超临界流体换热可视化实验研究进展

田冉[1,2]，叶小康[1]，沈俊[1]，魏名山[1,3]，史琳[4]
（1. 北京理工大学机械与车辆学院，100081，北京；2. 北京理工大学重庆创新中心，401135，重庆；
3. 中国矿业大学(北京)机械与电气工程学院，100083，北京；4. 清华大学热科学与
动力工程教育部重点实验室，100084，北京）

摘要：超临界流体在临界点附近物性剧烈变化，其流动与换热机理复杂，对能源、化工等领域的高效系统设计具有重要意义。该文系统综述了超临界流体对流换热可视化实验方法的研究进展，重点分析了粒子图像测速、纹影法、激光多普勒测速、干涉法、中子成像及非弹性X射线散射等技术的原理、应用与局限性。研究表明：中子成像/非弹性X射线散射等技术可捕捉超临界流体在拟临界区类液-类气态共存的多相特征；粒子图像测速与激光多普勒测速能够提供高分辨率速度场，但在物性突变条件下受折射率畸变、示踪粒子跟随性差等因素制约，导致测量精度受限；纹影法可实现密度场、温度场的定性观测，与其他技术集成则有望实现速度场的定量测量；干涉法可获得高时空分辨率的局部温度与密度场定量数据，是研究超临界流体换热机理的有效手段。未来应发展高精度、抗干扰的可视化方法，结合深度学习提升图像畸变校正能力，推动多模式集成测试技术的创新，并加强实验与数值模拟的协同，以深入揭示超临界流动换热的内在机理。

关键词：超临界流体；对流换热；可视化；物性突变
中图分类号：TK124 **文献标志码**：A
DOI：10.7652/xjtuxb202608001 **文章编号**：0253-987X(2026)08-0001-21

Progress in Visualization Experimental Studies on Heat Transfer of Supercritical Fluids

TIAN Ran[1,2], YE Xiaokang[1], SHEN Jun[1], WEI Mingshan[1,3], SHI Lin[4]
(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Chongqing Innovation Center, Beijing Institute of Technology, Chongqing 401135, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Near the critical point, supercritical fluids exhibit dramatic variations in physical properties, leading to complex flow and heat transfer behaviors essential for energy and chemical system design. Recent experimental advances in flow visualization for supercritical convective heat transfer are systematically reviewed. The principles, applications, and limitations of key techniques including particle image velocimetry (PIV), schlieren imaging, laser Doppler velocimetry (LDV), interferometry, neutron imaging, and inelastic X-ray scattering are emphatically analyzed. Research results show that neutron imaging and inelastic X-ray scattering can capture the

收稿日期：2025-10-12。 作者简介：田冉(1991—)，女，副教授；魏名山(通信作者)，男，教授，博士生导师。 基金项目：国家重点研发计划资助项目(2024YFB3813602)。
网络出版时间：2026-03-04 网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20260304.1445.003

multiphase-like features of liquid-like and gas-like coexistence in the pseudo-critical region. Although PIV and LDV provide high-resolution velocity data, their accuracy is limited under sharp property gradients due to refractive index distortions and poor tracer particle responsiveness. Schlieren imaging is found to provide qualitative density and temperature field visualization, and its potential for quantitative velocity measurements can be realized when combined with other methods. Interferometry enables quantitative, high-spatiotemporal-resolution measurements of local temperature and density, proving effective for probing heat transfer mechanisms. Future work should prioritize the development of interference-resistant, high-precision visualization techniques, the improvement of distortion correction via deep learning, the advancement of multimodal integration, and the strengthening of experiment-simulation synergies to elucidate fundamental mechanisms of supercritical flow and heat transfer.

Keywords: supercritical fluid; convective heat transfer; visualization; sharp thermophysical property variation

超临界流体是指压力和温度超过其临界点的流体,因其在临界点附近特殊的物理性质,兼具液体的高溶解性和气体的高扩散性[1-2],在油气开采[3-4]、材料合成、天然物萃取[5]、制冷[6]、先进动力循环[7]等领域展现出了广阔的应用价值和应用前景。

超临界流体在拟临界区物性变化剧烈,兼具高密度、低黏度及比热突增特性,换热能力优异,可提升热效率、缩小系统尺寸[7-9],在第4代核反应堆[8]、燃煤发电[9]及可再生能源等领域应用前景广阔[10-11]。美国、欧盟及我国已建成多个MW级示范项目,如美国Sunshot计划、欧盟超临界CO_2(sCO_2)循环项目、我国5 MW燃煤机组及MW级压缩机等[12-15],但超临界流体换热异常引发的工程风险日益突出,机理研究滞后已成为制约技术商业化的关键瓶颈。

含超临界流体的换热系统是超临界发电系统的重要子系统,也是影响系统整体效率的关键要素[16]。超临界流体物性随温度变化剧烈,换热特性明显区别于常物性流体,物性变化引发的浮升力、热加速等作用影响了湍流输运特性[12,16-18],换热机理更加复杂,超临界流体换热问题一直是动力循环研究的焦点。

目前,针对超临界流体在加热和冷却条件下的流动换热问题开展了大量研究,形成了许多综述性论文,对多种超临界流体(水、CO_2、氟利昂类流体)的对流换热问题从参数影响规律[1]、湍流输运机理[13]、传热恶化机制及预测[14]、换热关联式[17]、数值模型[18-20]等多个方面展开论述。其中,实验研究是研究超临界流体流动换热的基础重要手段,已有大量实验研究通过在实验段施加不同的热边界条件,获得壁温分布,从而获得沿程换热系数分布,为理解超临界流体换热特性规律及建立预测模型提供了大量的数据支撑[21-26]。但是,这些宏观性实验难以获得内部流场、温度场分布细节,成为制约机理认识和湍流模型发展的瓶颈。流动是传热的载体,流场的涡分离、涡再附、转捩等精细结构直接决定了热量的转移路径和转移强度,而温度场的变化又会影响流体的物性和流动特性,流动与传热之间存在强耦合关系。超临界流体对流换热过程同样涉及复杂的流-热耦合机制,深入揭示其换热机理的关键在于,准确捕捉流体在跨越拟临界点前后,因局部物性剧烈变化所引发的流场精细结构特征。通过速度、密度等参数的可视化观测,可提供速度分布、湍流结构分布,分析热量传输机理,进而与宏观温度场变化建立联系,系统分析超临界流体的换热机理。因此,超临界流体流场可视化是完善超临界流动换热理论、发展更高精度湍流模型的必要手段。

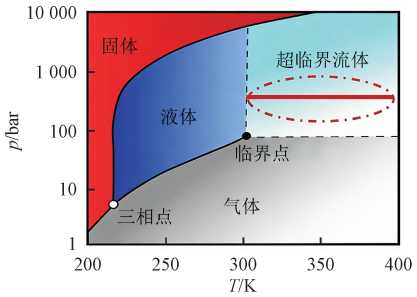
常见的可视化实验技术包括粒子图像测速技术(particle image velocimetry,PIV)、纹影法、多普勒激光测速法(laser Droppler velocimetry,LDV)等,这些技术已广泛用于揭示常物性流体的速度分布、湍流结构及流动传热机制[27]。在超临界流体湍流换热领域,随着流场测量技术的发展,研究人员对相关机理有了新的认识。然而,超临界流体的特殊物性给可视化测量带来严峻挑战:所需的高温高压条件虽已随加工技术进步逐渐可控,但由密度畸变引发的折射率畸变、示踪粒子跟随性差等问题仍是当前技术瓶颈。

目前，关于超临界湍流换热可视化研究的系统性分析仍较缺乏。本文从技术可行性与经济性角度出发，系统梳理现有研究中采用的可视化技术及其结果特征，综合评估各方法在超临界流场测量中的适用性与局限性，深入剖析当前对流换热可视化面临的核心难点，并展望未来发展方向，旨在为揭示超临界流体对流换热机理提供研究支撑。

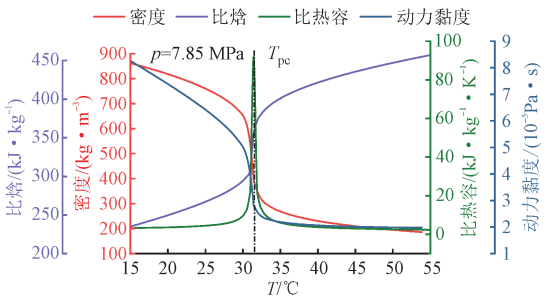
1　超临界流体物性变化及对流换热特征

1.1　超临界流体物性变化特点

当物质的温度压力都超过临界值后，液体和气体的相界面消失，流体进入超临界状态，既不是液体也不是气体。在换热过程中，由于压力的变化并不会引起明显的物性变化，所以可近似为等压过程。以 CO_2 加热过程为例，流体沿着等压线经历了如图 1(a)所示的液体到超临界状态的转变。物性随温度发生了如图 1(b)所示的连续且剧烈的变化，比热容出现极高的峰值时对应的温度定义为拟临界温度 T_{pc}，在 T_{pc} 附近物性变化最为剧烈。



(a)物质三相图



(b) 7.85 MPa 下等压加热过程 sCO2 的热物性

p—压力；T—温度。

图 1　超临界流体物性特点

Fig. 1　Characteristics of thermophysical properties of supercritical fluids

在很小的温度梯度内，密度、黏度和导热系数快速降低，焓值急剧增大。压力越靠近临界值，物性变化越剧烈。T_{pc} 随压力增加而增大，可以通过数学拟合得到 T_{pc} 与压力的关系。表 1 总结了常见流体的拟合关系式，不同压力下的 T_{pc} 连起来构成了拟临界线，称为 Widom line。在数学上 Widom line 被定义为热力学响应函数出现局部极值的轨迹，可认为是气液相变在超临界区域的延伸[28]。

表 1　常见流体拟临界点拟合关系式

Table 1　Correlations for the pseudocritical point of common fluids

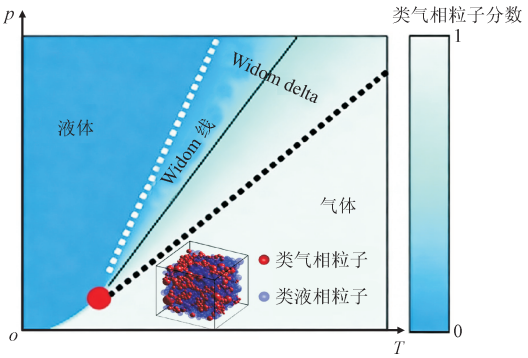
适用工质	关联式
R134a	$T_{pc}=314.588+0.017\,31p_{ab}-6.485\times10^{-6}p_{ab}^2$
CO_2	$T_{pc}=250.698+0.008\,67p_{ab}-1.922\times10^{-7}p_{ab}^2$
R1234yf	$T_{pc}=304.93+0.022\,4p_{ab}-1.121\,3\times10^{-6}p_{ab}^2$
H_2O	$T_{pc}=374.15+0.17p_{ab}-0.114\,1p_{ab}^2$

注：p_{ab} 为绝对压力。

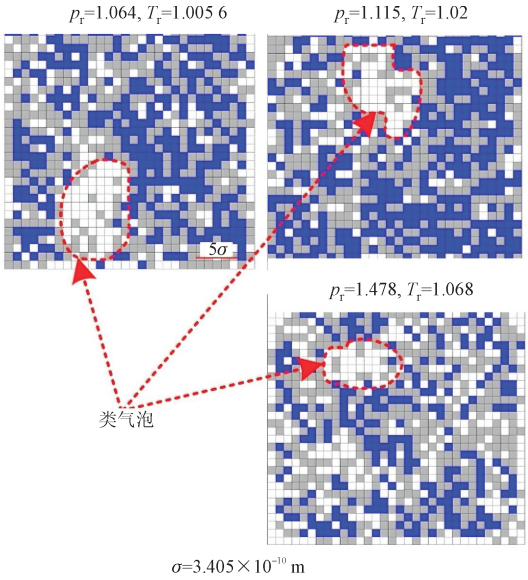
流体的换热过程通常是一个跨越拟临界线的过程，可能在流动方向上跨越，也可能在横截面上跨越，这都导致流动换热过程中经历巨大的物性变化，给换热带来规律和机制的影响。跨越拟临界限过程中，流体在类液态和类气态之间转换，但是没有明显相界面[28-31]。随着研究逐渐向分子层面深入，通过分子动力模拟及中子成像等技术，可以更加深入的认识超临界流体的物性本质。

