

真空条件下珠状凝结传热特性的 理论分析与试验研究

高 明, 史月涛, 孙奉仲, 平亚明

(山东大学 能源与动力工程学院, 山东 济南 250061)

摘 要: 从理论分析和试验研究两个方面研究了真空状态下珠状凝结的传热特性。首先从蒸汽流场、气膜热阻和表面能 3 个角度进行理论分析, 分析结果表明, 珠状凝结的换热系数 K 值随着真空的提高而增大。然后进行真空条件下的珠状凝结试验, 经过数据分析表明, 试验结果与理论分析相吻合, 即在真空条件下, 凝结换热系数 K 值随着真空度的提高而增大, 在较大 Re 数时 ($Re=34755$), 真空度每提高 0.01 MPa, 换热系数可提高 10% 左右。

关 键 词: 真空; 珠状凝结; 传热特性; 表面能

中图分类号: TK124 文献标识码: A

引 言

蒸汽凝结是化工、发电、动力等工业领域中重要的换热过程之一。蒸汽的凝结方式可分为膜状凝结和珠状凝结^[1]。目前, 工业过程中使用的换热设备主要是膜状凝结, 相对于膜状凝结, 珠状凝结是一种高效换热方式, 其凝结换热系数比膜状凝结要高一个数量级以上, 如果能够在工业应用中实现该过程, 将会大幅度的减少换热面积, 既能获得节能效果, 又能降低设备成本, 有着显著的经济效益。

以前的珠状凝结试验都是在常压下进行^[2~4], 而工业中很多场合的凝结过程要求在真空条件下实现, 如电厂汽轮机的凝汽器。因此, 真空状态下珠状凝结传热特性的研究就显得尤为重要。但是在真空状态下珠状凝结的传热特性还没有相关报导, 基于此, 本研究采用能实现珠状凝结的换热管(等离子注入铜管)做试件^[7, 11], 研究了真空状态下珠状凝结的换热特性。

1 真空下珠状凝结传热特性的理论分析

1.1 从蒸汽流场角度分析

收稿日期: 2008-08-17; 修订日期: 2008-12-07

基金项目: 山东省博士后创新专项基金资助项目(200803056)

作者简介: 高明(1977-)男, 山东莱芜人, 山东大学讲师

蒸汽的流速会影响到换热效果, 蒸汽流速越快, 对管子表面的液滴的冲刷作用越大, 能够使冷凝液尽快脱离管子表面, 从而增加有效换热面积, 增强换热效果。真空条件下, 随着真空度的提高, 换热段内与蒸汽入口的压差 ΔP 增大, 较大的压差增大了流动的驱动力, 加快蒸汽的流速, 从而增强换热。

1.2 从气膜热阻角度分析

蒸汽中含有不凝结气体, 如空气, 即使含量极微, 也会对凝结换热产生十分有害的影响^[9~10]。这主要是因为靠近管壁的蒸汽侧, 随着蒸汽的凝结, 蒸汽分压力减小, 而不凝结气体的分压力增大。蒸汽在抵达管壁进行凝结前, 必须以扩散方式穿过聚集在界面附近的不凝结气体层。因而不凝结气体层的存在增加了传递过程的阻力, 使凝结过程削弱。

若考虑不凝气体热阻 r 的影响, 则凝结换热时, 换热系数 K 值的计算式为:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_0} + \frac{1}{h_i} \frac{d_0}{d_i} + \frac{d_0}{2\lambda} \ln \frac{d_0}{d_i} + R_f + R + r \quad (1)$$

牛顿冷却公式变形为:

$$\frac{1}{h_0} = \frac{A}{\phi} (t_s - t_w) \quad (2)$$

将式(2)带入式(1)可得:

$$\frac{1}{K} = C_1 (t_s - t_w) + R + r + C_2 \quad (3)$$

式中: $C_1 = A/\phi$, $C_2 = \frac{1}{h_i} \frac{d_0}{d_i} + \frac{d_0}{2\lambda} \ln \frac{d_0}{d_i} + R_f$ 均为常数; R —液滴热阻, $m^2 K/W$; R_f —水侧污垢热阻, $m^2 K/W$; t_s —真空下某压力对应的蒸汽饱和温度, K ; t_w —换热表面的壁面温度, K ; d_0 —换热管外径, m ; d_i —换热管内径, m ; h_0 —管外凝结放热系数, $W/(m^2 K)$; K —总换热系数, $W/(m^2 K)$; A —换热面积, m^2 ; ϕ —总换热量, W 。

