

文章编号:0253-4339(2025)01-0101-07

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.01.101

# 螺旋折流板管壳式换热器壳侧碳氢工质两相流型实验研究

杨果成<sup>1</sup> 郑培仁<sup>1</sup> 丁国良<sup>2</sup> 陈杰<sup>3</sup>

(1 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093; 2 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200040;  
3 中海石油气电集团有限公司 北京 100028)

**摘要** 碳氢工质在液化天然气用螺旋折流板管壳式换热器壳侧的两相流型决定了换热器的换热性能。通过可视化实验方法测试了丙烷和乙烷/丙烷混合物在螺旋折流板管壳式换热器壳侧的两相流型。测试结果表明:随着干度的增大,实验依次观测到了分层流、分层-雾状流和雾状流3种流型;随着丙烷的质流密度从 $20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增至 $40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,分层流至分层-雾状流的转化干度从0.7减至0.3,而分层-雾状流至雾状流的转化干度从接近1减至0.7;当乙烷的比例从0增至50%时,分层流至分层-雾状流的转化干度从0.30~0.45增至0.43~0.55,而分层-雾状流至雾状流的转化干度从0.69~0.85增至0.83~接近1。已有的水-空气混合物的流型图无法适用于碳氢工质的流型预测,新建立的流型转化准则对于实验的分层流、分层-雾状流和雾状流的预测偏差分别约为6.5%、5.5%、4.2%。

**关键词** 混合制冷剂;两相流;流型;壳侧;螺旋折流板

中图分类号:TB61<sup>+</sup>1;TQ051.5

文献标识码:A

## Experimental Investigation on Two-Phase Flow Pattern of Hydrocarbon Refrigerants in the Shell Side of a Helically Baffled Shell and Tube Heat Exchanger

Yang Guocheng<sup>1</sup> Zheng Bangren<sup>1</sup> Ding Guoliang<sup>2</sup> Chen Jie<sup>3</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China; 3. CNOOC Gas & Power Group Co., Ltd., Beijing, 100028, China)

**Abstract** The two-phase flow pattern of hydrocarbon working fluids on the shell side of a helically baffled heat exchanger for liquefied natural gas determines its heat transfer performance. This study tested the two-phase flow patterns of propane and ethane/propane mixtures on the shell side of a helically baffled heat exchanger using a visualization experimental method. The test results demonstrated that with the increase in vapor quality, the experimental observations sequentially included stratified flow, stratified-spray flow, and spray flow; as the mass flux of propane increased from  $20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  to  $40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , the transition vapor quality from stratified flow to stratified-spray flow decreased from 0.7 to 0.3, while the transition vapor quality from stratified-spray flow to spray flow decreased from approximately 1 to 0.7; when the proportion of ethane increased from 0 to 50%, the transition vapor quality from stratified flow to stratified-spray flow increased from 0.30–0.45 to 0.43–0.55, while the transition vapor quality from stratified-spray flow to spray flow increased from 0.69–0.85 to 0.83 – close to 1. The existing flow pattern map for water-air mixtures was inadequate for predicting the flow patterns of hydrocarbon working fluids. A new set of flow pattern transition criteria was established with prediction deviations of approximately 6.5%, 5.5%, and 4.2% for the experimental stratified flow, stratified-spray flow, and spray flow, respectively.

**Keywords** mixed refrigerants; two-phase flow; flow pattern; shell side; helical baffle

螺旋折流板管壳式换热器具有突出的换热压降综合性能,且受流动诱导振动影响较小<sup>[1-2]</sup>,因此被广泛用作天然气液化工厂预冷循环的主冷凝器<sup>[3-4]</sup>。在预冷循环中,螺旋折流板管壳式换热器管侧通常采

用海水为壳侧制冷剂冷凝提供冷量,而壳侧制冷剂通常使用从原料气中提取的碳氢工质。其中壳侧的制冷剂包括纯丙烷和以乙烷/丙烷为主要成分的混合碳氢工质<sup>[5-8]</sup>。碳氢工质在换热器壳侧沿螺旋形通道

基金项目:国家自然科学基金(52104067)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52104067).)

