

R134a 水平管内流动凝结 换热的实验研究

李沛文 陈 民 陶文铨

(西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049)

关键词 R134a, 凝结换热, 关联式

1 引 言

为了保护地球大气环境, 在制冷、空调及热泵中应用对大气臭氧层无破坏作用的新工质是全球性的紧迫任务。目前, 比较一致地认为, R134a 是最有可能替代 R12 的新工质。但是关于 R134a 的传热性能的研究还不够充分, 尤其是对凝结换热, 一些现有的关联式还不能很有把握地推广应用于 R134a, 还必须进行大量的研究工作, 以查明 R134a 的传热特性。

Eckels 于 1991 年曾测量了蒸汽干度从 0.8 到 0.1 的范围内 R134a 在水平管内的平均凝结换热系数^[1]。结果表明, R134a 的平均凝结换热系数比 R12 的高约 25~35%, 并且指出, Shah、Traviss、Cavallini 三个关联式的预测值与其实验值的偏差为 $\pm 25\%$ 。但是 Eckels 的实验数据不足 20 个, 以其来评价关联式的准确度是不够充分的。此外, 关于水平管内凝结换热的关联式还有 Akers、Tandon、Boyko 等提出的公式^[2~4], 有必要对这些公式预测的准确度也加以比较, 以便选择较好的换热系数计算式。Torikoshi 对 R134a、R32 和 R32/R134 在水平管内的平均换热系数也进行了实验研究^[5], 其结果表明, 在相同温度及质量流速下, R134a 和 R32 的平均换热系数比 R22 的平均换热系数分别高 10% 和 65%。需要说明的是, 上述两文中都只获得了对整个实验段平均的凝结换热系数, 实验中没有测量凝结管的壁面温度。因此, 总的来说, 关于 R134a 的凝结换热研究是很不充分的, 尤其缺乏局部换热系数资料。为了克服上述不足, 我们对 R134a 在水平管内凝结换热的局部平均特性进行了实验研究, 得到了 518 个局部平均换热系数实验数据。在此基础上对现有的关联式进行了比较充分的评价, 选择了对 R134a 凝结换热系数预测准确度最好的 Boyko 公式推荐做为冷凝换热器设计的公式。

2 实验系统与方法

图 1 是实验系统图, 由实验段、制冷剂回路及冷却水回路三个主要部分组成。其中实验段由 10 个局部段构成, 制冷剂在内径为 11 mm、壁厚 2 mm 的紫铜管内流动, 冷却水在套管与紫铜管之间的环形空间内沿逆流方向流动。通过测量冷却水的流量和其经过每个局部实验段后温差就可以求得制冷剂经过一个局部段的换热量。制冷剂回路主要

本课题受到陕西自然科学基金及西安交大动力工程多相流国家重点实验室基金的资助。
本文曾于 1995 年 10 月在宜昌召开的中国工程热物理学会传热传质学学术会议上宣读。

由贮液器、循环泵、蒸发器、实验段及冷凝器组成，其中制冷剂流量由旋转活塞式流量计测量，其基本误差为 0.5%。制冷剂的压力由精度为 0.25 级的压力表测量，紫铜管外壁面温度由布置在管壁上的热电偶测量。冷却水回路由冷水箱、冷凝器、水泵、实验段夹套及连接管路组成，其中冷水箱内的冷水由空气冷却塔提供，冷却水的质量流量通过称重法测量。

局部凝结换热系数由下式计算：

$$h_{loc} = q_{loc} / (T_{sat} - T_{wi})$$

其中 q_{loc} 为实验段的局部热流密度，根据水侧的换热量计算得到； T_{sat} 为管内制冷剂的饱和温度，根据测得的管内制冷剂的饱和压力计算得到； T_{wi} 为实验段内管壁温度，是由实验测得的外管壁温度根据一维导热方程推算得到的。

实验系统的热平衡计算表明，制冷剂的释热量与冷却水吸热量之间的偏差最大不超过 8%。由实验数据的不确定性分析得出，在中等热流密度和中等质量流速下，热流密度的不确定度为 4.2%；局部冷凝换热系数的不确定度为 6.8%。

