

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2017.02.016

# LNG 绕管式换热器管侧流动与传热实验台设计及验证

李丰志<sup>1</sup>, 于佳文<sup>1</sup>, 鹿来运<sup>2</sup>, 姜益强<sup>1</sup>, 蔡伟华<sup>1</sup>, 陈明<sup>1</sup>, 浦晖<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 中海石油气电集团有限责任公司, 北京 100028)

**摘要:** 绕管式换热器是天然气液化的核心设备, 然而目前中国天然气液化用大型绕管式换热器的实验研究比较薄弱, 相关设计工作的指导理论还不完善. 为研究液化天然气(LNG)绕管式换热器管侧流动与传热特性, 提出一种可以模拟 LNG 绕管式换热器实际运行工况的实验方法, 并完成实验台的设计、搭建及调试工作. 为保证实验数据的准确性, 以液相丙烷为实验介质, 对其在不同工况下的传热系数进行实测, 并将实验所得传热系数与在相同工况下由经典的管内传热关联式计算所得传热系数进行对比. 结果表明: 实验台可以稳定工作, 实验工况可以达到 LNG 绕管式换热器的实际运行工况, 实验测试值与相同工况下的关联式计算值偏差在 $\pm 10\%$ 以内. 说明实验台精度较高, 实验数据可靠, 为 LNG 绕管式换热器管侧冷凝流动与传热特性的深入研究奠定了实验基础.

**关键词:** 液化天然气绕管式换热器; 管侧; 实验台; 设计; 验证

**中图分类号:** TE64 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)02-0098-05

## Design and verification for tube-side flow and heat transfer test-rig of coil-wound LNG heat exchangers

LI Fengzhi<sup>1</sup>, YU Jiawen<sup>1</sup>, LU Laiyun<sup>2</sup>, JIANG Yiqiang<sup>1</sup>, CAI Weihua<sup>1</sup>, CHEN Ming<sup>1</sup>, PU Hui<sup>2</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. China National Offshore Oil Corporation Gas & Power Group, Beijing 100028, China)

**Abstract:** Coil-wound heat exchangers are the core equipment for liquefaction of natural gas, however, the experimental research on large-scale coil-wound liquefied natural gas (LNG) heat exchangers is relatively weak and the design theory is also imperfect in China. In order to obtain the characters of flow and heat transfer at the tube side of coil-wound LNG heat exchangers, a new experimental method which can simulate the actual coil-wound LNG heat exchangers operation conditions was presented, and then the corresponding test-rig was designed, developed and debugged. For guaranteeing the accuracy of the experimental data, the test-rig was verified by using liquid propane as experiment medium. The tested heat transfer coefficients of propane under different experimental conditions were compared with those from the classic tube heat transfer correlations in the same experimental conditions. It is concluded that the experimental conditions can meet the actual coil-wound LNG heat exchangers operation conditions, and the test-rig can operate stably. The deviation between the tested values and the predicted values is less than  $\pm 10\%$ . So the accuracy of the test-rig is high and the experimental data are credible. The test-rig provides an experimental basis for comprehensive research on flow and heat transfer under the actual conditions for large-scale coil-wound heat exchangers.

**Keywords:** coil-wound liquefied natural gas (LNG) heat exchanger; tube-side; test-rig; design; verification

气态天然气具有储存及运输困难、密度小、临界温度远低于常温等优点. 为便于储存运输, 必须对其深冷液化<sup>[1]</sup>. 液化天然气(liquefied natural gas, LNG)具有安全、清洁、适合长距离运输等优点, 是直接应用的理想能源<sup>[2]</sup>. 绕管式换热器是天然气液化的核心设备<sup>[3]</sup>, 具有结构紧凑、换热系数高、传热温差

小等特点<sup>[4-6]</sup>, 主要用于大型陆上天然气液化工厂和大型液化天然气浮式生产储卸装置(liquefied natural gas-floating production storage and offloading, LNG-FPSO). 绕管式换热器在大型天然气液化工艺中的使用率已超过 90%<sup>[7]</sup>, 且换热器的造价占液化系统总造价的 10%左右<sup>[8]</sup>. 然而目前中国天然气液化用大型绕管式换热器的设计和制造技术仍相对薄弱, 全球 90%以上的大型 LNG 绕管式换热器的设计和制造技术均被美国 APCI 和德国 Linde 公司垄断. LNG 绕管式换热器的国产化势在必行, 而其内部流动与传热机理的研究是国产化的前提和基础.

