

喷涂多孔表面沸腾传热实验研究

赵孝保

(南京师范大学动力工程学院, 南京, 210042)

[摘要] 对喷涂多孔表面沸腾传热进行了实验研究, 喷涂多孔表面有三种厚度, 采用蒸馏水、乙醇和 R-113 作实验工质, 实验在当地大气压下进行. 实验结果表明: 喷涂多孔表面上产生沸腾的起始过热度低, 传热系数比光滑表面高 2~5 倍. 喷涂多孔表面沸腾临界热流也比光滑表面高, 可以在比较宽的热流范围内强化沸腾换热. 实验还表明: 喷涂多孔表面也具有沸腾滞后现象, 但是, 滞后过热度较小. 喷涂技术不仅具有设备简单、操作方便、费用低等优点, 还具有能够适应不同基体表面形状的特殊优点. 因此, 喷涂表面是热管技术和蒸发器强化沸腾传热的一种有效方法.

[关键词] 喷涂多孔表面; 沸腾传热; 临界热流; 沸腾滞后

[中图分类号] TK124; [文献标识码] A; [文章编号] 1008-1925(2001)03-0012-05

0 引言

在常规能源不断减少, 节约和有效使用能源的要求不断提高的形势下, 强化传热技术已经成为传热研究领域的一个重要课题. 强化传热研究, 特别是强化沸腾传热研究, 对提高能源的有效利用率, 新能源开发和高热负荷下材料的热保护等有重要意义. 机械加工表面和烧结粉末多孔表面是一些强化沸腾传热的有效方法, 这些表面强化沸腾传热的机理和特征得到了许多研究, 其中, 粉末多孔表面被认为是性能最好的表面之一^[1~4]. 但是, 烧结粉末多孔表面制造比较麻烦, 费用高, 特别是不适合不规则表面的加工制作. 与之相反, 喷涂技术不仅制造简单, 操作方便, 费用低, 而且适用于不规则表面, 甚至可以直接在设备表面, 如电子元件壳体上加工制作. 因此, 喷涂多孔表面比烧结粉末多孔表面更容易在工程中得到广泛应用, 其强化沸腾传热机理研究具有更重要的意义. 但是, 目前, 对喷涂多孔表面沸腾传热的研究还很少^[5], 在热管技术及蒸发器中的应用还未见报道. 本文主要进行喷涂多孔表面沸腾传热研究, 分析沸腾传热的机理和特征, 对多孔层结构对沸腾传热、临界热流和沸腾滞后曲线的影响作初步的讨论.

1 实验装置与过程

实验装置如图 1 所示, 实验多孔表面(3)由氧—乙炔火焰喷涂技术制作. 细磷锌铜丝在喷嘴喷出的氧—乙炔高温火焰中熔化并喷涂到基体表面上形成多孔层, 实验用基体表面是直径 40mm 的短圆柱紫铜块的上表面. 根据喷涂时间的不同, 得到了三种厚度不同的多孔层, 分别为 0.3 mm、0.9 mm、1.1 mm. 在加热系统中, 辅助加热器(8)用来加热液体并维持饱和状态, 主加热器(5)用于加热实验多孔层, 补偿加热器(6)用于补偿主加热器下部的散热损失. 检流计(14)

收稿日期: 2001-04-16

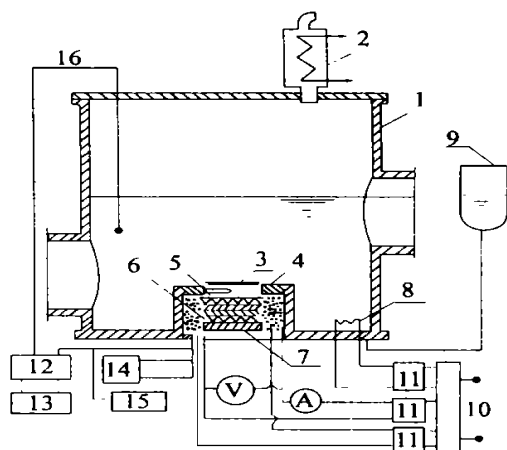
作者简介: 赵孝保, 1962—, 工学博士, 南京师范大学动力工程学院副教授, 主要从事两相流动与沸腾、强化传热等方面的教学与研究.

