

# 超临界流体传热特性研究综述

王英杰

中航发动机控股有限责任公司,北京 100028

**摘要** 超临界状态下流体状态介于液态和气态之间,其扩散性更接近气体,密度依然为液体量级,这种特殊的性质导致超临界压力下流体流动换热特性与亚临界压力下有很大不同。本文以超临界压力条件下水、二氧化碳和碳氢燃料为研究对象,综合分析了超临界流体在管内的换热规律,系统总结了浮升力、热流密度、质量流速、压力、进口温度、流道形状等因素对流动换热特性的影响。其中,浮升力、热流密度和质量流速影响作用较大,在较高热流密度条件下,浮升力会导致传热恶化发生;在较低热流密度下,流体临界点附近会发生传热强化;质量流速增加能够使管内换热效果显著增强。传热强化和传热恶化现象的发生与临界点附近流体物性的剧烈变化密切相关。

**关键词** 超临界流体;流动;传热;热流密度;传热恶化

**中图分类号** V231.1

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.33.013

## Review on Supercritical Fluid Heat Transfer Characteristics

WANG Yingjie

China Aircraft Engine Holdings Ltd., Beijing 100028, China

**Abstract** The fluid state in supercritical conditions is between liquid and gas. Its diffusivity is close to gas while the density level is equal to liquid. Such special characteristics lead to a different pattern in heat transfer under supercritical pressure conditions compared to subcritical pressure situations. According to the heat transfer properties of water, carbon dioxide as well as carbon and hydrogen fuels under supercritical conditions, this paper gives an analysis on supercritical fluid heat transfer characteristics, and summaries the influences of the physical factors (buoyancy, heat flow density, mass flow, pressure and inlet temperature) on fluid heat transfer properties, in which the buoyancy, heat flow density and mass flow are dominant factors. This paper also makes a comprehensive analysis of supercritical fluid heat transfer patterns inside the tube. The enhancement and deterioration of heat transfer is closely concerned with the changes of supercritical fluid physical properties.

**Keywords** supercritical fluid; flow; heat transfer; heat flow density; heat transfer deterioration

### 0 引言

自 1869 年 Thomas Andrew 首次发现临界现象以来<sup>[1]</sup>,超临界流体技术应用已经涉及化学化工、石油、环保、食品、生物技术、能源、分析等诸多领域,其中超临界流体传热特性一直是能源领域的研究重点之一。20 世纪 60 年代以来,国内外学者们以水为研究对象,对超临界压力下流体的传热规律进行了大量的研究,开发出以超临界压力锅炉发电机组和核反应堆为背景的超高热流密度换热技术<sup>[2-6]</sup>,可使传热效率提高

45%—50%。20 世纪 90 年代,出于环保考虑,超临界 CO<sub>2</sub> 在空调制冷中重新受到重视,被用来作为制冷剂替代氟里昂<sup>[7]</sup>,其在车载系统中的应用一定程度上减少了污染物对大气层的破坏。近些年来,随着航空燃料技术的发展及对高性能动力的需求,超临界碳氢燃料技术开始在航空航天领域内得到应用<sup>[8]</sup>,利用其吸热能力进行冷却以提升先进动力装置的性能。超临界流体换热技术的研究与应用,对促进中国能源、汽车和航空航天等领域关键技术的进步有着非常重要的作用。

收稿日期:2012-09-03;修回日期:2012-10-19

作者简介:王英杰,博士,研究方向为超临界流体换热,电子信箱:iampal@163.com

# 1 超临界流体特性

## 1.1 物质状态

物质有固相、液相和气相 3 种基本相态,它们会随温度和压力的改变而相互转变。气相与液相之间的转化,称之为气液相变,包括沸腾、蒸发和凝结。当工质的压力升高至某一特定值时,对液相工质持续加热时气液相变过程消失,液相工质在一瞬间发生“汽化”,此时对应工质压力被称为临界压力 (Critical Pressure,  $P_c$ ), 温度称之为临界温度 (Critical Temperature,  $T_c$ )。临界温度和临界压力对应的点称为临界点 (Critical Point)。工质的临界点表现为饱和液相线与饱和气相曲线的交点,如图 1 所示。