LNG 绕管式换热器换热管为螺旋上升管, 螺旋

收稿日期: 2016-07-20

基金项目: 工信部大型 LNG 绕管式换热器研制项目(工信部联装[2013]418号)

作者简介: 李丰志(1991—), 男, 博士研究生;

姜益强(1973—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 姜益强, jyq7245@sina.com

管是一种特殊的传热强化管,结构紧凑,加工方便,污垢热阻小,在天然气液化及其他低温制冷领域均有广泛应用<sup>[9]</sup>.管侧研究内容主要包括混合冷剂在螺旋管中的传热特性、压降特性以及流型的转换特性.由于具有高压、低温、相变、多元流动等特点,实验工况比较复杂,目前针对 LNG 绕管式换热器管侧的实验研究较少.Neeraas<sup>[10]</sup>曾针对管侧开展实验研究,螺旋管内径为 14 mm,曲率直径为 2 m,倾斜角为 10°;实验介质有丙烷、R22、丙烷、乙烷摩尔比为 1:1,丙烷、甲烷摩尔比为 92/8~95.5/4.5;流量范围 150~400 kg/(m<sup>2</sup>·s),压力范围 1.2~4 MPa,但实验工况与实际工况仍存在一定差距.邵莉等<sup>[11]</sup>完成了 R134a 在水平直管和螺旋管内冷凝换热的实验研究,发现 R134a 在螺旋管内的冷凝换热系数较直管大 4%~13.8%.Boyko 等<sup>[12-13]</sup>在实验数据分析的基础上采用类比分析的方法得到了冷凝换热关联式,该式是在一定假设基础上推导来的,没有引入任何经验系数,因此适用范围较广得到了广泛应用.郑水

华等<sup>[14]</sup>以空气和水为工质开展了螺旋管内气液两相流阻力特性实验研究,得到了螺旋管内气液两相流摩擦阻力系数关系式,并在此基础上建立两相摩擦阻力的计算公式.李广军等<sup>[15]</sup>进行了螺旋管内油水液液两相流流型的实验研究,给出了螺旋管内液液两相流的流型图.上述研究取得了一定成果,但未能反映实际的 LNG 绕管式换热器运行工况,导致实验结果偏差较大,并不能直接指导 LNG 绕管式换热器设计计算.因此,提出了一种可以模拟 LNG 绕管式换热器实际运行工况的实验方法,设计并搭建了实验台,并对其精度进行校验,为下一步 LNG 绕管式换热器流动与传热规律的研究奠定了实验基础.

### 1 实验系统原理

LNG 绕管式换热器管侧实验系统包括 3 部分:测量循环系统、冷却循环系统和外部冷源系统.实验系统原理见图 1,相关设备名称见表 1.

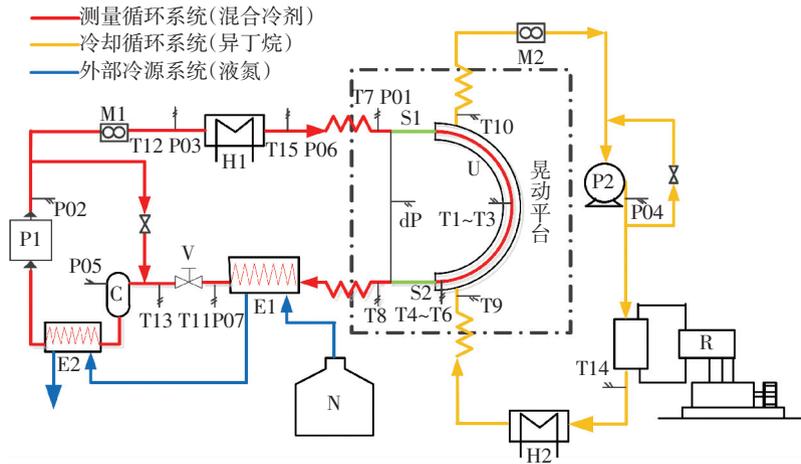


图 1 实验系统原理

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

表 1 主要设备

Tab.1 Major equipment

设备编号	设备名称
U	测试样件
T1~T15	温度传感器
P01~P07	压力传感器
dP	压差传感器
M1、M2	质量流量计
P1、P2	循环泵
E1、E2	换热器
H1、H2	加热器
C	缓冲罐
S1、S2	流型观察窗
R	低温制冷机
N	液氮罐
V	调节阀