用于监测补偿功率以保证主加热器加热功率全部经多孔表面传递到池液体中. 为了测得加热表面温度 T_w , 在距紫铜块上表面下方 2 mm 的断面上, 沿周向间隔 120° 钻 3 个深度不同的直径为 1 mm 的小孔, 将 NiCr-NiSi 热电偶分别插入小孔中测量该断面处温度. 加热表面与池液体间的温差 ($T_w - T_{\text{sat}}$) 可以由外推法得到. 主加热器功率由低逐步升高并缓慢达到临界热流, 当表面温度出现飞升时, 加热功率迅速降低, 然后进行加热负荷由高到低的降负荷实验. 在加热功率改变后, 大约经过 10~15 min, 在达到新的稳定工况后, 记录相关数据. 实验用池液体为蒸馏水、乙醇和 R-113. 实验在当地大气压下进行.

2 实验结果与分析

图 2 和图 3 分别是乙醇和 R-113 在三种不同厚度喷涂多孔表面上的沸腾换热实验结果.

图中, ∇ , \circ 和 \square 分别是没有经过浸泡和老化处理的新多孔表面上得到的升负荷沸腾换热曲线. \blacktriangle , \bullet 和 \blacksquare 分别是降负荷沸腾换热曲线. 光滑表面上的沸腾换热曲线也表示在图中, 以便于比较. 图中可见, 喷涂多孔表面在比较低的温差下就激发并维持沸腾, 具有比光滑表面高 2~5 倍的沸腾换热系数. 喷涂多孔表面沸腾换热机理与烧结粉末多孔表面相同^[6]. 在喷涂多孔层内, 有大量的形状不同的孔穴和槽道, 形成了一系列的进入型和再进入型具有良好聚集气(汽)体能力的孔穴. 这些孔穴能够聚集蒸汽或不凝结气体, 成为稳定的沸腾活化中心. 孔穴开口处,



1—容器；2—冷凝器；3—实验多孔层；4—绝热层；5—主加热器；6—补偿加热器；7—薄不锈钢板；8—辅助加热器；9—液位调节器；10—稳压器；11—调压器；12—一切换开关；13—数字电压表；14—检流计；15—数字记录仪；16—热电偶

图 1 实验装置示意图

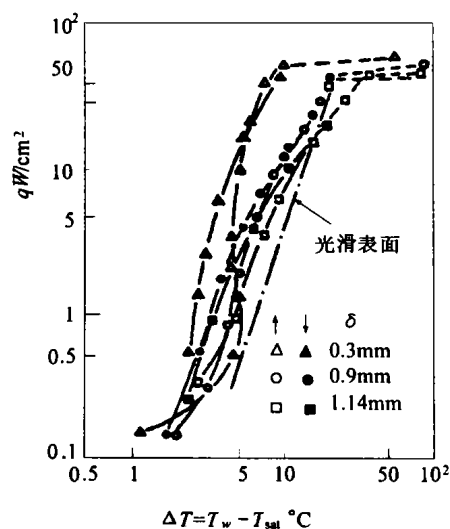


图 2 喷涂多孔表面乙醇沸腾曲线

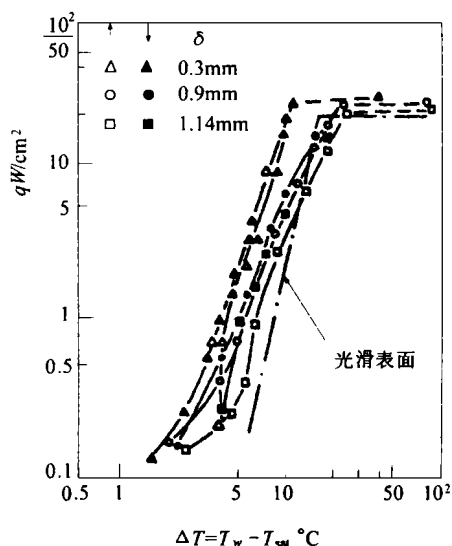


图 3 喷涂多孔表面 R-113 沸腾曲线

维持汽泡半径为 r 的热力学平衡条件为:

$$P_g + P_v - P_l = 2\sigma/r \tag{1}$$

式中: P_g , P_v 分别为孔穴内聚集的不凝地气体和蒸汽的压力; P_l 为池液体压力; σ 为液体表面张力. 聚气(汽)孔穴成为活化核心的壁面过热度可以由理想气体状态方程和 Clausius-Clapeyron 方程^[6]得到:

$$T_w - T_{sat} = \frac{T_{sat}}{\rho_v h_{fg}} \left(\frac{2\sigma}{r} - \frac{3W_g RT_v}{4\pi r^3} \right) \tag{2}$$

