https://doi.org/10.1051/jnwpu/20254340774

低压下固着液滴闪蒸的机制和关键影响参数研究

徐世明[1,2], 周贤[3], 胡蔚帆[4], 李大超[1], 高英伟[1], 李鹏[1], 彭烁[3],
张云鹏[3], 赵烨枫[4], 田远思[4], 李二强[4]

(1.华能营口热电有限责任公司, 辽宁 营口 115004; 2.中国矿业大学 低碳能源与动力工程学院, 江苏 徐州 221116;
3.中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209; 4.中国科学技术大学 工程科学学院, 安徽 合肥 230027)

摘 要:液滴闪蒸广泛应用于余热回收、人工制冰等工业领域。其中剧烈闪蒸会引发液滴沸腾爆炸从而造成闪蒸腔内部结构的损伤,因此研究如何抑制闪爆发生对工业生产安全至关重要。基于高速摄像技术,实验观察了固着液滴(去离子水和脱硫浆液)发生闪爆的过程并记录闪爆发生时间;利用有限元计算方法建立了液滴闪蒸模型,并对单个/多个液滴发生闪蒸时内部流动和传热过程进行了数值模拟。结果表明,液滴初始直径能够直接影响其内部温度变化率,从而控制内部相变过程和液滴闪爆的发生。给出了不同条件下液滴发生闪爆的临界直径,并指出有效抑制闪爆发生的方法,包括提高环境气压、降低液滴初始温度、减小液滴尺寸和使用低导热系数基底。此外,数值结果发现闪蒸过程中液滴内部由热对流主导,并通过对多液滴阵列的三维计算发现闪蒸速率下降是由液滴附近较低的蒸汽浓度梯度造成的。

关 键 词:液滴闪蒸;液滴闪爆;临界直径;有限元方法;脱硫浆液
中图分类号:O359 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2758(2025)04-0774-10

闪蒸是指当液体从饱和状态突然降压至过热状态而引起的蒸发现象。值得注意的是,闪蒸是在液体表面与内部同时发生的快速蒸发过程。因此,具有高蒸发速率、低能耗、可在减压环境发生等特性的闪蒸过程,被广泛应用于余热回收[1]、喷雾冷却[2-7]、盐水脱盐[8-15]、除湿制冷[16-18]、人工制冰[19-21]等工业技术领域。湿法烟气脱硫工艺中通过闪蒸实现脱硫浆液余热的清洁、高效、低成本回收,可以提高吸收塔内 SO_2 吸收效率,同时可减少工艺用水的供应[1]。闪蒸喷雾冷却是指液体经过喷嘴进入低压环境发生雾化产生大量微小液滴,并进行冷却换热的高热流密度散热方式。该技术已应用于激光手术中以避免高温光束对皮肤造成灼伤,并成为航天探测器紧凑型空间散热热控方案之一[7]。液膜闪蒸指闪蒸罐底部液体因压力突降而产生的闪蒸现象。液膜闪蒸过程的研究主要集中于闪蒸参数和蒸发特性随时间的演化特征[22],以及界面流动特性[23]。喷雾闪蒸中的大量小液滴因液体雾化作用,具有更大比表面积和更快蒸发速率。喷雾闪蒸研究一般着眼于液滴闪蒸即单个液滴在闪蒸状态下的传热传质特性。液膜闪蒸较液滴闪蒸的传热传质过程更为简单,与二维液滴闪蒸相似。喷雾闪蒸可理解为大量单个液滴同时闪蒸,以及液滴间相互作用的过程。由此可见,液滴闪蒸是闪蒸研究的基础。揭示液滴闪蒸机理,建立液滴闪蒸的传热传质模型,对于研究多种闪蒸过程具有重要意义和指导作用。

液滴蒸发在自然界和人类的生产生活中普遍存在,液滴表面与远处的蒸汽压力差是造成液滴扩散通量、体积减小的主要驱动力。Deegan 等[24]首先发现了基板上固着液滴蒸发的咖啡环现象,引起了研究者对液滴蒸发过程的关注。目前,对液滴蒸发特性的研究主要集中在毛细流、马兰戈尼流和多组分

收稿日期:2024-09-09
基金项目:国家自然科学基金(12302350)、陕西省自然科学基金(2023-JC-QN-0083)、中央高校基本科研业务费专项资金(WK2090000072)与中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ21-H45)资助
作者简介:徐世明(1983—),高级工程师
通信作者:周贤(1983—),正高级工程师
e-mail:x_zhou@qny.chng.com.cn

液滴蒸发等方面。同时,减压环境下的液滴闪蒸也是研究热点之一[25]。Hu 和 Larson[26]通过理论分析和有限元计算,对具有钉扎接触线的固着液滴蒸发进行了实验研究,发现在小的初始接触角下,液滴的净蒸发速率几乎保持不变。Dalla 等[27]提出了对经典 D^2 定律的修正,通过对渐进液滴特性的适当估计确定稀释条件下的液滴蒸发率。Shen 等[28]建立了在环形坐标系下弯曲基底上固定液滴蒸发的扩散控制传热传质的综合理论模型,并详细介绍了液滴和基体的界面冷却和热导率及其初始形状对液滴蒸发的影响。杜王芳等[29]给出了悬滴闪蒸冻结的热力学特征。Stauber 等[30]比较了“黏附-滑移”模式蒸发与恒定半径/恒定接触角模式蒸发对固着液滴蒸发寿命的影响。Masoud 等[31-32]推导了不同尺寸和任意接触角的多个固着液滴的扩散蒸发率的精确估计。Wray 等[33]提出了多个固着液滴竞争扩散蒸发的渐近模型,展示了液滴间的屏蔽效应,并使用该模型研究了这种屏蔽效应对液滴演变和寿命以及咖啡环效应的影响。

