

波槽管管外珠状凝结换热的实验探讨

黄渭堂, 刘 锋, 照日格图

(哈尔滨工程大学 动力与核能工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 在水平及垂直管外水蒸气凝结的条件下, 对 4 种实验管的传热性能进行了比较实验研究。对于水平、略高于大气压的凝结条件, 在实验范围内, BGT 管的总传热系数约为光管的 1.38~1.60 倍, 而 BGT-1 管的总传热系数约为光管的 2.05~2.16 倍。对于同一管型, 在真空 $P_h=0.0686$ MPa、冷却水 Re 数 $5 \times 10^3 \sim 4 \times 10^4$ 范围内, BGT-1 管垂直布置时总传热系数约为水平布置时的 0.78~0.87 倍。实验结果表明, 布置方式、蒸汽凝结负荷及压力是维持珠状凝结持久的重要因素。

关 键 词: 波槽管; 珠状凝结; 水质; 铜镍合金

中图分类号: TK124 文献标识码: A

(水平); $Re=5 \times 10^3 \sim 4 \times 10^4$ (垂直)。

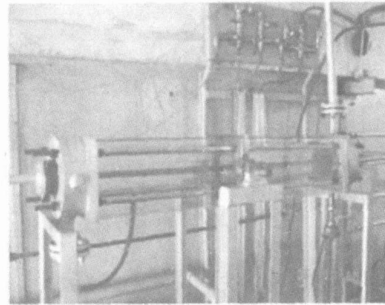


图 1 水平实验装置

1 引 言

我们近期开发的波槽管是一种传热性能很不错的双侧强化管^[1~2], 为了进一步提高其强化效果, 作者对波槽管进行了表面改性处理, 在管外壁上实现了良好的珠状凝结, 并对 4 种管型在水平及垂直布置条件下进行了膜状凝结及珠状凝结的对比实验, 为冷凝器强化传热元件的开发做了新的初步探索。

2 实验装置、实验管及实验条件

水平实验装置如图 1 所示, 冷凝试验体的壳体为硼化玻璃筒, 可清晰地观察实验管表面的凝结状况。实验管的表面特征、材质及结构参数如表 1 所示。实验管有效换热长度为 930 mm, 波槽管的组合结构参数 $\phi=e^2/(p \cdot d)$, 其中 e 为波槽管的槽深, p 为节距, d 为管子内径。

实验条件: 换热管水平或垂直布置, 实验管的壳侧为略高于大气压或真空条件下的水蒸气凝结, 所有工况点的蒸汽流速小于 10 m/s。管侧冷却水为自来水, 冷却水的实验参数范围: $Re=5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4$

表 1 实验管表面特征、材质及结构参数

	表面特征	材质	外径 d_o /mm	Φ
BST	光滑圆管	铜镍合金	16	—
BGT	波槽管	铜镍合金	16	0.004 422
BST-1	光管表面改性处理	铜镍合金	16	—
BGT-1	波槽管表面改性处理	铜镍合金	16	0.004 379

3 强化传热机理

波槽管是一种双侧高效强化管。在管内冷却水侧, 其流道截面是收缩、扩大反复改变的。这种结构特征使得收缩区流体速度增加、静压减小, 扩大区流速减小而静压增大, 使得管壁内侧产生涡流; 同时在扩大区的进口处, 由于流速较高将发生喷射效应, 而在收缩处将产生节流效应。上述作用的结果, 一方面使层流底层减薄, 另一方面也增加了主流的紊流度, 从而使管内冷却水侧的换热得到显著增强。

波槽管的外壁呈波浪状, 由于波形凸起处与凹槽处的曲率半径不同, 这种结构特点有利于水平布置条件下凝液的排泄, 从而使凹槽两边的冷凝液膜

收稿日期: 2005-01-15; 修订日期: 2005-06-10

作者简介: 黄渭堂(1945-), 男, 浙江义乌人, 哈尔滨工程大学教授。

减薄,减小了热阻,提高了冷凝换热系数。

波槽管管外进行表面改性处理后,使得管面的表面能大大降低,从而促成了良好的珠状凝结。波状结构及珠状凝结的复合,使得这种管型的凝结换热得到显著地增强。

4 水平实验管传热结果及分析

实验所得数据采用修正的 Wilson 方法进行处理,在略高于大气压条件下所得实验结果如图 2 ~ 图 4 所示。

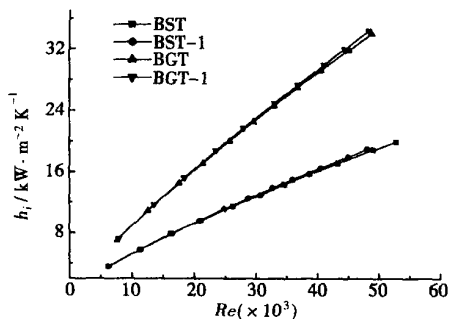


图 2 Re 与 h_i 的关系曲线

由图 2 可见,普通光管与经表面改性处理的特殊光管,其管内对流换热系数 h_i 均随管内冷却水雷诺数 Re 增加而增加,且两者吻合很好;而结构尺寸相同的 BGT 管与 BGT-1 管的 h_i 两者吻合也相当好,这说明实验数据是可信的。

