

结霜工况下翅片管气化器表面气流换热特性 试验研究

王明秋 陈叔平 姚淑婷 金树峰 刘丹 杨佳卉 李军 毛红威

(兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050)

摘要: 为深入掌握气化器翅片管表面结霜过程中翅片管表面气流换热特性,以液氮为介质进行了翅片管表面结霜试验,分析了翅片表面结霜特性及气流温度、相对湿度沿翅片管轴向变化规律。结果表明:翅片管表面结霜最先出现在入口处的翅尖位置,沿翅片管径向越靠近翅根结霜现象越晚出现。结霜初期,翅片管(0mm—300mm)表面换热程度由强逐渐减弱,翅片管(600mm—900mm)表面换热程度由弱变强,随后逐渐减弱;结霜后期,整个翅片管表面换热程度呈稳定状态。可见,在设计气化器第一根翅片管时,应考虑适当增加翅片高度以延缓基管表面霜层的出现,提高气化器换热效率。这为进一步探寻合理有效抑制翅片管表面结霜方法提供了一定的理论基础。

关键词: 翅片管气化器; 结霜; 气流; 换热特性; 试验研究

DOI: 10.16711/j.1001-7100.2017.09.015

Experimental study on heat transfer characteristics of flowing air on the surface of finned-tube vaporizer under frosting conditions

Wang Mingqiu, Chen Shuping, Yao Shuting, Jin Shufeng, Liu Dan, Yang Jiahui, Li Jun, Mao Hongwei
(School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: An experiment on frosting on the finned-tube vaporizer surface was conducted with liquid nitrogen as the medium to investigate the flowing air heat transfer characteristics around the finned-tube surface. Frosting characteristics and the variation of the flowing air temperature as well as the relative humidity along the finned-tube axial direction were analyzed. The results indicate that frosting on the finned-tube surface appears earliest at the fin top of the finned-tube in the entrance region. The frosting occurs later at the position closer to the fin root along the radial direction of the finned-tube. At the beginning of frosting, the heat transfer intensity of the finned-tube surface(0mm—300mm) gradually turns from strong to weak, and that of the finned-tube surface(600mm—900mm) varies from weak to strong then begins to descend. In the later frosting period, the heat transfer intensity of the whole finned-tube surface presents a stable state. Therefore, when the first finned-tube is designed, its height should be increased properly to delay frosting on the basic finned-tube surface and improve the heat transfer efficiency of the vaporizer, which provides a theoretical basis for the further study on reasonable and effective method to restrain frosting on the finned-tube surface.

Keywords: Finned-tube vaporizer, Frosting, Flowing air, Heat transfer characteristics, Experimental study

1 引言

近年来我国煤炭、石油等高碳能源利用带来的大范围雾霾天气等生态环境问题使得人们对天然气这种清洁能源越来越重视,以天然气为清洁能源的产业链快速崛起,带动了各大类型气化器的迅速发展,也为气化器的研制带来了新的挑战。

空温式翅片管气化器是目前最常见的气化器类型,通过铝制翅片管从周围环境中获得热量使管内低温液体气化,具有结构简单、绿色环保、运行成本低等诸多优点,是液氮、液氧、液化天然气(LNG)等低温介质气化系统的主要设备。空温式翅片管气化器的运行受周围气流影响较大,存在翅片管表面结霜引起的换热效果降低、气化不

