

# 三维扩展表面管加多孔导液带的凝结换热

CONDENSATION HEAT TRANSFER ON THE THREE-DIMENSIONAL  
EXTENDED SURFACE TUBE ATTACHED BY A POROUS DRAINAGE STRIP

杜 扬\*\*

辛 明 道

Du Yang

Xin Mindao

(工程热物理研究所)

**摘 要** 本文对三维扩展表面管轴向槽的形状和深度对换热的影响, 三维扩展表面管加多孔导液带组合的凝结换热进行了实验研究。结果表明轴向槽的形状和深度的影响均为10%左右。组合方法是强化水平低肋管凝结换热的有效方法, 对乙醇, 可提高凝结换热系数达152%, 对于水蒸汽达185%。

**关键词** 三维扩展表面; 多孔导液带; 凝结换热; 实验研究  
中国图书资料分类法分类号 TK124

**ABSTRACT** An experimental study was carried out for the condensation heat transfer on the three dimensional extended surface tube attached by a porous drainage strip. The results show that the combination of the three-dimensional extended surface and the porous drainage strip is the effective method enhancing condensation heat transfer on the horizontal tube. The change of the shape and depth of the axial grooves results in a 10% variation of condensation heat transfer coefficients. In the range of the experiments, for alcohol as the working fluid, the enhancement is up to 152%, and for water, 185% as compared with the horizontal low-finned tube.

**KEY WORDS** three-dimensional extended surface tube, porous drainage strip, condensation heat transfer, experimental study

## 一、前 言

近一、二十年来, 由于世界范围内的能源危机感, 低品位能量利用的需要, 以及节约貴重金属、降低设备成本的需要, 使得人们不断深入研究换热强化; 水平管外的凝结换热的强

\* 本文在1988年11月上海召开的中国工程热物理学会年会上宣读。

\*\* 现在解放军后勤工程学院(重庆)任教。

本文于1988年12月13日收到。

化研究也是一个重要组成部分。

自1954年Gregorig[1]提出表面张力对扩展表面凝结换热的重要作用后,人们有目的地研究了各种扩展表面,利用表面张力减薄凝结液膜以强化水平圆管外的膜状凝结换热。低肋管是目前工业上广泛应用的水平管外凝结的管型。在低肋管的基础上,人们又研制了三维扩展表面管。例如Hitachi Thermoexcel-C,这是一种有代表性的三维扩展表面[2],其结构示意图如图1所示。文献[2,3]的实验揭示:用这样的三维扩展表面管制造的换热器将减小体积30%。文献[4]中,用这样的管型做了一台样机,换热器的换热效率为低肋管的1.5~1.7倍。有的作者指出:这样管型槽的间距是重要参数[4]。对R-11,最佳槽节距为0.7mm。这与低肋管的肋间距最佳尺寸差不多。三维扩展表面是70年代才发展起来的新的凝结管型。由于几何形状很不规则,理论分析尤为困难,其凝结换热强化的机理研究也很不充分。在设计、制造三维扩展表面时,自然要遇到选取什么样的槽形状、槽深度的问题;而目前还没有见到过这方面的报道。在本文里,我们对槽形状和深度的影响进行了实验研究,对凝结换热强化的机理进行了探索分析。

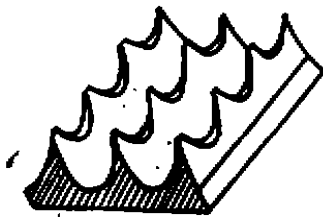


图1 三维扩展表面结构示意图

三维扩展表面管在表面张力作用下同样存在着非淹没区和淹没区。用加导液带的方法强化低肋管的凝结换热是目前认为减小淹没角的一种较好的方法。而多孔导液带认为是较好的一种导液带[5—11]。在本文里,对三维扩展表面管加多孔导液带也进行了实验研究,以探讨多种强化方法组合强化水平低肋管凝结换热的效果,也有益于探索三维扩展表面管强化凝结换热的机理。

## 二、实验装置与实验过程

实验装置示意图如图2所示。实验筒体是内径为200mm,长215mm的玻璃筒。在冷却水

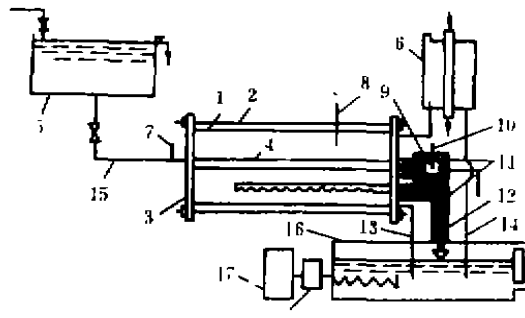


图2 实验装置示意图

- |           |                 |
|-----------|-----------------|
| 1——实验段筒体; | 10——冷却水出口测温热电偶; |
| 2——固定拉条;  | 11——绝热层;        |
| 3——法兰盘;   | 12——蒸汽进管;       |
| 4——实验元件;  | 13——凝结液回流管;     |
| 5——稳压水箱;  | 14——凝结液回流管;     |
| 6——二次冷却器; | 15——冷却水管道;      |

