

# 通风管间距对冷库地坪通风防冻系统传热性能影响的研究

贾景福<sup>1</sup>, 郝满晋<sup>2</sup>, 李建华<sup>1</sup> (1. 河北农业大学海洋学院, 河北秦皇岛 066003; 2. 燕山大学建筑工程与力学学院, 河北秦皇岛 066004)

**摘要** 为了研究通风管间距对冷库地坪通风防冻系统传热性能的影响程度, 建立了三维稳态传热数学模型, 对传热模型进行了合理的简化, 根据系统的传热过程确定了传热模型的定解条件, 利用 Phoenix 软件对通风系统未启动和不同通风管间距下的传热模型分别进行了数值模拟分析。结果表明, 对冷库地坪采取机械通风防冻的效果良好, 通风管间距对冷库地坪通风防冻系统的传热性能有较大影响。

**关键词** 冷库地坪; 通风防冻; 三维稳态传热; 传热性能; 管间距

**中图分类号** TU265 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)22-10765-02

**Study on Effect of Ventilation Tube Spacing on Thermal Performance of Cold Storage Floor Antifreezing Ventilation System**  
**JIA Jing-fu et al** (Ocean college of Hebei Agricultural University, Qinhuangdao, Hebei 066003)

**Abstract** The research aimed to investigate the effect of ventilation tube spacing on thermal performance of cold storage floor antifreezing ventilation system. A steady three-dimensional mathematical model of heat transfer was set up. The heat-transfer model was simplified reasonably. The definite conditions of the heat-transfer model were confirmed according to the heat-transfer process. The temperature field of this system were simulated and calculated by Phoenix under different kinds of working conditions, such as without circulating the ventilation system, with different tube spacing. The results showed that the effect of using mechanical antifreezing ventilation to cold storage floor was better. They also indicated the effect of ventilation tube spacing was greater on thermal performance of cold storage floor antifreezing ventilation system.

**Key words** Cold storage floor; Antifreezing ventilation; Steady three-dimensional heat transfer; Thermal performance; Tube spacing

冷库地坪防冻是冷库设计、施工与运行中不可忽视的重要问题。冷库地坪虽然铺设了与库温相适应的隔热层, 但隔热层厚度不能防止土壤的冻结, 只能推迟其冻结的时间<sup>[1]</sup>。当冷库温度降低后, 库温与地坪下土层之间产生较大的温差, 冷量由库内传至土层, 使土层温度降低。冷库温度常年在 0℃ 以下, 若地坪下土层得不到热量补充, 将使土层中的水分受冻结冰。由于温差的存在及冰晶的形成, 土壤上、下层之间的水蒸气分压力差使下层土壤的水蒸气不断上移, 导致冰冻体逐渐扩大, 水分结冰产生的体积膨胀力最终将引起地坪冻胀或地基冻胀现象, 危及建筑、结构安全<sup>[2]</sup>。因此, 冷库底层冷间设计温度低于 0℃ 时, 地面应采取防止冻胀的措施, 使地坪下的土层温度保持在 0℃ 以上。

通风防冻是目前最常用的冷库地坪防冻措施, 是指通过用埋设的通风管进行自然或机械通风对冷库地坪提供热量。多年来, 人们一般多采用一些经验值对冷库地坪进行通风防冻的设计与施工, 除文献<sup>[1, 3]</sup>外, 比较系统地研究较少。为了真正做到防冻, 对其进行系统地研究, 指出各种因素对系统的影响程度具有更好地指导设计、施工与运行的现实意义, 这也正是冷库设计与使用的科学化、合理化、节能化的必然发展趋势。因此, 笔者以采取机械通风防冻措施的冷库地坪为研究对象, 建立了冷库地坪的三维稳态传热数学模型, 依据冷库地坪系统内温度分布的导热微分方程和单值性条件, 利用 Phoenix 软件对通风系统未启动和不同通风管间距下的传热模型分别进行了数值模拟分析, 旨在研究通风管间距对冷库地坪通风防冻系统传热性能的影响。

