

## 分割表面对蒸汽滴状冷凝传热特性的影响

马学虎, 宋天一, 兰忠, 周兴东

(大连理工大学化学工程研究所, 辽宁 大连 116012)

**摘要:** 实验测定了相同操作条件下涂层表面 1:1 分割前后水蒸汽冷凝传热通量与表面过冷度的关系, 对分割表面上滴膜共存冷凝进行了研究, 结果表明, 分割表面上滴膜共存时的热通量比全部为滴状和膜状冷凝表面热通量的平均值大, 且其差值随处理表面上接触角的增大而增大. 从固液界面效应的角度对该现象进行了分析, 并解释了其原因.

**关键词:** 滴膜共存冷凝; 界面效应; 分割表面; 强化传热

**中图分类号:** TK124   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1009-606X(2007)03-0472-04

### 1 前言

自从 20 世纪 30 年代 Schmidt 等<sup>[1]</sup>发现滴状冷凝这种高效换热方式以来, 许多研究者就滴状冷凝的传热机理、实现滴状冷凝的低表面能的表面制备和滴状冷凝的工业化应用等课题进行了大量研究. 滴状冷凝具有很高的传热速率, 其传热系数是膜状冷凝的几倍至几十倍<sup>[2]</sup>. 但是由于长期维持滴状冷凝表面技术的制约, 使该冷凝方式距工业化应用还有一定距离. 本课题目前的研究重点是分割表面滴状冷凝的微观传热机理以及固液界面间相互作用对冷凝液运动的影响, 为滴状冷凝的大规模工业应用提供理论依据.

Kumagai 等<sup>[3-5]</sup>进行了竖平面上垂直分割的滴膜共存表面上的冷凝传热实验. 结果表明, 当滴状冷凝区和膜状冷凝区的面积比为 1:1 时, 平均热负荷高于在通常表面上全部为滴状冷凝和膜状冷凝热负荷的平均值, 而且平均热负荷与表面分割方式和分割数目有关, 他们在一种具有特殊分割形式的表面上得到的最大热负荷高于当表面全部为滴状冷凝时的热负荷<sup>[3]</sup>. Leipertz 等<sup>[6]</sup>的实验表明, 液滴在表面上形成的接触角越大, 冷凝传热系数越大. 马学虎等<sup>[7-9]</sup>总结了表面自由能差影响冷凝传热特性的规律, 即冷凝传热特性是随着表面自由能差的增加而增加的, 可通过调控表面自由能差值的变化范围, 有效强化冷凝传热, 并通过实验研究了分割表面对竖管冷凝传热特性的影响.

本研究在紫铜表面上制备了有机复合涂层表面, 实现了稳定的滴状冷凝, 并采用与前文<sup>[9]</sup>不同的分割方式对该处理表面进行分割, 从而在同一表面上实现了具有不同表面能的区域(如图 1 所示, 黑色部分为涂层表面, 白色部分为刮去涂层后裸露出的铜表面), 用以研究不

同的表面自由能差在同一实验条件下对水蒸汽冷凝传热的影响. 在相同的实验条件下, 冷凝液的表面自由能相同, 而冷凝表面上不同的分割区域具有不同的表面自由能, 这样可以排除物性参数等因素对冷凝传热的影响, 冷凝表面分割前后所测定的传热特性的差异可认为是固液表面自由能差影响的结果.



图 1 处理表面分割形式  
Fig.1 The departing mode of treated surface

### 2 实验

实验装置由蒸汽循环系统、冷却水系统、测量和监视控制系统 3 部分组成(具体流程图参见文献[10]). 水蒸汽由去离子水在电加热锅炉内产生, 锅炉内蒸汽温度由 AI 人工智能工业控制器控制, 精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . 蒸汽进入冷凝室之前先经气液分离器, 分离出的液体流入贮槽中, 蒸汽进入冷凝室冷凝. 贮槽中的液体由泵打回锅炉中循环使用. 冷凝室中的剩余蒸汽进入列管式二次冷凝器, 完全冷凝后流回贮槽. 冷凝室上方、左右侧和前方共开有 4 个视窗, 用于实验现象观察、图像采集及照明. 冷凝室内设有测温和测压点, 用以测量蒸汽的温度和压力. 从冷凝块表面后侧 5 mm 处开始沿热流线方向平行钻出 4 个直径为 1 mm 并与冷凝块中轴线垂直的孔, 孔

收稿日期: 2006-03-03, 修回日期: 2006-07-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 59906002; 50376005); 辽宁省自然科学基金资助项目(编号: 20032130)

作者简介: 马学虎(1965-), 男, 内蒙古兴和县人, 博士, 教授, 主要从事强化过程传递与节能技术方面的研究, E-mail: xuehuma@dlut.edu.cn.