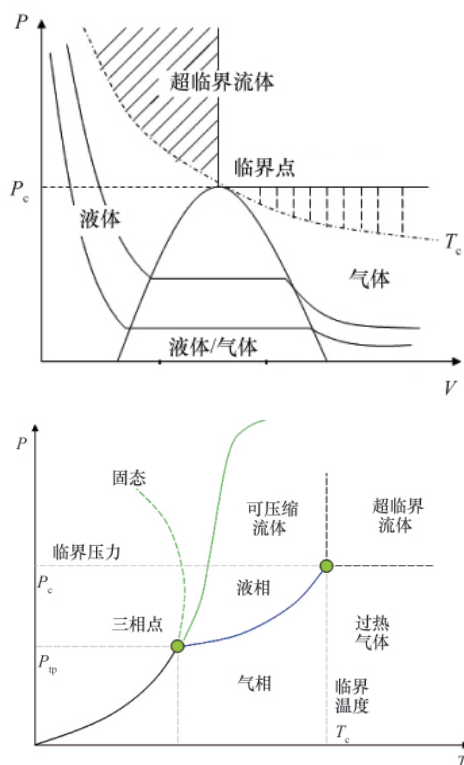


图 1 流体气液两相  $P-V$ 和  $P-T$ 图  
Fig. 1  $P-V$  and  $P-T$  relations of the fluid

## 1.2 超临界流体

当物质的温度和压力均高于临界温度和临界压力时,其所处状态称之为超临界状态,对应的流体称之为超临界流体 (Supercritical Fluid, SCF)。在临界点 ( $P_c, T_c$ )附近,流体密度剧

烈变化,黏度和导热系数迅速减小,定压比热突增趋于无穷大<sup>[2]</sup>,如图 2<sup>[2]</sup>所示。当压力高于临界压力时 ( $P > P_c$ ),工质比热容呈现出一峰值区域,峰值顶点对应的温度定义为拟临界温度。在拟临界温度附近,物性变化同样显著,如图 3 所示。但当压力远高于临界压力时,流体比热及其他物性无明显突变,拟临界点不明显甚至消失。

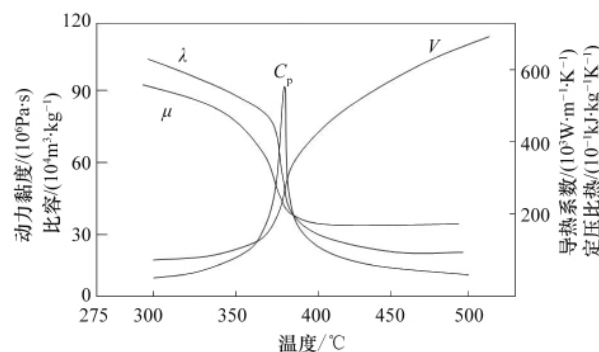


图 2  $P$  为 26MPa 时水的物性与温度关系  
Fig. 2 Water properties vs temperature  $P$ =at 26MPa

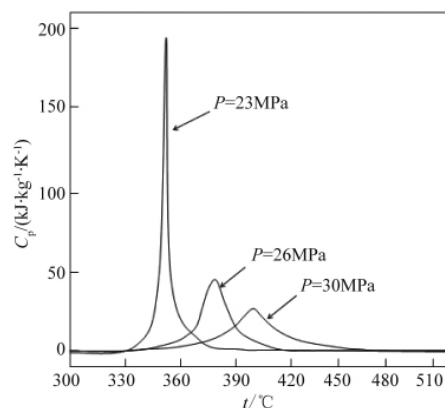


图 3 压力对超临界压力水的比热的影响  
Fig. 3 Water  $C_p$  at supercritical pressures

超临界流体非常特殊,它既不同于液体也不同于气体,是一种处于两者之间的特殊的状态—超临界状态。超临界流体其界面张力为零,具有近似液体量级的密度,同时又具有与气体接近的扩散能力。其密度高于气体,接近液体;黏度与气体相近,比液体小;扩散系数接近气体,约为液体的 10—100 倍,具有良好的流动性和传输特性,具体数值比较见表 1<sup>[9]</sup>。