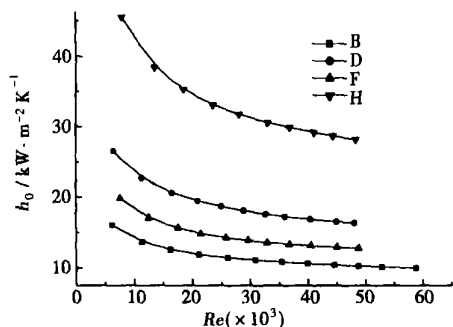


图 3 Re 与 h_o 的关系曲线

图 3 给出了 4 种实验管管外凝结换热系数 h_o 随冷却水 Re 数的变化关系。由图可见,在实验范围内,当 Re 数一定时 3 种强化管的 h_o 均比光管的高。而经表面改性处理、实现珠状凝结的 BST-1 管及 BGT-1 管的 h_o 均比形成膜状凝结的 BST 管及 BGT 管的高。BST-1 管及 BGT-1 管表面凝结状况

如图 5 照片所示。

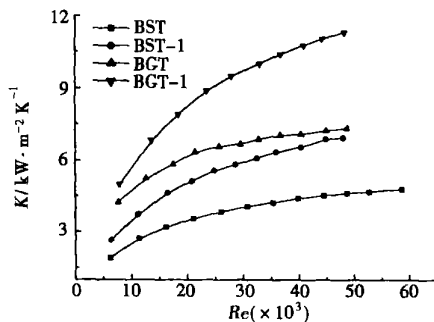


图 4 Re 与 K 的关系曲线

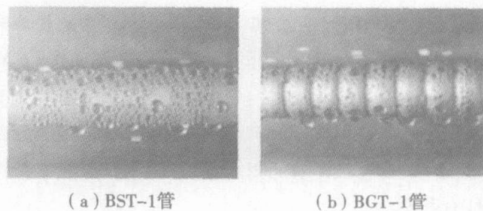


图 5 BST-1 管及 BGT-1 管表面凝结状况

由图可见,在实验范围内 BGT-1 管的 h_o 比 BST-1 管的要大得多,这主要是因为(见图 5) BGT-1 管的波形结构特征使得成珠后脱离直径较小,从而使得凝结中心成珠频率高,这必然使表面凝结强度大大增加。此外波形凹槽有利于波形顶部液珠的排泄,这也是 BGT-1 管 h_o 高的另一个原因。

图 4 给出了 4 种实验管总传热系数 K 与管内冷却水 Re 数的关系曲线。众所周知,对于冷凝管而言,在管材及结构尺寸一定的条件下,其主要热阻在管内,因此对管内冷却水侧采用强化技术其强化效果最为显著;BGT 管是一种双侧强化管,在实验范围内它的总传热系数明显高于 BST-1 管,其原因正在于此。

BGT-1 管的管外采用了复合强化方法,管外凝结换热大大增强,从而使得总传热系数也得到了显著提高,表 2 给出了 3 种强化管的 h_i 、 h_o 及 K 的强化效果。

表 2 3 种管型的强化效果

	H_i/h_{iS}	H_o/h_{oS}	K/K_S
BST 管	1	1	1
BGT 管	1.72~2.02	1.22~1.23	1.38~1.60
BST-1 管	0.97~1.02	1.59~1.67	1.14~1.28
BGT-1 管	1.89~2.10	3.03~3.16	2.05~2.16

由表 2 可见, 在实验范围内, BGT-1 管与光管比较: $h_i/h_{iS}=1.89 \sim 2.10$, $h_0/h_{0S}=3.03 \sim 3.16$, 而 $K/K_S=2.05 \sim 2.16$ 。

实验结果表明, 波槽管是既能强化管内冷却水换热, 又能强化管外膜状凝结换热的一种双侧强化管, 在波槽管管外进行表面改性处理促成珠状凝结是进一步提高波槽管传热性能的重要途径之一。

