

天舟一号空间冷凝实验装置地基冷凝实验^{*}

晏 硕 王许稳 刘秋生 朱志强

(中国科学院力学研究所 北京 100190)

摘 要 天舟一号 (TZ-1) 蒸发与冷凝实验装置地面科学匹配实验是优化空间实验参数与两相试验系统技术参数的重要环节. 通过地面科学匹配冷凝实验, 控制冷凝实验输入条件, 观察条件变化给非稳态冷凝换热带来的影响, 可为空间实验数据处理提供修正依据. 实验内容主要包括: 改变冷凝台和蒸气温度, 获得换热系数随时间变化的规律, 从而指导空间实验数据采集和液池加热; 通过实验验证蒸气压力对液膜换热系数的影响. 实验还证明了冷凝台温度、蒸气温度、抽气压力等对换热系数也都有很大影响. 地面科学匹配实验对于完善实验装置、优化工况与实验参数以及提高实验可靠性具有指导意义.

关键词 地面匹配, 两相流动, 冷凝实验, 换热系数

中图分类号 V 524

Ground-based Experimental Results of TZ-1 Matching Scientific Condensation Experiment

YAN Shuo WANG Xuwen LIU Qiusheng ZHU Zhiqiang

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*)

Abstract TZ-1 ground matching experiment is important to optimize the space science experiment parameters and technical parameters of two-phase test system. The correctional data for space experiment can be provided through scientific matching condensation experiments on the ground by observation of the influence of condensation experiment condition change on the unsteady condensing. The experiment mainly includes: changing condensing units and steam temperature, to obtain the rule of temporal change so as to guide the space experiment data acquisition and liquid pool heating; validating the influence of steam pressure on the liquid film heat transfer coefficient. Through a series of experiments, it can be seen that the condensation temperature, vapor temperature, extraction pressure also have great impact on the heat exchange coefficient, and at the same time, TZ-1 ground matching experiment has high guiding significance to improve the experiment device, optimize the condition and experimental parameters and improve the reliability.

Key words Ground matching experiment, Two phase flow, Condensation experiment, Heat transfer coefficient

^{*} 国家自然科学基金项目 (11532015), 载人航天工程空间应用系统“天舟一号”货运飞船科学实验项目 (TZYY08001) 和中国科学院战略性先导科技专项 (XDA04077800) 共同资助
2015-11-10 收到原稿, 2016-04-11 收到修定稿
E-mail: yanshuo@imech.ac.cn. 通信作者刘秋生, E-mail: liu@imech.ac.cn

0 引言

冷凝是相变换热过程的基本形式之一,也是空间两相应系统中比较经典的传热方式.对于冷凝实验,根据工质和冷凝表面材质以及几何形状的不同,观察到的冷凝液体可能是连续液膜,也可能是聚合液滴,前者称为膜状凝结,是很普遍的凝结方式,后者称为珠状凝结,具有很高的凝结率.在大多工业冷凝器中,凝结方式都是膜状凝结.虽然珠状凝结换热系数比其他条件相同的膜状凝结大几倍甚至几十倍,但珠状凝结难于保持^[1].

对于膜状凝结,影响其换热系数的因素有过冷度、不凝气体的比例、蒸气流速、蒸气过热度、凝结表面几何形状等.对于蒸气侧,不凝气体的比例、蒸气与不凝气体的流动情况(例如自然对流与强制对流)以及蒸气过热度对冷凝换热均有影响.对于冷凝台侧,液膜的情况、凝结表面的几何形状以及冷凝台的过冷度对冷凝换热都有影响^[2-3].为得到准确的冷凝换热关系以及各参数、装置对冷凝速率和换热系数的影响,考虑减小测量装置和冷凝台本身的影响.因此在地基实验中提出以下实验方案.

(1) 对应于空间冷凝工况,改变液池空间不凝气体的比例,观察其对非稳态冷凝换热的影响.

(2) 对应于空间冷凝工况,改变液池空间内蒸气

的温度,观察其对非稳态冷凝换热的影响.

(3) 对应于空间冷凝工况,改变地基实验中的水浴温度,控制改变冷凝台的温度,观察其对非稳态冷凝换热的影响.