式中: ρ_v , T_v , h_{fg} , R 和 W_g 分别为蒸汽密度、蒸汽温度、蒸发潜热、气体常数和孔穴内气体质量. 对于非聚集气体孔穴, $W_g = 0$, 则激发沸腾的温差为:

$$T_w - T_{sat} = \frac{T_{sat}}{\rho_v h_{fg}} \frac{2\sigma}{r} \tag{3}$$

因此, 喷涂多孔表面可以使沸腾起始温差减小. 因为, 孔穴是相互连通的, 在沸腾爆发后, 多孔层内形成了许多大大小小的蒸汽区, 在这些蒸汽区周围的颗粒表面上形成了大面积的薄液膜, 液膜强烈蒸发导致热阻显著降低, 因而, 沸腾传热得到了强化. 图中还表明, 乙醇沸腾传热性能优于 R-113, 这与沸腾液体的物性有关. 孔穴聚集气体的能力取决于液体特性, 两者的定性关系可以分析如下:

蒸汽从孔穴内溢出和蒸汽流向充液孔穴时汽-液两相流动如图 4(a)和图 4(b). 显然, 如果接触角 β 大于孔穴锥角 ϕ 或 $\beta > (\pi - \phi)$, 则孔穴可以持久聚集气体, 如果 $\beta < \phi$ 或 $\beta < (\pi - \phi)$, 则孔穴不能聚集气体. 对于乙醇与铜表面而言, $\beta_{a1} = 8^\circ - 15^\circ$, R-113 与铜表面的 $\beta_{R-113} < 5^\circ$. 因此, 使用 R-113 作沸腾液体时, 多孔表面中非聚集气体孔穴数量比使用乙醇时多. 因为多孔层中孔穴形状非常复杂, 与图 4 中简单结构有显著不同, 所以, 以上分析只能作定性的解释. 实验还表明, 喷涂多孔表面的沸腾传热性能没有烧结多孔表面的性能好^[7]. 这因为, 喷涂多孔层的空隙率比烧结多孔层低, 喷涂多孔层中孔穴相互连通性没有烧结多孔层好, 喷涂多孔层内薄液膜面积比烧结多孔层少, 所以, 喷涂多孔层内汽液两相流动循环比烧结多孔层差. 因此, 需要改进喷涂技术, 以提高喷涂多孔层的空隙率和沸腾传热性能. 图 2 和图 3 还表示出了多孔层厚度对沸腾传热性能的影响. 图中可见, 随多孔层厚度增加, 沸腾传热性能下降. 因为, 喷涂多孔层空隙率低, 多孔层密实, 多孔层内薄液膜面积并不随多孔层厚度增加而显著增加. 相反, 流动阻力和热阻却有较大的增加, 在相同热流下, 壁面过热度增加, 传热系数降低. 因此, 使用喷涂表面强化沸腾传热时应尽可能采用薄多孔层.