间距 2 mm 左右, 具体尺寸利用 AUTOCAD 软件在由 CCD 加显微镜镜头组拍摄的图像上根据精确量取的物体尺寸制作的标尺测得, 对于不同的冷凝块, 具体间距尺寸会稍微有所不同. 孔内安装铜-康铜热电偶, 校正精度为  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 冷凝表面周围套有聚四氟乙烯绝热环, 用以密封和隔热, 冷凝块块体用聚四氟乙烯材质整体覆盖以尽量减少热量损失. 采用 Agilent34970A 型数据采集系统和自编软件进行实时数据监控和测量.

实验前对整套装置进行正压和负压检漏实验, 确定系统的气密性良好后进行实验. 为了验证实验方法的可靠性, 首先进行了纯蒸汽膜状冷凝实验, 结果与经典 Nusselt 理论计算值基本吻合, 数据的最大偏差在 11% 以内, 因此可以认为实验系统是可靠的, 实验结果是有效可信的.

通过数据采集监控系统对实验装置的稳定性进行实时监测, 系统稳定后进行数据测定和采集. 由于铜块外有聚四氟乙烯绝热, 传热可以近似按一维稳态导热处理. 通过测定铜块内部热流线上的 4 点温度, 用最小二乘法外推求出传热通量、表面温度和冷凝传热系数.

表面涂层的制备方法: 首先用 1200# 砂纸对紫铜表面进行抛光, 然后用去离子水冲去表面残留的金属颗粒, 再用丙酮和去离子水反复清洗以去除表面污染物. 清洗过的表面放在干燥器内于室温下晾干后, 用高压喷枪喷涂有机氟碳材料(1# 表面成膜物为 PVDF, 2# 表面成膜物为 PFA+0.5%( $\omega$ ) 纳米 CuO 颗粒, 3# 表面成膜物为 PFA), 最后通过高温塑化得到疏水表面涂层. 喷涂过程中可通过调节成膜物与添加物的配比控制不同涂层表面的表面能, 具体操作方法参见文献[11].

### 3 结果与讨论

#### 3.1 实验现象

利用 Dataphysics OCAH200 型接触角测定仪测得各处理表面上的平衡接触角、前进角和后退角, 如表 1 所示. 用 Byko-test 7500 型膜厚仪测得涂层厚度为 10~15  $\mu\text{m}$ . 蒸汽在处理表面上呈现完美的滴状冷凝(图 2), 液滴在表面上周而复始地进行着生长、合并、脱落的运动过程, 表面上形成大液滴向下脱落, 将其下方尺寸尚未达到脱落直径的液滴也冲刷脱离冷凝壁面. 大液滴的运动轨迹比较一致, 通常都向下脱落, 而较小液滴

表 1 各处理表面上的接触角

Surface	Equilibrium contact angle, $\theta$ ( $^{\circ}$ )	Advancing contact angle, $\theta_A$ ( $^{\circ}$ )	Receding contact angle, $\theta_R$ ( $^{\circ}$ )
1#	74	87	65
2#	114	135	89
3#	120	128	92

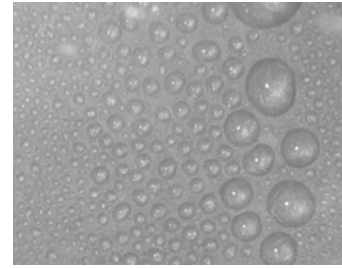


图 2 处理表面上形成的滴状冷凝  
Fig.2 Dropwise condensation on coated surface

的运动则比较随机, 向各个方向运动的都有. 数据采集充分后停止实验.

根据实验图像确定冷凝液滴的脱落直径, 将冷凝表面涂层进行等面积分割, 使紫铜表面以竖条形裸露出来, 并确保涂层宽度略小于液滴的脱落直径. 对分割后的表面用去离子水和乙醇反复清洗, 去除表面杂质, 然后在相同条件下继续重复水蒸汽冷凝实验. 观察发现, 蒸汽在裸露的紫铜表面上呈现膜状冷凝, 而在未去除的表面涂层上呈现滴状冷凝, 两种冷凝方式呈条形交错分布. 位于滴状区上靠近膜状区的小液滴具有一致的运动趋势—向膜状区运动(图 3). 因为滴状冷凝区的分割宽度小于涂层表面上液滴的固有脱落直径, 所以液滴还没有生长到脱落直径大小就被膜状冷凝区“吸”了过去, 这无疑增加了液滴的扰动程度, 相当于减小了液滴的脱落直径所引起的效果. 最后, 将冷凝表面上的涂层完全除去, 并抛光、洗涤, 进行水蒸汽的冷凝实验, 以获取该冷凝表面的膜状冷凝传热数据.

