

文章编号: 1671-6612 (2019) 03-262-07

# 翅片换热器热泵除霜技术的应用研究

孙陆萌<sup>1</sup> 王春敏<sup>2</sup> 贾斌广<sup>1</sup>

(1.山东建筑大学热能工程学院 济南 250101;

2.顿汉布什(中国)工业有限公司济南分公司 济南 250101)

**【摘要】** 热泵技术是近年来在全世界倍受关注的新能源技术,作为热泵的重要组成部分之一,换热器的相关问题备受关注。热泵的换热器结霜除霜问题一直是热泵技术面临的难题。主要介绍了有关翅片换热器热泵除霜技术近年来研究的新进展,对翅片换热器热泵除霜技术的研究及应用现状和新发展想法作了简单的阐述,并提出参考性意见。

**【关键词】** 翅片换热器; 热泵结霜除霜技术; 研究进展

中图分类号 TK-9 文献标识码 A

## Study on Application of Defrosting Technology in Fin Heat Exchanger

Sun Lumeng<sup>1</sup> Wang Chunmin<sup>2</sup> Jia Bingguang<sup>1</sup>

(1.Shandong Jianzhu University, College of Thermal Engineering, Jinan, 250101;

2.Dunham Bush (China) Industrial Co., Ltd, Jinan Branch, Jinan, 250101 )

**【Abstract】** Heat pump technology is a new energy technology which has attracted much attention in the world in recent years. As for one of the important parts of heat pump, the related problems of heat exchanger are very concerned. The frosting and defrosting problem of heat exchanger is always the problem of heat pump technology. The article mainly introduces the related fin heat exchanger and heat pump defrosting technology research in recent years, the new development of the fin heat exchanger defrosting technology research, application status and development of new ideas are made the simple elaboration, and reference opinions are put forward.

**【Keywords】** Fin heat exchanger; Heat pump frosting and defrosting technology; Research progress

## 0 引言

热泵的室外机运行需要吸收空气热,当室外温度低于5℃时,室外换热器的蒸发温度就会在0℃以下,室外冷凝器表面结霜发生结霜现象。而随着系统运行,结霜的厚度初步增加,此时增大换热面积,短暂的提高换热量,但随着厚度的叠加,换热热阻增大,蒸发温度下降,导致换热器效率下降,热泵运行效率下降。同时,霜层阻碍了空气的流动,换热器的空气流量减少,从而加大压缩机的负担,加重热泵能效性能和效率的下降,产生严重的损失。因此,为了保证热泵的正常运行,必须进行周

期性的除霜。但就目前的情况而言,除霜技术对热泵的运行产生一定的不利影响,需要进行科学研究和技术的发展革新。

对于结霜除霜问题的研究,始于国外学者,并作出巨大贡献。现如今,换热器的热泵除霜问题在国内依然是重要的研究课题,每年均有大量的文献公开发表<sup>[1]</sup>。本文主要介绍了有关翅片换热器热泵除霜技术在近年来研究的新进展,对热泵除霜技术的研究及应用现状以及新发展动向作了简单的阐述,并提出参考性意见。

## 1 结霜机理

为了提高热泵机组的效率,需要在室外温度较低湿度较大的情况下进行除霜。结霜机理的研究可以从根本上了解霜层形成和生长的过程,从根本上寻找抑制和减弱结霜现象影响的方法,也可以利用结霜机理优化利用。

Yujiro Hayashid 等<sup>[2]</sup>用显微镜摄影的方法研究了霜层的形成过程,将霜层发展分阶段研究。DLO'Neal<sup>[3]</sup>采用实验的方法研究了反循环除霜过程中制冷系统的动态特性,获得了反循环除霜过程中重要的系统工况参数以及换热器表面融霜状态随时间的变化趋势。Yonko 和 Sepsy<sup>[4]</sup>通过假设空气导热系数,提出了理论霜层导热系数的计算模型,展现系数受多方面因素的影响。Hayashi 等<sup>[5]</sup>提出在高速气流产生的霜有四种晶体形态,并分别对形态结构进行了详细的研究。Tokura 等<sup>[6]</sup>在空气自然对流状态下霜层的形成过程进行了研究,此时霜层仅有两种晶体形态出现。Tao<sup>[7]</sup>建立了模型,从系统工况特性参数入手,研究霜层生长过程的动态分布特性。童钧耕等<sup>[8]</sup>进行霜层能量平衡分析,提出霜层综合导热系数的概念。查式彤,连添达等<sup>[9]</sup>分析了换热器表面结霜过程,并从几种形式和结构的霜入手,分析了不同系统工况参数与结霜速率的关系以及霜层不同形态形成的条件。在热、质理论的基础上,建立了均质霜层模型和考虑霜结构的霜层成长模型。邢震等<sup>[10]</sup>从环境系统工况参数以及翅片结构对翅片换热器霜层生长特性的具体影响,多个角度分析得出结霜机理可以择优利用的情况。

