

SiO₂ 纳米液滴蒸发过程中浓度及活性剂对液滴动力学的影响



郭广辉^{1,2}, 梁丹丹^{1,2}, 王雅琪^{1,2}, 何文晴^{1,2}, 王添安^{1,2}, 郭瑞超^{1,2,*}

¹ 山东航空学院航空工程学院, 山东滨州 256600

² 山东省航空材料与器件工程技术研究中心, 山东滨州 256600

摘要: 二氧化硅 (SiO₂) 纳米流体作为新型功能流体, 其研究主要源于传统流体 (如水、油) 在热传导、润滑等领域的性能局限性。目前 SiO₂ 纳米流体液滴撞击高温壁面的规律与机制还不够明确。本文通过试验方法, 分析不同浓度下有无表面活性剂添加时 SiO₂ 纳米流体液滴的蒸发规律以及在 Leidenfrost 温度下撞击 7050 铝合金板材壁面的动力学行为。结果表明: SiO₂ 纳米流体在一定浓度范围内, 较高浓度的 SiO₂ 纳米颗粒对溶液的蒸发过程具有促进作用; 表面活性剂 SDS 的添加降低了溶液表面张力, 对蒸发过程起到了促进作用; 添加 SDS 的 SiO₂ 纳米溶液相对未添加 SDS 的 SiO₂ 纳米溶液的 Leidenfrost 温度较低; 在 Leidenfrost 温度下 SiO₂ 纳米流体液滴的撞击动态过程为: 初始下落、径向铺展、轴向回缩、初次反弹、二次接触、持续弹跳以及最终稳定蒸发。本研究有助于深入理解特定条件下 SiO₂ 纳米流体的蒸发特性与冲击动力学, 为其在传热冷却系统等相关工程领域的实际应用提供理论依据。

关键词: 纳米流体液滴; 撞击; 蒸发; 表面活性剂; Leidenfrost 温度

DOI: 10.57237/j.mater.2025.03.001

Effects of Concentration and Surfactant on the Dynamics of SiO₂ Nanodroplets During Evaporation

Guo Guanghui^{1,2}, Liang Dandan^{1,2}, Wang Yaqi^{1,2}, He Wenqing^{1,2}, Wang Luoan^{1,2},
Guo Ruichao^{1,2,*}

¹School of Aeronautical Engineering, Shandong University of Aeronautics, Binzhou 256600, China

²Shandong Engineering Research Center of Aeronautical Materials and Devices, Binzhou 256600, China

Abstract: As a novel functional fluid, silicon dioxide (SiO₂) nanofluid has attracted growing attention due to the performance limitations of conventional fluids (e.g., water and oil) in thermal conduction, lubrication, and other applications. However, the impact behaviors and underlying mechanisms of SiO₂ nanofluid droplets on high-temperature surfaces remain poorly understood. This study employs experimental approaches to investigate the evaporation characteristics of SiO₂ nanofluid droplets with different concentrations, both in the presence and absence of surfactants. Additionally, the dynamic impact behaviors of these droplets on 7050 aluminum alloy plates at the Leidenfrost temperature

基金项目: 山东省高等学校“青创团队计划”项目 (基金号: 2023KJ275); 山东省大学生创新创业训练项目 (基金号: S202410449009); 山东航空学院研究生创新基金 (基金号: SHSYCX18).

*通信作者: 郭瑞超, ytgrc@163.com

收稿日期: 2025-07-09; 接受日期: 2025-08-06; 在线出版日期: 2025-09-09

<http://www.materialsrd.com>

are explored. The results demonstrate that higher concentration of SiO₂ nanoparticles accelerates the evaporation kinetics of the solution. The addition of sodium dodecyl sulfate (SDS) surfactant reduces the surface tension of the solution, thereby promoting the evaporation process. Moreover, SiO₂ nanofluid solutions with SDS exhibit a lower Leidenfrost temperature compared to those without SDS. The dynamic processes of SiO₂ nanofluid droplet impact at the Leidenfrost temperature involve the following stages, which are initial deposition, radial spreading, axial retraction, first rebound, secondary contact, sustained bouncing, and eventual stable evaporation. This study is conducive to a deeper understanding of the evaporation characteristics and impact dynamics of SiO₂ nanofluids under specific conditions. And it can provide a theoretical basis for their practical application in related engineering fields such as heat transfer and cooling systems.

Keywords: Nanofluid Droplet; Impact; Evaporation; Surfactant; Leidenfrost Temperature

1 引言

高温壁面撞击问题的研究具有重要的科学和工程意义。在航空航天领域,热防护系统设计方面,飞行器在进入大气层时,高速气流与壁面撞击产生高温,相关研究有助于优化热防护材料,提升飞行器安全性。在发动机性能方面,发动机燃烧室内高温高压气体与壁面撞击影响冷却和材料寿命,相关研究有助于改进冷却系统,延长发动机寿命[1, 2]。在能源领域,核反应堆安全方面,核反应堆中冷却剂与壁面撞击产生高温,相关研究有助于优化冷却系统,提升反应堆安全性。在燃烧效率方面,燃烧设备中高温气体与壁面撞击影响燃烧效率和污染物排放,相关研究有助于优化燃烧过程,提高效率并减少排放[3]。