收稿日期: 2017-06-08

作者简介: 王明秋(1989-),女,硕士生,主要从事低温储运技术及传热的研究。

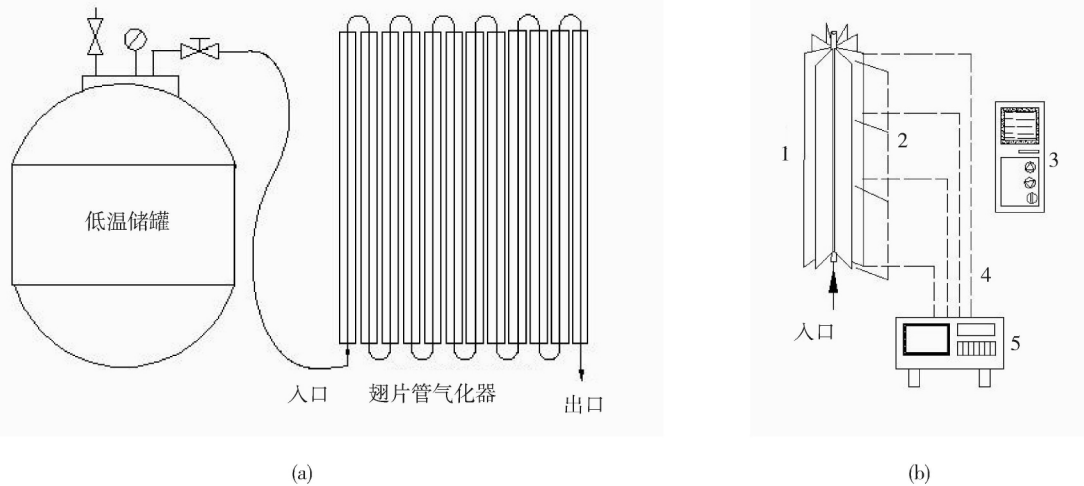
通讯作者: 陈叔平(1964-),男,教授,主要从事低温储运设备、低温传热设备的研究(E-mail: chensp@lut.cn)。

完全、供气不稳定等问题。因此,深入研究翅片管气化器表面气流换热特性,探究气化器运行过程中翅片管表面气流分布和翅片管表面结霜特性,对探寻合理有效地抑制翅片管表面结霜方法至关重要。

Seker D^[1]建立了翅片管换热器结霜过程中热质传递特性的半经验数值分析模型,计算了空气侧动态热质传递系数、空气-霜界面温度及换热器上结霜量。秦海杰^[2]等对空冷器表面结霜特性进行了研究,指出空气流量对结霜过程影响较大,风量增大,结霜时刻较晚,但霜层增长速率较大。Kim^[3]对低温储罐表面换热特性和结霜过程进行了数值研究,得出结论霜层是影响低温储罐维持所需温度的主要因素,且换热程度受环境温度湿度和风速影响较大。陈叔平^[4,5]等利用仿真模拟的方法得到了翅片管气化器表面自然对流换热 Nu 数计算关联式和霜层导热系数等物性参数。Lee Sang Hun^[6]等对螺旋翅片管换热器的结

霜问题进行了研究,结果表明霜层厚度主要受相对湿度、入口空气温度和空气流量的影响。张建文^[7]分析了翅片管气化器表面自然对流传热的数值研究现状,指出数值模拟难以考虑到管内沸腾相变和表面霜层的影响。Silvia^[8]提出了预测霜导热系数的多孔介质模型,表明壁面温度对霜导热系数的影响比空气温湿度更大。马强^[9]对水平冷面上结霜过程进行了数值模拟,结果显示冷表面前沿处水蒸气浓度高,相转移速率快,霜密度较大。

以上研究主要集中在换热器表面的结霜过程,而针对结霜工况下翅片管气化器表面气流换热特性的研究较少。本文在前人研究的基础上,采用实验的方法,对自然对流深冷翅片管气化器表面霜生长过程和气流换热特性进行研究,分析翅片管表面结霜特性及气流温度、相对湿度沿翅片管轴向随时间变化规律,以深入掌握翅片管气化器表面结霜过程中气流分布及流动规律。



1 - 翅片管气化器的第一根翅片管; 2 - 刻度带; 3 - PH - II 手持式气象站; 4 - 铂电阻温度传感器; 5 - 智能温度巡检仪
图1 试验系统图

Fig. 1 Schematic of experimental system

2 试验装置及过程

2.1 试验装置

设计并搭建结霜工况下深冷翅片管表面气流传热特性试验台,如图1所示,其中图(a)为试验系统流程图,图(b)为测量系统布置图。整个系统主要包括自增压液氮储罐、深冷翅片管气化器和数据采集系统,设备及环境主要参数见表1,试