测量循环系统:过冷的循环工质经过循环泵 P1 后进入加热器 H1,通过调节加热器加热功率可以控制循环工质的蒸发量从而控制测试样件入口的干度.加热器出口循环工质为气液两相,由于气相和液相温度存在差异,会导致流体温度测量不准确,因此在测量气液两相流温度时需要先经过搅拌使气液温度达到平衡.搅拌后循环工质原有的流型被破坏,通过流型发展段使流型重建,流型重建完成后进入流型观察窗 S1,然后进入测试样件.在测试样件内循环工质被部分冷凝.循环工质经过测试样件后进入流型观察窗 S2,如果流型观察窗 S1 和 S2 显示的为同一流型则可以认为测试样件内也保持为该种流型.循环工质经过流型观察窗 S2 后进入液氮换热器 E1 和 E2,两相流被冷却为过冷液体,然后进入循环泵,完成循环.

由于目前针对单相流动的研究已经比较成熟,本实验的主要研究对象为气液两相区,在测量循环系统中,流量的调节主要通过循环泵 P1 的变频以及旁通实现;压力的调节主要通过调节阀门 V 实现;干度的调节主要通过加热器 H1 调节加热功率实现.通过系统的调节达到不同的工况要求.

**冷却循环系统:**冷却循环内的循环工质为异丁烷,在整个系统中异丁烷始终保持为液相.过冷的异丁烷进入测试样件用来冷却测量循环系统中的循环工质.异丁烷在进入测试样件前先通过加热器 H2 调节其温度以保证异丁烷温度满足要求.在冷却循环系统中制冷机 R 为系统提供冷量,制冷机可提供的最低温度为 $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,控温精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .冷却循环对测试样件管外温度的控制保证了测量循环系统中流型观察窗 S1、S2 中显示的为同一流型.

**外部冷源系统:**外冷源为液氮.测量循环系统中循环工质经过测试样件后为气液两相,为了保证循环泵 P1 入口循环工质为液相,必须为其提供大量的冷量.液氮储存在自增压的液氮罐中,通过流量调节阀的调节控制液氮进入换热器 E1 和 E2 的流量,为循环工质提供冷量,将其过冷.

## 2 实验装置

为了保证 LNG 绕管式换热器换热管侧流动与传热规律测试数据的准确性,提高实验的精度,本实验台在测点布置及参数采集等方面都提出了特殊的要求.

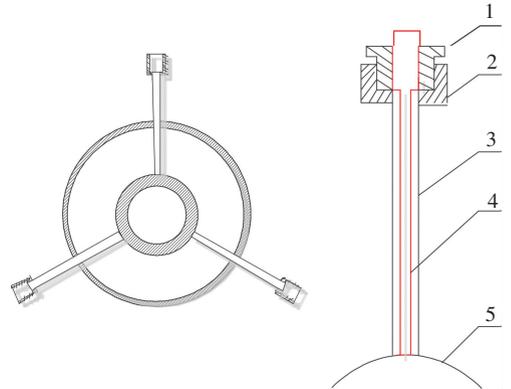
### 2.1 测点布置

实验中 T1~T6 为壁温的测点,T7~T15 为流体温度的测点.对于测试样件 T1~T6 完成了管壁温的测量,T7、T8 完成了流体温度的测量.测点 T1~T6 的布置是本实验的难点.

测试样件是一段紫铜套管,缠绕角为 $10^{\circ}$ ,内管外径为 $14\text{ mm}$ ,壁厚为 $2\text{ mm}$ ,承压 $4\text{ MPa}$ ;外管外径为 $32\text{ mm}$ ,壁厚为 $1\text{ mm}$ ,承压 $1\text{ MPa}$ .测试样件采用套管式换热结构,内管走测试循环工质(混合冷剂),外管走低温冷却介质(异丁烷),循环工质从下往上流动,冷却介质从上往下流动形成逆流换热.为了使测试样件内流型发展充分,在循环工质进入测试样件之前需要加一段流型发展段,本实验的流型发展段为与螺旋管入口相切的 $1\text{ m}$ 长倾斜直管.为了观察流型,在流型发展段和测量段之间加了一段流型观察窗 S1,观察窗采用双层真空石英玻璃制造,承压高,保温性好,确保在观察流型时不产生附加热流.为了保证测试样件内为某一确定流型,除了在入口处观察外,在出口处也需要观察流型,如果二

者为同一流型则可以认为管内工质在确定流型下冷凝;为此,在出口处也添加了一段与螺旋管出口相切的流型观察窗 S1.