在闪蒸过程中,液滴内部剧烈蒸发并形成多个气泡。在较剧烈的闪蒸过程中,气泡在闪蒸初期产生并迅速膨胀,最终破裂爆炸。Peterson 等[34]发现闪蒸过程中的传质速率是单独蒸发时的 10~12 倍,并给出了实验条件下“闪蒸因子”的经验公式 $F = 27.5 - 0.527T_0 - 0.129\Delta p$,其中 T_0 为初始温度,Δp 为压降。大多数液滴闪蒸研究使用悬滴,Avedisian[35]通过将液滴悬浮在不混溶液体中,在一定的过热度范围内完整地观察到液滴内部沸腾过程。Liu 等[36]实验研究了海水悬滴在低环境压力下的闪蒸过程,发现组分和溶液浓度对蒸发过程有较大影响。Gao 等[16,37]对氯化锂溶液液滴中的温度分布进行了实验,发现表面温度和中心温度在闪蒸开始阶段都急剧下降,然后缓慢恢复;压力是影响蒸发速率的重要因素,压力越低,闪蒸越强烈;初始温度较高的液滴只会在开始时增强闪蒸的强度;辐射热可以显著提高闪蒸的强度。Gao 等[38]发现由于内部过热液体和马兰戈尼流,成核位置位于液滴的上层,并且气泡破碎过程或冠部破碎过程都发生在成核部位。Liu 等[36]发现基底润湿性对液滴蒸发速率和气泡生长均有影响,并考虑对流传热、基底传热、蒸发冷却、液滴内部对流和 Stefan 流,模拟铜和玻璃片表面的液滴闪蒸。在特定情况下,液滴会因剧烈闪蒸导致闪爆发生,Shepherd 和 Sturtevant[39]实验研究了过热极限下闪爆发生的瞬态过程,发现在每次爆炸过程中,液滴内只形成一个气泡,并且生长在微秒的时间尺度上进行,并在气泡表面观察到由快速蒸发导致的界面不稳定性。

Satoh 等[21]给出了可预测压力突降时液滴温度变化的理论模型。Morlat[40]给出了可描述过热液滴中气泡生长过程理论公式。Chen 等[9]提出了考虑液滴运动和液滴尺寸分布的闪蒸模型,该模型能够准确预测现有喷雾蒸发器在特定运行条件下的产水量和热效率。Cai 等[25]提出并开发了一个基于扩散控制蒸发的数学模型,考虑了液滴运动、液滴尺寸变化和温度变化。

综上所述,可以发现多数液滴闪蒸实验均使用热电偶悬滴,这会直接引入气化核心,影响液滴闪爆的研究。其次,对造成液滴闪爆的内部气泡演化过程和模拟工业生产中闪蒸器内部多液滴闪蒸过程的研究不足。因此,全面系统地研究液滴闪蒸现象对于揭示闪蒸机理、厘清气泡生成以及发生闪爆的机制具有重要意义。本文结合脱硫浆液的闪蒸工艺,实验研究了去离子水与脱硫浆液在不同压力、温度、尺寸条件下的闪蒸特性并给出闪爆发生的临界直径,同时通过数值计算研究了液滴内部流动和传热过程,以及多液滴阵列的闪蒸特性,以期为工业生产提供参考。

1　方法

1.1　实验设置

使用高速成像系统观测低压下固着液滴闪蒸过程,实验装置示意图如图 1 所示。为获得低压从而促使液滴闪蒸发生,固着液滴和基底均置于真空箱内,箱体与真空罐相连,其体积比为 1∶750,从而确保真空箱内压力能够迅速(约 300 ms)达到设定压力并维持较长时间(5 min)。基底材料分别为玻璃和特氟龙胶带包裹的气凝胶(下称气凝胶),液滴在特氟龙胶带上的接触角为 120°左右,使用 EGC 1700 电子涂层剂在玻璃表面进行镀膜使液滴在玻璃上获得相似接触角。而玻璃和气凝胶的热导率分别为 1 200 mW/(m·K)和 14 mW/(m·K)。实验中液滴流体分别使用经气泵抽气 30 min 的去气去离子水和脱硫浆液,因无法获取脱硫浆液内颗粒浓度,测量其密度为 1 030 kg/m^3。通过表面张力仪(KRÜSS Force Tensiometer-K100C)测得其在 23 ℃的表面张

力系数为 70.9 mN/m,与该温度下水的表面张力 72.3 mN/m十分接近[41],故脱硫浆液溶液部分性质与水十分接近。真空箱为亚克力玻璃材质,实验中使用 LED 光源(DannyU MODEL U-40T)以背光/前光方式为高速相机(Phantom VEO 710)提供照明,高速相机搭配了可变焦的长距离显微镜头(Leica Z16 APO)对液滴闪蒸过程进行实时观测。采用热电偶接触式测量液滴内部中心位置处的温度,并利用无纸记录仪存储,其采样频率为 10 s^{-1}。真空箱和真空罐的压力测量均由压力表获得。真空箱上的压力表一端与无纸记录仪相连记录气压数据,另一端连接相机,当气压达到设定气压时即可发出电信号控制相机记录的开始与结束。真空罐的另一端与真空泵(Edwards RV12)相连。