二氧化硅纳米流体是一种将二氧化硅纳米颗粒分散在基液(如水、油或有机溶剂)中形成的稳定悬浮液。由于其独特的物理化学性质,二氧化硅纳米流体在多个领域展现出广阔的应用前景。在工业冷却方面,二氧化硅纳米颗粒的加入显著提高了基础流体的热导率,提升了冷却效率,并且二氧化硅的高效散热适用于高功率设备[4]。在能源系统方面,二氧化硅纳米流体在相变储能材料中的应用,能提升储能密度和热传导效率,适用于太阳能和工业废热回收。此外,二氧化硅作为燃料电池的冷却介质,能有效管理电池温度,提升性能和寿命[5]。在航空航天领域,二氧化硅纳米流体可用于热控系统,提升热交换效率,确保设备在极端环境下的稳定运行。齐胜利和武德珍[6]制备的PI@SiO₂复合气凝胶,导热系数低至25.8,在应对宇宙极端温度波动(-100~150℃),保障热结构稳定性具有重要作用。由此可见,二氧化硅纳米流体在热管工业冷却、能源系统和航空航天等领域具有广泛的应用潜力。

纳米流体的流动受颗粒类型、尺寸和浓度影响,撞击高温壁面时,颗粒分布和流体动力学特性对传热效率有显著影响。Hao 等[7]以乙二醇为基液配置 SiO₂ 纳米流体,指出随流体浓度的增大,纳米流体液滴弹跳现象将被抑制。Li [8]研究了表面活性剂对液滴撞击的影响,将不同浓度的 SDS(anionic)、CTAB(cationic)和 TritonX-100(nonionic)溶液作为实验工质进行液滴撞击实验。发现添加少量不含任何表面活性剂的亲水性 TiO₂ 纳米颗粒可以显著抑制液滴反弹。纳米流体撞击高温壁面的传热机制复杂,涉及对流、传导和辐射,颗粒与壁面间的微观相互作用也影响传热效果。胡定华等[9]通过模拟分析液滴的铺展因子、无量纲高度的变化研究不同纳米颗粒体积分数等因素对 Al₂O₃ 纳米流体液滴撞击壁面的铺展的影响。

此外,纳米颗粒在流体中易团聚,导致分布不均,影响传热性能。国内外学者们对于水和乙醇等牛顿流体液滴撞击固体壁面的行为进行了大量研究[10-14],但关于纳米流体这类非牛顿流体液滴撞击壁面的蒸发过程和动力学特性的研究尚少。由此可见,纳米流体撞击高温壁面的研究虽已取得了一定进展,但仍存在一定局限性。目前还没有较为完整的体系来解释这一过程中的所有现象,所以对这一现象的研究仍然有很大的研究价值。

本文首先通过“两步法”配置不同浓度的 SiO₂ 纳米流体稳定分散液,使用表面张力测试仪测试了不同浓度下的纳米流体表面张力变化;其次设计液滴撞击壁面试验装置,采用微小压力推动注射器产生液滴,记录液滴蒸发曲线,并通过高速摄像机记录纳米流体液滴在 Leidenfrost 温度下撞击 7050 铝板壁面时的动态铺展过程;最后分析了 SiO₂ 纳米流体液滴的蒸发规律和有无表面活性剂对液滴撞击壁面后铺展形态的变化等。

2 实验方法

2.1 实验装置与设备

如图 1 所示为液滴撞击壁面实验系统简图。在该系统中,步进电机通过升降轴精确控制液滴产生的频率,液滴下落高度由丝杠调节,本实验液滴下落高度为 10cm。加热系统对撞击对象进行加热,本研究液滴撞击对象为美铝公司生产的 7050 铝板,实验温度范围为 70℃–350℃。高速摄像机(帧率 5200fps,分辨率 1280×800 像素)记录的液滴撞击壁面过程通过 PCC 软

件逐帧解析。蒸发曲线测试通过秒表计时器,每次升温 10℃ 测量三次计时取平均值。

本研究使用的纳米颗粒是二氧化硅颗粒(SiO_2 , 南京先丰纳米材料技术有限公司,中国南京)。 SiO_2 的标称直径和纯度分别为约 10-15nm 和 99.9wt%。使用的分散剂是由国药试剂生产的十二烷基硫酸钠(SDS), SDS 是一种阴离子表面活性剂,是制备 SiO_2 纳米流体最常用的稳定分散剂之一[15],其纯度为 99.0%。基础溶液选取去离子水。分别制备了添加 SDS 的纳米流体和未添加 SDS 的纳米流体。