现如今,结霜机理的霜层模型已经相对稳定,但是主要针对自然结霜的研究,多为理想的模型,结霜机理的研究发展需要进一步的结合实际环境系统状况来发展研究,才有利于热泵换热器结霜除霜的发展。

## 2 结霜模型的研究

随着对结霜机理的充分研究和对解决问题的实际需要,诸多的研究者提出了众多的结霜模型,并发表了诸多成果。

Sanders<sup>[11]</sup>建立了蒸发器融霜模型,提出霜层的融化分为三个阶段,并详细的表述了霜层转化冰层随后接受空气热的融化过程。

Krakow 等<sup>[12]</sup>建立了分析空气源热泵热气除霜

过程的模型,将除霜过程分为:预热、融霜、蒸发和干热四个阶段。李九如等<sup>[13]</sup>建立了室外换热器热气除霜动态模型,通过模型动态观测空气源热泵除霜时换热器表面蒸发水量、耗热量及翅片管换热特性。杨明涛等<sup>[14]</sup>通过研究结霜除霜过程的系统工况状态参数变化规律,选出最佳除霜开始时间。

通过结霜模型的建立与相关研究,明确结霜过程的物理变化现象、换热特性和状态参数的规律特点,促进结霜除霜问题的研究和解决是相关研究重要出发点。

## 3 翅片管换热器表面结霜特性的研究

由于翅片管式换热器几何形状的复杂性,因此其结霜问题较简单几何面上的结霜问题复杂。翅片多样的形式使得结霜过程的影响因素增加,并导致换热器结霜问题更加突出,空气流动和风机流量下降现象明显。

Konde-pudisn (1989—1991) 将平片、波纹片及百叶窗片三种翅片形式的换热器进行风洞实验,分别研究了不同翅片参数在结霜状态下对三种翅片管换热器性能的影响<sup>[15]</sup>。

Jiankai Dong 等<sup>[16]</sup>搭建了空气源热泵逆循环除霜试验台,研究了除霜过程中能量消耗的具体分布情况,实验结果表明融霜所消耗的总能量中有 71.8%来自于室内环境,其中有 59.4%消耗在除霜上面,除霜最高效率能够达到 60.1%。

黄东<sup>[17]</sup>研究了不同节流机构对逆循环除霜时间的影响。用旁通铜管及热力膨胀阀分别作为除霜时的节流机构,利用空气源热泵冷热水机组进行了实验研究。因为旁通铜管系统比热力膨胀阀系统有更大的流通面积,所以旁通铜管系统比热力膨胀阀系统的除霜时间缩短 1.5min,其中融霜时间缩短 1.3min。分析得知节流机构的进口的制冷剂为过热气体或者两相状态,制冷剂的气相状态使节流机构的流量增加缓慢。

郭宪民等<sup>[18]</sup>通过对空气源热泵翅片管蒸发器表面结霜特性进行实验研究,分析了室外环境温度和相对湿度对霜层的形态和各类密度的影响。李腊芳等<sup>[19]</sup>通过对开孔型翅片的研究比较,进行数据模拟和实验研究,展现出在结霜条件下更高效的翅片形式。王金龙等<sup>[20]</sup>通过进行不同温度的循环溶液对结霜融霜过程的实验研究,分析了循环溶液的温度

