

二氧化碳在金属丝网的毛细动力学实验与分析^{*}

裴念强¹, 刘 杰², 郭开华¹, 李廷勋¹, 余国保¹

(1. 中山大学工学院, 广东 广州 510275)

2. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘 要: 二氧化碳 (CO_2) 作为制冷剂具有环保及良好的热力特性, 已经越来越受到重视, 并将率先应用在航天毛细驱动的两相循环冷却技术 (CPL) 和环路热管 (LHP) 中, 但是由于它的工作压力较高, 对其毛细动力特性研究还没有实验支持。文章的目标是通过实验测量 CO_2 在不锈钢丝网爬升的动态结果, 进行毛细上升的动力学分析, 并将实验结果与几个经典的公式进行比较, 找出最佳适用公式。

关键词: 二氧化碳; 毛细力; 毛细作用; 丝网

中图分类号: O351.2 文献标识码: A 文章编号: 0529-6579 (2007) 06-0131-04

自蒙特利尔议定书签订以来, 由于大多制冷剂有较高的温室效应指数 (GWP) 等缺点, 同时也担心这些化合物可能隐含着不可预知的潜在危险, 因此, 天然工质就引起人们极大关注。其中 CO_2 因具有良好的热力性能和环保特性, 尤其受到了重视^[1]。并且作为制冷工质, CO_2 不会因为受高能射线的激发产生二次辐射, 因此已经被美国、俄罗斯等国家用于航天两相冷却, 如热管技术、CPL、LHP^[2]。这些技术都涉及到流体在微细通道的动力学特性研究。然而, 在实际中, 由于 CO_2 液体为高压状态, 要想获得 CO_2 在微细通道上的动力学数据必须在耐压的密闭容器中进行实验, 且需要较好的控温环境, 对实验设备要求较高。因此现在国内外还没有进行过相应的实验研究。

实际应用中有许多的毛细结构可以作为微通道, 如烧结粉末、金属丝网、烧结纤维、微槽道等, 但是为了防止烧结粉末或纤维等有粉末脱落, 损坏两相系统中泵与阀门, 因此通常选择金属丝网作为毛细结构。

1 实验

1.1 实验设备 可视化压力容器由北京卫星厂设计加工 (如图 1 所示), 压力容器上部带有两个直径 5 mm 圆形玻璃视窗用于拍照。视窗下长条形液位计, 可以用于指示液位高度。容器内部高度 35 mm, 容器底部平台有调节旋钮, 可以调节水平。在压力容器的进口装有绝对压力传感器, 量程 10

MPa, 精度是满量程的 0.2%。在压力容器内部接有一个 Pt100 铠装铂电阻, 精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 用于测量底部的 CO_2 液体温度, 一个已标定的 OMAGA 热电偶 ($\pm 0.1^\circ\text{C}$) 用于测量上部丝网温度, 在测试丝网最上端贴有一个电加热片。整个压力容器放在 ESPAK 高低温环境气候箱内, ESPAK 环境气候箱可以提供 -40°C 到 $+75^\circ\text{C}$ 的温度范围, 控温精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

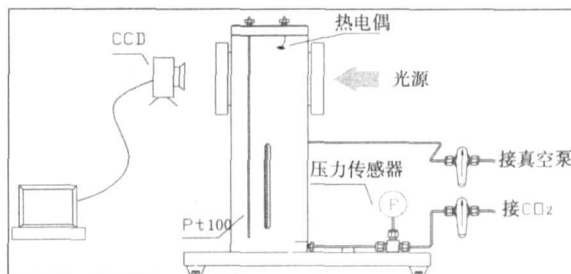


图 1 实验装置

Fig 1 Experimental installation

直流电源采用台湾茂迪直流电源, 解析度 10 mV, 用于电加热片及压力传感器供电。数据采集使用 Fluke2680A 多通道数据采集仪, 用来采集温度、压力信号及加热片的电流。 CO_2 在丝网上的爬升过程的监视及拍照采用 200 万像素 CCD 镜头使用日本 Computar 百万像素定焦镜头, 背光采用冷反射定向照明。实验用 CO_2 为 99.99% 纯度, 丝网