收稿日期:2023-09-17;修回日期:2023-11-30;录用日期:2023-12-12

流动,流动形态复杂,并且流型随着流动冷凝的进行发生变化<sup>[9-10]</sup>,从而导致换热器的性能难以预测。流型判别是换热器换热特性研究的前提。因此为了优化换热器设计,有必要对螺旋折流板管壳式换热器壳侧流型进行研究。

已有文献对螺旋折流板管壳式换热器的研究多集中于换热特性<sup>[11-12]</sup>和压降特性<sup>[13-14]</sup>的研究,仅有陈亚平等<sup>[15-17]</sup>对壳侧两相流型进行了研究。陈亚平等<sup>[15-16]</sup>使用CFD模拟方法研究了立式螺旋折流板管壳式换热器壳侧的流型,研究发现螺旋折流板能够加强流体冲刷管壁,减小液膜厚度,而在折流板上增加挡液堰和疏液口可以有效排液。而对于卧式螺旋折流板管壳式换热器壳侧流型的实验研究,杜婷婷<sup>[17]</sup>使用可视化技术观测了壳侧流型,并发现贝克流型图<sup>[18]</sup>并不适用于卧式螺旋折流板管壳式换热器壳侧的流型判断。这些研究所使用的工质为水蒸气和水-空气混合物,目前还缺少碳氢工质在螺旋折流板管壳式换热器壳侧两相流型的研究。由于工质物性上的较大差异,有必要使用碳氢工质进行壳侧流型的研究。

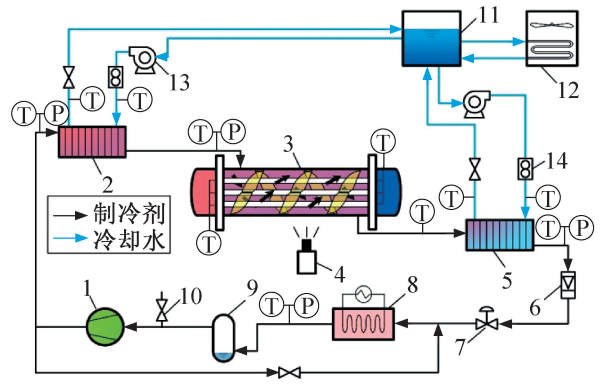
螺旋折流板管壳式换热器作为管壳式换热器之一,管壳式换热器壳侧流型的分类方法应该可以用于这种特殊换热器壳侧流型的分类。而壳侧流型按 I. D. R. Grant 等<sup>[19]</sup>的观测结果通常可以分为分层流、分层-雾状流、雾状流、间歇流和泡状流 5 种流型。其流型图的绘制参考了水平管内的流型图,以气液相表观速度为横纵坐标。

本文的目的是通过实验方法获得纯丙烷工质和乙烷/丙烷混合工质在螺旋折流板管壳式换热器壳侧的两相流型分布,参照 I. D. R. Grant 等的流型图绘制新的流型图,并建立流型判别准则。

## 1 实验方法

### 1.1 实验装置和测试样件

实验装置分为制冷剂循环和冷却水循环两部分,如图 1 所示。制冷剂循环包括隔膜压缩机、气液分离器、预冷冷凝器、测试样件、过冷冷凝器、膨胀阀和水浴式汽化器。气相制冷剂先被隔膜压缩机压缩至高压,压缩机前设置气液分离器以防止压缩机液击损坏。随后高压气相制冷剂依次经过预冷冷凝器、测试样件和过冷冷凝器,被冷却和冷凝为过冷液相状态。过冷液相制冷剂之后经过膨胀阀节流为两相状态,继而被水浴式汽化器加热汽化为过热气体并返回压缩机入口,完成循环。实验过程中,通过调节主回路和旁通回路上的气动调节阀来调节制冷剂的冷凝压力



1 压缩机;2 预冷冷凝器;3 测试样件;4 摄像机;5 过冷冷凝器;  
6 质量流量计;7 气动膨胀阀;8 汽化器;9 气液分离器;  
10 取样阀;11 水箱;12 冷水机组;13 水泵;14 电磁流量计。

图 1 实验原理  
Fig.1 Experimental principle

和质量流量。

冷却水循环由 1 台冷水机组、1 个水箱和 2 条冷却水回路组成,分别为制冷剂循环中的预冷冷凝器和过冷冷凝器提供冷量。测试样件与冷却水无热量交换,实验不考虑冷凝过程对流型造成的影响。冷水机组用于调节水箱中的水温,温度范围在 5~20℃。在每条冷却水回路中分别包含了水泵、电磁流量计和气动调节阀。通过调节气动调节阀可以控制回路中的水流量,从而实现供冷量的调节。特别是对预冷冷凝器的冷量调节可以实现测试样件入口干度的精确调节。

通过计算机软件与实验装置上的 PLC 控制系统实时通信,最终实现了对被测实验样件的壳侧压力、流量和干度的调节。实验过程中采集压缩机入口的气相工质,并使用色谱分析仪获得实验工质的组分比例。

