

②

8-13

# 光管管束的沸腾传热实验研究

龙恩深

(城建系)

TK172

**摘要** 本文实验研究了管束间距、管排数、管束排列方式、热负荷大小和沸腾工质物性等因素对光管管束池沸腾传热的影响规律。实验包括有二排管束、三排管束、七管束、十三管束等,管束相对间距在0.9~3.3之间。实验结果表明,对于旺盛核池沸腾区域,管束中管间距的影响甚微,沸腾曲线基本上与光管时吻合;对于自然对流向核沸腾转折区域,管束各管间的影响较大,明显地使传热强化,一般可提高10~100%。

**关键词** 光管, 沸腾传热, 管束, 实验

在工程实际应用中,大量使用沸腾换热设备,如蒸发器、再沸器等。由于目前相当一部分都是以光管管束的形式出现的,因此要弄清换热器的总体传热特性,进行管束沸腾实验是十分必要的。

近年来,国外学者已经开始了管束沸腾的实验研究。Robinson-Katz<sup>[1]</sup>首先研究了错列管束的沸腾传热,发现管束上部管比下部管具有更大的传热系数。日本人<sup>[2]</sup>针对二管束和三管束以F-113为工质,实验研究了压力和管子位置对传热的影响。Müller等<sup>[3~5]</sup>实验研究了管子位置、排列方式对低肋管束沸腾的影响规律。这些文献都证实光管束和低肋管束沸腾具有强化传热的性能。但是文献[6]研究表明,在商用冷冻机上,E管管束的沸腾换热系数增加很小。

本文的目的就在于实验研究管子排列方式、管子位置、管束相对间距以及相邻管热负荷变化的影响规律;并以水和乙醇作工质,研究工质物性对管束沸腾特性的影响,进而深入研究管束沸腾的机制和规律。

## 1 实验装置及过程

实验装置示意如图1所示。实验使用了两种端盖,相应的两种不同管间距的管束排列方式分别为图2a),b)所示。管束实验的所有试验管均为 $\phi 19 \times 2.5$ 的紫铜管,外表面用400号金相砂纸打磨,管内用电阻丝加热。

管束实验中,仅测量部分试验管的壁面温度。对于图2a)所示的管束,从上到下中间三根为测温管;对于图2b)所示的管束,中间五根为测温管。测温管的外形及热电偶布置如图

\* 本文1992年3月5日收到。

3a), b) 所示。五根热电偶空间夹角为  $72^\circ$ ，布置于相互间距为 40 mm 的五个截面上。测试段长度为 160 mm，管内加热丝长度均为 250 mm，且测试段位于加热段中间部分，以消除端部散热的影响。在加热过程中，为了使管束实验的各根试验管的热流密度相同，各加热器的电阻偏差和长度偏差均应不大于 1%，测温与量热的要求与[7]中相同。