- 7——冷却水进水测温热电偶; 16——蒸发器;  
 8——蒸汽空间测温热电偶; 17——稳压器;  
 9——测温小室; 18——变压器。

进口处有长约80mm的一段直管, 在管内插入螺旋钢丝, 以增强冷却水流动的进口扰动。凝结压力为当地大气压。作比较用的低肋管和加工三维扩展表面管的低肋管是工业中常用的低肋紫铜管, 肋形为梯形。其几何参数见表1。图3、图4、图5为加工的三维扩展表面管不

表1 低肋管几何参数(mm)

长	内径	外径	壁厚	肋高	肋端厚	肋根厚	节距
215	13.93	18.83	1.365	1.285	0.375	0.71	1.04

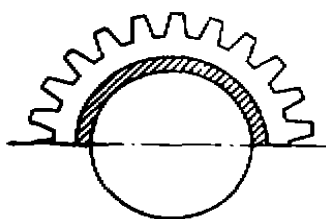


图3 弧形三维扩展表面

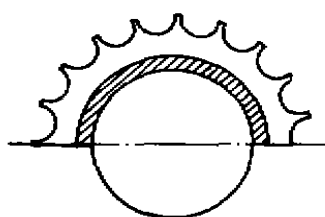


图4 三角形三维扩展表面

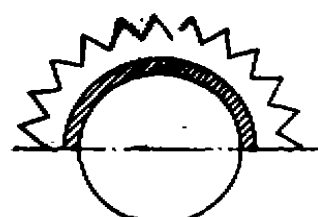


图5 梯形三维扩展表面。

表2 三维扩展表面的几何参数(mm)

编号	形状	槽密度(个/米)	槽高	弧半径	节距	顶角	肋端肋间距	肋基肋间距
T1	弧形	710	0.64	0.57	1.048	/	/	/
T2	三角形	913	0.64	/	1.095	45°	/	/
T3	梯形	710	0.64	/	1.408	/	0.665	0.33
T4	梯形	540	1.285	/	1.85	/	0.665	0.33

表3 多孔导液带的几何参数(mm)和数目

型号	d	t	L	W	N	注
TP1	0.1	0.22	20	1.4	116	工质为乙醇
TP2	0.3	1.11	20	1.5	24	工质为水蒸汽

同槽形状示意图。其实验管试件的几何参数见表2。实验用的多孔导液带其几何参数见表3。表中T表示三维扩展表面管, TP为三维扩展表面管加多孔导液带。多孔导液带被置入T管底部开的轴向槽内, 槽宽1.5mm, 深1.3mm。实验工质为乙醇和水蒸汽。

所有实验元件在实验前先用酒精浸泡, 后经碱洗、酸洗再经铬酸浸泡作钝化处理, 然后沸水煮后放入清水池浸泡, 然后吹干以备使用。

所有测温元件都是用直径为0.2mm的镍铬—镍硅热电偶。汽空间用四根热电偶测量温度取其平均值。冷却水进口和出口分别用二根热电偶测量取其平均值。冷却水流量用量杯量

测。实验前做了热平衡试验。凝结液放热和管内冷却水吸热作比较，不同的热负荷下其相对误差为 $\pm 3 \sim \pm 5\%$ 。

### 三、凝结换热系数的确定

求取凝结换热系数是用总传热热阻减去冷却水一面的换热热阻和管壁的热阻得到。定性尺寸对于管内是内径，管外是肋基处直径。显然得到准确的管内流动换热公式是至关重要的。通过实验，我们回归出以下的适用于我们实验装置的计算管内对流换热系数的准则方程式

$$N_u = 0.0469 Re^{0.757} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.11} \quad (1)$$

为了验证该方程的准确度，用乙醇的光管外膜状凝结的实验数据，由式(1)外推计算该实验的凝结换热系数。其结果与Nusselt方程(12)比较误差为0—3%，与实验方程(13)比较，误差为0—17%。