Ha 等[32]经过分子动力学分析，识别出超临界流体中类液和类气分子的微观共存状态，提出了如图 2(a)所示的 Widom delta 的新概念。该概念认为超临界流体并非均匀相，而是类液与类气分子交织形成的非均匀混合物，重新将 Widom 线定义为类气相粒子分数为 0.5 的轨迹。徐进良教授团队通过分子动力学模拟发现，在超临界流体中存在如图 2(b)所示的具有弯曲界面、界面处存在高密度梯度的类气泡结构。结合邻近分子法、径向分布函数与两体过剩熵等多种方法系统，确定了相区边界。通过非线性动力学分析，揭示两相共存区域具有类似亚临界两相流的气液共存行为，从微观结构层面证实了超临界流体具有多相特征[33-37]。Zhu 等[38]利用拉曼光谱原位测量了超临界水的氢键特性，揭示了即使在极端条件下氢键仍以二聚体/三聚体形式存在，深化了超临界水中分子簇结构与反应机理的认识。Maxim 等[39]利用中子成像技术，在 mm 尺度上可视化了超临界水在跨越 Widom 线时从类液态向类气态的转变过程，如图 2(c)所示。结果发现，该过

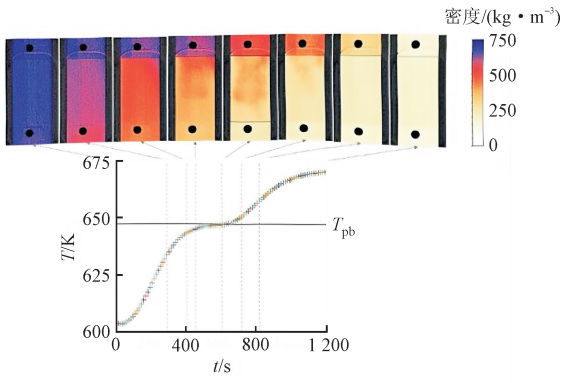
程伴随明显的密度波动与结构滞后，这解释了类沸腾现象的动态密度波动与结构演化，为超临界水具有多相特征提供了实验证据。



(a)Widom delta 概念[32]



(b)超临界流体类气泡结构[37]



(c)超临界水密度涨落[39]

p_r—无量纲压力，定义为 p/p_c，其中 p_c 为临界压力；

T_r—无量纲温度，定义为 T/T_c，其中 T_c 为临界温度；

T_{pb}—主流拟临界温度。

图 2 超临界流体类相变理论相关研究

Fig. 2 Research on the theory of pseudo-phase transition in supercritical fluids

1.2 超临界压力流体对流换热特性

超临界流体物性的特殊性带来了流动换热的特殊性。如图 3 所示，在超临界压力下，由于物性变化，常规的常物性强迫对流换热转变为变物性强迫对流换热，当有浮升力影响时，转变为变物性混合对流换热[19,38]。

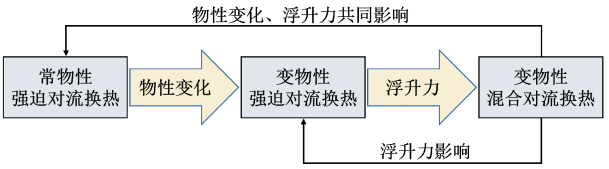


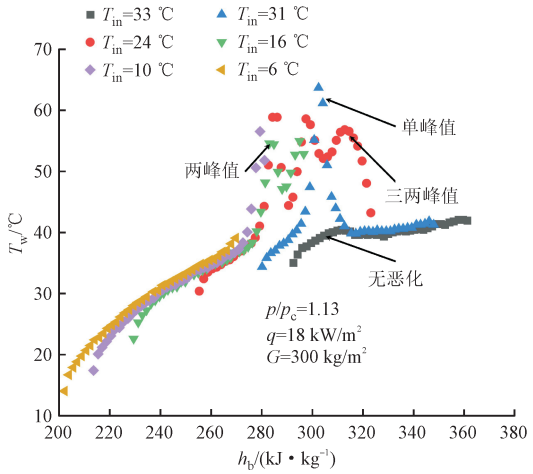
图 3 超临界流体对流换热分类

Fig. 3 Classification of heat transfer in supercritical fluids

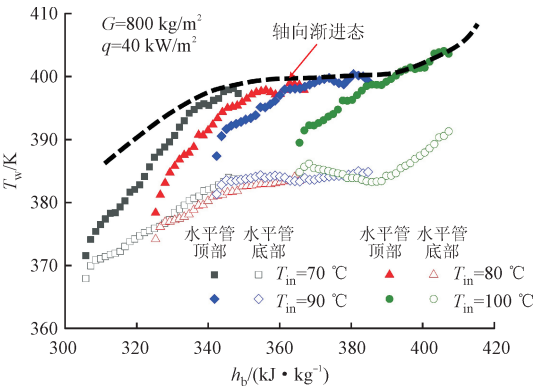
超临界流体的换热特性显著区别于常物性流体。一方面，在较高的质量流速、较低的热流密度下，超临界流体处于变物性强迫对流换热，其在拟临界点附近出现换热系数的峰值分布[13,40-41]，在没有相态变化时能够达到与两相核态沸腾相当的量级。另一方面，在浮升力影响下进入混合对流换热，产生的传热恶化则极易引发局部壁温飞升[20]。与两相沸腾换热的换热恶化不同的是，这种恶化只发生在局部，壁温达到峰值后，立刻下降，即发生换热恢复，换热恢复也是超临界流体换热中的特有现象[42-43]。除这些基本换热形态外，超临界流体换热参数变化对换热特征的影响规律也较为特殊。目前，尚不能较为准确地预测参数变化的影响，呈现出一定的随机性[21]，尚不能描述换热恶化时壁温峰值的数量，出现如图 4(a)所示的 1、2、多个峰值的情况，且出现位置尚未总结出明确的规律性。入口状态的影响也较为特殊，相同热流、流量等参数条件下，入口温度的差异直接影响换热恶化峰是否出现、出现数量和位置。并且，超临界对流换热的入口段非常长，Tian 等[44]提出了如图 4(b)所示的超临界换热特有的轴向渐进态，证明了上游历史的影响规律和范围。

超临界流体的对流换热特性较为复杂，物性变化是根本诱因，由此引发的浮升力、热加速、流动加速等作用进一步影响了湍流输运特性，使得其换热机理成为多物理耦合作用下的复杂问题[15,22,45-47]。针对超临界流体的换热异常现象，主要形成了两类基本理论。一类是基于超临界热物性的单相对

流理论，该理论认为换热强化是由于大比热的积分效应引起，而传热恶化是由于剧烈变化的热物性引起的浮升力、热加速等耦合作用对湍流产生了直接影响（影响湍流脉动）和间接影响（通过影响速度分布，从而影响湍流强度），引发湍流层流化，带来传热恶化。对于在湍流层流化后发生的换热恢复的机制研究相对缺乏，有研究认为完全层流化后的旁路转捩促进了后续的湍流再生成[48]，从而促进换热恢复。



(a)换热恶化峰值分布[24]



(b)上游历史影响[44]

T_w—管壁温度；T_{in}—实验段进口温度；G—质量流率；q—热流密度；h_b—主流焓值。

图 4　超临界流体换热特性

Fig. 4　Heat-transfer characteristics of supercritical fluids

第二类则是类比亚临界两相换热而建立的类沸腾理论[31,36,48-49]。该理论认为，超临界流体传热强化是由于近壁面类似气泡的类气态分子团脱离壁面时，对冷热流体进行充分的扰动与掺混，导致换热系数增大。传热恶化是由于在高热流、低质量流速工况下，低密度的类气态分子团在近壁面处逐渐聚集进而形成稳定且高热阻的低密度膜层，阻碍了热量的径向传导[33]，从而导致了传热恶化。无论是单相对流理论，还是类沸腾理论，目前都需要更多的可视化实验证据，从流动形态、流场结构及物性变化角度提供更充足的证据支撑。

2　超临界流体对流换热可视化实验研究进展

针对超临界湍流换热，目前开展的实验研究大致分为两类。一类是通过测量壁温获得换热系数分布的参数化实验[24,33,50-52]，基于壁温、换热系数等数据进行规律性分析[53-55]，建立换热预测关联式[2]，提出强化或抑制传热的措施[56-57]。这类实验所涉及到的参数范围已经较为广泛，流体种类也较为丰富，但这种参数化实验难以揭示超临界流体传热机理。另一类则通过可视化手段获得静止或流动状态下超临界流体局部温度分布、速度场变化、密度场涨落等信息，以获得更加直观和有效的证据说明超临界流体的湍流换热机理，揭示超临界流体临界异常现象[58]，进而将可视化数据与湍流模型进行关联，修正现有湍流模型，使超临界流体具有更为广泛的工程应用。

按照是否会对流场产生扰动，可视化实验分为侵入式和非侵入式方法。侵入式测量方法包括 PIV 法、荧光粒子示踪法等，通过测量流场中的示踪粒子运动间接测量速度场。非侵入式测量法主要有干涉法、纹影法、中子成像等方法，对温度场、密度场进行测量时不会对流场产生干扰。按照成像原理划分有光学可视化、衍射成像、干涉成像等方法[27]。表 2 列举了目前应用于超临界流体换热的典型可视化研究，具体包括 PIV、激光诱导荧光法（laser-induced fluorescence，LIF）、LDV、纹影法、干涉法、中子成像技术、非弹性 X 射线散射（inelastic X-ray scattering，IXS）等。面对超临界流体物性的显著变化，尤其是密度剧烈变化所引起的复杂折射率波前畸变，光学可视化技术在应用过程中面临一定挑战。本文将系统梳理超临界换热领域各类关键可视化技术的研究进展，分析其各自特点，并归纳当前存在的主要难点与挑战。

表 2 经典超临界流体换热可视化实验研究

Table 2 Visualization experimental study on heat transfer of classical supercritical fluids

