的影响主要体现在初始阶段, 而对蒸发总时间的影响较

小。对于含盐液滴的蒸发, 虽然析盐之前液滴内部可能具有较大浓度梯度, 但对蒸发速率的计算影响较小。总体来看, 计算纯水液滴在 700°C 以下环境中蒸发总时间时可采用快速混合模型; 而有效扩散模型可以更好地处理含盐液滴蒸发时盐析出的过程。

**关键词:** 液滴蒸发; 纯水液滴; 含盐液滴; 内部温度梯度; 内部浓度梯度; 数值模拟; 蒸发模型

## 0 引言

液滴蒸发现象在自然界和工农业生产中广泛存在, 如蒸发冷却<sup>[1-3]</sup>、喷雾灭火<sup>[4]</sup>、海水淡化<sup>[5-8]</sup>以及电厂含盐废水的处理<sup>[9-13]</sup>等, 液滴蒸发过程受到了众多学者的研究和关注。

液滴蒸发过程中, 在其内部同样存在传热传质过程, 即液相的输运过程, 根据对此过程处理方式的不同, 可区分不同的蒸发模型, 包括“ $d^2$ ”模型、快速混合模型、完整的涡模型以及有效扩散模型等。

“ $d^2$ ”模型<sup>[14]</sup>是最早提出的液滴蒸发模型, 此模型假设液滴温度均匀且始终处于湿球温度, 并假设液相和气相的物性为常数。该模型忽略了液滴由初始温度过渡到稳定蒸发温度(即湿球温度)的瞬态加热过程, 并且没有考虑液相输运过程, 是一个基础的气相模型。

快速混合模型<sup>[15]</sup>假设液滴的导热系数和传质扩散系数无穷大, 液滴内部各处温度和组分质量分数相同。与“ $d^2$ ”模型相比, 快速混合模型考虑了液滴的瞬态加热过程, 但依然没有考虑液相的输运过程。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(基于发电的煤炭热解多联产技术)(2018YFB0605000)。

National Key R&D Program of China (Integrated Polygeneration Technology for Coal Pyrolysis and Power Generation) (2018YFB0605000).

完整的涡模型<sup>[16]</sup>采用二维轴对称的控制方程求解液滴内部的环流和传热过程,该模型对物理过程描述最为精确,但计算过程复杂,对计算资源要求较高。

有效扩散模型<sup>[16]</sup>采用有效扩散系数的概念,考虑到内部环流等因素会加速传热传质过程的进行,将其影响归为修正因子,得到有效扩散系数,通过一维扩散方程求解液滴内部的传热传质过程。结果表明,有效扩散模型的计算结果与涡模型及实验吻合较好<sup>[16]</sup>。

为在保证模型精度的同时减小计算量,学者们提出了一些新的模型。Xiao等<sup>[17]</sup>针对液滴内部温度梯度的影响提出了一种新的模型,指出该模型的准确性介于快速混合模型和有效扩散模型之间,而计算量相比有效扩散模型下降了30%。Snegirev等<sup>[18]</sup>指出内部温度梯度对高温环境中易气化液滴的蒸发速率计算有较大影响,并给出了3种简化模型来估计液滴内部的温度分布情况。

以上各种模型中,快速混合模型由于模型简单、计算方便,在许多工程问题中应用广泛<sup>[8-12]</sup>,但由于该模型没有考虑液滴内部的温度及浓度梯度,因此计算出的蒸发速率会有一定误差,而现有文献在采用快速混合模型时并未对误差大小作出估计,因此有必要对此问题进行研究。

实际工程应用中,液滴蒸发的环境条件相差较大,如喷水灭火中,液滴周边环境温度可高达1500K<sup>[4]</sup>,而低温多效海水淡化法中环境温度只有350K<sup>[6]</sup>;此外,液滴本身物性也并不相同,如喷雾冷却及喷雾灭火等领域,往往采用纯水液滴<sup>[1,3]</sup>,而海水淡化及电厂废水处理等领域,液滴中则含有盐分等复杂成分<sup>[9-12]</sup>。基于此,本文分别针对纯水液滴及含盐液滴,研究不同条件下蒸发过程中液滴内部的温度及浓度分布情况,及其对蒸发速率计算的影响。

## 1 理论模型

基于含盐液滴建立理论模型,将初始盐分质量分数置为0,即可得到纯水液滴蒸发的情况。未饱和和含盐液滴的蒸发过程主要包括4个阶段<sup>[19-20]</sup>:在达到饱和析盐之前,液滴依次经历温度变化的非稳态蒸发和温度维持恒定的稳态蒸发两个阶段;液滴饱和析盐后依次经历成壳蒸发及核壳蒸发两个阶段。对于含盐液滴,本文研究液滴析盐之前内部温度和浓度梯度对蒸发速率计算的影响,因此仅针对

蒸发的前两阶段建立模型,所建模型基于以下假设:

1) 液滴在蒸发过程中始终保持球形;