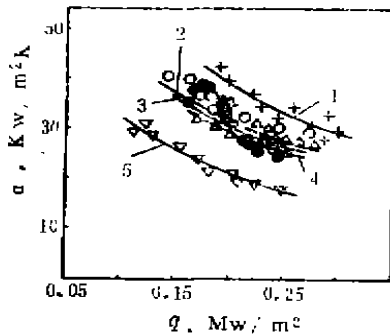


图6 三维扩展表面的实验结果(乙醇)  
1—T4; 2—T3; 3—T1;  
4—T2; 5—B。

### 四、实验结果与讨论

对乙醇为工质，其T管的凝结换热实验结果如图6所示。其平均换热系数 $\alpha_m$ 与低肋管(B管)的平均换热系数 $\alpha_{m0}$ 的比值如表4所示。最大的强化倍数为1.56(T4管)。T4管为梯形槽，其槽深与低肋等高。T4管强化换热效果好一些，但仅比T3管高出10%，并无明显增大，说明轴向槽深度在肋半高与肋高范围内变化影响较小。T2管强化换热效果最低是由于该管轴向槽为三角形，表面张力作用最差。所以，对低 $\sigma/\rho$ 值的凝结工质，槽几何参数是否有利于表面张力作用是影响强化换热效果的重要因素。

对图6所示实验结果比较、分析可以看到，轴向槽的形状影响较小，仅为10%左右。这与低肋管上肋的形状影响不大(10~15%)的结论是吻合的。

对图6所示实验结果比较、分析可以看到，轴向槽的形状影响较小，仅为10%左右。这与低肋管上肋的形状影响不大(10~15%)的结论是吻合的。

表4 平均传热系数的比较(三维扩展表面，乙醇)

型 号	B	T1	T2	T3	T4
$\alpha_m/\alpha_{m0}$	1	1.45	1.37	1.48	1.56

图7给出了水蒸汽为工质，T管的凝结换热实验的结果。其平均换热系数 $\alpha_m$ 与低肋管的平均换热系数 $\alpha_{m0}$ 的比值如表5所示。最大的强化倍数仅为1.36(T2管)。这是由于我们所加工的实验管轴向小槽的几何特征尺度远小于象水蒸汽这样的高 $\sigma/\rho$ 值工质表面张力作用的

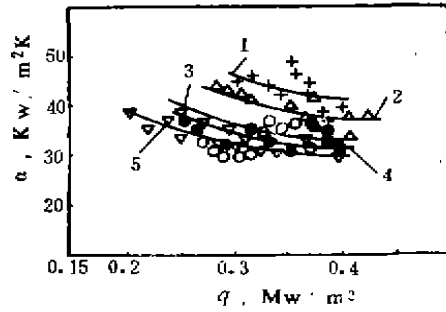


图7 三维扩展表面的实验结果(水蒸汽)  
1—T2; 2—T3; 3—T4;  
4—T1; 5—B。

最佳尺度(对水蒸汽为1.5mm至2mm)。对乙醇和水蒸汽的实验结果比较可以得出, 表面张力作用加强, 是三维扩展表面强化凝结换热的重要原因。另外, 可以看到, T2管(三角形槽管)在水蒸汽凝结中效果最好而在乙醇凝结中效果最差。这主要是由于T2管具有底部排液性能较好而表面张力作用较差的双重特性。对 $\sigma/\rho$ 值较大的工质(例如水蒸汽)其排液性能较差, 淹没区换热系数占总换热系数份额较大, 所以表现出T2管的强化效果较好。这说明, 三维扩展表面强化凝结换热的另一主要原因是由于加速管底

表5 平均换热系数的比较(三维扩展表面, 水蒸汽)

型 号	B	T1	T2	T3	T4
$\alpha_m/\alpha_{ms}$	1	1.04	1.37	1.26	1.04

部排液所致。

对乙醇、水蒸汽为工质, T管加多孔导液带的实验结果分别如图8、图9所示。其平均换热系数 $\alpha_m$ 与低肋管的平均换热系数 $\alpha_{ms}$ 的比值分别列在表6、表7。

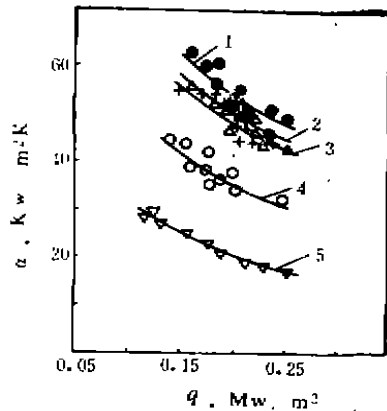


图8 三维扩展表面加多孔导液带的实验结果(乙醇)  
1—T1P; 2—T3P; 3—T2P;  
4—T4P; 5—B。

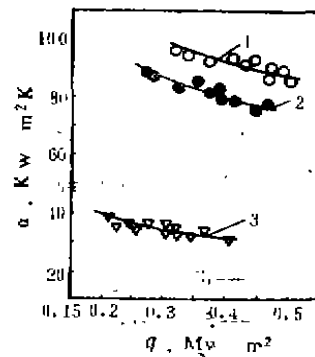


图9 三维扩展表面加多孔导液带的实验结果(水蒸汽)  
1—T3P; 2—T1P;  
3—B。

表6 平均换热系数的比较(三维扩展表面加多孔导液带, 乙醇)