验介质为液氮。液氮由容积为110L的自增压液氮储罐途径软管进入翅片管气化器,在翅片管气化器内吸热气化然后排出。翅片管气化器与周围气流自然对流换热,翅片管表面温度较低,气流中的水蒸气遇冷凝结在翅片管表面形成霜层。

2.2 试验过程

本试验测量参数包括霜层厚度,气流温度、相对湿度、风速和大气压力。选用刻度带测量霜层厚度,翅片管长度为900mm,沿管内低温液体走

向,每隔 300mm 在翅尖布置一个测量点,共有 4 个测量点,具体位置如图 2(a) 所示。试验开始前,先用酒精清洗测量位置,将 4 条刻度带的 0 点对准 4 个测量位置的翅尖中心,然后将其固定,如图 2(b) 所示。试验开始后,前 5 分钟内每隔 1 分钟记录一次霜层厚度,之后每隔 5 分钟记录一次,直至霜层厚度保持稳定后停止霜层厚度数据记录。

表 1 试验设备及环境参数

Tab. 1 Parameters of the equipment and environment

项目名称	参数指标	
自增压储罐 YDZ - 100	几何容积 /L	110
	翅片管长度 /mm	900
	翅片管外径 /mm	25
	单根翅片管	
	翅片高度 /mm	45
	翅片厚度 /mm	1.5
	翅片夹角 /°C	45
PH - II 手持式气象站	温度 /°C	-50 ~ 80
	相对湿度 /%	0 ~ 100
	温度 /°C	26.6
环境参数	湿度 /%	53.9
	大气压力 /Pa	843.15

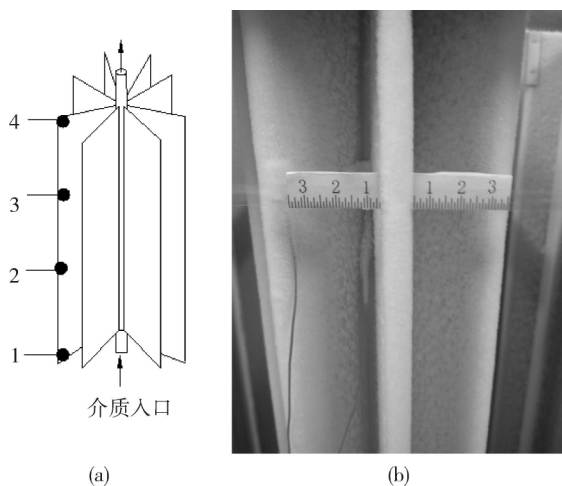


图 2 霜层厚度测量

Fig. 2 Measurement of frost thickness

PH - II 手持式气象站能同时测量温度、相对湿度、风速和大气压力四项参数,故选用 PH - II

手持式气象站测量气流参数,其风速测量精度为 $\pm 0.3\text{m/s}$,大气压力测量精度为 $\pm 0.3\text{hPa}$ 。翅片管带有 8 根翅片,选相邻两翅片所夹区域为测量范围,沿管长方向,每隔 300mm 布置一个测量点,共有 4 个测量点,具体位置如图 3(a) 所示。实验开始后,每隔 5 分钟记录一次,待试验测量数据无明显变化后停止记录数据。