为了准确测量测试样件内管的壁温,在测试样件的中间及出口位置设置温度测点,每个测点有 3 个温度传感器,在圆管截面上均匀布置,每 $120^{\circ}$ 一个.3 个测量值的平均值为该点的内管壁温,传感器布置见图 2.



1—传感器接头; 2—螺母; 3—铜套管; 4—温度传感器; 5—测试样件内管外壁

图 2 温度传感器布置

Fig.2 Layout of temperature sensor

### 2.2 测试数据采集系统

实验测试数据由 PLC 完成采集,主机型号为 CPU224XP,同时连接 EM231 模块,可以实现多组模拟量数字量的采集.需要测试的实验参数有温度、压力、压差和流量等,分别由铂电阻(Pt100)温度传感器、压力传感器、压差传感器以及质量流量计测试完成.所选传感器的性能参数如表 2 所示.

本实验主要的测试参数为温度,温度测试值直接参与数据计算并影响最后的实验结果.温度传感器的精度已经给出,但在信号传输过程中仍会有误差产生,为了消除这部分误差带来的影响,对与温度传感器连接的 15 路信号传递线路进行了精度校核.

表 2 传感器性能参数

Tab.2 Parameters of sensor

名称	量程范围	输出信号	精度	供电电压
压力传感器	0~6 MPa	4~20 mA 电流信号	$\pm 0.1\% \text{FS}$	24 V DC
	0~1 MPa	4~20 mA 电流信号	$\pm 0.1\% \text{FS}$	24 V DC
压差传感器	0~30 kPa	4~20 mA 电流信号	$\pm 0.1\% \text{FS}$	24 V DC
温度传感器	$-160\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	电阻信号	$\pm(0.1+0.0017\times t )\text{ }^{\circ}\text{C}$	24 V DC
流量计	$50\sim 200\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$	4~20 mA 电流信号	$\pm 0.1\% \text{FS}$	220 V DC
	$240\sim 320\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$	4~20 mA 电流信号	$\pm 0.1\% \text{FS}$	220 V DC

为了准确校核传递线路带来的误差,选用标准电阻箱代替温度传感器连接在信号线上.根据 Pt100 分度值<sup>[16]</sup>,调节电阻箱阻值,通过读取计算机显示的温度值直接校核传递线路的误差,具体检测结果见表 3.

表 3 传递线路误差分析  
Tab.3 Error analysis of route °C

编号	(R/Ω)/(t/°C)				
	35.54/-160	60.26/-100	80.31/-50	96.09/-10	111.67/30
T1	0.07	0.27	0.19	0.25	0.31
T2	0.07	0.19	0.19	0.24	0.26
T3	0.04	0.07	0.01	0	-0.05
T4	-0.01	-0.01	-0.08	-0.09	-0.10
T5	0.03	0.07	0.03	0.03	0.01
T6	0.01	0.13	0.06	0.04	0.07
T7	0.01	0.13	0.13	0.20	0.19
T8	0.16	0.29	0.32	0.36	0.38
T9	0.10	0.18	0.18	0.21	0.19
T10	0.04	0.15	0.17	0.17	0.21
T11	-0.21	-0.16	-0.13	-0.03	0.14
T12	0.63	0.53	0.51	0.52	0.59
T13	-0.03	-0.16	-0.07	-0.02	0.10
T14	-0.10	-0.18	-0.13	0.01	0.14
T15	0.69	0.70	0.87	0.84	1.40
最大误差	0.69	0.70	0.87	0.84	1.40
最小误差	0.01	-0.01	0.01	0	0.01

传递线路为温度测试系统带来系统误差,最大误差为 1.40 °C,最小为 0 °C.根据多次校核结果,对温度传感器传递线路进行数据修正,保证了实验数据的准确性.

### 3 实验台精度验证

实验台的运行情况对实验结果影响很大,在进行正式实验之前需要对实验台进行精度验证.精度验证实验选用丙烷作为测量循环系统循环工质,分别在不同流量、压力下进行实验.计算并分析丙烷在不同工况下的传热系数,将实验所得传热系数与在相同工况下由经典的管内传热关联式计算所得传热系数进行对比,校核实验台的精度,为后续实验数据的准确性提供保障.

