

装配式冷库地坪热流测试及其温度场计算

邓东泉

谢晶 徐世琼

(中国船舶及海洋工程研究设计院, 上海 200011)

(上海水产大学食品学院, 200090)

摘要 本文根据实测,对装配式冷库地坪在给定温度下产生的热流密度进行了分析,然后对地坪传热状况进行了简化,建立了传热数学模型,并导出了分析解,最后对地坪温度场进行了数值求解。

关键词 装配式冷库,热流密度,温度场

中图分类号 TB657

Testing of heat flow and calculation of the temperature field in assembly cold store

Deng Dongquan

Xie Jing, Xu Shiqiong

(*Marine Design & Research Institute of China, Shanghai 200011*)

(*College of Food Science, SFU, 200090*)

ABSTRACT According to the practical test, the density of heat flow of the floor in an assembly cold store at a given temperature was analyzed. In order to build a mathematical model of heat transfer, the heat transfer conditions in the floor were simplified, and the analytical result was deduced. At last the temperature field of the floor was calculated in numerical method.

KEYWORDS assembly cold store, heat flow, temperature field

与热有关的物理量中,温度是人们最熟悉的,每个人对它都有某种程度的感觉。温度测量所用的方法和仪表在热工测量中也是最重要的,已经研究出许多的方法和仪表,能够适应各种需要,并能达到很高的精度。与温度测量相比,热流测量则大为落后,而且对其意义和重要性的认识也较晚^[1]。一是由于对基本概念理解不够,二是由于热流测量的方法与手段没有普及,所以人们对它比较生疏。

热流密度矢量的方向是热流密度最大的方向,其大小等于沿着这个方向单位面积流过的热量。在连续温度场内每一点上都可以建立热流密度矢量,这些矢量的全体构成热量场。在传导传热的情况下,如果测试对象的热导率已知,就能够从对象内部的温度分布求出热流密度的分布。然而这是个间接的方法,对象内部的温度分布是不容易得到的。热流密度与温度梯度(温度对位置的一次微分)成比例,因此即使温度的变化很小,热流密度也有可能产生很大的变化,热流密度与温度高低无直接关系^[2,3]。

1 测试过程

1.1 测试目的

通过对热流(密度)的测定,了解地坪热流(密度)的规律性分布。

第一作者简介:邓东泉,男,1966年12月生,硕士学位,工程师

收稿日期:1998-07-07

1.2 测试仪器、设备

数字式温度巡回检测仪、调压器、功率表、热流计、热电偶、电加热器等。

1.3 测试方法

由于人无法进入地坪下表,考虑到地坪下面有一较低架空层,所以用电钻在库外地坪钻孔,设法将热电偶放入架空层的地坪下表面,测量下表面温度;库内地坪表面放置8根热电偶,热流计靠近热电偶贴在地坪表面,图1为地坪表面热流计和热电偶布置示意图;库内8个角附近分别放置热电偶,用以测量库内温度;库外放置一热电偶用来测量库外温度;电加热器均匀布置在库内空间,均匀加热库内空气。

热流计和热电偶的所有接线接入温度巡回检测仪的外部端子箱,设定每15min打印一次数据。通过电加热器加热,建立起16℃的库内外温差,根据文献介绍,加热9h后隔热结构的热惰性系数和热容量都可视为常数,因此稳定9h后即可在此温差下进行热流测试,此时所得数据即为有用数据^[4,5]。

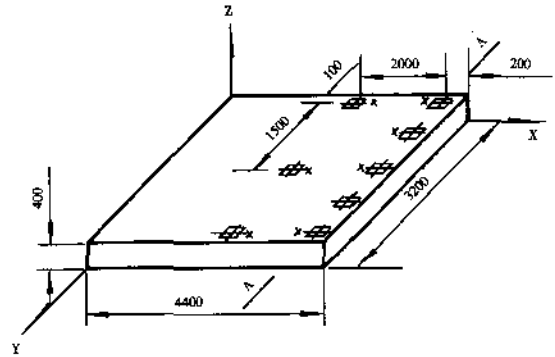


图1 地坪表面热电偶、热流计布置示意图
Fig.1 Arrangement of thermocouple and heat flow meter on the surface of floor

2 测试数据整理分析

2.1 计算传热系数

在温差稳定9h后,所得数据可用来计算传热系数,其理论依据是傅立叶定律: $q = -\lambda \partial T / \partial x$ 。根据传热学基本方程 $Q = KF\Delta t$,当库内外建立起稳定温差,利用热流量直接测量到比热流 $q = Q/F$ 时,即可由公式 $K = q/\Delta t$ 求得地坪传热系数,其中 q 为热流计直接测量到的地坪比热流值,计算 K 值时, q 取平均值, Δt 为平均温差(地坪上下表面温差的平均值)。地坪传热系数计算值可见表1所示。