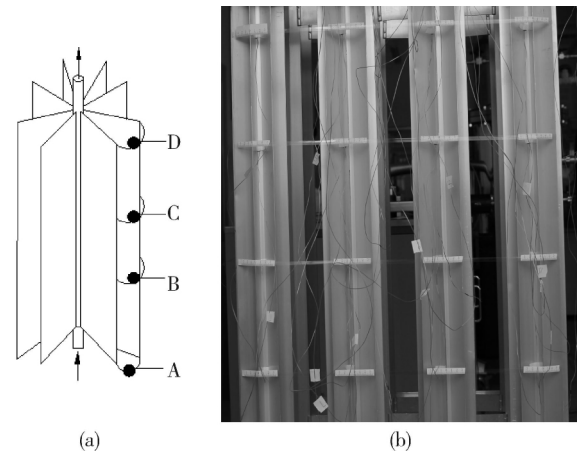


图 3 气流参数测量

Fig. 3 Measurement of flowing air parameters

3 试验结果及分析

3.1 翅片管表面结霜过程分析

试验开始,最先观察到测量点 1(翅片管入口 0m 处翅尖位置)的成霜现象,霜晶呈针状和数枝状附着在翅尖,易吹落。1min 时刻测得测量点 1 的霜层厚度为 0.4mm,此时,其他测量点的霜层厚度依然为 0mm。随着时间的推移,霜沿径向和轴向两个方向生长,沿径向从翅尖到翅根、沿轴向从测量点 1 至测量点 4 依次出现成霜现象,且霜生长情况均不相同,沿翅片管轴向结霜情况如图 4 中(a) 所示,沿径向结霜情况如图 4 中(b) 所示。30min 后,观察到霜生长均匀而缓慢,霜空隙逐渐减小。试验进行到 60min,霜层厚度测量数据无明显变化,并出现霜晶掉落现象,霜层厚度沿径向从翅尖到翅根逐渐减小,且基管表面几乎无霜生成。

可见,翅片管表面结霜最先出现在翅片管入口处的翅尖位置,沿翅片管径向越靠近翅根结霜现象越晚出现,基管表面成霜最晚,且霜层厚度从翅尖到翅根逐渐减小。实验开始,翅片管内的低温液体自下向上流动通过翅片管吸收周围气流的

热量,翅片管周围气流内部存在温度梯度,温度梯度会引起物质迁移,故气流中的水蒸气沿着温度梯度向温度较低的翅片管表面迁移。翅片管入口翅尖位置温度较低,与气流间温差较大,水蒸气浓度较高,相转移速率较快,故最先结霜。随着时间的推移和传热的进行,沿翅片管径向和轴向两个方向依次出现成霜现象。增加翅片高度会提高换热量,但超过一定值会降低翅片效率,因此可在考虑翅片效率的基础上适当增加气化器第一根翅片管的翅片高度以延缓翅片管表面霜层出现。

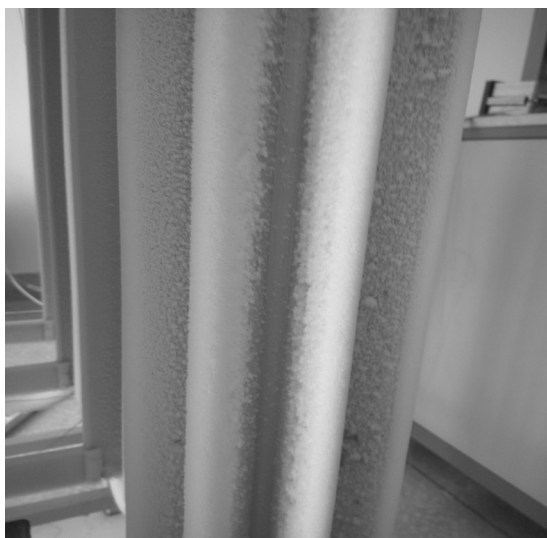
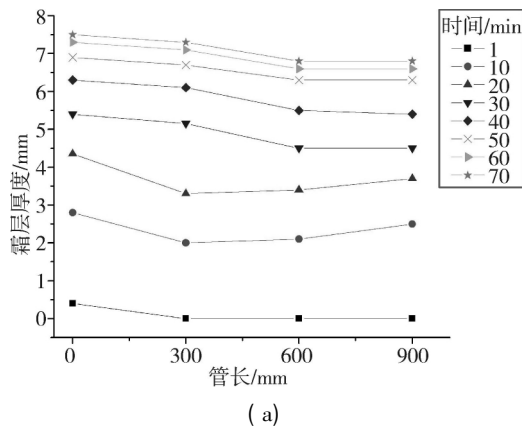


图4 霜层生长示意图

Fig. 4 Schematic of frost growth

3.2 霜层厚度实验结果及分析

图5所示为不同测量点处霜层厚度随时间的变化曲线,图中曲线序号是按管内低温液体走向排列的,曲线1是气化器第一根翅片管入口处翅尖位置霜层厚度变化曲线,曲线4是气化器第一根翅片管出口处翅尖位置霜层厚度变化曲线。实