和传热系数对结霜除霜过程的影响。不少学者应用仿真技术模拟了翅片管式换热器结霜工况下运行特性。Sensuh 等人<sup>[11]</sup>基于传热传质机理建立热泵用换热器结霜与抑霜的数值仿真模型,并进行相关机理的研究。Krakow<sup>[12]</sup>建立翅片式蒸发器仿真模型模拟了干工况、湿工况以及结霜工况下的运行过程,并分析了相应的运行特性。丁兵和丁国良等人<sup>[21]</sup>针对冰箱用翅片管式蒸发器的特点建立仿真模型,模拟了从开机运行、稳定运行到停机这一过程的结霜特性以及换热特性。张信安<sup>[22]</sup>建立翅片管式蒸发器干工况、湿工况和结霜工况下的动态仿真模型。刘志强、汤广发等人<sup>[23]</sup>进行了空气源热泵蒸发器结霜过程仿真研究。

以翅片换热器结霜特性为基础,结合热泵运行的其它组成部分,通过建立实验研究和数值模拟的方式,推进结霜除霜问题的研究,以得出合理处理结霜除霜问题的方法,对推动除霜技术的发展有着重要意义。

#### 4 除霜方法现状和发展动向

目前,抑制结霜和强化除霜技术还没有得到完善和广泛的应用,霜的存在依然会给多个领域的发展带来困扰。因此,为保持系统高效的运行,除霜是需要重点发展的研究核心。目前常用的除霜方法。主要有停机自然融霜、水或盐水喷淋融霜、热气旁通除霜、电热除霜和逆循环除霜。常用方法随着热泵技术的发展不能满足需求,需要几种具有良好前景的新方法。

气动除霜:依靠高速气流对霜层的动力作用将霜层从设备壁面上剥离。这种方式耗能小,且不会增加设备间的热负荷。

室内排风除霜:通过合理利用室内排风与环境空气混合,经除湿处理后进行对结霜的抑制。

过冷蓄能除霜:通过相变蓄热,使节流前制冷

剂过冷,以达到目的。同时结合室外风机换向延缓结霜。

在此基础上,除霜方式的优化有了进一步的发展。结合传统的和新兴的除霜方式,产生了组合式的除霜方式,例如多热源辅助的除霜方式,结合热气旁通和蓄热除霜的方式,提高除霜效率;结合喷气增焓技术的系统耦合除霜,降低除霜能耗。同时在换热器运行过程中的溶液除霜,也是除霜发展的重要趋势。

除霜方式的发展,主要基于传统的除霜方式以及翅片换热器本身的换热过程,可以从中进行新的研究,寻出更高效和合适的方法。

#### 5 霜层生长计算模型

结霜除霜的研究需要建立相应的模型进行研究,霜层的成长模型是研究结霜除霜的基础。

##### 5.1 控制方程

控制方程主要包括一套体积分数控制方程,两套质量守恒方程、一套组分守恒方程、两套动量守恒方程、两套能量守恒方程和一套湍流控制方程。并使用相应的方程求解相应的状态参数。

方程构成了霜层的形成与生长数学模型。此时,霜层为两相混合物的模型形式,负荷霜层的真实结构。

##### 5.2 数学模型的建立

微元段的选取一般有如下两种方法:

根据换热管的排列方式,选取一直管段加上与直管段所相邻的两侧各占一半的弯头段以及所连接的翅片为一个微元段,则整个换热器的微元段数等于换热管数。如图(a)所示的换热器。

制冷剂在直管段的换热情况需要着重考虑,所以以制冷剂流向为标准,将换热管选出的流程段划分为若干个微元段,每一个微元段上连接的翅片自动划归到该微元段内。如图(b)所示。

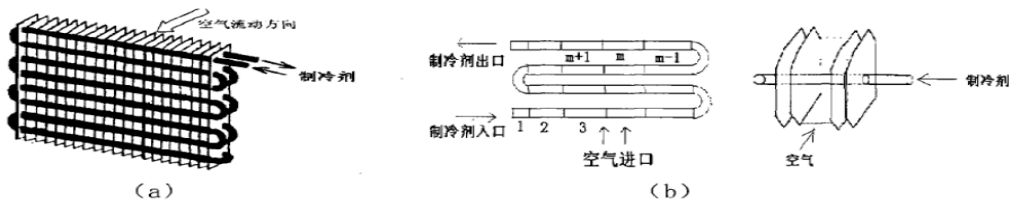


图1 翅片换热器排列及分段

Fig.1 Finned heat exchanger arrangement and section

仿真模型对霜层生长过程的模拟采用经验性的集总参数模型, 均假设霜层的物性在整个霜层中是均匀分布的。仿真模型的经验性的公式较多, 需要进行简化处理。

为了简化模型, 在模拟的过程中, 本文做了如下假设

- (1) 假设湿空气为不可压的牛顿流体;
- (2) 湿空气入口流量在入口处均匀分布;
- (3) 忽略重力的影响;
- (4) 相邻翅片间的温度场和流场关于中间界面呈对称分布;