^{*} 收稿日期: 2007-04-26

基金项目: 广东省人民政府科技专项、科技部国际科技合作计划重点资助项目 (2003DF000050); 国家 973 计划前期研究专项资助项目 (2006CB708613); 广东省自然科学基金资助项目 (05003274)

作者简介: 裴念强 (1975 年生), 男, 博士研究生; 通讯联系人: 郭开华, E-mail: pein@2001@163.com

为 325×2 300 目 316 L 不锈钢密纹网。

1.2 实验步骤 首先, 将实验用丝网及夹具使用分析纯丙酮浸泡 4 h 然后 120 ℃烘箱内烘干 2 h 使用夹具将丝网垂直挂在容器内的顶盖上, 夹具上采用激光刻痕, 精度 0.5 mm, 丝网最上端贴一个电加热片。实验开始前, 测试系统的泄漏率, 确保系统在 4 MPa 的压力下 24 h 的压力降小于 20 kPa。泄漏检测完后对系统进行抽真空至 1 kPa, 然后冲入 1 MPa 的 CO₂, 重复以上过程 5—7 次, 消除空气杂质影响。调节气候箱温度为 0 ℃, 开始缓慢向系统充入 CO₂ 并液化, 通过 CCD 观察液位高度, 确定充注量。充注完毕后, 关闭阀门, 改变气候箱温度为实验温度, 等待容器内温度达到稳定状态。

当丝网的温度与 CO₂ 的温度均达到稳定的时候, CO₂ 会在丝网上凝结, 因此无法观察 CO₂ 液体的爬升情况。为了观察液体 CO₂ 在丝网上的爬升过程及最终高度, 必须首先造成丝网与 CO₂ 的温度差, 使液体在丝网上蒸发。有两种方法可以实现此过程, 第一是加热丝网, 第二是节流降温。在实验中发现由于不锈钢的导热系数较低, 要使液面克服毛细力而尽量降低就必须给加热片较大的功

率, 而为了更好的密闭容器不可能在加热片连接粗的电线, 所有, 此种方法较危险, 实际采用节流降温的方法。

实验中首先快速放气, 由于节流的影响, 两相 CO₂ 的温度会迅速降低, 而丝网的温度降低速度会比 CO₂ 小的多, 就会造成液体在丝网上蒸发, 但是由于毛细力的作用, 在丝网上还会有一段较小的爬升高度。停止放气, 利用 CCD 就可以观察到实际液体在丝网上的爬升速度, 经过一段时间会观察到最终的爬升高度。同时, 在加热片加入极少的功率, 以保证丝网温度略高于液体温度, 这样气相的 CO₂ 就不会在丝网上发生凝结。

2 结果和讨论

图 2 中的 8 张图在为 0 ℃时每隔 4 min 拍下的 CO₂ 在丝网上的爬升情况。从 (1) — (8) 八张小图可以看出, 图 2 中 (1) 显示 CO₂ 沿不锈钢丝网的上升高度最低, (2) — (8) 显示随着时间的增加 CO₂ 上升高度缓慢增加, 但是上升的速度不是匀速上升, 而是逐渐变慢。从图 2 可以看出 (1) — (2) 的上升高度差明显要大于 (7) — (8) 的高度差。

