

冰球式封装蓄冰槽蓄冷过程理论分析及实验研究

王 瑾¹, 赵 凯¹, 王素英², 赵路平¹, 段文珊¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 中原工学院 信息商务学院, 郑州 450000)

摘要: 通过对冰球式封装蓄冰槽蓄冷时的传热过程进行分析, 建立了数值传热方程, 对蓄冷过程进行了理论计算, 得到了蓄冰槽蓄冷过程中乙二醇溶液出口温度及蓄冰球温度的变化趋势. 同时, 设计搭建了冰球式封装蓄冷空调系统实验台, 分析了冰球式蓄冷系统中蓄冰槽和蓄冰球的结构与性能, 对蓄冷过程进行了实验测试, 并将测试结果与理论计算进行了对比分析, 提出了优化冰球式蓄冷系统的方法.

关键词: 冰球式封装蓄冰槽; 传热计算; 蓄冷过程; 实验研究

中图分类号: TU 831.5 **文献标志码:** A

Theoretical Analysis and Experimental Study on Charging Process of Ice Hockey Style Packaged Storage Tank

WANG Jin¹, ZHAO Kai¹, WANG Suying², ZHAO Luping¹, DUAN Wenshan¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. College of Information and Business, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The charging process of ice hockey style packaged storage tank was analyzed and a numerical heat transfer equation was established. Through the theoretical calculation for charging process, the temperature changes of glycol solution and ice ball were obtained. A bench for the tests of hockey style storage air conditioning system was established, the structure and performance of the storage tank and ice ball were analyzed, and the experimental tests on charging process were carried out. The test results were compared with the theoretical calculation results, and the optimization of ice storage system were put forward.

Key words: ice hockey style packaged storage tank; heat transfer calculation; charging process; experimental study

冰蓄冷空调系统以其“削峰填谷”的优势, 在国内日益得到高度重视和广泛应用^[1]. 冰蓄冷空调系统分静态与动态制冰, 静态制冰中又以盘管式和冰球式为主, 相对盘管式系统, 冰球式蓄冷系统结构

简单可靠、蓄冷量大、冰球外壳耐腐蚀、寿命长、阻力小、故障率低、融冰速率快, 亦能实现大温差的低温送风, 适用于各种集中式空调系统^[2-3], 因此, 掌握该蓄冷设备的蓄冷特性对于工程应用非常重要.

收稿日期: 2014-05-09

基金项目: 上海市教委重点学科资助项目(J50502)

第一作者: 王 瑾(1955-), 女, 教授. 研究方向: 制冷空调工程研发与节能. E-mail: wjljh2003@163.com

本文设计搭建了一种冰球式封装蓄冷系统,通过对蓄冰槽内的蓄冷过程进行传热计算,得到了蓄冰槽蓄冷过程中乙二醇溶液及蓄冰球的温度变化规律.根据实验测试与理论计算值的对比分析,提出了优化冰球式蓄冷系统的结构与传热的设计方法.

1 蓄冰槽蓄冷过程理论分析

1.1 蓄冷过程传热分析

蓄冰槽内的蓄冷过程是一个非稳态的传热过程^[4-5],主要包括载冷剂与冰球外部表面之间的对流换热、冰球球壳的导热、冰球内固相冰层(液相水层)的导热这3个部分.在蓄冷过程中,载冷剂从蓄冰槽底部流入,在冰球之间的缝隙通道内流动,与冰球内的水进行热交换,载冷剂不断从冰球内吸收热量,温度上升;同时,冰球内水温随着蓄冷时间的推移不断下降,冰球内的水逐渐结冰,冰层不断加厚,整个过程的传热系数随时间发生变化,因此,蓄冷是一个非稳态的传热过程.

蓄冷过程分为3个阶段:第一阶段为冰球内水的显热蓄冷阶段,此时,冷量以水的显热形式储存,直至水温下降到0℃;第二阶段以冰的潜热蓄冷为主,在此过程中,冰球内水温继续下降,冰球内开始结冰,过程如图1所示,冰层首先从冰球下部形成,逐渐向内向上移动,冰层逐渐变厚,热阻增加,结冰速率愈来愈慢,最后在上部封顶;第三阶段是冰球内冰的显热蓄冷过程,此时,冰球内的水全部冻结成冰,温度继续下降,直至蓄冷结束.

