文章编号:1005-0523(2011)05-0035-06

加金属丝水平单圆管蓄冰数值模拟

钟 亮,潘 阳

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:盘管式蓄冰传热瓶颈出现在冰层处,考虑在管外加入一些金属丝来促进管外换热从而提高蓄冰效率。为了描述管外扩展表面给结冰过程带来的影响,把管外金属丝和水的混合区域考虑为多孔介质区域,建立了合理的数学物理模型,进行了理论计算,并采用了密度随温度接近抛物线变化来研究水的自然对流对结冰过程的影响。通过计算,发现自然对流对温度分布的影响主要通过自然对流大循环来实现的,但对结冰形状的影响主要是通过在结冰区域附近的微循环来实现的。加丝蓄冰系统与不加丝蓄冰系统结冰形状均呈倒梨形。但加丝系统因为丝网的存在,倒梨形状不如不加丝系统明显。

关键词:多孔介质;金属丝网;自然对流;结冰

中图分类号:TB6 **文献标识码**:A

冰蓄冷系统在电力负荷较低的夜间用电低谷期采用制冷机制冷,利用冰的潜热特性,将冷量储存起来,在电力负荷较高的白天用电高峰期,把冰中储存的冷量释放出来,来满足建筑物空调或生产工艺的要求,达到转移尖峰电力、减轻电网负荷、节省电费、降低设备容量的设备。冰蓄冷系统按结冰方式分为动态蓄冰和静态蓄冰,其中静态蓄冰包括盘管式蓄冰和冰球式蓄冰等。许多学者为提高盘管式蓄冰的效率做了许多有益的实验和理论研究。

Motoi Yamaha[1]对盘管式蓄冰桶性能进行了实验研究,指出当底部水温降到4 ℃后,蓄冰桶上部的水温迅速下降,是受水的自然对流的影响。N. H. Saeid[2]研究了水的密度反转对多孔腔内的自然对流的影响。刘道平等[3-4]通过对有限空间水平恒壁温单圆管蓄冰过程水的自然对流实验研究,明确指出水的自然对流对于结冰轮廓和温度分布有明显的影响。在水的初始温度高于4 ℃时,结冰轮廓呈现上小下大梨形状;当水的初始温度低于4 ℃时,结冰轮廓呈现上大下小倒梨形状。Yuwen Zhang和Amir Faghri[5]研究了相变储能系统(管外为相变储能材料,管内为导热系数不高的流体)中通过在管内部加金属翅片来强化传热的过程。他通过运用焓法建立数学物理模型,着重强调了管内强制对流的液体与管外的耦合换热过程。通过数值计算确定在传热弱侧加入金属翅片的确对蓄冰效率有很大的提高。Nirmalanandhan[6]针对多孔铜丝网增强管外换热的结冰过程进行研究,通过建立一维传热模型进行数值计算和实验证明,得出利用多孔铜丝网增强换热装置对结冰体积的增长在50%~90%之间是可能的。日本富山大学平泽良男等[7]在蓄冰槽内加入不同密度的格子或多孔状的铜和合金对四种情况的融冰进行了详细的研究。通过实验得到各种融冰模式的优缺点。必须指出,他们实验观测出加了金属丝网的蓄冰系统自然对流强度要小于没加丝网的系统。N. Kayansayan等[8]人通过对加翅片水平盘管冰蓄冷进行实验研究以及通过改进Lacroix等人对融冰现象的焓法数学描述进行了合理的数值计算,得到在一定的蓄冰空间内最佳的翅片密度和翅片尺寸,以及冷媒流速和入口温度对蓄冰的影响。然而,对于碎金属丝强化蓄冰的研究较少。本研究的目的是通过数值计算证明加入金属丝对蓄冰系统的传热强化效果。根据碎金属丝与相变介质的混合状态,利用多孔

收稿日期:2011-09-02

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(GU09221)