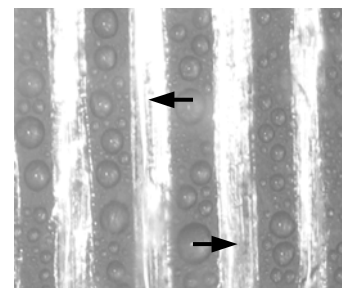


图 3 滴状冷凝区液滴的运动  
Fig.3 The motion of droplets on the dropwise condensation regions

#### 3.2 实验结果

图 4 是常压下 3 个冷凝块的热通量与表面过冷度的关系曲线(下标 DFC 和 MDF 分别为滴膜共存表面上的热通量与全部为滴状和膜状冷凝表面热通量的平均值). 可以看出, 滴膜共存表面的热通量较同一工况下的全部滴状和全部膜状冷凝表面热通量的数学平均值(膜状冷凝区和滴状冷凝区各占 50%)大, 且接触角越大, 两者的差别( $\Delta q$ )也越大(如表 2). 同一冷凝块表面涂层分割

前后的实验中蒸汽温度和压力保持恒定,则相同过冷度下冷凝表面温度相同,因此可认为冷凝液的温度也是一致的.由于冷凝液的温度相同,因此冷凝液的物性参数

一致.在此情况下,表面分割前后的实验系统中就只有固液相界面间相互作用有所不同.因此,可认为表面热通量的提高是由固液相界面效应引起的.

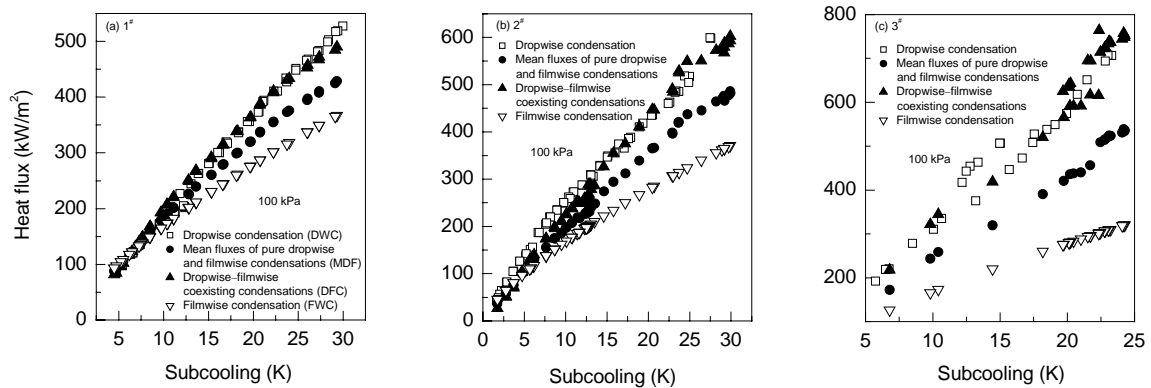


图4 表面上热通量与过冷度的关系  
Fig.4 Heat flux vs. subcooling of surface

表2 各处理表面上的平衡接触角和不同过冷度下的热通量

Table 2 The different equilibrium contact angles (298 K) and heat fluxes of treated surfaces (100 kPa)

Surface	Equilibrium contact angle, $\theta$ (°)	Subcooling (K)	$q_{DFC}$ (kW/m <sup>2</sup> )	$q_{MDF}$ (kW/m <sup>2</sup> )	$q_{DWC}$ (kW/m <sup>2</sup> )	$q_{FWC}$ (kW/m <sup>2</sup> )	$(q_{DFC}-q_{MDF})/q_{FWC}$ (%)
1 <sup>#</sup>	74	10	182.36	178.96	192.56	165.34	2.0
		20	360.78	318.02	360.85	275.16	15.5
		30	539.20	457.08	529.14	384.98	21.3
2 <sup>#</sup>	114	10	237.16	189.27	215.06	163.49	29.3
		20	434.28	345.04	416.94	273.25	32.7
		30	631.40	500.81	618.82	383.01	34.1
3 <sup>#</sup>	120	10	325.73	235.96	308.01	168.16	53.4
		20	603.73	444.21	617.88	276.73	57.6
		30	881.73	652.46	927.76	385.30	59.5