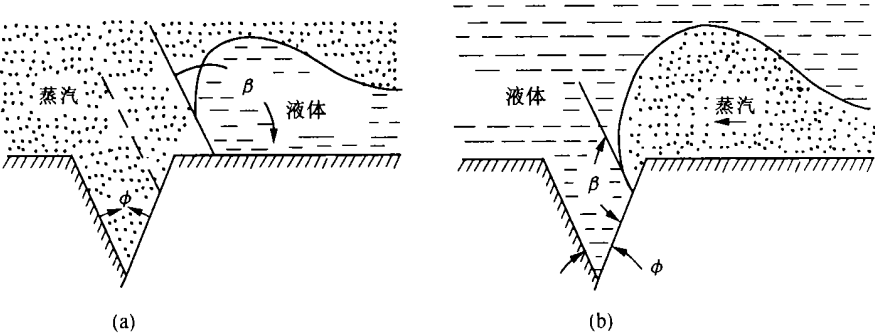


图 4 孔穴聚集气体能力

临界热流的变化也表示在图2和图3中。图中, 喷涂多孔表面的临界热流比光滑表面高, 因此, 与烧结多孔表面一样, 喷涂表面可以在更广泛的热流范围内强化传热性能。首先, 对于喷涂多孔层而言, 液体在毛细力和以细柱喷射形式溢出的蒸汽流的抽吸力作用下, 可以充分地回流到多孔层内, 使沸腾危机(临界沸腾)推迟。其次, 细蒸汽柱几乎不相互聚合, 没有阻碍液体回流到加热表面上。而对光滑表面而言, 蒸汽泡只有在聚集到一定大小时, 才从加热表面脱离, 因此, 蒸汽泡对液体回流有较大的阻碍作用。因为, 空隙率低, 多孔层内薄液膜面积小, 所以, 喷涂多孔表面临界热流比烧结表面低。临界热流也与液体物性有关, 乙醇临界热流比 R-113 高。图中, 不同液体工质时, 临界热流都与多孔层厚度没有明显的关系。实验用喷涂多孔表面具有相似的多孔结构, 实验工质也具有相同的浸润性, 相同多孔层结构时, 加热面上的液体回流性能相同。当沸腾危机产生时, 多孔层被蒸汽充满, 在多孔层上表面形成一个纯蒸汽膜层^[7]。此时, 多孔层内, 毛细力、蒸汽抽吸力和流动阻力对沸腾传热已不再有影响。但是, 随多孔层厚度增加, 热阻增大, 传热温差显著增加。这与文献[6]的实验结果是一致的。相同多孔层厚度下, 液体物性对沸腾传热性能的影响表示在图5和图6中。在热流密度为 $1\sim 30\text{ W/cm}^2$ 范围内, 乙醇性能最好、蒸馏水次之, R-113 最差。 $(\rho_l h_{fg})_{\text{R-113}}$ 最小, $(\mu_l)_{\text{R-113}}$ 最大, 在相同热流下, R-113 蒸汽流动速度最大, 汽液两相流动循环性能最差, 热阻最大。因此, R-113 性能最差。因为, $(\rho_l h_{fg})_{\text{al}}$ 比 $(\rho_l h_{fg})_{\text{R-113}}$ 大, $(\mu_l)_{\text{al}}$ 比 $(\mu_l)_{\text{R-113}}$ 小, 所以, 汽液两相流动循环得到了改善, 热阻降低, 乙醇沸腾传热性能得到了提高。蒸馏水的沸腾传热性能没有乙醇好, 是因为在实验进行的热流范围内, 汽液两相流动循环和传热还没有达到最佳工况。图中可见, 当热流密度超过 30 W/cm^2 时, 蒸馏水沸腾传热变得比乙醇和 R-113 好。由图2和图3还可以发现, 喷涂多孔表面同样有沸腾滞后现象, 但是, 沸腾滞后程度(壁面过热度)比烧结表面小^[6]。因为, 喷涂多孔层空隙率低, W_g 小, 所以, 激发沸腾的壁面过热度大, 几乎与光滑表面相同。因此, 喷涂多孔表面的沸腾滞后程度小, 而这种小滞后程度是换热设备所需要的, 特别是对电子元件的安全和可靠运行有重要影响。