2) 忽略辐射换热;根据Tseng等<sup>[21]</sup>的研究,对于喷水灭火,当周围环境温度在1500K时,需要考虑辐射的影响,而当周围环境温度在1000K以下,且对流作用较强时,辐射对液滴蒸发速率计算结果的影响较小,因此本文模型研究的范围限制在此条件下;

3) 液滴表面处于气液相平衡状态;

4) 液滴中所含盐分为NaCl。

### 1.1 液滴内部传热传质的控制方程及边界条件

描述液滴内部导热的方程<sup>[22]</sup>为

$$\rho_L c_{pL} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda_{\text{eff}} r^2 \frac{\partial T}{\partial r}) \quad (1)$$

式中:  $T$  为液滴温度, K;  $\rho_L$  为液滴密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_{pL}$  为液滴定压比热,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $r$  为液滴径向坐标, m;  $\lambda_{\text{eff}} = \chi \lambda_L$  为有效热导率,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $\chi$  为考虑液滴运动对内部传热影响引入的修正系数。液滴为水和盐的混合物,其物性计算方法为

$$\rho_L = \left( \frac{\bar{Y}_1}{\rho_1} + \frac{\bar{Y}_2}{\rho_2} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$c_{pL} = \bar{Y}_1 c_{p1} + \bar{Y}_2 c_{p2} \quad (3)$$

式中  $\bar{Y}_i$  为液滴中  $i$  组分的平均质量分数,下标  $i=1,2$  分别代表水和盐。

描述液滴内部盐分传质扩散的方程<sup>[22]</sup>为

$$\frac{\partial Y_2}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (D_{\text{eff}} r^2 \frac{\partial Y_2}{\partial r}) \quad (4)$$

式中:  $Y_2$  为液滴内部盐分质量分数;  $D_{\text{eff}} = \chi D_c$ , 为有效传质扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $D_c$  为氯化钠在水中的传质扩散系数,其值近似<sup>[23]</sup>为

$$D_c \approx 0.6 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s} \quad (5)$$

边界条件为:

$$r=0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \frac{\partial Y_2}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

$$r=R, \begin{cases} 4\pi R^2 \lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial r} = Q - Q_e \\ \rho_L D_{\text{eff}} \frac{\partial Y_2}{\partial r} = Y_2 \frac{m_d}{4\pi R^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $R$  为液滴半径, m;  $m_d$  为液滴质量蒸发速率,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $Q$  为单位时间内对流传递给液滴的热量, W;  $Q_e$  为单位时间内液滴蒸发所需的热量, W。

$$Q_e = m_d L_v \quad (8)$$

式中  $L_v$  为水的气化潜热, J/kg。1.2 节中将会给出  $Q$  和  $m_d$  的计算方法。

式(1)和式(4)是有效扩散模型中液滴内部传热传质的控制方程, 若令其中导热系数和传质扩散系数趋于无穷, 即可得到快速混合模型。

### 1.2 液滴蒸发模型

单位时间内通过对流传递给液滴的热量为

$$Q = 4\pi R^2 h(T_\infty - T_s) \quad (9)$$

式中:  $T_\infty$  为环境温度, K;  $T_s$  为液滴表面温度, K;  $h$  为对流换热系数, W/(m<sup>2</sup>·K), 采用 Ranz-Marshell 关于圆球对流换热的经验关系式计算<sup>[2]</sup>。

$$Nu = \frac{2hR}{\lambda_g} = 2 + 0.6Re_d^{1/2} Pr_g^{1/3} \quad (10)$$

式中:  $\lambda_g$  为周围气体的平均热导率, W/(m·K);  $Pr_g$  为周围气体平均普朗特数;  $Re_d$  为液滴雷诺数:

$$Re_d = \frac{\rho_g V_d (2R)}{\mu_g} \quad (11)$$

式中:  $\rho_g$  为周围气体平均密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\mu_g$  为周围气体平均动力粘度, Pa·s;  $V_d$  为液滴与周围气体的相对速度, m/s。

液滴与周围气体的相对运动会加速内部混合, 强化内部传热传质, 上文修正系数  $\chi$  通过下式计算<sup>[16]</sup>:

$$\chi = 1.86 + 0.86 \tanh[2.245 \log_{10}(Pe_L / 30)] \quad (12)$$

$$Pe_L = \frac{2\rho_L u_s R}{\mu_L} Pr_L \quad (13)$$

式中  $u_s$  为液滴表面最大液体流速<sup>[16]</sup>, m/s:

$$u_s = \frac{12.69}{32} u_d \frac{\mu_g}{\mu_L} \frac{Re_d}{Re_d^{2/3} (1 + B_M)} \quad (14)$$

液滴质量蒸发速率<sup>[16]</sup>可以表示为

$$m_d = 2\pi\rho_g R D_V Sh^* \ln(1 + B_M) \quad (15)$$

式中:  $D_V$  为水蒸气在水中的传质扩散系数<sup>[23]</sup>, m<sup>2</sup>/s;  $Sh^*$  为考虑蒸发过程影响的修正舍伍德数, 计算<sup>[16]</sup>如下:

$$\begin{cases} Sh = 2 + 0.6Re_d^{1/2} Sc_g^{1/3} \\ F_1 = (1 + B_M)^{0.7} \frac{\ln(1 + B_M)}{B_M} \\ Sh^* = 2 + \frac{Sh - 2}{F_1} \end{cases} \quad (16)$$

