

文章编号: 1671-6612 (2021) 03-342-05

# 低温空气源热泵相变蓄热除霜性能模拟研究

丁 艳<sup>1,2</sup> 蔡 乐<sup>1</sup> 袁隆基<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学徐海学院 徐州 221008;

2. 中国矿业大学电气与动力工程学院 徐州 221116)

**【摘 要】** 低温空气源热泵是目前主流的节能设备之一,但其发展受到结霜问题的困扰。以相变蓄热除霜技术为基础,借助 Fluent 软件对蓄热器传热模型进行了建模,模拟分析了换热管数量、换热流体温度和换热流体流速对蓄热器传热效果的影响。结果表明:在结构合理的基础上,增加蓄热器内换热管数量可以提高传热性能;随着传热流体的温度与相变材料的温差增大,蓄热器的传热效果增强,除霜效果增强;流速增大,蓄热器的传热效果增强,除霜效果增强。

**【关键词】** 空气源热泵; 除霜; 相变材料; 模拟

中图分类号 TK02 文献标识码 A

## Simulation of Phase Change Heat Storage Defrosting Performance of Low Temperature Air Source Heat Pump

Ding Yan<sup>1,2</sup> Cai Le<sup>1</sup> Yuan Longji<sup>2</sup>

(1.Xuhai College of China University of Mining and Technology, Xuzhou, 221008;

2.School of Electrical and Power Engineering,China University of Mining and Technology, Xuzhou, 221116)

**【Abstract】** Low temperature air source heat pump is one of the mainstream energy-saving equipment, but its development is plagued by frosting. In this paper, based on the phase change thermal storage defrosting technology, the heat transfer model of the regenerator is established with the help of FLUENT software. The influence of the number of heat exchange tubes, the temperature of the heat exchange fluid and the flow rate of the heat exchange fluid on the heat transfer effect of the regenerator is simulated and analyzed. The results show that: on the basis of reasonable structure, increasing the number of heat exchange tubes in the regenerator can improve the heat transfer performance; with the increase of the temperature difference between the heat transfer fluid and the phase change material, the heat transfer effect and defrosting effect of the regenerator are enhanced; with the increase of the flow rate, the heat transfer effect and defrosting effect of the regenerator are enhanced.

**【Keywords】** Air Source Heat Pump; Defrosting; Phase Change Material; Simulation

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究面上项目资助 (19KJD480001); 2020 年江苏高校“青蓝工程”资助 (20200415); 中国矿业大学徐海学院一流专业建设项目资助 (YA2005)

作者(通讯作者)简介: 丁 艳(1980-), 女, 博士研究生, 副教授, E-mail: dingyan02@126.com

收稿日期: 2020-09-07

## 0 引言

空气源热泵是依靠提取空气中的低品位热能,以电力驱动压缩机,将提取的空气热能转换产生高品位热能以供使用的一种设备。消耗一份电能,可

获得 2~4 倍的热能<sup>[1-3]</sup>。随着国家“煤改电”、“煤改清洁能源”的不断推进,空气源热泵以其高效、环保、安全、可靠的优势,在商用和民用空调领域快速发展,目前,国家已将空气源热泵纳入可再生

能源范围,并在“十三五”规划中设立了发展目标<sup>[4]</sup>。空气源热泵在我国长江以南区域得到广泛运用,但冬季运行时会受到结霜的困扰<sup>[5]</sup>,机组能效因此而降低。尤其在环境温度低于 $-10^{\circ}\text{C}$ 时的北方极其寒冷地区,机组的制热能力和效率下降明显<sup>[6]</sup>。低温空气源热泵的结霜问题以及除霜导致的能耗问题给空气源热泵高效率运行带来了挑战,因此对于解决其除霜问题已成为未来空气源热泵进一步发展的关键,也是目前空气源热泵技术研究的热点之一。