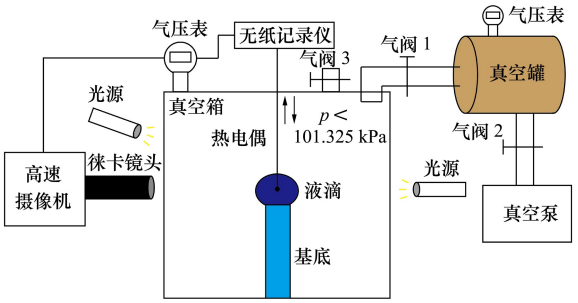


图 1 液滴闪蒸实验装置示意图

进行一次液滴闪蒸实验的流程为:①关闭气阀 1,打开气阀 2,关闭气阀 3,使用真空泵将真空罐内的压力降至设定压力;②将特定尺寸的液滴置于真空箱内的基底上;③将热电偶插入液滴内部设定位置,同时打开无纸记录仪;④调正相机设置,打开光源开始记录;⑤关闭气阀 2,打开气阀 1,保持气阀 3 关闭;⑥液滴闪蒸发生一定时间后,停止相机记录,存储拍摄片段;⑦关闭气阀 1,打开气阀 2 和气阀 3,调整真空罐内压力至下次实验压力,待真空箱内压力恢复至 101.325 kPa 后,再次关闭气阀 3。

1.2 有限元数值计算

液滴的闪蒸涉及流体流动、传热、传质多个物理过程,本文使用商业软件 COMSOL Multiphysics 进行有限元分析,求解独立的质量、动量、传热以及扩散方程,并通过质量传递以及对流项将方程进行耦合,最终求解闪蒸过程。

本文中,质量传递由扩散方程得出,即

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{J}_i + \boldsymbol{u} \cdot \nabla c_i = 0 \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{J}_i = -D_{\mathrm{d}} \nabla c_i$,$M_{\mathrm{f}} = M_{\mathrm{g}} \cdot \boldsymbol{J}_{\mathrm{g}}$,$c$ 是气体的分子浓度;$\boldsymbol{J}$ 是扩散通量;$\boldsymbol{u}$ 是速度;$\boldsymbol{u} \cdot \nabla c_i$ 是对流项;D_{d} 是扩散系数;M_{f} 是质量通量;M_{g} 是分子摩尔质量;下标 i 表示不同的组分,本文中指代水蒸气。

热量传递由传热方程得出,即

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \boldsymbol{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \boldsymbol{q} = Q \tag{2}$$

$$\boldsymbol{q} = -k \nabla T \tag{3}$$

式中:C_p 是恒压热容;$\boldsymbol{q}$ 是热通量;$\rho C_p \boldsymbol{u} \cdot \nabla T$ 是对流项。基底为固相,因此在基底的传热方程中,不考虑对流项。在气-液界面处存在相变,应满足相变热量方程

$$-\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{q} = Q_{\mathrm{b}} = -M_{\mathrm{f}} \cdot L \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{n}$ 是单位法向向量;Q_{b} 是热量;L 是汽化潜热。

流体流动需求解 Navier-Stokes 方程以及质量方程,同时气-液界面处满足动量方程以及速度相容性条件,如(5)~(8)式所示。

$$\rho_i \frac{\partial \boldsymbol{u}_i}{\partial t} + \rho_i (\boldsymbol{u}_i \cdot \nabla) \boldsymbol{u}_i = \nabla \cdot [-p\boldsymbol{I} + \boldsymbol{K}_i] + \boldsymbol{F}_i + \rho_i \boldsymbol{g} \tag{5}$$

$$\rho_i \nabla \cdot \boldsymbol{u}_i = 0 \tag{6}$$

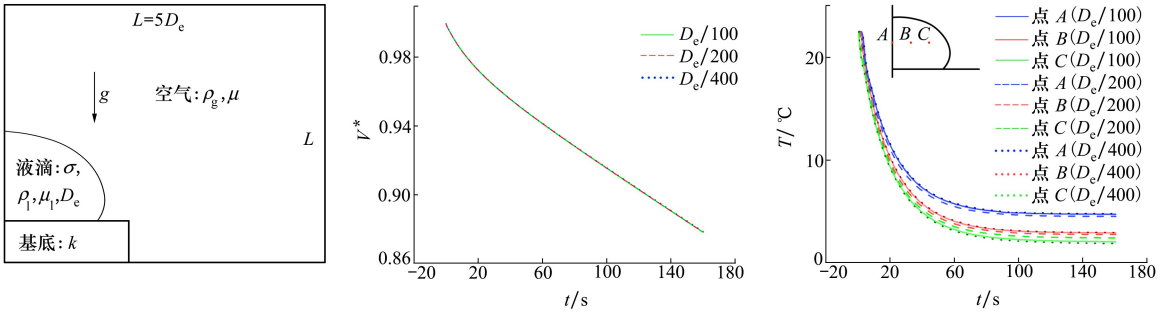
$$\boldsymbol{n}_1 \cdot (\boldsymbol{T}_1 - \boldsymbol{T}_{\mathrm{g}}) = \boldsymbol{\sigma}(\nabla_t \cdot \boldsymbol{n}_1)\boldsymbol{n}_1 - \nabla_t \boldsymbol{\sigma} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{u}_1 = \boldsymbol{u}_{\mathrm{g}} + M_{\mathrm{f}}\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_{\mathrm{g}}}\right)\boldsymbol{n}_1 \tag{8}$$

式中:$\boldsymbol{T} = -\rho\boldsymbol{I} + \boldsymbol{K}$,$\boldsymbol{K}$ 是黏性应力;$\boldsymbol{F}$ 是流体单元受到的除重力外的体积力;$\boldsymbol{\sigma}$ 是表面张力系数。其中,通过质量传递((1),(4),(8)式)和对流项((1)~(2)式)将 3 个模块进行耦合。

本文构建了与实验相同的二维轴对称仿真模型,如图 2a)所示,图中,ρ,μ 分别表示密度和动力学黏度,$\boldsymbol{\sigma}$ 是表面张力,D_{e} 是液滴的等效直径,k 是导热系数,g 是重力加速度,L 是计算域的边长。下标 l,g,s 分别表示液相、气相与基底,i 表示气相或液相。二维轴对称模型可以极大地降低计算量,但忽略了流动、传热、物质扩散等过程在周向上的不对称性;同时计算中将边界条件设定为二维轴对称的,这也与真实情况不同。因此二维轴对称模型的计算结果与真实结果存在误差。仿真计算中使用的大部分参数均由材料的物理性质给出。然而,低压下的水蒸气扩散系数 D_{d} 根据经典的 D^2 关系和实验数据进行修正得到[42]。为了精准追踪界面运动,构建网格时在气-液界面处(图 2a))中红色标识)进行了局部加密。在同一案例中,使用不同尺寸网格进行网