## 1 模拟条件

模拟的是冬季天津地区冷库地坪的三维稳态传热的温度场分布, 冷库冻结物冷藏间的设计温度为 -20℃, 设有鼓

风装置, 因此冷库地面上表面的对流换热系数为  $\alpha_n = 12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ <sup>[2]</sup>。冷库地坪通风管内风速为 1.5 m/s, 送风温度为 10℃, 管内径为 250 mm。3.2 m 深处的土壤温度选取天津市地面下 3.2 m 深处历年最低 3、4 月份的土壤平均温度:  $t_s = 10.4 \text{ C}$ <sup>[4]</sup>。

## 2 传热模型

**2.1 传热模型的计算单元** 冷库地坪的结构层由上到下各层依次为<sup>[5]</sup>: 钢筋混凝土面层、水泥砂浆保护层、一毡二油防潮层、硬质聚氨酯泡沫塑料隔热层、二毡三油隔气层、水泥砂浆找平层、混凝土预制平板、中砂填料层(内埋混凝土通风管), 地坪的结构层以下为土壤层。

对冷库冻结物冷藏间的地坪及土壤层截取微元段( $X \times Y \times Z = 1\ 500 \text{ mm} \times 3\ 900 \text{ mm} \times 1\ 000 \text{ mm}$ )作为传热模型的计算单元, 如图 1 所示。

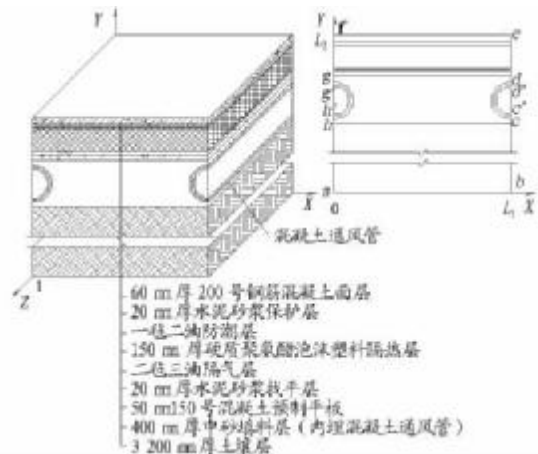


图 1 冷库地坪传热模型的计算单元

Fig. 1 The calculating unit of heat transfer model for cold storage floor

**2.2 传热模型的简化假设** 冷库地坪内的热传递实际非常复杂, 为便于分析求解, 需做一定简化, 具体如下: 冷库地坪内的传热简化为三维稳态导热; 忽略一毡二油和二毡三油的热阻; 不考虑冷库地坪各层材料间的接触热阻; 同一构造层

基金项目 秦皇岛市科学技术研究与发展指导计划(2008018)。  
 作者简介 贾景福(1973-), 男, 河北昌黎人, 硕士, 助教, 从事空调制冷教学与科研工作。  
 收稿日期 2009-06-08

内材料是均质、各向同性、常物性的;忽略湿传递。

2.3 传热模型的导热微分方程及定解条件 该传热模型计算单元的三维稳态导热微分方程可表述为:

$$\alpha \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = 0 \tag{1}$$

该传热模型计算单元导热微分方程的边界条件为:

冷库地坪上表面的边界条件:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=L_2} = \alpha_n (t_n - t_{nb}) \tag{2}$$

传热模型下表面的边界条件:

$$t \Big|_{y=0} = t_s \tag{3}$$

由于冷库地坪内的通风管道按照一定间距对称铺设,对于图 1 所示的计算单元,沿 x 轴方向的两个边界可近似认为是绝热面:

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=L_1} = 0 \tag{4}$$

同样,沿 z 轴方向的两个边界也近似认为是绝热面:

$$\frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=1} = 0 \tag{5}$$

通风管道外壁的边界条件:

$$t = t_{w2} = t_f + \frac{V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_{out} - t_{in})}{K \cdot l} \left( 1 + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} \cdot K \cdot l \right) \tag{6}$$