式中  $Sc_g$  为周围气体平均施密特数。

式(15)中  $B_M$  为传质数<sup>[14]</sup>:

$$B_M = \frac{Y_{v,s} - Y_{v,\infty}}{1 - Y_{v,s}} \quad (17)$$

式中  $Y_{v,s}$  和  $Y_{v,\infty}$  分别为液滴表面和远离液滴的环境气体中的水蒸气质量分数。液滴表面处水蒸气质量分数  $Y_{v,s}$  为

$$Y_{v,s} = [1 + (\frac{P_g}{\alpha_w P_{v,sat}} - 1) \frac{M_a}{M_v}]^{-1} \quad (18)$$

式中:  $P_g$  为环境压力, Pa;  $P_{v,sat}$  为液滴温度下纯水的饱和蒸气压, Pa;  $M_a$  和  $M_v$  分别为空气和水蒸气摩尔质量, kg/mol;  $\alpha_w$  为液滴溶液中水的活度<sup>[22]</sup>:

$$\alpha_w = 1 - 0.57 \frac{Y_{2,s}}{1 - Y_{2,s}} \quad (19)$$

式中  $Y_{2,s}$  为液滴表面处液体薄层中的盐分质量分数。

基于以上模型, 采用四阶 Runge-Kutta 方法, 利用 MATLAB 平台编写计算程序。

### 1.3 模型验证

Sadafi 等<sup>[25]</sup>对不同初始含盐率的液滴在不同的气流速度和温度条件下的蒸发进行了实验研究, 根据其实验结果对本文模型的有效性进行验证。实验工况为: 液滴初始含盐率 3%, 初始半径 550 $\mu$ m, 周围气流温度 45 $^{\circ}$ C, 气流速度分别为 0.5、1.5 和 2.5m/s, 采用本文的两种模型分别进行计算。将有效扩散模型得到的结果与实验结果进行比较, 如图 1 所示。

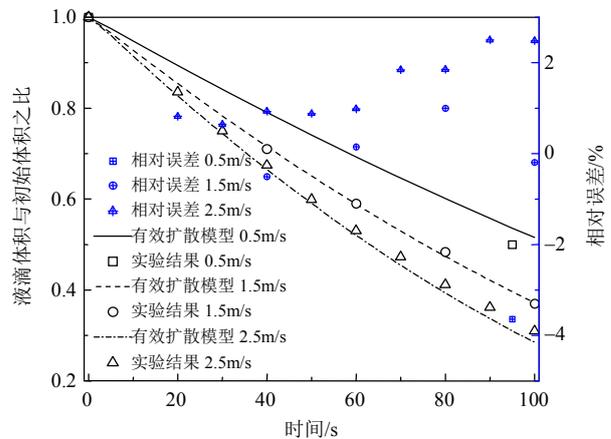


图 1 本文中有效扩散模型与 Sadafi<sup>[25]</sup>实验结果的对比  
Fig. 1 Comparison of the effective diffusion model in this paper with the experimental results<sup>[25]</sup>

由图 1 可知, 本文有效扩散模型与实验结果吻合较好。计算表明, 上述工况下快速混合模型得到

的结果与有效扩散模型十分接近,两者差别在1%以下。

## 2 结果与讨论

### 2.1 内部温度梯度的影响

针对纯水液滴蒸发过程研究内部温度梯度对蒸发速率计算的影响。在第一阶段的非稳态蒸发过程中,液滴由初始温度过渡到稳定的蒸发温度,由于传热热阻的存在,液滴内部会有温度梯度。当进入第二阶段的稳态蒸发后,液滴温度不再变化,内部温度均匀分布。因此,内部温度梯度只影响初始的非稳态蒸发过程。

因此首先针对蒸发初始阶段,比较了不同液滴初始直径下采用快速混合模型的误差与环境温度之间的关系,条件设置为:液滴初始温度 $20^{\circ}\text{C}$ ,液滴与周围气体相对速度 $V_d=2\text{m/s}$ ,周围气体中水蒸气质量分数1%,结果如图2所示,其中相对误差的计算方法为

$$e_r = \frac{t_{\text{rapid}} - t_{\text{eff}}}{t_{\text{eff}}} \times 100\% \quad (20)$$

式中 $t_{\text{rapid}}$ 和 $t_{\text{eff}}$ 分别为快速混合模型和有效扩散模型计算的液滴质量蒸发2%所需的时间。

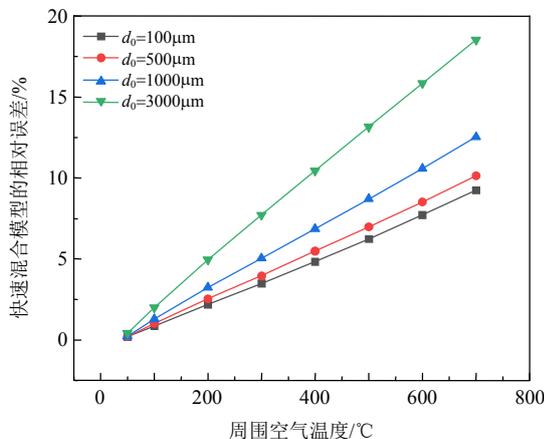


图2 初始阶段快速混合模型的误差( $V=2\text{m/s}$ )