格无关性验证,参数设置为:液滴等效直径 D_e = 5 mm,环境温度 22.5 ℃,环境气压 2 500 Pa。界面处的网格尺寸分别为 $D_e/100$,$D_e/200$,$D_e/400$。如图 2b) ~ 2c) 所示,在不同网格尺寸下,液滴蒸发速率与液滴内部不同点(中心点 A,边缘点 C 以及两者中央点 B,示意图见图 2c)) 温度变化相互吻合,因此认为网格无关性得到了验证,在后续的计算中,为了在保证计算精度的同时减少计算资源,采用 $D_e/200$ 的网格。



a) 数值计算二维轴对称模型　　b) 不同尺寸网格下的无量纲体积变化　　c) 不同网格下,液滴内部点的温度变化

图 2　数值计算初始设定与网格无关性验证

2　结果与讨论

2.1　液滴闪爆临界直径

实验中液滴闪爆出现在较低的环境气压下以及具有较大尺寸的液滴中。图 3 为实验中观测到的典型液滴闪爆结果,液滴为直径 3 mm 的去离子水液滴,环境气压为 1 200 Pa,液滴初始温度为 20 ℃,基底为玻璃片,时间零点为液滴发生闪爆的时刻,高速摄像机的拍摄帧率为 10 000 frame/s。首先,在玻璃基底上出现 1 个气泡(-2.6 ms),接着气泡快速胀大直到接触到液滴、基底、空气三相交界的位置,气泡开始与外界空气发生接触,液滴形变为一层液膜(2.0 ms),同时有很多小液滴从液膜顶部分离出来。随后在液体的表面张力作用下,液膜开始回缩为 1 个液柱(13.1 ms),最后液柱再破裂为多个液滴。

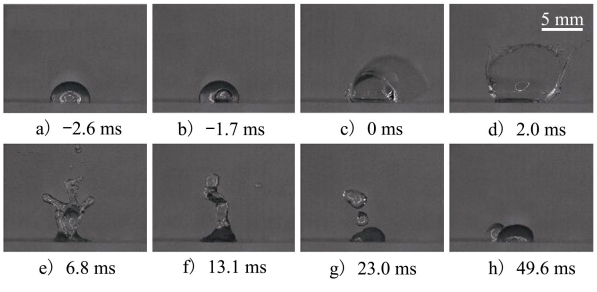
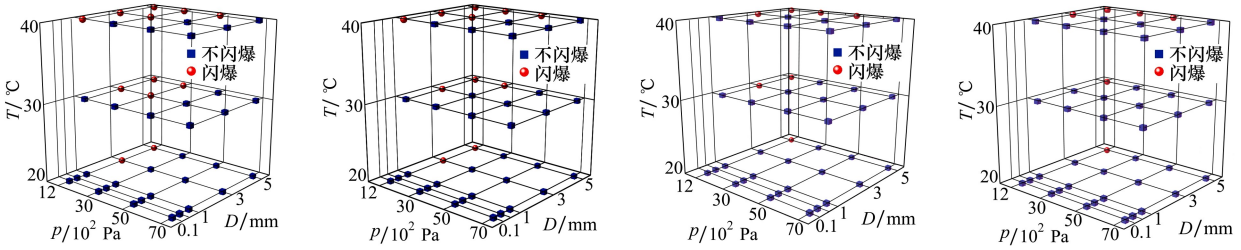


图 3　液滴闪爆时间序列图

图 4 展示了不同直径 D、初始温度 T 的去离子水液滴及脱硫浆液液滴在不同环境气压 p、不同基底下的闪爆相图。可以发现,在相同的环境气压、液滴初始温度下,液滴存在闪爆临界直径。低于该临界直径时液滴不会发生闪爆,而高于临界直径则会发生闪爆。液滴初始温度为 20 ℃,环境气压为 1 200 Pa时,在玻璃基底上的直径为 5,3 mm 的去离子水液滴会发生闪爆,而直径为 1,0.5,0.1 mm 的去离子水液滴不会发生闪爆(见图 4a) ~ 4b))。实验中液滴临界闪爆尺寸受以下几个因素的影响:液滴的初始温度、环境气压、基底材料。当液滴的初始温度从 20 ℃提升到 30,40 ℃时,在气压 3 000 Pa 时,位于玻璃基底上的去离子水液滴从直径 5 mm 的液滴都不发生闪爆,到直径 5,3 mm 的液滴都发生闪爆再到直径 5,3,1 mm 的液滴都发生闪爆(见图 4a)),临界直径不断下降。此外,当环境气压从 1 200 Pa上升到 3 000,5 000,7 000 Pa 时,去离子水液滴在玻璃基底上的临界直径逐渐上升,从小于 1 mm到 1 ~ 3 mm 之间再到 3 ~ 5 mm 之间最后大于 5 mm。而当基底换成导热系数更小的气凝胶基底时,临界直径大多有所上升,例如气压 1 200 Pa、初始温度为 40 ℃时,玻璃基底上的去离子水液滴的临界直径从小于 1 mm 上升到 1 ~ 3 mm 之间(见图 4a) 和图 4c))。而对于去离子水液滴和脱硫浆液液滴来说,在其他条件相同的情况下,两者的临界尺寸差距不大,这是因为尽管脱硫浆液相较于去离子水有大量固体颗粒,即存在更多潜在的气化核心,但是液滴都固着在基底上,基底对其影响更大。而实验中