表 1 气体、液体和超临界流体的性质比较

Table 1 Properties comparison among gas, liquid and supercritical fluid

性质	气体	超临界流体		液体
	101.325kPa, 15—30°C	$T_c, P_c$	$T_c, 4P_c$	15—30°C
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	0.6—2.0	$(0.2—0.5)\times 10^3$	$(0.4—0.9)\times 10^3$	$(0.6—1.6)\times 10^3$
黏度 $\eta/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$	$(1—3)\times 10^{-5}$	$(1—3)\times 10^{-5}$	$(3—9)\times 10^{-5}$	$(0.2—0.3)\times 10^{-3}$
扩散系数 $D/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$(0.1—0.4)\times 10^{-5}$	$0.7\times 10^{-7}$	$0.2\times 10^{-5}$	$(0.2—3.0)\times 10^{-9}$

## 2 超临界流动换热特性

### 2.1 超临界传热机制

与亚临界压力下完全不同,流体在超临界压力下加热时不发生相变。换言之,气相和液相分界面消失,工质不再历经液态→气液共存区→气态这一相变过程,而是在一瞬间由液体状态转变为超临界状态,同时物性发生急剧变化。

在这种情况下,通用的传热经验关系式和亚临界压力下沸腾理论不能完全描述超临界压力下流体的传热过程。因此,学者们将这一领域内的传热问题分成两个区域分别进行研究。一是低于临界压力点的区域,认为此区域是沸腾传热和对流传热的相结合<sup>[10-11]</sup>,可用传统的换热理论进行解释;二是高于临界压力点的区域,多数研究者将此区域内的传热问题看作是自然对流和强制对流换热相结合的过程,认为超临界压力流体表现出的特殊规律是由于临界点/拟临界点附近物性剧烈变化引起的,可使用变物性湍流模型对相关过程进行描述<sup>[1]</sup>。也有许多学者持另外一种观点,他们认为高于临界压力区域的流体传热过程是一个与亚临界压力下沸腾传热类似的过程,并称其为“似沸腾”或者“拟沸腾”<sup>[12]</sup>。第二种观点的依据是在实验中观察到近临界区有伴随尖啸的传热强化发生<sup>[13]</sup>,在加热壁面附近有泡状结构出现<sup>[14]</sup>;而对于高热流密度下的传热恶化,认为是加热壁面被一层密度相对平均密度低很多的流体层所覆盖,类似亚临界压力下的“拟膜态沸腾”<sup>[15]</sup>。

### 2.2 浮升力

1971年Hall指出,浮升力对管内流体在超临界压力区的流动换热有很重要的影响<sup>[16]</sup>。在临界/拟临界区域流体物性变化十分剧烈,浮升力不可忽略,它的存在能够对换热管流动产生重大影响。1964年,在较高热流密度条件下,Wood和Smith<sup>[17]</sup>对近临界区CO<sub>2</sub>在垂直上升管中的温度和速度分布进行了实验测量,发现在流体平均温度接近临界温度时管内流体速度分布呈M型。2008年,同样的现象在张宇<sup>[18]</sup>数值模拟中得到证实,他在较低进口雷诺数及较高热流密度条件下,对圆管中超临界CO<sub>2</sub>对流换热进行研究,也发现管内流体径向速度呈M型分布。这种特殊的流动机制,必然会引起管内换热机制变化。2008年,Kim<sup>[19]</sup>研究了超临界压力CO<sub>2</sub>在垂直上升光管中的对流换热,发现热流密度较大时会发生明显的传热恶化,并认为传热恶化是由浮升力引起湍流层流化导致的。湍流层流化可通过McEligot<sup>[20]</sup>于1970年提出热加速因子 $K_v$ 判定,他指出,当 $K_v \geq 3 \times 10^{-6}$ 可认为再层流化。

然而并非在所有工况下,浮升力都会对换热产生显著影响。Yamagata<sup>[21]</sup>和Bourke<sup>[22]</sup>分别在超临界水和CO<sub>2</sub>的实验中发现,在低热流密度条件下竖直向上和向下流动对流动换热影响并不大,浮升力的作用不明显;Shiralkar<sup>[23]</sup>也在针对超临界CO<sub>2</sub>的低流速换热实验中得到类似结论。Watts和周强泰<sup>[24]</sup>提出,使用修正的无量纲数 $Gr_f/(Re^{2.7} \cdot Pr^{0.5})$ 衡量浮升力的作用,其中 $Gr$ 为格拉晓夫数, $Re$ 为雷诺数, $Pr$ 为普朗特数,下标

