

水蒸气在 TA2 改性表面冷凝传热特性实验研究

齐宝金, 张 莉, 徐 宏, 孙 岩

(华东理工大学 机械与动力工程学院 化学工程联合国家重点实验室, 上海 200237)

摘 要: 通过对纯钛 (TA2) 表面改性获得不同静态接触角的冷凝表面, 并对水蒸气在各试样表面的传热特性进行了可视化实验研究。实验结果表明, 蒸汽在原始表面为液滴和沟流液膜共存的混合冷凝, 在氢氟酸刻蚀表面为膜状冷凝, 传热性能降低为原始表面的 30% 以下, 而在双氧水氧化表面及氢氟酸刻蚀后再双氧水氧化表面则为明显的滴状冷凝, 相应传热性能也有明显提高, 约为原始表面的 1.3~1.6 倍, 且经两步处理表面强化冷凝效果更为明显。通过对试样表面显微形貌的观察和分析指出, 冷凝表面微观形貌的改变是导致各试样表面静态接触角和冷凝形貌存在差异的主要原因。

关 键 词: 表面改性; 钛; 滴状冷凝; 传热特性

中图分类号: TQ026.2 文献标识码: A

引 言

钛制换热元件具有强度高、比重小、耐蚀性能优良, 表面光洁、不易结垢等优点, 因此在各工业领域的应用日益增多, 钛的传热特性研究也随之兴起, 特别是钛表面的冷凝形态的不确定性更是引起各国学者浓厚兴趣^[1~2]。O Keeff 在纯钛管表面采用氢氧化钠和乙醇溶液进行预氧化处理^[3], 管内冷却水流量较大时, 管外为膜状冷凝, 而在较小热通量条件下, 管外会间歇性地出现小区域的滴状冷凝。于文艳等人采用类似氧化工艺^[4~5], 在钛表面亦得到膜状冷凝, 但在实验中却发现未经预氧化处理的钛管表面很难形成稳定的膜状冷凝, 会伴有滴状冷凝现象的存在。宋永吉等人在铜表面镀 1 μm 的钛^[6], 然后通过离子注入的方式向钛镀层注入氧, 在其表面获得了较稳定的滴状冷凝。Rausch 通过研究发现^[7], 通过预氧化和离子注入 N^+ 处理的钛表面, 能够形成稳定的滴状冷。McNeil 王琴瑶等人也认为蒸汽在钛表面的冷凝形式为滴状冷凝^[8~9]。

本研究在进行钛—水两相闭式热虹吸管传热性能实验时发现, 其冷凝段传热系数为铜—水热虹吸管的 2~4 倍之多, 且不服从经典的 Nusselt 竖直壁面膜状冷凝理论公式。从表面能的角度进行了分析, 提出水蒸气在钛表面为滴状或滴状与膜状共存的冷凝形式的推断^[10]。为了对钛表面冷凝特性做更为深入的研究, 对钛板试样表面进行了表面改性处理, 并对经改性后的各钛板试样进行了冷凝实验, 同时, 对蒸汽在各试样表面的冷凝形貌和传热特性进行了可视化观察与研究, 并将各冷凝表面的冷凝形貌和传热特性进行了对比和分析。

1 实验系统及测试方法

1.1 实验装置

垂直试板表面冷凝实验系统如图 1 所示。冷凝单元分为冷凝室和冷却室两部分, 由垂直试板分割而成。冷凝室内经气化炉、过热器加热形成的饱和干蒸汽或略微过热蒸汽在试板表面冷凝。冷凝室内, 饱和蒸汽入口设置挡板, 以减弱蒸汽流速对冷凝液滴的吹扫作用。冷凝液由设置在试板下方的漏斗收集, 并由计量罐进行存储和计量, 多余蒸汽由辅助冷凝器全部冷凝。蒸汽温度通过调节气化炉的功率及过热器温度控制, 采用美国 OMEGA P100 型热电阻测量, 精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$; 蒸汽流量由平流泵精确控制; 压力通过压力表进行测量和监控, 整个实验过程冷凝室内始终保持常压。