真空条件下, 由于压力较低, 对应的饱和蒸汽温

度 t_s 较小;此外真空越高,不凝气体的含量越少,而且珠状凝结时,随着液滴的脱落,液滴周围少量不凝气体形成的气膜随着脱离换热表面,如图 1 所示,因此不凝气体的传热热阻 r 较小,根据式(3)可知传热系数 K 值变大。由于随着真空的降低, t_s 和 r 值都变小,因此换热系数 K 值变大。

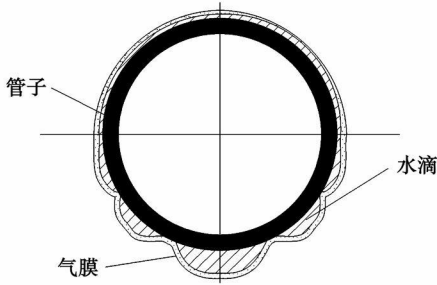


图 1 珠状凝结换热表面热阻模型

1.3 从表面能角度分析

将液体置于固体表面上,其平衡形状取决于固体表面能、液体表面能以及固液界面能之间的平衡关系。达到平衡时总界面能最小,此时液相表面与固相表面的接触界面处,形成相对的面间角,称之为接触角 θ ,接触角 θ 与界面张力的关系,可通过热力学中自由能最小原理得到,用 Young 式表示为:

$$\gamma_3 - \gamma_1 + \gamma_2 \cos \theta = 0 \tag{4}$$

式中: γ_1 —固—气界面能,即固体表面的表面能; γ_2 —液—气界面能,即液体表面张力; γ_3 —固—液界面能,其值一般小于两相呈自由表面时的表面能的总和。

因此可假设为:

$$\gamma_3 = a(\gamma_1 + \gamma_2), a < 1 \tag{5}$$

又因为换热系数 K 值与接触角 θ 有对应关系,即 θ 越大 K 值越大,则:

$$K \leftrightarrow \cos \theta = \frac{\gamma_1 - \gamma_3}{\gamma_2} = \frac{\gamma_1 - a(\gamma_1 + \gamma_2)}{\gamma_2} = (1-a) \frac{\gamma_1}{\gamma_2} - a \tag{6}$$

由式(6)可知,要想提高换热系数 K 值,则接触角 θ 应尽量接近 180° ,要尽可能的增大液体的表面张力 γ_2 ,减小固体表面的自由能 γ_1 ,或者增大液固之间的界面能 γ_3 ,因为固液之间的自由能差越大,越易实现珠状凝结^[8]。

1.3.1 液体表面张力 γ_2 对 K 值的影响

液体的表面张力与压力和温度有关^[9],温度降低时,一般液体的表面张力都增大,而且具有线性关系^[11]。真空条件下,随着蒸汽压力的降低,蒸汽饱

和温度降低,故凝结液的表面张力 γ_2 随着升高;同样,水的表面张力随压力减小而增大,水在 0.098 MPa 压力下的表面张力为 72.82 mN/m,在 9.8 MPa 下为 66.43 mN/m。因此真空度越高,管壁周围的水滴的表面张力 γ_2 越大,由式(6)可知,换热系数 K 值越大。

1.3.2 固液界面能 γ_3 的影响

固体表面吸气的现象称为气体的吸附。吸附理论认为,当固体温度升高到一定程度,使分子的振幅足够大时,气体分子就从固体表面蒸发掉。吸附作用将降低界面能 γ_3 ^[12],界面能的降低不利于凝结换热,所以实际冷凝过程中,应尽量避免吸附现象。真空条件下,不凝结气体随时被真空泵抽走,而且珠状凝结的管壁壁温较高^[13],吸附作用减弱,故而减小了吸附效应,不会影响固液的界面能,即真空度越高,空气量越少,对界面能的降低作用越弱,对传热恶化的影响就越小。