$f$ 表示基于工质质量平均。当 $Gr_f/(Re^{2.7} \cdot Pr^{0.5}) < 10^{-5}$ 时,认为浮升力影响微弱。Ikryannikov<sup>[25]</sup>认为,当浮升力达到和惯性力相当量级时,其作用才会凸显出来,并给出浮升力作用起始点表达式: $Gr/Re^2 \approx 5\xi$ ,其中 $\xi$ 为摩擦压降因子。McEligot和Jackson<sup>[26]</sup>提出,在给定热流密度下,可使用 $Gr^* = g\beta q_w D_b^4 / \lambda v^2$ 表征浮升力的影响,并给出计算圆管内对流换热显著浮升力作用起始点的判断式 $B_o^* = Gr^* / Re^{3.425} Pr^{0.8} \geq 6 \times 10^{-7}$ 。其中, $g$ 为重力加速度, $\beta$ 为体积膨胀系数, $q_w$ 为壁面热流密度, $D_b$ 为水力直径, $\lambda$ 为导热系数, $B_o$ 为浮力数。

### 2.3 热流密度

热流密度是影响超临界流体换热的另外一个重要因素。1965年,Swenson<sup>[27]</sup>在超临界水在垂直上升圆管中的传热实验研究中发现,当热流密度较低时,换热系数在拟临界点附近增强,管内传热强化;当热流密度较大时,在拟临界点附近换热系数有所降低,管内出现传热恶化。相似的结论也在Yamagata(1972)<sup>[21]</sup>和姜培学(2004)<sup>[28]</sup>的研究结果中被提及。传热恶化的原因通常被认为是:在高热流密度下流体拟临界点附近物性变化十分剧烈,出现了类似亚临界压力下的膜态沸腾(称为拟膜态沸腾)。物性变化剧烈,导致近壁处与主流区域流体传热特性的巨大差异。由于温度相对较高,在近壁处形成了密度相对较小、导热性相对较差的一层“薄膜”。这种“薄膜”与亚临界压力下气膜不同,它同主流区域的流体在性质上是均一的,只是物性参数的大小有很大差异。

Yamagata<sup>[21]</sup>和Krasnoshchekov<sup>[15]</sup>认为,热流密度和质量流速的相对大小决定了传热恶化的出现。Yamagata给出了22.6—29.7MPa下传热恶化发生的临界热流计算公式 $q_c = 0.20G^{1.2}$ ,其中 $G$ 为质量流速。Krasnoshchekov同时提到在相对较小热流密度和较大质量流速下,管壁温度随主流温度的上升单调增加,管内换热系数在管长方向上变化不大;而在相对较大热流密度和较小质量流速下,换热系数会在主流温度接近拟临界点时出现最小值。Kim(2005)<sup>[29]</sup>在其研究中得到与Yamagata不一致的结论,他发现即使保持压力与 $q/G$ 不变( $q$ 为热流密度),等比例增大质量流速与热流密度,传热恶化也会发生,但在高流速条件下传热恶化的强度大为减弱。

### 2.4 质量流速

在亚临界压力下单相工质的对流换热中,质量流速增加可以显著降低边界层厚度,增大管内流动的湍流程度,增强管内换热效果。超临界压力流体的传热同样遵从这一规律。

Swenson<sup>[27]</sup>在管径和压力不变的前提下改变质量流速542.4—2149kg/(m<sup>2</sup>·s),研究发现管内对流换热系数与 $Re^{0.923}$ 呈正比。姜培学<sup>[28]</sup>使用内径为0.948mm的垂直上升管研究超临界二氧化碳的换热规律,研究发现质量流速增加并不总是能够增大换热系数,管内换热效果还要受到热流密度、进口压力等其他因素的综合影响。正因为质量流速通常并不是一个独立的参数,在实验过程它通常热流密度密切相关,因此很多学者将两者统一起来讨论<sup>[21,29]</sup>,将热流密度和质量