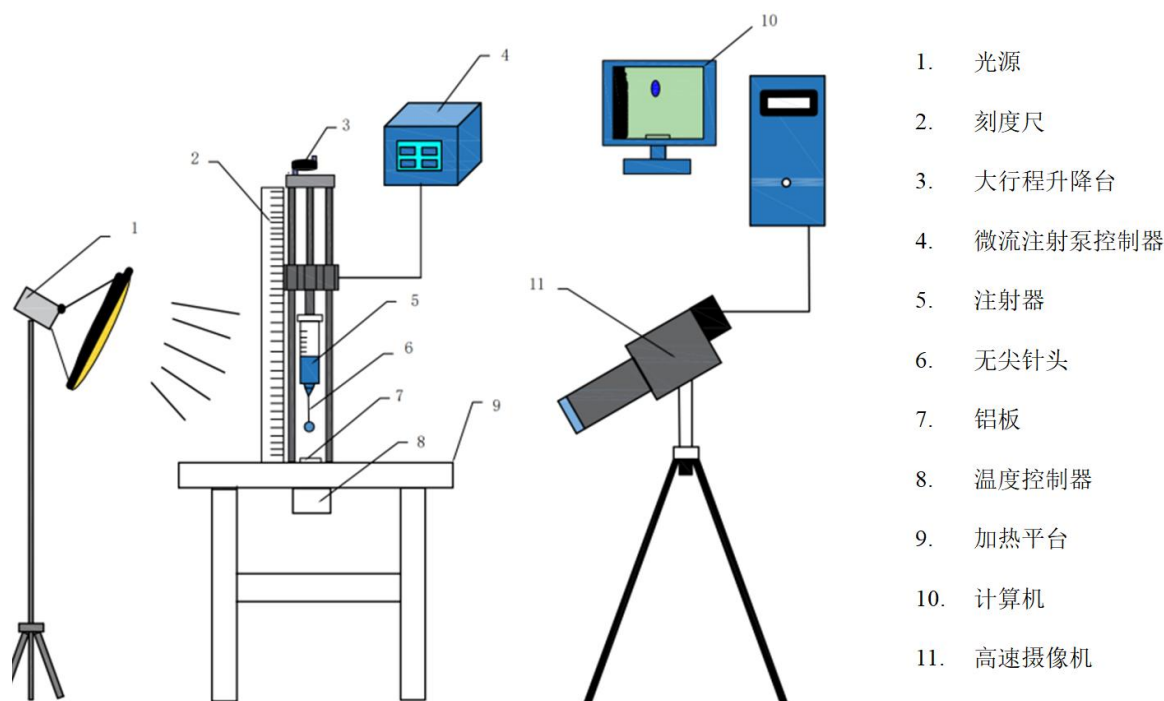


图 1 实验装置简图

2.2 SiO_2 纳米流体的制备

本实验采用“两步法”制备二氧化硅纳米流体,“两步法”是指纳米颗粒的制备与在液体工质中的分散是通过两步来完成的。为制备稳定性较好的纳米流体,需优化磁力搅拌时间、超声震荡时间以及表面活性剂

的添加比例等关键参数。基于文献[16-19]确定了相关参数范围,采用正交试验法,综合考虑上述三因素对纳米流体稳定性的影响,以期筛选出最优制备方案。正交试验设计的因素水平见表 1,如图 2 所示为配置的体积分数为 0.05%的 SiO_2 纳米流体。

表 1 SiO_2 纳米流体制备方案优化正交试验表

水平	因素		
	震荡时间 (min)	搅拌时间 (min)	纳米颗粒: 活性剂质量比
1	60	10	1:0.5
2	90	15	1:1
3	120	20	1:2



图 2 0.05%浓度的 SiO₂ 纳米流体溶液

以制备 200ml 溶液为例，首先称量所需质量的表面活性剂 SDS，加入到已有近 200ml 水的烧杯中，用玻璃棒搅拌均匀。称量所需质量的二氧化硅纳米颗粒加入到烧杯中并搅拌均匀，先用磁力搅拌器搅拌相应时间，再用超声震荡器震荡相应时间，最终获得所需体积分数的二氧化硅纳米流体。通过对比观察不同配置方法下二氧化硅纳米流体的沉淀完全时间，即可得到最优配置方案。由表 2 可知：3 个试验因素对沉淀完全时间的主次顺序为震荡时间>搅拌时间>活性剂比，最佳配置方案为：震荡时间 120min、磁力搅拌时间 10min、活性剂比为 1:1，在此条件下重复 3 次验证实验，所得沉淀完全时间为 3.5h。

表 2 正交实验结果

试验号	震荡时间（min）	搅拌时间（min）	活性剂比	沉淀完全时间（h）
1	60.00	10.00	1:0.5	5
2	60.00	15.00	1:2	6
3	60.00	20.00	1:1	5
4	90.00	10.00	1:2	4.5
5	90.00	15.00	1:1	5
6	90.00	20.00	1:0.5	4
7	120.00	10.00	1:1	3.5
8	120.00	15.00	1:0.5	4.5
9	120.00	20.00	1:2	4
K1	12.00	15.50	13.50	
K2	13.50	13.00	14.50	
K3	16.00	13.00	13.50	
R	1.33	0.83	0.33	

