

④

25-30

# 冷库稻壳热绝缘层热湿状态研究

陈启高 冯 雅

(建筑系)

TU 267.2

**摘 要** 本文对冷库稻壳热绝缘层的热湿特性进行了分析。提出用空气层解决冷库工程中热绝缘材料受潮的方法，通过工程实践和热工测试分析，证实了在冷库阁楼稻壳层表面形成自防潮壁垒理论；0℃附近的干燥带的存在。使得对冷库热绝缘层的热湿迁移现象的物理本质有了新的认识，对冷库热绝缘层保持干燥的设计方法起重要的指导作用。

**关键词** 空气层防潮法，自防潮壁垒，三相点干燥带，冷库设计优化

稻壳  
绝缘层  
热湿

在冷库的设计中，国内外工程设计〔1〕普遍采用的是蒸汽渗透理论。采用在高温侧设防潮隔汽层，做到围护结构中按层次分布使蒸汽难进易出的原则来保证围护结构的不受潮，但这一理论忽视了材料中质迁移及相变的客观规律。因此，经过一定的使用一段时间后，热绝缘材料逐渐受潮而失去其热绝缘性。为解决这一问题，许多学者都致力于对非饱和含湿多孔材料的热湿迁移基本现象的研究，I.S.Cammerer〔2〕（1962）就围护结构材料热湿特性作了大量的研究工作。A.B.雷科夫〔3〕（1965）等人对多孔介质的热湿特性作了深入系统的研究，得到了丰富的资料。七十年代后许多国家对围护结构的受潮，结露问题极为关注，如日本的小原俊平等〔4〕（1982）在这方面提出了许多工程中有效的方法。清华大学和北京建筑设计院〔5〕也对此问题开展了一系列的研究工作。与此同时，重庆建工学院〔6〕〔7〕对围护结构的热湿特性进行了十多年的研究工作，根据多孔材料中存在温度梯度时，围护结构中蒸汽水和液态水的反向迁移而造成水份自我平衡的干燥机理，采用在围护结构热绝缘材料层的低温侧设空气间层这一方法来解决热绝缘材料的受潮问题。并在具体的工程实践中，对冷库稻壳热绝缘材料层低温侧设防潮空气层以及阁楼稻壳层表面形成的防潮壁垒层，在0℃相变点附近特别干燥带得到了一个基本满意的解释。

## 1 冷库围护结构中热湿迁移现象的描述

### 1.1 围护结构材料中热湿迁移规律

在含湿多孔材料中热湿迁移基本方程为：

本文1992年10月12日收到。

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_q \nabla^2 t + \varepsilon_1 r \frac{C_m}{C_q} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{C_p}{C_q} \frac{K}{\gamma_0} \nabla P \cdot \nabla t$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 \theta + a_m \delta' \nabla^2 t + a_m \delta'' \nabla^2 P$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = a_p \nabla^2 P + \varepsilon_1 \frac{C_m}{C_p} \frac{\partial \theta}{\partial \tau}$$

式中,  $t$ ,  $\theta$ ,  $P$  分别表示温度、湿度、压力;  $a_q$ ,  $a_m$ ,  $a_p$  分别为导温系数、导湿势系数、导湿空气渗透压系数;  $\delta'$ ,  $\delta''$  为热湿梯度、质迁移系数比值;  $\varepsilon_1$  相变化数;  $r$  凝结潜热;  $C_m$ ,  $C_p$ ,  $C_q$  分别为比湿容、比热容、毛细多孔体容积有关的系数;  $K$  空气的渗透系数。

通常对长期使用的冷库围护结构可视为处于热湿平衡状态, 即稳态的热湿平衡完全能准确描述实际工程中的热湿状况, 此时, 总的压力  $P$  为常数, 有

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial \tau} = 0 \quad \text{和} \quad \nabla P = 0$$

相应方程简化为:

$$\nabla^2 t = 0, \quad \nabla^2 \theta = 0 \quad \text{和} \quad \nabla^2 P = 0$$

而冷库围护结构可视为一维热湿传递, 可求得对应的比热流、空气渗透比质流以及水份迁移比湿流为:

$$J_q = -\lambda_q \frac{dt}{dx}, \quad J_p = -\lambda_p \frac{dP}{dx} \quad \text{和} \quad J_m = \lambda_m \frac{d\theta}{dx}$$