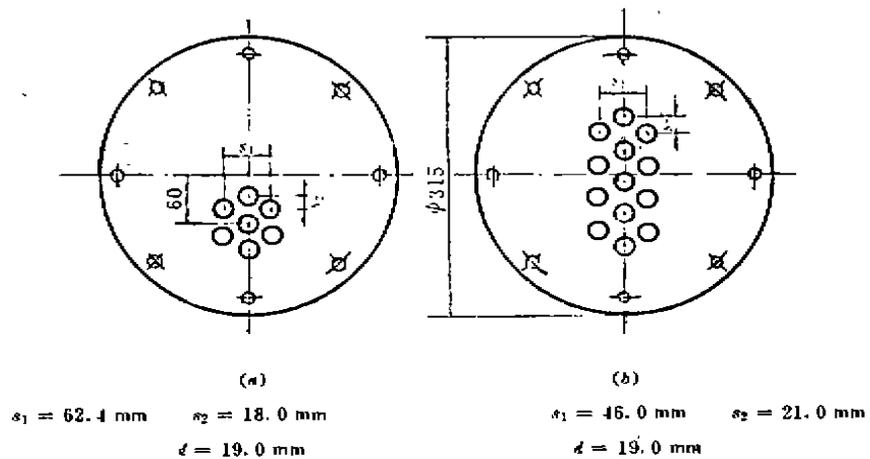
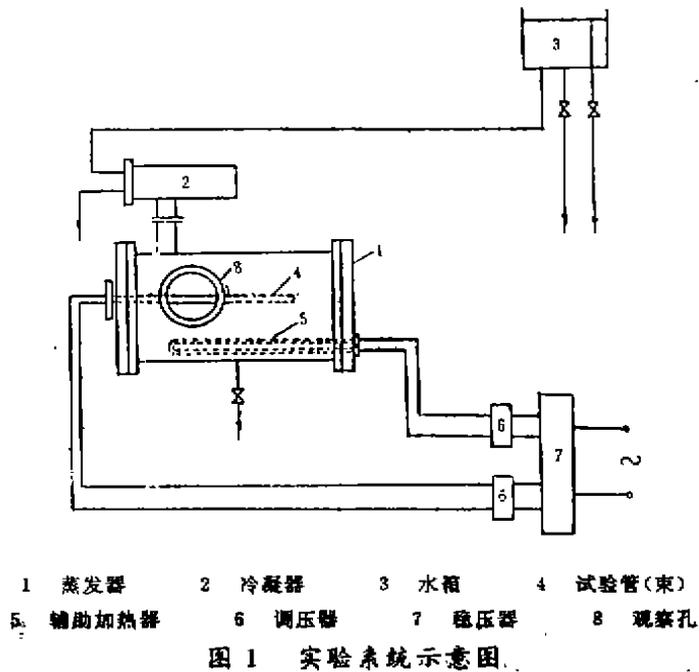


图 2 端板上管束的布置

管束沸腾时，实验容器内的液体温度不是均匀一致的，温度分布极为复杂，沸腾管数多少及热负荷高低都会产生影响。一般地说，液体温度略高于饱和温度（高  $0.2 \sim 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[3]</sup>）。因此，处理实验数据时，参考温度取沸腾管附近的液温就变得困难了。为此，本文的参考温度一律采用当地大气压力下的饱和温度。需要指出的是，这样处理的结果使壁面过热度比实际值

略高,而换热系数比实际值略低.事实上,管束实验普遍都面临着这个难题.但国外的有关管束研究的文献几乎都是这样选择参考温变的,这样处理使管束沸腾的特性就便于比较了.

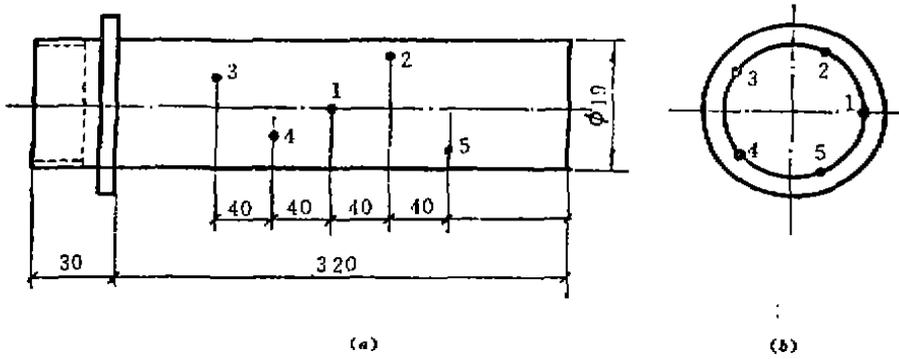


图 3 测试管上热电偶的位置

在正式实验前,加热管都在中等热流密度( $q = 3.6 \text{ W/cm}^2$ )下老化 20 小时以上,以消除不稳定汽化核心的影响.在第一次测取实验数据以前,试验管束加热一小时左右,然后从高负荷到低负荷进行实验.每隔 20 ~ 30 分钟改变一次工况,记录各加热器的电流电压,读取各测温点的热电势,同时观察管束沸腾现象.

## 2 实验结果

在本文的实验结果图中,管排编号均为从下到上为序.实心圆圈(●)表示热流变化的试验管,且在同一图中相同标号的各根试验管的热流密度相同.