Fig. 2 Relative error of the rapid mixing model in the initial stage ( $V=2\text{m/s}$ )

由图2可知,随周围环境温度的提高及液滴初始直径的增大,快速混合模型得到的初始阶段蒸发速率误差增大。由图2还可以看出,周围温度 $T_{\infty}$ 对误差的影响较大,而相比之下液滴直径的影响较小。

图2中误差最大的条件为: $d_0=3000\mu\text{m}$ , $T_{\infty}=700^{\circ}\text{C}$ ,此时误差接近20%,此条件下液滴内部温度分布情况如图3所示。该条件下液滴质量蒸发2%所用时间为1.2s,由图3可得,此时液滴内部具有较大的温度梯度,1s时液滴表面与中心温度相差

$21.9^{\circ}\text{C}$ 。

在计算液滴蒸发速率时,需要由液滴表面温度计算饱和蒸气压,快速混合模型由于没有考虑内部温度梯度,计算出的液滴表面温度并不准确,可据此对误差产生的原因进一步分析:图3工况下两种模型计算出的液滴表面温度如图4所示,与之对应的蒸发速率如图5所示。

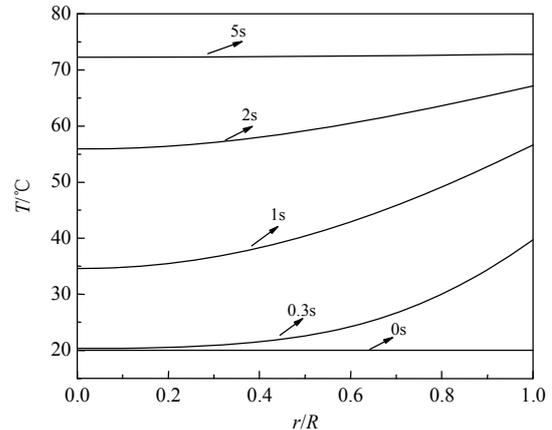


图3 蒸发初期液滴内部温度分布

Fig. 3 Internal temperature distribution in the initial stage

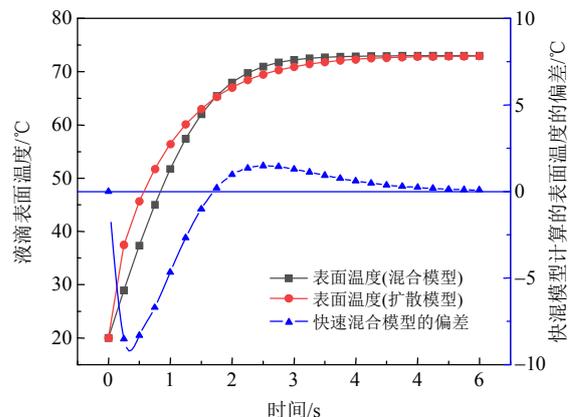


图4 2种模型计算出的液滴表面温度比较

Fig. 4 Comparison of the droplet surface temperature calculated from the two models

从图4和图5中可以看出,在前1.7s,快速混合模型计算的表面温度偏低,最大偏差 $8.5^{\circ}\text{C}$ ,相应的蒸发速率也偏低,最大误差49.1%;1.7s之后进入稳态蒸发之前,快速混合模型计算的表面温度偏高,蒸发速率也偏高;随着蒸发逐渐进入稳态,快速混合模型的误差逐渐减小。

可以从内部传热的角度分析其原因,前1.7s快速混合模型计算的表面温度偏低的原因在于高估了表面处热量向液滴内部传递的过程;而在1.7s之后一段时间快速混合模型计算的表面温度偏高的原因在于该模型忽略了内部传热热阻,所以液滴更

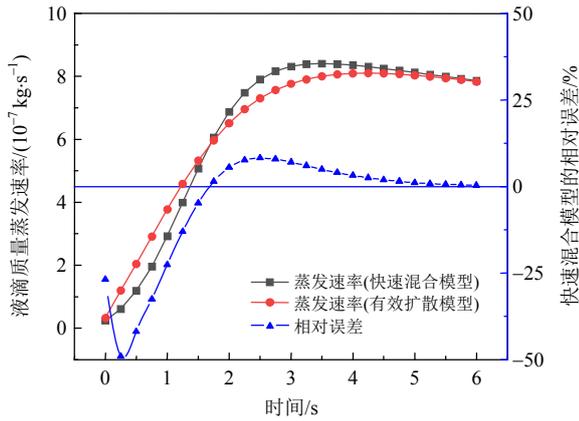


图 5 2 种模型计算出的蒸发速率比较  
Fig. 5 Comparison of the evaporation rates calculated from the two models

