

# 冷中子源氢热虹吸系统传热极限研究

李强<sup>1</sup>, 杨健慧<sup>2</sup>, 周远<sup>1</sup>, 李青<sup>1</sup>

(1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100080;  
2. 中国科学院研究生院物理学部, 北京 100039)

**摘要:**提出了一个简便的计算方法,用以确定冷中子源氢热虹吸管的尺寸。计算结果表明:当热虹吸管的外管内径为 54 mm、内管内径为 21 mm 时,传热极限为 3 kW。

**关键词:**冷中子;热虹吸管;传热极限

**中图分类号:** O571.53; TQ021.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2003)01-0076-03

## Study on the Critical Heat Flow Rate of Hydrogen Thermosyphon in Cold Neutron Sources

LI Qiang<sup>1</sup>, YANG Jian-hui<sup>2</sup>, ZHOU Yuan<sup>1</sup>, LI Qing<sup>1</sup>

(1. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;  
2. Department of Physics, Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** A simple method is established which can determine the size of hydrogen thermosyphon in cold neutron sources. It is showed that the critical heat flow rate is 3 kW when the inner diameter of outside pipe is 54 mm and the inner diameter of inner pipe is 21 mm.

**Key words:** cold neutron sources; thermosyphon; critical heat flow rate

冷中子源主要由氢回路、氦制冷回路和相应的监控系统组成。氢回路的主体是冷包、氢热虹吸管和氢氦冷凝器。

氢热虹吸管的传热能力是氢热虹吸系统能否正常运行的关键。对于冷中子源氢热虹吸系统,影响传热能力的决定因素是轴向传热极限。系统运行时,随着热流密度的增加,蒸汽流速加大,将会携带冷凝下来的液滴,达到一定程度时,冷凝液无法回流而聚集在冷凝器,导致出现溢流。同时,蒸发段发生干涸,影响冷中子源系统的正常运行,严重时还会发生事故。

影响轴向传热能力的关键因素是热虹吸管的管径。加大管径,蒸汽流速降低,携带的液滴减少,但同时又会增加核发热。因此,需要进行综合考虑。

对于采用单根管的热虹吸管,传热极限可用 Wallis 公式<sup>[1]</sup>计算。对同心套管的热虹吸管,尚无合适的理论计算公式。本工作将根据 Wallis 公式导出的单管传热极限计算公式计算外管内径,再利用气相和液相阻力相等的原则确定内管直径,从而计算出同轴型热虹吸管的尺寸。

收稿日期:2001-11-02;修回日期:2001-12-29

作者简介:李强(1969—),男,四川乐山人,助理研究员,硕士,热能工程专业

## 1 单管传热极限

单管传热极限的计算主要依据 Wallis 公式:

$$\sqrt{J_G^*} + \sqrt{J_L^*} = c \quad (1)$$

式中的无因次折算速度  $J_G^*$  和  $J_L^*$  定义如下:

$$J_G^* = J_G \left[ \frac{G}{gD(\rho_L - \rho_G)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$J_L^* = J_L \left[ \frac{L}{gD(\rho_L - \rho_G)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

其中:  $J_G$  和  $J_L$  分别为气相和液相折算速度, m/s;  $G$  和  $L$  分别为气相和液相密度, kg/m<sup>3</sup>;  $c$  为无因次系数, 由实验确定,  $c = 0.725 \sim 1$ ;  $D$  为热虹吸管内径, m;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>。

当进入液体为饱和状态时, 其极限热功率  $Q$  为:

$$Q = A G J_G h_{fg} \quad (4)$$

式中:  $A$  是热虹吸管的横截面积, m<sup>2</sup>;  $h_{fg}$  是汽化潜热, J/kg。

由式(1)~(4)可导出传热极限  $Q$  的表达式为:

$$Q = \frac{c^2 A h_{fg} f g D G (\rho_L - \rho_G)^{\frac{1}{2}}}{\left[ 1 + \left( \frac{G}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2} \quad (5)$$

## 2 同轴管传热极限

在冷中子源系统中, 普遍采用同心套管结构的氢热虹吸系统。这是由于气液相通路分开, 气相携带液滴减少, 不易发生溢流现象, 使得传热极限增大。日本 JRR-3 的模拟实验<sup>[2]</sup>已证明了这一点。

实际上, 并非所有情况下采用同心套管均优于单管。若液相通路和气相通路的大小选择不合理, 同心套管的传热极限反而低于单管的传热极限。单管内径为 12.2 mm 时, 传热极限为 308 W。同心套管外管内径为 12.2 mm, 当内管内径分别是 4.5、5.8 和 7.8 mm, 且对应的液气流通截面比分别为 0.179 7、0.397 0 和 1.284 0 时, 其传热极限分别为 515、510 和 242 W。由这一组数据可知: 液气流通截面比为 0.179 7 和 0.397 0 时, 同心套管的传热极限远

高于单管的传热极限; 液气截面比为 1.284 0 时, 同心套管的传热极限低于单管的传热极限。

采用 R113 所进行的模拟实验<sup>[2]</sup>表明: 当液相通路和气相通路截面比为 0.2~0.3 时, 同心套管的传热极限明显高于单管。他们未从理论上对此加以分析。