为配置稳定的纳米流体，依次加入基础溶液、分散剂和纳米颗粒。先用玻璃棒搅拌均匀后，再使用磁力搅拌器（JJ-160W，常州苏瑞仪器有限公司，中国常州）电磁搅拌 10min。最后，对分散液进行 28kHz 的超声波处理（KQ-300DE，昆山超声仪器有限公司，中国昆山），时间为 120min。为防止纳米流体过热，超声波每 40 分钟停止 3 分钟。超声波分散后，将纳米流体静置 0.5 小时，冷却至室温。配置完成后对其表面张力进行测定（XR-6541，希尔仪器科技有限公司，中国东莞）。在本研究中，配置的纳米颗粒悬浮液的体积分数分别为 0.1%、0.05%和 0.005%。体积分数通过以下公式计算[20]：

$$\varphi = \frac{V_{SiO_2}}{V_{SiO_2} + V_{water}} = \frac{\omega_{SiO_2} / \rho_{SiO_2}}{\omega_{SiO_2} / \rho_{SiO_2} + \omega_{water} / \rho_{water}} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{V_{SiO_2}}{V_{SiO_2} + V_{water} + V_{SDS}} \\ &= \frac{\omega_{SiO_2} / \rho_{SiO_2}}{\omega_{SiO_2} / \rho_{SiO_2} + \omega_{water} / \rho_{water} + \omega_{SDS} / \rho_{SDS}} \end{aligned} \tag{2}$$

其中，(1)式为不加 SDS 的纳米流体体积分数计算公式，(2)式为加 SDS 的纳米流体体积分数的计算公式； w_{SiO_2} 为纳米颗粒的质量， w_{water} 为水的质量， ρ_{SiO_2} 为纳米颗粒的密度， ρ_{water} 为水的密度。

本实验基于该最佳配置方案，分别配置了如表 3 所示的体积分数为 0.1%、0.05%和 0.005%的添加与不添加表面活性剂 SDS 的六种溶液。

表 3 最佳配置方案下的六种溶液

实验材料	SiO ₂ 浓度	表面活性剂比例	震荡时间（min）	搅拌时间（min）	表面张力（mN/m）
SiO ₂	0.1%	1:1	120	10	31.45
	0.05%				31.61

实验材料	SiO ₂ 浓度	表面活性剂比例	震荡时间 (min)	搅拌时间 (min)	表面张力 (mN/m)
SiO ₂	0.005%	无	120	10	36.28
	0.1%				70.13
	0.05%				70.84
	0.005%				70.65

3 误差分析

蒸发时间测量采用秒表计时器, 由于计时设备精度与人为操作无法完全同步, 造成了 $\pm 0.5\text{s}$ 的误差; 而加热温度的 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 误差是由加热设备控温精度和热传递滞后导致的; 受天平测量精度影响, 纳米颗粒质量和表面活性剂质量在称量时会有 $\pm 0.001\text{g}$ 的误差; 由于注射器针头在挤出液滴时, 压力稳定性不一致导致液滴初始直径存在 $\pm 0.2\text{mm}$ 的误差, 进而也导致了液滴下落高度存在 $\pm 0.1\text{mm}$ 的误差。表面张力是由表面张力测试仪测量的, 其误差为 $\pm 0.1\text{mN/m}$ 。实际值和测量值的主要误差列在表 4 中。

表 4 主要误差

误差来源	误差
蒸发时间	$\pm 0.5\text{s}$
加热温度	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$

误差来源	误差
纳米颗粒重量	$\pm 0.001\text{g}$
表面活性剂重量	$\pm 0.001\text{g}$
液滴初始直径	$\pm 0.2\text{mm}$
液滴下落高度	$\pm 0.1\text{mm}$
表面张力	$\pm 0.1\text{mN/m}$

4 结果与分析

4.1 浓度对不同温度下的纳米流体蒸发时间的影响

温度区间划分为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ (初始蒸发阶段)、 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ (过渡沸腾阶段)、 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ (膜态沸腾阶段), 分别分析不同阶段蒸发时间随浓度与表面活性剂的变化趋势, 如图 3 所示为纳米流体液滴蒸发时间曲线, 其中最長蒸发时间所对应的温度即为 Leidenfrost 温度。

