

## 分析测试

基于声光电原理的微液膜厚度  
测定方法及其研究进展周靖和<sup>1,2</sup>, 于涛<sup>1,2\*</sup>

(1. 东华理工大学江西省新能源工艺及装备工程技术研究中心, 江西 南昌 330013;

2. 东华理工大学核科学与工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**介绍了当前主要的测量液膜厚度的方法, 简述了它们基于声学、光学、电学等的测量原理及研究进展情况, 着重介绍了光学法、电学法的特点和优势, 总结了相关研究成果在化工工业及科学研究中的广泛应用。

**关键词:**膜; 测量; 光化学

中图分类号: TK31; TH74

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)06-0258-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.06.044

Advances in measurement methods for thickness of  
microliquid film based on acoustics, optics and electricity principlesZHOU Jing-he<sup>1,2</sup>, YU Tao<sup>1,2\*</sup>

(1. Jiangxi Provincial Engineering Research Center of New Energy Process and Equipment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Main methods for measuring liquid film thickness at present are introduced, their measurement principles based on acoustics, optics and electricity, and the related research progress are briefly described. The characteristics and advantages of optical and electrical methods are emphatically expounded, and the wide applications of related research results in the chemical industry and in scientific research are summarized.

**Key words:** film; measurement; photochemistry

液膜是以液体为材料的膜, 普遍存在于物体表面和固液界面。液膜形成、流动、蒸发的原理和特性在各种工业领域中都有应用, 如电力工程<sup>[1]</sup>、空调和制冷<sup>[2]</sup>、太阳能<sup>[3-4]</sup>、海水淡化<sup>[5]</sup>和石化工业<sup>[6]</sup>等。其中液膜厚度对相关过程中流动特性、传热机理甚至反应机理的影响都是关键性的。

长期以来, 人们普遍认为液膜具有多层结构, 但缺乏直接的证据证明, 并且液膜厚度也因外界条件的变化而具有不确定性。液膜厚度测量技术的发展一直是两相流领域的重要课题, 与流型、气液速度等参数密切相关。高精度测量液膜温度和厚度, 可以为提高工业装置性能、提高传热效率、优化工业过程提供重要参考。目前液膜厚度测定的主要方法都是基于声学、光学和电学的基本原理, 特别是光学和电学。

## 1 液膜厚度测定的重要意义

## 1.1 理论研究中的意义及相关应用

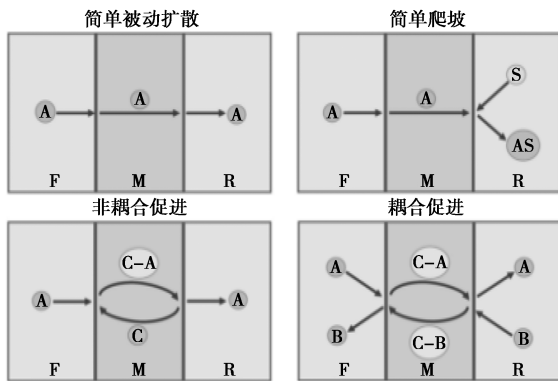
人类生活的世界中每时每刻都在发生各类化学反应, 其中大部分就是在液膜或生物膜中进行的<sup>[7-8]</sup>, 如图 1 所示。理论研究分析表明, 近壁面液膜的特性在气液两相流传热系统中地位重要, 影响着整个系统的性能及安全边界。

热交换器中传热传质过程主要是金属圆管外的降膜形成和蒸发, 这样的过程广泛存在于多种工业领域, 如核辐射防护、机械车辆、航空航天工程和制冷等<sup>[9]</sup>。而影响传热性能的重要因素就包括液膜厚度。在凝结换热领域的研究中, 精准高效测量凝结液膜厚度并分析其分布情况是不可或缺的。液膜现象还广泛存在于喷涂、燃油雾化、换热冷却、润滑