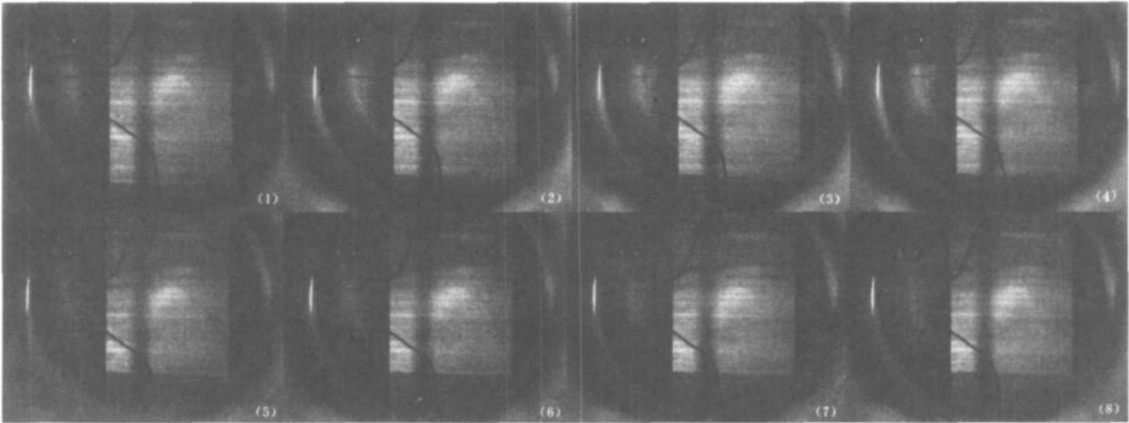


图 2 CO₂ 在丝网毛细爬升的动态图片
Fig 2 Dynamic Photos of CO₂ wicking along mesh

图 3 显示了在不同温度下, CO₂ 在密纹金属网上的爬升高度随时间变化的实验值与三种理论曲线, 图中 “○” 代表实验测量值, “×” 代表完全不考虑重力情况的理论计算曲线, “。” 代表考虑微小重力时理论关系曲线, 实线代表充分考虑重力的关系曲线。

丝网和多孔介质相似, 都是看作成束的毛细管。由于毛细力驱动的流动速度都很小, 因此毛细流动都是层流并且空气阻力可以忽略, 这样毛细管中液体的力平衡方程可以写为方程 (1) 的形

式^[3]:

$$\frac{\eta}{K} \frac{x}{dt} + \rho \left[\frac{d^2 x}{dt^2} + \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \right] = \sum P \tag{1}$$

式中 ρ 代表液体密度, η 是液体的动力粘度, σ 代表液体表面张力, r 对丝网来说是当量毛细管半径, $\sum P$ 是施加于液柱的合力, 包括毛细力 $P_s = 2\sigma \cos\theta/r$ 静力学压力 $P_G = \rho g x$ 和非平衡压力 P_A 通常非平衡压力 P_A 认为是零。K 代表渗透率, 是一个与结构有关的参数, 密纹金属网的渗透率还没有现成数据, 需要实验确定。对于毛细上升, 方程