图 2 所示为实验用的测试样件。实验用的测试样件为卧式 1/4 扇形螺旋折流板管壳式冷凝器,如图 2(a)所示。其主要的结构参数与实际换热器相同,如图 2(b)所示。测试样件的壳侧安装有高硼硅玻璃视镜用以观测混合碳氢冷剂的流型,并通过摄像机记录壳侧流型。测试样件外包裹有 30 mm 厚的泡沫橡塑材料,漏热量小于 3%。

### 1.2 实验工况

实验测试的工质包括纯工质(丙烷)和混合工质(乙烷/丙烷混合冷剂)。实验工况参考了实际液化天然气预冷循环的运行工况<sup>[20-21]</sup>,设置纯丙烷的测试压力为 1.0 MPa,冷却水温度为 7℃。而乙烷/丙烷混合工质的乙烷质量配比包括 8%、15%、31%、38%、50%,对应的冷凝压力分别为 1.2、1.4、1.8、

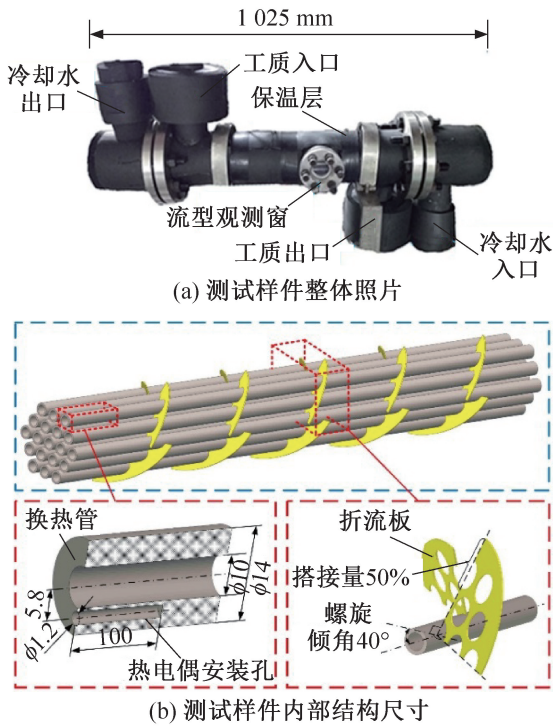


图2 测试样件  
Fig.2 Test section

2.0、2.35 MPa,以保证泡点温度和露点温度的平均值接近纯丙烷的冷凝温度 26.9 °C。纯丙烷的工况测试范围为质流密度 20~40 kg/(m<sup>2</sup>·s),干度 0.1~0.9;乙烷/丙烷混合工质的工况测试范围为质流密度 30~50 kg/(m<sup>2</sup>·s),干度 0.1~0.9,其他实验工况参数如表1所示。

表1 实验工况

Tab.1 Experimental working conditions

工质	压力/MPa	质量配比/% (乙烷:丙烷)
丙烷	1.0	—
	1.2	8:92
	1.4	15:85
乙烷/丙烷混合物	1.8	31:69
	2.0	38:62
	2.35	50:50

### 1.3 数据处理和误差分析

壳侧质流密度的计算式如下:

$$G = F_r / A_F \quad (1)$$

$$A_F = 0.5B \left[ D_i - D_t + \frac{D_t - d_o}{t_p} (t_p - d_o) \right] \quad (2)$$

测试样件干度是根据冷凝压力和壳侧制冷剂平

均比焓通过 NIST-REFPROP Version 10.0 软件<sup>[22]</sup> 查询得到的,如式(3)所示。而测试样件壳侧制冷剂的平均比焓与入口比焓的计算方法如式(4)和式(5)所示。

$$x = \text{NIST}(h_r, p_r) \quad (3)$$

$$h_r = h_{r,in} - c_{p,cw} V_{cw} \rho_{cw} (T_{cw,out} - T_{cw,in}) / (2F_r) \quad (4)$$

$$h_{r,in} = h_{r,pre,in} - c_{p,cw} V_{cw,pre} \rho_{cw} (T_{cw,pre,out} - T_{cw,pre,in}) / F_r \quad (5)$$

参照误差标准计算手册<sup>[23]</sup> 对误差进行了分析,误差包括重复测量误差和仪表精度误差。计算得到的质流密度误差为 ±1.4%~±3.8%。干度误差为 ±0.061~±0.079(丙烷)和±0.042~±0.090(乙烷/丙烷混合工质)。