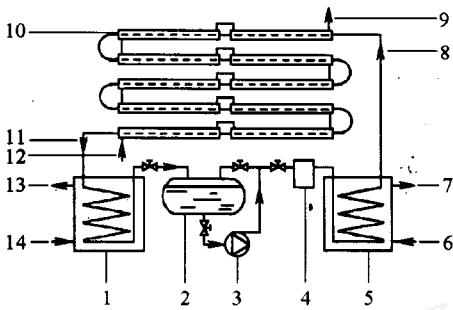


图 1 实验系统示意图

- 1 冷凝器 2 贮液器 3 循环泵 4 流量计
5 蒸发器 6 热水进 7 热水出 8 制冷剂进
9 冷水出 10 实验段 11 制冷剂出
12 冷水进 13 冷水出 14 冷水进

3 实验结果及讨论

3.1 局部冷凝换热系数随无量纲冷凝长度及质量含汽率变化的规律

图 2、3 是 R134a 在同一冷凝温度、不同质量流速时，局部 Nusselt 数随无量纲冷凝长度和质量含汽率的变化过程。可以看出，随着无量纲冷凝长度的增加和质量含汽率的降低，局部凝结换热系数下降。在质量流速较大的工况下，在无量纲冷凝长度的前部分局部换热系数下降较快，后半部分则趋缓。而对质量流速小的工况，局部换热系数

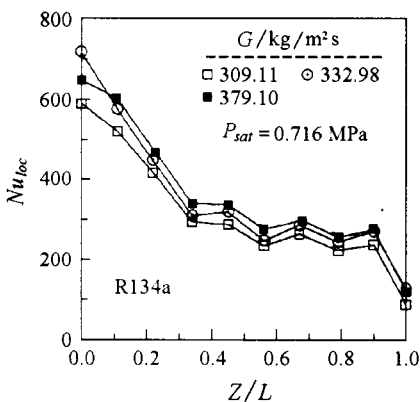


图 2 局部 Nusselt 数随无量纲冷凝长度的变化

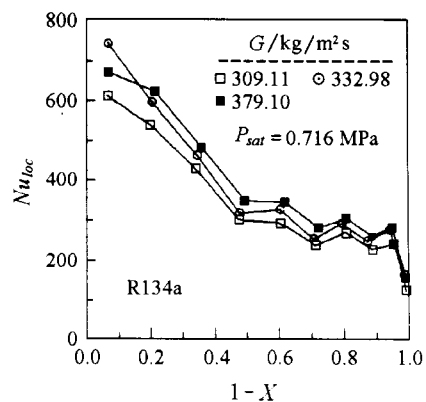


图 3 局部 Nusselt 数随质量含汽率的变化

并不急剧下降。这说明,质量流速较高时,凝结起始段雾状流持续的过程较长。在本文实验的大多数条件下,环状流占冷凝过程的主要部分,因此,局部冷凝换热系数随冷凝长度的下降速率是比较均匀的。另外,由图 2 和图 3 可见,凝结过程中冷凝无量纲长度和凝结液的质量百分比并非呈线性增长。

3.2 一些关联式对 R134a 凝结换热系数预测值的准确度

在质量流速为 $250 \sim 510 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 冷凝温度从 27 到 35°C ; 饱和压力从 0.716 到 0.886 MPa 的范围内,本文进行了 56 个工况下的冷凝换热实验,获得了 518 个局部平均换热系数实验值。以此为基础,对现有关联式预测 R134a 凝结换热系数的准确度做出评价。用 Akers 公式计算的冷凝换热系数与实验值的偏差集中表现为负偏差,显然,该公式是偏于保守的。Boyko 公式的预测值与实验值的比较如图 4 所示。有 80% 的预测值与实验值的相对偏差不超过 $\pm 35\%$,且偏差的正负分布比较均匀。这说明,用 Boyko 公式计算 R134a 在水平管内分段平均冷凝换热系数是令人满意的。Traviss 公式的预测值偏高于实验值,且主要表现为较大的正偏差,这一现象也曾有报道^[3]。Shah 公式对 R134a 冷凝换热系数的预测准确度较 Traviss 公式要好,有 73% 的预测值与实验值的相对偏差不超过 $\pm 35\%$,偏差的分布见图 5。Cavallini 公式的预测值主要地表现为正偏差,偏差的范围较 Traviss 公式稍小一些。Tandon 在 1985 年提出了 Akers 公式的改进型,其计算值与实验值比较,偏差的范围在 $\pm 35\%$ 之内,但仍主要表现为负偏差。1986 年 Kaushik 也曾提出了一个水平管内凝结换热的关联式^[6],但其预测值严重地偏离本文的实验值。综上所述,七个现有关联式中,Boyko 公式预测 R134a 水平管内冷凝换热系数的准确度最好,而且 Boyko 公式的形式比较简单,用做冷凝换热器的设计公式是合适的。