采用喷雾冷却的方式, 通过调整冷却水的流量, 对冷却室内试板进行冷却, 改变冷凝表面的过冷度 (简称: 过冷度)。冷却水流量及压力通过调节转子流量计和压力表进行控制和测量, 冷却水进、出口温度亦采用 P100 热电阻测量, 精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

收稿日期: 2009-12-14 修订日期: 2010-01-17

基金项目: 上海市重点学科建设基金资助项目 (B503)

作者简介: 齐宝金 (1980-) 男, 黑龙江大庆人, 华东理工大学博士研究生。

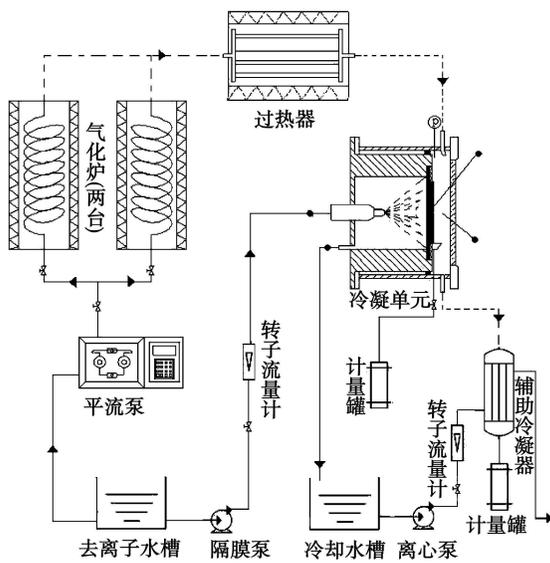


图 1 实验系统 (•为测温点;实线为水;虚线为蒸汽)

1.2 平板试样

试样形状及尺寸如图 2 所示,冷凝面为 50 mm × 50 mm 正方形平面。试样厚度为 3 mm,冷凝和冷却侧的厚度分别为 2 和 1 mm。在试样侧面距离冷凝表面 1.5 mm 处打 φ1 × 25 mm 和 φ1 × 15 mm 的

孔,孔的具体位置如图 2 所示。将两根直径为 1 mm 的 T 型 OMEGA 热电偶分别插入两孔中测量温度,取两测点温度平均值作为实验测量值,测量精度为 ±0.1 °C。

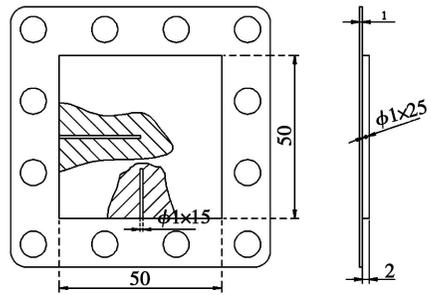


图 2 试板及测温点布置

试样材质选用换热器常用钛材—工业纯钛 TA2 为降低表面粗糙度对实验结果的影响,对所有试样冷凝表面先抛光,然后再进行表面处理,各表面处理工艺如表 1 所示。实验前,采用 CAM-100 型接触角测量仪测量水在各试样表面的静态接触角及前进角和后退角,对各试样表面接触角进行多次测量并取其平均值,测量精度为 ±5°。测量数据也如表 1 所示。

表 1 水在各试样表面接触角测量结果

试样编号	静态接触角 θ/(°)	前进角 θ _a /(°)	后退角 θ _r /(°)	表面改性
1	86.06	100.18	57.42	饱和干蒸汽预处理 48 h ^①
2	60.87	78.72	39.51	5% 氢氟酸刻蚀, 20 °C、5 min 清洗, 80 °C 烘干
3	92.48	113.63	66.79	15% 双氧水浸泡, 90 °C、90 min 清洗, 80 °C 烘干
4	100.41	124.2	74.43	氢氟酸刻蚀 + 双氧水处理