流速的比值作为判断传热恶化是否会发生的依据。

## 2.5 压力

在临界/拟临界区域流体物性变化剧烈,压力和温度的微小变动会导致物性的巨大差异,而物性的变化又会对管内工质的流动状态及换热状况产生很大影响,因此压力的大小对工质在管内的换热情况也有显著影响。压力的影响程度与其同临界压力的相对大小有很大关系。在较低热流密度条件下管内工质换热得到强化,压力越接近临界压力,换热强化的幅度越大<sup>[21]</sup>;而在高热密度下出现的换热恶化,压力越高越远离临界压力,恶化程度越来越弱<sup>[23,27]</sup>。Brouke 研究发现,流速、热流密度、入口焓值对换热的影响随压力的增加而减弱<sup>[30-31]</sup>,他认为当压力超过 1.5 倍临界压力时,这些影响便不再重要。孙丹以超临界水为研究对象<sup>[19]</sup>,更是指出:当压力比临界压力足够高时,水的传热是单相对流换热;当压力足够低时,是简单的沸腾换热;而在近临界区 ( $0.98 < P/P_c < 1$ ),为沸腾换热与对流换热相结合的综合过程。

压力对换热的影响是通过其对物性的影响而实现的,但物性的变化只在近临界区域才非常明显,因此压力在近临界压力区域对换热有明显作用,而在远离临界压力区的位置效果不明显。

## 2.6 进口温度

Shiralkar 研究发现<sup>[23]</sup>,入口温度对超临界压力  $\text{CO}_2$  管内对流换热有明显影响,在一定范围内,入口温度越低,发生的传热恶化越严重。Petuhov 的研究也支持了此种观点<sup>[4]</sup>,并同时指出,当入口温度远高于拟临界温度时,也有可能发生局部传热恶化。姜培学<sup>[28,32]</sup>针对超临界压力下  $\text{CO}_2$  进口温度的影响进行研究,当进口温度低于拟临界温度时,进口温度对换热影响不大;而当进口温度高于拟临界温度时,进口温度对换热的影响增强;入口温度的影响同其与临界温度的相对大小有关。

## 2.7 碳氢燃料

碳氢燃料在超临界压力下流动换热,与纯物质相比既有相似之处又有其自身的复杂性。与  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  等纯物质相同,超临界压力碳氢燃料在低热流密度条件下,均会在拟临界点处发生传热强化<sup>[33-35]</sup>;在较高热流密度下则发生传热恶化<sup>[33,35-39]</sup>。不同之处在于,在极高热流密度下,碳氢燃料温度升高导致热裂解反应的发生,可吸收大量热量<sup>[37]</sup>,导致管内出现二次传热强化<sup>[33,35]</sup>。

在高热流密度下,许多学者在研究中观测到压力和温度的脉动<sup>[38-40]</sup>。这些脉动发生的条件几乎完全相同,均是在壁面温度高于拟临界温度、主流温度低于拟临界温度时发生,压力一般不超过 1.5 倍临界压力。John<sup>[41]</sup>认为,超临界流体压力和温度脉动与亚临界条件沸腾不稳定性十分相似,都是由于物性剧烈变化引起的,只有在高热流密度条件下才会发生。正因为如此,大多数学者认为该脉动是拟核态沸腾时壁面处泡状结构破裂引起的<sup>[40,42]</sup>。按照该机制,超临界压力下  $\text{H}_2\text{O}$  和

$\text{CO}_2$  等纯物质在临界/拟临界区也会出现脉动,但是这一方面的研究却鲜有报道。因此超临界压力下碳氢燃料压力和温度脉动的形成机制,还需要进一步证实和深入研究。

## 2.8 超临界传热经验关系式

在实验的基础上,许多学者提出了超临界压力下流体的传热经验关系式<sup>[21,27,43-44]</sup>。这些关系式大都建立在单项强制对流传热机制的基础上,一般采用努谢尔特数、雷诺数、普朗特数及其他物性参数来拟合实验数据,采用流体温度、壁面温度或者膜温度作为定性温度。

Dickson<sup>[45]</sup>使用 Dittus-Boelter 关系式计算换热系数并与实测值进行对比,结果显示在低于拟临界点区域该关系式与实验测量值接近,而当主流温度接近拟临界温度时计算结果误差较大。Krasnoshchekov<sup>[45]</sup>认为,在无量纲关联式中引入截面物性变化修正因子  $\rho_w/\rho_b$  和  $\bar{C}_p/C_{pb}$  可以更好地拟合实验数据。Kim(2007)<sup>[46]</sup>在 Dittus-Boelter 公式中引入  $\rho_w/\rho_b$  和  $\bar{C}_p/C_{pb}$  等物性修正项,获得了更高的精度。除了 Dittus-Boelter,许多学者根据实验获得的数据,拟合出各种形式的经验关系式,但有些关系式计算结果差别很大,主要是由于实验条件、实验对象、物性处理方法不同以及热负荷和浮升力的综合影响所致。

