

文章编号:0253-4339(2014)01-0098-05

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2014.01.098

冰浆贮存的均匀性研究

赵美 于航

(同济大学机械与能源工程学院 上海 201804)

摘要 在自行搭建的冰浆蓄冷实验台基础上,以从冰浆开始输入蓄冰槽到输冰结束为止的冰浆堆积贮存过程为研究对象,观察形成的“富冰层”发展变化特性,研究冰浆贮存的均匀性。通过改变冰浆入口含冰率、冰浆入口流量和蓄冰槽初始液面高度控制参数,采用正交实验方差分析法分析上述参数对冰浆贮存均匀性的影响显著性和影响规律。

关键词 冰浆贮存;均匀性;正交实验;方差分析

中图分类号:TB61^{*1}

文献标识码:A

Research on Ice Slurry Storage Homogeneity

Zhao Mei Yu Hang

(College of Mechanical and Energy Engineering, Tongji University, Shanghai, 201804, China)

Abstract The characteristics of ice-rich layer formed during ice slurry storage and the ice slurry storage homogeneity were investigated experimentally based on the self-built experiment table, which focused on the period of ice slurry accumulation from the start that ice slurry enters the ice storage tank to the end of ice-delivering. The ice slurry inlet IPF, ice slurry inlet flow and initial water level of ice storage tank were varied in order to get the significance of influence and influence on the ice slurry storage homogeneity using the orthogonal experiment and variance analysis.

Keywords ice slurry storage; homogeneity; orthogonal experiment; variance analysis

冰浆作为一种有效的蓄冷和输冷介质,有着广阔的应用前景。国内外学者对冰浆的制备^[1-3]、流动、传热特性和压降^[4-8]等方面开展了大量深入细致的研究,得到很多有意义的结果,而关于冰浆贮存的研究相对较少。冰浆贮存过程可以分为两个阶段:1)冰浆开始输入蓄冰槽到输冰结束的冰浆堆积贮存阶段;2)冰浆全部输入蓄冰槽到开始融冰取冷的冰浆贮存阶段。目前关于冰浆贮存的研究主要集中于第二阶段蓄冰槽中冰晶粒子演变的物理机理、影响因素、以及防止冰粒子团聚的措施等方面,对于第一阶段的研究则少之又少。

日本的 Yoshiyuki^[9], Masayuki 等^[10-11]对过冷水在圆柱型蓄冰槽中的贮存特性进行了详细的探讨,他们认为,冰浆贮存过程实际是冰晶粒子逐渐上浮并堆积形成一个“富冰层”的过程。两位学者使用了相同的模型,认为富冰层形成了一个在一段时间内结构不变的多孔介质体,冰堆积的过程中冰浆中的水在多孔介质中渗流。研究发现模型计算结果与实验结果基本一致,入口冰浆质量流量增大有助于富冰层在径向充分发展,可以更好地充满蓄冰槽。该模型结果可用

来设计冰浆贮存时的流量、出口口的数量及空间布置情况,对蓄冰槽设计有很大帮助。

中国科学院的青春耀和宋文吉等^[12-13]分别采用实验和数值模拟的方法研究了影响冰浆在蓄冰槽内贮存过程富冰层发展形态的因素主要有入口冰浆含冰率、入口冰浆质量流量、蓄冰槽初始液面高度和出冰方式等,总结规律发现:冰浆入口质量流量和含冰率对富冰层发展变形影响较大,其它因素次之。

本文以冰浆贮存第一阶段中冰浆贮存均匀性为研究对象,自行建立实验台,通过改变冰浆入口含冰率、冰浆入口流量和蓄冰槽初始液面高度控制参数,分析冰浆堆积形成的富冰层的发展变化,计算各种实验工况下的冰浆贮存均匀性,采用正交实验方差分析法分析上述控制参数对冰浆贮存均匀性的影响显著性和影响规律,为更有效地贮存冰浆,提高蓄冰槽效率提供一定的指导。