$x, y \in c \cdot d, g \cdot h, z \in (0, 1)$

式中, $\lambda$  为各种材料的导热系数,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ;  $\alpha_n$  为冷库地面上表面的对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $t_n$  为冷库冻结物冷藏间的设计室温,  $^\circ C$ ;  $t_{nb}$  为冷库地坪上表面的温度,  $^\circ C$ ;  $t_s$  为 3.2 m 深处的土壤温度,  $^\circ C$ ;  $t_{w2}$  为通风管道外壁的温度,  $^\circ C$ ;  $t_f$  为通风管道内空气的平均温度,  $t_f = \frac{t_{in} + t_{out}}{2}$ ,  $^\circ C$ ;  $V$  为系统内的空气流量,  $m^3/s$ ;  $\rho$  为空气的密度,  $kg/m^3$ ;  $c_p$  为空气的定压比热,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $t_{out}$  为系统出口空气平均温度,  $^\circ C$ ;  $t_{in}$  为系统进口空气平均温度,  $^\circ C$ ;  $K$  为通风管内空气与管壁间单位管长的传热系数,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ;  $l$  为通风管道的总长度,  $m$ ;  $d_1$  为通风管道的内径,  $m$ ;  $d_2$  为通风管道的外径,  $m$ 。

### 3 模拟结果分析

3.1 通风系统未启动时的温度场分布 当通风系统未启动时,对冷库地坪的传热模型进行模拟计算,温度场分布如图 2 所示。由结果可知,冷库地坪各结构层在 Y 平面上温度分布比较均匀,通风加热层上表面平均温度为  $-12.92^\circ C$ ,下表面平均温度为  $-10.32^\circ C$ ,均远低于  $0^\circ C$ 。所以,若不开启通风系统,加热层以下的土壤层就会结冰,产生的体积膨胀力最终将引起地坪冻胀。

#### 3.2 通风管间距对冷库地坪温度场的影响

3.2.1 通风管间距改变时的数值结果。开启机械通风系统,当通风管间距分别为 1.5 和 2.0 m,而传热模型的其他模拟条件不变时,对冷库地坪的传热模型进行了模拟计算。这两种状况下的冷库地坪温度场分布如图 3、4 所示,加热层上、中、下表面在  $Z = 1.0 m$  处各点温度的分布如图 5、6 所示。

3.2.2 通风管间距改变时的计算结果分析。由图形可以看出计算结果,通风管间距为 1.5 m 时,传热模型通风加热层

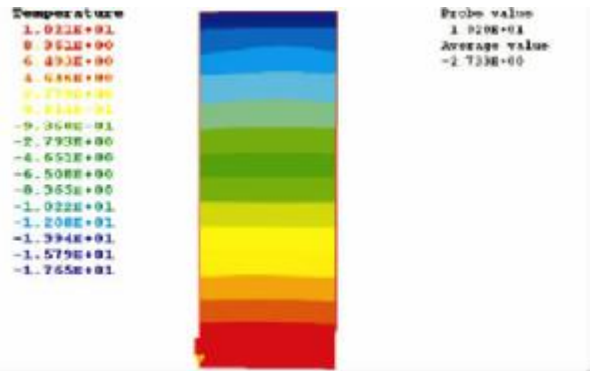


图 2 通风系统未启动时的冷库地坪温度场

Fig. 2 The temperature field of cold storage floor without circulating the ventilation system