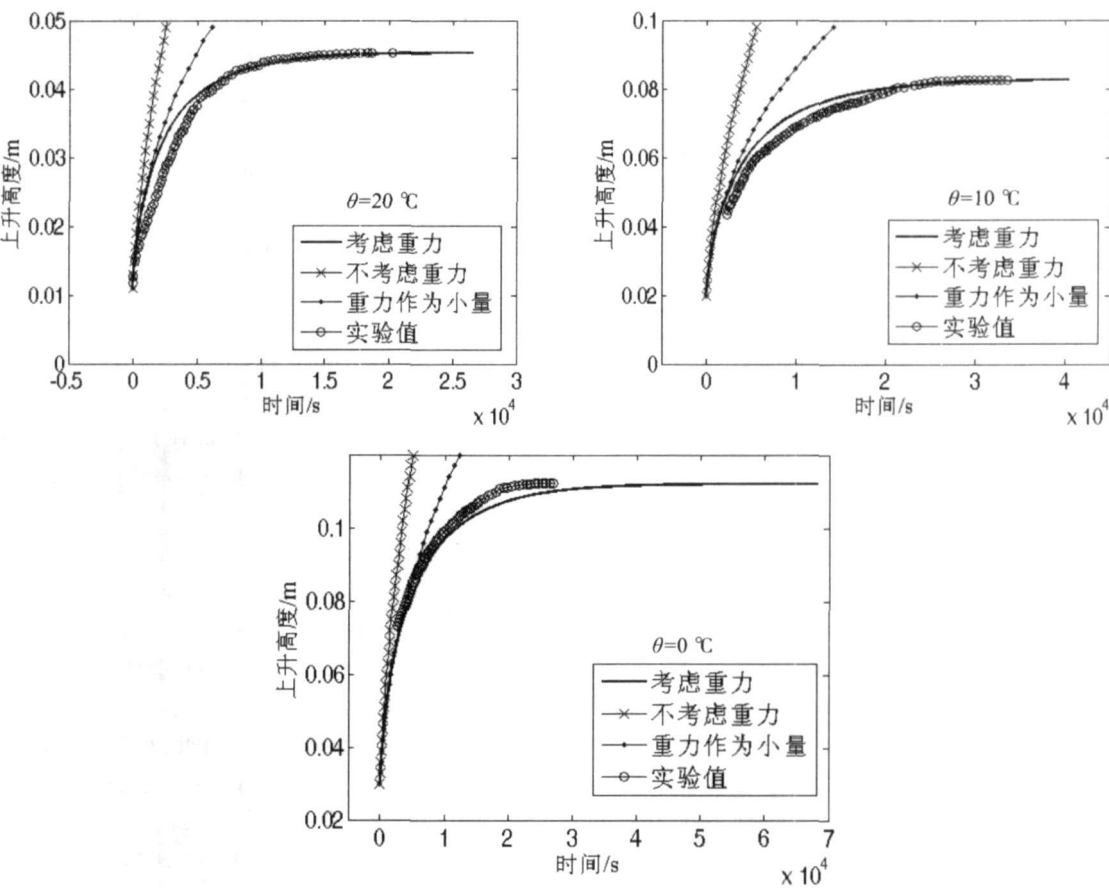


图 3 温度分别为 20 °C、10 °C 和 0 °C 时 CO₂ 爬升实验及理论关系曲线
Fig 3 20 °C、10 °C and 0 °C CO₂ wicking experimental and theory curve

(1) 中的惯性力非常小，通常忽略不计，因此以粘性力为主导的方程 (1) 可以写为：

$$\frac{\eta}{K} \cdot \frac{x}{dt} = -\Delta \rho g x + \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \tag{2}$$

方程 (2) 初始条件为 $x|_{t=0} = h$ 时，求解微分方程 (2) 得到方程 (3)：

$$\frac{\Delta \rho g \cdot K}{\eta} \ln \left[\frac{\Delta \rho g \cdot x - 2\sigma \cos \theta}{\Delta \rho g \cdot h - 2\sigma \cos \theta} \right] = -t \tag{3}$$

在忽略重力的情况下，则方程 (2) 可以写为变形的 Lucas Washburn 方程^[4-5]， $x - h = \frac{4K\sigma \cos \theta}{\eta \cdot r} \sqrt{t}$

Lucas Washburn 方程被广泛的应用于多孔介质、毛细通道的毛细流动计算中，Xue 等^[6]考虑将重力作为一个微小量将方程进行三次泰勒展开，以增加适用范围。

通过图 3 实验结果与几种理论方程的比较可以清楚的看出，完全忽略重力作用的 Lucas Washburn 方程的结果仅适用于过程初始的几分钟之内很窄的一段时间，随着爬升过程的继续，爬升高度与实际的情况偏差越来越大，计算值要比实际值大很多，

所以这种简单的简化形式在计算中会造成比较大的误差。考虑微小重力情况对方程 (3) 进行三次泰勒展开后，得到的理论计算结果与实际的测量值在一段较长时间内都比较接近，但是当液体爬升高度逐渐增高，重力的影响渐渐增强后，理论公式也开始逐渐偏离实际情况。

