

蓄冰球内金属蕊芯传热特性的理论研究

①
97.19(5)
1-5

张力君 田胜元
(重庆建筑大学城市建设学院 400045)

1141
~~TB612~~
TB612, TB657
~~ET612~~

摘要 带金属蕊芯的冰球,由于具有内外双向结冰及融冰的特点,而且金属蕊芯兼有配重的作用,因而这种冰球在冰蓄冷空调系统中具有广阔的前景。本文研究了金属蕊芯的传热机理,在此基础上探讨了用不同金属材料做蕊芯时所产生的传热效果。最后对金属蕊芯开口端形状的设计提出了理论依据。

关键词 蓄冰球, 金属蕊芯, 配重, ~~传热特性~~ ~~传热机理~~, 制冷设备
中图分类号 TB612

~~蓄冰球~~, ~~冰蓄冷空调~~

冰蓄冷空调系统由蓄冰设备与空调系统组成。蓄冰设备可分为冰盘管、冰球、冰片滑落和冰晶等几种形式,其中冰球式蓄冰设备是至今应用最多的蓄冰方式之一。这一设备中最关键的部件即为冰球,蓄冰系统性能的优劣主要也取决于冰球的性能。常见的蓄冰球可分为普通冰球和金属蕊芯冰球两种。

普通冰球大多为中空圆球形,外壳由PE塑料吹制而成,内部充填水。其优点是结构简单,运行可靠,流动阻力小,技术要求低等。但它的致命弱点是当凝固接近球心时,其过程相当缓慢。其次,众多的这种圆球形冰球装于蓄冰罐中,当乙烯乙二醇载冷剂从其间流过时对其冲击以及自身的浮动,易导致冰球外载冷剂流量不均,形成热传导不稳定,致使各个冰球的结冰与融冰速度不相同,造成热传导不平均,结果是某些冰球不能结冰或融冰,影响蓄冰罐的蓄冰容量及冻结品质。

针对以上缺点,一种于壳体内部设置金属蕊芯的蕊芯冰球应运而生。金属蕊芯的作用主要是在冻结时作为结冰的结晶核心,使其具有由内外双向结冰与融冰的效果,从而增强了热交换,加快了冻结与融化的速度;此外,这种金属蕊芯还起到了配重作用,即使在开放式槽体内放置时冻结后也不会浮起。

然而这种金属蕊芯冰球应用于实际工程时尚存在一系列技术上的问题亟待解决,诸如,金属蕊芯的管长和管径与蕊芯冰球的结构尺寸存在怎样的关系,用何种金属材料制做会使价格最省而传热效果最佳,金属蕊芯开口端的形状有何限制等等。第一个问题已在另文介绍,本文重点针对后两个问题进行探讨,以期对这种蓄冰设备的开发起到理论上的指导作用。

收稿日期:1997-08-05

张力君,男,1964年生,博士生

1 金属蕊芯传热特性的理论分析

图 1 为金属蕊芯褶皱囊式冰球的示意图。褶皱囊由高强度聚乙烯制成,褶皱有利于适应因冻结和融冰时内部冰水体积变化而产生的膨胀与收缩,同时也增大了与外部载冷剂进行热交换的面积。图 2 为金属蕊芯传热的示意图。

设金属蕊芯长度为 l , 直径为 R , 截面积为 A_c , (为使问题简单, 这里取等截面)。对图 2 中的微元体积, 应用能量守恒, 有

$$q_x = q_{x+dx} + q_{ground} \quad (1)$$

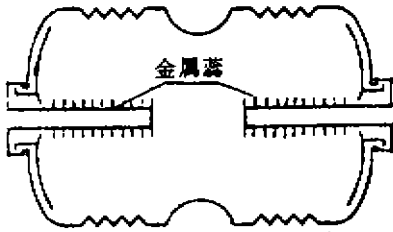


图 1 双蕊芯冰球

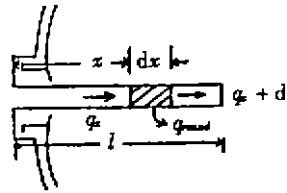


图 2 金属蕊芯传热示意图

式中 q_x 为导入热量, q_{x+dx} 为沿 x 方向导出的热量, q_{ground} 为导向冰层的热量。由傅立叶定律, 有:

$$q_x = -k A_c \frac{dt}{dx} \quad (2)$$

因为 $x+dx$ 处的热传导可表示为

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{dq_x}{dx} dx \quad (3)$$

由此得到

$$q_{x+dx} = -k A_c \frac{dt}{dx} - k \frac{d}{dx} \left(A_c \frac{dt}{dx} \right) dx \quad (4)$$

而导向冰层的热为

$$q_{ground} = -\frac{2\pi k_i (\zeta - t_f)}{\ln \frac{\zeta}{R}} \quad (5)$$

将式(2)(3)(4)(5)代入式(1), 有

$$-k A_c \frac{d^2 t}{dx^2} = -\frac{2\pi (\zeta - t_f)}{\ln \frac{\zeta}{R}} \quad (6)$$

相应的边界条件

$$x=0, \quad t=t_b \quad (7)$$

$$x=l, \quad t=0 \quad (8)$$

以上各式中, k 为金属蕊芯的导热系数, k_i 为冰的导热系数, ζ 为结冰厚度, t 为蕊芯沿 x 方向的温度分布, t_f 为水的相变温度, t_b 为蕊芯开口端基准温度

结冰时释放的潜热为

$$q_{\text{冰}} = 2\pi\zeta\rho L \frac{d\zeta}{d\tau} \tag{9}$$

这部分热亦由微元体导入,于是有

$$-2\pi k_i \frac{(t_f - t)}{\ln \frac{\zeta}{R}} = 2\pi\zeta\rho L \frac{d\zeta}{d\tau} \tag{10}$$

初始条件

$$\tau = 0, \quad \zeta = R \tag{11}$$

$$\tau = \tau_f, \quad \zeta = \zeta_f \tag{12}$$

式中 ρ 为冰的密度, L 为单位质量的相变潜热, τ 为完成相变过程所需的时间。

对式(10)进行分离变量,然后积分,有

$$\int_0^{\tau_f} \frac{k_i}{\rho L} (t_f - t) d\tau = \int_R^{\zeta_f} \zeta \ln \zeta d\zeta - \int_R^{\zeta_f} \zeta \ln R d\zeta$$

即:
$$\frac{k_i}{\rho L} (t_f - t) \tau \Big|_0^{\tau_f} = \frac{1}{2} \zeta^2 \left(\ln \zeta - \frac{1}{2} \zeta^2 \ln \frac{\zeta_f}{R} \right) \Big|_R^{\zeta_f} \tag{13}$$

取 $R = 0.013 \text{ m}$, $L = 334.4 \text{ kJ/kg}$, $\rho = 920 \text{ kg/m}^3$, $k_i = 2.22 \text{ W/m} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau_f = 8 \text{ 小时} = 8 \times 3600 \text{ S}$ (实际工程夜间蓄冰时间一般为 8~10 小时)。采用数值计算方法,算出 $t = t_b = -5, -4.5, -4, \dots, 0$ 时对应的 ζ_f 值,列于附表。

附表 ζ_f 值

t ($^\circ\text{C}$)	ζ (m)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3 (m)
-5.0	0.048 9	0.000 0	0.000 0	0.000 0
-4.5	0.047 3	0.009 6	0.014 8	0.008 1
-4.0	0.045 5	0.020 1	0.030 8	0.016 9
-3.5	0.043 6	0.031 6	0.048 4	0.026 5
-3.0	0.041 5	0.044 3	0.067 9	0.037 3
-2.5	0.039 1	0.058 5	0.089 7	0.049 3
-2.0	0.036 1	0.074 5	0.114 2	0.062 8
-1.5	0.33 6	0.094 4	—	0.079 5
-1.0	0.029 7	0.117 6	—	0.099 1
-0.5	0.024 4	—	—	0.123 8
0.0	0.013 1	—	—	—