式中  $\lambda_q$ ,  $\lambda_p$ ,  $\lambda_m$  分别为其导热系数、空气渗透系数和水份迁移系数。液态水份的迁移是从材料层的低温层向高温侧迁移, 而水蒸汽的扩散  $J_p$  和空气对流引起的水蒸汽在温度梯度作用下的  $J_q$ ; 与液态水的迁移  $J_m$  反向的。在稳态条件下, 总的湿流量

$$J = 0, \quad \text{即} \quad J = J_q' + J_p - J_m = 0$$

因此, 在多孔或松散的热绝缘材料层中, 存在一种与水蒸汽渗透相反的水份迁移, 使高温方面的水蒸汽  $J_q'$ ,  $J_p$  和低温方面的液态水  $J_m$  都有减少的趋势, 使热绝缘层处于干燥。说明在材料层中, 不会由于水蒸汽的渗透而造成无限制的潮湿, 而是维持在一定的湿平衡状态, 这也是旧的水蒸汽渗透理论无法解释的现象。

从以上基本原理出发, 考虑到冷库围护结构中多孔热绝缘材料层的热工状况, 在其材料热绝缘层的低温侧设一引湿空气间层, 将进入热绝缘材料层中的水蒸汽引到空气层中凝结, 以保证材料层的干燥, 同时又切断了与热绝缘层液态水的通道, 来解决材料的受潮问题。

空气层的防潮性能是由于热面空气流向冷面, 受冷面降温相对湿度升高, 当温度降致露点后在其冷面凝结成水, 同样冷面下降的气流由于热面空气上升流向热面, 使温度上升、湿度降低, 故与热面接触的空气处于相对湿度比较低的干燥状态, 而达到防潮的目的。

如图 1 所示, 设空气层热表面温度为  $t_1$ , 绝对湿度为  $e_1$ ; 冷表面温度为  $t_2$ , 绝对湿度为  $e_2$ , 其各自相对湿度为:

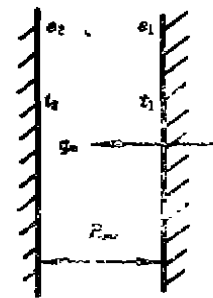


图 1 空气层相对湿度分析

$$\varphi = \frac{e_1}{E_1} \quad \text{和} \quad \varphi_2 = \frac{e_2}{E_2}$$

通过空气层的湿流  $q_m$  为  $q_m = a_m \left( \frac{e_1}{p} - \frac{e_2}{p} \right)$ ，式中  $p$  为湿空气总压力， $a_m$  为湿交换系数。

由上式可得：

$$e_1 = e_2 + \frac{q_m P}{a_m}$$

所以： 
$$\frac{e_1}{E_1} = \frac{e_2}{E_1} + \frac{q_m P}{a_m E_1} = \frac{e_2}{E_2} \cdot \frac{E_2}{E_1} + \frac{q_m P}{a_m E_1}$$

或： 
$$\varphi_1 = \varphi_2 \frac{E_2}{E_1} + \frac{q_m P}{a_m E_1} \times 100\%$$

故上式近似表示为： $\varphi_1 = \varphi_2 E_2 / E_1$ ， $E_1, E_2$  分别为空气层热壁和冷壁表面空气的绝对饱和湿度。设在空气层两温度范围以内，相差 1 度时饱和湿度之比为  $E_1 / (E_1 + 1) = E_r$ ，那么当  $t_1$  变到  $t_2$  时，设它近似等于  $E_r$ ，则

$$E_r^{t_1 - t_2} = \frac{E_2}{E_1}$$

又因通过空气层的热流  $q_{air} = (t_1 - t_2) / R_{air}$ ， $R_{air}$  空气层的热阻。则

$$\varphi_1 = \varphi_2 E_r^{t_1 - t_2} = \varphi_2 E_r^{R_{air} q_{air}}$$

考虑通过空气层的热流  $q_{air}$  与通过整个围护结构的热流相等，即： $q_{air} = q = (t_1 - t_0) / R_0$ ， $t_1, t_0$  室内外气温， $R_0$  围护结构总热阻。故

$$\varphi_1 = \varphi_2 E_r^{\frac{R_{air}}{R_0} (t_1 - t_0)}$$

而  $E_r$  始终是小于 1 的。在正温区  $E_r = 0.93$ ，负温区  $r = 0.9$ 。故，空气层两表面温差越大，或室内外温差越大，温度较高的那个表面材料的湿度就越低，所受的干燥作用越强。