### 2.1 两管束实验结果

管束沸腾的最简单情形是二管束沸腾.图 4 给出了以水作工质时  $s/d$  为 2.21 的两管束等热流加热的沸腾曲线.图 5、图 6 分别是以水和乙醇作工质、下管的热流密度维持常数时上管的沸腾曲线.从图 4 可以看出,两管束等热流密度加热,对沸腾曲线影响不大,低负荷时上管的换热系数略有提高.从图 5、图 6 可以看出,二管束沸腾传热有以下规律:1) 当上管的热负荷较大时,下管的热负荷对上管的影响甚微;2) 在自然对流向旺盛沸腾转折区域,下管的热负荷大小对上管的换热系数有较大的影响,下管热流越大,上管换热系数越高,一般地说,换热系数可以提高 10 ~ 100%;3) 比较两图可以发现,水为工质时换热系数的提高比乙醇作工质时更显著.

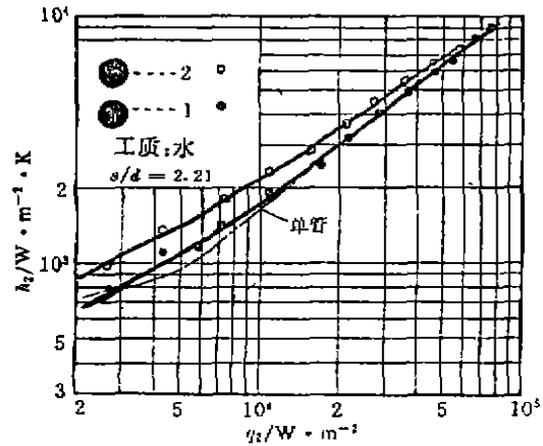
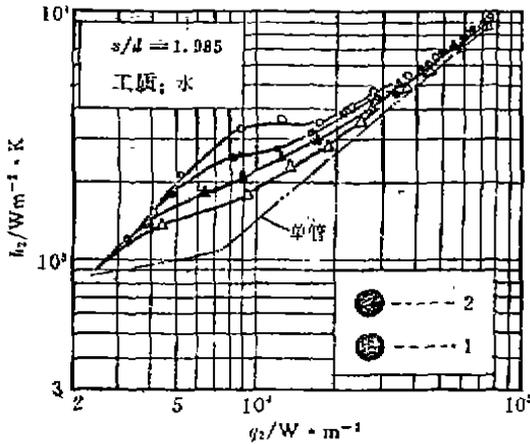
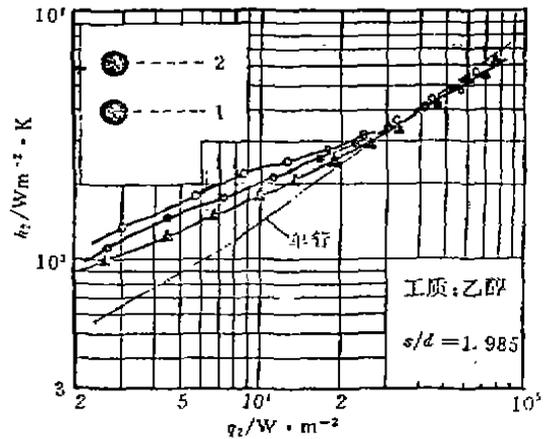


图 4 等热流加热两管束的沸腾曲线



△— $q_1 = 7340 \text{ W/m}^2$  ●— $q_1 = 39000 \text{ W/m}^2$   
 ▲— $q_1 = 21350 \text{ W/m}^2$  ○— $q_1 = 67394 \text{ W/m}^2$

图 5 第一排管的热流对第二排管的沸腾曲线的影响(水)



