

CO₂ 单管池沸腾换热实验研究

曲宏伟, 李敏霞, 马一太, 剧成成

(天津大学 中低温热能高效利用教育部重点实验室 天津 300072)

摘 要: 在 CO₂ 跨临界水-水热泵试验台添加池沸腾实验段, 进行 CO₂ 单管池沸腾换热实验, 用威尔逊分析法对实验数据进行处理。研究表明: CO₂ 池沸腾换热效果优于管内沸腾换热效果; 同时, 结合实验数据, 拟合在饱和压力 3.2 和 3.4 MPa 下的 CO₂ 池沸腾换热系数与热流密度和对比压力之间的关联式。

关键词: CO₂; 池沸腾换热; 预测关联式

中图分类号: TB61+2 文献标识码: A

引 言

CO₂ 由于其蒸发压力高 (2.0 ~ 6.0 MPa), 比热以及容积换热量大, 其更适用于小管径的换热器。但是 CO₂ 在管内流动时, 容易发生干涸现象, 导致换热效果恶化。同时, 制冷剂中存在的润滑油, 也会对小管径的沸腾换热产生重大影响, 使得换热系数剧烈下降^[1]。

由于 CO₂ 沸腾换热压力高, 存在蒸发器制造密封性、安全性等难点, 当前对 CO₂ 池沸腾换热的研究并不多^[2-9]。本研究通过 CO₂ 跨临界水-水热泵试验台, 对蒸发器的改进, 测得不同温度下换热系数随热流密度的变化规律。

1 CO₂ 池沸腾实验

1.1 实验系统

实验系统是由 CO₂ 跨临界循环系统、水循环系统、数据采集系统组成, 如图 1 所示。CO₂ 跨临界循环系统主要包括压缩机、油分离器、气体冷却器、节流阀门、管外池沸腾换热实验段、蒸发器、气液分离器等装置组成。工作过程中, 从压缩机中出来的高温高压 CO₂ 气体进入油分离器, 将 CO₂ 中的润滑油分离出来回到压缩机中, CO₂ 气体进入气体冷却器与水循环系统中的冷却水进行热交换, 变成常温高

压的 CO₂ 气体, 然后经过节流降压变成低温低压的 CO₂ 两相混合物, 进入到管外池沸腾换热段和原来的蒸发器, 与冷冻水换热后进入气液分离器, 气态 CO₂ 进入压缩机中完成循环。

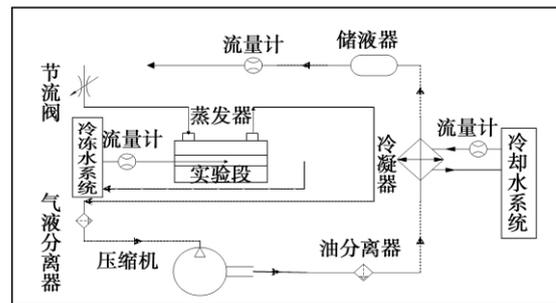


图 1 实验系统原理图

Fig. 1 Schematic drawing of the test system

实验管为 $\phi 19.1 \times 1.4$ mm 的光滑紫铜管, 有效长度为 830 mm, 表面粗糙度为 $0.3 \mu\text{m}$ 。实验段外套管 $\phi 90 \times 10$ mm 的无缝钢管, 如图 2 所示。CO₂ 液体从底部进入到套管中, 饱和蒸气从套管顶部出来。为了方便更换换热管, 换热管两端均采用法兰连接。同时, 为了能够认识了解池沸腾换热的动态特性, 外套管装上两对视镜。视镜为 $\phi 32$ mm, 厚度为 25 mm 的石英玻璃制作, 每对视镜呈 90° 布置, 以方便观察。因为池沸腾换热过程中外套管也存在与外界环境换热, 因此, 必须对外套管进行保温处理, 实验采用厚度为 20 mm 的橡胶套管进行保温。同时, 系统中凡是存在与外界进行热交换的位置和管道也都包围橡胶管。