收稿日期: 2024-10-11; 修回日期: 2025-04-07

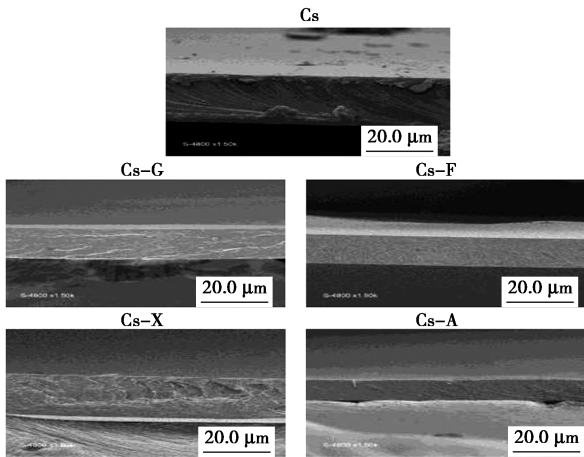
基金项目: 江西省自然科学基金项目(20242BAB25153); 东华理工大学江西省新能源工艺及装备工程技术研究中心开放基金项目(JXNE2022-07); 江西省聚合物微纳制造与器件重点实验室开放基金项目(PMND202101)

作者简介: 周靖和(2001-), 女, 硕士生; 于涛(1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为环境放射化学, 通讯联系人, tyu@ecut.edu.cn。



A—溶质;B—偶联溶质;C—载流子;S—汽提剂;F—进料相;M—膜相;R—接收相

(a) 液膜运输机制示意图



Cs—壳聚糖;A—阿拉伯糖;F—果糖;G—葡萄糖;X—木糖

(b) 生物膜不同糖类偶联的生物质膜的扫描电镜图像

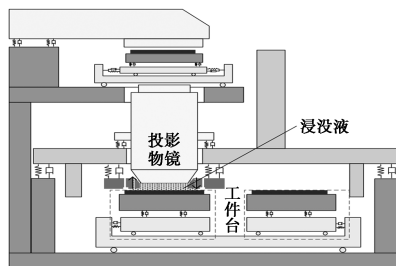
图 1 液膜、生物膜结构及工作机制示意图

以及流体输送等工业领域中。

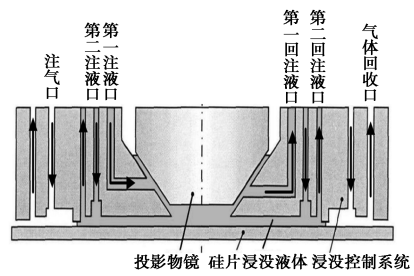
### 1.2 工业及前沿领域中的应用

重工业是国家发展的支柱产业,润滑是任何机器生产中都要考虑的重要项目。机械运转中摩擦与润滑都是与液膜息息相关的。内燃机中附壁油膜燃烧产生的池火会导致污染物排放增加,而航空发动机中高速运动的液膜会显著影响燃油的初始破碎<sup>[10]</sup>。

在一些前沿热门领域,如光刻机领域,浸没光刻机需要在硅片与投影物镜间填充浸没液(一般为纯水),这有助于增大光学数值孔径从而减小光刻特征线宽<sup>[11]</sup>。图 2 为浸没光刻机示意图。



(a) 浸没光刻机整机结构示意图



(b) 浸没控制单元典型结构

图 2 浸没光刻机示意图

### 1.3 环境领域中的应用

液膜厚度的研究在环境研究及试验中也是有帮助的。材料在大气环境中表面也会形成一层液膜,这是在毛细、吸附、化学凝聚等作用的影响下,大气中的水汽、可溶性离子及其他介质凝结在其表面<sup>[12]</sup>。液膜使大气腐蚀从纯化学腐蚀转化为电化学腐蚀,因其提供了电化学腐蚀所需的电解质溶液<sup>[13]</sup>,材料更容易变质损坏。因此材料表面的液膜厚度是影响大气腐蚀速率的主要因素<sup>[14]</sup>,也是环境试验的重要研究内容,目前一般利用液膜的润滑作用降低污泥与固体壁面之间的黏附性<sup>[15]</sup>。图 3 为干涉仪测量薄电解质膜厚度原理图。

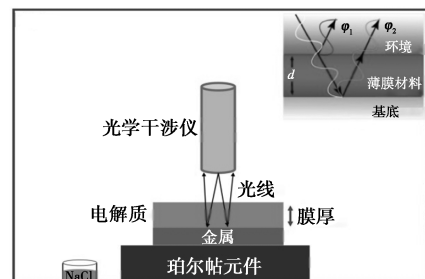


图 3 大气电化学腐蚀中干涉仪测量薄电解质膜厚度原理图

## 2 液膜分类

按照性状及功能分类划分,液膜可分为普通液膜(界面液膜)、乳化液膜和支撑液膜等。

乳化液膜(ELM)是由内水相、膜相、外水相 3 相组成,主要有水油水(W/O/W)和油水油(O/W/O)2 种类型<sup>[16]</sup>。乳化液膜在进行废水处理时为 W/O/W 类型,通常是己烷、煤油等溶剂与内相试剂、表面活性剂在一定条件下乳化,形成 O/W/O 乳化物<sup>[17]</sup>。