下一步计算与 t, ζ_f 对应的 x 值。

由方程(6)可得

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = \frac{2 k_i}{KR^2 \ln \frac{\zeta}{R}} (t - t_f) \tag{14}$$

定义 $\theta = t - t_f$, 故式(14)可进一步简化为

$$\frac{d \theta^2}{dx^2} = m^2 \theta \tag{15}$$

式中 $m = \sqrt{\frac{2 k_i}{KR^2 \ln \frac{\zeta}{R}}}$

方程(15)是一个线性、齐次、二阶常微分方程,而且具有常系数,它的通解为

$$\theta(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \tag{16}$$

将边界条件代入式(16),并根据文献

[1]最终得到 $\theta(x)$ 的表达式为

$$\frac{\theta(x)}{\theta_b} = e^{-mx} \tag{17}$$

1) 当金属蕊芯为实心的铝合金杆时, $k = 170 \text{ W/m} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$, 算得与 t, ζ_f 对应的 x_1 值,列入表 1 中 x_1 栏。

2) 当金属蕊芯为实心的纯铜时, $k = 400 \text{ W/m} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$, 算得与 t, ζ_f 对应的 x_2 值,列入

表 1 中 x_2 栏。

3) 当金属蕊芯为空心的铝合金筒时 (此时开口端与载冷剂相通), 筒外径为 $R = 0.013$ m, 杆内径为 $R_2 = 0.007$ m, 算得与 t_c, ζ_r 对应的 x_3 值, 列入表 1 中 x_3 栏 (中空部分为载冷剂)。温度沿 x 方向的分布见图 3

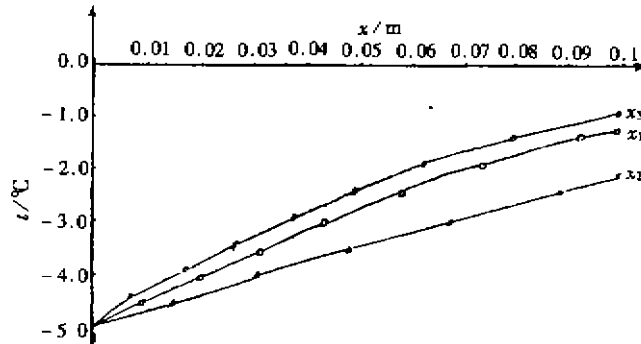


图 3 温度沿 x 方向的分布图

从表 1 中可以看出, 选用不同的金属材料做蕊芯, 基准温度 t_r 沿 x 方向的变化程度是不同的。其中以实心铜杆的温度梯度最小, 实心铝杆的温度梯度则相对大一些。也就是说, 所选用的金属材料导热性能越好, 热阻越小, 则越容易将里面水结冰时释放出的相变潜热导出, 而且同种材料, 实心蕊芯比空心蕊芯要好。这种区别反映在 t_r 沿 x 方向变化图上, 如图 3 所示, 当基准温度同为 -5°C 时, 如果以铜作实心蕊芯, 其尾端的温度在 -2°C 左右, 而以铝材作蕊芯时, 其尾端的温度则为 -1°C 。由此可以看出, 选用不同导热系数的金属材料作蕊芯, 其传热效果是不一样的, 导热系数越大, 传热效果越理想。

上述结论成立的前提是金属蕊芯开口端有足够的排热能力。以图 1 所示的形状是无法做到这一点的。为了使金属蕊芯周围的水在冻结时所释放出的相变潜热能及时的排出体外, 必须要对蕊芯开口端作一些改进。改进的依据是增大暴露在载冷剂中的金属蕊芯的表面积, 使之有充分的表面积与外部载冷剂进行对流热交换。改进的措施是在蕊芯的开口端加一个铁饼状的盖, 使整个金属蕊芯的形状如一个横放的蘑菇, 如图 4 所示。经改进后的双金属蕊芯冰球如图 5 所示。