长期以来,大量的专家学者对热泵除霜展开研究,探寻空气源热泵除霜性能特性。研究涉及的传统除霜方式主要包括逆循环除霜法、热气旁通除霜法、加热除霜法和超声波除霜等。其中,逆循环除霜是目前最常用的除霜方式<sup>[7,8]</sup>。白韩<sup>[9]</sup>在实验研究中发现,逆循环除霜时室内温度下降 $8.1^{\circ}\text{C}$ ,导致舒适性较差,且四通阀切换时会对系统内部设备造成冲击,影响机组性能和寿命,并伴有工作噪音。

表1 相变材料基本参数

Table 1 Basic parameters of phase change materials

名称	相变潜热 (kJ/kg)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	热导率 (W/(m·K))	相变温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	过冷/相分离	毒性	生产能力	腐蚀性
石蜡	188.6	700~900	0.24	固-固: 32 固-液: 51	无	无	易得	无

## 2 模型建立

该模型以“焓法模型”为基础,引用液相率 $\beta$ 来间接表征模拟流体的固化和熔化过程。液相率即液相物质在整个系统中所占的比例。该参数可较好地反映物质相变程度。融化过程, $\beta$ 不断增大;而凝固过程, $\beta$ 会不断减小。液相率 $\beta$ 用温度表达为:

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_{\text{solidus}} \\ \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}}, & T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}} \\ 1, & T > T_{\text{liquidus}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T$ 为材料温度, $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{solidus}}$ 为材料凝固温度, $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{liquidus}}$ 为材料熔化温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

本文选取 ANSYS-FLUENT 软件中的

近年来,蓄热除霜因节能、可靠、除霜效果好快速成为本领域的研究热点。董建锴等<sup>[10]</sup>在蓄热除霜实验中发现蓄热除霜比传统除霜输入功率高,并且除霜时间为传统除霜的1/3以上。朱颖秋等<sup>[11]</sup>建立了同心套管相变蓄热器模型,提供了同心套管相变蓄热的结构基础。晋瑞芳等<sup>[12]</sup>对同心管相变蓄热规律进行数值模拟并通过实验手段进行验证。龙建佑等<sup>[13]</sup>研究了三重同心套管的相变蓄热规律。本文以相变蓄热除霜技术为基础,借助Fluent软件对蓄热器传热模型进行了建模,模拟分析了换热管数量、换热流体温度和换热流体流速对蓄热器传热效果的影响。

## 1 相变材料

相变材料在除霜系统中起着关键性作用,而不同的相变材料相变蓄热性能也不同。本文从相变材料的潜热、密度、热导率、温度等其他方面进行综合考虑,选择石蜡作为相变材料,其参数如表1所示。

Solidification&Melting 模型进行相变蓄热器传热性能研究,此模型贴切相变蓄热器运行时实际状况。引进的液相率能充分说明传热过程中相变材料的状态,能够反映出相变蓄热器的传热性能。在相同的模拟时间内,液相率变化越大,说明蓄热器传热性能越好,越有利于提高系统的除霜性能。

### 2.1 物理模型

选取除霜套管的某一段为研究对象,物理模型如图1所示。在保证相变材料和蓄热体积不变的情况下,改变换热管数量以及换热流体的温度和流速,研究不同参数对蓄热器传热性能的影响。图1中的(a)、(b)、(c)和(d)分别为对应管数为1、2、3和4根。