注: ① 避免实验初始阶段水蒸气与钛反应而导致静态接触角与冷凝形貌变化, 可视为原始表面。

1.3 测试方法

由传热学理论, 冷凝平板表面换热系数 h 可求得:

$$h = q / (t_s - t_w) \tag{1}$$

为了计算冷凝表面传热系数, 实验过程中需要测量通过平板试件冷凝面的热通量 q、冷凝室内蒸汽温度 t_s 以及冷凝壁面温度 t_w 等参数。实验过程中, 通过平板冷凝面的热量可通过以下两种方法进行测量计算: (1) 通过收集计量冷凝表面产生的冷凝水的质量进行计算, 记为 Q₁; (2) 通过测量冷却水进出口温差进行计算, 记为 Q₂。实验过程中两种方法测得传热量值的偏差在 5% 范围内, 因此通过平板热通量:

$$q = \frac{Q_1 + Q_2}{2A} \tag{2}$$

冷凝壁面的温度可推算为:

$$t_w = t_s + \frac{q \cdot \Delta l}{\lambda} \tag{3}$$

式中: Δl—插入冷凝板内部热电偶测温点到冷凝壁面的距离; t_w—测点温度。

将冷凝室内蒸气温度 t_s 与冷凝壁面温度 t_w 的差值定义为冷凝表面的过冷度, 即:

$$\Delta t = t_s - t_w \tag{4}$$

为保证 t_w 的可靠性, 实验完毕后, 将冷凝板沿测量孔切开, 进而精确测量壁面到测温点距离。

2 实验结果和分析

2.1 表面冷凝形貌

图 3 为水蒸气在不同表面相近过冷度条件下冷凝形貌, 为消除过冷度对试样表面冷凝形貌的影响, 各冷凝试样对比照片在相同或相近过冷度条件下选取。由图可知, 蒸汽在各冷凝面冷凝形貌存在较大差异, 饱和干蒸汽在试样 1 表面同时存在膜状冷凝和滴状冷凝两种不同的冷凝形貌, 如图 3(a) 所示, 冷凝液膜以沟流形式存在, 沟流液膜将冷凝面域分割成若干不连续的滴状区, 在滴状区, 液滴不断形成、生长、合并、脱落, 然后在“干”表面重新生长新一代液滴。蒸汽在试样 2 呈现明显的膜状冷凝, 而非滴膜共存冷凝形式, 如图 3(b) 所示。实验过程中在小过冷度条件下 ($\Delta T < 3^\circ\text{C}$) 会观察到冷凝面小范围内出现间歇性的冷凝液滴, 但是滴状区面积较小且不稳定。当过冷度较大时, 则整个冷凝面被冷凝液膜覆盖。蒸汽在试样 3 和试样 4 表面呈现稳定的滴状冷凝, 如图 3(c) 和 (d) 所示, 无沟流液膜出现, 但试样 3 冷凝面上液滴脱落直径较试样 4 大, 生长周期较试样 4 更长, 液滴滑落过程中, 在试样 3 的表面接触角滞后现象也比试样 4 更为明显。当表面过冷度 $\Delta T > 9^\circ\text{C}$ 时, 试样 3 表面开始出现以沟流形式存在着冷凝液膜, 且过冷度越大, 液膜面积比率也越大, 而整个实验过程, 试样 4 表面始终保持滴状冷凝, 未观察到冷凝液膜。