1 实验系统

结合实验室现有实验条件,采用过冷法制取冰浆,实验装置包括5个系统:制冷循环系统、二次冷媒

循环系统、过冷水循环系统、冰浆循环系统以及温控和数据采集系统。实验装置及测点布置的示意图如图 1 所示。系统中的主要装置有双工况制冷主机、过

冷却器、过冷解除装置、蓄冰槽、自动控制柜和数据采集仪等。冰浆贮存实验装置的实物图如图 3 所示。

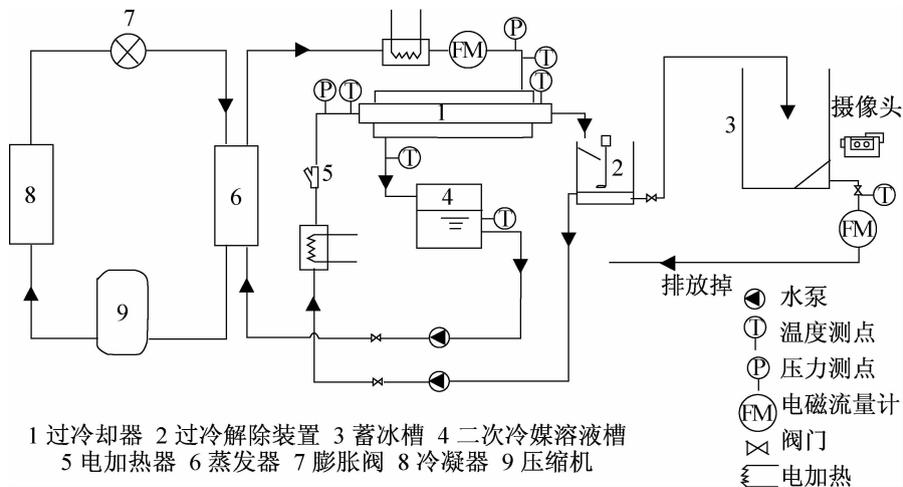


图 1 实验装置及测点布置示意图

Fig. 1 Schematic view of experiment device and measure point

根据热量计的原理,实验自行设计了 IPF (ice packing factor) 测量装置,结构设计如图 2 所示。其工作原理是:将冰浆引入测试仪器内部,由电加热器进行加热,直至进入测试仪器内部的冰晶全部融化。热电偶传感器插入棒用来测量加热前冰浆的温度以及加热后溶液的温度,利用温度可以计算整个加热过程中显热消耗量,加上溶解冰浆中冰晶所需的潜热消耗量则等于加热器所消耗的功,通过热平衡关系可以计算出冰浆的含冰率。含冰率计算方法如下:

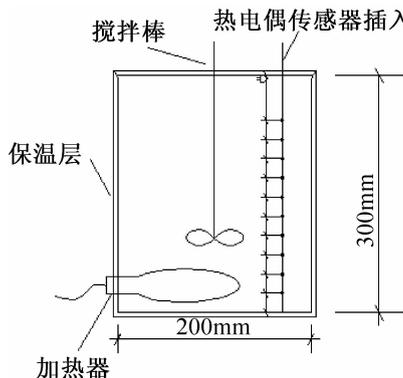


图 2 冰浆 IPF 测量装置示意图

Fig. 2 Schematic view of IPF measurement device

$$cm\Delta t + \chi_s \cdot m\gamma = P\tau \quad (1)$$

所以

$$\chi_s = \frac{P\tau}{m\gamma} - \frac{c\Delta t}{\gamma} \quad (2)$$

式中: P 为电加热器功率,本实验中取为 1500W; τ 为加热时间, s; m 为冰浆的质量, kg; c 为水的比热容 $4.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; γ 为冰的相变潜热,



图 3 冰浆贮存实验装置实物图

Fig. 3 Physical map of ice slurry storage experiment device

$335 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{kg}$; Δt 为冰浆的温度变化值, $^\circ\text{C}$ 。

冰浆贮存实验用过冷法制取冰浆,调节至实验工况所需的含冰率,设定冰浆的入口流量和蓄冰槽初始液面高度,开启阀门,使得特定工况下的冰浆落至蓄冰槽中进行贮存,开启排水泵,调节排水流量,保持蓄冰槽内液面恒定。用摄像头记录蓄冰槽内富冰层的发展变化情况。将拍到的富冰层发展变化的一系列图片用图像分析软件进行分析,得到富冰层轮廓曲线,进而计算得到冰浆贮存均匀性。