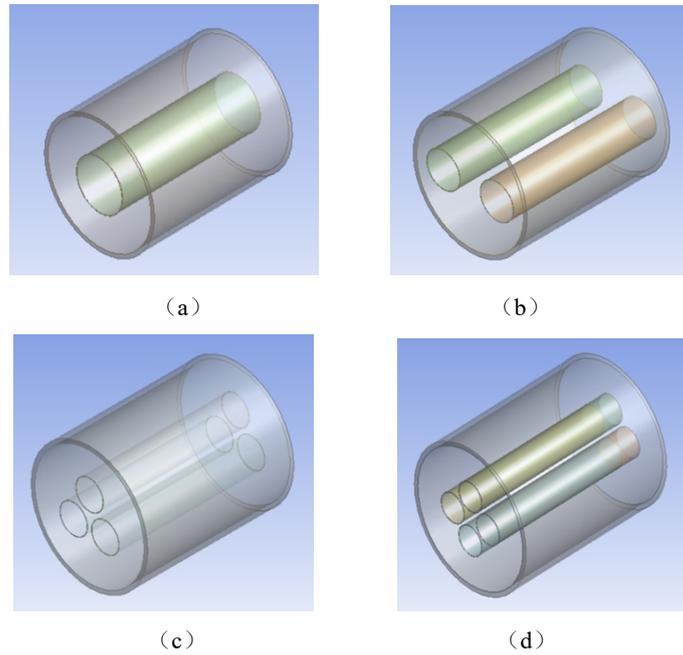


图1 不同管数下相变蓄热器物理模型

Fig.1 Physical model of phase change regenerator with different number of tubes

模型中蓄热器换热管和外壳材料均采用铜材质，外壳和内部换热器之间采用相变材料填充。在模拟过程中相当于对两种相变材料进行传热研究。模拟过程比较复杂，制冷剂状态在系统运行中容易改变，即相变材料和换热介质状态变化复杂。目前用制冷剂作为相变蓄热器模拟中的载热流体的模型较少，多采用水作为载热流体。为保证模拟的可行性，本文选用液态水代替制冷剂R22。此外为了强化传热效果，增大换热流体与相变材料温差，模拟中选取熔点为511K的相变材料进行模拟实验。通过293K的液态水冷却熔点为511K的相变材料进行相变材料的凝固过程模拟，并分析换热管数量、换热流体温度和换热流体流速对相变蓄热器传热性能的影响，进而分析相变蓄热器对系统除霜性能的影响。

### 2.2 数学模型

相变材料存在固态、液态和固、液共存状态，固、液共存状态被定义为“模糊区”。本数学模型遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒，控制方程如下：

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

式中： $\rho$ 为密度， $\text{kg/m}^3$ ； $t$ 为时间， $\text{s}$ ； $u$ 为 $x$

方向速度， $\text{m/s}$ ； $x$ 为 $x$ 轴坐标， $\text{m}$ ； $v$ 为 $y$ 方向速度， $\text{m/s}$ ； $y$ 为 $y$ 轴坐标， $\text{m}$ 。

(2) 动量方程

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (4)$$

$$S_u = \frac{(1-\beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} A_{mush} u \quad (5)$$

$$S_v = \frac{(1-\beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} A_{mush} v + \rho_{ref} g \alpha (T - T_{ref}) \quad (6)$$

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_{solidus} \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}}, & T_{solidus} < T < T_{liquidus} \\ 1, & T > T_{liquidus} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\mu$ 为动力黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； $p$ 为绝对压力，

$\text{Pa}$ ； $S_u$ 为 $u$ 方向动量方程源项； $S_v$ 为 $v$ 方向动量方程源项； $\varepsilon$ 为系数，取 $10^{-3}$ ； $A_{mush}$ 为糊状区的连续

数系数, 取  $5 \times 10^4$ ;  $\rho_{ref}$  为相变材料的初始密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\alpha$  为体积膨胀系数,  $\text{K}^{-1}$ ;  $T_{ref}$  为相变材料初始温度,  $\text{K}$ 。

因为“模糊区”的存在, 在动量方程中添加  $S_v$  和  $S_u$ , 限制“模糊区”速度的发展。

(3) 能量方程

$$\rho \left( \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \frac{\lambda}{C_p} \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + S_h \quad (8)$$

$$S_h = \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (9)$$

$$h = h_s + \Delta h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT + fr_q \quad (10)$$

式中:  $h$  为任意时刻比焓,  $\text{J/kg}$ ;  $\lambda$  为热导率,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $C_p$  为比定压热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $S_h$  为能量方程源项;  $h_s$  为显热比焓,  $\text{J/kg}$ ;  $\Delta h$  为潜热比焓,  $\text{J/kg}$ ;  $h_{ref}$  为初始比焓,  $\text{J/kg}$ ;  $r_q$  为相变潜热,  $\text{J/kg}$ 。

### 2.3 边界条件

传热模型管的外壁是绝热的, 因此边界条件为:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=R_0} = 0 \quad (11)$$