验进行到70min左右,出现霜晶掉落现象,停止霜层厚度数据记录。

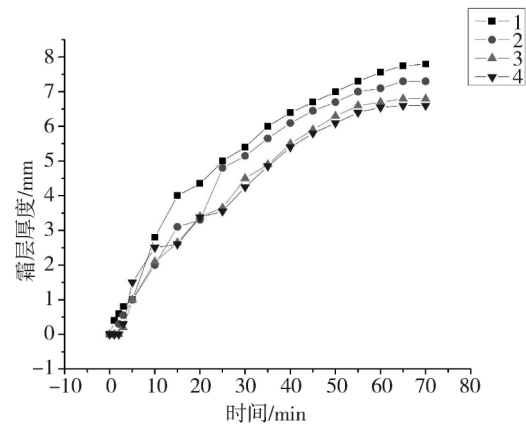


图5 霜层厚度随时间变化曲线图

Fig. 5 Variation of frost thickness with time

由图5可以看出:所有测量点霜层厚度在不同时间段有不同的增长率。在试验开始30min内,所有曲线均呈现出大幅度增长趋势,霜层厚度增长量和增长速率经分析列于表2中,霜层厚度整体平均增长速率为0.16mm/s,说明翅片管表面霜生长处于初期阶段,霜层厚度增长率较大。30min后,所有曲线的变化均趋于平缓,霜层厚度整体平均增长速率为0.07mm/s,说明这一时间段内翅片管表面霜生长进入了中期阶段,霜层厚度增长率达到了一个相对稳定值。1h后,所有曲线趋势几乎不变,测量点1的霜层厚度高达7.8mm,测量点2的霜层厚度保持在7.2mm左右,测量点3、4的霜层厚度在逐渐靠近7mm,说明翅片管表面霜生长进入了后期阶段,霜层厚度增长已达到最大值。由此可见,结霜初期(0—30min),霜生长较迅速,霜层厚度平均增长速率达到0.16mm/s;结霜中期(30—60min),霜生长逐渐趋于平缓,霜层厚度增长速率低至0.07mm/s;结霜后期(>60min),霜层厚度不再增加,出现霜晶掉落现象。霜是水蒸气的固态存在,当水蒸气与温度低于水三相点温度的冷表面相接触,就会在冷表面相变形成霜。冷表面温度变化幅度越大,结霜速率越大,冷表面温度越低,霜层越厚。试验系统启动后,翅片管由刚开始的环境温度骤然降至与管内介质相对应的温度,翅片管与周围气流温差较大,管外气流换热强度较大,霜生长较迅速,霜层厚度增长率较大。30—60min,翅片管内低温介质的平均温度逐渐升高,翅片管与周围

气流温差逐渐减小,使得霜生长逐渐趋于平缓,霜层厚度增长率减小。60min 后,霜覆盖了整个翅片,且拥有了一定的厚度,增加了气流与翅片管表面间的传热热阻,翅片管表面与周围气流的温差较小,管内低温介质与管外气流换热强度较小,故霜层厚度增加不再明显。结霜初期,翅片管表面霜晶呈针状和数枝状生长,易吹落,因此可考虑利用侧吹风吹落霜晶,以提高翅片管换热效率。

表 2 霜层厚度变化率

Tab. 2 Frost thickness change rate

	时间/min	霜层厚度增加量/mm	霜层厚度增长率/(mm/s)
测量点 1	0-30	5.4	0.18
	30-60	2.16	0.072
测量点 2	0-30	5.15	0.172
	30-60	1.95	0.065
测量点 3	0-30	4.5	0.15
	30-60	2.2	0.073
测量点 4	0-30	4.25	0.142
	30-60	2.3	0.076