对比上述文献中提出的经验公式,虽然在形式上千差万别,但总体来看可分为 3 种类型:第 1 种类型是 Dittus-Boelter 形式,引入了物性变化对换热的影响;第 2 种为 Petukhov 公式,在形式上与格林尼斯基公式十分相似;第 3 种类型 Watt-Chou 公式,考虑了浮升力和流体热加速等对换热的影响。3 种类型的公式分别为

$$Nu = A Re^{c_1} Pr^{c_2} \left( \frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{c_3} \left( \frac{\bar{C}_p}{C_{pb}} \right)^{c_4} \left( \frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{c_5} \left( \frac{\lambda_w}{\lambda_b} \right)^{c_6} \quad (1)$$

$$Nu = \frac{(f/8) Re Pr}{1 + 900/Re + 12.7(f/8)^{1/2} (Pr^{23} - 1)} \quad (2)$$

$$Nu = A Re_c \bar{Pr}_c^8 \left( \frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{c_9} f [\bar{G} r_f / (Re_b^{0.5} \bar{Pr}_b^{0.5})] \quad (3)$$

其中,  $Nu$  为努塞尔数,  $\rho$  为密度,  $f$  为阻力系数, 下标  $b$  为流体, 下标  $w$  为壁面,  $c_1 \sim c_9$  为拟合指数。

## 3 结论

从文献资料看,超临界流体传热规律在很大程度上可归结为由流体在临界点/拟临界点附近物性剧烈变化引起,不同工况下物性变化剧烈程度造成了传热强化和传热恶化的产生。热流密度、质量流速、进口温度、压力和浮升力均为超临界流体换热的重要影响因素,其中热流密度和质量流速影响较大。同时,缺乏通用性较好的经验关系式,不能对超临界压力下流体传热问题进行精确的数学描述。在传热强化、传热恶化及脉动机制方面尚存在不同观点。未来应进一步加强超临界流体换热基础性实验,深入研究超临界流体传热机制,为超临界技术广泛应用打下基础。

