

## 蒸发器结霜速率实时测定

董金铝 王 玮 董振强

( 山东工业大学动力系 济南 250061 )

摘要：用激光衍射技术对制冷蒸发器的结霜速率进行实时测定。该技术简单、直观、精度高。并叙述了测试原理、方法和精度等。

关键词：蒸发器 结霜速率 衍射

## Real-time measurement for evaporator frosting rate

*Dong Jinchang ,Wang Wei ,Dong Zhenqiang*

( Shandong Polytechnic University ,Jinan 250061 )

**Abstract :** The frosting rate of the evaporator interface is an important parameter for designing the refrigerator system. In this paper, we described a novel technique of laser diffraction measurement technique to visually and fast determine the frosting rate. There was a space between the frosted surface and the reference surface. When a light went through the space, the diffraction fringes were performed. Then the frosted area expanded, the space changed more narrow and the diffraction fringes moved. With the variation of the location of the diffraction fringes, the frost rate can be precisely determined.

**Key words :** evaporator frost rate diffraction

## 引 言

由于制冷、空调等工程技术的发展,研究和改善结霜工况下蒸发器的工作性能一直受到人们的关注<sup>[1]</sup>。但是,目前对蒸发器设计大多是针对干工况条件进行,即在无霜条件下设计,所以,难以保证结霜工况下蒸发器的最佳传热特性。为此,精确地实时测定蒸发器界面的结霜速率,对于结霜工况下,传热传质特性研究,并决定结霜工况下的蒸发器运行情况,如气流、温度、湿度、速度以及蒸发器表面温度、材料结构、间距布置等有着十分重要的意义。我们介绍一种测定结霜界面生长速率的有效方法——激光衍射测量技术。该技术具有装置简单、直观、精度高等优点。可配置 CCD 或摄像机记录变工况下蒸发器界面上各点结霜速率的变化,这对控制蒸发器的结霜、强化传热、降低制冷系统的能耗研究提供有用的实验手段。

## 1 原 理

当湿空气接触到低于露点又低于冰点的蒸发器冷表面时,将会结霜。随着霜的生长会造成传热的恶化,严重时造成气流阻塞,使蒸发器无法正常工作。结霜速率是单位时间内结霜界面在法向上推移的距离, $v = \Delta l / \Delta t$ ,式中, $v$ 代表结霜速率, $\Delta l$ 为结霜界面在法向上推移的距离。 $\Delta t$ 为时间间隔。如能测得结霜界面的法向推移距离和经过的时间 $\Delta t$ ,即可求出 $v$ 。该方法是利用结霜生长界面和参考物面之间的间隙所形成的远场夫朗和费衍射效应来进行的。当平行光照射到结霜生长界面和参考物面之间的间隙时,这相当于单缝的远场衍射,离观察屏距离为 $R \geq B / \lambda$ 时( $B$ 为间隙宽, $\lambda$ 为激光波长),在观察屏的试场上得到清晰的衍射条纹。衍射条纹的光强分布为:

$$I = I_0 (\sin \beta / \beta) \quad (1)$$

$$\beta = \pi B \sin \theta / \lambda$$

式中, $\theta$ 为衍射角。利用暗条纹进行测量, $\beta = \pi B \sin \theta / \lambda = n \pi$ 。

$$\beta = 0, \pm \pi, \pm 2\pi, \dots \pm n\pi \text{ 时, 从远场条件 } \sin \theta \approx \tan \theta = X_n / R \quad (2)$$

$$\text{则单缝的宽度可用右式求得 } B = R n \lambda / X_n \quad (3)$$

式中, $R$ 为观察屏距单缝平面的距离; $\lambda$ 为激光波长; $n$ 为衍射级; $X_n$ 为第 $n$ 级暗条纹中心距中心零级条纹中心的距离。

结霜开始时,结霜生长界面尺寸改变 $\Delta l$ 相当于窄缝尺寸 $B$ 改变 $\Delta l$ ,则衍射条纹的位置也随之改变,由衍射条纹位置变化来确定结霜生长界面与参考物之间的缝隙。这意味着,可在结霜生长真实条件下,在任意时刻精确地测定结霜生长界面的变化速度。实际测量时利用参考物面和结霜生长界面不在同一平面内所形成的间隙来计量。由于组成狭缝的两个边缘不在同一平面上,因此,出现的中心亮条纹两边的衍射条纹呈不对称分布,同一级次的暗条纹形成条件不同,分离窄缝的缝宽可用下式求得<sup>[2]</sup>:

$$\text{缝宽} = (n_1 R \lambda / X_{n_1}) - (X_{n_1} / 2R) = (n_2 R \lambda / X_{n_2}) + (X_{n_2} / 2R) \quad (4)$$