闪爆的气泡也均生成在基底上，这也能证实这一观点。因此，通过提升液滴初始温度、降低环境气压、增大基底导热系数，能够使固着液滴闪爆的临界直径下降，增加闪蒸的剧烈程度。



a) 去离子水，玻璃基底　b) 脱硫浆液，玻璃基底　c) 去离子水，气凝胶基底　d) 脱硫浆液，气凝胶基底

图 4　液滴在不同基底上闪爆相图

2.2　液滴闪爆发生机理

图 5 展示了在相同气压下，初始直径不同的去离子水滴闪爆时间，环境气压为 1 200 Pa，时间零点对应气压开始下降的时间。可以发现，液滴闪爆大部分都发生在 0.2~1.2 s，与液滴初始直径无明显相关性。汽化发生的时间分成核时间和气泡增长时间[43]，其中成核时间具有一定的随机性，这也解释了为什么实验中同一尺寸、相同初始条件的液滴发生闪爆的时刻不同。而实验中气泡增长时间均为毫秒量级，比闪爆发生时间小了约 2 个数量级，对总体时间影响可以忽略不计。液滴的闪爆是当气压下降时，溶液的沸点降到液滴温度之下导致的[44]。

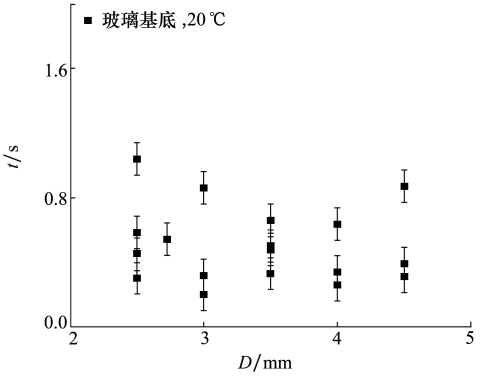


图 5　闪爆发生时间 t 与去离子水液滴直径 D 关系图

在闪蒸过程中，液滴初始直径会影响到其内部温度下降速率。如图 6 所示，在环境气压 3 000 Pa 的情况下，直径分别为 5，3，1 mm 的去离子水液滴在玻璃基底上蒸发 3 s 时温度分别下降了 1.3，3.8，15.9 ℃，这说明其他条件一致的情况下，液滴直径越大其温度下降越慢。图 6 中 2 条黑色虚线之间的区域代表闪爆可能发生的时间，蓝色与红色虚线分别为水在气压 3 000，1 200 Pa 下的沸点[41]。环境气压 3 000 Pa 时，3 种直径的液滴初始温度均低于沸点（蓝线虚线），所以不会发生闪爆。而环境气压 1 200 Pa 时，液滴初始温度高于沸点（红色虚线），但是在经历成核时间时液滴温度也会下降，例如图中直径 1 mm 的液滴温度在约 0.1 s 时就降低到沸点附近，所以没有发生闪爆，而对于直径为 3 mm 的液滴在成核时间内液滴温度仍高于沸点，最终发生了闪爆。

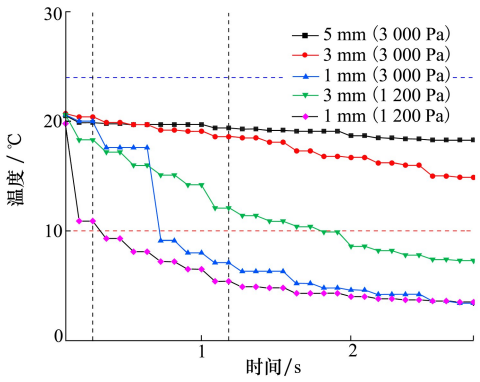
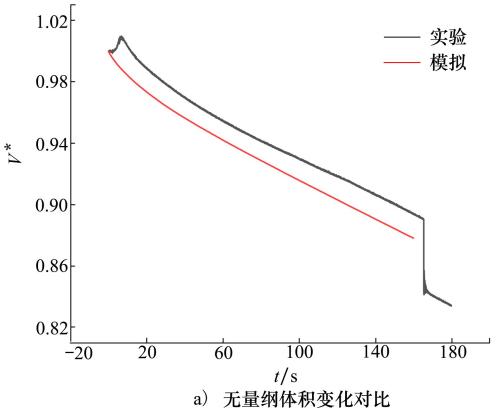


图 6　玻璃基底上去离子水液滴温度与时间关系图

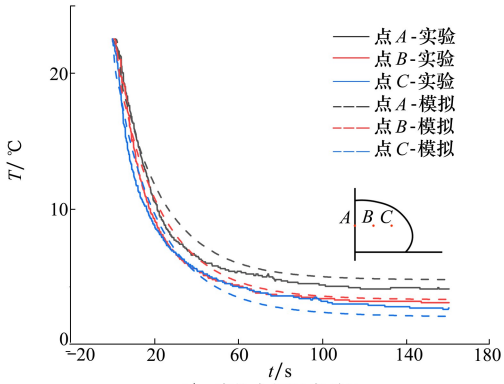
2.3　闪蒸时液滴内部传热与流动

本文利用 COMSOL Multiphysics 对固着在玻璃基底的单一液滴进行数值计算。首先通过实验与数值计算结果对比验证了二维轴对称模型的正确性。对比案例参数为：液滴等效直径 D_e = 5 mm，环境温度 22.5 ℃，环境气压 2 500 Pa。图 7a）展示了无量纲体积的对比，由于实验中在玻璃基底处会形成小气泡，使得实验测量的体积偏大，但实验与仿真的体积随时间变化斜率较为吻合，即其蒸发速率相近。图 7b）展示了液滴内部不同点的温度对比，实线与虚线分别为实验与仿真结果，点 A 为液滴中心点，点 C 为液滴边缘点，点 B 位于 A，C 中央，仿真中取