### 1.2 阁楼稻壳层的防潮壁垒层

在冷库阁楼空间中，空气温度和相对湿度  $t_a, \varphi_a$  基本上与室外空气温、湿度相等，相应

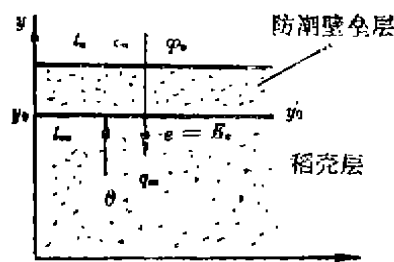


图 2 防潮壁垒示意图

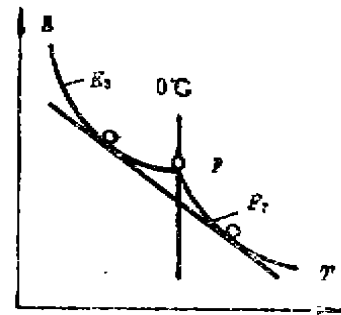


图 3 冰和液态水表面水蒸饱饱和和压力曲线

的水蒸汽分压为  $e_a$ 。根据  $e_a$  可求出  $e_a$  成为其饱和状态  $E_a$  的露点温度  $t_{ea}$ 。同样在稻壳热绝缘层中存在某一温度面  $y_0, y'_0$ ，其温度值等于  $t_{ea}$ ，此时的材料处于饱和吸附湿度状态，即  $\theta = 100\% M$ ，达到湿平衡。如图 2 所示。因此，在稻壳热绝缘层表面与  $y_0$  面之间产生了一个

特殊的材料层，在这个层中水蒸汽分压  $e$  等于  $e_s$ ，而湿度  $\theta$  使水份向表面层迁移。通过这个特殊材料层的湿流为：

$$q_m = -k \frac{\partial e}{\partial y} = 0$$

表明，这个层形成一个自防潮壁垒，以阻止阁楼空间中水蒸汽向材料层中迁移。也解释了屋顶阁楼中热绝缘材料层潮湿到一定程度后，而不再继续发展下去，维持在某一湿平衡状态。

### 1.3 0℃附近特别干燥带

在多孔材料中，液态水表面和固态水表面的水蒸汽饱和压力分别为  $E_2, E_s$ 。其随温度分布曲线如图3所示。在0℃度点，当隔热材料处于稳定的平衡状态时，材料中不会产生汇和源。在P点可看出二种相态下饱和水蒸汽压力交点。然而在此点，实际材料中水蒸汽饱和分压曲线不可能出现一阶导数不连续现象，实际水蒸汽分压曲线必然沿两条曲线切线分布，也就降低了在0℃的湿度，形成0℃附近的干燥带现象。

## 2 工程实测和结果分析<sup>[8]</sup>

为了寻求解决围护结构受潮的方法，从以上热湿迁移基本原理出发，根据冷库热绝缘材料的热工特性。一九八七年与四川省商业建筑设计所合作，设计一座在冷库稻壳热绝缘层的冷侧设空气层的冷库围护结构，通过工程进行对比实验研究。图4是冷库阁楼构造示意图。