式中,  $n_1$  为条纹间距较小一边的衍射级,  $n_2$  为条纹间距较大一边的衍射级,  $Z$  为结霜生长界面与参考物面分离距离。条纹距增大的一边, 就是分离值所在的一边。

## 2 测试技术和结果

测试光路图如图 1 所示。其中, 1 为激光器, 2 为扩束准直镜, 3 为测试段, 4 为成像物镜, 5 为参考物, 6 为观察屏, 7 为显微相机、摄像机、CCD, 8 为蒸发器冷表面。光源 He-Ne 激光器, 经扩束准直成一束平行光通过测试段, 测试段两侧开有光窗, 并保持相互平行。参考物是刀口, 刀口支架四维可调, 激光通过结霜生长界面和刀口所组成的窄缝形成的衍射条纹, 由成像物镜成像在显微相机或摄像机上进行条纹记录。为了得到清晰的衍射条纹, 在测试中, 应注

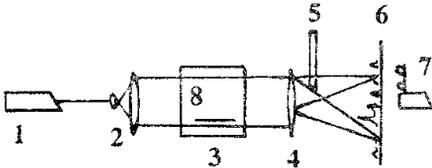


Fig.1 Schematic diagram of light path

意仔细调节刀口与结霜界面的间隙和成像物镜的位置, 使成像物镜的相对孔径尽可能大些。

实验系统由有机玻璃风道和蒸发器冷表面两部分组成。风道内的结霜工况: 空气流速、温度、湿度及蒸发器冷表面温度等分别由调温、调湿、制冷系统提供, 检测系统由干湿球温度计、热电偶、热球式电风速计等组成, 用于测量空气温度、湿度、流速及蒸发器冷表面壁温。实验范围: 冷表面温度  $-25^{\circ}\text{C}$   $\sim 0^{\circ}\text{C}$ 、湿空气温度  $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 、空气流速  $0.3 \sim 5\text{m/s}$ 、相对湿度  $60\% \sim 92\%$ 。图 2、图 3 是结霜生长表面经历 120min 过程中, 生长界面推移的衍射图样。 $X_{n_1}$  测量由读数显微镜测出底片上的距离除以放大倍数求得。放大倍数由光路布置和显微

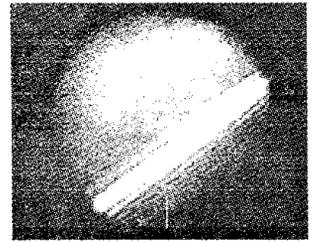


Fig.2 Initial appearance

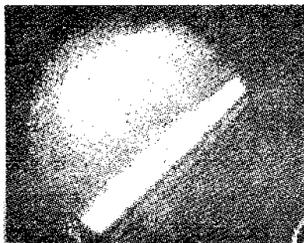


Fig.3 After 120min growth

相机所确定。结霜速率可由衍射条纹位置变化量计算出的窄缝绝对变化量, 再除以该过程所需时间求得。实验参数: 空气温度  $13^{\circ}\text{C}$ 、湿度  $67\%$ 、空气流速  $0.5\text{m/s}$ 、冷表面温度  $-15^{\circ}\text{C}$ 。

## 3 结 论

(1) 激光衍射技术测定结霜界面生长速率具有较明显的优点。由于是非接触式测量, 可用于结霜工况下的实时动态测试, 因此, 为蒸发器结霜工况气固相变传热传质研究提供了可靠的实验依据。(2) 计量  $X_n$  灵敏度为  $0.5\text{mm}$ , 窄缝宽度  $B$  的灵敏度一般可达  $1\mu\text{m}$ , 如果条纹清晰,  $X_n$  为  $0.05\text{mm}$ , 则  $B$  的灵敏度可达  $0.1\mu\text{m}$ 。

## 参 考 文 献

- 1 岳丹婷. 结霜工况下蒸发器传热实验研究. 传热传质学学术会议论文集(下册). 中国工程热物理学会, 1989:195~200
- 2 杨国光. 近代光学测试技术. 北京: 机械工业出版社, 1986:241~243

作者简介 董金钊, 男, 1947年3月出生。副教授。现从事工程热物理流场显示、热声学及放电活化技术的研究。