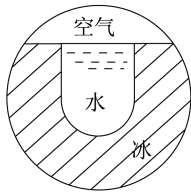


图1 冰球的结冰过程

Fig.1 Freezing process of the ice ball

1.2 蓄冷过程传热计算

为了简化计算,假设:a.蓄冷时,冰球在蓄冰槽内均匀分布,载冷剂在蓄冰槽内自下而上均匀地掠过冰球,与冰球内的水进行热交换;b.冰球内充满水,且冰球内的水降至-2℃开始结冰;c.蓄冰槽保温性能良好,与周围环境之间不存在换热.简化后的蓄冷单元体如图2所示.

从图2中可以看出,蓄冰槽进、出口格栅之间分成 n 个蓄冷单元^[6].在不考虑传热损失的情况下,

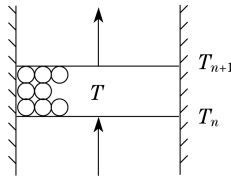


图2 蓄冷单元体示意图

Fig.2 Schematic diagram of the storage unit

蓄冷过程中乙二醇溶液的吸热量应等于冰球的蓄冷量,以第 n 层为研究对象,单位时间内蓄冷单元体的能量变化等于乙二醇溶液与球内水的热交换量,即

$$\rho c q_v (T_{n+1} - T_n) = \sum_{i=1}^N \varphi_i \tag{1}$$

式中, φ_i 表示乙二醇与单个冰球换热量,kW; ρ, c 为乙二醇密度和比热容, $\text{kg/m}^3, \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; q_v 为乙二醇流量, m^3/s ; T_n, T_{n+1} 为乙二醇进、出蓄冷单元体温度, $^\circ\text{C}$; T 为蓄冷单元体进、出口平均温度; N 表示每层冰球的个数.

单个冰球的换热量取决于蓄冷介质的状态,冰球凝固过程分为水冷却阶段、成核阶段、冰层生长阶段和冰降温阶段^[7-10],凝固过程如图3所示. S 为固相蓄冷介质, L 为液相蓄冷介质, r_e 为冰球的外径, r_i 为冰球的内径, $r_{c,\tau}$ 为冰层的半径.

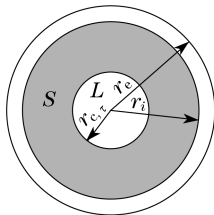


图3 冰球内的凝固过程

Fig.3 Solidification process of the ice ball

现对不同阶段冰球的换热量进行分析.

a. 水冷却阶段.

在液态水冷却阶段,冰球的换热以导热和对流为主,单位时间内的换热量

$$\rho_L c_L V_n \frac{dT_b(t)}{dt} = \frac{T_b - T(t)}{R_f + R_{env}} = - \varphi_L(t) \tag{2}$$

式中, $\varphi_L(t)$ 表示水冷却阶段的换热量,kW; ρ_L 为冰球内水的液相密度, kg/m^3 ; c_L 为冰球内水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; V_n 为冰球内水的体积, m^3 ; R_f 为乙二醇与冰球外部表面之间的热阻, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{kW}$; R_{env} 为球壳的热阻, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{kW}$; T_b 为冰球内水的温度, $^\circ\text{C}$; $T(t)$ 为乙二醇溶液的温度,以单元体进出口平均值计, $(T_{n+1} + T_n)/2$.

b. 成核阶段.

当冰球中的液态水冷却到过冷温度(−2℃)后,蓄冷进入成核阶段,冰晶在过冷水中逐渐形成和生长,形成冰晶后的水温逐步回升到凝固温度0℃.成核阶段属于亚稳态,一旦亚稳态遭到破坏,冰层就开始在球的内表面形成,并逐步向内扩展,直到 $r_{c,\tau}(t)=0$,结冰过程完成.

成核完成时的凝固薄冰层半径

$$r_0 = \left[r_i^3 \left(1 - \frac{\rho_L c_L}{\rho_S L_F} \Delta T \right) \right]^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

式中, ρ_S 为冰球内水的固相密度,kg/m³; L_F 为蓄冷介质的凝固热,kJ/kg; ΔT 为水的过冷度,℃.

c. 冰层生长阶段.

冰层的生长阶段以冰球内的水开始结冰为起始时刻 τ ,直到结冰完成时刻 $t_{f,\tau}$.载冷剂与冰球的换热量

$$\varphi_{c,\tau}(t) = \frac{T_F - T(t)}{R_f + R_{env} + R_{c,\tau}(t)} \tag{4}$$

式中, $\varphi_{c,\tau}(t)$ 表示冰层生长阶段的换热量,kW; T_F 为冰的凝固温度,℃; $R_{c,\tau}(t)$ 为固相冰层的热阻, m²·℃/kW.