作者简介:钟亮(1957—),男,硕士研究生,研究方向为空调设备节能技术。

中国知网 https://www.cnki.net

介质体积平均法的建立合理的数学模型,通过数值计算得出结果。

1 数学物理模型的建立

1.1 蓄冰物理模型

蓄冰桶为长柱体,长300 mm,宽160 mm,高130 mm;桶内换热铜管长300 mm,外径为16 mm,壁厚为1 mm。铜管中通入 −7 ℃的乙二醇溶液,冷媒通过管壁与管外的初始温度为15 ℃水或者水和金属丝(铝丝)的混合体进行热交换,使得水结冰。由于铜管较短,管中的乙二醇溶液在入口和出口温度差基本可以忽略不计,蓄冰桶内乙二醇溶液流动方向温度分布和结冰形状基本都是一致的。在铜管中心处垂直于乙二醇流动方向截取一个平面宽160 mm,高130 mm,以这个平面上的蓄冷工况变化分析整个蓄冰桶内的加丝系统相比于不加丝系统的变化。

1.2 数学描述

在实际情况中,由于水存在过冷度,所以即使当水的温度降到凝固点也不会结冰。同时因为金属丝的传热性能远远优于水和冰,所以在金属丝丝和水之间也会存在着换热。因此,进行数值模拟需对实际问题进行假设,使得问题简单化。现做如下假设:① 乙二醇进出口温度相同恒为 −7 ℃;② 蓄冰桶的保温良好,认为其向周围环境散热忽略不计;③ 蓄冰桶内初始水温均匀一致;④ 因为铜管比较薄,忽略铜管的传热热阻和蓄热性能;⑤ 各项物性参数除了浮力项中的密度外都为常数;⑥ 金属丝缠绕均匀,多孔介质各向同性;⑦ 任意一点金属丝与其周围接触的水接触良好,认为没有传热温差;⑧ 忽略由温度变化引起的金属丝体积变化;⑨ 在结冰过程中,不存在过冷度,即水温达到0 ℃水开始结冰。由以上假设我们可以把结冰区域考虑为多孔介质区域对水平缠丝管蓄冰过程水和丝的传热过程列出方程,考虑到多孔介质作为一个多相介质,用微分方程不能全面的反映介质内部固体骨架和流体的传热传质过程。所以我们在多孔介质中取一个代表性单元体(REV)来作为代表整个多孔介质的控制体。

1.2.1 连续性方程

$$\varepsilon\frac{\partial\rho_{\mathrm{f}}}{\partial t}+\frac{\rho_{\mathrm{f}}}{r}\left(\frac{\partial\left(r\langle u_r\rangle\right)}{\partial r}+\frac{\partial\langle u_\theta\rangle}{\partial\theta}\right)=0 \tag{1}$$

式中:ε 为代表性单位体的孔隙率,$\varepsilon=\frac{V_{\text{孔隙}}}{V}\times100\%$;$\rho_{\mathrm{f}}$ 为流体密度;t 为时间;r 为极坐标半径;θ 为极坐标夹角;u_r 为径向速度;u_θ 为切向速度。

1.2.2 动量方程

$$\begin{aligned}
&\frac{\rho_{\mathrm{f}}}{\varepsilon}\left(\frac{\partial\langle u_\theta\rangle}{\partial t}+\langle u_r\rangle\frac{\partial\langle u_\theta\rangle}{\partial r}+\frac{\langle u_\theta\rangle}{r}\frac{\partial\langle u_\theta\rangle}{\partial\theta}+\frac{\langle u_r\rangle\langle u_\theta\rangle}{r}\right)=\frac{\mu}{\varepsilon}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial\langle u_\theta\rangle}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2\langle u_\theta\rangle}{\partial\theta^2}-\frac{\langle u_\theta\rangle}{r^2}+\frac{2}{r^2}\frac{\partial\langle u_r\rangle}{\partial\theta}\right)+S_\theta\\
&\frac{\rho_{\mathrm{f}}}{\varepsilon}\left(\frac{\partial\langle u_r\rangle}{\partial t}+\langle u_r\rangle\frac{\partial\langle u_r\rangle}{\partial r}+\frac{\langle u_\theta\rangle}{r}\frac{\partial\langle u_r\rangle}{\partial\theta}-\frac{\langle u_\theta\rangle^2}{r}\right)=\frac{\mu}{\varepsilon}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial\langle u_r\rangle}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2\langle u_r\rangle}{\partial\theta^2}-\frac{\langle u_r\rangle}{r^2}+\frac{2}{r^2}\frac{\partial\langle u_\theta\rangle}{\partial\theta}\right)+S_r
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
S_\theta&=-\frac{\mu}{K_{\mathrm{m}}}\langle u_\theta\rangle-C_F k_{\mathrm{m}}^{-\frac{1}{2}}\rho_{\mathrm{f}}\langle u_\theta\rangle\langle|u_\theta|\rangle\\
S_r&=-\frac{\mu}{K_{\mathrm{m}}}\langle u_r\rangle-C_F k_{\mathrm{m}}^{-\frac{1}{2}}\rho_{\mathrm{f}}\langle u_r\rangle\langle|u_r|\rangle
\end{aligned} \tag{3}$$