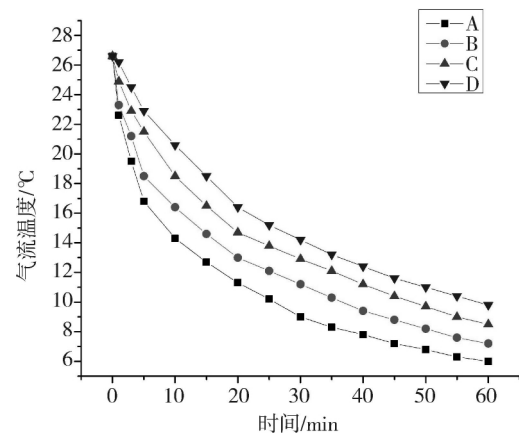
3.3 翅片管表面气流换热特性分析

试验开始前,PH-II 手持式气象站测量气流各参数分别为温度 26.6℃、相对湿度 48.2%、大气压力 843.15Pa 及风速 0m/s。实验开始,翅片管表面气流的温度值和相对湿度值一直在变化,大气压力值一直保持在 843.15Pa,风速值保持为 0m/s。由 PH-II 手持式气象站的精度可知自然对流深冷翅片管表面结霜过程中,翅片管表面气流压力变化幅度在 ±0.3hPa 范围内,流速小于 0.3m/s。

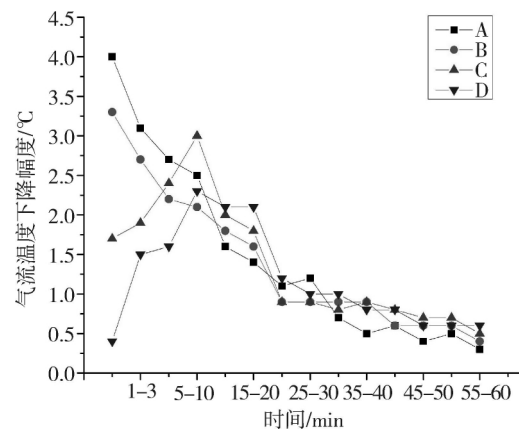
(1) 气流温度变化及分布

翅片管表面气流温度变化曲线如图 6 所示,其中图(a)为气流温度随时间变化曲线,图(b)气流温度在不同时间段内的下降幅度。

从图 6(a)中可以看出:整个试验过程中,气流温度随时间的增加均呈现明显下降趋势,且曲线较光滑。翅片管内的低温液体自下向上流动通



(a)



(b)

图 6 气流温度变化曲线

过翅片管与表面气流流动换热,传热过程使得翅片管外气流温度分布呈现出沿翅片管轴向自上向下逐渐降低的规律。另外,换热过程不仅与温度有关,还与低温液体和气流的流量有关,试验环境处于大空间,翅片管内低温液体流量为定值,而气流流量较充足,故气流温度随时间变化曲线更平缓。同时,从图 6(b)中可以看出:不同位置气流温度下降幅度不相同,同一位置气流温度在不同时间段内的下降幅度也不同。试验开始 1min 内,测量点 A 的温度下降幅度最大,为 4℃,其余测量点的温度下降幅度沿管长方向依次减小,测量点 D 的温度下降幅度最小,为 0.4℃。曲线 A、B 呈现出温度下降幅度不断减小的趋势,曲线 C、D 呈现出温度下降幅度先增大后减小的趋势。

曲线 A、B 从一开始,温度下降幅度较大,随着时间的增加,温度下降幅度逐渐减小,说明翅片管(0mm—300mm)表面气流在实验开始换热强

度较强,随着时间的推移,换热强度逐渐减小。试验开始,曲线 C、D 的温度下降幅度逐渐增大,说明翅片管(600mm—900mm)在实验开始换热强度较弱,随着时间的推移,换热逐渐加强,在 15min 后,温度下降幅度又开始减小,说明换热强度开始减小。30min—60min(结霜中期),所有曲线温度下降幅度均趋于稳定,说明换热强度也达到了稳定。这是由于结霜初期,翅片管(0mm—300mm)温度最先由环境温度 26.6℃ 降至与翅片管内低温介质相对应的温度,下降幅度较大,故换热强度较强。翅片管(600mm—900mm)温度下降时间最晚,且降幅最小,故换热强度较弱。随着换热过程的进行,翅片管(0mm—300mm)表面气流温度下降幅度逐渐减小,使得换热强度逐渐减小。而同一时间,翅片管(600mm—900mm)还处于翅片管冷却过程中,翅片管与表面气流间的温差逐渐增加,故气流温度下降幅度逐渐增大,换热逐渐加强。随着翅片管冷却过程的完成,翅片管(600mm—900mm)表面气流温度下降幅度逐渐减小,故换热强度开始减小。结霜中期,虽然霜层的存在增加了气流与翅片管间的传热热阻,但水蒸气相变结霜释放了相变潜热,故换热强度逐渐趋于稳定。