式(4)中的热阻可分别按下式计算:

$$R_f = \frac{1}{hS}, R_{env} = \frac{1}{4\pi k_p} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_e} \right) \\ R_{c,\tau}(t) = \frac{1}{4\pi k_s} \left(\frac{1}{r_{c,\tau}(t)} - \frac{1}{r_i} \right) \tag{5}$$

式中, h 为乙二醇与冰球表面之间的表面传热系数, kW/(m²·℃); S 为冰球的外表面积,m²; k_p 为球壳的导热率, kW/(m·℃); k_s 为冰的导热率, kW/(m·℃).

乙二醇与冰球表面间的传热系数 h 按下式确定:

$$\frac{hd_p}{\lambda_f} = 2 + 1.8Pr^{\frac{1}{3}} Re_p^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

$$Re_p = \frac{v_0 d_p}{\nu_f} \tag{7}$$

式中, d_p 为冰球直径,m; λ_f 为乙二醇导热系数, W/(m·℃); Pr 为乙二醇的普朗特数; Re_p 为乙二醇流经冰球时的雷诺数; v_0 为乙二醇的速度,m/s; ν_f 为乙二醇的运动粘度,m²/s.

冰层半径 $r_{c,\tau}(t)$ 的计算公式为

$$4\pi r_{c,\tau}^2(t) \rho_L L_F dr_{c,\tau}(t) = -\varphi_{c,\tau}(t) dt \tag{8}$$

当 $t=\tau$ 时,则有 $r_{c,\tau}(\tau)=r_0$;当 $t=t_{f,\tau}$ 时(凝固过程完成), $r_{c,\tau}(t_{f,\tau})=0$. $t_{f,\tau}$ 为冰球凝固完成时刻.利用式(3)~(8)就可确定 $\varphi_{c,\tau}(t)$.

d. 冰的降温阶段.

在冰的降温阶段,冰球内的水已完全凝固,冰不断释放显热,该阶段的换热方式与水冷却阶段相似,因此,冰球的换热量 φ_S 按式(2)计算,只需将 ρ_L, φ_L 替换为 ρ_S, φ_S 即可.

通过上述公式,根据各个阶段 τ 和 t 值,则有 $\varphi_i = \varphi_L, \varphi_{c,\tau} = \varphi_S$,从而计算出蓄冰槽内乙二醇溶液及冰球内温度随时间的变化趋势.

2 蓄冰槽蓄冷过程实验研究

2.1 蓄冷实验系统

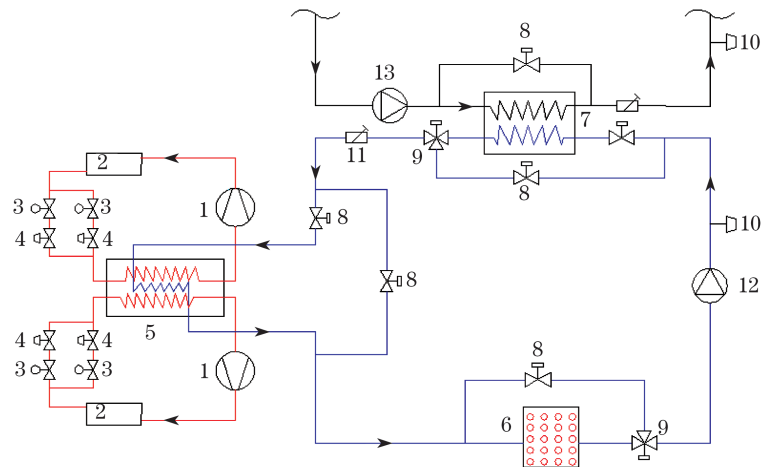
实验蓄冷系统共分为3个回路,其原理图如图4所示(见下页).红色代表制冷机组的制冷循环回路,蓝色代表蓄冰装置乙二醇溶液的蓄冷、释冷循环回路,黑色代表冷媒水循环回路.

实验系统采用双工况制冷机组,设置两套并联膨胀阀,使机组能够在空调或蓄冷工况下正常工作.空调工况制冷机的蒸发温度为0℃,蓄冷工况制冷机的蒸发温度为−10℃,既可向常规空调系统提供7℃的冷媒水,也可为蓄冰槽提供−6℃的乙二醇溶液.蓄冷系统采用部分蓄冷的运行模式,制冷机组和蓄冰槽串联,机组位于蓄冰槽上游,载冷剂先流经制冷机组降温后再流过蓄冰槽,其优点是制冷机组的蒸发温度较高,可提高机组的运行效率.