2 实验结果与分析

本文中的冰浆贮存均匀性是指冰浆均匀地分布

在蓄冰槽中的程度,由于冰浆堆积形成“富冰层”,冰浆贮存均匀性即指富冰层占据蓄冰槽的效率,其定义公式为:

$$\chi = \frac{s_1}{s_2} \quad (3)$$

式中: s_1 表示纵截面上富冰层的面积; s_2 表示以富冰层底部为边的区域在纵截面上的面积,如图 4 所示。

冰浆依靠重力落到蓄冰槽中,在水面上堆积形成富冰层,如图 5 所示。富冰层上部,含水量少,颜色白;冰层下部,含水量多,颜色浅,呈棉絮状。富冰层与水之间有着明显的分界线,近似成对称的弧形。

2.1 控制参数影响显著性分析

考虑到实验误差,采用正交实验方差分析法^[14]进行数据分析,判断控制因素取值变化和误差对冰浆贮存均匀性的影响显著性。方差分析的优点是能把总平方和分解成因素与误差的平方和。而正交设计

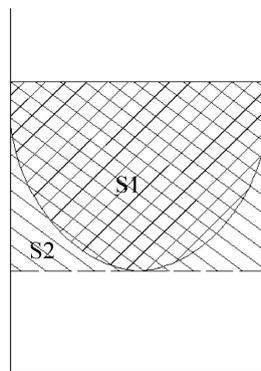


图 4 蓄冰槽中冰浆贮存均匀性计算示意图
Fig. 4 Schematic view of ice slurry storage homogeneity in ice storage tank

将这种分解已固定到每一列上,没有安排因素的空列,一般可反映实验误差。实验采用 $L_{16}(4^2 \times 2^9)$ 的正交实验表安排实验,实验结果填入表 1 中。

表 1 冰浆贮存均匀性实验结果方差分析表
Tab.1 Experiment results of ice slurry storage homogeneity

	A	B	C	空 1	空 2	空 3	空 4	空 5	空 6	空 7	空 8	指标
1	4	0.3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0.681
2	4	0.5	2	1	1	2	2	2	2	2	2	0.839
3	4	0.7	3	2	2	1	1	1	2	2	2	0.909
4	4	0.9	3	2	2	2	2	2	1	1	1	0.914
5	6	0.3	2	2	2	1	2	2	1	2	2	0.838
6	6	0.5	2	2	2	2	1	1	2	1	1	0.911
7	6	0.7	3	1	1	1	2	2	2	1	1	0.914
8	6	0.9	3	1	1	2	1	1	1	2	2	0.948
9	8	0.3	3	1	2	2	1	2	2	1	2	0.880
10	8	0.5	3	1	2	1	2	1	1	2	1	0.915
11	8	0.7	2	2	1	2	1	2	1	2	1	0.926
12	8	0.9	2	2	1	1	2	1	2	1	2	0.935
13	10	0.3	3	2	1	2	2	1	2	2	1	0.918
14	10	0.5	3	2	1	1	1	2	1	1	2	0.929
15	10	0.7	2	1	2	2	2	1	1	1	2	0.943
16	10	0.9	2	1	2	1	1	2	2	2	1	0.949
k_1	3.573	3.559	7.318	7.276	7.297	7.312	7.286	7.313	7.313	7.283	7.304	
k_2	3.654	3.648	7.304	7.346	7.325	7.310	7.336	7.309	7.309	7.339	7.318	
k_3	3.656	3.692										
k_4	3.739	3.723										
k							14.622					

表 2 方差分析结果表
Tab. 2 The result of variance analysis

方差来源	平方和 Q	自由度 f	方差 S^2	F	显著性检验尺度
冰浆入口含冰率变化	0.00345	3	0.00115	12.732	9.6
冰浆入口流量变化	0.00381	3	0.00127	14.095	9.6
初始液面变化	0.00001	1	0.00001	0.135	14.69
实验误差	0.00070	8	0.00009		