快地进入稳态蒸发阶段。

以上分析针对的是内部温度梯度对初始阶段蒸发速率计算的影响，对于整个蒸发过程，上述工况下两种模型计算的蒸发时间及快速混合模型的误差如图 6 所示。

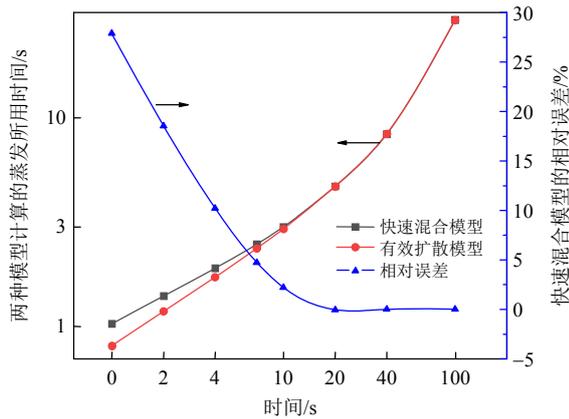


图 6 2 种模型计算的蒸发不同质量所需时间的比较  
Fig. 6 Comparison of the time required for evaporation different mass calculated from the two models

由图 6 可以看出，两种模型计算的蒸发速率差别主要体现在初始阶段，随着蒸发的进行差别逐渐减小。根据对图 4 和图 5 的分析，快速混合模型计算的蒸发速率在 0~1.7s 内偏小，1.7s 之后稳态蒸发之前偏大，这两阶段造成的误差会抵消一部分；且蒸发进入稳态后，由于不存在内部温度梯度，两种模型是等效的，所以后期快速混合模型得到的结果比较准确。

接着，改变液滴初始直径、周围环境温度及液滴与周围气体相对速度，分析了蒸发不同阶段快速混合模型的相对误差，结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出，不同条件下快速混合模型的误差都在初始阶段较大，随着蒸发的进行误差逐渐

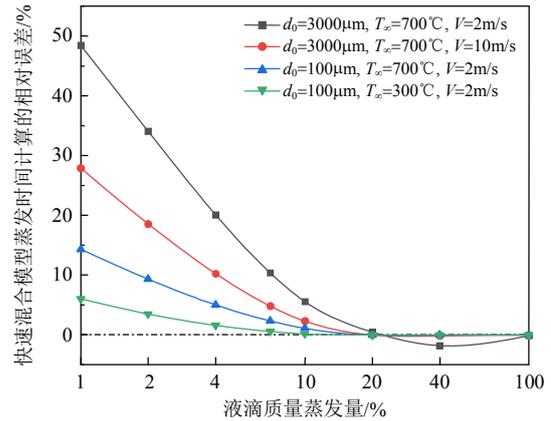


图 7 蒸发不同阶段快速混合模型的误差  
Fig. 7 Error of the rapid mixing model at different evaporation stage

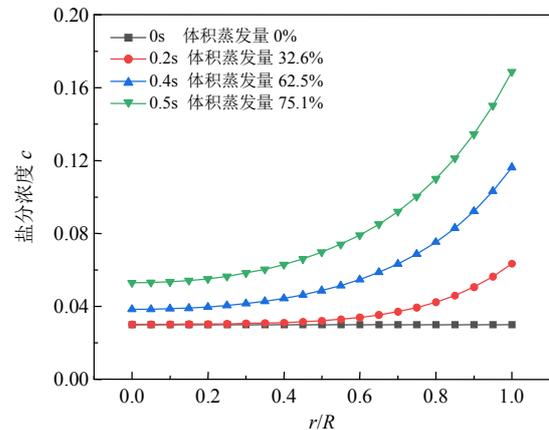
减小，总蒸发时间的误差较小。蒸发初始阶段的误差随液滴直径增大、周围环境温度提高及液滴与环境相对速度的提高而增大。而图中工况下总蒸发时间的误差都在 0.5% 以下。

根据本文所建的两模型，当选择相同的时间步长时，有效扩散模型的计算耗时约为快速混合模型的 5 倍，因此，实际在计算纯水液滴蒸发总时间时往往可以采取快速混合模型，并能保证足够的精度。

### 2.2 内部浓度梯度的影响

含盐液滴蒸发时，表面水分蒸发，盐分质量分数提高，表面处盐分会向液滴内部扩散，因此在液滴内部存在盐分浓度梯度，且浓度梯度在蒸发过程中始终存在，这与温度梯度不同，根据 2.1 节的分析，内部温度梯度只存在于初始的非稳态蒸发阶段。

首先，研究了不同初始含盐率  $c_0$  的液滴蒸发时内部浓度分布变化情况，工况条件为：液滴初始直径  $d_0=100\mu\text{m}$ 、周围环境温度  $T_\infty=160^\circ\text{C}$ 、液滴与周围气体相对速度  $V=0\text{m/s}$ ，采用有效扩散模型计算，得到的内部盐分浓度分布如图 8 所示。



