

倾角对管外沸腾传热性能影响的实验研究

EXPERIMENTED INVESTIGATION OF EFFECT OF THE INCLINATION ON HEAT TRANSFER ON TUBE

刘 洪 陈远国
Liu Hong Chen Yuanguo
(热力工程系)

摘 要 用9种不同规格的试验管,在大气压力下的饱和水及乙醇中进行了系统的实验。结果表明,安装角对管外池沸腾传热性能有明显的影响。倾角增加,汽泡扰动加剧,沸腾换热强度增大。综合524组实验数据,得到包括倾角、长径比在内的管外池沸腾传热准则关系式,可供工程设计时预测倾斜管沸腾传热系数。

关键词 池沸腾; 倾斜角; 汽泡扰动; 强化传热

中图法分类号 TK124

ABSTRACT The present paper describes experiment research of effect of the inclination on heat transfer on 9 kinds of plain tubes in atmosphere, working fluids are distill water and ethanel. Experiment result show very obvious effect of inclination of pool boiling heat transfer. The larger heat transfer increases, the larger the inclination does. The correlation obtained on 524 experiment data can be used for reference to engineering design in prospect of heat transger coefficient.

KEY WORDS pool boiling; inclination; bubble disturbance; enhance heat transfer

0 前 言

工程实践中常遇到倾斜或垂直管外沸腾传热问题,如化工、制冷设备、热管锅炉等,其沸腾管常常是垂直或倾斜安装。目前设计这类换热器时只能借用水平管外沸腾传热的经验公式估算,影响设备的经济性,甚至影响安全性。已有文献中研究倾角对沸腾传热性能影响的很少^[1-5],而且只限于平表面的沸腾传热,对管外沸腾研究又局限于水平和垂直位置,至于对有倾角的管外沸腾的研究迄今未见有文献。倾角对管外沸腾有否影响?是强化传热还是恶化传热?迫切需要探索其规律性。其次,在工程应用中,如安装条件允许,采用倾斜管取代水平管能提高传热系数,则可在不增加材料耗量及不增加设备体积的条件下提高传热能力,取得事半功倍的效果。

1 可视性实验和传热分析

为了更好地观察和分析倾角对管外沸腾传热性能的影响,首先进行了单管管外沸腾传热的可视性实验。

实验装置如图1所示,试验管为 $\varnothing 24\text{mm}$ 的厚壁紫铜管,管长为130mm。由 $\varnothing 0.8\text{mm}$ 镍铬丝绕制的电炉通电加热。试验管外表面经金相砂纸磨光,试验工质为无水乙醇。

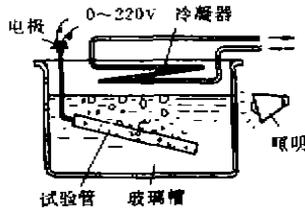


图1 可视性实验装置

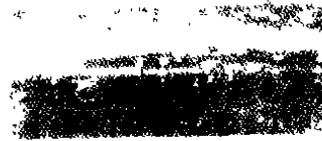


图2 水平管外气泡运动图像



图3 倾斜管外气泡运动图像



图4 垂直管外气泡运动图像

从水平、倾斜和垂直三种位置的可视性实验中可看到,当试验管水平放置时,上半表面的气泡能够自由脱离浮升,而下半表面的气泡必须沿周向运动一段距离,或冲刷掉前面生长着的气泡,或与前面的气泡聚合。水平管外气泡运动图像如图2。

当试验管倾斜放置时,气泡运动规律发生变化,此时,上表面的气泡一部分自由浮升,而另一部分则沿轴向运动;下半表面的气泡一般沿周向和轴向的合成方向运动,这两种运动,使气泡流的扰动加强。倾斜管外气泡运动图像如图3。