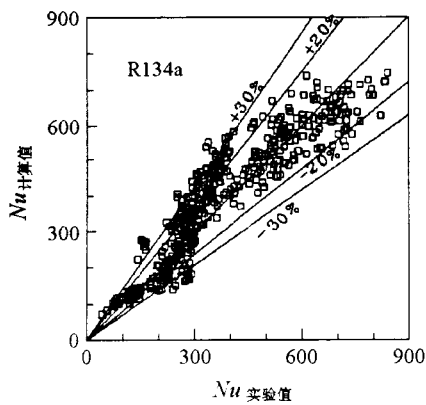


图 4 Boyko 公式的预测值与实验值的比较

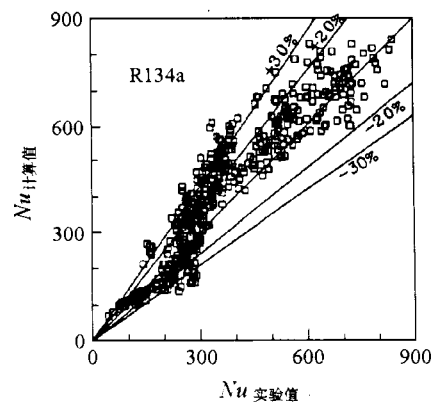


图 5 Shah 公式的预测值与实验值的比较

4 结 论

本文对 R12 的替代工质 R134a 在水平管内强迫流动冷凝换热进行了实验研究,在质量流速为 $250 \sim 510 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的范围内测量了局部凝结换热系数。以获得的 518 个局部平均换热系数为基础,对现有的七个关联式进行了评价,建议选择 Boyko 公式做为 R134a 在水平管内强迫流动冷凝换热的计算关联式。

参 考 文 献

- [1] Eckels S J, Pate M B. An Experimental Comparison of Evaporation and Condensation Heat Transfer Coefficients for HFC-134a and CFC-12. *Int. J. Refrig.*, 1991, 14(2): 70-77
- [2] Akers W W, Rosson H F. Condensation Inside a Horizontal Tube. *Chem. Eng. Progress, Symp. Ser.*, 1960, 56(30): 145-149
- [3] Tandon T N, Varma H K, Gupta C P. An Experimental Investigation of Forced-Convection Condensation During Annular Flow Inside a Horizontal Tube. *ASHRAE Trans.*, 1985, 91(1A): 343-354
- [4] Boyko L D, Kruzhilin G N. Heat Transfer and Hydraulic Resistance During Condensation of Steam in a Horizontal Tube and in a Bundle of Tubes. *IJHMT*, 10(2): 361-373
- [5] Torikoshi K, Ebisu T. Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of R134a, R32 and a Mixture of R32/R134a Inside a Horizontal Tube. *ASHRAE Trans.*, 1993, 99(2A): 90-96
- [6] Kaushik N, Azer N.Z. A General Heat Transfer Correlation for Condensation Inside Internally Finned Tubes, *ASHRAE Trans.*, 1988, 94(2): 261-279

AN EXPERIMENTAL STUDY ON FORCED-CONVECTIVE CONDENSATION HEAT TRANSFER OF R134A INSIDE A HORIZONTAL TUBE

LI Peiwen CHEN Min TAO Wenquan
(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract

An experimental study is reported on forced-convective condensation heat transfer of R134a inside a horizontal smooth tube, using a 13m long, 11mm inside diameter test tube. The refrigerant temperature varied from 27 to 35°C. The mass flux varied from 250 to 510 kg/(m²·s). The heat flux ranged from 4 to 28 kW/m². The vapor quality ranged from 1.0 to 0.0. The experimental results were compared with seven existing correlations. The correlation of Boyko has a reasonable agreement, and is suggested for use of R134a.

Keywords R134a, condensation, correlation