2.2 蓄冰槽的设计

由于空调房间面积为120 m²,因此,该实验系统是一种小型冰蓄冷系统.根据安装位置的不同,蓄冰槽可选用卧式和立式两种结构,为避免载冷剂流动短路而引起换热性能下降的现象,蓄冰槽选择立式结构.由于受到房间层高的限制,蓄冰槽高度的设计首先要保证载冷剂能够在蓄冰槽内达到设计要求的换热效果,综合考虑房间的净高、管道设备所占空间等因素,蓄冰槽有效高度设计为1.2 m,有效容积为0.96 m³.蓄冰槽的蓄冷量为40 kW·h,蓄冷时间为8 h,承担约40%的空调负荷.

载冷剂采用质量分数为25%的乙二醇溶液,其凝固温度为−10.7℃^[11].乙二醇溶液进蓄冰槽的温度需合理设计.蓄冷温度太高,不能达到冰球结冰时的过冷度.蓄冷温度太低,一方面导致机组的蒸发温度下降,制冷系数降低;另一方面是温度过低,乙二醇接近凝固点,不利于系统的正常运行.综合考虑乙二醇溶液进蓄冰槽的最低温度为−6℃,进、出口温差为2.5℃.



1.压缩机 2.冷凝器 3.电磁阀 4.膨胀阀 5.蒸发器 6.蓄冰槽 7.板式换热器 8.二通阀
9.三通阀 10.流量计 11.流量开关 12.乙二醇泵 13.冷冻水泵

图 4 冰蓄冷系统原理图
Fig.4 Diagram of the ice storage system

2.3 蓄冰球的选择

冰球选用美国 CRYOGEL 高密度聚乙烯材料蓄冰球,直径约 103 mm,壁厚 2 mm,冰球表面设有 16 个凹坑,凹坑的直径为 25.4 mm.水结成冰时凹坑向外突出容纳膨胀的量;冰融化时,每个球又恢复到原来的形状,冰球结冰前后的外形变化如图 5 所示.冰球中几乎不含空气,有效换热面积大,换热效率高,单位立方米堆放体积的蓄冷量可达到 62.6 kW·h.冰球中添加 AgI 胶体成核剂,降低了结冰过冷度,加快了结冰和融冰速度,提高了结冰的温度.冰球均匀地摆放在蓄冰槽内,共计 1 000 个冰球.

2.4 实验测试仪器配置

蓄冰槽内乙二醇溶液温度采用 T 型热电偶进行测试,等级为 I 级,偏差为 ± 0.5 °C,测温范围为 -50 ~ + 50 °C.蓄冰槽沿高度方向被分为 5 层,每

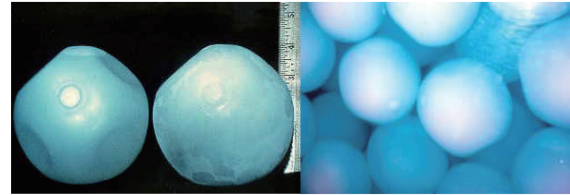


图 5 单个与多个冰球结冰前后的外形变化
Fig.5 Changes in shape before and after the freezing of single and multiple ice balls

层沿宽度方向均匀布置 4 个 T 型热电偶.冰球内温度采用 PT100 铂电阻进行测试,精度等级为 A 级,偏差为 ± 0.1 °C.铂电阻探头放入冰球中心处,实验过程中共测试 3 个冰球的温度变化,在距蓄冰槽底

层 1 m 的位置,将被测试冰球沿宽度方向均匀放置.

乙二醇溶液流量采用涡街式流量传感器进行测试,精度等级为 1.0 级,工作压力小于等于 1.6 MPa,温度范围为 -40 ~ 150 °C.

实验数据由数据采集仪配合 Labview 数据采集程序进行采集,将采集的数据输入电脑进行数据分析.

2.5 实验结果及分析

在乙二醇溶液初始温度为 20 °C,流量为 3.0 m³/h 的情况下进行蓄冷实验,结果如图 6 所示.