(2) 气流相对湿度变化及分布

翅片管表面气流相对湿度变化曲线如图 7 所示,其中图(a)为气流相对湿度随时间变化曲线,图(b)为气流相对湿度在不同时间段内的增长幅度。

从图 7(a)中可以看出:整个试验过程中,气流相对湿度随时间的增加均呈现明显上升趋势。试验系统运行 15min 后,测量点 D 的相对湿度变化曲线在测量点 C 的上方,其他测量点的相对湿度变化曲线依然呈现缓缓增加趋势。这是由于系统启动后,气流与翅片管表面间开始对流换热,使得气流温度降低,相对湿度增大。随着换热的进行,气流温度继续降低,相对湿度逐渐增大接近 96%,含湿量因相变结霜而减小,完成气流的冷却减湿过程。想比于测量点 C,测量点 D 与气流的接触面更大,故随着换热进行 15min 后,测量点 D 的相对湿度随时间变化曲线在测量点 C 的上方。

从图 7(b)中可以看出:气流相对湿度增加幅度总体呈现减小趋势,在不同时间段内减小趋势

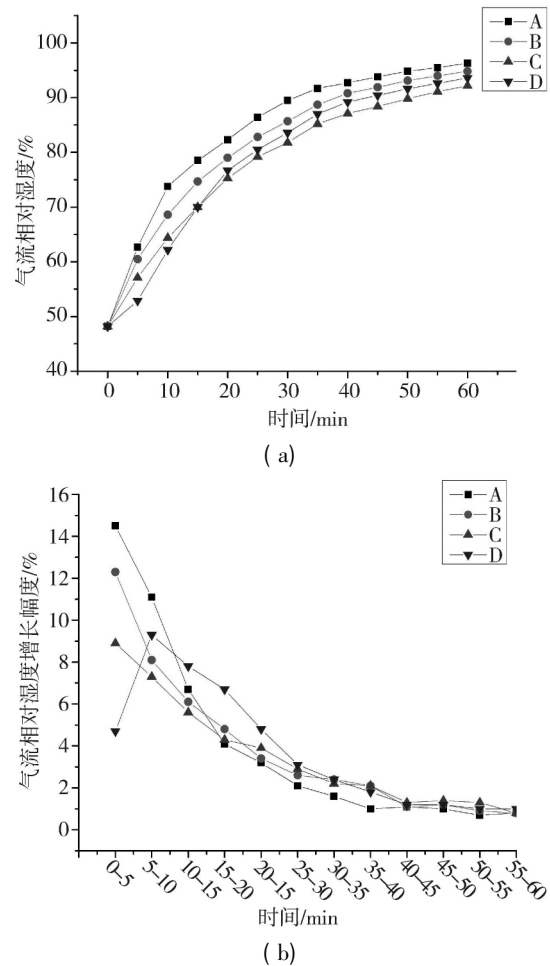


图 7 气流相对湿度变化曲线

Fig. 7 Variation of relative humidity of flowing air with time different. System running 0min—5min, measurement point A's relative humidity increase amplitude is the largest, 14.5%; measurement point D's relative humidity increase amplitude is the smallest, 4.7%. System running 5min—10min, measurement point D's relative humidity increase amplitude has increased (9.3%), other measurement points' relative humidity increase amplitude has decreased. System running 10min after, all measurement points' relative humidity increase amplitude gradually decreases. 30min—60min (icing middle period), all curves' relative humidity increase amplitude tends to be stable. It can be seen that during the frosting process of the evaporator fin surface, the relative humidity of the flowing air increases rapidly in 0min—30min (icing initial period), and the increase amplitude changes continuously. In 30min—60min (icing later period), the change is slow, and the relative humidity gradually approaches the saturation line. The increase amplitude of the relative humidity of the flowing air on the fin surface is affected by temperature. In the initial frosting period, the change amplitude of the air temperature is large, the water vapor migration speed is fast, and the concentration is high. The frosting layer on the fin surface grows rapidly, and the heat exchange between the air and the fin surface is strong. In the later frosting period, the whole system gradually approaches equilibrium, and the frosting process gradually tends to be flat, so the relative