1 实验装置与原理

1.1 实验装置

采用与 TZ-1 初样件相匹配的地面冷凝实验系统,包括封闭液池、两相回路、高清 CCD、蒸气发生器、水浴、APS 压力传感器、PID 温控装置.实验装置的工作原理如图 1 所示.封闭液池尺寸为 $180\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 75\text{ mm}$.工质通过蒸气发生器进行加热,通过管路进入液池,液池底部装有冷凝台.冷凝台面观测直径为 20 mm ,冷凝台与水浴连接,通过水浴降低冷凝台温度使注入的蒸气在冷凝台面冷凝,透过液池上盖的玻璃可用模拟 CCD 进行实验观测,CCD 分辨率为 1280×1024 .冷凝台表面材料为不锈钢,依次经 $800\#$, $1200\#$, $1500\#$, $2000\#$ 砂纸打磨光滑.在冷凝台面和液池内部几个关键位置接有热流量传感器和热电偶,用于在实验过程中对热流量和温度等参数进行采集.地基冷凝实验装置与实验液池实物如图 2 所示.

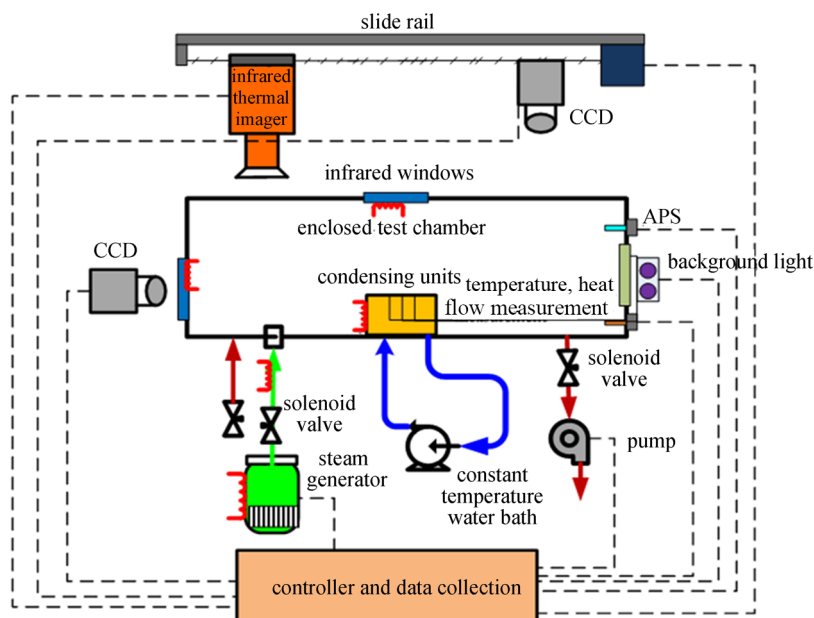


图 1 实验装置工作原理

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

1.2 实验原理

基于地面实验工况, 进行如下假设.

- (1) 液膜为层流, 物性参数恒定;
- (2) 蒸气处于均匀稳定状态, 无强制对流;
- (3) 气液交界面切应力可忽略.

根据热流量传感器测出的热流密度和热电偶测出的蒸气、冷凝台温度, 可以求出换热系数^[4], 即

$$q_s'' = h_s(T_v - T_s). \quad (1)$$

式中, q_s'' 为热流量, 单位 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; h_s 为换热系数, 单位 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; T_v 为蒸气温度, 单位 K; T_s 为冷凝台温度, 单位 K.

在对已有的冷凝相变流体对流和流体界面稳定性研究基础上^[5-7], 以 HFE-7100 为工质设计科学实验方案, 进行地基实验研究, 揭示冷凝在相变过程中对热质传输规律的影响. 具体实验过程为: 抽气泵将能承压的液池抽到实验所需压力进行保压, 之后将工质注入蒸气发生器, 热电偶实时监测蒸气温度, 通过阀门与液池压力表的反馈控制蒸气注入量; 蒸气注入后, 打开事先调节好的循环水浴, 对冷凝台进行降温, 使注入的蒸气在冷凝台面冷凝; 通过数据采集系统对数据进行采集, 同时采用高清 CCD 对实验进行观测. 为避免蒸气在壁面及观测窗口冷凝, 影响观测及实验结果, 对液池外壁采取了适当加热措施, 通过 PID 反馈可对加热温度进行调节.

选取 HFE-7100 为工质, 其表面张力小, 粘度低, 热物性质与目前空间热流体实验使用较多的 FC-72 相似, 以便于与其他工质结果^[8-9]相比较. HFE-7100 物理化学性质列于表 1.

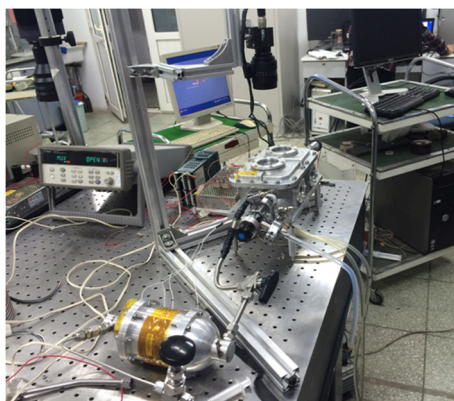


图 2 冷凝实验装置实物

Fig. 2 Condensation experiment system

2 实验研究内容

本次地基实验分别分析了水浴温度、蒸气温度、抽气压力对冷凝换热系数的影响.