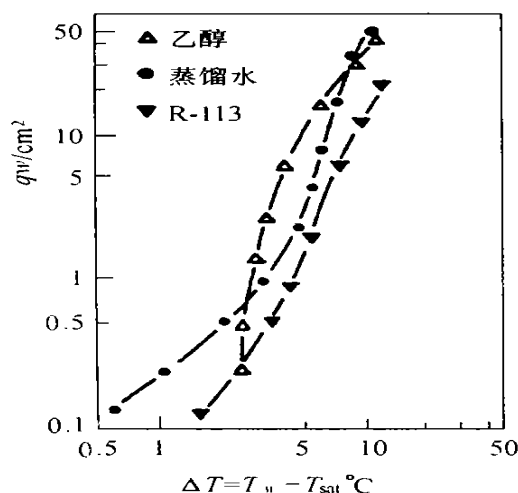


图5 厚度为 0.3 mm 时喷涂多孔表面上沸腾曲线

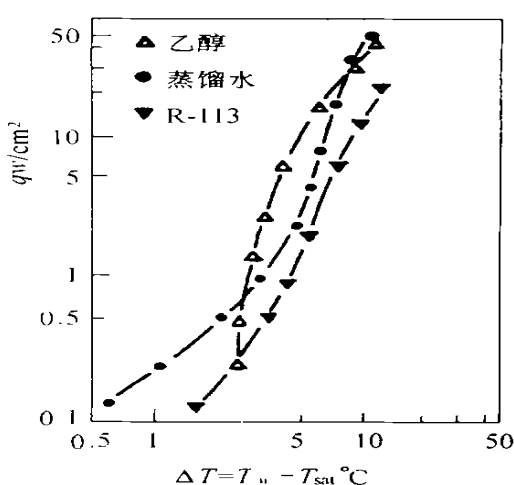


图6 厚度为 0.9 mm 时喷涂多孔表面上沸腾曲线

3 结论

(1) 喷涂多孔表面激发沸腾时壁面过热度低, 沸腾传热系数高, 强化传热的热流范围大, 因此, 喷涂多孔表面是热管和蒸发器表面多孔结构的一种有效形式。

(2) 喷涂技术不仅具有设备简单、操作方便和费用低等优点,还具有适合各种复杂基体表面的特点,因此,喷涂多孔层结构是值得广泛推广和应用的一种多孔层结构。

(3) 喷涂多孔表面的临界热流有一定程度的提高,多孔层厚度对临界热流没有明显的影响,但是,因为空隙率低,所以在实际使用中应选择薄多孔层结构。

(4) 喷涂多孔表面沸腾滞后程度小,这有利于设备安全和可靠运行。应该改进喷涂加工技术,提高多孔层空隙率,以进一步增强沸腾传热性能。

[参考文献]

- [1] Ó'Neill P S, Gottzman C F, Terbot J W. Novel Heat Exchanger Increase Cascade Cycle Efficiency for Natural Gas Liquefaction[C]. In *Advances in Cryogenic Engineering*, Timmerhaus, K. D, ed. Plenum, New York, 1972: 420~ 437
- [2] Bergles A E, Chyu M C. Characteristics of Nucleate Pool Boiling from Porous Metallic Coatings[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1982, 104(2): 279~ 285
- [3] Nishikawa K Ito T. Augmentation of Nucleate Boiling Heat Transfer by Prepared Surfaces[C]. In *Heat Transfer in Energy Problem*, Mizushima, T. and Yang, W. J. eds. Hemisphere, Washington, D. C., 1982: 111~ 118
- [4] Afgan N H, Jovic L A, Kovalev S A, *et al.* Boiling Heat Transfer from Surfaces with Porous with Porous Layer[J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 1985, 28(2): 415~ 422
- [5] Dahl M M, Ebb L O. Liquid Heat Exchanger Interface and Method[P]. U. S. Patent 3,990,862, 1976-11-09
- [6] Zhao X B, Zhang H J. Experimental Study of Pool Boiling Heat Transfer from Powder Porous Surface at High Heat Flux [C]. In *Advances in Phase Change Heat Transfer*, Xin Minglao, ed. International Academic Publisher and Chongqing University Press, 1988: 236~ 241
- [7] Zhao X B, Zhang H J. Analysis and Experimentation on Boiling Heat Transfer in Thin Powder Porous Layers at High Heat Flux[J]. *Chinese Journal of Engineering Thermophysics*, 1990, 2(3): 323~ 333

Experimental Research on Pool Boiling Heat Transfer from a Spraying Porous Surface

Zhao Xiaobao

(College of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, 210042, PRC)

Abstract: Boiling heat transfer on the flame spraying porous surface was experimentally studied. The tested spraying porous layers were made of gear bronze with three different thickness. Distilled water, ethyl alcohol and R-113 were used as working liquids. The experimental was performed at the saturated temperature under local atmospheric pressure. The experimental results show that for such porous layer, the wall superheat required to initiate boiling is low, the boiling heat transfer coefficient can be higher than that of smooth plane surface by about twofold to fivefold. At the same time, the critical heat flux of such spraying porous layer is also higher than that of smooth plane, and it can enhance the boiling heat transfer within wide heat flux range. The experiment also reveals that the boiling hysteresis is not serious. The spraying technique not only has the advantages of simple equipment, convenient operation and low cost, but also can be suited for irregular base surface with complex geometry shapes. So, the spraying porous surface is a promising type of wick structure for heat pipe and vapor chamber.

Key words: spraying porous surface, boiling heat transfer, critical heat flux, boiling hysteresis

[责任编辑: 刘健]