实验过程中需要对冷冻水的温度、冷冻水的流量、实验段 CO₂ 两相流体的温度、压力以及管壁温度进行测量。冷冻水的温度通过在进入实验段之前、离开实验段位置上布置铠装热电偶测量; 冷冻水流量通过 LXSC-15E 转子流量计测量; 压力采用

收稿日期: 2011-10-31; 修订日期: 2011-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50976075)

作者简介: 曲宏伟 (1986-) 男, 山东烟台人, 天津大学硕士研究生。

BP800 压力变送器进行测量。实验段需要测量饱和 CO₂ 液体的温度、饱和 CO₂ 气体的温度以及管壁的温度。饱和液体和饱和气体的温度是通过外径 1.5 mm 的 T 型铠装热电偶测量,在外套管上钻一小孔,将热电偶直接插入到 CO₂ 液体和气体中,插入深度为 12 mm。每个环形区域布置 3 个热电偶,两个位于液体中,一个位于气体中。如图 3 所示。

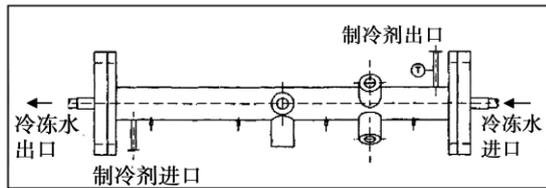


图 2 测试段装置

Fig. 2 Device in the testing section

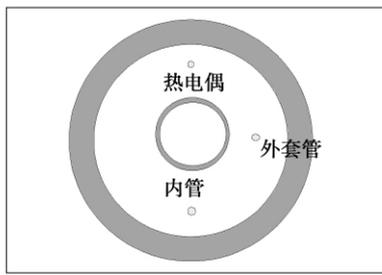


图 3 CO₂ 温度的测量

Fig. 3 Temperature measurement of CO₂

对于管壁温度的测量,是通过在管壁外表面上凿一小凹坑,将热电偶触点埋入并用锡焊焊严。沿管子轴向布置四个区域,测量这 4 个区域的温度变化情况,每个区域沿圆周布置 3 个测点,分布于上、中、下,如图 4 所示。

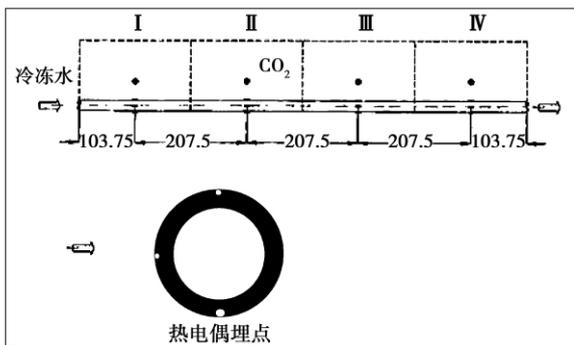


图 4 管壁温度的测量

Fig. 4 Temperature measurement of the tube wall

实验所用热电偶都为 0.15 mm 的 T 型铠装铜-康铜热电偶。实验前都通过恒温水浴进行标定。实验中,待系统运行稳定后,保持实验段温度和压力不变,调节冷冻水流量或冷冻水进口温度,改变热流密度,运行一段时间各个数值基本稳定后,开始采集数据。通过对不同热流密度下的温度的数据的整理,计算换热系数。

1.2 数据处理

实验中因为外套管外包裹了保温橡胶,所以忽略外套管与外界环境的热交换,近似认为 CO₂ 液体只与管壁间存在热交换,且换热量全部为水的换热量。

冷冻水换热量为:

$$Q = cm\Delta T \tag{1}$$

式中: c —水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; m —水流量, kg/s ; ΔT —水进出管温差, $^{\circ}\text{C}$ 。