### 3.3 机理分析

根据热力学原理,系统有自发向稳定态转化的趋势.对于冷凝系统,冷凝液要尽量覆盖冷凝面上表面能较高的部分,裸露出表面能较低的部分,以使整个系统的表面能之和最低,达到最稳定的状态.分割表面上有涂层的部分表面能较低,裸露的部分表面能较高,因此形成了两种不同的冷凝形式—滴状冷凝和膜状冷凝.对于膜状冷凝区,冷凝液以液膜的形式稳定存在,由于其条形分布,该液膜有些类似于沟流.而在滴状冷凝区,其宽度对液滴的脱落直径产生影响.据马学虎等<sup>[8]</sup>提出的接触角表面自由能差判据分析,接触角越大,冷凝液与冷凝表面之间的表面自由能差就越大,固液间界面效应越显著.因此,对于滴膜共存的分割表面,滴状冷凝区液滴的接触角越大,该区域与冷凝液的表面自由能差越大,且与膜状冷凝区的表面自由能差也越大,因而其表面上的液滴受两个区间的作用力越大,向膜状区的运动就越剧烈,相当于液滴“脱落”频率加快.所以相对接触角较小的表面,接触角较大的表面上滴膜共存时的热通量比全部为滴状和膜状冷凝热通量的平均值之差要

大一些.

## 4 结论

实验测定了相同操作条件下涂层表面1:1分割前后水蒸汽冷凝传热通量与表面过冷度的关系,对分割表面上滴膜共存冷凝进行了研究,得出了与前人一致的实验结果:分割表面上滴膜共存时的热通量比全部为滴状和膜状冷凝表面热通量的平均值大,另外还发现其差值随涂层表面上接触角的增大而增大.从固液界面效应的角度对该现象进行深入分析,认为大出的这一部分热通量归功于固液间界面效应,该效应通过对冷凝液产生扰动强化了冷凝传热.

### 参考文献:

[1] Schmidt E, Schurig W, Sellschop W. Versuche über die Kondensation von Wasserdampf in Film und Tropfenform [J]. Technologie Mechanismus und Thermodynamik, 1930, 1: 53-63.  
 [2] Rose J W. Dropwise Condensation—Some Personal Reflections [A]. Wang B X. Heat Transfer Science and Technology 2000 [C]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 90-110.  
 [3] Yamauchi A, Kumagai S, Takeyama T. Condensation Heat Transfer on

- Various Dropwise–Filmwise Coexisting Surface [J]. Heat Transfer—Japanese Research, 1986, 15: 50–64.
- [4] Kumagai S, Tanaka S, Katsuda H, et al. On the Enhancement of Filmwise Condensation Heat Transfer by Means of the Coexisting with Dropwise Condensation Sections [J]. J. Exp. Heat Transfer, 1991, 4: 71–80.
- [5] Kumagai S, Fukushima H, Katsuda H, et al. Dropwise–Filmwise Condensation Coexisting Condensation Heat Transfer [J]. Trans. JSME, Ser. B, 1989, 55: 3739–3745.
- [6] Leipertz A, Koch G. Dropwise Condensation of Steam on Hard Coated Surfaces [A]. Lee J S. Proceedings of the 11th International Heat Transfer Conference [C]. Kyongju: Korea, 1998, 6: 379–384.
- [7] Ma X H, Chen X F, Bai T, et al. A New Approach for Condensation Heat Transfer Enhancement [A]. Hua B, Guo Z Y, Ma C F. Proceedings of the 3rd International Symposium on Heat Transfer and Energy Conservation [C]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2004. 95–100.
- [8] 马学虎, 陈嘉宾, 徐敦顺, 等. 蒸汽冷凝形态的表面自由能差判据 [J]. 化工学报, 2002, 53(5): 457–460.
- [9] 马学虎, 汪琳, 陈嘉宾, 等. 表面分割方式对滴膜共存冷凝传热特性的实验研究 [J]. 高校化学工程学报, 2002, 17(1): 31–36.
- [10] 马学虎, 张宇, 兰忠, 等. 界面效应影响蒸汽冷凝传热的实验研究 [A]. 中国工程热物理学会. 中国工程热物理学会第十届学术年会传热传质学论文集 [C]. 吉林: 中国工程热物理学会, 2004. 340–343.
- [11] 马学虎, 兰忠, 周兴东, 等. 一种功能性传热表面的制备方法 [P]. 中国专利: 200510047351.9, 2005–09–30.

## The Effect of Dividing Surface on Heat Transfer Characteristics of Dropwise Condensation

MA Xue-hu, SONG Tian-yi, LAN Zhong, ZHOU Xing-dong

(Institute of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116012, China)

**Abstract:** The relations of water vapor condensation heat fluxes with surface subcoolings on coated surfaces were determined experimentally, and the experimental results with and without dividing surfaces with the ratio of 1:1 were also compared. It was observed that the heat fluxes of dropwise–filmwise coexisting condensations (DFC) on dividing surfaces were more than the mean fluxes of pure dropwise and filmwise condensations (MDF) on coated and bare surfaces, respectively, and the differences between them increased with increasing the contact angles on the coated surfaces. The phenomenon was explained from the point of view of interfacial energy effect of condensate and solid.

**Key words:** dropwise–filmwise coexisting condensation; interfacial energy effect; dividing surface; heat transfer enhancement