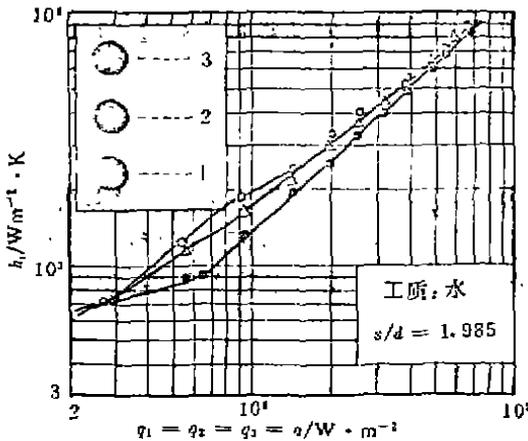
△— $q_1 = 11191 \text{ W/m}^2$  ●— $q_1 = 23970 \text{ W/m}^2$   
 ○— $q_1 = 62839 \text{ W/m}^2$

图 6 第一排的热流对第二排管的沸腾曲线的影响(乙醇)

2.2 三管束沸腾实验

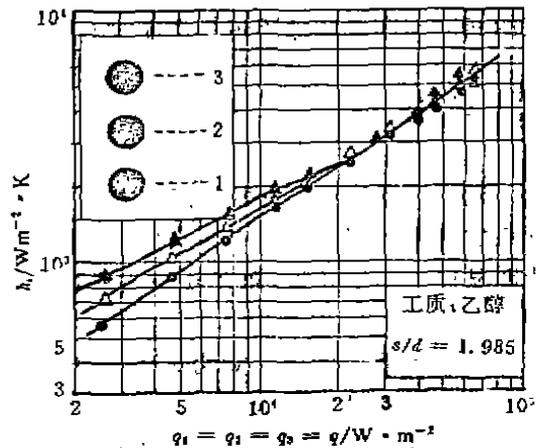
正式实验之前,作者分别以水和乙醇作工质对图 2 a) 所示的七管束中列三根管进行了单管沸腾传热实验.实验结果表明,三根管子的总体平均换热系数与其中任一单管换热系数的偏差在 ± 10% 以内,因此,各根管子的性能可以认为是相同的.

图 7、图 8 分别表示以水和乙醇作工质、三管等热流密度加热时各管的沸腾曲线.从图中可以看出,在核沸腾区域,各管的沸腾曲线几乎重合;在过渡沸腾区域和自然对流区,第一排管与单管差不多,而第二、三排管的换热系数均有提高,且第三排比第二排更显著.



●—第一排 △—第二排 ○—第三排

图 7 三排管同时等热流加热时各管的沸腾曲线(水)

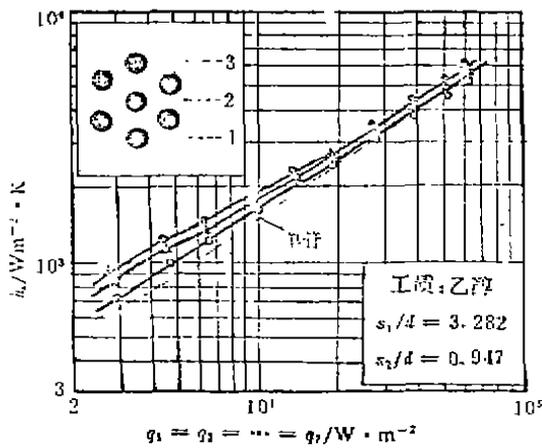


●—第一排 △—第二排 ○—第三排

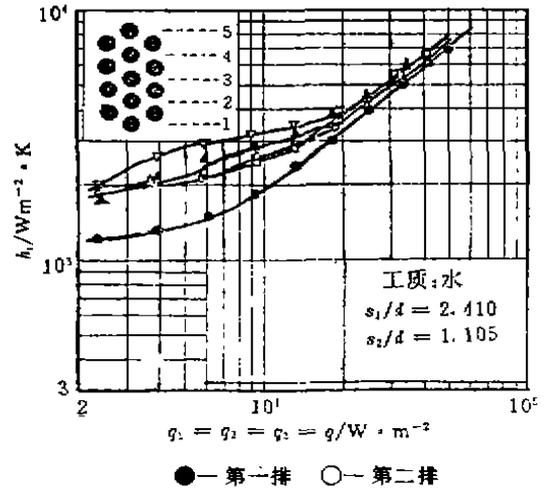
图 8 三排管同时等热流加热时各管的沸腾曲线(乙醇)

2.3 七管束实验结果

图 9 表示以乙醇作工质、七管束同时以等热流密度加热时中间列三根管的沸腾曲线.结果表明,管束核沸腾性能与单管差不多;而过渡沸腾有明显的强化.