点位置与实验相同,如图 7b)所示。结果表明,仿真与实验的温度变化基本吻合,但仿真结果中不同点的温差大于实验中的温差,其原因为实验中采取热电偶进行温度测量,测量值为热电偶附近的平均温度,因此测得的温差较小。二维模型的对比验证了模型的准确性,为下文三维阵列模型研究奠定了基础。图 8 展示了闪蒸过程中液滴内部的典型温度场与流场。图 8a)中相邻的等温线相差 0.5 ℃。由于基底的传热效应,液滴内部产生了温度差,引发了热对流。

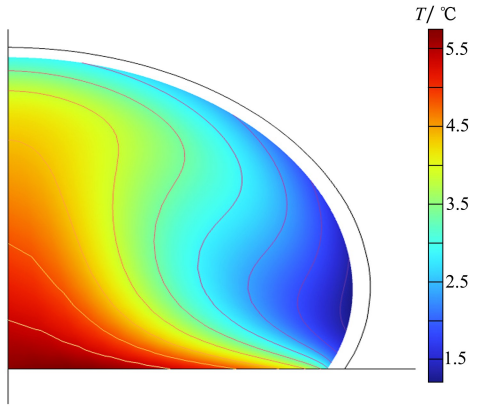


a)　无量纲体积变化对比

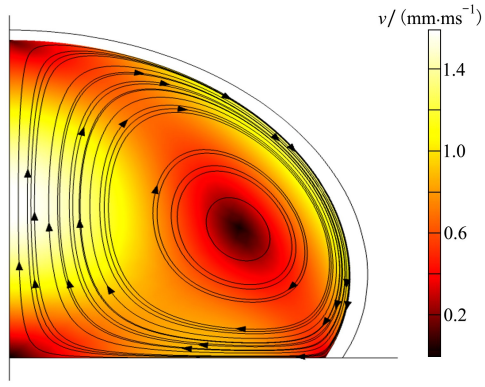


b)　液体内部温度对比

图 7　仿真与实验结果的对比



a)　液滴内部的温度场与等温线



b)　液滴内部的流场

图 8　闪蒸过程中液滴内部的典型流场温度场

2.4　液滴阵列的闪蒸过程

目前绝大多数研究聚焦于单液滴的蒸发过程,但多液滴蒸发时的相互影响同样重要。Masoud 等[31]研究了等温条件的多液滴蒸发过程,但闪蒸过程伴随着剧烈的温度变化。因此,为探究不同的液滴排布对闪蒸过程的影响,构建了三维阵列模型。本文计算了单液滴、双液滴、三液滴、十字排布、3×3 阵列 5 种排布方式,液滴直径 D_e = 5 mm,温度 20 ℃,压力 3 000 Pa。相邻液滴之间的距离取为 l = $2D_e$,与文献[31]中的取值相近。本节研究对象为自由液滴,排除了基底传热的影响。三维模型计算量庞大,因此,为减少计算量,本文利用了对称性,同时减小了网格密度,在气-液界面处的网格尺寸为 $D_e/36$。进行了网格无关性验证,液滴边界处网格大小分别为 $D_e/50$ 以及 $D_e/36$ 时,结果的差距小于 1%,因此认为网格的减小对模拟精度没有明显的影响。阵列排布方式及三维模型示意图如图 9 所示。

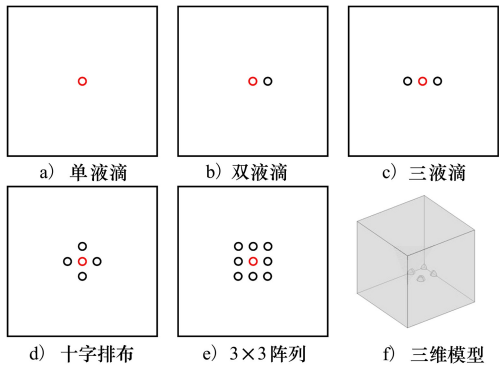
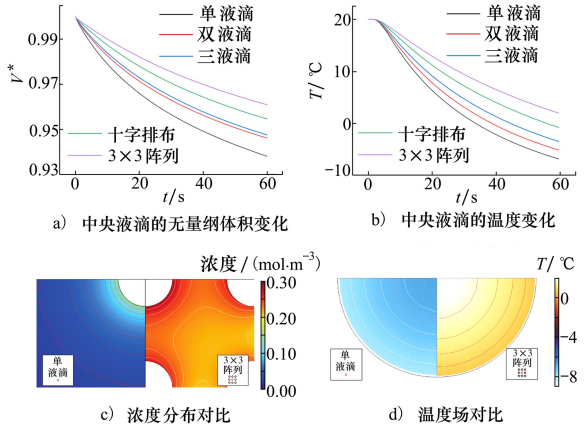


图 9　阵列排布方式以及三维模型示意图

在不同的液滴排布方式中,本文研究对象均使用红色进行标注。

实际工业生产中,脱硫浆液由喷头进入闪蒸塔内,形成密集而非单一的液滴排布。因此对液滴阵列的研究对于工业生产应用具有重要意义。图 10a)~10b)展示了不同液滴排布方式下的无量纲体积以及温度变化。随着液滴数目的增加,中央液滴的蒸发速率降低,降温幅度减少。在闪蒸进行 60 s 时,单液滴与 3×3 阵列中央液滴的蒸发率为3.9%与6.2%,降温幅度为 17.78 ℃与 26.67 ℃。说明了阵列排布对液滴的蒸发率以及降温幅度有着巨大影响。图 10c)~10d)展示了单液滴以及 3×3 阵列在 60 s 时刻液滴周围的浓度分布以及液滴内部的温度场,图 10c)中相邻等浓度线相差 0.015 mol/m^3,图 10d)中相邻等温线的温差为 0.3 ℃。可以看出,当排布多个液滴时,在中央液滴周围形成了高浓度、较低浓度梯度的区域,因此很大程度上抑制了中央液滴的蒸发。