可视化方法	作者	流体	工况参数	示踪粒子或示踪光剂	实验技术	实验结果
PIV	Kazemifar 等[59]	CO_2	p=8.0 MPa T=24,40 ℃	水相:1.0 μm 荧光微球 CO_2 相:荧光液	micro-PIV,分相标记	获得孔隙尺度 sCO_2 驱替水的速度场和相分布
	Ghorpade 等[60]	CO_2	p=6～8 MPa T=20～35 ℃	5～30 μm 非荧光镀银中空玻璃微球	micro- PIV,背光照明	获得 T 型通道内液态 CO_2-甲醇混合物的速度分布
	Valori 等[61]	氟利昂、水	p=5.5 MPa T=28～36 ℃	5 μm 的空心玻璃珠	PIV 结合背景导向纹影,乙醇清洗示踪粒子	获得强折射率畸变条件下的瞬时与时间平均速度场图像
	吴超等[62]	氟化液、水	p=1.85 MPa T=25 ℃	5 μm 的空心玻璃珠	透明导电膜加热,径向截面流场可视	获得水平管径向截面二次流结构及其演化规律
LIF	Park 等[63]	CO_2	p=7.9 MPa T=23～90 ℃	罗丹明 6G	动态背景扣除与信号包络提取算法	实现了 sCO_2 流体远程测温
LDV	Rohd 等[64]	氟利昂	p=5.3 MPa T=27～33 ℃	空心球形颗粒	4 种不同密度的示踪粒子,数值模拟分析	探究示踪粒子大小、密度梯度对测量精度的影响
	Du 等[65]	CO_2	p=7.54～8.36 MPa T=6～25 ℃	5 μm 的二氧化钛颗粒	方形环形通道,加热棒局部镀银	获得传热恶化条件下近壁面区域的模糊阴影图像
纹影法	Whitaker 等[66]	CO_2	p/p_c=1.05		高速纹影成像技术	实现了微通道内临界区密度梯度的侧视可视化测量
	He 等[33]	CO_2	p=8,10 MPa T=15 ℃		高速相机直接拍摄,光纤测温,灰度提取	获得了铂丝和镍铬丝表面的 sCO_2 加热流动图像
	Draskic 等[67]	CO_2	p/p_c=1.20		阴影成像、纹影图像测速法、背景纹影法	获得 sCO_2 在水平矩形通道内的分层流动传热图像
干涉法	Chen 等[68]	CO_2	p=5～7.9 MPa		像素化阵列掩膜相移干涉仪,相位展开与场重建算法	实现了高雷诺数下 sCO_2 在微型通道内的边界层密度场、温度场测量
	Yang 等[69]	CO_2			像素化阵列掩膜相移干涉仪,相位展开与场重建算法	测量了亚/跨/超临界条件下射流过程相界面的瞬态密度场和边界结构
中子成像技术	Maxim 等[39]	H_2O			多孔碳纤维单体分离和稳定类气态和类液态区域,放大和延缓微小密度波动	获得超临界水从类液态快速演化到类气态时的密度突变
	Sugioka 等[70]	H_2O	p≈25 MPa T=385～393 ℃		温度-中子衰减系数定量标定方法	实现超临界水热合成纳米颗粒管式流动反应器内水的温度和密度分布的测量

续表

可视化方法	作者	流体	工况参数	示踪粒子或示踪光剂	实验技术	实验结果
IXS	Simeoni 等[28]	超临界氩	p=0.4～3.34 GPa T=573 K		金刚石压砧与同步辐射的结合，分子动力学模拟	IXS 图像清晰地将超临界区划分为类气与类液两个动力学区域
	Gorelli 等[71]	超临界氩	p=1.2 GPa T=295 K		金刚石压砧，空样品室光谱测量与扣除抑制寄生散射	获得超临界氩的声波色散关系、广义热容比和纵向黏度

2.1　粒子图像测速法

PIV 技术广泛应用于湍流流场、气动声学涡生成、燃烧与高温流场等的测量[72-73]。原理是通过向流场中布撒示踪粒子，用激光片光照射待测区域，通过连续两次曝光拍摄粒子图像，并识别计算粒子在已知时间间隔内的位移，从而获得流场的速度分布。随着相机和计算机性能的提升，逐渐形成 micro-PIV 技术、多帧 PIV 技术乃至三维 PIV、高频 PIV、时间分辨 PIV 等技术[74-76]。PIV 技术的分辨率在 mm 及 μm 尺度，测量维度可为二维或三维，其采样特征为平面瞬时采样。定量测量程度高，能够获得流场的瞬态瞬时速度场。PIV 技术的测量精度与示踪粒子的跟随性高度相关，示踪粒子跟随性由粒-液密度比、折射率匹配、粒形粒径、弛豫时间及流体黏度共同决定[77-78]。超临界流体密度在拟临界点变化剧烈，因此根据流体选择合适的示踪粒子是超临界流体 PIV 可视化实验的关键[79-80]。

目前，有部分学者使用 PIV 研究了超临界流体在多孔介质内的流动换热特性。Kazemifar 等[59]采用荧光显微 micro-PIV 技术，在 8 MPa、进口温度 24 ℃和 40 ℃条件下，对液态/超临界 CO_2 与水在如图 5 所示二维多孔硅微模型中的两相流动进行了观测。通过在水相添加荧光示踪粒子、在 CO_2 相标记荧光染料，并结合光谱分离与显微成像，实现了两相独立成像与水相瞬时速度场的测量。由于背景噪声和折射率畸变，在使用光学滤波的情况下，低速工况流场测量精度仍然被影响。此外，为保证空隙尺度分辨率，有效视场区域被压缩，无法同步观测全域流动。该工作为孔隙尺度下高压 CO_2 驱替水的动力学过程提供了高时空分辨率的速度场数据，也为研究超临界流体提供了分相标记研究思路。

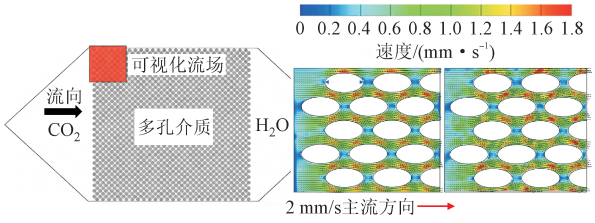


图 5　二维多孔硅基模型内水及 CO_2 多相流可视化流场[59]

Fig. 5　Visualized flow field of water and CO_2 multiphase flow in a 2D porous silicon-based model[59]

利用 PIV 进行超临界流体自然对流和强迫对流的研究也被较多尝试。吴超等[62]采用 PIV 技术，对比研究了水与氟化液在水平管内的流动与换热特性。实验获得了如图 6 所示的 μm 级空间分辨的瞬态速度-涡量场，但在接近临界温度时，密度剧烈变化导致折射率畸变，难以捕捉清晰粒子运动图像，只能通过调整工况参数使得视窗边缘工质达到或跨越临界态，从而获得流场大部分区域粒子运动图像。同时，示踪粒子的跟随性也影响了流场测量精度，导致低估了浮升力对换热的影响。该研究直观揭示了水平管内二次流结构及其对换热的增强机制，为换热器优化设计提供了重要依据。

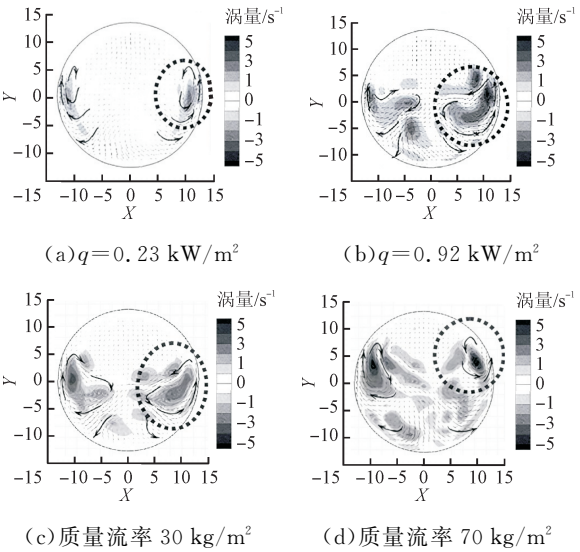
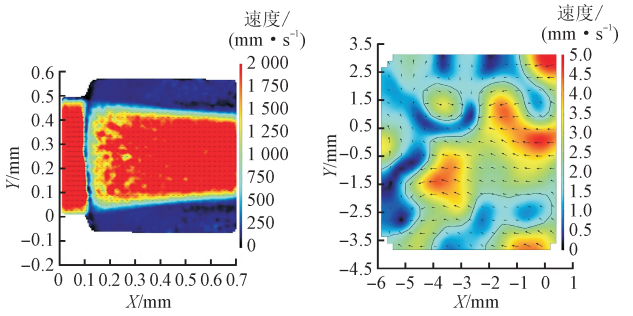


图 6　超临界氟化液水平管 PIV 流动可视化流场[62]

Fig. 6　PIV flow visualization of flow field in a horizontal tube with supercritical fluorinated liquid[62]

Ghorpade 等[60]采用 micro-PIV 结合背光照明技术，对近临界条件下液态 CO_2 与甲醇在 T 型通道内的混合流动进行了可视化测量。实验选用直径 5～30 μm的银包覆空心玻璃微球作为示踪粒子，通过双组分互相关分析，获得了如图 7 所示的混合物速度分布。结果显示，流场呈现波状非均匀结构，并观察到涡旋积累现象，验证了银包覆空心玻璃微球作为 CO_2 相容示踪粒子的适用性。为了避免传统示踪粒子固定密度导致粒子跟随性差，实验采用调节压力适配示踪粒子密度方法保证密度匹配，同时采用非荧光微粒结合背光技术增强粒子识别，一定程度上避免了折射率畸变和粒子跟随性差的问题，但同时也增加了实验成本，无法适应变工况实验的要求。

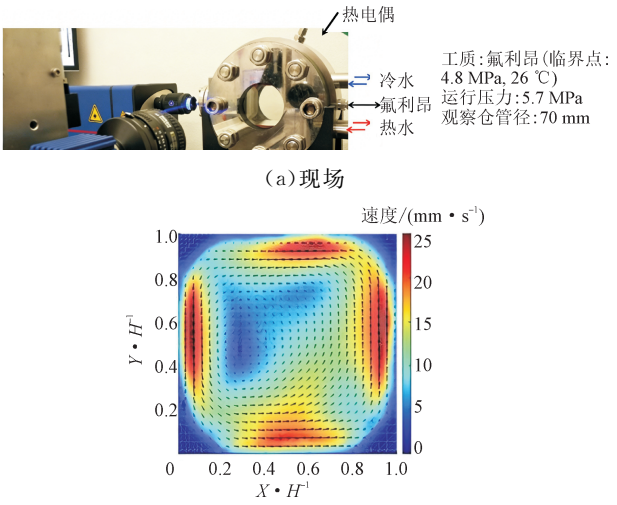


(a)水与荧光示踪粒子混合物　(b)液态 CO_2-甲醇-银包覆空心玻璃微球示踪剂混合物

图 7 Ghorpade 等[60]基于 micro-PIV 法获得的速度场云图

Fig. 7 Velocity field maps obtained by micro-PIV by Ghorpade et al.[60]

此外，PIV 在超临界流体流场测量还面临测量精度低的问题。Valori 等[61]建立了如图 8 所示的 PIV 可视化实验系统，系统评估了其测速精度，图中 H 为实验仓深度。该系统结合 PIV 与背景纹影技术，研究了超临界三氟甲烷在瑞利-贝纳德对流腔室内的流动。为应对流体密度剧烈变化(最大相对密度差达 42%)导致的折射率畸变，研究采用密度匹配的空心玻璃微球示踪粒子，并对其进行乙醇清洗以防止团聚。背景纹影评估表明，尽管在边界层和热羽流区域存在图像畸变，PIV 在约 75%的区域内仍具可靠性。基于 Wieneke[81]提出的相关 PIV 流速不确定性量化方法，估计出瞬时速度测量不确定度约为 0.53 像素，相当于大尺度循环速度的 5%～10%。该工作证实，超临界流体剧烈的物性变化会引入显著的折射率畸变与粒子跟随性问题，从而增大 PIV 的测量误差。



(a)现场

(b)速度场

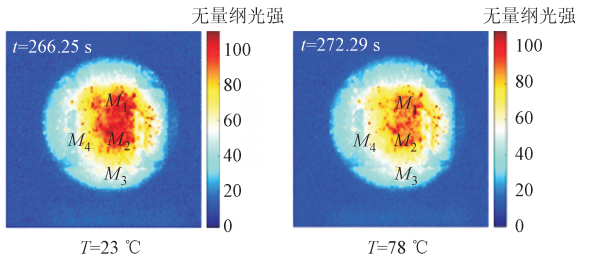
图 8 超临界三氟甲烷瑞利-贝纳尔对流实验段结构及速度场云图[61]

Fig. 8 Experimental setup and velocity field contours of supercritical trifluoromethane Rayleigh-Bénard convection[61]