## 参考文献 (References)

- [1] Thomos A. On the properties of matter in gaseous and liquid state under various conditions of temperature and pressure[C]. London: Philosophical Transactions of the Royal Society, 1869, 178: 45-48.
- [2] 陈听宽. 两相流与传热研究[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.  
Chen Tingkuan, Study on two-phase flow and heat transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004.
- [3] Dimitrov D, Zahariiev A, Kovachev V. Forced convective heat transfer to supercritical nitrogen in a vertical tube [J]. *Int J Heat Fluid Flow*, 1989, 10(3): 278-280.
- [4] Petukhov B S. Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties [M]//Advances in Heat Transfer. New York: Academic Press, 1970, 6: 503-564.
- [5] Krasnoshechekov E A, Protopopov V S. Experimental study of heat exchange in carbon dioxide in the supercritical range at high temperature drops[J]. *Teplofizika Vysokikh Temperature*, 1996, 4(3): 389-398.
- [6] 唐宇. 美国超临界水堆的概念设计与研究[J]. 国外核动力, 2004, 25(2): 7-18.  
Tang Yu. *Foreign Nuclear Power*, 2004, 25(2): 7-18.
- [7] Lorentzen G. The use of natural refrigerants: A complete solution to the CFC/HCFC predicament[J]. *Int J Refrig*, 1995, 18(3): 190-197.
- [8] Bruening G B, Chang W S. Cooled cooling air systems for turbine thermal management [R]. ASME Paper 99-GT-14, New York, NY: ASME, 1999: 1-7.
- [9] Lee M L, Markides K E. Chromatography with supercritical fluids[J]. *Science*, 1987, 235(4794): 1342-1357.
- [10] Iwabuchi M, Taleiwa M, Haneda H. Heat transfer characteristics of rifled tubes in the near critical pressure region [C]//Grigull U, Hahne E, Stephan K S. *et al.* Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, Washington DC: Hemisphere Pub, 1982, 5: 313-318.
- [11] Hall W B. Heat transfer near the critical point [J]. *Adv Heat Transfer*, 1971, 7: 1-83.
- [12] Hahne E, Neumann R. Boiling-like phenomena in free-convection heat-transfer at supercritical pressures [J]. *Wärme- und Stoffübertragung*, 1981, 15: 171-180.
- [13] Goldmann K. Special heat transfer phenomena for supercritical fluids [R]. Report NDA-2-31, White Plains, NY Nuclear Development Corporation of America, 1956.
- [14] Hahne E, Feurstein G, Grigull U. Free convective heat transfer in the supercritical region [C]//Heat Transfer 1974: Proceedings of Fifth International Conference, Tokyo: Society of Heat Transfer of Japan, 1974, 3: 5-9.
- [15] 孙丹, 陈听宽. 垂直上升光管内临界压力区水的传热特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(1): 10-14.  
Sun Dan, Chen Tingkuan. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2001, 35(1): 10-14.
- [16] Hall W. Heat transfer near the critical point [J]. *Advance in Heat Transfer*, 1971, 7: 1-86.
- [17] Wood R D, Smith J M. Heat transfer in the critical region temperature and velocity profiles in turbulent flow [J]. *AICHE Journal*, 1964, 10(2): 180-186.
- [18] 张宇, 姜培学, 石润富, 等. 竖直圆管中超临界压力 CO<sub>2</sub> 在低 Re 下对流换热研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(1): 118-120.  
Zhang Yu, Jiang Peixue, Shi Runfu, *et al.* *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(1): 118-120.
- [19] Kim H, Kim H Y, Song J H, *et al.* Heat transfer to supercritical pressure carbon dioxide flowing upward through tubes and a narrow annulus passage[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2008, 50: 518-525.
- [20] McEligot D M, Coon C W, Perkins H C. Relaminarization in tubes[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1970, 13: 431-433.
- [21] Yamagata K. Forced convective heat transfer to supercritical water flowing in tubes[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1972, 15: 2575-2593.
- [22] Bourke P J. Forced convective heat transfer to turbulent CO<sub>2</sub> in the supercritical region[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1970, 13: 1339-1348.
- [23] Shiralkar B, Griffith P. The effect of Swirl, Inlet Conditions, flow direction and tube diameter on the heat transfer to fluids at supercritical pressure [J]. *Journal of Heat Transfer, Transactions of the ASME*, 1970, 7: 465-474.
- [24] 周强泰. 浮力对立式管中超临界压力水的传热的影响 [J]. 工程热物理学报, 1983, 4(2): 5-8.  
Zhou Qiangtai. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1983, 4(2): 5-8.
- [25] Ikryannikov N P, Petukhov B S. Calculation of heat transfer in the single-phase near-critical region in the case of a viscosity-inertia-gravity flow [J]. *Institute of High Temperature Academy of Sciences of USSR, Teplofizika Vysokikh Temperature*, 1973, 11(5): 1068-1075.
- [26] McEligot D M, Jackson J D. "Deterioration" criteria for convective heat transfer in gas flow through non-circular Ducts[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2004, 232: 327-333.
- [27] Swenson H S, Carver J R, Kakarala C R. Heat transfer to supercritical water in smooth-bore tubes [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1965, 4: 477-483.
- [28] Jiang P X, Xu Y J. Experimental investigation of convection heat transfer of CO<sub>2</sub> at super-critical pressures in vertical mini-tubes and in porous media[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24: 1255-1270.
- [29] Kim H Y, Kim H, Song J H. Heat transfer test in a tube using CO<sub>2</sub> at supercritical pressures [C]//Proceedings of the 7th International Conference GLOBAL 2005. Tokyo: Atomic Energy Society of Japan, 2005: 103.
- [30] Bourke P J, Pulling D J, Gill L E, *et al.* Forced convective heat transfer to turbulent CO<sub>2</sub> in the supercritical region[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1970, 13(8): 1339-1348.
- [31] Bourke P J, Pulling D J. An experimental explanation of deterioration in heat transfer to supercritical carbon dioxide [R]. Report Atomic Energy Research Establishment AERE-R6765, Chemical Engineering Division, United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA) Research Group, Harwell: Atomic Energy Research Establishment 1971: 12.
- [32] Jiang P X, Zhang Y, Shi R F. Experimental and numerical investigation of convection heat transfer of CO<sub>2</sub> at supercritical pressures in a vertical mini-tube[J]. *Heat Mass Transfer*, 2007, 9: 008.
- [33] 胡志宏. 高热流条件下超临界压力煤油流过小直径管的传热特性[J]. 化工学报, 2002, 53(2): 134-138.  
Hu Zhihong. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2002, 53(2): 134-138.
- [34] Isaev G I, Arabova I T. Heat exchange in organic fluids at supercritical pressure[J]. *Heat Transfer Soviet Research*, 1993, 25(2): 175-178.
- [35] 胡志宏, 陈听宽, 罗毓珊, 等. 超临界压力下煤油传热特性试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(9): 62-70.  
Hu Zhihong, Chen Tingkuan, Luo Yushan, *et al.* *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1999, 33(9): 62-70.