## 2 实验结果分析

### 2.1 观测的流型结果分类

卧式螺旋折流板管壳式换热器壳侧两相流型分类参考 I. D. R. Grant 等<sup>[19]</sup> 对管壳式换热器壳侧水平流动流型的判别方法。在实验工况范围内,观测到分层流、分层-雾状流和雾状流 3 种流型,如图 3 所示。

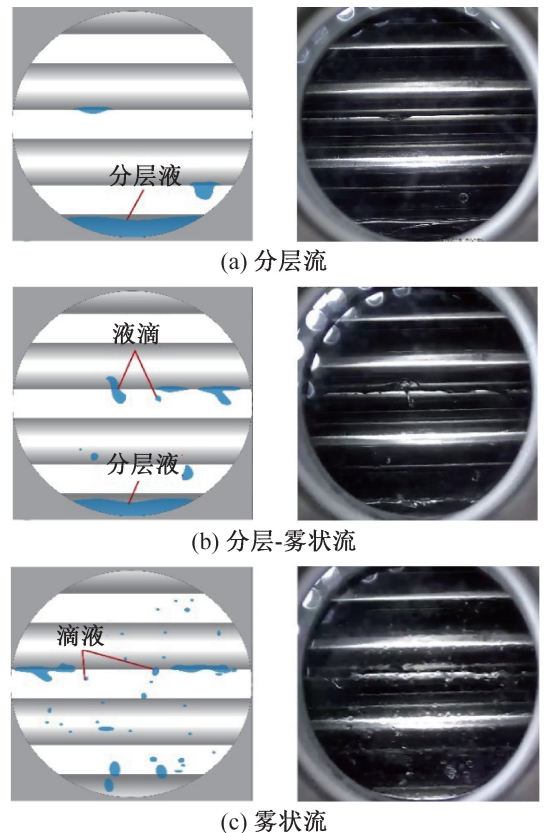


图3 实验观测的壳侧流型分类

Fig.3 Classification of observed flow patterns

分层流:工质气液完全分离,液相工质在重力作用下沿壳侧底部流动,气相工质流动速度缓慢,流动

过程中不会夹带液滴,如图3(a)所示。

**分层-雾状流:**部分液相工质仍然在重力作用下沿壳侧底部流动,但气相工质流动速度增大导致另一部分液相工质以液滴形式随气相工质一起运动,如图3(b)所示。

**雾状流:**气相工质流动速度继续增加,所有液相工质均被气相工质夹带以液滴形式随气相工质运动,如图3(c)所示。

## 2.2 纯丙烷的流型实验结果

根据观测的流型结果绘制纯丙烷在螺旋折流板管壳式换热器壳侧的流型分布图,如图4所示。由图4可知,不同质流密度工况下,发生流型转化的干度均不同。

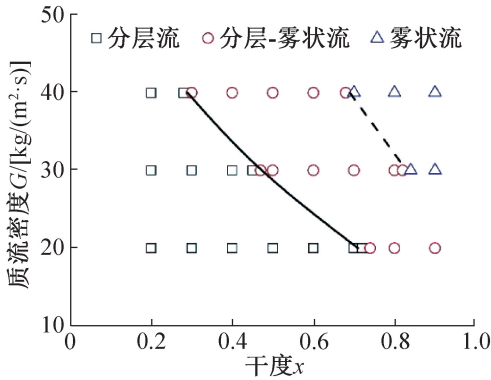


图4 纯丙烷的流型分布

Fig.4 Flow pattern distribution of pure propane

**分层流转化为分层-雾状流:**在质流密度为 20 kg/(m<sup>2</sup>·s)时,分层流转化为分层雾状流的干度约为 0.7。而在质流密度为 30 kg/(m<sup>2</sup>·s) 和 40 kg/(m<sup>2</sup>·s) 时,分层流转化为分层雾状流的干度分别为 0.45 和 0.30。

**分层-雾状流转化为雾状流:**在质流密度为 20 kg/(m<sup>2</sup>·s)时,分层液体始终存在,未观测到雾状流,此时可以认为转化。可能是由于该质流密度下实验的干度还未达到转化的干度。在质流密度为 30 kg/(m<sup>2</sup>·s)时,分层雾状流转化为雾状流的干度为 0.85。而质流密度增至 40 kg/(m<sup>2</sup>·s)时,分层雾状流转化为雾状流的干度减至 0.7。