热流密度为:

$$q = Q/\pi dL \tag{2}$$

式中: d —测试管管径, μm ; L —管长, μm 。

CO₂ 液体温度为每个测量单元所有测点温度的平均值:

$$T = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 T_i \tag{3}$$

管壁温度为每个测量单元所有测点温度的平均值:

$$T' = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 T'_i \tag{4}$$

制冷剂 CO₂ 换热系数:

$$\alpha = q/(T' - T) \tag{5}$$

2 实验结果及讨论

池沸腾换热系数不仅与热流密度相关^[4],还与实验压力有关,这个压力通过对比压力(工作压力与临界压力的比值)来体现,池沸腾换热系数的关联式的通用形式为: $h = cq^m (p/p_c)^n$,关键是确定常数 c 、 m 、 n 的值。本研究通过 EXCEL 多元非线性回归方法对数据进行处理,得到: $h = 9.631q^{0.447} (p/p_c)^{0.895}$ 。换热系数随热流密度的变化如图 5 所示。将该关联式分别与实验数据进行比较后发现,最大偏差为 3%,满足实际工程操作的要求。

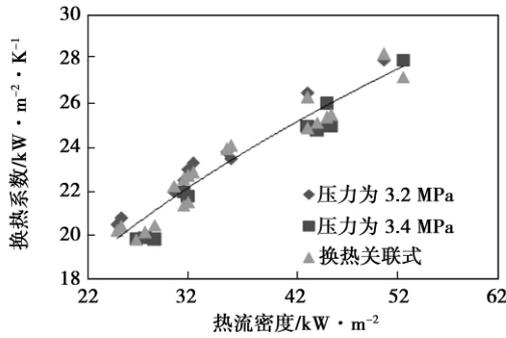


图5 压力为3.2、3.4 MPa时，
换热系数随热流密度的变化

Fig. 5 Change of the heat exchange coefficient with
the heat flux density at 3.2 and 3.4 MPa

3 结 论

(1) CO₂管外池沸腾换热实验对系统安全性和密封性等要求很高，系统的安装设计必须考虑全面；

(2) CO₂管外池沸腾不存在干涸问题，换热效果优于管内流动沸腾换热，具有较好的理论研究意义和工程应用背景；

(3) 通过 EXCEL 多元非线性拟合对 CO₂常用蒸发压力 3.2 和 3.4 MPa 下的实验数据的整理，拟合出相关的实验关联式 $h = 9.631q^{0.447} (p/p_c)^{0.895}$ ，与实验数值最大偏差为 3%，为 CO₂池沸腾换热满液式蒸发器的设计提供参考。

参考文献:

- [1] Katsuta M, Kinpara H, Yagi S. The effect of oil contamination on evaporative heat transfer characteristics of CO₂ refrigerant cycle. In [C]//The 2nd Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning, Beijing 2004: 332 - 340.
- [2] Loeb S, Kraus W E, Quack H. Pool boiling heat transfer of carbon dioxide on a horizontal tube [J]. International Journal of Refrigeration 2005 28: 1196 - 1204.
- [3] Dieter Gorenflo, Stephan Kotthoff. Review on pool boiling heat transfer of carbon dioxide [J]. International Journal of Refrigeration 2005 28 (8): 1169 - 1185.
- [4] Stephan K, Abdelsalam M. Heat - transfer correlations for natural convection boiling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 1980 23(1): 73 - 87
- [5] Nishikawa K, Fujita Y, Uchida S. Effect of the surface roughness on the nucleate boiling heat transfer over a wide range of pressure [C]//Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, Munich West Germany, 1982.
- [6] Cooper M G. Heat flow rates in saturated nucleate pool boiling—a

wide - ranging examination using reduced properties [J]. Advances in Heat Transfer 1984 16: 157 - 239.