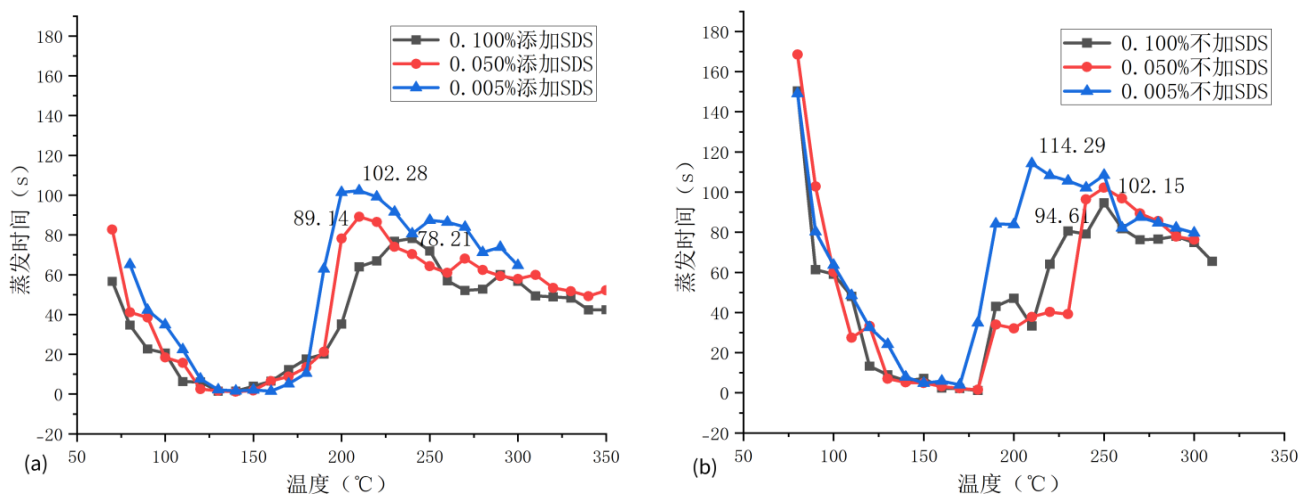


图 3 0.1%、0.05%和 0.005%的 SiO₂ 纳米溶液在不同温度下的蒸发时间对比: (a)添加 SDS, (b)不加 SDS

添加 SDS 与未添加 SDS 的 SiO₂ 纳米溶液在不同温度下的蒸发时间变化规律如图 3 所示。实验结果表明, 在 $70\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内, 所有样品的蒸发时间均呈现非线性变化趋势: 初始阶段 ($70\text{--}140\text{ }^{\circ}\text{C}$), 蒸发时间随温度升高而显著缩短, 并在约 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 蒸发时间最短; 随后进入过渡沸腾阶段 ($140\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $210\text{ }^{\circ}\text{C}$), 蒸发时间随温度升高而延长, 且在 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近变化速率达

到最大值; 当温度继续升高至 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 体系达到莱顿弗罗斯特点 (Leidenfrost point), 此后蒸发时间再次随温度升高呈现缓慢下降趋势。

同时还注意到, 不同浓度的 SiO₂ 纳米溶液显著影响了 Leidenfrost 温度。对于添加 SDS 的样品组: 0.1% 的 SiO₂ 纳米溶液的 Leidenfrost 温度为 $240\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而 0.05% 和 0.005% 浓度样品则提前至 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相比之下, 未添

加 SDS 的对照组表现出不同的特征温度:0.1%和 0.05% 的 SiO₂ 纳米溶液的 Leidenfrost 温度为 250 ℃, 而 0.005% 浓度样品的 Leidenfrost 温度则为 210 ℃。

SiO₂ 的浓度是影响蒸发时间快慢的关键参数之一。如图 3(a)所示, 三种不同浓度(0.1%、0.05%和 0.005%) 的 SiO₂ 纳米流液体滴在相同温度条件下表现出显著的蒸发时间差异。实验数据显示, 虽然各浓度样品均在

约 140 ℃ 时蒸发时间最短, 但随着溶液浓度的提高, 体系达到 Leidenfrost 温度阈值明显提高(图 4(a)), 且对应的最大蒸发时间数值显著减小(图 4(b))。这一现象在添加 SDS 的对照组中表现得尤为突出: 当 SiO₂ 浓度从 0.1%降至 0.005%时, 最大蒸发时间从 78.21s 增加至 102.28s。上述结果表明, 较高浓度的 SiO₂ 纳米颗粒对溶液的蒸发过程具有促进作用。

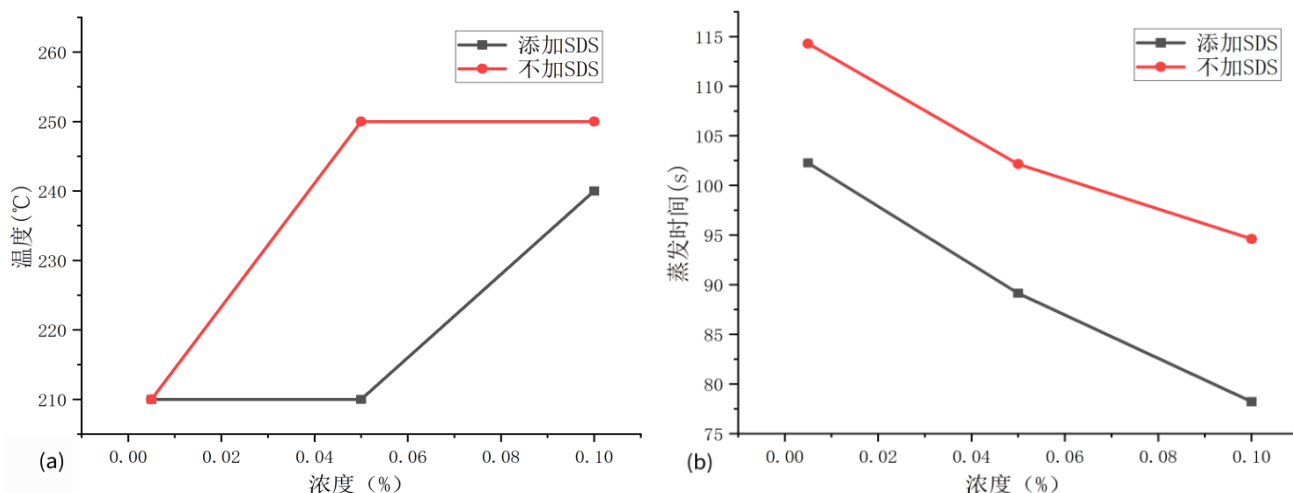


图 4 Leidenfrost 温度和蒸发时间随浓度变化曲线: (a) Leidenfrost 温度, (b) 蒸发时间

4.2 表面活性剂对不同温度下的纳米流体蒸发时间的影响

如图 5 所示, 相同浓度添加 SDS 与未添加 SDS 的

SiO₂ 纳米流液体滴在不同温度下的蒸发行为表现出显著差异。实验结果表明, 未添加 SDS 的样品表现出更高的 Leidenfrost 温度, 这意味着其过渡沸腾阶段发生在更高的温度区间。