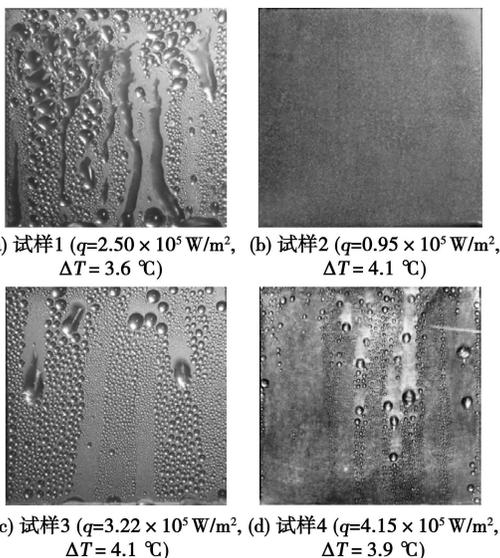


图 3 饱和干蒸汽在不同表面冷凝形貌

水蒸气在不同表面冷凝形貌差异较大的主要原

因是各表面的静态接触角不同。实验过程中, 一方面, 随着静态接触角增大, 试样表面冷凝形貌由膜状冷凝转变为滴膜共存的混合冷凝形式, 最后转变为完全的滴状冷凝。另一方面, 冷凝液滴脱落直径随着试样表面静态接触角增大逐渐变小, 液滴生长周期也相应缩短, 而滴状区面积比率则呈增大趋势。此外, 过冷度的对蒸汽在试样表面冷凝形貌也有较大影响, 过冷度 ΔT 越大, 同一冷凝面上液滴脱落直径越大, 滴状区面积比率则呈减小趋势。

2.2 实验数据分析

图 4 为不同试样表面热通量随过冷度的变化曲线。由图可知, 各试样表面热通量都随着过冷度的提高而增大, 且在过冷度 $\Delta T < 9^\circ\text{C}$ 时呈现较好的线性, 而当过冷度继续增大时, 热通量增加速度有所减缓。这是由于随着 ΔT 的增大, 冷凝表面的滴状区逐渐减小, 而膜状区呈增大趋势, 滴状冷凝的传热系数明显高于膜状冷凝, 从而导致热通量增加速度减缓。此外, 随着 ΔT 的增大, 冷凝液滴的脱落直径也随之增大, 而大直径液滴的传热系数要低于小直径液滴。除各实验数据点外, 图 4 还给出 $Nusselt$ 层流膜状冷凝和 $Rose$ 滴状冷凝模型的计算值。比较实验值与两模型计算值可知, 试样 1 实验数据点分布于 $Nusselt$ 值与 $Rose$ 滴状冷凝的计算值之间; 试样 2 热通量与 $Nusselt$ 层流膜状冷凝理论计算值比较接近; 试样 3 和试样 4 实验值则更加接近于 $Rose$ 滴状冷凝的计算值, 且试样 4 的热通量略高于试样 3。实验结果与图 3 中各表面冷凝形貌相互印证, 且 Ma 等人提出的表面冷凝形貌表面自由能差划判据相吻合^[13]。

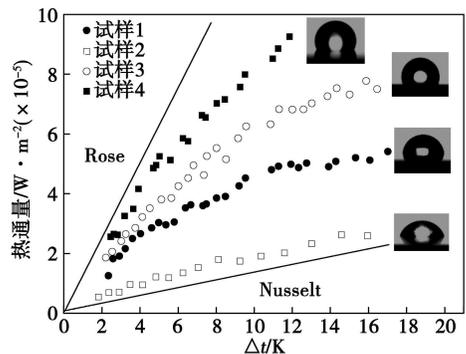


图 4 不同试样热通量随过冷度变化

图 5 为不同过冷度条件下热通量随接触角变化曲线。由图可以看出, 当过冷度不变时, 冷凝表面的热通量都随着接触角的增大而逐渐提高。在小接触

角 ($\theta < 90^\circ$) 亲水表面, 实验曲线变化较为平缓, 接触角变化对热通量影响较小。随着接触角增大, 特别是在接触角 $\theta \geq 90^\circ$ 时, 冷凝形式为滴状冷凝的疏水表面, 接触角的变化对热通量影响较小, 接触角亲水表面更为明显。此外, 比较不同过冷度实验曲线可知, 过冷度 Δ 在 4°C 左右时, 接触角对热通量的影响较其它两过冷度时小。这说明在同一冷凝面小过冷度更容易产生和维持滴状冷凝, 如图 5 (a) 和 (c) 所示, 且能够在接触角 $\theta < 90^\circ$ 条件下继续维持部分滴状冷凝, 如图 5 (a) 所示。而当过冷度较大时, 冷凝面更容易产生沟流液膜, 如图 5 (b) 所示, 不利于小接触角表面滴状冷凝的形成。当过冷度增大到一定程度, 接触角略大于 90° 的疏水表面也观察到沟流膜状区的存在, 如图 5 (d) 所示。