1.3.3 固体表面能 γ_1 的影响

表面自由能由于表面原子的热运动而降低,这种效应体现在表面能与表面温度的关系上,以 $\partial\gamma_1/\partial T$ 标志。选取 T, V 作为系统的自变量,在系统总体积不变的情况下,考虑表面自由能随温度的变化规律,并由热力学公式可以导出表面能与温度的关系。

根据吉布斯—亥姆霍兹方程^[11]:

$$u = \gamma_1 - T \frac{\partial \gamma_1}{\partial T} \tag{7}$$

式中: u —单位面积的表面内能,整理得:

$$\frac{\partial \gamma_1}{\partial T} = -\frac{1}{T}(u - \gamma_1) < 0 \tag{8}$$

由自由能定义 $\gamma_1 = u - TS$ 即 $u - \gamma_1 = TS$ ^[11],因为 TS 恒为正,可知 $u > \gamma_1$ 恒成立,由此可知式(8)中, $\frac{\partial \gamma_1}{\partial T} < 0$ 恒成立。这说明固体表面自由能随着固体壁面温度的升高而降低。在珠状凝结的条件下,真空度越高,换热系数越大,由式(3)可知,换热表面壁温越高,换热表面的表面自由能越低。由式(6)可知, γ_1 的降低会进一步的增大换热系数 K 值。

通过从蒸汽流场、气膜热阻和表面能 3 个角度分析可知随着真空度的提高,换热系数 K 值增大。

2 真空下珠状凝结传热特性的试验

2.1 试验部分

试验所用的装置是根据相似理论模拟汽轮机凝

结器设计制造。试验是在一个密闭的试验段中进行的, 参与换热的冷媒体和热媒体交叉流过试验段, 管外的蒸汽进入试验段横掠实验管束。试验段处于真空状态, 为防止各部分漏风破坏真空, 影响测试结果, 对于试验段的结合部位和测量孔进行了密封。试验中换热管为可实现珠状凝结的等离子注入铜管管束^[13]和普通铜管管束。通过对两种换热管束在真空下传热性能的比较, 得出等离子注入铜管管束的换热性能随真空度的变化情况, 即珠状凝结的传热特性随真空的变化情况^[14]。