式中:$\rho_{\mathrm{f}}F$ 为质量力,在本模型中仅体现为重力;μ 为流体动力粘度;S_θ 为动量方程切向源项;S_r 为动量方程径向源项;$-\frac{\mu}{K_{\mathrm{m}}}\langle\bar{U}\rangle$ 为粘性阻力项,即达西项;K_{m} 为多孔介质渗透率;$\bar{U}$ 为速度矢量项;

中国知网 https://www.cnki.net

$-C_F k_{\mathrm{m}}^{-\frac{1}{2}}\rho_{\mathrm{f}}\langle\bar{U}\rangle\bar{U}$ 为针对 Re 数较大的内部流动的多孔介质达西 Forchheimer 修正项；C_F 为无量纲阻力常数。

根据固体骨架金属丝的特性,把多孔介质考虑为纤维多孔介质,Drummond & Tahir[9]假设纤维都是直线状的(弯曲度为零),按方框格子均匀堆积,流体垂直或者平行流过纤维方向得到方程:

$$\frac{k}{d^2}=\frac{1}{8\phi}\left[\ln\left(\frac{1}{\phi}\right)-1.476+2\phi+o\left(\phi^2\right)\right] \tag{4}$$

式中:ϕ 为多孔介质固相体积分数。d 为纤维直径。在实际生活中,纤维都是会或多或少有一些弯曲,所以 DAVIS 等[10]对纤维是完全弯曲(弯曲度为100%)做了一系列计算,得到加权表格,见表1。

表1　纤维弯曲度的加权表

Tab.1　Fiber curvature weighted table

$\phi\times10^4$	$\frac{k/d^2(\text{rings})}{k/d^2(\text{rods})}$
1.00	0.993 9
1.59	0.993 5
2.51	0.993 1
4.00	0.992 5
6.31	0.991 9
10.00	0.991 0
15.85	0.989 9

表中：k/d^2(rings) 为弯曲度为100%的纤维的无量纲渗透率；k/d^2(rods) 为弯曲度为0%的纤维的无量纲渗透率。

实验测得实验测量金属丝孔隙率为97.32%,即在实验中固体骨架的体积分数为2.68%,代入式(4)中得到 $k/d^2=9.75$。利用表1经过加权计算得出 $k/d^2=9.31$。C_F 的计算选择 Fand[11]等人对 Ergun 公式中的两个系数进行了优化后的公式:

$$C_F=B\left(A\varepsilon^3\right)^{-\frac{1}{2}} \tag{5}$$

式中:A,B 为计算系数。

表2　Ergun公式的优化

Tab.2　Optimization of ergun formula

Forchheimer区	湍流区
$5\leqslant Re\leqslant80$	$Re\geqslant120$
$A=182$　$B=1.92$	$A=225$　$B=1.6$