5 垂直实验管传热实验结果及分析

图 6 所示为垂直实验装置, 水蒸气在实验管外自上而下流动, 冷却水在管内自下而上流动。在实验管垂直布置的条件下, 由于凝液受重力作用沿管壁向下流动, 凝液膜厚度不断增加, 而自上而下沿管长局部凝结换热系数是逐渐降低的。这种特点无论对膜状凝结还是珠状凝结均有重大的影响。

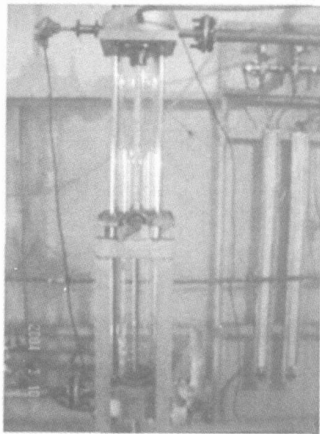


图 6 垂直实验装置

实验观察还发现, 蒸汽凝结压力对珠状凝结换热有明显的影 响。BST-1 管在略高于大气压的条件下凝结时, 实验管上部形成珠状凝结的区域很小, 而在真空条件下则珠状凝结的区域要大得多。究其原因在于, 对水水质而言, 随着蒸汽凝结压力的上升, 水的表面张力逐渐减小, 但表面改性处理后的实验管的表面能是一定的, 随着凝结压力的增加, 凝液与实验管壁面之间的表面能之差减小, 当实验管壁面表面能接近、等于甚至大于凝液温度对应的表面张力时就丧失了形成珠状凝结的基本条件而只能处于膜状凝结状态。图 7 示出了 BST-1 管及 BGT-1 管在真空 $P_h=0.0686 \text{ MPa}$ 条件下的表面凝结状况。对于 BST-1 管而言, 在略高于大气压的条件下, 当冷却水 $Re=8000$ 时 BST-1 管上部仅约 100 mm 区域内是珠状凝结, 而在真空条件下珠状凝结

区域扩大。BGT-1 管的珠状凝结状况要好于 BST-1 管, 在真空 $P_h=0.0686 \text{ MPa}$ 条件下, 当冷却水 Re 数由 5000 变至 42000 时珠状凝结区域由 480 mm 缩小至 104 mm, 这就是由于随着管内 Re 数的增加, 蒸汽凝结负荷增加, 导致壁面上凝液量增加的结果。

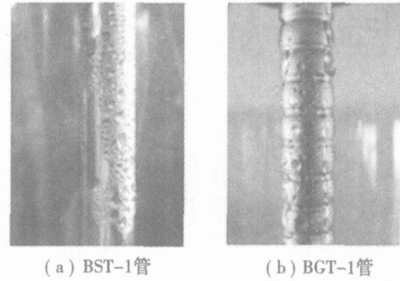


图 7 垂直布置时两种管型表面凝结状况

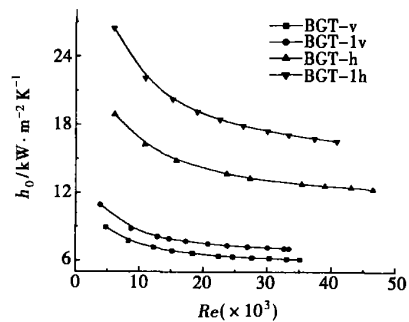


图 8 Re 与 h_0 的关系曲线

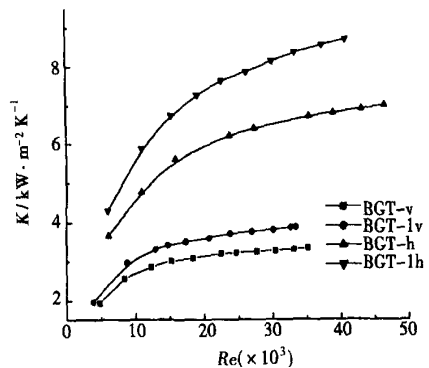


图 9 Re 与 K 的关系曲线

图 8 和图 9 示出了真空 $P_h=0.0686 \text{ MPa}$ 条件下, BGT 管及 BGT-1 管在水平及垂直布置条件下 h_0 及 K 与管内冷却水 Re 数关系的曲线。由图可见, 对于同一管型, 水平布置比垂直布置情况下的 h_0 与 K 要大得多。在真空 $P_h=0.0686 \text{ MPa}$, 冷却水 Re 数在

$5 \times 10^3 \sim 4 \times 10^4$ 范围内, BGT-1 管垂直布置时管外凝结换热系数约为水平布置时的 0.39 倍, 而总传热系数约为水平布置时的 0.78 ~ 0.87 倍。