a) 中央液滴的无量纲体积变化　b) 中央液滴的温度变化

c) 浓度分布对比　d) 温度场对比

图 10 不同排布方式下的无量纲体积、温度、浓度对比,温度 20 ℃,压力 3 000 Pa

3 结 论

在不同气压下(1 200,3 000,5 000,7 000 Pa),将初始温度为 20 ℃,直径为 5,3,1,0.5,0.1 mm 以及初始温度 30,40 ℃,直径为 5,3,1 mm 的去离子水/脱硫浆液液滴置于玻璃/气凝胶上进行了液滴闪蒸实验,利用高速相机记录其闪蒸过程,得到了液滴闪爆的临界尺寸,对于不发生闪爆的直径为 5,3 mm 液滴,利用热电偶测量了液滴内部不同位置处的温度演变过程。实验发现,减小环境气压、提高液滴初始温度、使用导热性更好的基底会降低液滴闪爆的临界尺寸。对于气凝胶基底来说,其较小的导热系数能显著降低基底对液滴闪蒸的影响。同时给出了存在闪爆临界尺寸的原因,即在不同尺寸液滴内部温降不同,液滴内部温度降至低于沸点时无法产生气泡,从而不会发生闪爆。数值计算方面,利用 COMSOL Multiphysics 建立了单液滴的二维轴对称闪蒸模型,通过与实验结果进行对比,验证了模型的正确性,并展示了液滴内部在重力场以及温度差作用下产生的热对流,而非表面张力差引起的 Marangoni 流动,促进了热量交换。利用三维模型计算了多液滴阵列的闪蒸过程。给出不同液滴排布条件下目标液滴的体积、温度、浓度分布以及温度场特征,说明多液滴排布时,在液滴聚集区形成局部的高浓度、低浓度梯度的区域,从而降低了液滴闪蒸速率。

参考文献:

[1] 徐世明, 徐海涛, 安航, 等. 脱硫浆液闪蒸提热试验研究[J]. 热力发电, 2022, 51(7): 156-162
XU Shiming, XU Haitao, AN Hang, et al. Experimental study on heat recovery via flash of desulphurization slurry[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(7): 156-162 (in Chinese)

[2] 陈华. 闪蒸及喷雾液滴特性对喷雾冷却强化换热的影响[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018
CHEN Hua. Effect of flash evaporation and spray droplet characteristic on heat transfer enhancement of spray cooling[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018 (in Chinese)

[3] 彭钰航. 真空闪蒸喷雾冷却传热特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018
PENG Yuhang. Investigation on the heat transfer characteristics of vacuum flash evaporation spray cooling[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018 (in Chinese)

[4] ZHANG Weiwei, LI Yiyi, LONG Wenjun, et al. Enhancement mechanism of high alcohol surfactant on spray cooling: experimental study[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126: 363-376

[5] WANG Chao, XU Ruina, SONG Yu, et al. Study on water droplet flash evaporation in vacuum spray cooling[J]. International

Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 112: 279-288

[6] CHENG Wenlong, PENG Yuhua, CHEN Hua, et al. Experimental investigation on the heat transfer characteristics of vacuum spray flash evaporation cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 102: 233-240

[7] GOLLIHER E, ROMANIN J, KACHER H, et al. Development of the compact flash evaporator system for exploratio[C]//37th International Conference on Environmental Systems, 2007

[8] FATHINIA F, AL-ABDELI Y M, KHIADANI M, Evaporation rates and temperature distributions in fine droplet flash evaporation sprays[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 145: 106037

[9] 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

[10] 高文忠, 时亚茹, 韩笑生, 等. 混合除湿盐溶液液滴闪蒸机理[J]. 化工学报, 2012, 63(11): 3453-3459
GAO Wenzhong, SHI Yaru, HAN Xiaosheng, et al. Droplet flash evaporation of mixed dehumidification solutions[J]. CIESC Journal, 2012, 63(11): 3453-3459 (in Chinese)

[11] 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)

[12] STRUB M, JABBOUR O, STRUB F, et al. Experimental study and modelling of the crystallization of a water droplet[J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(1): 59-68

[13] LIU Lu, BI Qincheng, LI Huixiong. Experimental investigation on flash evaporation of saltwater droplets released into vacuum [J]. Microgravity Science and Technology, 2009, 21(suppl.1): 255-260

[14] JIANG X, WARD T L, VAN SWOL F, et al. Numerical simulation of ethanol-water-nacl droplet evaporation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49(12): 5631-5643

[15] CHEN Q, KUM J M, LI Y, et al. Experimental and mathematical study of the spray flash evaporation phenomena[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 598-610

[16] GAO W Z, SUN W Z, ANDERSON K, et al. Investigation on temperature distribution of flash evaporation of LiCl droplets released into vacuum[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 74: 414-420

[17] LIU L, BI Q, WANG G. Dynamics of evaporation and cooling of a water droplet during the early stage of depressurization[C]// International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Florida, 2009: 1777-1785

[18] 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)

[19] CAO Hongfen, ZHANG Wenzhuang, HUA Weisan, et al. Vacuum ice-making technology and characteristic analysis[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 360: 119360

[20] 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

[21] SATOH I, FUSHINOBU K, HASHIMOTO Y. Freezing of a water droplet due to evaporation: heat transfer dominating the evaporation-freezing phenomena and the effect of boiling on freezing characteristics[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(2): 226-234

[22] SAURY D, HARMAND S, SIROUX M. Experimental study of flash evaporation of a water film[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45: 3447-3457