支撑液膜(SLM)是将液膜牢固地吸附在多孔支撑体的微孔中,在表面张力的作用下,充满微孔而形成 SLM。在膜的两侧是与膜互不相溶的料液相和

反萃相。SLM 受压能力强,且由于载体的存在,SLM 具有很高的选择性,分离特性优于有机高分子固态膜。

### 3 液膜测定方法

现有液膜厚度测量方法较多,可分为声学法、电学法、射线法和光学法等,它们各具优势,各有特点。总的来说,液膜厚度是依据能量在液膜衰减或通过液膜产生物理化学特性变化进行测量的。

#### 3.1 声学法

声学法以超声波为基础,基于超声波穿过两相界面时发生衰减和反射,来测量液膜厚度。由于其特性,可达到高采样测量频率。另外,超声法对温度敏感,通过与光学法结合可以更好地实现液膜多参数的高精度测量<sup>[18]</sup>。图 4 为使用超声法测量液膜厚度的原理示意图<sup>[19]</sup>。

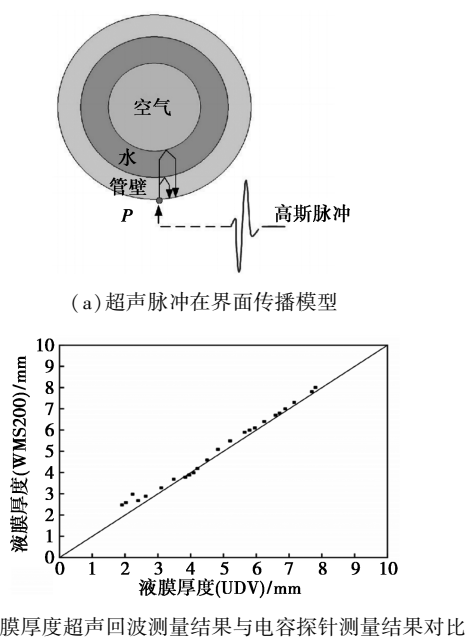


图 4 超声法测定液膜厚度示意图

苏明旭等<sup>[20]</sup>利用已知液膜厚度的标准具(100~1 000 μm)对超声法和激光法精度进行验证,结果表明,液膜在不同速度流动中,2 种方法测量流动液膜的平均厚度吻合良好,且速度越高,相对偏差越小。

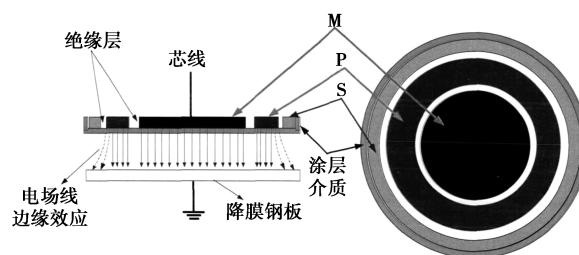
#### 3.2 电学法

电学法通常有电容测量法和电导测量法 2 种,顾名思义是基于液膜厚度与电容、电阻的对应关系来进行测量,但测量范围与精度易受液膜波动形态、传感器有效截面及探针结构影响,因此具有一定局限性。

#### 3.2.1 电容法

在流道两侧布置电极形成一个电容器,如果电介质由液体和气体构成,电容将根据两相形态变化,测量电容来计算与液膜厚度的关联,将两者的关系用函数关系表示,这就是电容传感器测量法的基本原理<sup>[21]</sup>。

李斌<sup>[22]</sup>比较了不同测量方法,根据静电场理论,对电容传感器进行改良,在液膜和探头之间添加一层聚四氟乙烯,并对其线性度和分辨率等性能指标进行了评估。图 5 为电容传感器探头示意图。