根据上式,假设管壁结冰后与水接触的冰面温度为 -1 ℃,水温为 1 ℃,计算得出 $Ra=Gr\,Pr=1.28\times105$,Ra 为瑞利准则数;Gr 为浮升力与粘性力之比;Pr 为动量扩散系数与热量扩散系数之比。根据表2确定管外流动为层流。取 $A=182$,$B=1.92$,代入 $\varepsilon=0.973\,2$,得到 $C_F=0.148$。

1.2.3　能量方程

能量方程的表达在冻结区和非冻结区不同,冻结区的方程:

$$\left\{(\rho c)\frac{\partial\langle T\rangle}{\partial t}=k\left(\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial\langle T\rangle}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2\langle T\rangle}{\partial\theta^2}\right)\right. \tag{6}$$

非冻结区的方程:

$$(\rho c)\frac{\partial\langle T\rangle}{\partial t}+(\rho c)\left(\frac{u_\theta}{r}\frac{\partial\langle T\rangle}{\partial\theta}+u_r\frac{\partial\langle T\rangle}{\partial r}\right)=\lambda\left(\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial\langle T\rangle}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2\langle T\rangle}{\partial\theta^2}\right) \tag{7}$$

式中:T 为温度;(ρc) 为多孔介质表观热容,$(\rho c)=\varepsilon(\rho c)_{\mathrm{f}}+(1-\varepsilon)(\rho c)_{\mathrm{s}}$;$\lambda$ 为多孔介质表观传热系数,$\lambda=\varepsilon\lambda_{\mathrm{f}}+(1-\varepsilon)\lambda_{\mathrm{s}}$。下标f表示流体(水),下标s表示固体骨架。

1.2.4　边界条件和初始条件

把铜管当做一个恒定 -7 ℃ 壁温的边界来看待。假设蓄冰桶体与外界接触壁面保温层保温良好,蓄冰桶与外界换热热流密度为零。当 $r=R0$ 时:$T_{r=R0}=-7$ ℃;当 $r=R1$ 时:$\left.\frac{dT}{dr}\right|_{r=R1}=0$ W/mK。式中:$R0$ 表示管壁面坐标;$R1$ 表示蓄冰桶外壁面坐标。计算区域内的初始温度为15 ℃。

为了观察结冰过程中温度各点的温度分布,在蓄冰桶中心竖直方向布置了6个点,0点为冷媒管的位置,1~3点布置在冷媒管的上方,1点距管壁5 mm,2点距管壁15 mm,3点距管壁25 mm,4~6点布置在冷媒

中国知网　https://www.cnki.net

管下方,相对于1~3点关于x轴对称,见图1。

2 计算结果及分析

运用数值计算软件对上述数学模型进行数值计算,蓄冰桶内水的初始温度为15 ℃,铜管壁面温度保持恒温为 −7 ℃ ,蓄冰桶外壁面绝热。对桶内加入部分金属丝网和桶内没有加入金属丝网的情况进行模拟。图2为近壁点(1点和4点)温度分布。