对于采用垂直布置的电站及船用汽轮机装置的给水预热器而言, 要提高其换热效率, 实现给水预热器的小型化, 采取措施对凝液进行疏导是一个必需解决的问题。

6 结 论

在水平及垂直布置条件下, 对 4 种实验管的传热性能进行了比较实验研究, 结果表明:

(1) 在水平布置、略高于大气压凝结条件下, 在管内冷却水 $Re = 5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4$ 的范围内, 管外实现珠状凝结的双侧强化管 BGT-1 管的总传热系数 K 约为普通光管的 2.05 ~ 2.16 倍, 普通波槽管的总传热系数约为光管的 1.38 ~ 1.60 倍。这表明波槽管管外实现珠状凝结后, 可使水平冷凝管的传热效

果显著增强。

(2) 对于同一管型, 在真空 $P_h = 0.0686$ MPa、冷却水 Re 数在 $5 \times 10^3 \sim 4 \times 10^4$ 范围内, BGT-1 管垂直布置时管外凝结换热系数约为水平布置时的 0.39 倍, 而总传热系数约为水平布置时的 0.78 ~ 0.87 倍。

(3) 实验结果表明, 布置方式、蒸汽凝结负荷及压力对珠状凝结的效果有十分明显的影响。在一定条件下, 随着蒸汽凝结负荷及压力的增加, 珠状凝结可能过渡为膜状凝结。在垂直布置、真空凝结的条件下, 若注意凝液的疏导, 将有利于维持垂直管外珠状凝结的持久性。

参考文献:

- [1] 黄渭堂, 刘军彦. 波槽管传热及阻力特性的初步实验研究[A]. 船用核动力专业委员会第 17 次年会论文专集[C]. 北京: 原子能出版社, 2003. 77-78.
- [2] 黄渭堂, 阎昌琪, 孙中宁. 一种新型波槽换热管[P]. 中国专利: ZL 03244999. 2 2004-08-18.

维护技术

汽轮机的维护技术

《Теплоэнергетика》2005 年 2 月号报导了冷凝式和背压式汽轮机通流部分蒸汽氧气混合气清洗、钝化和油封运用的情况。

在进行蒸汽氧气混合气清洗、钝化和油封时, 汽轮机通流部分形成一层与金属牢固结合在一起的保护膜, 保护膜的稳定性能可以使汽轮机投入运行, 并使其进入备用状态。在这种方法下, 可以对汽轮机进行油封, 并在它上面进行必要的修理工作, 不用耽心出现腐蚀破坏。

利用上述方法有助于清除汽轮机通流部分的铁的氧化物、铜和钙的化合物、可溶盐、硅酸以及这些化合物的混合物。

蒸汽氧气混合气清洗、钝化和油封保证金属表面深度钝化、遏制侵蚀—腐蚀过程发展。

由于使用经过钝化处理的金属, 减少了腐蚀产物沿汽水通道的迁移, 并保证了汽轮机组在 3~5 年停机期间的封存。

应用上述工艺增加了动力设备运行的可靠性, 并提高了汽轮机组的效率。它也具有良好的环保性能。

(吉桂明 供稿)

the boundary layer concentration gradient and a decrease in boundary layer thickness. However, at the inverse side, an exactly opposite situation will prevail. **Key words:** rotating cylinder, boundary layer, temperature field, concentration field, convective mass exchange

纵流壳程换热器新型抗振折流元件的数值研究 = **Numerical Investigation of an Innovative Vibration-proof Baffle Element for a Heat Exchanger with Longitudinal Flows at the Shell Side** [刊, 汉] / LI Jing, LIU Ming-shan, DONG Qi-wu (Research Center of Thermal Energy Engineering under the Zhengzhou University, Zhengzhou, China, Post Code: 450002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 579 ~ 583

Proposed is the construction of an innovative vibration-proof baffle rod element along with a simplified model for the unitary flow duct of this construction. By employing a numerical method the flow and heat transfer condition was simulated in a unitary flow duct supported by a clamp-type baffle rod. The results of the simulation were compared with those of the unitary flow duct of a straight baffle rod from the standpoint of fluid flow configuration, pressure and temperature distribution, etc. It has been found that with the exception of resistance drop the recommended construction has its heat transfer rate and heat transfer factor somewhat improved. **Key words:** heat exchanger, baffle rod, flow field, numerical simulation

回热器对 HAT 循环影响的分析 = **An Analysis of the Influence of a Recuperator on a Humid Air Turbine (HAT) Cycle** [刊, 汉] / QIU Chao, SONG Hua-fen (Institute of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 584 ~ 586