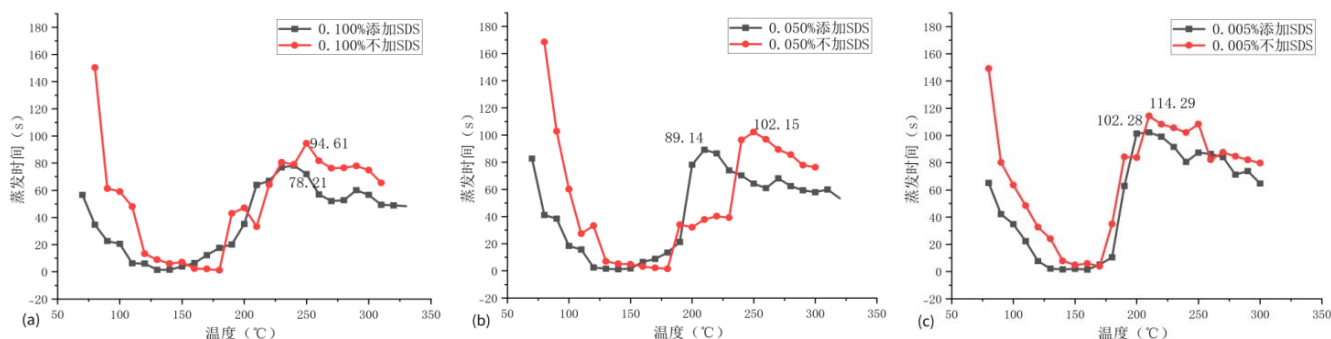


图 5 添加 SDS 与不加 SDS 的 SiO₂ 纳米流体在不同温度下的蒸发时间对比: (a) 0.100%, (b) 0.050%与(c) 0.005%

具体而言, 未添加表面活性剂 SDS 的纳米流体 Leidenfrost 温度比添加表面活性剂 SDS 的纳米流体高出约 10-40 ℃。此外, 对比相同温度条件下的蒸发时间发现, 未添加表面活性剂 SDS 的蒸发时间普遍比添加表面活性剂 SDS 要长。结合表 3 的表面张力测试结果分析, 未添加 SDS 的 SiO₂ 纳米流体溶液表现出更高的

表面张力(均大于 70mN/m)。上述现象表明, 表面活性剂 SDS 的添加降低了溶液表面张力(从大于 70mN/m 降至小于 37mN/m), 从而对蒸发过程起到了促进作用。

对于添加 SDS 的纳米流体来说: Leidenfrost 温度较低(0.1%: 240 ℃; 0.05%: 210 ℃; 0.005%: 210 ℃)。而对于未添加 SDS 的纳米流体来说: Leidenfrost 温度较

高（0.1%：250 ℃；0.05%：250 ℃；0.005%：210 ℃）。这可能是由于 SDS 在高温下可能发生分解或失去表面活性作用[21]，导致添加 SDS 的 SiO₂ 纳米溶液在相对未添加 SDS 的 SiO₂ 纳米溶液在较低温度下到 Leidenfrost 现象。

4.3 撞击过程铺展形态分析

如表 5 所示，通过高速摄像观测三种不同浓度、

有无添加 SDS 时 SiO₂ 纳米流体液滴在 Leidenfrost 温度下的撞击动态过程。本实验液滴是从 10cm 高度以 0.143m/s 的初速度撞击高温壁面。通过观察可以发现，液滴撞击动力学过程如下：初始下落、径向铺展、轴向回缩、初次反弹、二次接触、持续弹跳以及最终稳定蒸发。

表 5 不同浓度添加 SDS 时 SiO₂ 纳米流体液滴撞击过程

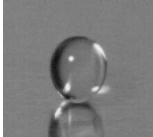
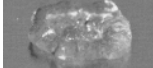
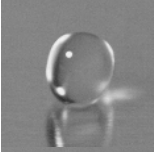
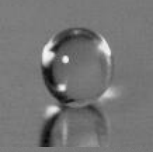
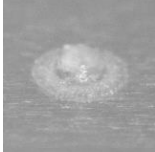
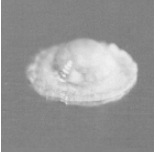
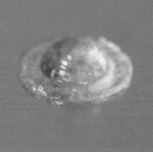
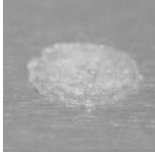
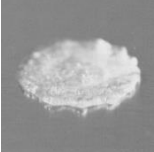
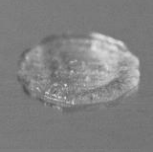
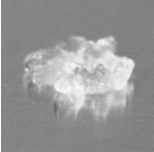
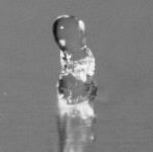
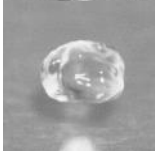
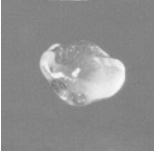
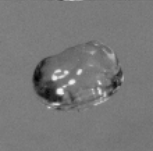
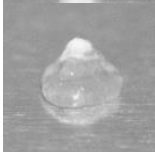
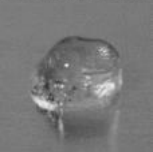
过程	浓度 0.1% 240 ℃	浓度 0.05% 210 ℃	浓度 0.005% 210 ℃
接触			
铺展			
铺展至最大			
回缩			
向上反弹			
形成液柱			
空中回缩			
再次接触			