综上所述,流型转化干度随质流密度的增大而减小。应该是由于质流密度增加导致工质气相速度增大,相同干度下气体剪切效应增强,促进了分层流至雾状流的转变。

## 2.3 乙烷/丙烷混合工质的流型实验结果

根据观测的流型绘制乙烷/丙烷混合工质(50%:50%)在卧式螺旋折流板管壳式换热器壳侧的流型分布图,如图5所示。

**分层流转化为分层-雾状流:**在质流密度为 30 kg/(m<sup>2</sup>·s)时,分层流转化为分层雾状流的干度约为 0.55。而在质流密度为 40 kg/(m<sup>2</sup>·s) 和 50 kg/(m<sup>2</sup>·s) 时,分层流转化为分层-雾状流的干度分别为 0.43 和 0.33。

**分层雾状流转化为雾状流:**在质流密度为 30 kg/(m<sup>2</sup>·s)时,分层液体始终存在,未观测到雾状流。在质流密度为 40 kg/(m<sup>2</sup>·s)时,分层雾状流转化为雾状流的干度为 0.83。而质流密度增至 50 kg/(m<sup>2</sup>·s)时,分层雾状流转化为雾状流的干度减至 0.65。

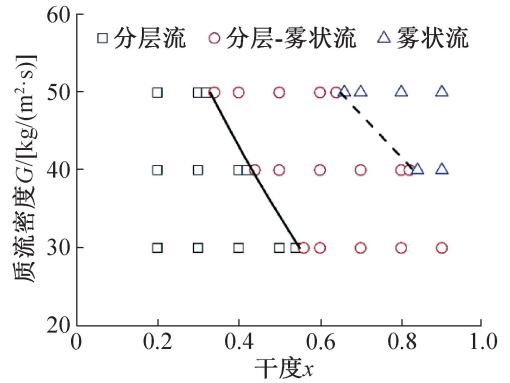


图5 乙烷/丙烷混合工质(50%:50%)的流型分布

Fig.5 Flow pattern distribution of ethane/propane mixture (50%:50%)

流型转化随质流密度和干度的变化原因与纯丙烷工质的解释相同,也是由于质流密度增加导致工质气相速度增大,气相剪切效应增强。

## 2.4 组分配比对流型的影响

组分变化会改变混合工质的物性,从而对壳侧的流型分布造成影响。实验分别在 30 kg/(m<sup>2</sup>·s) 和 40 kg/(m<sup>2</sup>·s) 质流密度工况条件下,改变乙烷组分配比 0~50%,观测流型分布的变化,如图6所示。

质流密度为 30 kg/(m<sup>2</sup>·s) 工况下的流型分布如图6(a)所示。乙烷组分配比从 0 增至 50%,分层流转化为分层-雾状流的转化干度从 0.45 增至 0.55。乙烷组分配比在 0~15%时,分层-雾状流转化为雾状流的转化干度为 0.83~0.85。而乙烷组分配比大于 15%后,在实验干度范围内未观测到雾状流型。

质流密度为 40 kg/(m<sup>2</sup>·s) 工况下的流型分布如图6(b)所示。乙烷组分配比从 0 增至 50%,分层流转化为分层-雾状流的转化干度从 0.3 增至 0.43。乙烷组分配比从 0 增至 50%,分层-雾状流转化为雾状流的转化干度从 0.69 增至 0.83。

说明易挥发组分(乙烷)质量配比增加会增加流型转化干度。这可能是由于乙烷质量配比高的乙烷/

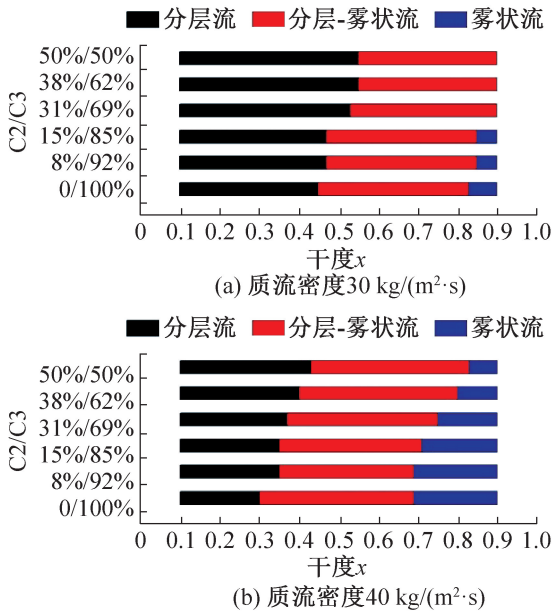


图 6 组分对比对乙烷/丙烷混合制冷剂的流型分布的影响  
Fig.6 Effect of component proportion on flow pattern distribution of ethane/propane mixtures

丙烷混合工质的气相密度大,相同干度下的气相工质速度低,气体剪切效应减弱。在实验工况下,当混合工质的乙烷质量配比从 8% 增至 50% 时,饱和气相密度从 25.4 kg/m<sup>3</sup> 增至 46.5 kg/m<sup>3</sup>,相同质流密度下气相速度降低,这与工质压力增加有关。