目前,单相流动和换热的理论相对成熟,已经有公认的较为普遍适用的关联式,计算所得的结果也较准确,本实验选用的对比关联式为 Dittus-Boelter 关联式、Gnielinski 关联式以及 Mikhejew 关联式.

Dittus-Boelter 关联式<sup>[17]</sup>具体形式为

$$Nu = [0.023 Re_d^{0.8} Pr^{0.3}] \times \left[ 1 + 10.3 \left( \frac{d}{R} \right)^3 \right]. \quad (1)$$

Gnielinski 关联式<sup>[18]</sup>具体形式为

当  $0.5 < Pr < 1.5, 10^4 < Re < 5 \times 10^6$  时

$$Nu = [0.021 4(Re^{0.8} - 100) Pr^{0.4}] \times \left[ 1 + 10.3 \left( \frac{d}{R} \right)^3 \right]. \quad (2)$$

当  $1.5 < Pr < 500, 3\ 000 < Re < 10^6$  时

$$Nu = [0.012(Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4}] \times \left[ 1 + 10.3 \left( \frac{d}{R} \right)^3 \right]. \quad (3)$$

Mikhejew 关联式<sup>[19]</sup>具体形式为

$$Nu = \left[ 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.43} \left( \frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} \right] \times \left[ 1 + 10.3 \left( \frac{d}{R} \right)^3 \right]. \quad (4)$$

式中:  $Nu$  为丙烷的努谢尔特数;  $Re$  为丙烷的雷诺数;  $Pr$  为丙烷的普朗特数;  $Pr_w$  表示丙烷温度为壁温时的普朗特数;  $d$  为螺旋管的内径, m;  $R$  为螺旋管的曲率半径, m.

传热系数计算公式为

$$h = \frac{Nu \times \lambda}{d}. \quad (5)$$

式中:  $h$  为丙烷的传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $\lambda$  为丙烷的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ .

实验中选取的工况见表 4, 实验测试值与关联式计算值偏差见图 3. 可以看出, 实验测试值与关联式计算值相比偏差在  $\pm 10\%$  以内, 实验台精度较高, 实验数据可靠.

表 4 实验工况

Tab.4 Experimental condition

压力/MPa	流量/(kg · (m <sup>2</sup> · s) <sup>-1</sup> )
2, 3, 4	200, 400, 600

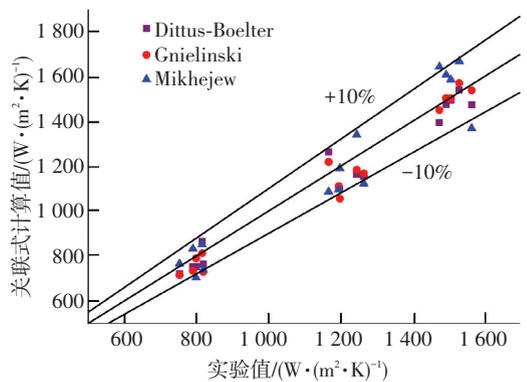


图 3 实验偏差分布

Fig.3 Distribution of experimental deviation

### 4 结论

在对 LNG 绕管式换热器的流动和传热机理的研究的目的在于获得足够精度的关联式,以指导换热器的设计选型,因而保证实验台有足够的精度显得尤为重要.本实验主要针对实验台的精度进行了相关研究.本文完成了 LNG 绕管式换热器管侧实验

台的流程设计以及搭建等工作,并以丙烷为介质,通过实验对实验台精度进行了验证,实验台误差小于 $\pm 10\%$ ,完全可以实现 LNG 绕管式换热器实际运行时管侧的运行工况,从而为 LNG 绕管式换热器管侧冷凝流动与传热特性的深入研究,提供了可信的实验基础,对我国大型绕管式换热器设计理论的形成有着重要的实际意义。