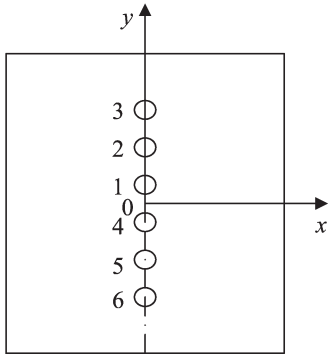


图1 温度测点示意图

Fig.1 Diagram of temperature measuring points

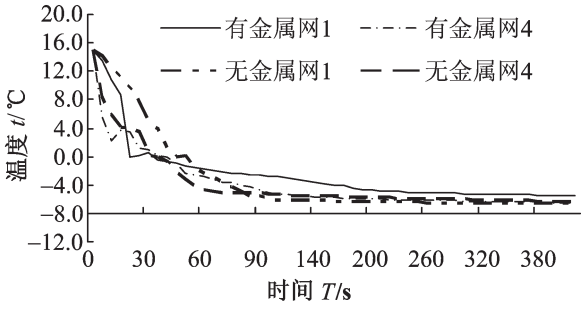


图2 距管壁5 mm纵向温度分布

Fig.2 Longitudinal temperature distribution with 5mm away from tube wall

对比图2图3温度分布图,刚刚开始水温下降的时候在自然对流的作用下靠近管壁被冷却的水往下运动,冷量被带到下方,处于冷壁下方的温度点4降温较快,但是当水温降低到4 ℃左右时,因为密度的逆转处于下方的温度点4温度出现在4 ℃左右停留一段时间的现象。而上方的温度点1在自然对流的冷量补充之下迅速降温到4 ℃以下同时对比处于同一个点1的加金属网和没加金属网的温度分布我们可以发现在近壁点1,4加了金属丝网的温度要略高于没有加金属丝网的温度。但是在2,3,4,6点加了金属丝网的温度要低于相同时间下没有加金属丝网的温度。这说明加了金属丝网以后冷媒的冷量在冰蓄冷过程中迅速的通过金属从靠近管壁的地方带到远离管壁的地方,从而维持铜管外侧的温度较高,增大铜管内壁和外壁的温差,增大热流密度。这也从温度分布的角度说明加入一定量的金属丝可以提高蓄冰效率。

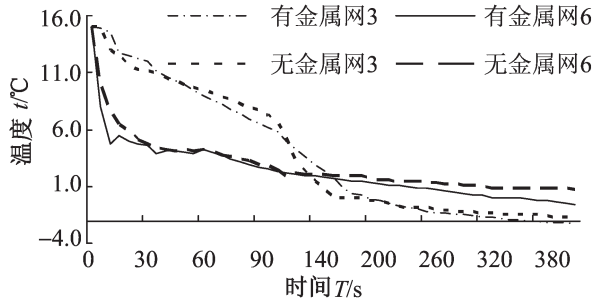


图3 距管壁15 mm纵向温度分布

Fig.3 Longitudinal temperature distribution with 5 mm away from tube wall

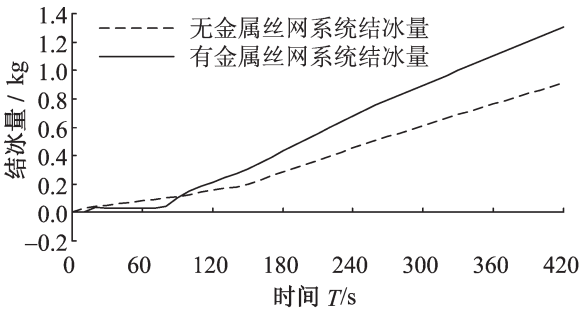


图4 两种蓄冷系统结冰量的比较对比

Fig.4 Ice volume comparison of two kinds of ice storage system

从图5的对比我们可以发现,蓄冰刚开始的时候,没加金属丝网的蓄冰系统结冰速率高于加了金属丝网的蓄冰系统,这是因为在蓄冰刚刚开始的时候,因为金属丝网的存在,铜管外相变介质的综合导热系数远高于纯水的导热系数,冷量从管内源源不断的被输运到离壁面较远的区域。但是图4中可以看到当蓄冰系统水温降到一定温度时,随着桶内水温温差的变小,加金属丝的蓄冰系统热流密度大的优势显现出来,结冰量超过没加金属丝网的蓄冰系统,并且自此之后两个系统蓄冰量差距越来越大。

从图6的对比中我们可以看出,蓄冰刚开始的时候靠近管壁的水由于密度的变化向下流动,蓄冰桶下部靠近管壁的水则受迫向上流动,在蓄冰桶的下部形成一个大的漩涡(图6:1 200 s)。在蓄冰桶的上部却

中国知网 https://www.cnki.net

基本不受影响,只有很微弱的对流存在。蓄冰进行到1 200 s时,水往下流动的趋势越来越明显,甚至已经开始影响到蓄冰桶的上部了,与此同时在最靠近管壁的地方出现了沿着铜管从下往上的流动。这是因为,随着冷却的进行,水的温度不断降低,当最靠近管壁的区域的温度已经低于4 ℃并且慢慢结冰的时候,由于结冰所带来的体积膨胀给冰层附近的水一个推力,但是靠外区域温度已经慢慢接近4 ℃了,密度已经大于靠近冰层的水了,靠近冰层的水往下流动的趋势被自然对流抵消掉,只能沿着冰层往上流动,因此在最靠近冰层区域形成一个向上的逆流循环。并且这个逆循环一直会存在于冰层附近,把最接近0 ℃的水源源不断的提供到铜管的上方。所以我们发现在结冰完成之后(25 200 s)铜管上部的冰要远多于铜管下部。