- [7] Leiner W. Heat transfer by nucleate pool boiling—general correlation based on thermodynamic similarity [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 1994 37(5): 763 - 769.
- [8] Jung D, Kim Y, YOUNGHWAN KO, et al. Nucleate boiling heat transfer coefficients of pure halogenated refrigerants [J]. International Journal of Refrigeration 2003 26: 240 - 248.
- [9] Gorenflo D, Chandra U, Kotthoff S, et al. Influence of thermo - physical properties on pool boiling heat transfer of refrigerants [J]. International Journal of Refrigerant 2004 27: 492 - 502.

(丛敏编辑)

· 书 讯 ·

《船舶工程技术手册》

(运行 - 监控 - 维护保养)

本手册旨在为业界人士提供切实有效的技术解决方案。手册共分 13 个章节，内容涉及轮机制造、动力推进、导航、船舶电站、检测与控制、保障与废弃物排放、空调与通风、船舶制造、消防与安全救生、船舶维护、船损分析以及相关的管理条例与标准文献等方面。主要章节：

- 第 1 章 机械设备
- 第 2 章 动力技术
- 第 3 章 电气系统、发电和配电
- 第 4 章 测量、控制和调节技术
- 第 5 章 供给和废物处理装置
- 第 6 章 制冷、空调和通风
- 第 7 章 货物装卸装置
- 第 8 章 船舶建造
- 第 9 章 消防、安全和救生装置
- 第 10 章 维护保养
- 第 11 章 部件损伤
- 第 12 章 规范
- 第 13 章 换算系数

作者：汉斯海因里希·迈尔 - 彼得，弗兰克·伯恩哈德

上海交通大学出版社出版

出版时间：2009 年 11 月

brings about an increase of the resistance to the flow inside. Through a multivariable linear regression a statistical correlation formula for Nu and f of a tube with a twisted tape was formulated through a fitting offering a theoretical basis for design and modification of a heat exchanger. **Key words:** twisted tape, spiral coil, Nusselt Number, resistance factor, heat transfer

CO₂单管池沸腾换热实验研究 = **Experimental Study of the Boiling-based Heat Exchange of Carbon Dioxide in a Pool Equipped with a Single Tube** [刊, 汉] QU Hong-wei, LI Min-xia, MA Yi-tai, JU Cheng-cheng (Thermal Energy Research Institute, Tianjin University, Tianjin, China, Post Code: 300072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). - 439 ~ 441

In the boiling-based test section of a filling pool of a CO₂ trans-critical water-water heat pump test stand, tested was the boiling-based heat exchange of carbon dioxide in the pool with the test data being processed by using the Wilson analytic method. The test results show that the boiling-based heat exchange effectiveness in the CO₂ pool is superior to that in the tube. In the meantime, on the basis of the test data, the correlation formulae for the boiling-based heat exchange coefficient, heat flux density and contrast pressure of the CO₂ pool at the saturation pressure 3.2 MPa and 3.4 MPa were obtained through a fitting. **Key words:** carbon dioxide, boiling-based heat exchange in a pool, predictive correlation formula

Micro-PIV 三维测量图像处理及优化研究 = **Study of the Processing and Optimization of Micro-PIV-based Three-dimensional Measurement Images** [刊, 汉] WANG Ling, LUO Rui, WANG Bu-xuan (Laboratory on Phase Change and Interface Transfer Phenomena, Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). - 442 ~ 448

Micro-PIV is an important micro-scale flow velocity measurement technology, capable of acquiring the speed of tracer particles and plotting a flow field of the fluid. On the basis of the currently available microscopic measurement technologies in the laboratory, the authors developed a Micro-PIV three-dimensional measurement image processing technology and conducted an optimization and corrected optimization of the image processing. The key to the precision of the two-dimensional coordinates of the particle image centers lies in the matter how to identify and locate the particles according to the main characteristics of the image centers. A three-dimensional identification of fluorescent particles is based on the diffraction images of the particles, which change with the defocus distance, and a Micro-PIV