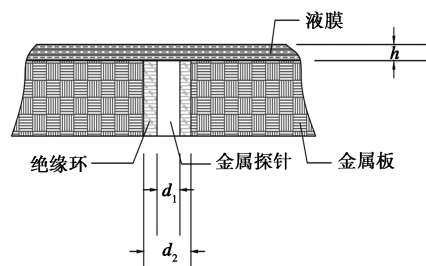
M—金属有效测量电极;P—绝缘层、保护环;S—金属夹持环

图 5 涂敷绝缘介质复合结构电容传感器探头

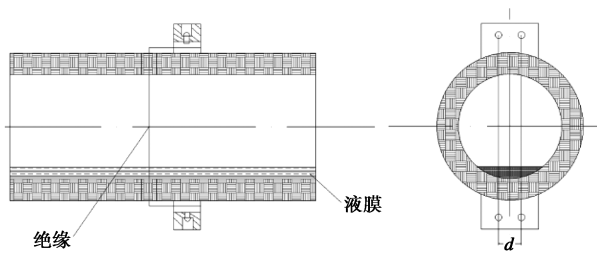
Bonilla 等<sup>[23]</sup>研究了一种电容测量系统来测量油管管壁附近的薄水膜和局部水分,是一种用于油水流动中的高时空分辨率膜厚测量新技术。测量系统基于柔性平面传感器,可以跟随管内壁的曲率放置。可用于观察和表征分离流中的平均界面拓扑结构,以及管壁附近液-液流中发生的与分散流相关的高频现象,在润滑运输方面有着重要应用。

#### 3.2.2 电导法

电导法的测量原理是基于气液两相的电导率差异来测量液膜厚度的,探针之间的电导率与它们之间的流体量直接相关,该技术简单且广泛用于宏观系统。电导探针作为一种直接接触式测量方法,易受到液膜表面张力影响,并且会对流场产生干扰,一定程度上降低了数据的可靠性,通常作为其他测量方法的参照方法<sup>[24]</sup>。常见的电导探针结构有嵌入式结构和双平行式结构,如图 6 所示。



(a) 嵌入式电导探针结构



(b) 双平行式电导探针结构

图 6 电导探针结构

潘思睿等<sup>[15]</sup>提出了一种电路探针测量污泥液膜厚度的方法,进行了污泥液膜测量参数优化,研究了电渗电压、电渗时间和污泥含水率对污泥阴极液膜厚度的影响。该方法操作简单且方便,为深入探究液膜与污泥黏附性的关联提供了方法支持,为环保领域做出了切实贡献。

### 3.3 射线法

射线法测量液膜的原理是利用射线(中子、 $\gamma$ 射线或 X 射线)穿过气液两相流系统时发生辐射能量衰减的速率不同,其在液相中衰减比在气相中更快。

图 7 为中子射线对两相流动态成像示意图。该技术包括一个开口的屏蔽辐射源,该开口设备由准直器形成辐射束,测试段后面的转换器用于检测穿过流后产生的辐射强度,这个转换器是一个面板,当被辐射击中时发出闪光。高速摄像机、相机和光电传感器用于捕捉板上的光分布。在环形流中,辐射穿过液体 2 次,因此该方法能测量线平均液体分数,

而不是局部液膜厚度。

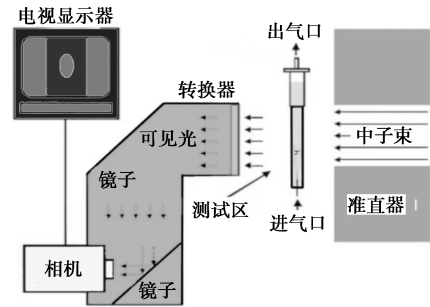


图 7 中子射线对两相流动态成像

射线法设备复杂,且成本昂贵,还需设置防辐射装置,限制了其应用场合,在一般工业过程控制和实验室场景中并不适用。

### 3.4 光学法

光学法是一种非接触式液膜测量技术。近年来数字图像处理技术快速发展,在气液两相流测量领域得到广泛应用。此方法一般是基于液-气和液-固界面的检测,每个相发射的光在界面处产生光梯度呈现不同的特性(颜色或强度)。

光学法测量精度较高、反应灵敏度高、非接触对流场无干扰。常用的光学测量技术包括椭圆光度法、位移聚焦法、荧光成像法、干涉法、界面检测法、束激光阴影法和光衰减法<sup>[25]</sup>等。传统的光学方法大多是通过分析光线强度的分析来获得液膜厚度,对于表面波动较大的液膜,可能导致结果失真。表 1 为不同光学方法测量液膜厚度特性对比。