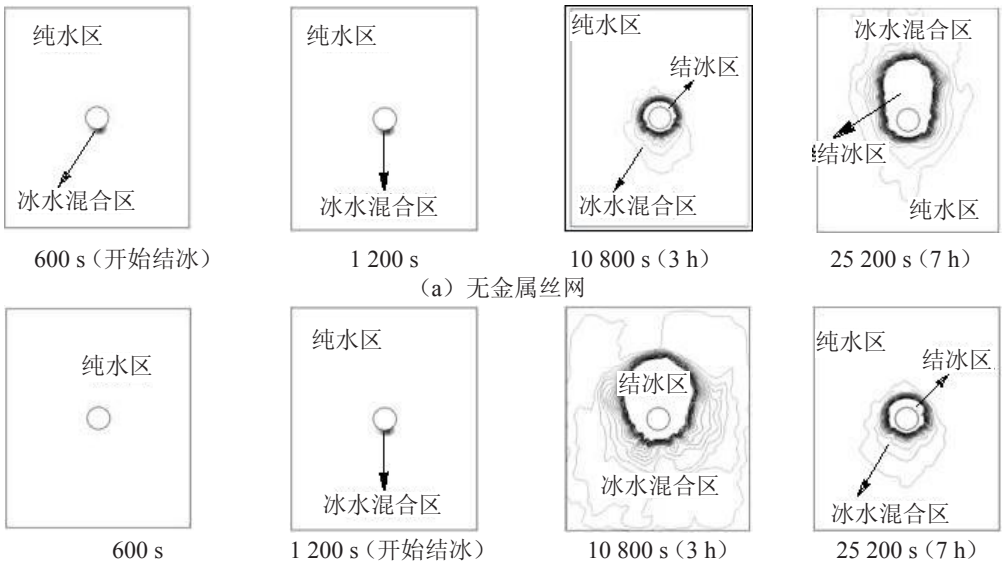


图5　有(无)金属丝网不同时间的结冰厚度

Fig.5　Ice thickness with different time with (without) metal screen

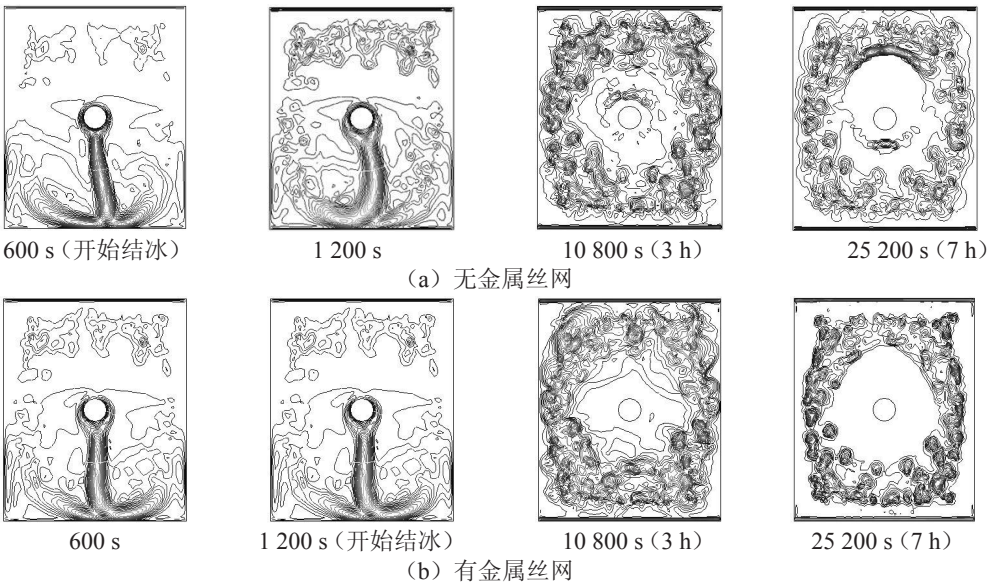


图6　有(无)金属丝网不同时间的流线

Fig.6　Streamline change with different time with (without) metal screen

3　结论

1) 由于金属丝的存在一方面削弱了蓄冰桶内的自然对流强度,另一方面加强了导热传热,加金属丝蓄

中国知网　https://www.cnki.net

冰系统桶内温度分布比不加金属丝蓄冰系统均匀。

2）相同条件下在7 h的蓄冰周期内，加金属丝蓄冰系统比没加金属丝蓄冰系统多蓄冰43.47%，极大的提高了蓄冰效率。

参考文献：

[1] YAMAHA M，NAKAHARA N，CHIBA R. Studies on thermal characteristics of ice thermal storage tank and a methodology for estimation of tank efficiency[J]. Int T Energy Res，2008，32：226-241.

[2] SAEID N H. Maximum density effects on natural convection in a porous cavity under thermal non-equilibrium conditions [J]. Acta Mechanica，2007，188：55-68.

[3] 刘道平，周文涛. 伴随自然对流叠置圆管外蓄冰特性的试验研究[J]. 暖通空调，2002，32(4)：14-16.

[4] 刘道平，周文涛. 水平置恒壁温单圆管外蓄冰规律的实验研究[J]. 能源研究与信息，2005，21(1)：37-42.

[5] ZHANG YUWEN，FAGHRI A. Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage system by using an external radial finned tube[J]. Int J Heat Mass Transfer，1996，39(15)：3165-3173.

[6] NIRMALANANDHAN V S. Heat transfer augmentation for external ice-on-tube tes systems using porous copper mesh to increase volumetric ice production [D]. Ohio：University of Cincinnati，2004：6-52.

[7] HIRASAWA Y，HAMADA T ，et al. An experimental study on melting process of ice containing conductive solids[C]//日本机械学会论文集，Japan：Japan society of mechanical engineers，1994：2491-2496.

[8] KAYANSAYAN N，ACAR M A. Ice formation around a finned-tube heat exchanger for cold thermal energy storage [J].International Journal of Thermal Sciences，2006，45：405-418.