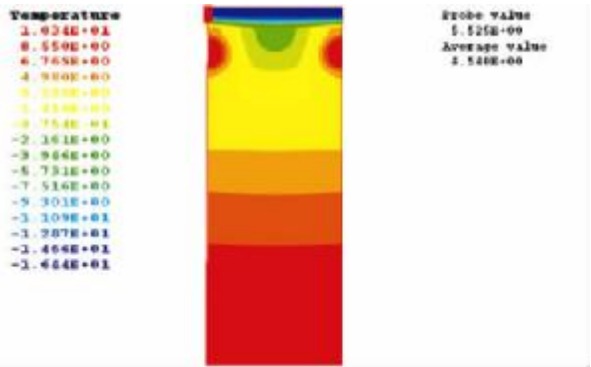


图 3 管间距为 1.5 m 时的冷库地坪温度场

Fig. 3 The temperature field with 1.5 m tube spacing

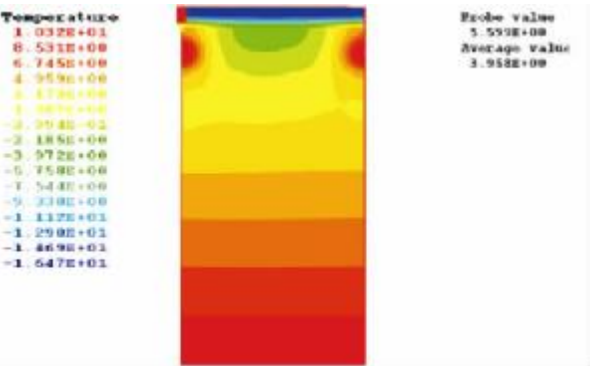


图 4 管间距为 2.0 m 时的冷库地坪温度场

Fig. 4 The temperature field with 2.0 m tube spacing

上表面平均温度为  $1.290^\circ C$ ,下表面平均温度为  $2.322^\circ C$ ;在  $Z = 1 m$  处,加热层上表面各点温度范围是  $-2.186 \sim 5.537^\circ C$ ,温度波动振幅为  $7.723^\circ C$ ,下表面各点温度范围是  $0.387 \sim 4.811^\circ C$ ,温度波动振幅为  $4.424^\circ C$ ;  $Z = 1$  平面的平均温度为  $4.54^\circ C$ 。

通风管间距为 2.0 m 时,传热模型加热层上表面平均温度为  $0.642^\circ C$ ,下表面平均温度为  $1.73^\circ C$ ;在  $Z = 1 m$  处,加热层上表面各点温度范围是  $-2.346 \sim 5.936^\circ C$ ,温度波动振幅为  $8.282^\circ C$ ,下表面各点温度范围是  $0.104 \sim 4.899^\circ C$ ,温度波动振幅为  $4.795^\circ C$ ;  $Z = 1$  平面的平均温度为  $3.958^\circ C$ 。结果表明,通风管间距较小时,通风加热层上、下表面各点温度波动的振幅均较小,上、下表面的平均温度较高;管间距较小时换热量较大,能大幅度减少冷库地面向土壤层传递冷

(下转第 10773 页)

水源。各地采取的一些应急措施,对加快抗旱进度、消除部分抗旱死角起到了重要作用,但这并非长久之计。安徽省地处南北气候过渡地带,旱、涝等自然灾害频繁,从长远看,必须进一步加大灾情监测预警能力建设的力度;提高防洪排涝抗旱设施如农村道路、供电、灌溉、排涝等的抗灾保障能力。只有通过全面综合治理,建立起抗灾、减灾的长效机制,才能从容应对各种可能发生的农业灾害。

#### 4 增强农业抗灾能力的建议

**4.1 进一步加大高标准农田建设的投入力度** 安徽省耕地 406.67 万  $\text{hm}^2$ , 目前仍有 200.00 万  $\text{hm}^2$  中低产田亟待改造。只有加大田间水利工程建设与整治的力度,彻底解决抗旱排涝问题,才能实现更大面积的旱涝保收、高产稳产。建议进一步加大对农田基础设施建设的投入,充分发挥农业大省在保障国家粮食安全中的作用。

**4.2 整合涉农项目资源,科学规划、综合治理** 据统计,目前涉及农田水利投入的部门达 10 多个,部门多,项目多,资金使用混乱,多数部门资金使用效益低下。建议由安徽省政府牵头,以农业综合开发为平台整合项目资金,按照“统筹安排,连片推进,综合治理”的原则,做好总体规划,实现综合治理,发挥整体效益。

**4.3 切实加强农业项目工程的建后管护工作** 项目工程和设备的管护好坏,直接影响其效益的发挥。随着农业项目投

入的逐年增加,工程建后管护问题将日益突出,必须建立健全符合实际的工程建后管护机制。建议各地采取切实可行的管护办法,落实管护经费,严厉打击损毁、盗卖水利设施、设备的犯罪行为。同时,大力推广农民用水协会,发动农民自用、自管、自更新,实现小型农水工程的良性循环。

**4.4 充分发挥现代农业的防灾、减灾作用** 在加强抗旱排涝设施和监测预警能力建设的基础上,通过现代农业建设,大力推广作物抗灾、减灾、避灾生产技术,发展节水灌溉,加大对农民的现代农业技术培训,提高农民的科技文化素质,充分发挥农业科技的增产与减灾作用。