表 1 不同光学方法测量液膜厚度特性对比

测量技术	测量原理	测量范围	精度	可操作性	适用场景
椭圆光度法	椭圆偏振技术	10 nm~1 $\mu$ m	高	复杂	单层或多层堆叠的薄膜
位移聚焦法	光谱共聚焦	2 $\mu$ m~2.8 mm	高	简单	工业化大批量检测,抗干扰能力强
荧光成像法	荧光探测	5 $\mu$ m~1.5 mm	中等	中等	普遍适用
干涉法	光波干涉	10 $\mu$ m~1.0 mm	高	复杂	普遍适用
界面检测法	气液界面光强梯度	20 $\mu$ m~1.3 mm	低	简单	光滑相界面
束激光阴影法	激光折射与反射	0.4~0.9 mm	中等	中等	光滑相界面
光衰减法	液体吸收光特性	1.5 $\mu$ m~3 mm	低	简单	半透明介质

#### 3.4.1 荧光强度法

平面激光诱导荧光(PLIF)技术是一种对流场无干扰的光学测试技术,具有灵敏度高、探测范围大、非侵入式探测等优点<sup>[26-27]</sup>。该方法基于荧光强度提供关于液膜轮廓的精确信息。它的原理是基于将染料添加到基液中,固定质量分数染料在特定波长照射下从无色变为有色,颜色强度随其分子数量的增加而增加,染色程度用于测量液膜厚度。图 8 为 PLIF 系统组成图。

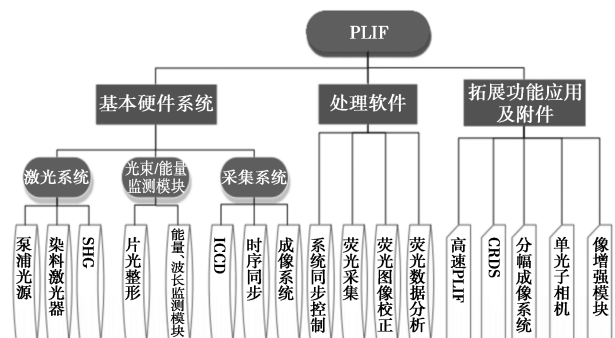


图 8 PLIF 系统组成

尽管这种方法是非侵入性的,但染料的添加可能会影响流体传输特性,从而影响测量的准确性。

### 3.4.2 激光干涉法

光学干涉测量法是利用激光束照射液膜及壁面,反射出的光线产生干涉条纹图案,分析该条纹图案可得出液膜厚度<sup>[28]</sup>。该方法主要受到膜折射率、波长范围、膜厚范围设定等因素影响较大。激光光源应满足相干条件(产生干涉条件):振动方向相同、振动频率相同、初相位一致(或相位差不变)。

孙路易<sup>[29]</sup>利用 CCD 摄像头、图像采集卡、ESPI 软件组成了干涉条纹的采集系统,通过实验证明了激光干涉法测量液膜厚度的可行性与可靠性。此外,研究还发现在电压较小时,玻璃管内液膜厚度会随管径增大而增大,这会增加不稳定性。此发现在空气冷凝器中的管内凝结换热过程中非常有帮助。

王子杰等<sup>[30]</sup>针对金属圆管外降膜过程,开发了基于双波长吸收光谱的液膜厚度测量系统,利用该系统对不同工况下竖直和水平金属圆管外降膜过程进行测量,同时结合图像法和热电偶对该系统的测量精度进行了验证。图 9 为激光干涉法光路与干涉条纹示意图。不同方法测的结果吻合良好,该系统可能对深入研究液膜形成、流动及蒸发过程提供更高精度、更高稳定性、更高敏感度的测试手段。在工业领域,有望应用于海水淡化水平管降膜蒸发器、电子器件喷雾冷却器件表面液膜测量等研究,以优化工业设计和流程。