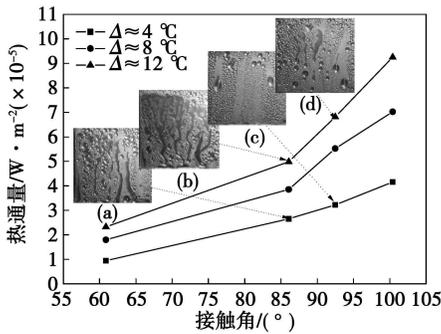


图 5 接触角与热通量关系

2.3 试样表面显微形貌

图 6 (a) 和 (b) 为试样 1 表面的 SEM 照片^[14], 图 6 (c) 和 (d) 为试样 2 表面 SEM 照片。由图可见, 与试样 1 表面相比, 经氢氟酸刻蚀后的钛表面出现了许多微米级的凹坑, 这是由晶粒界面的优先溶解而产生的。由于凹坑的形成使得水滴与表面发生湿式接触, 即水滴处于 Wenzel 状态, 由 Wenzel 模型理论得:

$$\cos\theta_w = (\gamma_{sv} - \gamma_{sl}) / \gamma_{lv} = r \cos\theta_e \tag{5}$$

式中: θ_w —表观接触角; θ_e —本征接触角; 系数 r 表示粗糙表面的实际面积与投影面积之比, 称为粗糙度因子。

由于 $r > 1$, 故由上式可推断, 表面粗糙度的存在将使水滴与表面接触角减小, 进而导致蒸汽在其表面呈现膜状冷凝。

图 6 (e) 和 (f) 为试样 3 表面的 SEM 照片^[14]。由图可见, 处理后的表面均匀地覆盖了一层亚微米级的无定形 TiO₂ 多孔膜, 这与 Wu 实验结果相吻合^[15~16]。此外, Wu 还在双氧水处理的表面上发现

有纳米阵列棒的存在。TiO₂ 多孔膜和纳米棒阵列即为导致钛表面具有较好疏水性的主要原因。图 6 (g) 和 (h) 是试样 4 表面的 SEM 照片^[14]。在两步处理后, 由氢氟酸刻蚀所产生的微米级凹坑仍然保留在表面, 同时由双氧水氧化形成的亚微米级 TiO₂ 多孔膜级纳米棒阵列覆盖于晶粒表面, 凹坑与多孔膜以及纳米棒阵列共同构成了一个具有微米、亚微米和纳米多重粗糙度的表面结构。这一结构与荷叶表面上微米乳突和纳米突起共同作用而产生的疏水性情况类似。因此, 该结构表面的静态接触角较试样 3 更高, 传热能也较试样 3 有所提高。

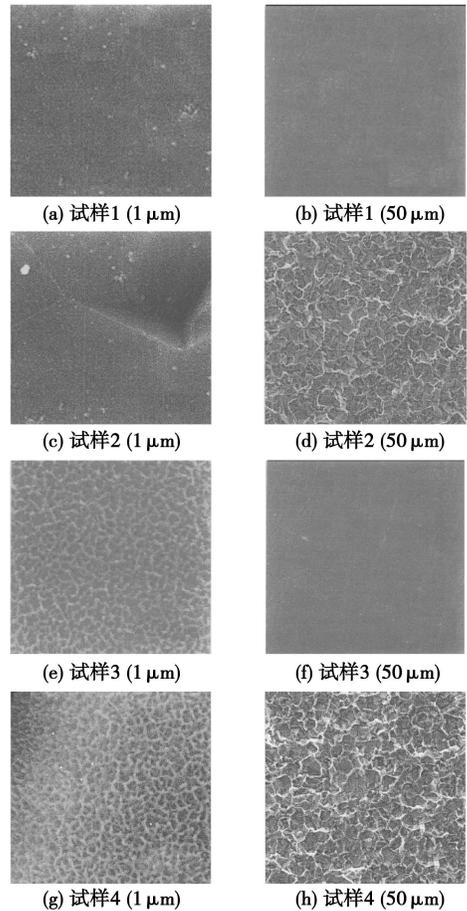


图 6 各试样表面 SEM 照片^[14]