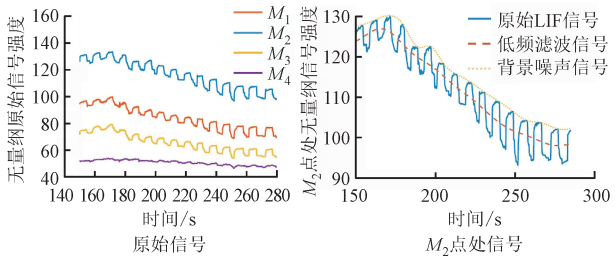
与 PIV 原理相近的 LIF 技术，是利用特定波长的激光激发流场中的示踪光剂，检测示踪光剂发射的荧光信号强度与分布，从而实现对浓度、温度或流速等物理量的非接触式高时空分辨率测量。荧光特性受温度、压力、溶剂环境等因素影响，使得 LIF 在测速的同时具备测量温度场等物理参数的潜力[63]。在应用于超临界流体流动换热时，需重点考虑染料与超临界流体的混合均匀性、以及超临界流体对荧光信号的吸收等问题。

目前，有学者尝试采用 LIF 方法测量超临界流体流动换热的温度场，但尚无速度场测量研究，其有效性还有待进一步验证。Park 等[63]发展了一种基于 LIF 的 sCO_2 远程温度测量技术，证明了 LIF 方法测量 sCO_2 流体温度的可行性。实验以罗丹明 6G 作为温敏荧光染料，在 7.9 MPa、23～90 ℃条件下成功获取了如图 9(a)的微通道内 sCO_2 流动的瞬态二维温度分布，发现 LIF 测得的温度数据与热电阻测量值吻合良好。该文发展了 LIF 信号处理方法，有效剔除了背景光源的干扰信号，获得了如图 9(b)所示的滤除背景光源的信号。

然而，该技术仍面临若干挑战：激发光强分布不均导致荧光图像中心与边缘强度差异超过 50%，需借助图像差分与归一化处理以消除由此引起的测温偏差；流体温度响应存在滞后，影响瞬态温度场的实时捕捉；荧光染料在超临界 CO_2 中的溶解度与化学稳定性亦限制了其长期适用性[63]。



(a)不同温度下的 LIF 图像



(b) LIF 原始信号及背景信号提取

M_1～M_4—原始 LIF 信号提取标记点。

图 9　Park 等[63]基于 LIF 的超临界 CO_2 局部荧光图像及 LIF 信号提取

Fig. 9　Local fluorescence images of supercritical CO_2 by LIF and LIF signal extraction by Park et al.[63]

针对流场密度急剧变化导致的折射率畸变，有必要建立高精度矫正算法进行修正，以减小测量误差。白斌等[82]基于图像几何矫正原理建立畸变图像与矫正基准板图像之间的多项式矫正关系式，实现了在 6 MPa 压力下流场的可视化观测。超临界流体实验中的折射率畸变数字校正算法，其核心思想通常是通过图像处理或计算成像技术，反演并补偿由非均匀折射率场引起的光线偏折。常用的流场图像矫正方法主要有图像几何矫正法[82]、复合滤波矫正法[83]、非对称图像形变矫正法[84]、自适应光学深度学习法[85]等。超临界流体流场折射率畸变复杂、变化迅速，缺乏适用的矫正模型，传统的矫正方法并不能很好地克服这些问题，深度学习方法在这方面展现出强大潜力，但仍然需要解决训练数据获取及模型训练问题。

PIV 技术具有全场测速和定量测量等优点，但在超临界流体流场测量中面临两大挑战：①示踪粒子的跟随性问题，由于临界点附近密度剧烈变化，传统粒子难以均匀悬浮且易团聚沉降，高压下布撒补充困难；②折射率畸变导致成像失真，密度梯度引起光线偏折和散焦，造成图像模糊和错位，尤其在边界层和热羽流等关键区域测量误差显著，需借助高精度图像矫正模型提高数据准确性。随着技术的发展进步，PIV 技术逐步从二维向三维、从低频向高频发展[86]，在获得更全面、更精细的流场信息的同时，能够拓展诸如超临界流体测量等极端条件下的应用边界，更好地捕捉流场精细结构。

2.2　激光多普勒测速技术

LDV 法侧重于测量局部速度场，其基本原理是当激光源与观测点之间存在相对运动时，相对距离的变化会引起接收频率的改变。当两者靠近时，接收频率高于发射频率；远离时，则低于发射频率。通过分析频率变化，即可计算出被测物体的位移与速度，从而实现局部速度场的精确测量[87]。LDV 法同样需要示踪粒子显示流场粒子运动，采样特征为单点序列时间采样，定量测量精度高，响应频率快，流速测量范围广[88]。

相比于 PIV，LDV 在超临界流动换热研究中的相关应用较少。Rohde[64]探究了使用 LDV 方法测量超临界氟利昂速度场的可行性。采用双组分激光多普勒测速系统研究了超临界流体中示踪粒子粒径对速度场测量精度的影响，并探索了流体密度梯度对速度测量精度的影响。研究表明，在没有跨越拟临界线及远离拟临界点等密度变化较小的工况中，速度场测量具有较高可靠性(尤其粒子密度与工质密度匹配时)，但在密度梯度较大的区域(如局部加热)，因折射率变化和流场复杂性，测量准确度显著下降，甚至出现不合理的负速度。

Du 等[65]利用 LDV 对超临界 CO_2 在非圆形通道内的传热恶化现象进行了实验研究。但是，由于示踪粒子无法均匀混合及入射激光定位不准等问题，未能有效获得流场的速度分布。该研究仅依靠可视窗的模糊阴影图像来定性反应密度梯度及流动加速现象，在不同热流密度 q 条件下拍摄到了如图 10 所示的靠近加热壁面区域的模糊阴影图像，定性地显示了传热恶化出现时的密度变化，反映了近壁区流体的加速行为。该研究暴露出了在高压环境下应用 LDV 技术所面临的严峻挑战，为后续超临界流体换热的可视化研究提供了重要参考。

激光多普勒测速法在常规流体的速度场测量中能够获得较为精准的速度场。但是，对于超临界流体，由于拟临界点附近距离剧烈变化的密度造成了示踪粒子的跟随性较差、激光定位不准确等问题，严重影响测量精度。同时，高温高压条件及实验段需集成加热、测量、光学等多个功能，使得系统技术复杂度高。因此，LDV 在超临界流体流场测量方面的应用还有待进一步攻克[65]。

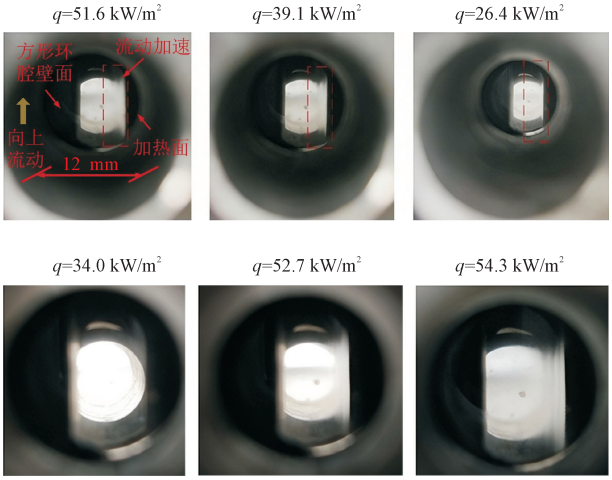


图 10 Du 等[65]获得的不同热流密度下视窗内 CO_2 图像

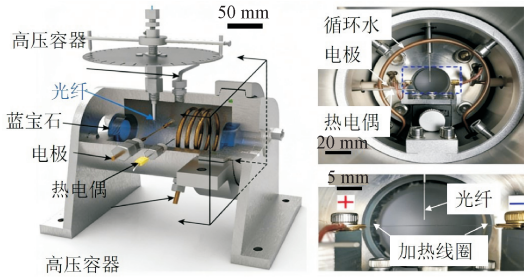
Fig. 10 CO_2 images within the viewing window under different heat flux conditions were obtained by Du et al.[65]

2.3 纹影法

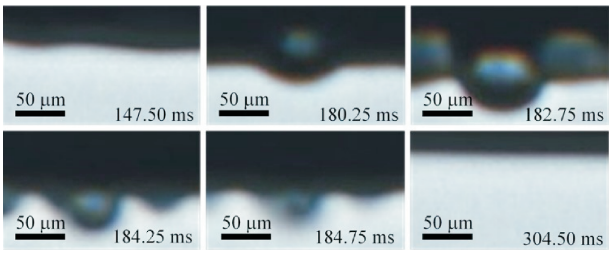
纹影法利用流体密度梯度引起的折射率变化，通过光学系统显示流动湍流结构，常用于激波、涡旋等非稳态流动现象的定性分析[89]，对于超临界流体也多用于定性测量其在临界点附近的密度波动。纹影法的空间分别率取决于视场及成像设备，采样特征为二维路径积分投影，受光线积分效应影响，定量化程度低，只能热对流、激波、密度涡等存在明显密度梯度的流场进行定性或半定量观测[90]。超临界流体由于拟临界点密度变化剧烈，浮升力作用大，存在密度梯度，使用纹影法能够定性或半定量观测其流场变化。

纹影法由于技术奠基早、成本较低，被较早用于流场可视化测量。随着技术的发展，逐步形成聚焦纹影技术、彩色纹影技术，实现对流场特定薄层平面进行成像[90]。纹影技术也被较早地应用于超临界流体换热研究，早期 Deng 等[91]采用高速摄像可视化方法，在高压石英玻璃管中观测了 RP-3 航空煤油在亚临界至超临界条件(0.107～5 MPa，300～730 K)下的流动，研究获得了 6 种典型两相流型的瞬态图像，并捕捉到临界乳光现象。

近期，部分学者利用纹影法研究类沸腾理论下的对流换热机理。Lyu 等[92]利用纹影法对超临界 CO_2 水平流动进行了局部可视化研究，在压力为 7.4 MPa 的条件下观察到了临界乳光现象，并观察到了超临界 CO_2 跨越临界点时的活塞效应，纹影图上表现为天蓝色和乳白色的快速交替，并将此归咎于超临界流体剧烈的密度涨落引起的瑞利散射。He 等[33]建立了如图 11(a)所示的高压纹影可视化实验仓，研究加热铂和镍铬丝表面的 CO_2 传热行为，采用灰度提取法对气液相界面进行量化，观察到如图 11(b)所示的与亚临界相似的气泡成核、生长与溃灭的过程。结果表明，铂丝只观测到自然对流和类蒸发模式，而镍铬丝出现了自然对流、类蒸发、类蒸发向类沸腾过渡以及类沸腾模式。



(a)可视化实验装置



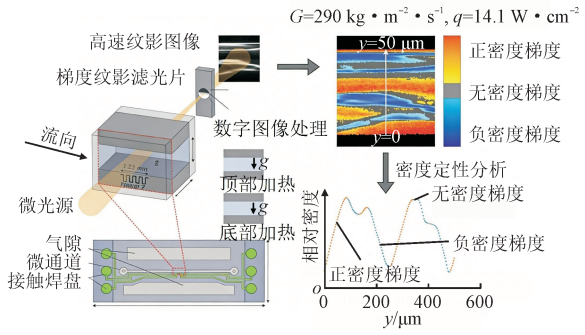
(b)类气泡结构成核、生长及溃灭过程

图 11 He 等[33]的 sCO_2 类沸腾纹影实验装置及纹影图像

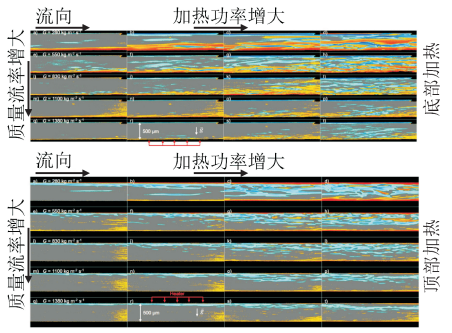
Fig. 11 Schlieren experimental apparatus for sCO_2 boiling-like phenomena and the corresponding schlieren images from He et al.[33]