表 6 不同浓度下未添加 SDS 时 SiO₂ 纳米流体液滴撞击过程

过程	浓度 0.1% 250 ℃	浓度 0.05% 250 ℃	浓度 0.005% 210 ℃
接触			
铺展			
铺展至最大			
回缩			
向上反弹			
形成液柱			
空中回缩			
再次接触			

液滴撞击高温壁面（ $T>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）后的动态演化过程展现出复杂的多阶段特征，其具体过程可概括如下：

初始铺展阶段：撞击瞬间，液滴在惯性力主导下迅速向径向铺展。这一过程极其短暂，通常在 10ms 内完成，液滴直径达到其最大值。此阶段壁面高温尚未对液滴整体产生显著的相变影响。

回缩与弹跳阶段：铺展达到极值后，液滴开始回缩。此时，壁面高温的强烈热传递效应开始主导。液滴底部与壁面接触的薄层液体因快速吸热蒸发，形成一层支撑性的蒸汽膜。这层蒸汽膜有效隔绝了液滴主

体与壁面的直接接触（即 Leidenfrost Effect），同时积聚了显著的弹性能量。当回缩达到一定程度，积聚的弹性能量克服液滴的表面张力和重力，驱动液滴中心部分垂直向上剧烈喷射，形成细长的液柱。

持续弹跳阶段：喷射出的液柱在空中因表面张力作用发生瑞利-普拉托不稳定性（Rayleigh-Plateau Instability）[22]，断裂并重组为一个或多个次级液滴。由于能量在每次碰撞、铺展、回缩和喷射过程中持续耗散（主要转化为热能用于蒸发以及克服粘滞阻力），次级液滴的反弹高度呈现逐次衰减的趋势。相应地，

其后续撞击壁面时的最大铺展直径也明显减小。

稳态悬浮蒸发阶段：经过数次弹跳后，液滴动能显著降低，无法再形成明显的铺展和喷射。此时，液滴在持续的蒸汽膜支撑下，维持一个近似球形的悬浮状态，与壁面仅通过蒸汽层接触。液滴在此稳定的悬浮状态下，主要通过蒸汽层扩散和热传导持续蒸发，体积逐渐减小，直至最终完全消失。

值得注意的是，添加 SDS 的样品在初次回缩弹跳阶段表现出独特的界面失稳现象：向上喷射的液柱并非完整，而是发生了不连续的断裂，通常分裂为 2 到 3 个 ($N=2-3$) 较小的液柱段或直接生成多个更小的次级液滴。与此形成鲜明对比的是，未添加 SDS 的液滴，其初次喷射形成的液柱通常保持结构的完整性，最终主要断裂重组为单一的次级液滴 ($N=1$)。结合表面张力测试数据（表 3），这一显著的形态差异可归因于 SDS 对液滴气/液界面性质的显著改变。表 3 数据明确显示，SDS 的加入使溶液的表面张力从纯水的大于 71mN/m 大幅降低至小于 37mN/m 。表面张力是维持液柱稳定的关键力。较低的表面张力意味着液柱抵抗瑞利-普拉托不稳定性（导致液柱断裂成小液滴）的能力减弱[23]，扰动的增长速率加快，因此更容易在更短的长度尺度上发生多次断裂。这直接解释了添加 SDS 样品中观察到的液柱多段断裂现象 ($N>1$)。

5 结论

本文采用“两步法”配置了不同浓度的 SiO_2 纳米流体，随后实验测试了该溶液的表面张力值，基于高速相机对液滴撞击壁面图像进行拍摄，分析了不同浓度及有/无表面活性剂时纳米流体液滴蒸发规律和撞击 7050 铝合金板材壁面行为，主要结论如下：

- (1) 不同浓度的 SiO_2 纳米流体 Leidenfrost 温度不同，且蒸发时间随纳米流体浓度的增大而增加。在一定浓度范围内，较高浓度的 SiO_2 纳米颗粒对溶液的蒸发过程具有促进作用。
- (2) 表面活性剂 SDS 的添加降低了溶液表面张力（从大于 70mN/m 降至小于 37mN/m ），从而对蒸发过程起到了促进作用。并且由于 SDS 在高温下可能发生分解或失去表面活性作用，导致添加 SDS 的 SiO_2 纳米溶液在相对未添加 SDS 的 SiO_2 纳米溶液在较低温度下到达 Leidenfrost 现象。
- (3) 在 Leidenfrost 温度下的撞击动态过程为：初始