使用方程 (3)，相对于 325×2300 目 316L 丝网来说，当渗透率取 $K=1.2 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 时，理论的曲线与实验测量所得数据非常接近。可能有两个原因导致实验数据与方程 (3) 产生微小偏差：第一是由于温度的影响。由于在气液两相状态下测量液体在丝网的毛细上升，为了防止 CO₂ 蒸气在丝网凝结必须要使丝网与液体有一定的温差，虽然实验中把此温差降低到最小（小于 0.4 °C），但是温差还是会造成实验结果与理论计算有一点偏离。第二，动态接触角产生的影响。由于考虑到毛细力驱动的流体运动速度很小，因此在公式 (3) 中使用的是一个固定的接触角值，然而，在很多文献中提到，由于接触角的滞后性，接触角的大小实际是与前驱膜在固体表面的流动速度相关，因此也会造成方程 (3) 与实验值的偏差^[7-12]

本文进行了在相平衡状态下, CO_2 液体在不锈钢密纹网的毛细上升的动力学过程实验研究。由实验结果和分析可以得出结论, 在地面毛细上升的动力学研究中, 重力的影响是不可以忽略的, 完全忽略重力或把重力看成微小量只能适用于初始的小段时间, 从毛细上升的整个过程研究, 重力的作用不可或缺。

参考文献:

- [1] 刘洪胜, 金纪峰, 陈江平, 等. 自然工质二氧化碳汽车空调性能的实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2006 40(8): 1407—1416
- [2] THEODORE D S, GAJANANA C B. NASA thermal control technologies for robotic spacecraft[J]. Applied Thermal Engineering, 2003 23(9): 1055—1065
- [3] MARTIC G, DE C J, BLAKE T D. Influence of the dynamic contact angle on the characterization[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2003 263(1): 213—216
- [4] ROTENBERG Y, BORUVKA L, NEUMANN A W. Determination of surface tension and contact angle from the shapes of axisymmetric fluid interface[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1983 91: 169—183
- [5] WASHBURN E W. The dynamics of capillary flow[J]. Physical Review, 1921 17(3): 273—283
- [6] XUE H T, FANG Z N, YANG Y, et al. Contact angle

- determined by spontaneous dynamic capillary rises with hydrostatic effects: Experiment and theory[J]. Chemical Physics Letters, 2006 432(1—3): 326—330
- [7] HARRY J B, SARAT K, EDGAR A Q. Advancing contact angles of Newtonian fluids during “high” velocity transient capillary-driven flow in parallel plate geometry[J]. J Phys Chem B, 2002 106(19): 4979—4987
- [8] HOFFMAN R L. A study of the advancing interface Part I. Interface shape in liquid-gas systems[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1975, 50: 228—241
- [9] JIANG T S, CHEN S G, SLATTERY J C. Correction for dynamic contact angle[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1979, 69: 74—77
- [10] AHMED H, KRISTIER T, TOMMY N, et al. Can a dynamic contact angle be understood in terms of a friction Coefficient[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2000 226(2): 199—204
- [11] 王晓东, 彭晓峰, 陆建峰, 等. 接触角测试技术及粗糙表面上接触角的滞后性 II: 粗糙不锈钢表面接触角的滞后性[J]. 应用基础与工程科学学报, 2003 11(3): 298—303
- [12] MORRIS M, OCCHIELLO E, GARBASSI F. Knowledge about polymer surfaces from contact angle measurements[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 1990 32: 79—116

Experimental Study of Carbon Dioxide Capillary Dynamic Rise along Metal Mesh

PEI Nian-qiang, LU Jiē, GUO Kai-hua, LI Ting-xun, YU Guo-bao

(1. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Mechanical Engineering & Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: As a refrigerant, carbon dioxide (CO_2) has good environmental protection and thermodynamics characteristics and has been considered as one of the most important work fluid. CO_2 will be tried to use in capillary pump loop (CPL) technique or Loop heat pipe (LHP), especially for the space applications. Because of higher operation pressure, there are few experiments about its capillary dynamics investigation. The experiments about CO_2 wicking along metal mesh have been carried out to investigate the capillary dynamic characteristics about capillary rise capability. Meanwhile, experimental results have been compared with some classical formulas and the optimal equation has been pointed out.

Key words: carbon dioxide; capillary force; wicking; mesh