(5) 换热管外表面温度恒定, 等于制冷剂蒸发温度;

(6) 翅片根部温度与换热管外表面温度一样, 等于制冷剂蒸发温度;

(7) 翅片温度沿垂直于换热管方向呈二维分布, 在翅片厚度的方向呈一维分布。

### 5.3 边界条件

边界条件如图所示, 空气侧前入口设置为速度入口边界, 后端入口设置为自由出流边界。换热管内表面设置为无滑移固体壁面, 温度与制冷剂蒸发温度相同。前端和后端均设置为绝热边界。两个计算域共有的界面设置为内部面, 在计算过程中, 两个计算域的温度通过这些界面进行传递。其他的界面均设置为对称面。

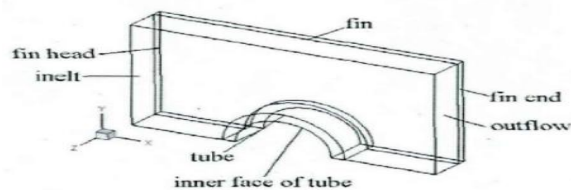


图2 翅片管式换热器结霜工况运行特性数值模拟边界条件

Fig.2 Numerical simulation of boundary conditions for frosting operation of finned tube heat exchanger

### 5.4 初始条件

初步条件设置如下:

$$u_g = 0, v_g = 0, \omega_g = 0, T_g = T_{in}, Y_{v\alpha} = Y_{in}, \alpha_1 = 0$$

举例说明翅片换热器的基本工况, 进行结霜除霜的模拟仿真研究方法。

分析翅片管结构对结霜特性的影响, 我们使用变参数正交模拟。其中, 保持不变的参数为换热管外径、管壁厚、翅片厚度、管间距和湿空气进口温

度, 其取值见表1。变化的参数为翅片间距、湿空气进口流速、湿空气进口相对湿度和制冷剂蒸发温度, 其取值见表2。

表1 翅片管式换热器部分结构参数与热力参数

Table 1 Some structural and thermal parameters of finned tube heat exchanger

换热管 外径 $d_0$ mm	管壁厚 $d_t$ mm	翅片厚度 $d_f$ mm	管间距 $s_1$ mm	湿空气进口 温度 $T_{in}$ ℃
12.7	2.5	1.6	25.4	10

表2 翅片管式换热器结霜工况运行特性模拟工况

Table 2 Simulation of operating characteristics of finned tube heat exchanger under frosting condition

NO.	翅片间 距 $s_f$ mm	湿空气进 口流速 $u_{in}$ m/s	湿空气进口相 对湿度 $\phi_{in}$ %	制冷剂蒸 发温度 $T_e$ ℃
Case-1		0.6		
Case-2	10	1	90	-30
Case-3		3		
Case-4		5		
Case-5	10	1	80	-30
Case-6			70	
Case-7	10	1	90	-20
Case-8				-40
Case-9	7	1	90	-30
Case-10	12			

最后根据工况的参数进行模拟计算, 得出翅片换热器结霜特性结果, 进而用于除霜的分析。

## 6 除霜模型

除霜模型的建立是基于水平圆管的二维物理模型, 采用VOF方法研究霜层融化的特征。

霜层融化过程中, 首先是冰晶坍塌, 靠近壁面的霜层开始融化, 融化水沿着壁面向下流动。在霜层存在孔隙的客观因素下, 融化霜层得到的霜水未被融化的霜层所吸收, 并且在室外环境温度足够低的情况下, 吸收霜水的霜层会重新凝固, 形成新的霜层。

上述实际的融霜过程过于复杂, 用FLUENT现有技术精确模拟融霜的整个过程目前还做不到, 于是借鉴融霜模拟分析的常用假设, 我们使用以下假设:

所有翅片管在融霜开始阶段初始温度统一; 霜

层均匀布在换热器表面；融霜过程为准稳态过程；霜层物理性质为传统结霜的性质；霜的热导率为固定值；忽略辐射换热；忽略霜层的自然变化过程；霜层外表面和外界的自然对流传热系数为定值。