[23] LIU Yongxin, ZHOU Leping, DU Xiaoze. Evaporation in thin film region of water at ambient temperature under reduced pressure conditions: flow and interface characteristics[J]. Vacuum, 2023, 209: 111814

[24] DEEGAN R D, BAKAJIN O, DUPONT T F, et al. Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops[J]. Nature, 1997, 389(6653): 827-829

[25] 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

[26] HU H, LARSON R G. Evaporation of a sessile droplet on a substrate[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2002, 106(6):

1334-1344

[27] DALLA Barba F, WANG Jietuo, PICANO F. Revisiting D_2-law for the evaporation of dilute droplets[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(5): 051701

[28] SHEN Yang, CHENG Yongpan, XU Jinliang, et al. Theoretical analysis of a sessile evaporating droplet on a curved substrate with an interfacial cooling effect[J]. Langmuir, 2020, 36(20): 5618-5625

[29] 杜王芳, 赵建福, 李凯. 快速减压条件下液滴热动力学行为的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(8): 1349-1352
DU Wangfang, ZHAO Jianfu, LI Kai. Experimental study on thermal-dynamical behaviors of liquid droplets during quick depressurization[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(8): 1349-1352 (in Chinese)

[30] STAUBER J M, WILSON S K, DUFFY B R, et al. On the lifetimes of evaporating droplets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 744: R2

[31] MASOUD H, HOWELL P D, STONE H A. Evaporation of multiple droplets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2021, 927: R4

[32] FAIRHURST D J. Predicting evaporation rates of droplet arrays[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2022, 934: F1

[33] WRAY A W, DUFFY B R, WILSON S K. Competitive evaporation of multiple sessile droplets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2020, 884: A45

[34] PETERSON R J, GREWAL S S, EL-WAKIL M M. Investigations of liquid flashing and evaporation due to sudden depressurization[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1984, 27(2): 301-310

[35] AVEDISIAN C T. Effect of pressure on bubble growth within liquid droplets at the superheat limit[J]. Journal of Heat Transfer, 1982, 104(4): 750-757

[36] LIU Lu, LIANG Xiujun, WANG Xilin, et al. Evaporation of a sessile water droplet during depressurization[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 159: 106587

[37] GAO W Z, SHI Y Z, ZHANG X L, et al. Experimental investigation on a new method of regenerating dehumidification solution-release solution droplet into vacuum[J]. Applied thermal engineering, 2013, 59(1/2): 14-20

[38] GAO Wenzhong, QI Jiaye, ZHANG Jiahao, et al. An experimental study on explosive boiling of superheated droplets in vacuum spray flash evaporation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 144: 118552

[39] SHEPHERD J E, STURTEVANT B. Rapid evaporation at the superheat limit[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982, 121: 379-402

[40] MORLAT T. Bubble growth rate in superheated droplets[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022, 36: 101505

[41] HAYNES W M. CRC Handbook of Chemistry and Physics[M]. 97th ed. New York: CRC Press, 2016

[42] HU Weifan, ZHAO Yefeng, ZHOU Xian, et al. Experimental and numerical investigations on flash evaporation of a sessile droplet under reduced pressure[J]. Physics of Fluid, 2023, 35(11): 112119

[43] XI Xi, LIU Hong, CAI Chang, et al. Analytical study on homogeneous nucleation and bubble evolution inside monocomponent fuel droplet[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2021, 35(3): 560-568

[44] LIN Yukai, CHU Fuqiang, WU Xiaomin. Evaporation and boiling of water-alcohol droplets: dynamic characteristics of wetting and heat transfer[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 134: 106045

Study on mechanism and key parameters of sessile droplets flash evaporation under reduced pressure

XU Shiming[1,2], ZHOU Xian[3], HU Weifan[4], LI Dachao[1], GAO Yingwei[1], LI Peng[1], PENG Shuo[3], ZHANG Yunpeng[3], ZHAO Yefeng[4], TIAN Yuansi[4], LI Erqiang[4]

(1.Huaneng Yingkou Thermal Power Co., Ltd., Yingkou 115004, China;
2.School of Low-Carbon Energy and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
3.Huaneng Clean Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;
4.School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Droplet flash evaporation is widely used in waste heat recovery, artificial ice making and other industrial fields. The vigorous flash evaporation leads to the flash explosion, which might cause damage to the internal structure of the flash evaporation chamber. Therefore, how to suppress flash explosions for industrial production safety is imperatively studied. With a high-speed camera system, the flash evaporation process of sessile droplets (deionized water and desulfurization slurry) is experimentally investigated and the duration of the flash explosion is recorded. The finite element method establishes the droplet flash evaporation model, and the internal flow and heat transfer process of single/multiple droplets are numerically simulated. The results show that the initial diameter of the droplet can directly affect its internal temperature change rate, thus controlling the internal phase transition process and the occurrence of droplet flash explosion. In this paper, the critical diameter of droplet flash explosion under different conditions and effective methods to suppress flash explosion are pinpointed, including increasing ambient air pressure, reducing the initial temperature of the droplet, reducing droplet size, and using a low thermal conductivity substrate. In addition, the numerical results show that the internal flow of droplets is dominated by thermal convection in the flash evaporation. The three-dimensional simulation of a multi-droplet array shows that the decrease in flash evaporation rate is the low vapor concentration gradient near droplets.

Keywords: droplet flash evaporation; droplet flash explosion; critical size; finite element method; desulfurization slurry

引用格式:*徐世明, 周贤, 胡蔚帆, 等. 低压下固着液滴闪蒸的机制和关键影响参数研究[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(4): 774-783*

XU Shiming, ZHOU Xian, HU Weifan, et al. Study on mechanism and key parameters of sessile droplets flash evaporation under reduced pressure[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2025, 43(4): 774-783 (in Chinese)