●—第一排    △—第二排    ○—第三排  
图 9 七管束同时等热流加热时  
中列三管的沸腾曲线(乙醇)



●—第一排    ○—第二排  
△—第三排    ▲—第四排    ▼—第五排  
图 10 十三管束同时等热流加热时  
中列五管的沸腾曲线(水)

2.4 十三管束沸腾实验

图 10 给出了第一、二、三、四、五排管以水作工质、十三管束同时以等热流加热时的沸腾曲线,图中同时给出了单管沸腾曲线,以便比较。从该图可以看出,第一排管的性能基本不变,从第二排开始,换热系数均有明显提高,且后排管比前排提高更显著。对于第五排管,换热系数可提高 100%。

2.5 相对间距的影响

图 4 和图 5,图 9 和图 10 给出的两种不同相对间距的两管束和多管束实验曲线表明,管束的相对间距对其沸腾传热性能没有明显的影响,在实验范围内其影响不超过 10%。

3 结论

通过对光管管束沸腾传热的大量实验研究,我们基本摸清了光管管束的换热规律。光管管束的管束效应主要集中在从自然对流至核沸腾的转折区域,在此区间,光管管束的换热性能明显优于单根光管;而在旺盛核沸腾区,光管管束的换热性能与单管差不多。现得出如下结论:

- 1) 光管管束沸腾性能明显优于单管;
- 2) 后排管比前排管更好;
- 3) 管束相对间距  $s/d$  影响规律不明显;
- 4) 当工质为水时管束的强化效果比乙醇作工质时更显著;
- 5) 管束强化传热的机理在于增强了自然对流换热的扰动和使汽泡的脱离频率增加。

参 考 文 献

1 Robinson and Katz. Chem. Eng. Prog., 47-6(1951)pp. 317  
2 Fujita and Nishikawa. Boiling Heat Transfer on Horizontal Tube Bundles. Chinese-American-Japan Heat Transfer

conf. Beijing, 1983

- 3 J. Müller. Boiling Heat Transfer on a Finned Tube Bundle. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1983, 26(6), 849~85
- 4 J. Müller. Boiling Heat Transfer on a Finned Tube Bundle—the Effect of Tube Position and Intertube spacing. *Heat Transfer*, 1986, Vol. 4, pp. 2111~2116
- 5 J. Müller and E. Hahne. Boiling Heat Transfer in Finned Tube Bundles. *Heat Transfer-Soviet Research*, 1983, 13(6)
- 6 Fujie. K. et al. High Flux Heat Transfer Tubes / Thermosxcoels' —Their Performance and the Results of Feasibility Test in a Refrigerating Machine. Hitachi Ltd B1 97
- 7 龙恩深等. 抑泡孔管沸腾传热的实验研究. *中国工程热物理学报*, 1989, 10(1)

(编辑:刘家凯)

## AN EXPERIMENTAL STUDY OF BOILING HEAT TRANSFER ON SMOOTH TUBE BUNDLES

*Long Enshen*

(Dept. of Urban Construction Engineering)

**ABSTRACT** This paper introduces the clarifying influence of the intertube spacing, the tube arrangement, the heat flux and the working fluid on boiling heat transfer of smooth tube bundles. The tube bundles include the arrangements of twin tubes, triple tubes, seven tubes and thirteen tubes. The relative intertube spacing of the tube bundles is from 0.9 to 3.3. Experimental results show that the tube position and intertube spacing have no effect on boiling curves for the region of fully-developed boiling. And they considerably affect the heat transfer coefficient for the transition region between natural convection and nucleate boiling. In general, the heat transfer coefficient in the transition region for the upper tubes can be enhanced by 0.5 to 1.5 times.

**KEY WORDS** smooth tube, boiling heat transfer, tube bundles