当试验管垂直放置时,管外表面的气泡运动仅沿轴向,由于汽液密度差,气泡浮升过程中,能较大幅度地冲刷掉上段的气泡,扰动也

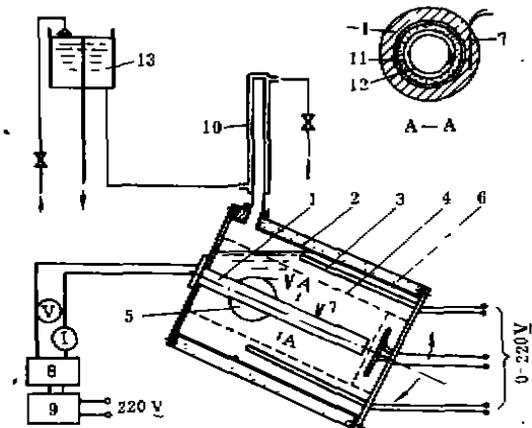


图5 实验装置

- 1-试验管 2-蒸发器 3-辅助加热器 4-防波罩
- 5-观察窗 6-绝热层 7-热电偶 8-调压器 9-稳压器
- 10-冷凝器 11-瓷管 12-镍铬丝 13-水箱

更剧烈,如图4。

基于上述可视性实验观察,管外沸腾传热的机理可以认为是汽泡流的扰动和汽液两相流的冲刷,由于倾角的变化,汽泡的扰动程度也不相同,所以沸腾换热强度将发生变化。管外表面的汽泡运动主要是由浮力和壁面粘性力决定的,当管子倾斜、垂直放置时,汽泡沿壁面运动的冲刷效应加强,汽泡流的扰动加大,汽液交换更加频繁,因此倾角增加时,沸腾传热系数可能增加。当管子垂直或接近垂直放置时,高热流密度下,观察到有汽泡块出现,传热有可能恶化。

由于管外有汽泡沿壁面冲刷的特点,管外径和管长对沸腾传热有影响,这种影响可能与倾角关系较大,可以认为它们决定了汽泡清扫的程度,所以在实验中也探索长度准则(L/D)对沸腾传热性能影响的规律。

2 实验装置及实验过程

实验装置及试验管如图5所示,试验管为厚壁紫铜管,表面经过粗砂和400[#]水砂打磨,最后用金相砂纸磨光。表面斜向钻有间距为50mm的测温孔,沸腾表面温度由外推法计算得到^[7],为减少端头效应,在管两端进行削薄处理,末端绝热。管内电炉是由 $\varnothing 0.8\text{mm}$ 的镍铬丝绕制而成,通过外周瓷管定位。试验管的外形尺寸见表1。

实验前,对首次使用的试验管进行了老化处理,以消除不稳定汽化核心的影响,试验管倾角变化步距为 30° 。实验工质为水和无水乙醇,实验在常压下进行。

表1 试验管尺寸(mm)

| D | L | | |
|-------|-----|-----|-----|
| | 150 | 200 | 240 |
| 24.00 | 150 | 200 | 240 |
| 29.90 | 150 | 200 | 240 |
| 37.00 | 150 | 200 | 240 |

3 实验结果与讨论

3.1 倾角对沸腾传热性能的影响

倾角对光管外沸腾传热性能影响的实验结果如图6(a)~(d)所示。实验结果表明,随着倾角从 0° 增加,沸腾传热曲线朝左上方移动,即沸腾换热加强。原因在于此时沸腾传热机理是汽泡流扰动和汽液两相流冲刷,大量在水平位置未达到脱离直径的汽泡,在管子倾斜位置时被下游已脱离的汽泡冲刷,角度越大,这种冲刷效应也越强烈,汽泡相互间干扰加强,汽液交换更加频繁,换热强度由此而增强。

实验结果同时表明,倾角对沸腾传热性能的影响与热流密度有关。以图6(a)为例,在中低等热流密度下,倾角影响较大。而在较高热流密度下,倾角的影响减弱,沸腾曲线有聚合趋势。这是因为,热流密度较高时,汽泡脱离频率和核心数增加,汽泡一般从表面能直接脱离,下游汽泡对上游汽泡的冲刷所起的作用相对减弱,换热强度增加不大。对于垂直位置的试验管,在高热流密度($q \geq 12 \times 10^4 \text{w/m}^2$)下,实验结果表明换热强度有减弱的现象。这也许是因为此时管周围由大量汽泡块包围,抑制了汽液交换,沸腾换热强度减弱。