湿度增加幅度趋于稳定,整个翅片管表面气流换热强度趋于稳定。

4 结论

(1) 翅片管气化工器表面结霜最先出现在翅片管入口处的翅尖位置,沿翅片管径向越靠近翅根结霜现象越晚出现,基管表面成霜最晚,且霜层厚度从翅尖到翅根逐渐减小。由此认为,可在考虑翅片效率的基础上适当增加翅片高度以延缓翅片管表面霜层的出现。

(2) 结霜初期(0min—30min),翅片管表面霜晶呈针状和数枝状迅速生长,易吹落,霜层厚度平均增长速率达到0.16mm/s;结霜中期(30min—60min),霜生长均匀而缓慢,霜密度逐渐增大,霜层厚度增长速率低至0.07mm/s;结霜后期(>60min),霜层厚度不再增加,出现霜晶掉落现象。因此可考虑利用侧吹风技术吹落初始霜晶,以提高翅片管换热效率。

(3) 翅片管(0mm—300mm)表面气流在实验开始换热强度较强,随着时间的增加,换热强度逐渐减小;翅片管(600mm—900mm)表面气流在实验开始换热强度较弱,随着时间的推移,换热逐渐加强,15min后,换热强度开始减小。30min—60min(结霜中期),整个翅片管表面气流换热强度均趋于稳定。

(4) 翅片管表面结霜过程中,气流相对湿度在结霜初期迅速增加,增长幅度不断变化,气流与翅片管表面间对流换热较强;结霜后期,变化较慢,气流逐渐接近湿饱和状态,气流与翅片管表面间对流换热趋于稳定。

参考文献

- [1] Seker D, Karatas H, Egrican N. Frost formation on fin and - tube heat exchangers. Part I - Modeling of frost formation on fin - and - tube heat exchangers [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27 (4): 367 - 374.
- [2] Qin Haijie, Li Weizhong, Dong Bo, et al. Experimental study of the characteristic of frosting on low temperature air cooler [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 55C: 106 - 114.
- [3] KimKyong - Hoo, Ko Hyung - Jong, et al. Analysis of heat transfer and frost layer formation on a cryogenic tank wall exposed to the humid atmospheric air [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29 (10): 2072 - 2079.
- [4] Chen Shuping, Yao Shuting, Xie Fushou, et al. Thermal conductivity study of frost layer on finned - tube vaporizer based on fractal theory [J]. CIESC Journal, 2012, 63(12): 3855 - 3860.
- [5] 王明秋, 陈叔平, 姚淑婷, 等. 结霜工况下空温式翅片管气化工器传热试验研究 [J]. 低温工程, 2017(3): 55 - 60.
- [6] 陈叔平, 常智新, 韩宏茵, 等. 空温式翅片管气化工器自然对流换热的数值模拟 [J]. 低温与超导, 2011, 39 (6): 58 - 63.
- [7] Lee Sang Hun, Lee Mooyeon, Yoon Won Jae, et al. Frost growth characteristics of spirally - coiled circular fin - tube heat exchangers under frosting conditions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 64: 1 - 9.
- [8] 张建文, 孙艳云, 江裕, 等. 空浴式翅片管气化工器传热性能数值模拟研究进展 [J]. 低温与超导, 2016, (11): 75 - 79.
- [9] Silvia Negrelli, Cardoso R P, Hermes C J L. A finite - volume diffusion - limited aggregation model for predicting the effective thermal conductivity of frost [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 101: 1263 - 1272.
- [10] 马强, 吴晓敏, 朱贝, 等. 水平冷面霜层生长的模拟 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37(3): 620 - 623.