其中,  $R_0$  为外管径。

换热面条件为:

$$q_f = q_{pcm} \quad (12)$$

式中:  $q_f$  为管内换热流体传递热量;  $q_{pcm}$  为相变材料热吸收管壁热量。

初始时刻条件为:

$$T(x, y, z, t) = T_0, \quad t = 0 \quad (13)$$

即换热管温度与相变材料温度一致。

式中:  $T_0$  为初始温度。

传热流体区域进口边界条件为: 速度为  $0.4\text{m/s}$ , 温度为  $293\text{K}$ ; 出口边界条件为: 压力大小设为相对压力  $0\text{Pa}$ , 其余默认; 壁面边界: 无速度滑移, 耦合壁面边界。

## 3 模拟结果及分析

### 3.1 管束数量对传热性能的影响

在保证蓄热材料体积、蓄热器体积和蓄热材料种类不变, 以及换热流体进口温度、进口流速和管

距不变的情况下, 增加管数研究相同时间点上相变材料的液相率变化情况, 如图 2 所示。

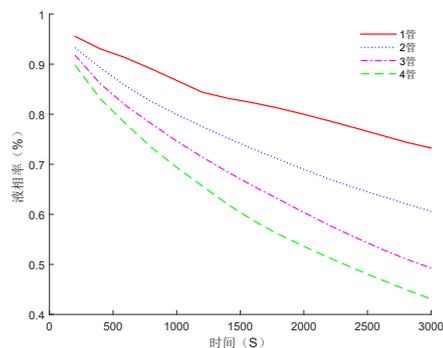


图 2 不同管数下液相率随时间变化情况

Fig.2 The change of liquid phase ratio with time under different tube numbers

从图 2 可以看出: 液相率均随模拟时间的增加而降低, 即在模拟时间增加的过程中, 相变材料呈现逐渐凝固的现象, 这是由于相变材料的热量不断传递给了换热管内的流体造成的; 同时还发现: 在相同模拟时间下, 管数越多, 液相率变化越大, 蓄热器传热性能越好, 除霜性能越好; 此外, 随着管数的增加, 管径减小, 液相率的变化率逐渐减小, 而且实际上管数增多, 管径减小, 流阻增加且制造工艺复杂, 结合考虑传热、流阻、制造工艺的情况下, 4 管的传热效果最佳。

### 3.2 传热流体温度对传热性能的影响

以 4 管 (管距为  $75\text{mm}$ ) 为研究模型, 流速为  $0.4\text{m/s}$ , 分别将流体温度设置为  $293\text{K}$ 、 $283\text{K}$  和  $273\text{K}$ , 模拟的结果如图 3 所示。

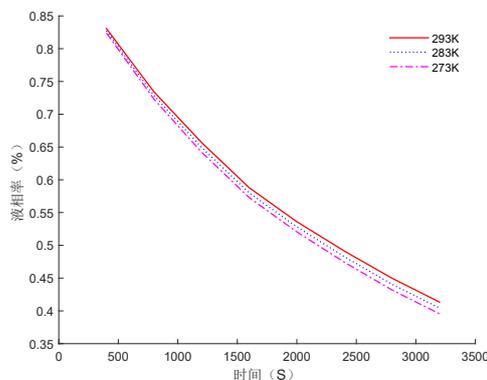


图 3 不同温度下液相率变化

Fig.3 Change of liquid phase ratio at different temperatures

从图 3 可以发现: 蓄热器的液相率随着模拟时

间的增加逐渐降低,当传热流体温度由 293K 降至 273K 时,相变材料的液相率逐渐降低,换热管内的流体与相变材料温差增大,相变材料的传热效果增强;同时可以看出,随着模拟时间的增加,传热流体温度越低,相变材料的液相率变化率越大,这是由于传热流体与相变材料温差增大从而换热增强造成的。由此可见,传热流体与相变材料温差增大,蓄热器传热效果增强,除霜效果增强。

### 3.3 传热流体流速对传热性能的影响

以 4 管(管距为 75mm)为研究模型,换热流体温度为 293K,分别将流速设置为 0.4m/s、1.6m/s 和 3.2m/s。通过改变流体流速进行模拟,分析传热流体流速对蓄热器传热效果的影响,其结果如图 4 所示。