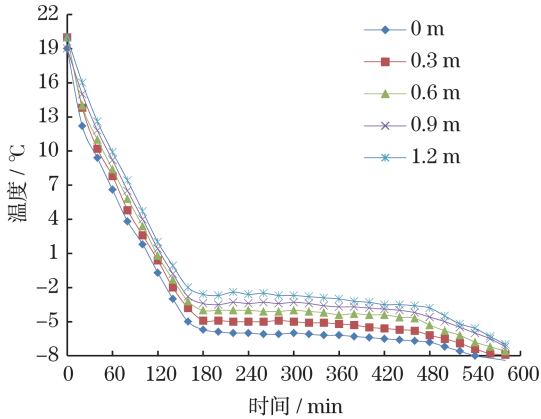


图 6 蓄冰槽内各层乙二醇溶液温度随时间的变化
Fig.6 Temperature changes with time of each layer glycol solution in the storage tank

从图 6 可以看出,在蓄冷开始阶段(前 180 min 左右),乙二醇溶液的温度下降较快,冰球内的水处于显热蓄冷阶段.当乙二醇温度降至 -4 °C 后,温度

下降速率开始变化缓慢,此时冰球内的水进入相变阶段,结冰过程开始.当冰球内的水完全结冰时(480 min左右),乙二醇溶液的温度又开始快速下降,冰球内的冰处于显热蓄冷阶段.最后溶液在蓄冰槽的进、出口温度基本趋于一致,蓄冷过程结束.

从图7可以看出,在相同条件下,蓄冰槽出口实测温度与计算温度基本一致.在整个过程中,实测温度比理论计算温度略高,主要是由于蓄冰槽与周围环境之间存在换热以及实验过程中测量仪器存在误差所致.

从图8可以看出,冰球温度变化与乙二醇温度变化趋势相同.蓄冷过程进行到180 min左右时,冰球内的水温趋于过冷温度,冰球内的水开始在壁面处结冰,此时的蓄冷既有显热蓄冷也有潜热蓄冷,当全部水温回升到0℃时,冰球完全进入相变阶段.在相变阶段,实测温度与理论计算温度的误差在10%以内,存在误差的主要原因是结冰时测点附近有水的存在,导致实测温度比计算温度略低.

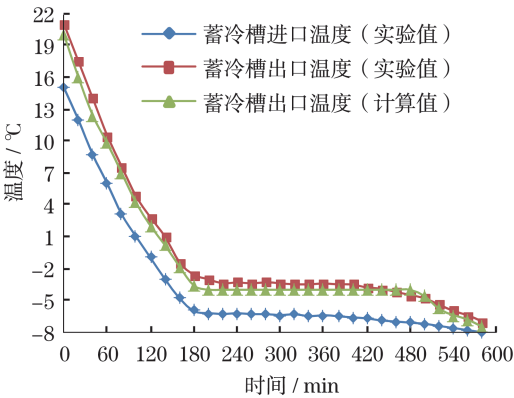


图7 蓄冰槽乙二醇溶液出口温度随时间的变化

Fig.7 Outlet temperature changes with time of glycol solution in the storage tank

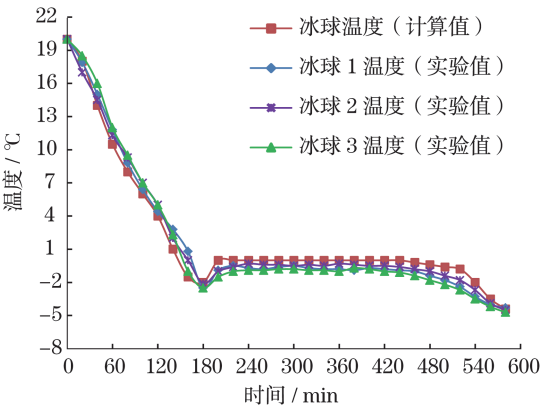


图8 不同冰球内水温随时间的变化

Fig.8 Temperature changes with time of the ice ball

从图9可以看出,显热阶段(前180 min左右)由于乙二醇溶液温度的快速下降,蒸发温度下降趋势也较大.潜热蓄冷阶段,由于水的相变温度不变,导致乙二醇溶液温度基本保持不变,蒸发温度也基本不变,系统的运行维持在相对稳定的状态.蓄冷时间经过480 min左右时,蒸发温度又开始下降,表明冰球内的水完全结冰,蓄冷过程基本结束.