图5是阁楼稻壳层中温度分布曲线。从有空气层阁楼稻壳层中测量的温度曲线可知，整

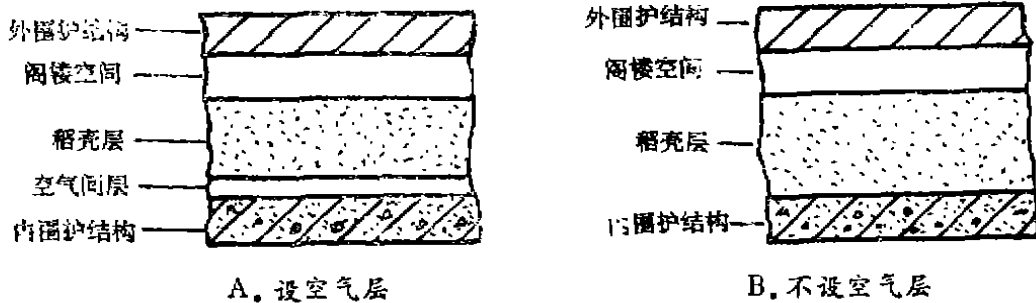


图4 冷库阁楼构造示意图

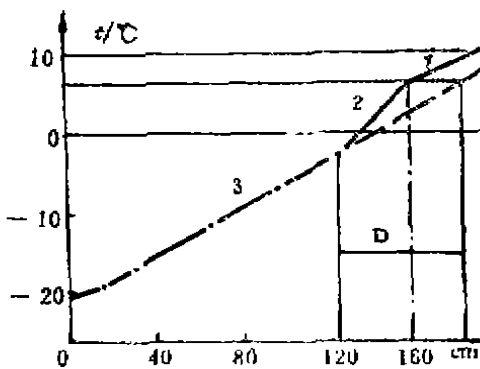


图5 阁楼稻壳层中温度分布曲线

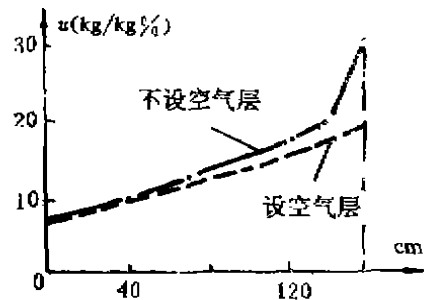


图6 阁楼稻壳层中湿度分布曲线

个层分为表面层1,干燥层2,和热绝缘底层3等三层。

表面层中以其绝对湿度等于其上的空气绝对湿度为特点,形成所谓的自发防潮壁垒层。由于此层的绝对湿度与外表面阁楼空间空气相等,阻止了阁楼中空气的湿份向材料中迁移,起到对材料内部的防潮作用。

干燥层是 $0^{\circ}\text{C}$ (冰点)附近的层。由于水份相变的特点,在 $0^{\circ}\text{C}$ 附近的水蒸汽形成冰晶,使此部分材料显得特别干燥,保温特性特别好。从曲线在此处斜率大可表现出来。如果将下层的温度直线延长,可以算出此层相当于热绝缘底层的当量厚度 $D$ ,如图5所示。

对于热绝缘材料底层,因受空气层直接引湿作用,显得比较干燥,曲线3比曲线1斜率大,这就说明了是由于空气层对底层的干燥作用所致。

对阁楼稻壳层湿分布的测定,测试采用直接标重法测量稻壳潮湿程度。在没设空气层阁楼中发现底层稻壳已有冰粒产生,稻壳层明显受潮。而设空气层部分,稻壳没有发现冰粒和受潮现象,其湿度分布曲线如图6所示。

## 4 结论

1. 经典的蒸汽渗透理论来指导冷库围护结构的防潮是不全面的,应从围护结构材料热,湿迁移基本原理出发来指导工程实践。

2. 根据热、湿迁移理论分析,提出冷库松散多孔材料围护结构的最佳构造方案,是在绝热材料层低温面设一个引湿空气层,将进入热绝缘层中的水蒸汽引到空气层中凝结,以保证此层的干燥。同时又切断了在内保护层上凝结水与热绝缘材料层的联系,对围护结构的防潮起到重大意义作用。

3. 实测发现处于 $0^{\circ}\text{C}$ 层附近有特别干燥带存在;稻壳表面层形成防潮壁垒层。

## 参 考 文 献

- 1 “建筑物理”统编教材。中国建筑工业出版社出版,1981
- 2 I.S.Cmmerer, Der Wärme-Und Kälteschutz in der industrie, 1962
- 3 A.B.雷科夫,任兴季译。建筑热物理基础。科学出版社,1965
- 4 小原俊平。“省エネルギー——基準による局建筑の断热と结露对策”昭和57年,井上书院
- 5 朱文鹏。轻质复合外墙热工特性研究。北京市建筑设计院,1987
- 6 陈启高。建筑热物理基础。西安交通大学出版社,1991
- 7 陈启高。传热,传湿和空气渗透下房屋围护结构的热工特性。重庆建工学院科技资料,1990
- 8 冯雅。“优化空气层耦合的热绝缘层热功能研究”,重庆建筑工程学院硕士研究生论文,1989

(编辑:徐维森)

A STUDY ON HEAT AND MOISTURE  
STATE OF HULL LAYER FOR THERMAL  
INSTULATION OF A COLD STORAGE

*Chen Qigao Feng Ya*

(Dept. of Architecture)

**ABSTRACT** This paper analyses the thermal-moist characteristics of the hull layer beside an air layer at lower temperature in an envelope for a cold storage and presents a new method of waterproof by air layer. With test data from engineering practice, the theory on the barrier of self moisture proof at the surface sublayer of the hull layer in an attic on a cold storage is proven. The dried zone about three phase point is confirmed. It is a new knowledge for thermophysics on thermal design of a cold storage with an optimum thermal performance.

**KEY WORDS** moisture proof by air layer, moisture proof by natural barrier, dried zone about three phase point, optimum thermal design on a cold storage