从表1可见,该冷库地坪的平均传热系数 $K = 0.2017W/m^2\text{℃}$,热阻为 $R = 1/K = 4.958m^2\text{℃/W}$,地坪热导率为 $\lambda = K\delta$ (δ 为地坪厚度),已知 $\delta = 0.4m$,则 $\lambda = 0.8068W/m^2\text{℃}$ 。

表1 地坪传热系数计算值
Tab.1 Calculating value of heat transfer coefficient of the floor

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	平均值
0.192	0.204	0.206	0.201	0.207	0.208	0.203	0.199	0.2017

2.2 计算通过地坪的漏热量

已知地坪平均面积: $A = 4.4 \times 3.2 = 14.08m^2$,

稳态时测得的电加热器功率为: $W = 1150w$,

地坪漏热量为: $Q = KF\Delta t = 0.2017 \times 14.08 \times 16 = 45.8w$,

Q 占总热量的比例: $45.8/1150 = 0.0398$,

可见,通过地坪的传热量较小。

2.3 稳态传热下 A-A 截面上热流密度的分布

为了分析问题方便,将该地坪传热认为是一维空间传热。根据所测得的热流密度值 q ,在垂直于 x 轴的 A-A 截面上作 $q-y$ 图,得到一条近似的抛物线,见图2所示。设拟合曲线为: $q = f(y) = c + by + ay^2$,根据多项式拟合,可以求得拟合曲线为:

$$q = f(y) = 4.231 - 1.648y + 0.48y^2$$

这是一条二次抛物线,开口向上。这条曲线反映了 A - A 截面上,在温差为 16℃ 时稳态传热下的热流密度分布规律。由于地坪的对称性,可以想象整个地坪的热流密度分布应该呈现抛物面形状。因试验中测试点较少,不能对该曲面进行函数拟合。

根据测试结果和以上的分析,可见热流密度大小在各测点处各不相同,地坪中心的热流值要比四周的热流值小,这反映了隔热层(地坪)中存在蓄热作用和热惰性。

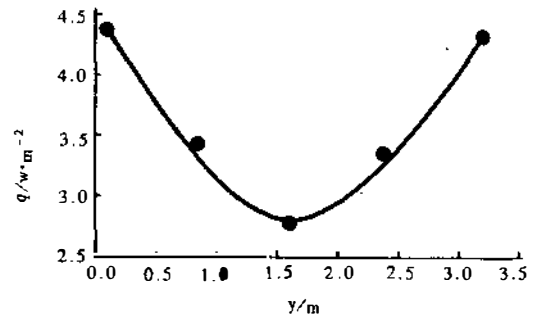


图2 A - A 截面热流密度分布曲线

Fig.1 Heat flow on the A - A cross section

3 理论分析和求解温度场

3.1 数学模型的建立

根据傅立叶定律,热流向量 \vec{q} 与温度梯度 ∇T 间的关系可表示为向量形式,见文献[6]。

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \tag{1}$$

根据(1)式,由能量守恒定理可得到热传导能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \tag{2}$$

式中, q 为单位体积内热源的生成热, ρ 为密度, c 为比热容, τ 为时间。

对于所测试的地坪,热导率是常数,且无内热源,是各向同性材料。由于地坪的对称性,且为了分析问题的方便,我们只研究 y 和 z 方向的二维稳态热传导,并作如下合理假设:(1)地坪上表面温度为常数 T_2 ;(2)其它三个表面温度为 T_1 ,见图3所示。

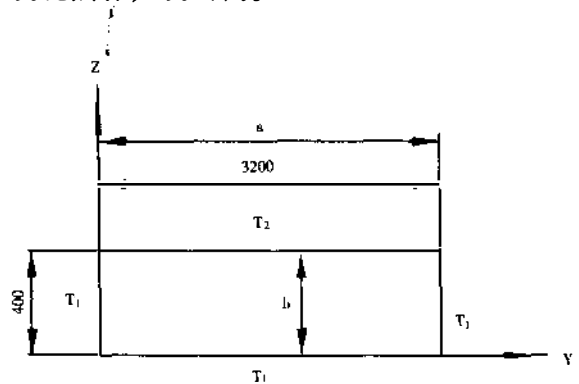


图3 地坪表面温度分布

Fig.3 Temperature distribution of the surface of the floor

根据以上假设,由式(2)可得以下方程,见文献[7]。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial y}(\frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\frac{\partial T}{\partial z}) = 0 \\ Y = 0, T = T_1 \\ Z = 0, T = T_2 \\ Y = a, T = T_1 \\ Z = b, T = T_1 \end{cases} \tag{3}$$

3.2 求解上述数学模型

首先,定义无量纲温度 $\theta = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}$,于是(3)式转化为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial y}(\frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\frac{\partial T}{\partial z}) = 0 \\ Y = 0, \theta = 0 \\ Z = 0, \theta = 1 \\ Y = a, \theta = 0 \\ Z = b, \theta = 0 \end{cases} \tag{4}$$