Whitaker 等[66]将纹影技术应用于微通道超临界流体可视化研究。结合高速纹影成像技术，实现了对如图 12(a)所示的 500 μm 方形微通道内临界区密度梯度的侧视可视化测量。观察到非均匀密度分布、自由混合的液状与气状包体，通过如图 12(b)所示的灰度强度变化识别正负密度梯度，进而判断液/气状区域。通过这些可视化的证据，提出液状包体穿透气状边界层并接触热壁是传热增强的核心机制，而高密度类气态 sCO_2 生成速率导致气膜稳定形成则是传热性能退化的主要原因。但是，纹影图像反映的是沿光路方向的密度梯度积分，在微通道中，这种光学平均效应会导致小尺度微细结构被平滑或弱化，损失空间分辨率。

除定性测量外，纹影法也逐渐被开发出定量测量的能力。Draskic 等[67]研究了超临界压力下 CO_2 在水平矩形通道内的分层流动与传热特性。实验中采用阴影成像定性获得可视化流动中的密度梯度结构，并利用纹影图像测速(schlieren image velocimetry，SIV)法将阴影图像中的密度波动结构作为天然示踪粒子，通过互相关算法实现无示踪粒子的速度测量。同时，使用背景纹影法定量测量路径积分意义上的平均密度梯度。通过这种多模式集成的光学手段，揭示了不稳定分层通过诱发热羽流增强混合与传热、而稳定分层通过抑制垂直脉动恶化传热的物理机制。利用流体自身光学特性进行测速，可在一定程度上规避 PIV 在超临界流体中面临的播粒难、光路畸变与测量失准的固有难题，为超临界流动的可视化与量化研究提供了新思路。但是，当存在大的全局折射率梯度时，SIV 也面临折射率畸变难题，需要严格校准才能将测量结果转化为真实的物理速度，且这种基于密度起伏的光学方法在流体密度梯度不强时，缺乏足够的折射率波动，导致低估甚至无法测量流速[93]。



(a)实验段及成像原理、图像处理过程



(b)底部、顶部加热瞬时纹影图像

图 12　Whitake 等[66]建立的高速纹影可视化实验段及图像处理过程、局部加热条件下的瞬时纹影图像

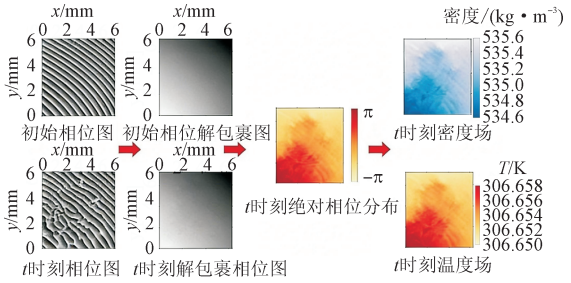
Fig. 12　High-speed schlieren visualization test section, image processing procedure, and instantaneous schlieren images under local heating conditions, after Whitake et al.[66]

总体来看，纹影法通常用于流场的定性分析，而超临界流体剧烈的密度变化使湍流涡结构成为热示踪剂，结合图像互相关算法形成的 SIV 技术，可实现速度场的定量测量。但是，该方法也面临由超临界物性本身带来的局限性：①具有强烈的路径积分效应，图像信号是沿光路密度扰动的叠加，导致测得的流速是整个通道宽度的投影，而非平面速度场；②对密度波动较为依赖，在层流或强稳定分层区域，流体密度趋于均匀，因缺乏热示踪剂而导致测量失效；③大密度梯度下易产生光学失真，近拟临界区的巨大折射率梯度会严重扭曲光线，导致图像畸变，直接削弱位移测量的准确性。

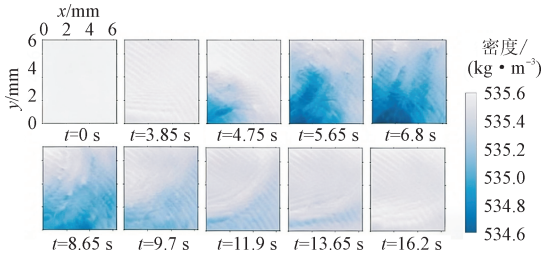
2.4　激光干涉法

激光干涉法利用激光通过流场中的流体时由于不同密度折射率不同而产生光程差，通过分析干涉光与参考光干涉条纹图，从而将温度、密度、浓度等物理量转化为可视化的定量数据[94-96]。干涉测量技术源于托马斯·杨的双缝干涉实验，并在此基础上发展出迈克尔逊干涉仪，为现代激光干涉技术奠定了基础。随着激光器的问世，干涉仪开始系统性地应用于流体力学研究，而高速相机与计算机技术的发展，则推动数字全息和相移干涉技术逐步成为主流，测量精度亦随之不断提高。干涉法的成像特征为一维路径积分采样，具有采样精度高、响应速度快等优势，能够有效捕捉流场中的细微变化[97-98]。

激光干涉法早在 20 世纪 70 年代就被应用于超临界流体密度场的测量[95]，由于干涉法对流场的流动和换热影响小，在超临界流体及近临界流体的相关研究中得到了较为广泛的应用。Deng 等[58]系统综述了利用干涉测量技术在微重力条件下对超临界/近临界流体的对流传热现象进行可视化研究的进展，重点分析了在微重力与常重力条件下，近临界流体的密度分层、热边界层演化、活塞效应及热射流等独特现象的观测结果。Chen 等[68]建立了 sCO_2 边界流的像素阵列掩模相移干涉系统，开发了如图 13 所示的定量数据处理方法，对雷诺数为 10^4 的 sCO_2 微型通道内的边界层瞬态换热过程进行了研究。实验系统采用了恒温实验室、光学平台、刚性密封等手段，保障测量过程中的精密控温和抗干扰能力。结果表明，即使在极高的主流流速下，该方法也能清晰捕捉到由底部局部脉冲加热(0.5 s 时)引发的微小扰动(密度变化约 1.0 kg/m^3，温度变化约 0.01 K)。



(a)图像处理过程



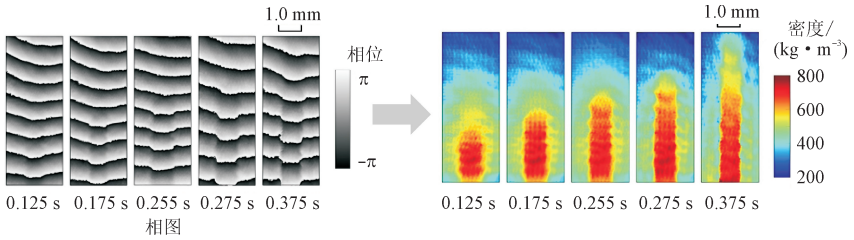
(b)不同时刻密度分布

图 13 Chen 等[68]建立的 sCO_2 像素阵列掩膜干涉图像处理过程及局部密度分布

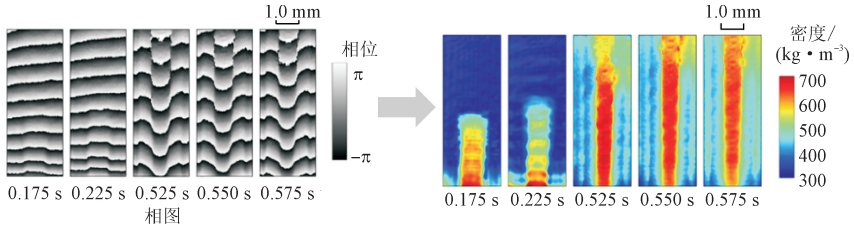
Fig. 13 Image processing procedure and local density distribution of sCO_2 pixel array mask interference established by Chen et al.[68]

Dong 等[69]设计了具有高时空分辨率的改进相移干涉系统，研究 CO_2 射流在 4 种典型热力学工况下的瞬态特性，包括：亚临界液相 CO_2 注入气相环境，亚临界液相 CO_2 射流入超临界环境，超临界射流入气相环境，类液态射流跨越伪临界线射入类气态环境。研究获得了如图 14(a)及图 14(b)所示流场密度分布，重点分析了由于表面张力消失及高密度梯度造成的独特雾化特性和扩散行为，揭示了超临界相变对射流混合机制的影响。

总体来看，干涉法适用于测量局部温度场和密度场，是研究超临界流体换热机理的有效方式之一。针对拟临界点附近小温度梯度内巨大的物性变化，干涉法具有很高的时空分辨率，能够捕捉到瞬时密度场和温度场。但是，干涉法的难度也显而易见。首先，由于近临界区流体物性对温度极其敏感，使用干涉法研究超临界流体流动换热需要建立精度达 mK 甚至 μK 级别的精密温控系统，以维持稳定的实验条件，因此一般的干涉实验都设计对应的多级控温装置[58]。其次，必须有效抑制环境振动等干扰因素，确保干涉条纹的稳定性。再者，需要通过复杂的相移技术等后处理方法，从干涉图像中精确重构密度场与温度场的三维分布。



(a)液态 CO_2 注入气态 CO_2 过程包裹相图及密度云图



(b)液态 CO_2 注入超临界 CO_2 过程包裹相图及密度云图

图 14 Dong 等[69]基于相移干涉法获得的 CO_2 的射流场密度分布

Fig. 14 Density distribution of CO_2 jet flow field obtained by phase-shifting interferometry by Dong et al.[69]

2.5 中子成像技术

中子成像技术基本原理如下：中子束穿过含氢物质样品或特定元素时，样品内部密度变化导致中子束的衰减程度不同；通过检测中子束的衰减信号，可以间接测量出样品密度的空间分布，采样特征为二维投影采样，可以分析密度场涨落的连续细微变化[99]。中子成像技术能够探测金属结构内部工质的流动或相变行为，适用于观察物质的相分布[100]。中子成像具有响应时间快、时空分辨率高等优点，适于捕捉超临界流体跨越拟临界点的密度涨落和分布情况。

中子成像技术自 20 世纪中叶起步，历经动态成

像与数字成像阶段逐步成熟，成本降低、可靠性提升，但直至近年才被用于超临界流体类沸腾机理研究[100]。Maxim 等[39]首次利用中子成像技术，在 mm 尺度上成功监测了超临界水跨越 Widom 线时从类液态快速演化到类气态时的密度突变。实验巧妙地利用多孔碳的疏水表面与类液和类气态水的不同相互作用，在空隙中分离并稳定了类液和类气区，从而延长和放大了瞬变的微小密度波动，形成了 mm 尺度上稳定存在且可被测量分辨的类液区和类气区。同时，给出了中子成像技术的图像处理流程和密度场最大密度、最小密度的计算方法，为中子成像技术在超临界流体中的探测奠定了基础。

中子成像对金属具有强穿透性，可以克服传统光学方法无法用于不透明金属装置的局限。Sugioka 等[70]利用建立了如图 15 所示的中子成像实验系统，对超临界水热合成纳米颗粒管式流动反应器内水的温度和密度分布进行了原位测量。研究中使用 3 种类型的反应器，观察反应器内 T 型管口处超临界水和常温水的混合行为，结果表明，中子照相揭示了管式流动反应器中温度和水密度的分布强烈地依赖于它们的结构。此外，使用 Fluent 数值模拟进一步解释了中子照相中的流场结构与温度分布的细节，证明了中子射线照相与 CFD 模拟的结合可为理解超临界反应器内的混合机制提供可视化与定量分析手段。