### 3 流型图和流型转化准则

由于以前文献中的管壳式换热器壳侧流型图均是根据水-空气混合工质的实验结果绘制的,不一定适用于碳氢工质的情况。因此有必要根据实验结果重新绘制流型图并建立相应的流型转化准则。参照 Grant 绘制的流型图,可以将纯工质和混合工质的流型实验结果整理计算得到以液相表观速度  $U_L$  和气相表观速度  $U_G$  分别为横纵坐标的流型图,如图 7 所示。工质液相表观速度和气相表观速度的计算式如下:

$$U_L = G(1 - x)/\rho_L \quad (6)$$

$$U_G = Gx/\rho_G \quad (7)$$

由图 7 可知,分层流至分层-雾状流以及分层-雾状流至雾状流转化临界值均随着  $U_L$  增加而单调减小。该结果与 Grant 用水-空气混合工质实验得到的结果相似,但转化边界完全不同。

造成该偏差的可能原因是 Grant 使用的工质为水-空气混合工质,物性与碳氢类工质差异较大。对于工质的气液相密度比,空气和水的密度比约为 1 : 1 000,而实验碳氢工质的气相和液相密度比最大

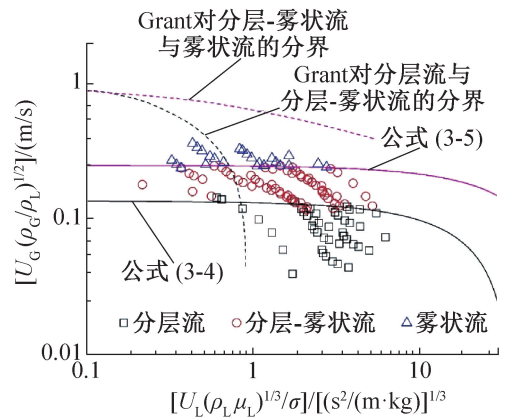


图 7 卧式螺旋折流板管壳式换热器壳侧碳氢工质两相流型图  
Fig.7 Flow pattern map for hydrocarbon refrigerants in shell side of horizontal helically baffled shell-and tube heat exchanger

为 1 : 25,两种工质差异很大。

将分层流和分层-雾状流两种流型区域边界附近的 15 个数据点拟合为一次线性函数,则得到分层流至分层-雾状流的转化曲线:

$$U_G(\rho_G/\rho_L)^{1/2} = - 0.003 65U_L(\rho_L\mu_L)^{1/3}/\sigma + 0.133 \quad (8)$$

将分层-雾状流和雾状流两种流型区域边界附近的 9 个数据点拟合为一次线性函数,则得到分层-雾状流至雾状流的转化曲线:

$$U_G(\rho_G/\rho_L)^{1/2} = - 0.003 26U_L(\rho_L\mu_L)^{1/3}/\sigma + 0.241 \quad (9)$$

新的转化准则对实验获得的分层流、分层-雾状流和雾状流的判别偏差分别约为 6.5%、5.5%、4.2%。新的转化准则的适用范围:乙烷丙烷质量配比 0 : 100%~50% : 50%,质流密度 20~50 kg/(m<sup>2</sup>·s),干度 0.1~0.9。

### 4 结论

碳氢工质在 LNG 用螺旋折流板管壳式换热器壳侧的两相流型决定了换热器的冷凝换热性能。由于物性上的巨大差异,现有对非碳氢工质的研究成果无法直接用于碳氢工质的流型预测。使用可视化实验方法对丙烷和乙烷/丙烷混合工质在 1/4 扇形螺旋折流板管壳式换热器壳侧的两相流型进行了观测。实验工况覆盖范围:乙烷丙烷质量配比 0 : 100%~50% : 50%,质流密度 20~50 kg/(m<sup>2</sup>·s),干度 0.1~0.9。通过研究得到如下结论:

1) 在实验工况范围内,随着干度的增大,卧式螺旋折流板管壳式换热器样件壳侧依次观测到分层流、分层-雾状流和雾状流 3 种流型。

2)壳侧碳氢工质质流密度增加会导致流型转化的干度减小。当丙烷的质流密度从  $20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  增至  $40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 分层流至分层-雾状流的转化干度从 0.7 减至 0.3, 而分层-雾状流至雾状流的转化干度从接近 1 减至 0.7。