结霜除霜模型是典型的凝固与融化模型，结合

流体基本方程，展开对模型的数值模拟，即可获得复杂流场中各位置的基本状态参数的分布以及随时间变化情况，明确除霜模型的动态特性。

从翅片换热器截截取其中一根单管以及周围的翅片，并绘制模型图。



图3 翅片模型图

Fig.3 Finned Model

从图中取下一个翅片。

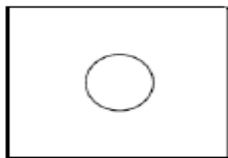


图4 翅片截取图

Fig.4 Finned Image

为简化分析，做以下假设：认为温度仅与肋片高度有关，肋片的导热系数为常数，肋片顶端中间位置视为绝热肋片的传热简化为一维稳态导热方程：

$$\frac{d^2t}{dr^2} + \frac{\varphi}{\lambda_f} = 0$$

通过数值模拟研究翅片间霜层的融化过程，需要定义两翅片间为一个单元，从一个翅片到另外一个翅片中间的物质分别是霜层-空气-霜层，由于物理模型具有几何对称性，因此数值模型只需要物理模型的一半进行模拟计算。



图5 相邻翅片单元

Fig.5 Adjacent Fin Unit

此处只突出翅片本身对霜层融化的影响，根据

图5，利用前处理软件Gambit做出模型图，根据物理模型和对称性，建立的数值模型如图6所示，图6上部圆圈部分的模型如图7所示。



图6 数值模型

Fig.6 Numerical Model

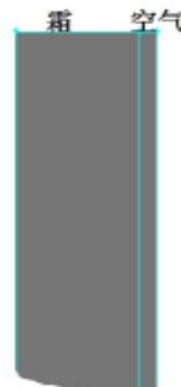


图7 数值模型（部分）

Fig.7 Numerical Model (Part)

数值模型的左边面为翅片表面，模型分割线的左边是霜层，模型分割线右边是空气层，模型的右

面为对称面。网格采用四边形和三角形网格。

通过以上除霜模型的建立,对除霜模型的一个基本的概念,为翅片换热器除霜的具体分析奠定一个基础,数值模拟仿真分析皆可从以上过程展开进行。

## 7 结论

随着翅片换热器热泵技术的发展,除霜问题成为相关技术发展的重点突破口,近年来国内外相关机构对做出大量研究。本文主要从结霜模型入手,同时结合除霜技术的发展,着重介绍了除霜的发展前景、结霜除霜数值分析模型的基本情况。结合文献分析和模型的研究,得到参考性的结论。

(1) 结霜机理的研究。结霜机理研究已相当充实,但多为理想模型,结霜机理的研究发展需要进一步的结合实际环境系统状况来发展研究,才有利于热泵换热器结霜除霜的发展。

(2) 结霜模型的相关研究,已经相对稳定,作为机理研究的延伸,多为结霜过程动态特性分析,是展开结霜除霜研究的基础。

(3) 翅片换热器结霜特性的研究。通过实验和数值模拟的方式,从翅片形式、换热器的基本组成部分的运行特性等角度入手,结合具体的运行工况,进行结霜除霜特性的研究。研究多数为换热器结霜除霜特性的研究,少有挑选重点角度进行结合除霜的优化研究,侧重研究相对较少,整体研究精细程度不够突出,将来的研究可有侧重精细进行结霜特性的研究,促进除霜的研究。