试样在空气中放置 3 个月或进行 100 h 实验后, 其静态接触角及冷凝实验等数据都没有发生明显变化, 这表明所制备的试样表面具有很好的时间稳定性。

3 结论

(1) 经过简单预处理钛表面的静态接触角发生变化, 蒸汽在各表面的冷凝形貌存在明显差异。实

验过程中在不同表面观察到膜状冷凝 (试样 2)、膜状与滴状冷凝共存的混合冷凝 (试样 1) 以及滴状冷凝 (试样 3、试样 4) 等 3 种不同冷凝形式。

(2) 氢氟酸刻蚀表面静态接触角降低, 冷凝效果较自然表面下降。双氧水氧化表面及氢氟酸刻蚀后双氧水氧化表面静态接触角升高, 冷凝效果提高, 且经两步处理的表面强化冷凝效果更为明显。

(3) 过冷度对小静态接触角表面热通量的影响弱于其对较大静态接触角表面热通量的影响, 且小过冷度更有利于小接触角 (试样 1) 表面滴状冷凝的形成和维持。

(4) 表面改性后, 各试样表面微观形貌与原始表面相比有明显变化, 这是导致各表面静态接触角及冷凝形貌不同的主要原因。

参考文献:

- [1] 黄嘉琥, 应道宴. 钛制化工设备 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002
- [2] KANAKIS D. The effect of condensate inundation on steam condensation heat transfer to wire-wrapped tubing [D]. Monterey Naval Postgraduate School, 1983.
- [3] O'KEEFE T J. Film condensation of steam on horizontal wire-wrapped smooth and roped titanium tubes [D]. Naval Postgraduate School, 1992.
- [4] 于文艳, 黄渭堂. 钛材在舰船冷凝器中的应用前景 [J]. 应用技术, 2000, 27 (7): 7-9.
- [5] 黄渭堂, 于文艳. 钛螺纹槽管传热及流动阻力的实验研究 [J]. 核动力工程, 2001, 22 (5): 456-459.
- [6] 宋永吉, 张东昌, 林纪方. 滴状冷凝传热机理 [J]. 化工学报,

- 1990, 41 (6): 670-675.
- [7] RAUSCH M H. Dropwise condensation of steam on ion implanted titanium surfaces [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2010, 53 (1-3): 423-430.
- [8] MCNEILD A, BURNSIDE B M, CUIHBERTSON G. Dropwise condensation of steam on a small tube bundle at turbine condenser conditions [J]. Experimental Heat Transfer, 2000, 13 (2): 89-105.
- [9] 王琴瑶. 钛制化工设备设计 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1985.
- [10] QI B J, ZHANG L, XU H, et al. Heat transfer characteristics of titanium/water two-phase closed thermosyphon [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50 (9): 2174-2179.
- [11] ROSE J W. Effect of condenser tube material on heat transfer during dropwise condensation of steam [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1978, 21 (7): 835-840.
- [12] NAGATA S. Dropwise condensation heat transfer of steam under small surface subcooling // Proceedings of the IHTC [C]. San Francisco Hemisphere Publ Comp, 1986, 1665-1669.
- [13] MA X H, CHEN X F, BAI T, et al. A new mechanism for condensation heat transfer enhancement: effect of the surface free energy difference of condensate and solid surface [J]. J of Enhanced Heat Transfer, 2004, 11 (4): 257-265.
- [14] 钱伯太. 金属基体上超疏水表面的制备研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [15] WU J M, HAYAKAWA S, TSURU K. Porous titanium films prepared from interactions of titanium with hydrogen peroxide solution [J]. Scripta Materialia, 2004, 46 (1): 101-106.
- [16] WU J M. Low temperature preparation of titanium nanorods through direct oxidation of titanium with hydrogen peroxide [J]. Journal of Crystal Growth, 2004, 269 (2-4): 347-355.