(a) 液滴初始含盐率  $c_0=0.03$

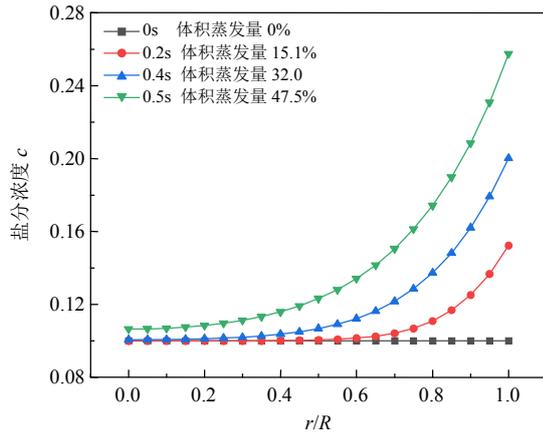
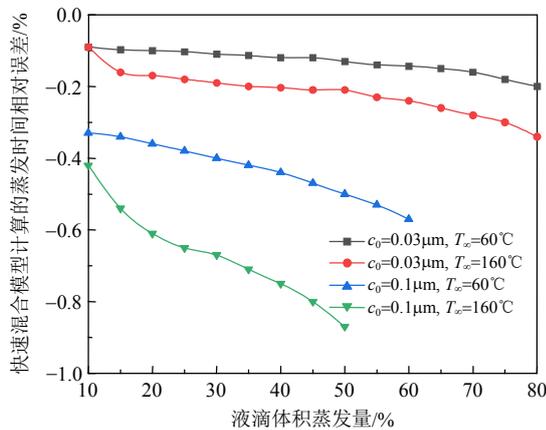
(b) 液滴初始含盐率  $c_0=0.1$ 

图8 液滴内部盐分浓度分布变化情况

Fig. 8 Variation of salt concentration distribution inside droplets

从图8中可以看出,蒸发过程中液滴表面处浓度不断升高,而中心处浓度始终接近初始值,表面和中心的浓度差别逐渐增大。对比图8(a)和图8(b)可以看出,当液滴初始浓度较小时,蒸发过程中液滴平均浓度升高更慢,内部浓度梯度更小。

接着,改变  $d_0$ 、 $c_0$ 、 $T_\infty$  以及  $V$ , 采用2种模型分别计算液滴蒸发不同体积所用的时间,并根据式(20)计算快速混合模型的相对误差,结果如图9所示,其中  $c_0=0.1\mu\text{m}$  的两条曲线没有继续向后延伸是因为液滴表面处盐浓度  $Y_{2,s}$  已经达到了饱和。

图9 快速混合模型计算蒸发不同体积所用时间的相对误差( $d_0=100\mu\text{m}$ ,  $V=0\text{m/s}$ )Fig. 9 Relative error of the time used for evaporating different volume calculated by the rapid mixing model ( $d_0=100\mu\text{m}$ ,  $V=0\text{m/s}$ )

从图9中可以看出,快速混合模型的误差随液滴初始含盐率的提高而增大,随周围环境温度提高而增大。计算表明,初始直径  $d_0$  和相对速度  $V$  对误差大小基本没有影响。原因在于  $d_0$  增大时,一方面盐分扩散的长度尺度  $d_0$  增大,另一方面液滴蒸发的

时间尺度按照  $d_0^2$  的比例增大,这样造成液滴内部浓度分布是相似的;而  $V$  增大一方面使蒸发时间缩短,另一方面促进液滴内部传热传质,两方面影响相互抵消。

总体来看,图9中各种工况下,相对误差都在1%以下,可以满足工程计算的精度需求。对比图8和图9可以看出,虽然蒸发过程中液滴内部浓度梯度较大,但对蒸发速率计算的影响并不大,这是因为在计算式(18)、(19)时,不同  $Y_{2,s}$  对应的  $Y_{v,s}$  差别不大。

另一个值得考虑的问题是,根据图8,液滴表面处浓度值始终高于平均浓度,那么在平均浓度达到饱和之前,表面处会首先达到饱和,这可能导致表面处提前析出盐分晶体, Sadafi 等<sup>[25]</sup>在实验中观察到了这种现象。在这种情况下蒸发速率如何准确计算仍是一个需要解决的问题。

### 3 结论

本文建立了液滴蒸发的快速混合模型及有效扩散模型,采用两种模型分别计算纯水液滴和含盐液滴在不同工况下的蒸发过程,分析液滴内部温度和浓度梯度,及其对蒸发速率计算的影响,得到的主要结论如下:

1) 对于纯水液滴的蒸发,在计算初始阶段蒸发速率时,快速混合模型的误差随液滴初始直径增大、周围环境温度提高、液滴与周围气体相对速度的提高而增大。快速混合模型的误差随蒸发进行逐渐减小。对于液滴寿命的计算,当环境温度在  $700^\circ\text{C}$  以下时,由内部温度梯度造成的误差在  $0.5\%$  以下。考虑到2种模型计算量的差别,此条件下计算纯水液滴蒸发总时间时可以采用快速混合模型。

2) 对于含盐液滴的蒸发,快速混合模型计算的蒸发速率误差随环境温度的提高而增大,随液滴初始含盐率的提高而增大。虽然在液滴析盐之前内部可能具有比较大的浓度梯度,但对蒸发速率计算的影响较小,当环境温度在  $160^\circ\text{C}$  以下时,内部浓度梯度造成的误差在  $1\%$  以下。而在计算液滴表面析出盐分的过程时采用有效扩散模型可以得到更准确的结果。

### 参考文献

- [1] 王瑜, 吴露露, 康娜, 等. 数据中心喷雾冷却系统研究进展和要素分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7391-7403.