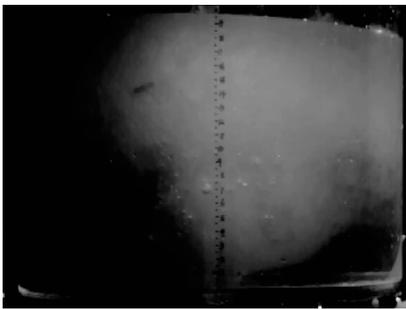


图 5 蓄冰槽中形成的富冰层

Fig. 5 The ice-rich layer in the ice storage tank

表 2 是方差分析结果,可以看出:冰浆入口流量是最显著的影响因素,而冰浆入口含冰率影响也较大,但不如冰浆入口流量影响显著,蓄冰槽初始液面高度的影响则很不显著。实验过程中的实验误差为:

$$\hat{\sigma}_e = \sqrt{S_e^2} = 0.95\%$$

表 3 中的补充实验工况 17-20 结合表 1 中的 1-16 号实验工况用于分析各因素对冰浆贮存均匀性的影响规律。

表 3 补充实验工况安排

Tab. 3 The arrange of the added experiments

工况	冰浆入口 IPF/%	冰浆入口流量/(m ³ /h)	初始液面高度/m	冰浆贮存均匀性指标
17	6	0.7	2	0.917
18	6	0.9	2	0.930
19	8	0.5	2	0.938
20	10	0.5	2	0.947

2.2 入口冰浆含冰率的影响

根据表 1 和表 3 中的实验结果,工况 2,6,19,20 的冰浆贮存均匀性与冰浆入口含冰率的关系为图 6 所示。

图 6 显示的是设定冰浆入口流量为 0.5m³/h,蓄冰槽初始液面为 0.2m 条件下,冰浆贮存均匀性随冰浆入口含冰率的变化情况。可以看出随着冰

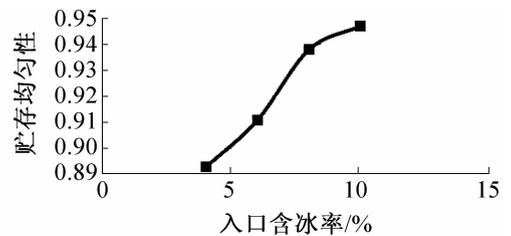


图 6 冰浆贮存均匀性随冰浆入口含冰率的变化情况

Fig. 6 The change of ice slurry storage homogeneity with ice slurry inlet IPF

浆入口含冰率增大,冰浆贮存的均匀性也增大。此外从冰浆贮存堆积的过程来看,增大冰浆入口含冰率,堆积初始时冰浆越容易在蓄冰槽中心轴处堆积,此处的富冰层厚度增加得越快。随着实验进行,冰浆向蓄冰槽的周边堆积,富冰层轮廓曲线的弧度越来越小。

2.3 入口冰浆流量的影响

根据表 1 和表 3 中的实验结果可得,工况 5,6,17,18 的冰浆贮存均匀性与冰浆入口流量的关系为图 7 所示。

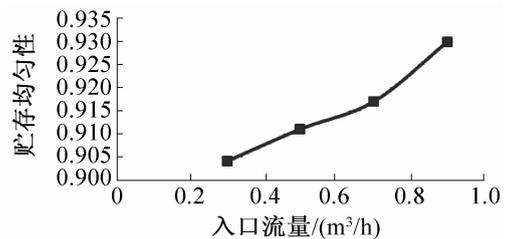


图 7 冰浆贮存均匀性随冰浆入口流量的变化情况

Fig. 7 The change of ice slurry storage homogeneity with ice slurry inlet flow

图 7 显示的是设定冰浆入口含冰率为 6%,蓄冰槽初始液面为 0.2m 情况下,冰浆贮存均匀性随冰浆入口流量的变化情况。可以看出随着冰浆入口流量增大,冰浆贮存的均匀性也增大。此外从冰浆贮存堆积的过程来看,增大冰浆入口流量,冰浆堆积初始时冰浆越容易向蓄冰槽周边推移堆积,形成的富冰层轮廓曲线的弧度越小。