**4.5 提高农业效益,调动农民主动抗灾的积极性** 随着国家、省各项强农、惠农政策力度的加大,农民种粮的积极性有了一定的提高。建议适度调整农产品价格政策,进一步加大对粮食生产的补贴及科技投入的力度,强力推进农业产业化进程,加快现代农业发展步伐,提高粮食比较效益,从而调动农民主动抗灾的积极性,实现国家增粮、农业增效、农民增收。

#### 参考文献

- [1] 汪孝宗. 安徽打响抗旱攻坚战[J]. 中国经济周刊, 2009(6): 25-27.
- [2] 夏树, 曹茸. 众志成城战旱魔——安徽干部群众抗旱工作纪实[N]. 农民日报, 2009-02-10.
- [3] 项仕安, 陈军. 辉煌 20 年安徽农业综合开发土地治理纪实[M]. 合肥: 安徽人民出版社, 2008.

(上接第 10766 页)

量,较高的加热层下表面温度更能有效地防止土壤层内水分

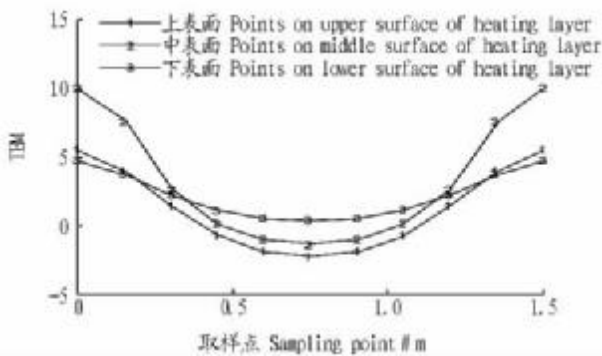


图5 管距为 1.5 m 时加热层上、中、下表面各点温度分布

Fig.5 The point temperature of upper, middle and lower surface for heating layer with 1.5 m tube spacing

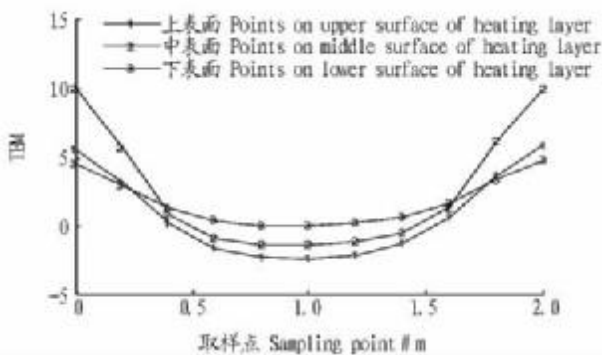


图6 管距为 2.0 m 时加热层上、中、下表面各点温度分布

Fig.6 The point temperature of upper, middle and lower surface for heating layer with 2.0 m tube spacing

结冰,进而避免地坪冻融现象的发生。

#### 4 结论

(1) 如果冷库地坪不采取任何防冻措施,地坪下表面平均温度远低于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 长期以来下面的土壤层就会结冰,产生的体积膨胀力最终将引起地坪冻融。

(2) 根据文献[4]对冷库地坪采取机械通风防冻措施,在该课题的模拟条件下,通风加热层下表面的温度均能保证在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上,防冻效果良好。

(3) 通风管间距对冷库地坪通风防冻系统中加热层上、下表面的平均温度及温度分布有较大影响。在其他条件相同时,采用较小的管间距,加热层内各点温度波动较小,冷库地坪的防冻效果较好,但这会增加管材的成本投资,同时加热层温度较高,必然会加大冷库的冷负荷,造成能源浪费。所以,进行冷库地坪设计时要选择适当的管间距,真正做到既防冻又节能。

#### 参考文献

- [1] 高祖银. 冷库地坪防冻融机械通风的传热计算[J]. 暖通空调, 1996(4): 68-71.
- [2] 李建华, 王春. 冷库设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 1-42.
- [3] 周然, 陈锦远, 王随林, 等. 冷库通风地面构造层温度场的数值模拟[J]. 冷藏技术, 2007(4): 37-40.
- [4] 原国家国内贸易局. GB50072-2001《冷库设计规范》[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.
- [5] 尉迟斌. 实用制冷与空调工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 297-314.