下落、径向铺展、轴向回缩、初次反弹、二次接触、持续弹跳、最终稳定蒸发。并且由于 SDS 表面活性剂降低了表面张力，添加 SDS 的液柱呈现不连续断裂，而未添加 SDS 的对照组保持液柱完整性。

参考文献

- [1] 胡泽辉, 李勇, 还大军, 等. Z-pin 增强防隔热复合材料研究现状及发展趋势 [J]. 复合材料科学与工程, 2024, (09): 125-132.
<https://doi.org/10.19936/j.cnki.2096-8000.20240928.018>
- [2] 李亚轩. 液滴撞击的碰撞与蒸发特性研究 [D]. 中国民航大学, 2022.
<https://doi.org/10.27627/d.cnki.gzmhy.2022.000676>
- [3] 陈博文. 波形板干燥器内液滴撞击壁面动力学特性研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2021.
<https://doi.org/10.27060/d.cnki.ghbcu.2021.001900>
- [4] 陈真真, 陈洪强, 黄磊, 等. 二氧化硅纳米流体强化对流换热研究进展 [J]. 工程科学学报, 2022, 44(04): 812-825.
<https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2022.02.10.002>
- [5] 房慧. 基于改性二氧化硅纳米流体的电池热管理系统传热特性研究 [D]. 中国矿业大学, 2021.
<https://doi.org/10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001370>
- [6] Xue Q, Dong N, Fan P, et al. Binary-Network structured PI@ SiO_2 nanofibrous composite aerogels with temperature invariant superelasticity for thermal insulation [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 493: 152424.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152424>
- [7] Hao C, Zhou Y, Zhou X, et al. Dynamic control of droplet jumping by tailoring nanoparticle concentrations [J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(2).
<https://doi.org/10.1063/1.4958691>
- [8] Li Y, Zhou J, Hu M, et al. Whole contact line pinning for droplets impacting on a hydrophobic surface due to hydrophilic TiO_2 nanoparticle addition [J]. Langmuir, 2021, 37(22): 6673-6680.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c00523>
- [9] 胡定华, 刘诗雨. Al_2O_3 纳米流体液滴撞击壁面的动力学行为数值研究 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2021, 55(05): 991-998.
<https://doi.org/10.3785/j.issn.1008-973X.2021.05.020>
- [10] Josserand C, Thoroddsen ST. Drop impact on a solid surface. Annual Review of Fluid Mechanics, 2017, 48(48): 365-391.
<https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122414-034401>

- [11] 郭亚丽, 陈桂影, 沈胜强, 等. 盐水液滴撞击固体壁面接触特性实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36(07): 1547-1552. <https://doi.org/CNKI:SUN:GCRB.0.2015-07-034>
- [12] 宋云超, 宁智, 孙春华, 等. 液滴撞击湿润壁面的运动形态及飞溅运动机制 [J]. 力学学报, 2013, 45(06): 833-842. <https://doi.org/10.6052/0459-1879-13-053>
- [13] 刘冬薇, 宁智, 吕明, 等. 液滴撞击超疏水壁面反弹及破碎行为研究 [J]. 计算力学学报, 2016, 33(01): 107-113. <https://doi.org/10.7511/jslx201601017>
- [14] Castrejon-Pita J R, Betton E S, Kubiak K J, et al. The dynamics of the impact and coalescence of droplets on a solid surface [J]. Biomicrofluidics, 2011, 5(1). <https://doi.org/10.1063/1.3567099>
- [15] 张哲旸. 二氧化硅纳米流体的制备及其稳定性与温度的关系研究 [D]. 华北电力大学(北京), 2020. <https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001321>
- [16] Liang G, Mudawar I. Review of pool boiling enhancement with additives and nanofluids [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 124: 423-453. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.046>
- [17] 宁创, 张丽伟, 童长兵, 等. 改性纳米 SiO₂ 颗粒提高 CO₂ 泡沫稳定性 [J]. 当代化工, 2024, 53(07): 1550-1554. <https://doi.org/10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2024.07.004>
- [18] 王新科. 二氧化硅纳米流体制备及其在超低渗油藏渗吸排油规律研究 [D]. 中国石油大学 (华东), 2018. <https://doi.org/10.27644/d.cnki.gsydu.2018.001184>
- [19] Cacia K, Ordoñez F, Zapata C, et al. Surfactant concentration and pH effects on the zeta potential values of alumina nanofluids to inspect stability [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 583: 123960. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123960>
- [20] Aksoy Y T, Zhu Y, Eneren P, et al. The impact of nanofluids on droplet/spray cooling of a heated surface: A critical review [J]. Energies, 2020, 14(1): 80. <https://doi.org/10.3390/en14010080>
- [21] 高大鹏, 高景滨. 阴离子型双子表面活性剂溶液高温下流变性研究 [J]. 精细石油化工进展, 2012, 13(05): 37-39+49. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-8348.2012.05.009>
- [22] Zhao C, Sprittles J E, Lockerby D A. Revisiting the Rayleigh-Plateau instability for the nanoscale [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 861: R3. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.950>
- [23] 夏同军, 董永, 曹义刚. 界面张力对 Rayleigh-Taylor 不稳定性的影响 [J]. 物理学报, 2013, 62(21): 214702. <https://doi.org/10.7498/aps.62.214702>