3)易挥发组分(乙烷)质量配比增加会增大混合工质流型转化的干度。当乙烷的比例从 0 增至 50% 时, 分层流至分层-雾状流的转化干度从 0.30~0.45 增长至 0.43~0.55, 而分层-雾状流至雾状流的转化干度从 0.69~0.85 增至 0.83~接近 1。

4)Grant 的流型转化判别准则不能适用于碳氢工质在卧式螺旋折流板管壳式换热器壳侧流型判别, 建立的新判别准则对于实验的分层流、分层-雾状流和雾状流的预测偏差分别约为 6.5%、5.5%、4.2%。

符号说明

- $A_F$ ——壳侧流通面积,  $\text{m}^2$
- $c_{p, cw}$ ——冷却水的比定压热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{C}^\circ)$
- $B$ ——折流板螺距,  $\text{m}$
- $D_i$ ——测试样件壳体内径,  $\text{m}$
- $D_o$ ——测试样件管束外接圆直径,  $\text{m}$
- $d_o$ ——管外径,  $\text{m}$
- $F_r$ ——制冷剂质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$
- $G$ ——制冷剂质流密度,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- $h_r$ ——制冷剂在测件入口平均比焓,  $\text{kJ}/\text{kg}$
- $h_{r, in}$ ——制冷剂在测件入口的比焓,  $\text{kJ}/\text{kg}$
- $h_{r, pre, in}$ ——制冷剂在预冷器入口的比焓,  $\text{kJ}/\text{kg}$
- $p_r$ ——制冷剂冷凝压力,  $\text{MPa}$
- $T_{cw, pre, in} \setminus T_{cw, pre, out}$ ——预冷器冷却水入口、出口温度,  $\text{C}^\circ$
- $T_{cw, in} \setminus T_{cw, out}$ ——测件冷却水入口、出口温度,  $\text{C}^\circ$
- $t_p$ ——测试样件管间距,  $\text{m}$
- $U_G$ ——气相表观速度,  $\text{m}/\text{s}$
- $U_L$ ——液相表观速度,  $\text{m}/\text{s}$
- $V_{cw, pre}$ ——预冷器的冷却水体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$
- $V_{cw}$ ——测件的冷却水体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$
- $x$ ——壳侧平均干度
- $\rho_{cw}$ ——冷却水密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$
- $\rho_G$ ——制冷剂气相密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$
- $\rho_L$ ——制冷剂液相密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$
- $\mu_L$ ——制冷剂液相黏度系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$
- $\sigma$ ——制冷剂表面张力系数,  $\text{N}/\text{m}$

参考文献

[1] WANG Qiuwang, ZENG Min, MA Ting, et al. Recent development and application of several high-efficiency surface heat exchangers for energy conversion and utilization[J]. Applied Energy, 2014, 135: 748-777.

[2] 王秋旺, 罗来勤, 曾敏, 等. 交错螺旋折流板管壳式换

热器壳侧传热与阻力性能[J]. 化工学报, 2005, 56(4): 604-607. (WANG Qiuwang, LUO Laiqin, ZENG Min, et al. Shell-side heat transfer and pressure drop of shell-and-tube heat exchangers with overlap helical baffles [J]. CIESC Journal, 2005, 56(4): 604-607.)

[3] YANG Guocheng, DING Guoliang, CHEN Jie, et al. Shell side condensation heat transfer characteristics of ethane/propane mixtures [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 194: 117017.

[4] HU Haitao, YANG Guocheng, DING Guoliang, et al. Heat transfer characteristics of mixed hydrocarbon refrigerant flow condensation in shell side of helically baffled shell-and-tube heat exchanger [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 133: 785-796.

[5] KHAN M S, KARIMI I A, LEE M. Evolution and optimization of the dual mixed refrigerant process of natural gas liquefaction[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 96: 320-329.

[6] 潘红宇, 李顺丽, 李玉星, 等. 丙烷预冷混合制冷剂液化工艺控制方式优选[J]. 制冷学报, 2016, 37(2): 53-58. (PAN Hongyu, LI Shunli, LI Yuxing, et al. Optimization in the control modes of propane pre-cooling and mixed-refrigerant process [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(2): 53-58.)

[7] 林文胜, 许婧煊, 高婷, 等. 非常规天然气液化研究进展[J]. 制冷学报, 2021, 42(2): 25-37. (LIN Wensheng, XU Jingxuan, GAO Ting, et al. Research progress of unconventional natural gas liquefaction [J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(2): 25-37.)

[8] 张镛, 鹿来运, 郭开华, 等. 小型混合工质循环气体液化系统实验及优化[J]. 制冷学报, 2011, 32(3): 48-52. (ZHANG Pu, LU Laiyun, GUO Kaihua, et al. Experiment and optimization of a small-scale mixed-refrigerant-cycle gas liquefaction system [J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(3): 48-52.)