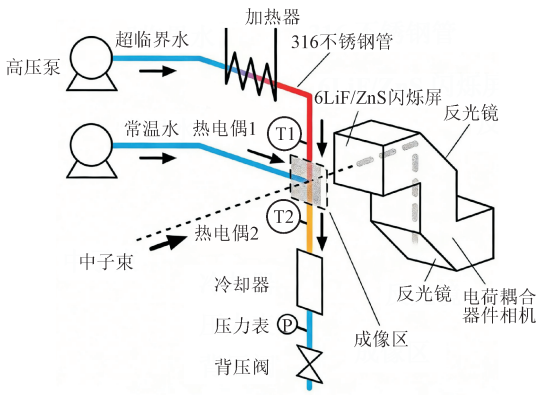


图 15　超临界水热合反应器中子成像实验系统[70]

Fig. 15　Supercritical hydrothermal synthesis reactor neutron imaging experimental system[70]

Shoji 等[101]利用中子成像技术，实现了 25 MPa、400 ℃下重油在超临界水中流动行为的原位观测。基于氢原子对热中子的高衰减特性，研究获得了反映重油分布的二维中子衰减图像。经背景信号扣除处理后，图像清晰揭示了重油在填充床内的动态扩展过程。结果发现，重油的流动形态与前缘速度均受两相流速影响，在逆流条件下，提高超临界水流速可显著抑制重油的下行速度。该工作证实，中子成像能够穿透金属壁面、准确捕捉超临界流体的复杂相行为，所得定量流动图像为验证数值模型和理解多相流动反应机制提供了可靠依据。

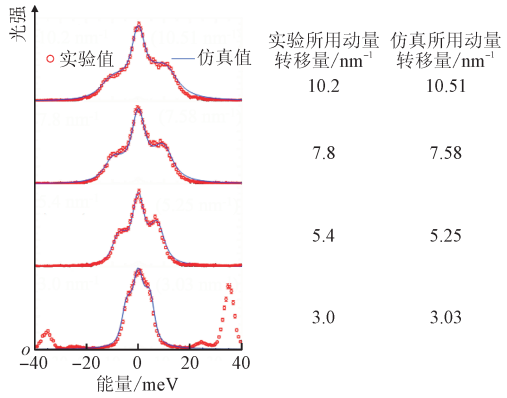
中子成像为超临界流体的原位可视化提供了独特手段，尤其在捕捉 Widom 线附近的类液-类气转变行为方面潜力显著，但其应用仍存在明显局限。一方面，空间分辨率有限：超临界流体换热中的关键区域，在高流速或高热流条件下可能薄至 μm 甚至亚 μm 尺度，中子成像往往难以分辨此类精细结构，通常只能观测到流道中心区域的平均效应。另一方面，时间分辨率不足：中子通量远低于同步辐射 X 射线，获取信噪比较高的图像常需 s 至 min 级的曝光时间，因此难以捕捉超临界流体换热中的快速瞬态过程，如类沸腾过程中气泡状结构的生成与湮灭、临界点附近由强浮力引起的流动失稳、快速热启动或功率变化等动态行为。成像结果易成为这些过程的时间平均图像，导致关键细节模糊[100]。中子成像技术正向成像能力高速化与精密化、应用对象聚焦于超临界水冷堆等新型系统、数据解析走向智能化和定量化发展，未来将更适应超临界流体复杂应用边界。

2.6　非弹性 X 射线散射技术

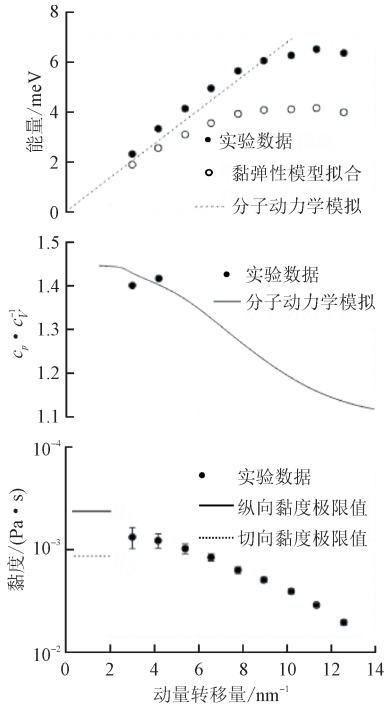
IXS 通过测量动态结构因子获取色散数据与分子动力学信息，从分子原子层面解释相变行为[71]。在流体传热领域，该技术主要用于研究微尺度传热及物性微观变化，采样特征为物质动量空间点采样，从分子或原子尺度分析分子动力学行为。随着第 4 代同步辐射和 X 射线激光技术发展，IXS 技术正向更高时空分辨率和高温高压工况等更复杂应用拓展[102]。近年来，一些研究采用 IXS 技术分析超临界流体在拟临界点附近的密度涨落及分子动力学行为，为理解其拟沸腾行为提供依据[28]。Simeoni 等[28]结合 IXS 技术与分子动力学模拟，测量了高压下超临界氩中纳米声波的传播速度。研究发现，声速随压力升高而增加，且在短波下显著高于连续介质极限的绝热声速，呈现正色散现象。该现象在跨越 Widom 线时发生显著变化，表明超临界区域可分为类气态与类液态两个具有不同动力学机制的区间。

Gorelli 等[71]将 IXS 技术与金刚石对顶砧技术

相结合，发展了一套用于高压流体太赫兹动力学研究的实验装置。通过在真空环境中最小化散射背景，该装置在 1.2 GPa、295 K 条件下成功获得了如图 16(a)所示的超临界氩的动力学结构，结果与已有实验及模拟吻合，研究进一步完成了黏弹性分析，获得了如图 16(b)所示的声波色散关系、广义热容比及纵向黏度等关键参数，为超临界流体跨越拟临界点物性变化提供了分子动力学角度解释。



(a)不同动量转移量下氩气的表征 IXS 线谱



(b)超临界氩的声波色散关系、热容比以及广义纵向黏度

图 16 Gorelli 等[71]获得的 IXS 超临界氩气动力学特征

Fig. 16 IXS supercritical argon dynamics by Gorelli et al.[71]

尽管非弹性 X 射线散射为在原子尺度上探测超临界流体的动力学提供了有效手段，然而其在实验实现与数据解析方面面临诸多挑战。一是当流体处于低密度超临界状态时，散射体数量急剧减少，导致 IXS 信号极其微弱、信噪比低下，这不仅要求超长曝光时间，更限制了该技术在气相超临界区域的应用。二是数据解析高度复杂，从原始谱中提取声速与弛豫参数需依赖基于记忆函数框架的多参数模型，可靠性受限于理论模型的完备性。三是该技术对分子动力学模拟存在强依赖性，关键参数如静态结构因子需从模拟中获取，导致其并非完全独立的观测手段[102]。

除上述综述的流场可视化技术外，还有热成像、声成像、电磁成像等流场可视化方法。热成像通过红外辐射非接触测温，能够观测具有较大温差的宏观温度场[103]，但受超临界流体高压密闭管路影响，仅能感知壁面或近壁面辐射，测量精度不足，可配合其他可视化方法作为辅助可视化技术使用。声成像技术利用声波在不同密度物质内传播速度不同，通过监测回波强度及回波时间，将三维物体映射到二维平面上，大多用于医学领域及工业无损检测领域，尚未有关于超临界流体流场测量的相关研究[104]。对于超临界流体高温高压工况，无法对流场进行单独成像，往往需要滤除实验段影响。同时，超声成像大多适用于宏观成像，从而导致超临界流场精细湍流结构无法分辨，其适用性还有待进一步考证。源于造影成像技术的电磁成像技术通过添加电磁颗粒来构建和还原三维图像，主要用于医疗、工业检测领域[105-106]，鲜有研究使用该方法分析超临界流体换热。超临界流体换热需要布撒电磁粒子或需要满足工质导电要求。若能够匹配超临界流体特殊性，针对性开发实验系统也可作为一种超临界流体流场可视化的有效手段。

综上可知，传统的流场可视化技术在超临界流体换热机理研究方面仍然具有较高精度。PIV、LDV、纹影法能够捕捉流场的精细结构，但需要克服光学折射率畸变导致粒子图像模糊、精度低等关键问题；中子成像及 IXS 技术从精度高，但实验成本昂贵，依赖于实验技术的进一步发展；干涉法能够高精度定量测量超临界流场，是未来超临界流体可视化研究的有效手段，但仍需克服高温高压条件下物性的剧烈变化带来的实验观测难度显著增加问题。通过对当前超临界流体流动换热可视化研究的综述可以发现，现有可视化技术均存在各自的局限，表 3 进一步从测量物理量、技术特点与局限性等方面对这些方法进行了系统总结。

表 3　各种可视化方法优缺点及应用于超临界流体对流换热实验的局限性

Table 3　Advantages and disadvantages of various visualization methods and their limitations in convective heat transfer experiments with supercritical fluids

可视化方法	空间分辨率	测量物理量	采样特征	适用条件	优势	用于超临界流体局限性
PIV	μm 至 mm 级	速度场	平面瞬时采样	需要示踪粒子，工质透光	可瞬时获得全场速度矢量，直观揭示涡旋、剪切等复杂流动结构	流体密度变化引起强烈折射率畸变造成测量精度下降、示踪粒子跟随性差，高压回路导致粒子难布撒
LDV	μm 级	局部速度场	单点时间序列采样	单点测速，需要示踪粒子	单点测量精度和频率响应高	密度变化造成折射率畸变造成测量误差大，示踪粒子布撒困难；激光在流场中定位困难
纹影法	mm 级	密度场、速度场	二维路径积分投影	工质透光，流场存在较大密度差异	实验成本低，定性显示密度梯度场	路径积分效应导致无法直接定量，折射率畸变造成的密度场测量失真
干涉法	μm 级	密度场、温度场	一维路径积分采样	干涉光路，实验系统抗振性高	高时空分辨率，动态响应好	光学系统极其精密，图像处理算法复杂，对环境振动和温控稳定性要求苛刻
中子成像	μm 至 mm 级	密度场	二维投影采样	需提供中子源	密度场分辨率高，原位测量	实验成本高，难以捕捉快速瞬态过程和在微尺度上分辨近壁区细节
IXS	原子或分子尺度	分子动力学行为	动量空间点采样	需同步辐射光源	可在原子或分子尺度探测动力学信息	设备昂贵，数据解析高度复杂且强烈依赖理论模型

3　总结与展望

本文系统综述了超临界流体对流换热的可视化实验进展，总结了各类方法的挑战与局限，通过对各类可视化方法在超临界流体对流换热实验研究中的局限性进行分析，主要结论如下。

(1)超临界流体在拟临界区呈现复杂的多相特征，以 Widom 线为标志的类相变行为已通过中子成像、分子动力学模拟及非弹性 X 射线散射等技术，在 mm 至分子尺度上逐步揭示。

(2)速度场测量中，PIV 与 LDV 可提供高分辨率速度场，但受超临界流体剧烈物性变化导致的折射率畸变与示踪粒子跟随性问题限制。

(3)密度场测量方面，纹影法成本低、可实现定性观测，但路径积分效应影响定量精度。干涉法具备高时空分辨率，能定量获取瞬态温度与密度场，但对环境稳定性与温控要求极高。

(4)针对密度涨落，中子成像可实现原位密度涨落测量，但其时空分辨率不足以捕捉快速瞬变过程与近壁微结构。IXS 等技术可在原子尺度探测动力学行为，但设备昂贵、信号解析复杂，尚未广泛应用。

(5)在畸变图像矫正方面，超临界流体流场具有折射率畸变复杂、变化迅速等特点，传统矫正模型效果有限。深度学习方法在此展现潜力，但仍需解决训练数据获取与模型泛化问题。

临界点附近物性的急剧变化所引起的光学干扰与测量误差，是当前超临界流体光学可视化面临的核心挑战，也是一个涉及光学、热物理、流体力学等多学科的系统性难题。为深入揭示超临界流体流动换热机理、提升定量测量能力，未来需着力于以下方向开展研究。

(1)开发先进实验硬件，研制适用于高温高压环境的稳定示踪粒子，优化其播撒与控制方法，并发展高精度、快响应的精密温控技术，以支撑复杂工况下的可靠测量。

(2)结合深度学习等先进算法，开发适用于强变

物性条件的图像畸变校正与特征提取模型，提升复杂折射率场下的测量精度与可靠性。

(3)发展多技术融合集成的测量技术，针对单一可视化技术(如纹影法、干涉法等)在超临界条件下的固有局限，探索多种光学与成像原理的有机结合，突破单一技术的测量瓶颈，实现对关键物理量更全面、更精确的探测。

(4)促进实验与数值模拟深度融合，利用高时空分辨率的实验数据，校验并优化现有湍流模型，推动可视化结果与高精度数值计算的相互验证与协同发展，形成从微观机理到宏观行为的系统性认知与预测能力。

参考文献：

[1] Xie Gongnan, Xu Xiaoxiao, Lei Xianliang, et al. Heat transfer behaviors of some supercritical fluids: a review [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(1): 290-306.