## 参考文献

- [1] 顾安忠,鲁雪生.液化天然气技术手册[M].北京:机械工业出版社,2010:1-2.  
GU Anzhong, LU Xuesheng. Liquefied natural gas (LNG) technical manuals[M]. Beijing: China Machine Press, 2010:1-2.
- [2] 孙陆晶,叶郁,贾领军.国内外 LNG 供需现状及发展前景[R].北京:中国石油和化学工业联合会,2011.  
SUN Lujing, YE Yu, JIA Lingjun. Status quo of supply and demand of LNG and its development at home and abroad[R]. Beijing: China Petroleum and Chemical Industry Federation, 2011.
- [3] 陈永东,陈学东.LNG 成套装置换热器关键技术分析[J].天然气工业,2010,30(1):96-100.  
CHEN Yongdong, CHEN Xuedong. A technical analysis of heat exchangers in LNG plants and terminals[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(1):96-100.
- [4] 吴志勇,陈杰,浦晖,等. LNG 绕管式换热器结构与流通参数计算[J].煤气与热力,2014,34(3):34-39.  
WU Zhiyong, CHEN Jie, PU Hui, et al. Calculation of structural and circulation parameters of spiral-wound LNG heat exchanger[J]. Gas & Heat, 2014, 34(3):34-39.
- [5] 陈永东,陈学东.我国大型换热器的技术进展[J].机械工程学报,2013,49(10):134-143.  
CHEN Yongdong, CHEN Xuedong. Technology development of large-scale heat exchanger in China[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(10):134-143.
- [6] 王家荣.绕管式换热器在天然气处理装置中的应用[J].油气田地面工程,2011,30(10):54-55.  
WANG Jiarong. The application of coil-wound heat exchangers in the natural gas processing plants[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2011, 30(10):54-55.
- [7] 浦晖,陈杰.绕管式换热器在大型天然气液化装置中的应用及国产化技术分析[J].制冷技术,2011(3):26-29.  
PU Hui, CHEN Jie. Application and technical analysis on localization of spiral-wound heat exchanger in large-scale natural gas liquefaction plant[J]. Refrigeration Technology, 2011(3):26-29.
- [8] ANDERSON P J, DANIELS E J. An overview of LNG operations [R]. Paper Presented at the Natural Gas Symposium Lagos, 1981.
- [9] 张小艳,姜芳芳.螺旋管换热技术的研究现状综述[J].制冷与空调,2014,28(1):75-80.  
ZHANG Xiaoyan, JIANG Fangfang. Present situation of the technical research on spiral tube [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2014, 28(1):75-80.
- [10] NEERAAS B O. Condensation of hydrocarbon mixtures in coil-wound LNG heat ex-changers tube-side heat transfer and pressure drop [D]. Trondheim; Norwegian University of Science and Technology, 1993.
- [11] 邵莉,韩吉田,潘继红.R-134a 在水平直管和螺旋管内凝结换热特性的实验研究[J].制冷学报,2007,28(2):23-26.  
SHAO Li, HAN Jitian, PAN Jihong. Condensation heat transfer of R-134a in horizontal straight and helically cooled tubes [J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(2):23-26.
- [12] ANANIEV E P, BOYKO L D, KRUSHILIN G N. Heat transfer in the presence of steam condensation in a horizontal tube [C]//International Heat Transfer Conference. 1961:290-295.
- [13] BOYKO L D, KRUSHILIN G N. Heat transfer and hydraulic resistance during condensation of steam in a horizontal tube and in a bundle of tubes [J]. Heat Mass Transfer, 1967, 10(3):361-373.
- [14] 郑水华,牟介刚,范文繁,等.螺旋管内气液两相流动阻力特性实验[J].农业机械学报,2013,44(11):87-90.  
ZHENG Shuihua, MU Jiegang, FAN Wencan, et al. Resistance characteristics experiment of two-phase flow in spiral pipe [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11):87-90.
- [15] 李广军,郭烈锦,高晖,等.螺旋管内油-水液液两相流型[J].化工学报,2000,51(2):239-242.  
LI Guangjun, GUO Liejin, GAO Hui, et al. Flow patterns of oil-water liquid-liquid two-phase flow in helically coiled tubes [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2000, 51(2):39-242.
- [16] 全国温度计量技术委员会.工业铂、铜热电阻检定规程:JJG 229—2010[S].2010.  
China Temperature Measurement Technology Committee. Verification regulation of industrial platinum and copper resistance thermometers: JJG 229—2010[S]. 2010.
- [17] DITTUS F W, BOELTER L M K. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1985(12):3-22.
- [18] GNIELINSKI V. New equation for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow [J]. Int Chem Engne, 1976(16):359-368.
- [19] MIKHEJEV M A. Heat transfer basis[M]. Berlin: VEB Technology Press, 1964:93-94.

(编辑 刘 彤)