其流程如图 2 所示, 试验段如图 3 所示。

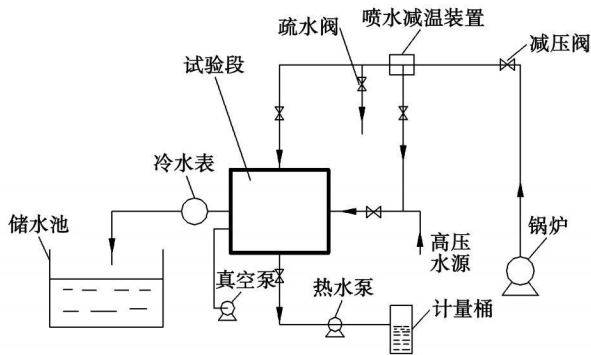


图 2 试验流程图

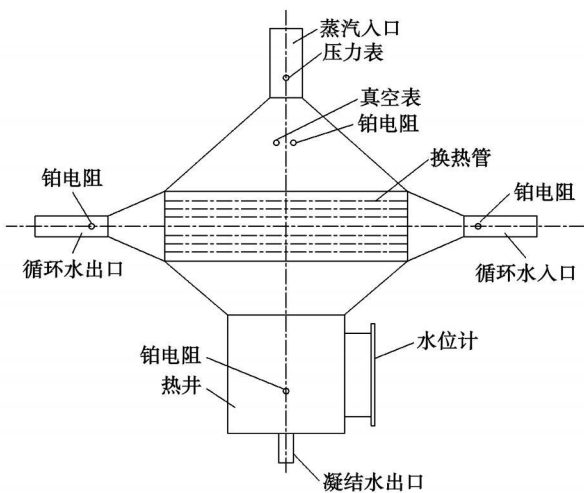


图 3 试验段结构示意图

2.2 试验结果分析

2.2.1 真空对两种管束换热性能影响的分析

本试验源蒸汽压力在 6 MPa 左右, 通过减压阀能减压至 0.1 MPa, 试验前, 首先建立试验段内的真空, 通过真空泵抽气将试验段内压力分别降至 0.09、0.08、0.07、0.06 和 0.05 MPa。取 Re 数为 17 377 (对应水速为 0.87 m/s) 和 34 755 (对应水速为

1.74 m/s) 进行讨论, 试验结果如图 4 和图 5 所示。

从图 4 和图 5 中可以看出: 在 Re 数一定 (即水速一定) 的情况下, 随着压力的减小 (即真空度的增加), K 值都明显增加, 而且等离子注入铜管管束的增加幅度要大于普通铜管管束。在 Re 数为 34 755 时, 当压力由 0.09 MPa 减小到 0.05 MPa 时, 等离子管管束的 K 值约为原来的 1.4 倍, 即真空度每提高 0.01 MPa, 珠状凝结换热系数可提高 10% 左右; 而普通铜管管束的 K 值约为原来的 1.13。试验表明, 真空对珠状凝结换热系数的影响较大, 即随着真空的提高, 珠状凝结换热系数增大。可见, 试验结果与理论分析结论吻合。

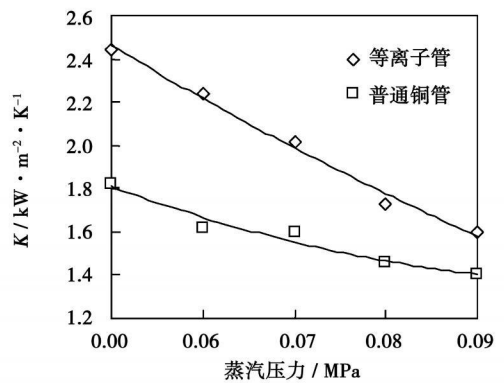


图 4 $Re=17377$ 时, K 与蒸汽压力的关系曲线

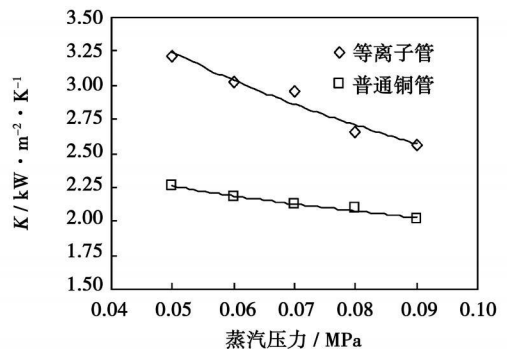


图 5 $Re=34755$ 时, K 与蒸汽压力的关系曲线

2.2.2 不同 Re 下真空对珠状凝结管换热系数影响的关联式

图 6 为不同 Re 下珠状凝结管换热系数与真空度的关系曲线, 随着 Re 数的提高, 珠状凝结管的换热系数增大。由试验数据分析可知, 珠状凝结管的换热系数与真空的关系并不是简单的线性关系, 因此这里使用对数曲线进行拟合, 结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 在不同 Re 数下, 珠状凝结管真空对换热系数影响可表示为:

$$K = A \ln(P_v) + B \quad (9)$$

式中: A 和 B 均为常数, A 的取值范围为 0.4 ~ 0.5, B 的取值为 4 左右。

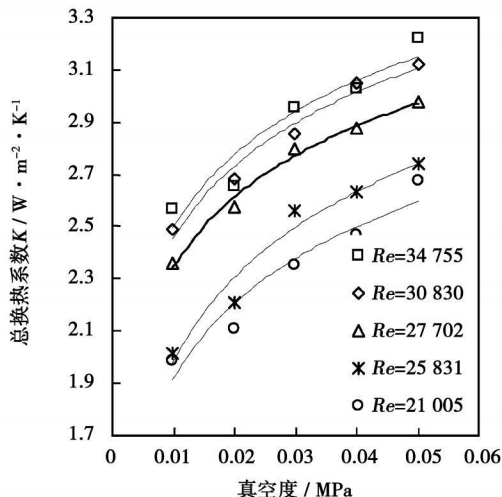


图 6 不同 Re 数下真空对珠状凝结管换热系数影响

表 1 不同 Re 下珠状凝结管换热系数 K 值与真空度 P_v 之间的关联式

Re	流速 / $m \cdot s^{-1}$	关联式
21 005	1.05	$K = 0.420 \ln(P_v) + 3.8517$
25 831	1.29	$K = 0.471 \ln(P_v) + 4.1508$
27 702	1.39	$K = 0.391 \ln(P_v) + 4.1443$
30 830	1.54	$K = 0.405 \ln(P_v) + 4.3186$
34 755	1.74	$K = 0.406 \ln(P_v) + 4.3667$

3 结 论

(1) 通过从蒸汽流场、气膜热阻和表面能 3 个方面的理论分析表明, 随着真空度的提高, 蒸汽流速增大, 气膜热阻减小, 表面能降低, 珠状凝结的换热系数增大。

(2) 对珠状凝结换热管(等离子管)而言, 在 Re 数为 34 755 时, 真空度每提高 0.01 MPa, 总体换热系数最大可提高 10% 左右。

(3) 得出了真空度与珠状凝结换热系数之间的基本关联式 $K = A \ln(P_v) + B$, 为珠状凝结管用于真空条件下的换热奠定了理论基础。

参考文献:

[1] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 1998

[2] MA XUEHU, ROSE J W. Advances in dropwise condensation heat transfer. Chinese Research[J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 78(1): 87-93.

[3] ZHAO Q. Dropwise condensation of steam on ion implanted condenser surface[J]. Plant Recovery System & CHP, 1994, 14(5): 525-534.

[4] 王乃华, 李淑英. 镍基渗层管表面实现珠状凝结的研究[J]. 动力工程, 2002, 22(3): 1804-1807.

[5] MA XUEHU. Filmwise condensation heat transfer enhancement with dropwise and filmwise coexisting condensation surface[J]. China Journal of Chemical Engineering 1998, 6(2): 95-102.

[6] MA XUEHU, XU D. Dropwise condensation heat transfer of steam on polymer coatings // Heat Transfer Science and Technology[C]. Beijing: Higher Education Press, 1996. 435-438.

[7] 宋永吉. 蒸汽凝结过程成滴机理的研究和实现滴状凝结方法的改进[D]. 大连: 大连理工大学, 1991

[8] 马学虎, 陈嘉宾. 蒸汽冷凝形态的表面自由能判据[J]. 化工学报, 2002, 53(5): 457-460.

[9] 宋永吉, 张东昌. 大气压附近蒸汽温度对滴状冷凝传热的影响[J]. 化工学报, 1991, 1: 119-123

[10] WILKINS D G, BROMLEY L A. Dropwise condensation phenomena [J]. AI Ch E Journal, 1973, 19: 839-845

[11] 朱履冰, 包 兴. 表面与界面物理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1992

[12] 陈晓峰. 固液表面自由能差强化蒸汽冷凝传热的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002

[13] 邹海涛. 等离子注入表面改性铜管束的换热特性试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2002

[14] 高 明. 不同换热管表面的结垢特性及真空下珠状凝结的试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2004

(编辑 何静芳)

° 书 讯 °

《工程力学》

本书为普通高等教育“十一·五”规划教材, 包括上、下两篇。上篇为理论力学, 包括静力学基本知识与人体的受力分析、平面汇交力系与平面力偶系、平面任意力系、质点动力学的基本方程、动力学普遍定理等方面知识; 下篇为材料力学, 包括拉伸、压缩与剪切、扭转、弯曲、压杆稳定性等方面知识。本书概念确切、说理透彻、内容丰富、注重培养学生的综合素质和能力。读者对象: 机械制造等工科类本科生, 相关工程技术人员。