Nowadays two methods are generally adopted for the theoretical analysis of recuperators in a HAT cycle, namely, heat-transfer temperature difference method and thermal-ratio analysis method featuring the characteristics of a recuperator. Calculations were conducted using respectively the above-mentioned two methods of analysis and their impact on the HAT cycle was compared and analyzed. It has been found that the heat-transfer temperature difference method is more suited for the theoretical analysis of the HAT cycle. However, due attention should be paid during the selection of the heat-transfer temperature difference. On the other hand, the thermal ratio method has found more applications for the design of recuperators. **Key words:** humid air turbine cycle, recuperator, thermal ratio, heat-transfer temperature difference

波槽管管外珠状凝结换热的实验探讨 = **Experimental Investigation of Tube-Outside Dropwise Condensation Heat Exchange of a Corrugated Tube** [刊, 汉] / HUANG Wei-tang, LIU Feng, ZHAORI Getu (Institute of Power & Nuclear Engineering under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 587 ~ 590

Under the condition of steam condensation outside a horizontal and vertical tube a comparative experimental investigation was conducted for the heat transfer performance of four kinds of experimental tubes. Within the range of tests for a horizontal tube with a condensation condition slightly higher than one atmospheric pressure the total heat transfer factor of tube BGT is about 1.38 - 1.60 times of that of a bare tube, while the total heat transfer factor of tube BGT-1 is about 2.05 -

2.16 times of that of a bare tube. For the same tube type within the range of vacuum $P_i = 0.0686$ MPa and cooling water Re number $5 \times 10^3 - 4 \times 10^4$ the total heat transfer factor of a vertically installed tube BGT-1 is about 0.78 - 0.87 times of that of a horizontally installed tube. The results of the tests indicate that the layout scheme, steam condensation load and pressure are major influencing factors for maintaining a sustained dropwise condensation. **Key words:** corrugated tube, dropwise condensation, water working medium, copper-nickel alloy

动静态转子分离器的试验研究 = **Experimental Investigation of a Dynamic-static Rotor Separator** [刊, 汉] / YANG Long-bin, WU Shao-hua, QIU Peng-hua (Combustion Engineering Research Institution under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post code: 150001), GAO Zhen-sen (Research Center of Clean Coal Technology under the Heilongjiang Institute of Science & Technology, Harbin, China, Post Code: 150027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 591 ~ 595

Presented is a test rig for studying the performance of a dynamic-static rotor separator. With pulverized coal serving as a raw material the separator was tested under a variety of conditions, including different airflow rates, different rotating speeds and different concentrations of pulverized coal being fed. After processing and analyzing the test results it has been found that a decrease in airflow rate, an increase in rotating speed and a lowering of pulverized coal concentration can result in a more finely pulverized coal at the outlet with R_{90} attaining 5.43% and a comprehensive separation efficiency in that case being assessed at 52.46%. However, the adjustment of the above-cited three parameters will engender both favorable and undesirable consequences in respect of separation efficiency and resistance. In view of this, the variation of the latter two items should be closely watched and determined through detailed analyses and specific tests. **Key words:** separator, gas-solid flow, experimental study

超细化煤粉的投入量对再燃效果影响的实验研究 = **Experimental Study of the Influence of Ultra-fine Pulverized-coal Feeding Rate on Reburning Effectiveness** [刊, 汉] / BAI Xu-dong, WANG Yang (China National Research Center of Power Plant Combustion Engineering and Technology, Shenyang, China, Post Code: 110034), ZHAO Yan-jun (Beijing Guohua Electric Power Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100025), GAO Dian-cheng (Yuanbaoshan Power Plant, Chifeng, Inner Mongolia, China, Post Code: 024070) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 596 ~ 598

Owing to the formidable and arduous task of restricting NO_x emissions from coal-fired power plants currently operating in China it is extremely urgent to develop low NO_x emission technologies suitable for China-specific conditions. The reburning of ultra-fine pulverized coal represents a low NO_x emission technology for coal-fired boilers. Through an experimental investigation conducted on a hot-state combustion test facility clarified and expounded was the influence of the feeding rate of ultra-fine pulverized coal on boiler NO_x emissions, slag formation conditions and mechanical incomplete combustion losses. From the tests it has been found that after feeding pulverized coal for reburning there was little change in the location of the furnace flame center and the removal rate of NO_x can be in excess of 50%. Meanwhile, slag-formation conditions have somewhat improved along with an increase in mechanical incomplete combustion losses. **Key words:** hot-state combustion test facility, reburning, extra-fine pulverized coal feeding rate, NO_x, slag formation