(编辑 伟)

新技术、新产品

IM2500在德国海军中的应用情况

据《Gas Turbine World》2009年9~10月号报道, GE将向发动机系统制造者MTU供应1台IM2500燃气轮机用来驱动德国海军的第一艘F125型护卫舰, MTU是得到GE Marine System授权的供应者。

Baden-Wurtemberg级护卫舰将使用混合的柴油机电力推进和燃气轮机并车传动联合(CODIAG)装置系统, 该系统由1台IM2500燃气轮机和4台MTU20 V 4000 M35柴油机和4台发电机组成。

尽管称之为护卫舰, F-125具有驱逐舰的尺寸, 排水量为7200 t, 使其成为迄今建造的最大级别的护卫舰。

通过MTU、GE的IM2500燃气轮机现在正以CODOG(柴燃交替传动联合)/CODAG(柴燃并车传动联合)装置的形式在德国海军的F122 Bremen级、F123 Brandenburg级和F124 Sachsen级护卫舰上运行。目前, 接近30台GE IM2500燃气轮机正在或被指定在德国海军中运行。

用于F125型护卫舰的IM2500发动机将于2010年3月交付, 供船厂装舰使用。

(吉桂明 摘译)

汽轮机功率背压特性的通用计算方法及其应用 = Universal Method for Calculating the Power/Back-Pressure Characteristics of a Steam Turbine and Its Applications [刊, 汉] / XU Damao, KE Yan, WANG ShiYong (China Guangdong Nuclear Power Group Co. Ltd., Shenzhen, China, Post Code: 518031) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6), — 605 ~ 608

Proposed was a universal method for calculating the power/back pressure characteristics (i.e. micro increased capacity) of a steam turbine. The method in question boasts two big features: one is simple, it is only necessary to know the low pressure exhaust steam area and flow rate, and another is accurate, the errors relative to the operating or test data are within a range of 3%. Its theory was described in detail and the errors possibly caused by various assumptions were analyzed. Key words: steam turbine, power/back-pressure characteristics, performance examination test, system optimization

水蒸气在 Ti_2 改性表面冷凝传热特性实验研究 = Experimental Study of the Condensing and Heat Transfer Characteristics of Vapor on Pure Titanium (Ti_2) Denatured Surfaces [刊, 汉] / QI Baojin, ZHANG Li, XU Hong et al (United Nations Key Laboratory on Chemical Engineering, College of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200237) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6), — 609 ~ 613

Through denaturing of pure titanium (Ti_2) surfaces, obtained were the condensing surfaces with different static contacting angles and visualization experimentally studied were the heat transfer characteristics of vapor on surfaces of various test specimens. The test results show that the steam assumes a hybrid condensing in coexistence of both liquid droplets and rivulet liquid film on the original surfaces and a film-shaped condensing on the HF etched surfaces, thus the heat transfer performance of the latter will drop to less than 30% of that of the former. However, it assumes a conspicuous droplet-shaped condensing on the surfaces oxidated by H_2O_2 and that treated in the same way after being etched by HF. The corresponding heat transfer performance will also be enhanced significantly, approximately 1.3 ~ 1.6 times of the heat transfer performance of the original surfaces. Furthermore, the intensified condensing effectiveness of the surfaces treated in the two steps is even more conspicuous. The microscopic morphological observation and analysis of the specimen surfaces show that the microscopic morphological change of the condensing surfaces should be the main cause of the differences in the static contacting angles and condensing morphology of various specimen surfaces. Key words: surface denaturing, titanium, drop-shaped condensing, heat transfer characteristics

骨架发热多孔介质通道内单相流阻力与换热特性数值模拟 = Numerical Simulation of the Resistance and Heat Exchange Characteristics of a Single-Phase Flow in the Passages of a Skeleton Heat Generation Porous Medium [刊, 汉] / YU Li zhang (Zhonghe Qingyuan Environmental Technology Engineering Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100037), SUN Li cheng, SUN Zhong ning (College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6), — 614 ~ 616