2009年5月出版。

The load of a ball mill in a thermal power plant features such complicated characteristics as a big lagging, slow time variation and strong non-linearity etc., and it is difficult for conventional control methods to obtain a satisfactory control effectiveness. Therefore, the authors have presented a method for controlling the load of a ball mill based on a grey prediction PID (proportional, integral and differential) control, which integrates the design approach of the grey prediction with that of the conventional PID control, replaces the measured values of the controlled object with the on-line predicted results obtained from the grey prediction, and then performs a PID control operation. The Simulink simulation results show that the grey prediction-based PID control is superior to the conventional PID control and Smith-prediction-based PID one in respect of speediness, stability, adaptability, robustness and disturbance-resistant capability. **Key words:** ball mill load, grey prediction, GM (1, 1) model, PID (proportional, integral and differential) control, Smith predictor

真空条件下珠状凝结传热特性的理论分析与试验研究 = Theoretical Analysis and Experimental Study of Bead-shaped Condensing Heat Transfer Characteristics under a Vacuum Condition[刊, 汉] / GAO Ming, SHI Yue-tao, SUN Feng-zhong, et al (College of Energy Source and Power Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 635 ~ 638

In contrast to the study of bead-shaped condensing heat transfer characteristics at a normal pressure, investigated were the above characteristics in a vacuum state from the following two aspects: theoretical analysis and experimental study. First, the authors have conducted a theoretical analysis from three angles: steam flow field, air-film heat resistance and surface energy. The analytic results show that the bead-shaped condensing heat exchange coefficient K increases with an increase of vacuum. Subsequently, the authors have also performed a bead-shaped condensing test under a vacuum condition. Data analysis shows that the test results are in agreement with the theoretical analytic ones, i. e. under a vacuum condition, the condensing heat exchange coefficient K increases with an increase of vacuum. In case of a relatively big Re number ($Re = 34755$), the heat exchange coefficient can increase by around 10% when the vacuum goes up by every 0.01 MPa. **Key words:** vacuum, bead-shaped condensing, heat transfer characteristics, surface energy

蜂窝式 SCR 催化剂烟气脱硝试验研究 = Experimental Study of Flue Gas Denitration by Using a Honeycomb Type SCR (Selective Catalytic Reduction) Catalyst[刊, 汉] / ZHU Chong-bing, JIN Bao-sheng, ZHONG Zhao-ping (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Combustion and Power Generation Technology, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 639 ~ 643

By employing a die set extrusion method, prepared was a honeycomb type 0.98%V₂O₅-9.65%WO₃/TiO₂-contained SCR (selective catalytic reduction) catalyst. By using BET (brunauer-emmett-teller), XRD (X-ray diffractometer), SEM (scanning electron microscope) and XRF (X-ray fluorescence) method etc., inspected and explored was the microstructure. On a SCR denitration test rig, tested was the performance of the catalyst under various conditions and conducted was a comparison with commercial catalysts having a similar structure. Through tests, it has been found that when the space velocity (SV) equals to 4 000 h⁻¹ and NH₃/NO ratio is 0.9 to 1.0 at a temperature within a range from 300 to 400 °C, under such circumstances, NO removal rate, SO₂ oxidation rate, N₂O formation rate and ammonia escape quantity of the self-prepared catalyst are comparatively close in performance to those of commercial catalysts, basically meeting the requirements for commercial applications. When the steam content is in excess of 5%, it has little influence on the NO removal rate, thus applicable for practical flue gases. During the tests, it has not been observed that SO₂ played a role of promoting the elimination of NO. The structural strength of the self-prepared catalyst is lower than that of the commercial catalysts, necessitating further improvement. **Key words:** honeycomb type catalyst, V₂O₅-WO₃/TiO₂, commercial catalyst, selective catalytic reduction (SCR), denitration