(4) 改进除霜方式的研究。除霜方式的发展,主要基于传统的除霜方式以及翅片换热器本身的换热过程,结合热泵和换热器的新的研究成果,研究更高效和合适的方法。

(5) 结霜除霜模型建立。本文举例说明了结霜除霜的模型建立,为具体研究提供模型基础。

## 参考文献:

- [1] 郭宪民.空气源热泵结霜问题的研究现状及进展[C].第十三届全国热泵与系统节能技术大会论文集,2008:169-176.
- [2] Yujiro Hayashi, Kazuo Aoki, Hiroshi Yohara. Study of frost formation based on a theoretical model of the frost layer. Heat Transfer Japanese Research, 1977,6(2):79-94.
- [3] DL O Neal, DR Tree. A Review of Frost Formation in Simple Geometries[J]. ASHRAE Trans, 1985,91(2):267-282.
- [4] JDYonko, CFSepsy. An Investigation of the Thermal Conductivity of Frost while Forming on A Flat Horizontal Plate[J]. ASHRAE Trans, 1967,73(1):1-11.
- [5] YHayashi A, aoki HYuhana. Study of Frost Properties Correlation with Frost Formation Types[J]. J. of Heat Transfer, 1977,6(3)L79-94
- [6] JDYonko, CFSepsy. An Investigation of the Thermal Conductivity of Frost while Forming on A Flat Horizontal Plate[J]. ASHRAE Trans, 1967,73(1):1-11
- [7] YX Tao, RW Besant, KS Rezkallah. A Mathematical Model of for Predicting the Densification and Growth of Frost on a Flat Plate[J]. Int. J of Heat&Mass Transfer, 1993,36(2):356-363.
- [8] 童钧耕,杨志斌,范云良.霜层综合导热系数的研究[J].低温工程,1996,(5):46-49.
- [9] 查世彤,连添达,姚普明.换热器表面结霜机理分析[J].天津商学院学报,1997(4):20-25
- [10] 邢震.翅片管换热器霜层生长特性研究[D].天津:天津商业大学,2016.
- [11] Sanders C Th. Frost formation (The influence of frost formation and defrosting on the performance of air coolers) Dissertation TU Delft[J]. 1974:115-119.
- [12] Krakow K I, Yan L, Lin S. A Model of Hot-gas Defrosting of Evaporators-Part 1: Heat and Mass Transfer Theory[J]. ASHARE Transaction, 1992,98(1):451-461.
- [13] 李九如,韩志涛,姚杨,等.基于实验参数的空气源热泵除霜滞留表面水蒸发模型[J].上海交通大学学报,2008,42,(6):989-992.
- [14] 杨明涛.兼顾供热性能和除霜时间的空气源热泵除霜控制研究[D].南京:东南大学.2016
- [15] Kondepudi S N, O' Neal DL. Effect of different fin configuration on the performance of inned-tubeheat exchange under forasting conditions[J]. ASHRAE Trans, 1990,96(2):439-444
- [16] Jiankai Dong, Shiming Deng, Yiqiang Jiang, et al. An experimental study on defrosting heat supplies and energy consumptions during a reverse cycle

- defrost operation for an air source heat pump[J]. Applied Thermal Engineering, 2012,37:380-387
- [17] 黄东,袁秀玲,陈蕴光.节流机构对风冷热泵冷热水机组逆循环除霜时间的影响[J].西安交通大学学报,2003,37(5):512-518.
- [18] 郭宪民,王善云,汪伟华.环境参数对空气源热泵蒸发器表面霜层影响研究[J].西安交通大学学报,2011,45,(3):30-34.
- [19] 李腊芳.空气源热泵结霜工况下高效能运行研究[D].重庆:重庆大学,2013.
- [20] 王金龙.空气源热泵室外换热器翅片管融霜过程分析[D].上海:东华大学,2015
- [21] 丁兵,丁国良.翅片管式蒸发器结霜特性模拟[J].流体机械,1995,23(4):52-56.
- [22] 张信安.蒸发器的动态仿真[D].大连:大连海事大学,2001.
- [23] 刘志强,汤广发,张国强.空气源热泵蒸发器结霜过程仿真研究[J].Heating Ventilating & Air Conditioning,2004,34(9).

#### (上接第 250 页)

对后续实施过程和效果进一步关注,特别是在装配式冷冻站整体能效的提高上,本文未做过多叙述,待运营后还需进一步根据运行数据验证分析。

总的来说,装配式冷冻站是目前国家大力发展的装配式建造技术的具体应用,通过模块化、集约化设计及工厂预制,实现现场直接组装,可以缩短施工周期,简化接口界面,节约占地面积,提高工

程质量,有利于实现地下车站冷水机房的标准化布置,装配式建造技术将是未来的发展趋势。

#### 参考文献:

- [1] 甄敬斌.预制装配式地铁车站施工技术研究[J].低碳世界,2018,(3):268-269.
- [2] 张瑞,刘昶,冯泽.基于BIM的城市轨道交通地下车站装配式高效制冷机房应用[J].暖通空调,2018,(1):99-103.