[2] 郭宇朦，李会雄，张庆，等. 倾斜上升光管上母线处超临界压力水传热关联式的建立 [J]. 西安交通大学学报，2016，50(1)：72-77.
Guo Yumeng, Li Huixiong, Zhang Qing, et al. Establishment of heat transfer correlation for the supercritical water flow near the upper generating line of an inclined upward smooth tube [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 72-77.

[3] 赵秋阳，金辉，徐加陵，等. 超临界多元热流体发生及地下原位转化开采重质油理论与技术 [J]. 西安交通大学学报，2023，57(11)：31-45.
Zhao Qiuyang, Jin Hui, Xu Jialing, et al. Theory and technology of multi-component supercritical thermal fluid generation and in-situ conversion technique for heavy crude oil resources exploitation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(11): 31-45.

[4] 刘清蕴，杨清河，卢玉涛，等. 超临界流体技术及其在重油处理中的应用 [J]. 石油炼制与化工，2025，56(11)：145-152.
Liu Qingyun, Yang Qinghe, Lu Yutao, et al. Supercritical fluid technology and its application in treatment of heavy oil [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2025, 56(11): 145-152.

[5] 尚珂怡，马晓敏，董宪姝，等. 煤炭清洁加工利用领域超临界流体萃取技术研究进展 [J]. 中南大学学报(自然科学版)，2025，56(10)：4034-4049.
Shang Keyi, Ma Xiaomin, Dong Xianshu, et al. Research progress on supercritical fluid extraction in the field of clean coal processing and utilization [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2025, 56(10): 4034-4049.

[6] 马飙，冀兆良. 二氧化碳制冷剂的应用研究现状及发展前景 [J]. 制冷，2012，31(3)：36-43.
Ma Biao, Ji Zhaoliang. The recent research and future application of refrigerant CO_2 [J]. Refrigeration, 2012, 31(3): 36-43.

[7] Ahn Y, Bae S J, Kim M, et al. Review of supercritical CO_2 power cycle technology and current status of research and development [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2015, 47(6): 647-661.

[8] Guo Jiaqi, Li Mingjia, He Yaling, et al. A systematic review of supercritical carbon dioxide(S-CO_2) power cycle for energy industries: technologies, key issues, and potential prospects [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 258: 115437.

[9] Ahn Y, Lee J I. Study of various Brayton cycle designs for small modular sodium-cooled fast reactor [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 276: 128-141.

[10] Le Moullec Y. Conceptual study of a high efficiency coal-fired power plant with CO_2 capture using a supercritical CO_2 Brayton cycle [J]. Energy, 2013, 49: 32-46.

[11] Crespi F, Gavagnin G, Sánchez D, et al. Supercritical carbon dioxide cycles for power generation: a review [J]. Applied Energy, 2017, 195: 152-183.

[12] Neises T, Turchi C. A comparison of supercritical carbon dioxide power cycle configurations with an emphasis on CSP applications [J]. Energy Procedia, 2014, 49: 1187-1196.

[13] Huang Dan, LI Wei. A brief review on the buoyancy criteria for supercritical fluids [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131: 977-987.

[14] Copping A W, Yaras M I. A critical review of the physics and modeling of deteriorated heat transfer in supercritical fluids [J]. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2020, 6(3): 031112.

[15] Wang Qingyang, Xu Jinliang, Zhang Chengrui, et al. A critical review on heat transfer of supercritical fluids [J]. Heat Transfer Engineering, 2023, 44(21/22): 1969-1994.

[16] Liao Gaoliang, Liu Lijun, E Jiaqiang, et al. Effects of technical progress on performance and application of supercritical carbon dioxide power cycle: a review [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 199: 111986.

[17] Lau K T, Ahmad S, Cheng C K, et al. Review on supercritical fluids heat transfer correlations: part I vari-

ants of fundamental dimensionless variables [J]. Heat Transfer Engineering, 2024, 45(6): 552-568.

[18] Bodkha K, Maheshwari N K. Heat transfer in supercritical fluids: a review [J]. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2021, 7(3): 030802.

[19] Liu Minyun, Liu Shenhui, Huang Yanping, et al. Pool heat transfer studies of near-critical and supercritical carbon dioxide [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 229: 125669.

[20] Kline N. An experimental study of heat transfer deterioration at supercritical pressures [D]. Ottawa, Canada: University of Ottawa, 2017.

[21] Liu Guangxu, Huang Yanping, Wang Junfeng, et al. Effect of buoyancy and flow acceleration on heat transfer of supercritical CO_2 in natural circulation loop [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 91: 640-646.

[22] Liaw K L, Kurnia J C, Sasmito A P. Enhancing supercritical carbon dioxide heat transfer in helical tube heat exchangers with twisted tape inserts: a computational investigation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 227: 125598.

[23] Zhang Gaowei, Hu Peng, Chen Longxiang, et al. Experimental and simulation investigation on heat transfer characteristics of in-tube supercritical CO_2 cooling flow [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 143: 1101-1113.

[24] Tian Ran, Wang Dabiao, Zhang Yue, et al. Experimental study of the heat transfer characteristics of supercritical pressure R134a in a horizontal tube [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 100: 49-61.

[25] Lei Xianliang, Zhang Jun, Gou Lingtong, et al. Experimental study on convection heat transfer of supercritical CO_2 in small upward channels [J]. Energy, 2019, 176: 119-130.

[26] Chang Hongliang, Han Zeran, LI Xionghui, et al. Experimental study on heat transfer performance of sCO_2 near pseudo-critical point in airfoil-fin PCHE from viewpoint of average thermal-resistance ratio [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 196: 123257.

[27] Ristić S. A view in the invisible [J]. Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 40(1): 87-119.

[28] Simeoni G G, Bryk T, Gorelli F A, et al. The Widom line as the crossover between liquid-like and gas-like behaviour in supercritical fluids [J]. Nature Physics, 2010, 6(7): 503-507.

[29] Banuti D T, Raju M, Ihme M. Between supercritical liquids and gases: reconciling dynamic and thermodynamic state transitions [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2020, 165: 104895.

[30] Banuti D T. Crossing the Widom-line: supercritical pseudo-boiling [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2015, 98: 12-16.

[31] Tripathi P M, Basu S. Insights into the dynamics of supercritical water flow using a two-phase approach [J]. Physics of Fluids, 2021, 33(4): 043304.

[32] Ha M Y, Yoon T J, Tlusty T, et al. Widom delta of supercritical gas-liquid coexistence [J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2018, 9(7): 1734-1738.

[33] He Xiaotian, Xu Jinliang, Yu Xiongjiang, et al. Distinguishing evaporation-like and boiling-like modes of pseudo-boiling in supercritical pressures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 214: 124417.

[34] Yan Chenshuai, Xu Jinliang, Wang Shuxiang, et al. Numerical study of convective heat transfer to supercritical CO_2 in vertical heated tubes [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 137: 106242.

[35] Nasuti F, Pizzarelli M. Pseudo-boiling and heat transfer deterioration while heating supercritical liquid rocket engine propellants [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2021, 168: 105066.

[36] Wang Qingyang, Ma Xiaojing, Xu Jinliang, et al. The three-regime-model for pseudo-boiling in supercritical pressure [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 181: 121875.

[37] Xu Jinliang, Wang Yan, Ma Xiaojing. Phase distribution including a bubblelike region in supercritical fluid [J]. Physical Review: E, 2021, 104(1): 014142.

[38] Zhu Shixing, Jin Hui, Ou Zhisong, et al. In-situ Raman spectral investigation into hydrogen bonding characteristics of supercritical water [J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 355: 118965.

[39] Maxim F, Contescu C, Boillat P, et al. Visualization of supercritical water pseudo-boiling at Widom line crossover [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4114.

[40] Shenoy A V. Natural convection effects on heat transfer to power-law fluids flowing under turbulent conditions in vertical pipes [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1984, 11(5): 467-476.

[41] Huang Dan, Wu Zan, Sunden B, et al. A brief review on convection heat transfer of fluids at supercritical

pressures in tubes and the recent progress [J]. Applied Energy, 2016, 162: 494-505.

[42] Wu Dingchen, Tian Ran, Wei Mingshan, et al. Characteristic stages of heat transfer for supercritical CO_2 flowing downward in a vertical tube under cooling conditions [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2024, 205: 106136.

[43] Wu Dingchen, Wei Mingshan, Tian Ran, et al. A review of flow and heat transfer characteristics of supercritical carbon dioxide under cooling conditions in energy and power systems [J]. Energies, 2022, 15(23): 8785.

[44] Tian Ran, He Shuisheng, Wei Mingshan, et al. The staged development of a horizontal pipe flow at supercritical pressure [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 168: 120841.

[45] Deng Daxiang, Zeng Long, Sun Wei. A review on flow boiling enhancement and fabrication of enhanced microchannels of microchannel heat sinks [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 175: 121332.

[46] Xu Ruina, Luo Feng, Jiang Peixue. Buoyancy effects on turbulent heat transfer of supercritical CO_2 in a vertical mini-tube based on continuous wall temperature measurements [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 110: 576-586.

[47] He Jundi, Yan Junjie, Wang Wei, et al. Effects of buoyancy and thermophysical property variations on the flow of supercritical carbon dioxide [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2020, 86: 108697.

[48] He Jundi, Tian Ran, Jiang Peixue, et al. Turbulence in a heated pipe at supercritical pressure [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2021, 920: A45.

[49] Zhu Bingguo, Xu Jinliang, Wu Xinming, et al. Supercritical "boiling" number, a new parameter to distinguish two regimes of carbon dioxide heat transfer in tubes [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 136: 254-266.

[50] 石润富，姜培学，张宇. 多孔介质中超临界压力 CO_2 对流换热的实验研究 [J]. 西安交通大学学报，2006, 40(11): 1254-1257.
Shi Runfu, Jiang Peixue, Zhang Yu. Experimental investigation on convection heat transfer of supercritical CO_2 in porous media [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(11): 1254-1257.

[51] Hsieh J C, Lin D T W, Lee B H, et al. Experimental study on heat transfer of supercritical carbon dioxide in a long silica-based porous-media tube [J]. Heat and Mass Transfer, 2017, 53(3): 995-1004.

[52] 徐铁君，姜培学，向恒，等. 竖直细圆管中超临界 CO_2 对流换热实验研究 [J]. 工程热物理学报，2004, 25(S1): 87-90.
Xu Yijun, Jiang Peixue, Xiang Heng, et al. Convection heat transfer to supercritical carbon dioxide in a vertical mini-tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(S1): 87-90.

[53] Chen Jian, Han Lincheng, Chen Hua, et al. Study on heat transfer characteristics and enhancement mechanism of supercritical carbon dioxide in adaptive channels [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 253: 123761.

[54] Cheng T C, Lir J T, Lin T F. Stationary transverse rolls and U-rolls in limiting low Reynolds number mixed convective air flow near the convective threshold in a horizontal flat duct [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(6): 1211-1227.