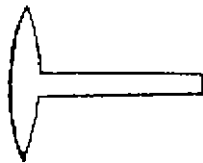


图 4 金属蕊芯示意图

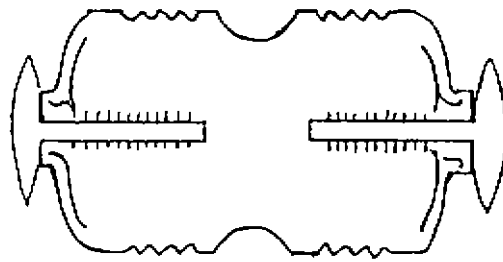


图 5 改进后的双金属蕊芯冰球

在开口端建立热平衡方程, 有

$$-kA_c \frac{dt}{dx} = \alpha \cdot F(t_b - t_R) \quad (18)$$

式中, α 为载冷剂与蕊芯冰球间的对流换热系数, F 为蘑菇状盖的表面积, t_k 为载冷剂的温度。

对图3中的曲线 x_3 进行多项式回归, 并取回归次数为3, 于是得到蕊芯温度沿 x 方向分布的表达式为

$$t = -5.0005 + 35.2768x - 95.6218x^2 + 146.899x^3 \quad (19)$$

根据文献[2], 载冷剂在蓄冰罐中的流速应小于 3×10^{-3} m/s 左右, 再由文献[3]求得此时的 α 值为 236.1 W/m^2 。

将 α 的值和式(19)代入式(18), 并取 $t_k - t_k = -1$, 于是得到 F 的值为 $1.78 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, 即蘑菇状盖的半径为 0.0476 m , 大约为蕊芯半径的4倍。

2 结 论

1) 与圆柱形冰球相比, 设有双金属蕊芯的冰球由于具有内外双向冻结与融化的特点, 虽然损失了一点相变容积, 却使冻结与融化速度明显加快。

2) 综合考虑制作工艺、价格、配重等因素, 建议采用实心铜杆作为蕊芯。为提高冻结温度, 可在蕊芯外围设一定数量的片状螺丝或鳍片。

3) 与载冷剂侧接触的金属蕊芯端头应设一蘑菇状的盖, 目的在于增加其与载冷剂接触的表面积, 使其与载冷剂充分进行对流换热, 以使冰球内的水在冻结过程中产生的相变潜热及时导出, 蘑菇状盖的半径大小与载冷剂的流速, 与载冷剂和蕊芯冰球间的对流换热系数以及金属蕊芯长度、直径大小和沿程温度分布等因素有关。

参 考 文 献

- 1 弗兰克·P·英克鲁佩勒, 传热的基本原理, 合肥: 安徽教育出版社, 1985
- 2 潘毅群, 陈沛霖, 相变材料式蓄冷槽之实验研究, 1996年全国暖通空调制冷学术年会论文集, 1996(10)
- 3 W·M·罗森诺, 传热学应用手册, 北京科学出版社, 1992

Study on Heat Conductivity of Metallic Wick inside a Hyllindrical Capsule

Zhang Lijun Tian Shenyuan

(Faculty of Urban Construction Engineering, Chongqing Jianzhu University 400045)

Abstract The hyllindrical capsule with metallic wick has a bright future and is being used all over China because of its characteristics, freezing or melting from both outside and inside, and its metallic wick actiney as balance at the same time. In this paper, the heat transfer mechanisms of the wick are studied. The heat transfer effect of the wick is discussed when it is made of different materials. Design optimization of this metallic wick is analyzed.

Key Words hyindrical capsule, metallic wick, balance

(编辑:刘家凯)