[9] NIELD D A，BEJAN A，Convection in porous media.[M]. Third Edition Salt Lake City：Godin Lyttle Press，2009：1-37.

[10] DAVIS A M J，JAMES D F .Slow flow through a model fibrous porous medium[J]. Int J Multiphase Flow，1996，22(5)：968-989 .

[11] FAND R M，KIM B Y K ，et al. Resistance to the flow of fluids through simple and complex porous media whose matrices are composed of randomly packed spheres[J]. Journal of Fluids Engineering，1987，109(3)：268-274.

Ice Storage Numerical Simulation of Horizontal Single Circular Tube Added with Wire

Zhong Liang，Pan Yang

（School of Civil Engineering and Architecture，East China Jiaotong University，Nanchang 330013，China）

Abstract：Shortcomings of the ice-on-coil thermal storage heat appear in the ice. Adding some metal wire around the tube may improve freezing efficiency. In order to describe the result of freezing process on extended surface，regarding wire and water mixing region as porous media，reasonable mathematical physical model is established and theoretical calculation is conducted. Density variation with temperature is used to study influence of the water natural convection on the freezing process. Calculation finds that effect of natural convection on the temperature distribution is achieved mainly through circulation of natural convection. The ice shape is achieved mainly by the microcirculation near the icing region. Both the ice storage system with wire and the one without wire appear the shape of inverted pear. Due to the wire，the shape of inverted pear is less clear than the ice storage system without wire.

Key words：porous media；metal wire；natural convection；freezing

中国知网 https://www.cnki.net