- WANG Yu, WU Lulu, KANG Na, et al. Research progress and factors analysis of spray cooling system in data center[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(18): 7391-7403(in Chinese).
- [2] ALKHEDHAIR A, JAHN I, GURGENCI H, et al. Parametric study on spray cooling system for optimising nozzle design with pre-cooling application in natural draft dry cooling towers[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 104: 448-460.
- [3] 刘严雪, 何锁盈, 张治愚, 等. 双喷嘴布置间距对蒸发冷却性能影响的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4910-4919.
- LIU Yanxue, HE Suoying, ZHANG Zhiyu, et al. Numerical simulation on the influence of two-nozzle distance on evaporative cooling performance[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4910-4919(in Chinese).
- [4] 孙瑞雪, 姚斌. 细水雾在城市地下综合管廊内灭火特性的数值模拟研究[J]. 火灾科学, 2019, 28(1): 28-34.
- SUN Ruixue, YAO Bin. Numerical simulation on extinguishing effect of water mist system in urban underground utility tunnel[J]. Fire Safety Science, 2019, 28(1): 28-34.
- [5] 骆骞, 毕勤成, 韩彦宁, 等. 盐水液滴降压环境下蒸发过程[J]. 化工学报, 2013, 64(6): 2001-2006.
- LUO Qian, BI Qincheng, HAN Yanning, et al. Evaporation process of brine droplet at reducing pressure[J]. CIESC Journal, 2013, 64(6): 2001-2006(in Chinese).
- [6] GUO Penghua, LI Tiantian, LI Peiwen, et al. Study on a novel spray-evaporation multi-effect distillation desalination system[J]. Desalination, 2020, 473: 114195.
- [7] 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.
- [8] 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).
- [9] 熊桂龙, 吴厚松, 李水清, 等. 可溶性盐份对脱硫废水液滴烟道蒸发特性影响的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5239-5247.
- XIONG Guilong, WU Housong, LI Shuiqing, et al. Numerical simulation of the influence of soluble salt on evaporation characteristics of desulfurization wastewater droplet in high temperature flue gas[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5239-5247(in Chinese).
- [10] 冉景煜, 张志荣. 不同物性液滴在低温烟气中的蒸发特性数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(26): 62-68.
- RAN Jingyu, ZHANG Zhirong. Numerical study on evaporation characteristics of different substance droplet in low temperature flue gas[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(26): 62-68(in Chinese).
- [11] 杨彬, 张力, 左蓓萌, 等. 含盐脱硫废水液滴群在低温烟道蒸发特性数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(4): 925-932.
- YANG Bin, ZHANG Li, ZUO Beimeng, et al. Numerical simulation of evaporation characteristics for salt containing desulfurization wastewater droplets in low temperature flue gas[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(4): 925-932(in Chinese).
- [12] 李恒凡, 焦世权, 韩中合. 脱硫废水在烟道中蒸发运动特性的数值研究[J]. 动力工程学报, 2021, 41(8): 659-666.
- LI Hengfan, JIAO Shiquan, HAN Zhonghe. Numerical study on evaporation and movement characteristics of desulfurization wastewater in flue gas channel[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(8): 659-666(in Chinese).
- [13] 何晨, 毛霖, 杨仲卿, 等. 逆流喷淋浓缩塔中雾化参数对脱硫废水液滴群流动与蒸发特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2588-2597.
- HE Chen, MAO Lin, YANG Zhongqing, et al. Influence of atomization parameters in countercurrent spray concentration tower on flow and evaporation characteristics of desulfurization wastewater droplets[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2588-2597(in Chinese).
- [14] SPALDING D B. The combustion of liquid fuels[J]. Symposium (International) on Combustion, 1953, 4(1): 847-864.
- [15] LAW C K. Multicomponent droplet combustion with rapid internal mixing[J]. Combustion and Flame, 1976, 26: 219-233.
- [16] 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.
- [17] XIAO Helin, ZHAO Liangrui, LI Zhongzhao, et al. Development of a simplified model for droplet vaporization[J]. Thermal Science, 2016, 20(1): 337-345.
- [18] SNEGIREV A Y. Transient temperature gradient in a single-component vaporizing droplet[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 65: 80-94.
- [19] HANDSCOMB C S, KRAFT M, BAYLY A E. A new model for the drying of droplets containing suspended solids after shell formation[J]. Chemical Engineering