[55] Zhang Zhao, Qin Xudong, Yang Huaxing, et al. Research on enhanced heat transfer performance at the solid-liquid interface of diamond coatings through diamond submicron cones composite microstructures [J]. Diamond and Related Materials, 2024, 143: 110900.

[56] Xiao Runfeng, Chen Liang, Hou Yu, et al. Experimental study on heat transfer behavior and prediction of heat transfer deterioration of supercritical nitrogen in vertical tubes [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 155: 107467.

[57] Cheng Liangyuan, Xu Jinliang. Experimental investigation of non-uniform heating effect on flow and heat transfer of supercritical carbon dioxide: an application to solar parabolic trough collector [J]. Renewable Energy, 2024, 236: 121373.

[58] Deng Bili, Kanda Y, Chen Lin, et al. Visualization study of supercritical fluid convection and heat transfer in weightlessness by interferometry: a brief review [J]. Microgravity Science and Technology, 2017, 29(4): 275-295.

[59] Kazemifar F, Blois G, Kyritsis D C, et al. Quantifying the flow dynamics of supercritical CO_2-water displacement in a 2D porous micromodel using fluorescent microscopy and microscopic PIV [J]. Advances in Water Resources, 2016, 95: 352-368.

[60] Ghorpade R, Kim G, Niazi S, et al. Micro-PIV measurements near supercritical CO_2 conditions inside the channel [C]//2024 23rd IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 1-8.

[61] Valori V. Rayleigh-Bénard convection of a supercritical fluid [D]. Holland: Delft University of Technology, 2018.

[62] 吴超，李会雄，张谦. 超临界流体水平管换热特性可视化研究 [J]. 工程热物理学报，2014，35(5)：897-901.
Wu Chao, Li Huixiong, Zhang Qian. Visualization experimental investigations of the heat transfer characteristics in a horizontal tube under supercritical pressure [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(5): 897-901.

[63] Park S, Parahovnik A, Peles Y, et al. Laser-induced fluorescence thermometry of supercritical CO_2 flows inside a micro-channel [J]. Optics Letters, 2021, 46(8): 1924-1927.

[64] Rohde M. Feasibility study on laser Doppler anemometry in supercritical fluids [D]. Delft, Holland: Delft University of Technology, 2019.

[65] Du Xin, Zhu Xiaojing, Yu Xiao, et al. Heat transfer deterioration and visualized flow state of supercritical CO_2 in a vertical non-circular channel [J]. Nuclear Engineering and Design, 2022, 386: 111574.

[66] Whitaker T A, Cochran J W, Hochhalter J D, et al. Flow regimes and heat transfer mechanisms affecting supercritical transition in microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 218: 124749.

[67] Draskic M, Westerweel J, Pecnik R. The stability of stratified horizontal flows of carbon dioxide at supercritical pressures [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2025, 1012: A17.

[68] Chen Lin, Zeng Gang, Yang Dong, et al. Quantitative visualization on boundary heat transfer of supercritical CO_2 mini-channel through-flow ($Re=10^4$) via pixelated phase-shifting interferometry [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 223: 125258.

[69] Yang Dong, Chen Lin, Kanda Y, et al. Quantitative visualization of injection jet flow behaviors of transcritical and supercritical processes by pixelated phase-shifting interferometer [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2022, 139: 110729.

[70] Sugioka K I, Ozawa K, Tsukada T, et al. Neutron radiography and numerical simulation of mixing behavior in a reactor for supercritical hydrothermal synthesis [J]. AIChE Journal, 2014, 60(3): 1168-1175.

[71] Gorelli F A, Santoro M, Scopigno T, et al. Inelastic X-ray scattering from high pressure fluids in a diamond anvil cell [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(7): 074102.

[72] Bilsky A V, Gobyzov O A, Markovich D M. Evolution and recent trends of particle image velocimetry for an aerodynamic experiment: review [J]. Thermophysics and Aeromechanics, 2020, 27(1): 1-22.

[73] Poelma C. Ultrasound imaging velocimetry: a review [J]. Experiments in Fluids, 2016, 58(1): 3.

[74] Neogi A, Mohanta H K, Sande P C. Particle image velocimetry investigations on multiphase flow in fluidized beds: a review [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2023, 89: 102309.

[75] Rohacs D, Yasar O, Kale U, et al. Past and current components-based detailing of particle image velocimetry: a comprehensive review [J]. Heliyon, 2023, 9(3): e14404.

[76] Blocken B, Stathopoulos T, Van Beeck J P A J. Pedestrian-level wind conditions around buildings: review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment [J]. Building and Environment, 2016, 100: 50-81.

[77] Guven D C, Sahin T K, Erul E, et al. The association between the pan-immune-inflammation value and cancer prognosis: a systematic review and meta-analysis [J]. Cancers, 2022, 14(11): 2675.

[78] Chen Fang, Liu Hong, Yang Zifeng, et al. Tracking characteristics of tracer particles for PIV measurements in supersonic flows [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(2): 577-585.

[79] Ghorpade R, Kim G, Niazi S, et al. Micro-PIV investigation of near-critical and liquid CO_2 conditions inside a T-channel setup [C]//ASME Turbo Expo 2024: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2024: V011T28A006.

[80] Lu Haowei, Huang Feng, Jiang Peixue, et al. Exsolution effects in CO_2 huff-n-puff enhanced oil recovery: water-oil-CO_2 three phase flow visualization and measurements by micro-PIV in micromodel [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 111: 103445.

[81] Wieneke B. PIV uncertainty quantification from correlation statistics [J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(7): 074002.

[82] 白斌，王尉佐，王晔春，等. 水热条件液固两相流可视化系统 [J]. 工程热物理学报，2021，42(8)：1997-2003.
Bai Bin, Wang Weizuo, Wang Yechun, et al. Visualization system of liquid-solid two-phase flow under hydrothermal conditions [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(8): 1997-2003.

[83] Bao Xiyuan, Lithgow-Bertelloni C. Self-correction of the optical distortion effect of thermal plumes in particle image velocimetry [J]. Physics of Fluids, 2024, 36(11): 113106.

[84] Ai Jia, Chen Zuobing, Li Junjie, et al. Rethinking asymmetric image deformation with post-correction for particle image velocimetry [J]. Physics of Fluids, 2025, 37(1): 017122.

[85] Gao Zeyu, Ge Xinlan, Zhu Licheng, et al. Flow field estimation with distortion correction based on multiple input deep convolutional neural networks and Hartmann-shack wavefront sensing [J]. Photonics, 2024, 11(5): 452.

[86] 李虎, 卢鸿基, 李磊, 等. 粒子图像测速技术在多相流检测中的应用进展 [J]. 化学反应工程与工艺, 2024, 40(6): 575-581.
Li Hu, Lu Hongji, Li Lei, et al. Recent advances in the application of particle image velocimetry in multiphase flow detection [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2024, 40(6): 575-581.

[87] Rothberg S J, Allen M S, Castellini P, et al. An international review of laser Doppler vibrometry: making light work of vibration measurement [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 99: 11-22.

[88] 金光, 焦晶晶, 吴晅. 典型流场测速技术应用研究进展 [J]. 矿山机械, 2015, 43(12): 10-15.
Jin Guang, Jiao Jingjing, Wu Xuan. Research progress on application of typical flow field velocimetry technology [J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(12): 10-15.

[89] Khodaparast S, Borhani N, Tagliabue G, et al. A micro particle shadow velocimetry (μPSV) technique to measure flows in microchannels [J]. Experiments in Fluids, 2013, 54(2): 1474.

[90] 熊渊. 背景纹影测量技术研究与应用进展 [J]. 实验流体力学, 2022, 36(2): 30-48.
Xiong Yuan. Recent advances in background oriented schlieren and its applications [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2022, 36(2): 30-48.

[91] Deng Hongwu, Zhang Chunben, Xu Guoqiang, et al. Visualization experiments of a specific fuel flow through quartz-glass tubes under both sub- and supercritical conditions [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(3): 372-380.

[92] Lyu Haicai, Wang Han, Huang Yanping, et al. Visualization experiments and piston effect of heat transfer for supercritical carbon dioxide [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2023, 198: 105905.

[93] Draskic M, Bugeat B, Pecnik R. The steady behavior of the supercritical carbon dioxide natural circulation loop [J]. Energy, 2024, 294: 130735.

[94] 张美玲, 郜鹏, 温凯, 等. 同步相移数字全息综述(特邀) [J]. 光子学报, 2021, 50(7): 1-23.
Zhang Meiling, Gao Peng, Wen Kai, et al. A comprehensive review on parallel phase-shifting digital holography (invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7): 1-23.

[95] Mohammadi M, Sharp K V. Experimental techniques for bubble dynamics analysis in microchannels: a review [J]. Journal of Fluids Engineering, 2013, 135(2): 021202.

[96] Fukuda T, Awatsuji Y, Xia Peng, et al. Review of three-dimensional imaging of dynamic objects by parallel phase-shifting digital holography [J]. Optical Engineering, 2018, 57(6): 061613.

[97] 张力伟, 陈浩博, 孙文卿, 等. 移相干涉测量中的抗振技术综述 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(19): 41-51.
Zhang Liwei, Chen Haobo, Sun Wenqing, et al. Review of anti-vibration technology in phase-shifting interferometry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(19): 41-51.

[98] Park J, Kim J A, Ahn H, et al. A review of thickness measurements of thick transparent layers using optical interferometry [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, 20(3): 463-477.

[99] Moldover M R. Visual observation of the critical temperature and density: CO_2 and C_2H_4 [J]. The Journal of Chemical Physics, 1974, 61(5): 1766-1778.

[100] 梅中恺, 贺林峰, 文青龙, 等. 新型工质堆多相流动形态中子成像表征技术进展及应用 [J]. 核动力工程, 2025, 46(1): 47-62.
Mei Zhongkai, He Linfeng, Wen Qinglong, et al. Progress and application of neutron radiography characterization technology for multiphase flow pattern of new working medium reactor [J]. Nuclear Power Engineering, 2025, 46(1): 47-62.

[101] Shoji E, Kikuchi T, Yamagiwa K, et al. In-situ visualization of heavy oil behavior in supercritical water using neutron radiography [J]. Chemical Engineering Science, 2020, 225: 115816.

[102] 李冰, 丁阳, 王霖, 等. 静态高压下氢的金属化研究与非弹性 X 射线散射技术 [J]. 高压物理学报, 2021, 35(5): 1-11.
Li Bing, Ding Yang, Wang Lin, et al. Metallization of hydrogen under static high pressure and the inelastic X-ray scattering technique [J]. Chinese Journal of

High Pressure Physics，2021，35(5)：1-11.

[103]何赟泽，陈琦，王洪金，等. 激光热成像无损检测研究进展(特邀) [J]. 红外与激光工程，2024，53(7)：41-56.
He Yunze，Chen Qi，Wang Hongjin，et al. Research progress of laser thermography non-destructive testing (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering，2024，53(7)：41-56.

[104]衡佳鸣，王宁浩，董凤林，等. 基于深度学习的超声成像技术研究现状 [J]. 声学技术，2023，42(2)：174-183.
Heng Jiaming，Wang Ninghao，Dong Fenglin，et al. Research status of deep learning based ultrasonic imaging [J]. Technical Acoustics，2023，42(2)：174-183.

[105]吴玉婷. 电磁辐射调控技术及其微波成像应用研究 [D]. 杭州：浙江大学，2024.

[106]朱健健，杨文晖，魏树峰，等. 纳米磁颗粒电磁探测及成像技术研究进展 [J]. 中国生物医学工程学报，2018，37(3)：344-352.
Zhu Jianjian，Yang Wenhui，Wei Shufeng，et al. Progress of electromagnetic detection and imaging of magnetic nanoparticles [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering，2018，37(3)：344-352.

（编辑　陶晴）