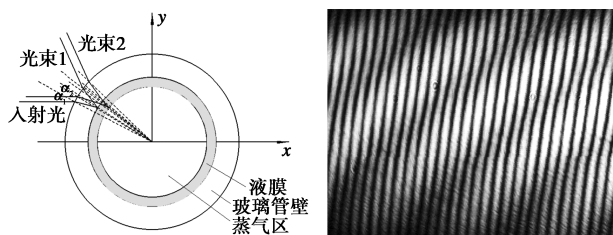


图 9 激光干涉法光路与干涉条纹示意图

图 9 激光干涉法光路与干涉条纹示意图

### 3.4.3 椭圆光度法

椭圆偏振技术与其他光学法相似,具有非接触性,且测量敏感度高、测量速度快。工作原理是利用光的偏振性质在反射或穿透样品时改变,来测量液膜厚度,主要是与样品的性质,如厚度、复折射率或介电性质有关。

与其他光学测量技术相比,椭圆偏振技术能够达到更高的精度,在目前半导体领域等工业中,已经得到了广泛应用。图 10 为椭圆偏振仪测试原理示意图。

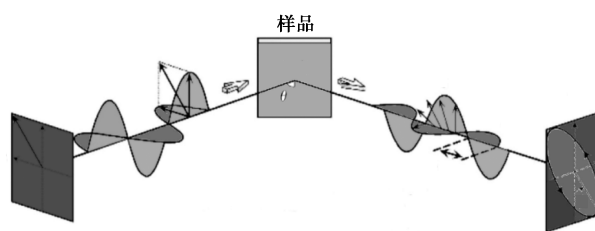


图 10 椭圆偏振仪测试原理示意图

## 4 结论与展望

综述了测量微液体膜厚度的重要意义、测量方法及测量原理,并分析了相关方法的特性、优点和限制条件,以及在各领域的应用。各方法测量原理均是依据能量在液膜衰减或通过液膜产生物理化学特性变化而进行的。

(1)液膜形成、流动、蒸发的原理和性质在各种工业领域中都有应用,高精度测量液膜温度和厚度,可为提高化学反应效率、优化工业过程、加强环保去污等提供重要参考。

(2)声学法具有高采样测量频率、较强的温度敏感性等特性,但超声波技术相关的不确定性与超声波波长(远大于光波长)直接相关,可能限制该方法在超薄膜上的应用;射线法测量精度高,但设备复杂、成本较高,在工业过程的应用较难实现。

(3)电导法和电容法的测量范围与精度易受液膜波动形态、传感器有效截面及探针结构等参数影响,可作为光学法的参照测量方法。

(4)光学法是通常条件下测量平均液膜厚度和分析气液两相流截面波动特性的最合适方案。该技术实施简单、无干扰、不昂贵、自校准,并且有合适的精度。其中,激光位移聚焦是一种非侵入方法,可以对极薄液膜进行动态测量,在未来的研究中应该会有广泛应用;荧光强度法也是一种有前途的方法,尽管添加染料颗粒可能会一定程度上影响流体性质。

(5)测量液膜厚度还有许多未开发的方法,例如利用光的衍射法,当 2 层液膜紧挨在一起,可以通过测量发生光衍射的临界点大致测量液膜厚度。并且液膜研究的应用还远不止文中列举出的领域,还可在色谱分离、催化、萃取等领域发挥重要作用。基于液膜测量的液膜分离技术在机械、环境等许多领域也有重要应用。