比较图6(a)和(c)、图6(b)和(d)实验结果曲线,可看出倾角对管外沸腾传热的影响与工质也有关系。以水为工质时影响较大;以乙醇为工质时影响较小。原因在于两种工质物性不同所造成的。乙醇表面张力小,脱离直径小,所需沸腾起始过热度小,汽泡自身脱离比表面张力大、脱离直径大的水更容易,乙醇脱离频率大,因此,冲刷效应就差;而水脱离频率小,冲刷效应就

强。随倾角变化,水的沸腾传热强度就比乙醇的沸腾传热强度增加程度大,实验表明,从0→90°,水的传热系数提高50~100%,乙醇的传热系数提高20~80%。

3.2 L/D对沸腾传热性能的影响

L/D对沸腾传热的影响与倾角有关,当水平放置管子时,主要起影响作用的是管径;倾斜时,由于汽液两相流的冲刷效应,管长与管径同时起作用;而垂直位置时起主要作用的是管长。由图6中 $\theta=90^\circ$ 的曲线比较可以看出,L/D增加,h值减小,也即是沸腾换热强度减弱。原因可能在于本次实验管太长,汽泡沿实验管轴向运动时,在上段聚气,阻止了汽液交换,使其局部换热系数下降,而导致该管平均换热系数减小,垂直管外沸腾时,管长对传热的影响可能有最佳值。

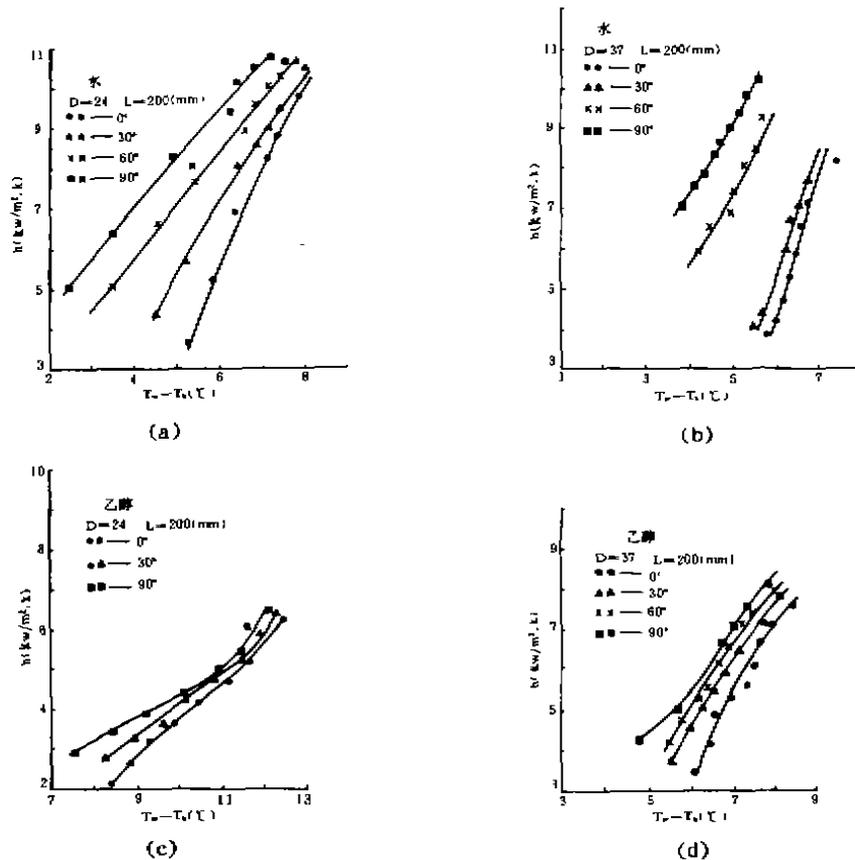


图6 倾角对沸腾传热的影响试验结果

3.3 换热关联式

倾斜管外沸腾传热机理是汽泡的扰动和汽液两相流的冲刷。根据 Rohsenow^[6]的沸腾传热关联式,考虑倾角和 L/D 对沸腾传热的影响,可写出倾斜管外沸腾换热关联式形式为:

$$S_r = C Ang^a (L/D)^b Re_b^c Pr_f^d \quad (1)$$

式中, S_r 为过热度准则, $S_r = C_p(T_w - T_{sat})/H_{fg}$,是液体显热与潜热之比;

$Ang = e^{2\theta/\pi}$,表示倾角的影响;L/D为长度准则; Re_b 为汽泡雷诺数,

$Re_b = \{\sigma/[g(\rho_l - \rho_v)]\}^{1/2} g/(\mu_l H_{fg})$,表示汽泡运动引起液体搅动的程度; Pr_f 为液体普朗特数,表示物性对传热的影响。

把524组实验数据采用多元线性逐步回归方法进行上机处理,得到下面的换热关联式:

$$S_r = 5.1088 \times 10^{-3} Ang^{-0.1386} (L/D)^{0.4807} Re_b^{0.3232} Pr_f^{0.66754} \quad (2)$$

对式(2)进行显著性检验,得到复相关系数 $R=0.93$,统计量 $F=856.27 (>>F_{0.05(2)}=2.23)$ 。

实验数据和式(2)的计算结果比较,大部分实验点处于 $\pm 20\%$ 的误差范围内。式(2)的试验值范围如表2。

4 结论与建议

1) 倾角对管外沸腾有较大影响,倾角增加,沸腾传热强度加大。在本次实验范围内,当倾角从 $0^\circ\sim 90^\circ$,以水为工质时, h 增加 $50\sim 100\%$;以乙醇为工质时, h 增加 $20\sim 80\%$ 。在不增加任何材料耗量的情况下,仅改变管子的安装角度可提高 $20\sim 100\%$ 的换热强度,这在工程应用中是有相当高的应用价值的。

2) 传热关联式(2)可为工程设计提供参考依据。

3) 当管子垂直放置时,高热流密度下传热可能恶化。此时管长可能有最佳值,可进一步探索管长对沸腾传热的影响。

表2 无因次数的范围

| | |
|--------|----------------|
| St | 0.00555~0.0400 |
| Ang | 1.00~2.71828 |
| L/D | 5.00~9.579 |
| Re_b | 0.0548~0.269 |
| Pr_1 | 1.866~8.167 |

代 表 符 号

L —管长,mm;

q —热流密度, W/m^2 ;

T_w —壁面温度, $^\circ C$;

θ —倾角, $^\circ$;

h —换热系数, $W/m^2\cdot k$;

H_{fg} —汽化潜热, J/kg ;

T_{sat} —饱和温度, $^\circ C$;

D —管外径,mm;

g —重力加速度, m/s^2 ;

ρ —密度, kg/m^3 ;

σ —表面张力, N/m ;

μ —动力粘度, $N\cdot s/m^2$

参 考 文 献

- 1 Githinji P M, Safeshy R H, ASME J. of Heat Transfer, 1963, 11, 379
- 2 Chen Li-Ting, Letters in heat and mass transfer, 1978, 5, 111~120
- 3 Vishnev I P et al. Heat transfer-Soviet Research, 1976, 8(7), July-August, 104-108
- 4 Nishikawa K, Int. J. of Heat and Mass Transfer, 1984, 27(9), 1559~1570
- 5 Venert J K S, Proc, 8th, Int. Heat Transfer Conf
- 6 Rohsenow et al, Transection of ASME, 1952, 74, 965
- 7 刘洪, 重庆大学硕士学位论文, 1989年3月