2.1 水浴温度对换热系数的影响

对于本次地基实验装置, 水浴与冷凝台相连, 通过调节水浴温度, 达到控制冷凝台温度的目的, 观察不同水浴温度下冷凝换热的区别, 实验结果列于表 2.

剔除较大误差项, 计算各工况换热系数, 结果如图 3 所示. 由图 3 可以得出水浴温度变化对换热系

表 1 HFE-7100 物理化学性质

Table 1 Physical and chemical properties of HFE-7100

化学式	$\text{C}_4\text{F}_9\text{OCH}_3$
分子量	250
沸点/ $^{\circ}\text{C}$	61
冰点/ $^{\circ}\text{C}$	-135
液体密度	1.52
表面张力	13.6
水中溶解性	12
融水能力	95

表 2 不同水浴温度下的实验参数

Table 2 Experimental parameters under different temperature of cooling water bath

工 况	水浴 温度/ $^{\circ}\text{C}$	蒸气 温度/ $^{\circ}\text{C}$	压力/kPa	
			抽蒸气	注蒸气
1	5.4	40.6	28.0	32.6
	5.7	40.5	28.1	32.3
	5.5	40.5	28.1	32.4
2	6.3	40.8	28.0	32.0
	6.4	40.8	28.0	32.2
	6.2	40.7	28.0	32.1
3	7.1	40.7	28.0	32.0
	7.3	40.7	28.0	32.4
	7.1	40.6	28.0	32.1
4	8.3	40.6	28.0	32.3
	8.1	40.6	28.0	32.3
	7.1	40.6	28.0	32.1

数有直接影响, 而且在峰值处, 水浴温度低的冷凝换热系数比高的换热系数大, 趋于平稳时, 换热系数由蒸气与冷凝台面温差主导.

2.2 蒸气温度对换热系数的影响

为保证注入蒸气达到目标值, 在液池底部设有加热片, 并在液池内部和壁面贴有热电偶作为反馈信号通过 PID 对加热片进行控制, 液池内部在蒸气入口设有热电偶, 对蒸气温度进行测量. 实验结果列于表 3.

表 3 不同蒸气温度下的实验参数

Table 3 Experimental parameters under different vapor temperature

工 况	水浴 温度/°C	蒸气 温度/°C	压力/kPa	
			抽蒸气	注蒸气
1	40.2	5.4	28.3	32.6
	41.0	5.2	28.3	32.3
	40.1	5.4	28.5	32.7
2	43.8	5.2	28.4	32.8
	44.0	5.3	28.3	32.7
	44.2	5.2	28.3	32.7
3	45.3	5.2	28.1	32.3
	45.1	5.4	28.1	32.4
	45.3	5.5	28.1	32.6
4	47.3	5.2	28.3	32.6
	47.0	5.4	28.3	32.7
	47.4	5.3	28.3	32.5

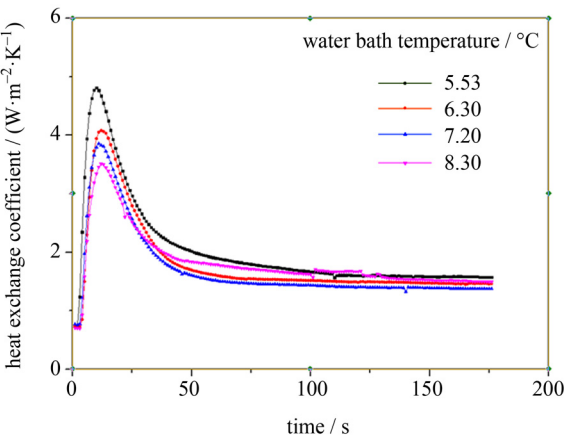


图 3 水浴温度对换热系数的影响

Fig. 3 Influence of the water bath temperature on heat exchange coefficient

去除较大误差项, 计算各工况换热系数, 结果如图 4 所示. 由图 4 可知, 在冷凝过程中, 在换热系数峰值处, 蒸气温度高的工况换热系数也相应较大, 实验趋于平稳时, 蒸气温度对换热系数的影响呈现不规则状态.

2.3 抽气压力对换热系数的影响

在蒸气注入前, 通过抽气泵将液池抽负压后进行冷凝实验, 观察不同抽气压力对冷凝换热的影响. 实验结果列于表 4.

整理并计算各工况换热系数, 结果如图 5 所示. 由图 5 可知, 改变冷凝液池内的压力对峰值处的换热系数也有直接影响, 液池内压力值越大, 冷凝实验过程换热系数越小.