## 参考文献

[1] Liu X F, Jiang H, Wang F, et al. Flow behavior and film thickness of

- gas-oil two-phase flow in the single screw expander[J]. *Int J Mech Sci*, 2022, 216: 106971.
- [2] Berto A, Lavieille P, Azzolin M, *et al.* Film thickness, interfacial waviness and heat transfer during downflow condensation of R134a [J]. *Appl Therm Eng*, 2022, 214: 118808.
- [3] Zhang T, Zheng W J, Wang L Y, *et al.* Experimental study and numerical validation on the effect of inclination angle to the thermal performance of solar heat pipe photovoltaic/thermal system [J]. *Energy*, 2021, 223: 120020.
- [4] Wang W W, Cai Y, Wang L, *et al.* A two-phase closed thermosyphon operated with nanofluids for solar energy collectors; Thermodynamic modeling and entropy generation analysis [J]. *Sol Energy*, 2020, 211: 192-209.
- [5] Tahir F, Mabrouk A, Koc M. Heat transfer coefficient estimation of falling film for horizontal tube multi-effect desalination evaporator using CFD [J]. *Int J Thermofluids*, 2021, 11: 110101.
- [6] Kaklar Z, Ansair M. Numerical analysis of the internal flow and the mixing chamber length effects on the liquid film thickness exiting from the effervescent atomizer [J]. *J Therm Anal Calorim*, 2018, 135: 1881-1890.
- [7] Khanghan F A, Karimi-sabet J, Ghotbi C. Experimental study on the removal of Ca(II) from aqueous solution using a bulk liquid membrane with facilitated transport mechanism [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2023, 191: 353-363.
- [8] Hamdi M, Naeri R, Azaza Y B, *et al.* Conception of novel blue crab chitosan films crosslinked with different saccharides via the Maillard reaction with improved functional and biological properties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 241: 116303.
- [9] 胡萍, 赖喜德, 岳清雯, 等. 液膜参数对核主泵水导轴承静态特性的影响 [J]. *动力工程学报*, 2020, 40(9): 773-780.
- [10] Li X S, Pan H J, Dong X, *et al.* Spray impingement wallfilm breakup by wave entrainment [J]. *Proc Combust Inst*, 2019, 37(3): 3287-3294.
- [11] 程依依. 光刻机浸没液挤压膜力仿真与试验方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [12] Koushik B G, Steen N, Terryn H, *et al.* Investigation of the importance of heat transfer during thin electrolyte formation in atmospheric corrosion using a novel experimental approach [J]. *Corrosion Science*, 2021, 189(5/6): 109542.
- [13] Saberi L, Amiri M. Modeling atmospheric corrosion under dynamic thin film electrolyte [J]. *J Electrochemical Soc*, 2021, 168(8): 081506.
- [14] Pei Z B, Cheng X Q, Yang X J, *et al.* Understanding environmental impacts on initial atmospheric corrosion based on corrosion monitoring sensors [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 64(64): 214-221.
- [15] 潘思睿, 邓文义, 苏亚欣. 电路探针测量污泥液膜厚度方法验证及应用 [J]. *化工进展*, 2023, 42(10): 5538-5547.
- [16] 王博. 石油烃污染土壤间接热脱附关键影响因素研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 54-65.
- [17] 张哲娜, 金兆迪, 林传钢, 等. 油基钻屑低温热脱附处理工艺模拟 [J]. *油气田环境保护*, 2020, 30(6): 29-32.
- [18] 陈婧, 许克军, 刘小锋, 等. 气液两相螺旋流超声脉冲传播模拟及液膜厚度测量 [J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2021, 36(6): 122-127, 133.
- [19] 李一博, 齐翔, 王会芳. 激光超声溢油油膜厚度遥测方法试验研究 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2017, 15(3): 159-167.
- [20] 苏明旭, Ahad M A, 蒋永, 等. 超声脉冲反射法和激光吸收光谱法同步测量流动液膜厚度 [J]. *化工学报*, 2018, 69(7): 2972-2976.
- [21] 王宇辰, 陈建业, 徐璐, 等. 基于电容法的管内低温流体液膜厚度测量方法 [J]. *浙江大学学报*, 2016, 50(10): 1855-1858.
- [22] 李斌. 电容式水膜厚度测量传感器的设计与实现 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
- [23] Bonilla A, Velasco H F, Bannwart A C, *et al.* Water film thickness measurement system for oil-water pipe flow [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2019, 66: 86-98.
- [24] 薛婷, 葛鹏辉, 杨柳湘子. 基于激光诱导荧光的环状流液膜流速测量与分析 [J]. *光电子·激光*, 2015, 26(3): 523-528.
- [25] 张友佳, 李华, 兰治科, 等. 微液膜厚度及气液界面波动特性测量技术分析 [J]. *当代化工研究*, 2022, (12): 177-179.
- [26] Jonsson P, Wästerby P, Gradmark P Å, *et al.* Bioaerosol detection and classification using dual excitation wavelength laser-induced fluorescence [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9455: 945509.
- [27] 朱鑫琦, 张佩, 王光辉, 等. 基于归一化本征荧光信号的气溶胶分类技术研究 [J]. *中国激光*, 2023, 50(13): 1310005.
- [28] 傅云霞, 曾燕华, 石红, 等. 基于激光三角法的厚度在线测量系统 [J]. *计量学报*, 2014, 35(6A): 72-75.
- [29] 孙路易. 凝结液膜厚度的激光干涉测量方法研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [30] 王子杰, 孔帅帅, 许晓妍, 等. 降膜过程中液膜厚度和温度同步测量系统研制 [J]. *动力工程学报*, 2021, 41(11): 959-965. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志, 邮发代号 82—67。