同心套管结构应该有一最佳截面比。若液相通路过小, 则液相阻力太大; 反之, 则气相阻力过大; 气相和液相阻力相等时, 对应的截面比为最佳截面比。

气相和液相阻力可用下式计算:

$$P_G = G \frac{G u_G^2}{2 D_e} \quad (6)$$

$$P_L = L \frac{L u_L^2}{2 d_e} \quad (7)$$

式中:  $P_G$  和  $P_L$  分别为单位长度气相和液相阻力, Pa/m;  $G$  和  $L$  分别为气相和液相摩擦阻力系数, 无因次;  $D_e$  和  $d_e$  分别为气相和液相通路的当量直径, m;  $u_G$  和  $u_L$  分别为气相和液相速度, m/s。

在确定同心套管结构型式的热虹吸管尺寸时, 首先根据 Wallis 公式计算出单管管径, 以此作为外管内径, 再根据气相液相阻力相等的原则确定内管内径。由于液管很薄, 计算中未考虑液管壁厚对气相流通截面的影响。

根据上述原则, 以 R113 为工质进行了计算。计算结果示于图 1 和 2。

图 1 表明: 当外管内径为 18 mm 时, 传热极限为 900 W, 即为 JRR-3 的核发热。

从图 2 可以看出: 外管内径为 18 mm、内管内径为 7.4 mm 时, 气液阻力相等, 此时的液气流通截面比为 0.22。

JRR-3 模拟实验得出的最佳液气流通截面比为 0.2~0.3。计算结果与模拟实验结果符合很好。

以液氢为工质的计算结果示于图 3 和 4。

图 3 表明: 当外管内径为 54 mm 时, 传热极限为 3 kW。

从图 4 可以看出: 采用内径 54 mm 外管, 当内管内径为 21 mm 时, 气液阻力相等, 此时的液气流通截面比为 0.2。

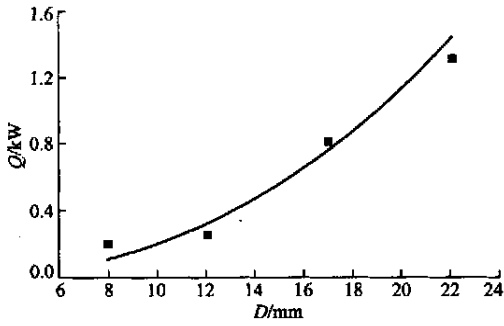


图1 以 R113 为工质的传热极限  $Q$  与外管内径  $D$  的关系  
Fig.1 Relation of heat transfer limit and inner diameter of outside pipe for the actuating medium R113  
实线——计算值； ——模拟实验结果

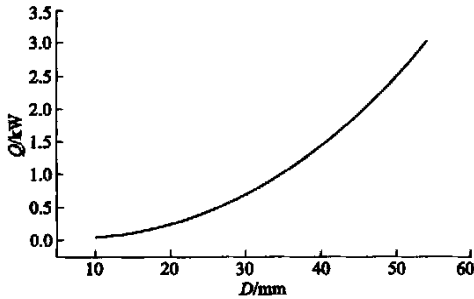


图3 以液氢为工质的传热极限  $Q$  与外管内径  $D$  的关系  
Fig.3 Relation of heat transfer limit  $Q$  and inner diameter  $D$  of outside pipe for the actuating medium liquid hydrogen

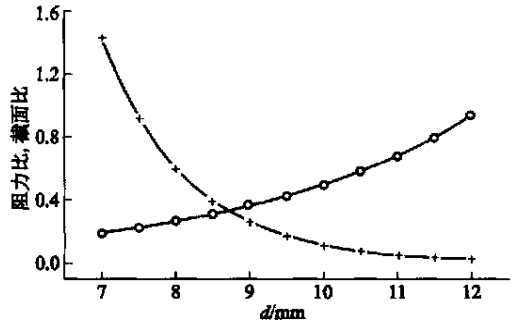


图2 阻力比和截面比与内管内径  $d$  的关系  
Fig.2 Relations of resistance ratio , section ratio and inner diameter  $d$  of inner pipe  
工质为 R113;外管内径为 18 mm  
+ ——阻力比; ——截面比

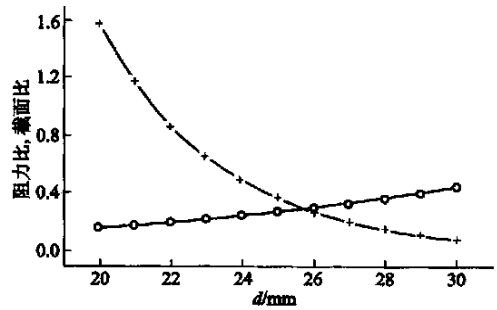


图4 阻力比和截面比与内管内径  $d$  的关系  
Fig.4 Relations of resistance ratio , section ratio and inner diameter  $d$  of inner pipe  
工质为液氢;外管内径为 54 mm  
+ ——阻力比; ——截面比

### 3 结论

提出了一个用以计算冷中子源同心套管式的氢热虹吸管尺寸的简便方法。计算结果与模拟实验结果吻合很好,可以指导工程设计。对于核发热为 3 kW 的冷中子源,可取外管内径为 54 mm,内管内径为 21 mm,此时的液气流通截面比为 0.2。

#### 参考文献:

[1] Hewit GF, Wallis GB. Flooding and Associated

Phenomena in Falling Film Flow in a Vertical Tube [A]. Multi-phase Flow Symposium, Winter Annual Meeting of the ASME [C]. Philadelphia, USA:ASME,1963. 256 ~ 263.

[2] Kumal T, Shinozu K, Sakamoto M, et al. Fundamental Experiments on Closed Thermosyphon for JRR-3 Cold Neutron Source ( ):JAERFM 87-006[R]. Tokyo Japan: Japan Atomic Energy Research Institute, 1987.