表 4 不同抽气压力下的实验参数

Table 4 Experimental parameters under different pumping pressure

工 况	抽蒸气 压力/kPa	水浴 温度/°C	蒸气 温度/°C	注蒸气 压力/kPa
1	28.0	5.2	40.5	32.6
	28.2	5.3	40.6	32.2
	28.6	5.2	39.6	33.2
2	30.1	5.2	40.7	34.7
	30.1	5.2	40.7	34.2
3	36.1	5.2	40.4	40.9
	36.0	5.3	40.7	40.2
	36.3	5.2	40.7	39.9

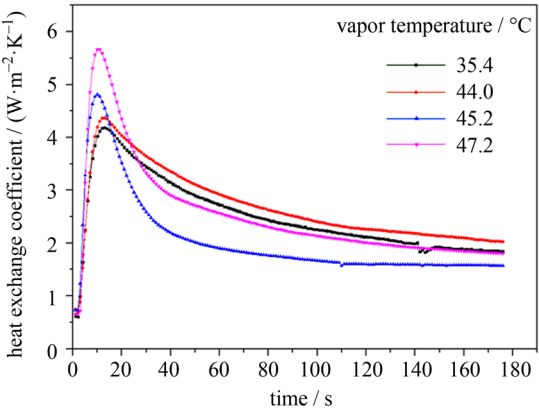


图 4 蒸气温度对换热系数的影响

Fig. 4 Influence of vapor temperature on heat exchange coefficient

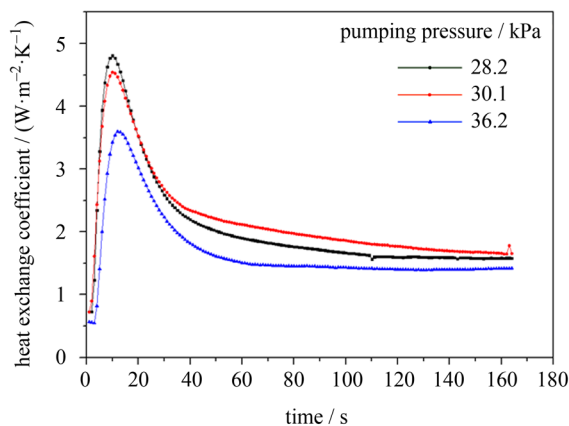


图 5 抽蒸气压力对换热系数的影响

Fig. 5 Influence of pumping pressure on heat exchange coefficient

3 结论

实验研究结果表明 TZ-1 空间冷凝实验方案正确可行, 地基实验发现了以下冷凝特征和现象: 随着冷凝实验进行, 换热系数先急剧增加, 随后缓慢减少最后趋于平稳且不为 0 (关闭水浴后趋近于 0); 冷凝过程中换热系数达到峰值时蒸气温度高的工况换热系数也相应较大; 冷凝过程中液池初始抽气压力值越大, 冷凝实验过程换热系数则越小; 冷凝过程中换热系数达到峰值时, 水浴设定温度越小, 则换热系数越大。

参考文献

[1] MA X H, WANG L, CHEN J B, *et al.* Condensation

heat transfer of steam on vertical dropwise and filmwise co-existing surfaces with a thick organic film promoting dropwise mode [J]. *Exp. Heat Trans.*, 2003, **16**: 239-253

[2] SHAH M M. A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1979, **22**(3): 547-556

[3] PATI S, KAUSHIK P, CHAKRABORTY S, *et al.* Film condensation in presence of non-condensable gases: interplay between variable radius of curvature and interfacial slip [J]. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 2014, **56**: 31-36

[4] YANG Shiming, TAO Wenshuan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006 (杨世铭, 陶文栓. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006)

[5] WANG Xuwen, LIU Qiusheng, ZHUZhiqiang, CHEN Xue. Experiments of transient condensation heat transfer on the heat flux sensor [J]. *Microgravity Sci. Technol.*, 2015, **27**: 369-376

[6] LEE H, MUDAWAR I, HASAN M M. Experimental and theoretical investigation of annular flow condensation in microgravity [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2013, **61**: 293-309

[7] TANG G H, HU H W, ZHUANG Z N, TAO W Q. Film condensation heat transfer on a horizontal tube in presence of a noncondensable gas [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2012, **36**: 414-425

[8] KONDOU C, HRNJAK P. Condensation from superheated vapor flow of R744 and R410A at subcritical pressures in a horizontal smooth tube [J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 2012, **55**: 2779-2791

[9] SON C H, OH H K. Condensation heat transfer characteristics of carbon dioxide in a horizontal smooth tube [J]. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2012, **36**: 233-241