[9] YANG Guocheng, HU Haitao, DING Guoliang, et al. Influence of component proportion on heat transfer characteristics of ethane/propane mixture flow condensation in shell side of helically baffled shell-and-tube heat exchanger[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 97: 381-391.

[10] 密晓光, 杨果成, 陈杰, 等. 混合碳氢制冷剂在螺旋折流板管壳式冷凝器壳侧冷凝特性的实验研究[J]. 制冷技术, 2018, 38(2): 6-10. (MI Xiaoguang, YANG Guocheng, CHEN Jie, et al. Experimental investigation on mixed hydrocarbon refrigerant flow condensation characteristics in shell side of helically baffled shell-and-tube condenser[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2018, 38(2): 6-10.)

- [11] YANG Guocheng, HU Haitao, DING Guoliang, et al. Experimental investigation on heat transfer characteristics of two-phase propane flow condensation in shell side of helically baffled shell-and-tube condenser [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 88: 58–66.
- [12] 金建祥. 螺旋折流板型波纹管换热器传热与流动性能研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014. (JIN Jianxiang. Study of performance on heat transfer and flow field in heat exchanger with helical baffles and corrugated tubes [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.)
- [13] 陈贵冬, 陈秋扬, 曾敏, 等. 组合式多壳程螺旋折流板管壳式换热器数值模拟研究[J]. *工程热物理学报*, 2009, 30(8): 1357–1359. (CHEN Guidong, CHEN Qiyang, ZENG Min, et al. Numerical studies on combined multiple shell-pass shell-and-tube heat exchanger with helical baffles [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(8): 1357–1359.)
- [14] 张剑飞, 李欣, 吴扬, 等. 螺旋折流板换热器层流流动与换热的数值模拟[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(5): 853–855. (ZHANG Jianfei, LI Xin, WU Yang, et al. Numerical simulation of laminar flow and heat transfer in shell-and-tube heat exchanger with helical baffles [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(5): 853–855.)
- [15] LIN Li, CHEN Yaping, WU Jiafeng, et al. Performance of flow and heat transfer in vertical helical baffle condensers [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016, 72: 64–70.
- [16] 郭亚, 林丽, 陈亚平, 等. 立式螺旋折流板冷凝器内制冷剂流型和换热特性的数值模拟[J]. *制冷技术*, 2016, 36(1): 35–39. (GUO Ya, LIN Li, CHEN Yaping, et al. Numerical simulation of flow pattern and heat transfer characteristics of refrigerant in vertical condenser with helical baffles [J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2016, 36(1): 35–39.)
- [17] 杜婷婷. 搭接螺旋折流板换热器传热与流动特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2015. (DU Tingting. Researches on heat transfer and flow characteristics of overlapped helical baffled heat exchangers [D]. Jinan: Shandong University, 2015.)
- [18] BELL K, TABOREK J, FENOGLIO F. Interpretation of horizontal in-tube condensation heat transfer correlations with a two-phase flow regime map [J]. *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 1970, 66: 150–163.
- [19] GRANT I D R, CHISHOLM D. Two-phase flow on the shell-side of a segmentally baffled shell-and-tube heat exchanger [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1979, 101(1): 38–42.
- [20] ALABDULKAREM A, MORTAZAVI A, HWANG Y, et al. Optimization of propane pre-cooled mixed refrigerant LNG plant [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(6/7): 1091–1098.
- [21] MORTAZAVI A, SOMERS C, HWANG Y, et al. Performance enhancement of propane pre-cooled mixed refrigerant LNG plant [J]. *Applied Energy*, 2012, 93: 125–131.
- [22] NIST standard reference database 23: reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, Version 10.0 [S]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2018.
- [23] Evaluation of measurement data-guide to the expression of uncertainty in measurement [S]. New York: International Organization for Standardization Geneva, 2008.

#### 通信作者简介

丁国良,男,教授,上海交通大学机械与动力工程学院,13386006116,E-mail: glding@sjtu.edu.cn。研究方向:制冷空调装置的仿真与智能控制,新能源汽车与储能系统的热管理,液化天然气系统仿真与优化设计。

#### About the corresponding author

Ding Guoliang, male, professor, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 86-13386006116, E-mail: glding@sjtu.edu.cn. Research fields: simulation and intelligent control of refrigeration and air conditioning units, thermal management of new energy vehicles and energy storage systems, simulation and optimal design of liquefied natural gas systems.