利用分离变量法可以求得图3所确定区域的解析解,最终得到此二维稳态温度分布场的解为

$$\theta(Y, Z) = \frac{2}{\pi} \sum_{N=1}^{\infty} (-1)^{N+1} / N \sin\left(\frac{N\pi Y}{\alpha}\right) \text{Sh}\left(\frac{N\pi Z}{\alpha}\right) / \text{sh}\left(\frac{N\pi b}{\alpha}\right) \quad (5)$$

$$0 < Y \leq 3.2\text{m}$$

$$0 \leq Z \leq 0.4\text{m}$$

由 $T = T_1 + \theta(T_2 - T_1)$ 可得到实际的温度分布。式(5)即为地坪在 y 和 z 方向的二维稳态温度分布。

3.3 数值迭代,求解温度场

为了进一步验证,不妨在 $y-z$ 方向进行数值求解。二维稳态热传导问题,要求确定有限差分网格中节点温度。每一节点的温度必须满足适当的节点方程。把(4)式的方程离散化,得到内部节点方程:

$$\theta_{i,j} = (\theta_{i,j-1} + \theta_{i-1,j} + \theta_{i,j+1} + \theta_{i+1,j})/4 \quad (6)$$

由于全部表面温度已知,因此只需使用内部节点方程即可确定温度分布。图4为平行于 $y-z$ 面的任一截面,大小为 $3.2\text{m} \times 0.4\text{m}$,为了求解方程(6),将该区域划分为 32×4 的网格。对(6)式编制计算机程序并输入,可求出无量纲温度矩阵,据此画出无量纲温度分布曲线,见图5。

4 结果与讨论

(1) 本文通过对地坪热流密度的测试,发现在稳态下(近似)地坪四周的热流密度较中心的要大。

(2) 本文通过建立地坪传热的数学模型,求出了地坪二维稳态温度分布的数学解和数值解。

(3) 实验中,由于布点数量较少,使测试的代表性受到一定的限制。

(4) 本文的数学分析解与数值解基本吻合。

(5) 实际上由于热流密度是矢量,要准确反映其情况,必须在三维空间中进行描述。目前,热流测试尚处于探索阶段,要充分认识和推广热流的特性及应用,有待今后继续努力。

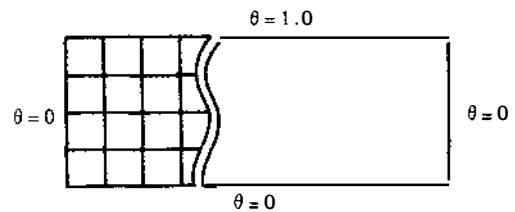


图4 $y-z$ 平行截面划分网格示意图
Fig.4 Diagrammatic sketch of the calculating net on the $y-z$ cross section

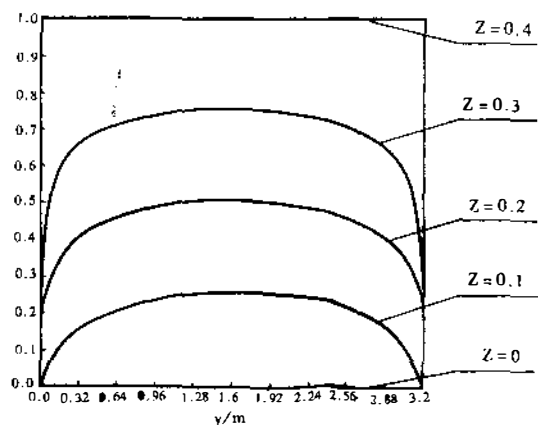


图5 计算机拟合的 $y-z$ 平行截面温度分布
Fig.5 Calculating temperature field simulated by computer

参 考 文 献

- 1 达式奎. 食品工程测试. 上海: 上海交通大学出版社, 1987. 359 ~ 372
- 2 刘小明. 冷库围护结构的热工性能测试. 冷藏技术, 1986, (2): 26 ~ 28
- 3 谢 晶. 积分法用于非稳态测定冷库围护结构传热系数的研究. 渔业现代化, 1998, 25(3): 24 ~ 27
- 4 李绍荣. 冷板集装箱传热系数的非稳态测定. 制冷学报, 1992, (4): 16 ~ 20
- 5 Romine T B. Design and Laboratory testing of a portable thermoelectric container for measuring heat - flow through walls. ASHRAE Transaction, 1998, (1): 498 ~ 516
- 6 钱壬章. 传热分析与计算. 北京: 高等教育出版社, 1987. 50 ~ 57, 110 ~ 121
- 7 Basch J F. A comparison of building thermal performance models using measured data. ASHRAE Transaction, 1986, 92(2): 537 ~ 546