型 号	B	T1P	T2P	T3P	T4P
$\alpha_m/\alpha_{ms}$	1	2.62	2.23	2.27	1.76

表7 平均换热系数的比较(三维扩展表面加多孔导液带, 水蒸汽)

型 号	B	T1P	T3P
$a_m/a_{ms}$	1	2.57	2.85

对乙醇, 换热系数的比值最大为2.52, 对水蒸汽为2.85。在多孔导液带作用下, 加快了凝结液流动, 减小了凝结液在肋间滞留使得三维扩展表面充分发挥其有利于表面张力双向作用的优势, 此时, 较之低肋管, 其凝结液更薄。

从图8可以看到, 三角形轴向槽的换热强化效果最好。这是由于在多孔导液带作用下, 强化换热的主要矛盾是增多表面张力作用槽。在所加工的试管中, 以三角形槽的槽密度可以加工得最大, 所以, 表现出最佳效果。实验表明, 在加多孔导液带后可以增大槽密度, 可以推知, 低肋管在加多孔导液带后也可以加大肋密度。对于水蒸汽, 从图9可以看到, 梯形槽的强化换热效果最好。

## 五、结 论

1. 三维扩展表面管外的凝结换热同低肋管比较, 对于乙醇可以提高换热系数56%, 对于水蒸汽提高36%。
2. 三维扩展表面管底部加多孔导液带后, 同低肋管比较, 对于乙醇凝结换热系数可以提高152%, 对于水蒸汽可以提高185%。
3. 三维扩展表面管的轴向槽形状和槽深对凝结换热的影响, 相差为10%左右。
4. 三维扩展表面管加导液带是强化水平低肋管凝结换热的有效方法。

## 致 谢

感谢陈远国教授、夏吉良老师对本实验的帮助; 感谢黄正旭实验师的协助; 本课题获国家自然科学基金会资助, 将此感谢。

符 号	说 明
$d$ —网丝直径;	$W$ —多孔导液带厚度;
$t$ —网丝节距;	$N$ —多孔导液带目数;
$L$ —多孔导液带高度;	$B$ —低肋管;
$T$ —三维扩展表面管。	

## 参 考 文 献

- [1] Gregorig, R., Film Condensation on Finely Rippled Surface with Consideration of Surface Tension, *Z. Angew. Math. Phys.*, 1954, V: 36—49
- [2] Nakayama, W et al., High-Flux Heat Transfer Surface Thermoexcel', *Hitachi Review*, 1975, 24(8): 329—333

- [ 3 ] Arai, N., Fukushina, T., Arai, A., Nakayama, T. and Fulie, K., Trans-ASHRAE, 1977, 83(2): 58—70
- [ 4 ] Honda, H., Nozu, S. and Mitsumori, K., Proceeding of ASME-JSME Thermal Engnr Joint Conference, Honolulu, 1983, 3, 289—295
- [ 5 ] Yau, K.K., Cooper, J.R. and Rose, J.W., ASME HTD-38, 1984, 151—156
- [ 6 ] Yau, K.K., Cooper, J.R. and Rose, J.W., Hori-Zontal Plain and Low-Finned Condenser Tubes-Effect of Fin Spacing and Drainage Stripes on Heat-Transfer and Condensate Retantion, J. Heat Transfer, 1986, 108, 946—950
- [ 7 ] Honda, H., Nozu, S. and Mitsumori, K., Augmentation of Condensation on Horizontal Finned Tubes by Atta a porous Drainage plate, Proc. ASME-JSME Thermal Eng Conf, Honolulu, 1983, 3, 289—296
- [ 8 ] Glincksman, L.R., Mikic, B.B. and show, D.J., AICHE.J., 1973, 19, 636—637
- [ 9 ] Demod, R.M. and Karlekar, B.V., 19th Nat'l Heat Transfer Conf, Orlanda, ASME Paper, 1980, 80—HT—53
- [ 10 ] Selim, G., Int. Develop. Heat Transfer, Proc. Heat Transfer Conf. Univ. of Colorado, 1961, Part 2, 279