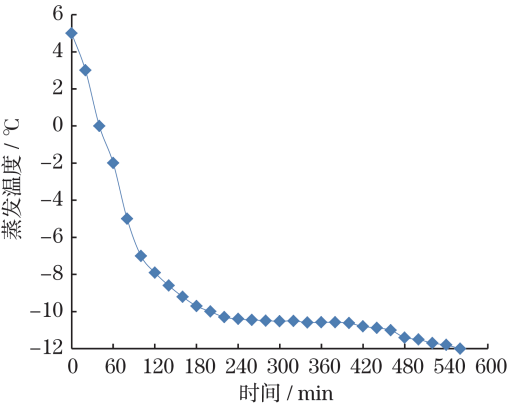


图9 机组蒸发温度随时间的变化

Fig.9 Evaporation temperature changes with time of the unit

3 结 论

- a. 针对冰球式封装蓄冰槽的蓄冷过程进行了理论与实验研究,通过理论计算与实验测试得到了蓄冷过程中乙二醇溶液及冰球的温度变化规律,理论计算与实测结果基本吻合.
- b. 在蓄冷过程中,当蓄冰槽载冷剂出口温度趋于稳定,并接近进口温度时,说明蓄冷过程结束,因此,可通过控制载冷剂出口温度来调节蓄冷时制冷机组的运行工况.
- c. 在蓄冷过程中,相变潜热蓄冷量占整个蓄冷量的81%,因此,在蓄冷系统设计时应选择相变潜热大的材料作为蓄冷介质,以减小蓄冷系统的体积.
- d. 冰蓄冷系统由于相变温度低于常规空调系统供冷温度,且蓄冷时存在较大的过冷度,使得制冷机组蒸发温度降低,机组效率下降,耗电量增加,因此,蓄冷过程中可通过在冰球中添加成核剂减小水的过冷度的方法,提高机组效率,同时考虑采用低温送风空调系统,达到提高整个空调系统效率的目的.

参考文献:

[1] 张永铨.我国蓄冷技术的发展[J].暖通空调,2010,40

(6);2-5.

[2] 殷平.冰蓄冷低温送风系统设计方法(1):室内计算参数、舒适感、室内空气质量[J].暖通空调,2004,34(5):59-65.

[3] 周文铸,刘道平,殷亮,等.多功能蓄冷空调实验装置的研制和应用[J].上海理工大学学报,1998,20(1):97-102.

[4] 杜艳利,何世辉,肖睿,等.直接蒸发内融式冰蓄冷空调的蓄冷和释冷特性[J].制冷学报,2007,28(3):33-35.

[5] 张华.冰球蓄冷罐蓄冷过程的动态特性[J].真空与低温,2000,12(4):211-224.

[6] 方贵银.蓄能空调技术[M].北京:机械工业出版社,2006.

[7] 罗森诺 W M.传热学应用手册[M].齐欣,译.北京:科学出版社,1992.

[8] Bédécarrats J P, Strub F, Falcon B, et al. Phase-change thermal-energy storage using spherical capsules: performance of a test plant[J]. International Journal of Refrigeration, 1996, 19(3):187-196.

[9] Ismail K A R, Henriquez J R, da Silva T M A. Parametric study on ice formation inside a spherical capsule[J]. International Journal of Thermal Science, 2003, 42(9):881-887.

[10] Brian Silvetti P E. Application fundamentals of ice-based thermal storage[J]. ASHRAE Journal, 2002, 44(2):30-35.

[11] 王瑾,沈小彬,梁志,等.冰蓄冷空调系统中乙二醇的缓蚀剂研究[J].上海理工大学学报,2014,36(2):181-184.

(编辑:石 瑛)

(上接第 262 页)

[7] 郑松林,王洪海,冯金芝,等.车身部件振动环境的实验室模拟方法研究[J].上海理工大学学报,2014,36(4):366-369.

[8] 冯金芝,李君,郑松林,等.车辆四轮随机输入模型研究[J].上海理工大学学报,2010,32(3):205-208.

[9] 门洪玉.汽车制动硬管的研究[J].世界汽车,1995(2):18-21.

[10] 李鹏.汽车试验场道路强化系数的研究[D].长春:吉林大学,2007.

[11] 宋勤,姜丁,赵晓鹏,等.道路模拟试验载荷谱的采集、处理与应用[J].仪表技术与传感器,2011(3):104-106.

[12] 汪学岭.实车振动谱的采集分析及其工程应用研究[D].合肥:合肥工业大学,2010.

[13] Lin J S, Yim K S. Application of random vibration test methods for automotive subsystems using power spectral density [C] // 2000 SAE World Congress, 2000:1-3.

(编辑:丁红艺)