- [36] Ianovski L, Sapgir G. Heat and mass transfer to hydrocarbon fuels at thermal decomposition in channels of engines[R]. AIAA 96-2683, Lake Buena Vista: AIAA, 1996.
- [37] Huang H, Spadaccini L J, Sobel D R. Fuel-cooled thermal management for advanced aeroengines [J]. *Journal of Engineering Gas Turbines and Power*, 2004, 126: 284-293.
- [38] Brad H, Michael K. Experimental investigation of heat transfer and flow instabilities in supercritical fuels [R]. AIAA 1997-3403, Lake Buena Vista: AIAA, 1997.
- [39] Hines W S, Wolf H. Pressure oscillations associated with heat transfer to hydrocarbon fluid at supercritical pressures and temperatures [J]. *American Rocket Society Journal*, 1962, 32(3): 361-366.
- [40] Edwards T. USAF supercritical hydrocarbon fuels interests [R]. AIAA 93-0807, Lake Buena Vista: AIAA, 1993.
- [41] Krieger J R, Chen L D. Measurement of heat transfer to near-critical fluids[R]. AIAA 1997-3044, Lake Buena Vista: AIAA, 1997.
- [42] Goldmann K. Heat transfer to supercritical water at 5000 psi flowing at high mass flow rates through round tubes[C]//International Developments in Heat Transfer. New York, NY: ASME, 1961: 561-568.
- [43] Griem H. A new procedure for the prediction of forced convection heat transfer at near and supercritical pressure [J]. *Heat and Mass Transfer*, 1996, 31: 301-305.
- [44] 徐峰. 超临界压力下水在管内流动与传热特性研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2004.  
Xu Feng. Experimental investigation to the heat transfer characteristics of water in pipes under supercritical pressures[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2004.
- [45] Dickson N L, Welch C P. Heat transfer to supercritical water [C]. ASME-AIChE Conference, 1957: 11-15.
- [46] Kim J K, Jeon H K, Lee J S. Wall temperature measurement and heat transfer correlation of turbulent supercritical carbon dioxide flow in vertical circular/non-circular tubes[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2007, 237: 1795-1802.

(责任编辑 马宇红,朱宇)

· 学术动态 ·

## “中国力学大会 -2013”征文



中国力学大会是中国力学界每两年一次的综合性学术盛会,是广大力学科技工作者学术交流的重要平台。“中国力学大会-2013”将于2013年8月21日在西安举行。会议由中国力学学会、西安交通大学联合主办,现征集相关学术论文。

联系电话:010-82543903,62559209。

电子邮箱:liuyang@cstam.org.cn。

大会网站:[www.cstam.org.cn/templates/lxxh\\_1/index.aspx?nodeid=94&page=ContentPage&contentid=171131](http://www.cstam.org.cn/templates/lxxh_1/index.aspx?nodeid=94&page=ContentPage&contentid=171131)。

· 学术动态 ·

## “第五届中国石油地质年会”征文

中国石油学会石油地质专业委员会、中国地质学会石油地质专业委员会,拟于2013年5月28日在北京联合召开“第五届中国石油地质年会”。

征稿范围:(1)非常规油气地质理论与勘探开发技术;(2)中国陆相盆地油气地质理论与勘探技术进展;(3)中国海相油气地质理论与勘探技术进展;(4)中国海域油气地质理论与勘探技术进展;(5)海外油气地质理论与勘探技术进展;(6)石油地质理论研究与技术探索;(7)石油工业上游面临的挑战与发展战略。

论文提交日期:2013年3月31日。

联系电话:010-82282485。

电子邮箱:sydz.syky@sinopec.com。

大会网站:[www.geosociety.org.cn/web/c\\_0000000200020015/d\\_5033.htm](http://www.geosociety.org.cn/web/c_0000000200020015/d_5033.htm)。