- Science, 2009, 64(2): 228-246.
- [20] SADAFI M H, JAHN I, STILGOE A B, et al. Theoretical and experimental studies on a solid containing water droplet[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 78: 25-33.
- [21] TSENG C C, VISKANTA R. Enhancement of water droplet evaporation by radiation absorption[J]. Fire Safety Journal, 2006, 41(3): 236-247.
- [22] 弗兰克 P 英克鲁佩勒, 大卫 P 德维特, 狄奥多尔 L 伯格曼, 等. 传热和传质基本原理[M]. 葛新石, 叶宏, 译. 6 版. 北京: 化学工业出版社, 2007: 269-270. INCROPERA F P, DEWITT D P, BERGMAN T L, et al. Fundamentals of heat and mass transfer[M]. GE Xinshi, YE Hong, trans. 6th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 269-270(in Chinese).
- [23] 弗兰克 P 英克鲁佩勒, 大卫 P 德维特, 狄奥多尔 L 伯格曼, 等. 传热和传质基本原理[M]. 葛新石, 叶宏, 译. 6 版. 北京: 化学工业出版社, 2007: 580. INCROPERA F P, DEWITT D P, BERGMAN T L, et al. Fundamentals of heat and mass transfer[M]. GE Xinshi, YE Hong, trans. 6th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 580(in Chinese).
- [24] ANDREAS E L. The temperature of evaporating sea spray droplets[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1995, 52(7): 852-862.
- [25] SADAFI M H, JAHN I, STILGOE A B, et al. A theoretical model with experimental verification for heat and mass transfer of saline water droplets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 81: 1-9.



董世贺

在线出版日期: 2022-06-28。

收稿日期: 2021-11-15。

作者简介:

董世贺(1998), 男, 博士研究生, 主要从事太阳能热利用基础的研究, dongsh20@mails.tsinghua.edu.cn;

\*通信作者: 卓建坤(1975), 男, 副研究员, 从事生物质能及多能互补技术研究, zhuojk@tsinghua.edu.cn;

姚强(1962), 男, 教授, 研究方向为燃烧理论与技术, 燃烧污染控制理论与技术, yaoq@mail.tsinghua.edu.cn。

(编辑 邵泽亮, 胡琳琳)

# Effects of Internal Temperature and Concentration Gradient on the Precision of the Droplet Evaporation Model

DONG Shihe<sup>1</sup>, ZHUO Jiankun<sup>1</sup>, YAO Qiang<sup>1,2</sup>

(1. Tsinghua University; 2. Xinjiang University)

**KEY WORDS :** droplet evaporation; pure water droplets; salt-containing droplets; internal temperature gradient; internal concentration gradient; numerical simulation; evaporation model

Droplet evaporation phenomenon is widely found in nature and used in industrial production, such as spray cooling, fire suppression, seawater desalination and treatment of salt wastewater in power plant. During the droplet evaporation process, there is also heat and mass transfer process inside the droplet, which is the liquid phase transportation process. Different evaporation models can be distinguished, including the "d<sup>2</sup>" model, the rapid mixing model, the complete vortex model and the effective diffusion model.

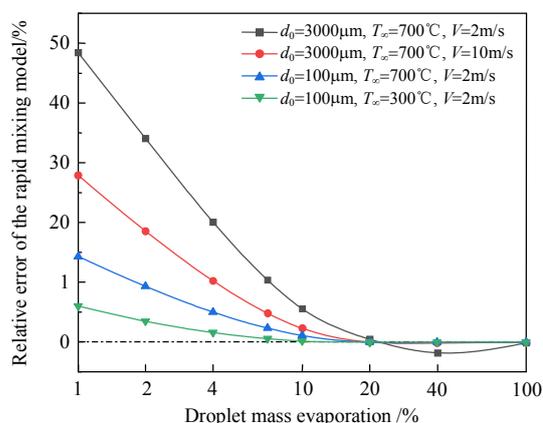
In the above models, the rapid mixing model is widely used in many engineering problems due to its simplicity and convenience. However, because the model does not consider the internal temperature and concentration gradient, the calculated evaporation rate may not be very accurate. And there is few literature estimate the error when adopting the rapid mixing model, so it is necessary to study the problem. In this paper, the temperature and concentration distribution inside the droplets and their influence on evaporation rate calculation under different conditions are studied.

The equation describing the internal heat conduction process of the droplet is

$$\rho_L c_{pL} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda_{\text{eff}} r^2 \frac{\partial T}{\partial r}) \quad (1)$$

The relative error of the fast mixing model is analyzed by changing the initial droplet diameter, the ambient temperature and the relative velocity between the droplet and the environment. The results are shown

in Fig. 1.



**Fig. 1 Error of the rapid mixing model at different evaporation stage**

As seen from Figure 1, the effect of the internal temperature gradient on the evaporation rate calculation is mainly reflected in the initial stage, and the error increases with the initial droplet diameter and the ambient temperature. The internal temperature gradient has little effect on the calculation of droplet lifetime. Thus the rapid mixing model can be adopted when calculating the lifetime of pure water droplets.

For the evaporation of saline water droplets, although there may exist large concentration gradient inside droplets before salt crystallize, the error of calculated evaporation rate is small. When the ambient temperature is below 160 °C, the error caused by internal concentration gradient is below 1%. More accurate results can be obtained by using the effective diffusion model when dealing with the process of salt crystallization.