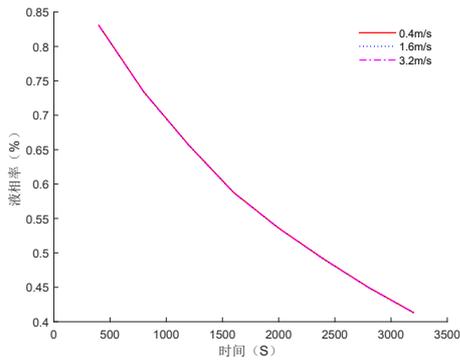


图 4 不同流速下液相率变化情况

Fig.4 Change of liquid phase ratio at different flow rates

从图 4 可以发现,随着模拟时间的增加,相变材料的液相率在逐渐降低;同时还发现,三种流速下的液相率曲线几乎重合,很难分清三者的差别,于是对三个速度做了差值分析,如图 5 所示。

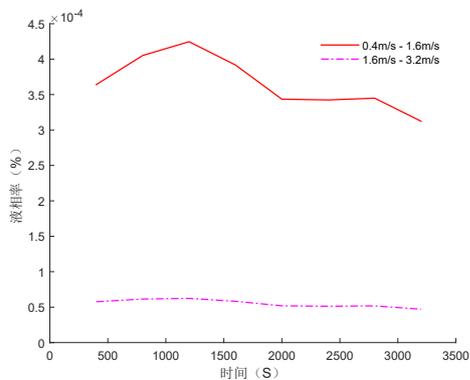


图 5 不同流速差值下液相率对比

Fig.5 Comparison of liquid phase ratio under different velocity difference

从图 5 可以看出: 0.4m/s~1.6m/s 曲线代表 0.4m/s 流速下的液相率与 1.6m/s 流速下的液相率之差,且这个差值为正,可见,0.4m/s 下的液相率比 1.6m/s 下的液相率高;同理,发现 1.6m/s 下的液相率比 3.2m/s 下的液相率高,说明随着流速的增大,相变材料液相率在降低,蓄热器的传热效果增强,从而除霜效果增强。

## 4 结论

本文基于 Fluent 软件对蓄热器传热模型进行了建模,模拟分析了换热管数量、换热流体温度和换热流体流速对蓄热器传热效果的影响。结果表明:在结构合理的基础上,增加蓄热器内换热管数量可以提高传热性能;随着传热流体的温度与相变材料的温差增大,蓄热器的传热效果增强,除霜效果增强;流速增大,蓄热器的传热效果增强,除霜效果增强。

### 参考文献:

- [1] 王晓艳.低温空气源热泵防霜增效实验分析[J].山东工业技术,2018,(3):22-23.
- [2] 马喆,国萍莉,林书帆,等.严寒地区某实验室清洁供暖方案应用研究[J].北方建筑,2018,3(4):42-55.
- [3] 刘思煦.两级压缩空气源热泵系统的性能分析[D].上海:东华大学,2014.
- [4] 马一太,代宝民.热泵在开发可再生能源领域的作用及其贡献率的计算方法[J].制冷学报,2016,(2):65-69.
- [5] 沈九兵,李自强,邢子文,等.空气源热泵系统无霜化及除霜方法概述[J].制冷学报,2019,40(2):85-104.
- [6] 封海辉.空气源热泵热水系统的应用与能效评价研究[D].成都:西华大学,2015.
- [7] Ding Y J, Ma G Y, Chai Q H, et al. Experiment investigation of reverse cycle defrosting methods on air source heat pump with TXV as the throttle regulator[J]. International Journal of Refrigeration,2004,(27):617-678.
- [8] Byun J S, Jeon C D, Jung J H, et al. The application of photo-coupler for frost detecting in an air-source heat pump[J]. International Journal of Refrigeration, 2006,29(2):191-198.
- [9] 白韡.房间空调器制热不停机除霜模式研究[C].2016 年中国家用电器技术大会论文集,2016:490-498.

(下转第 406 页)