2.4 蓄冰槽初始液面高度的影响

根据表 1 和表 3 中的实验结果可得,工况 17、7、18、8、20、14 的冰浆贮存均匀性与蓄冰槽初始液面高度的关系为图 8 所示。

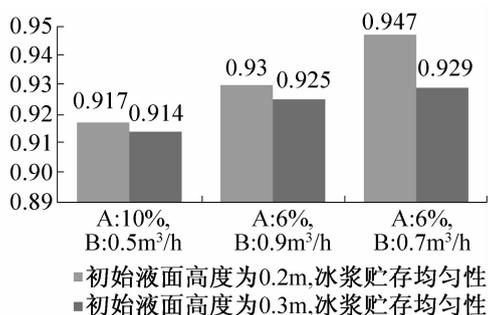


图 8 冰浆贮存均匀性随蓄冰槽初始液面高度的变化
Fig. 8 The change of ice slurry storage homogeneity with the initial water level of ice storage tank

图 8 显示的是三种不同冰浆入口流量和含冰率情况下,冰浆贮存均匀性随着蓄冰槽初始液面高度的变化情况。可以看出在上述工况下,由于蓄冰槽初始液面高度不同而导致的冰浆贮存均匀性的最大差值为 0.018,影响较小。初始液面越低,冰浆贮存均匀性越大。

3 结论

通过对不同冰浆入口含冰率、冰浆入口流量和蓄冰槽初始液面高度条件下的冰浆贮存均匀性实验的正交实验方差分析,可以得到以下结论:

1) 在冰浆贮存过程中会形成富冰层,富冰层形状随时间变化但基本呈现向入口流速方向凸起的圆弧形,近似对称。富冰层的轮廓发展状态受冰浆入口流量、冰浆入口含冰率和蓄冰槽初始液面高度的影响。

2) 其他条件相同时,冰浆入口含冰率越大,冰浆贮存均匀性越大;其他条件相同时,冰浆入口流量越大,冰浆贮存均匀性越大。

3) 正交实验方差分析表明:冰浆入口流量对冰浆贮存均匀性影响最显著,冰浆入口含冰率次之,蓄冰槽初始液面高度影响最小。

4) 蓄冰时为了提高蓄冰槽的容积蓄冰率,提高入口冰浆的入口流量是有效的途径之一。

参考文献

[1] Kim B S, Shin H T, Lee Y P, et al. Study on ice slurry production by water spray[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(2):176-184.

[2] Stamatiou E, Meewisse J W, Kawaji M. Ice slurry generation involving moving parts[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(1):60-72.

[3] 谢若非. 过冷法制备冰浆的控制参数研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.

[4] Kaushal D R, Sato K, Toyota T, et al. Effect of particle size distribution on pressure drop and concentration profile in pipeline flow of highly concentrated slurry [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 31(7):809-823.

[5] Efol P W, Kitanovski A, Ata-Caesar D, et al. Thermodynamics and heat transfer of ice slurries [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(1):51-59.

[6] Bellas J, Chaer I, Tassou S A. Heat transfer and pressure drop of ice slurries in plate heat exchangers [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(7):721-732.

[7] 何国庚, 王忠衡. 冰浆流体流动与换热研究综述 [J]. 制冷学报, 2005, 26(4):1-5. (He Guogeng, Wang Zhongheng. Review of study on flow and heat transfer of ice slurry [J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(4):1-5.)

[8] 刘永虹. 冰浆流动特性和传热性能的研究 [D]. 上海: 同济大学, 1997.

[9] Yoshiyuki K, Naoki A, Masayuki T. Study on ice storing characteristics in dynamic type ice storage system by using supercooled water. Effects of the supplying conditions of ice-slurry at deployment to district heating and cooling system [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(1):73-82.

[10] Masayuki T, Yoshiyuki K. Ice-water two-phase flow behavior in ice heat storage systems [J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(7):639-651.

[11] Masayuki T, Yoshiyuki K, Kunio H, et al. Prediction of ice storage process in dynamic-type ice storage system [C]// 10th International Conference on Thermal Engineering and Thermo-grammetry, 1997:321-326.

[12] 青春耀, 肖睿, 宋文吉, 等. 冰浆在蓄冰槽内的蓄冰特性及其均与度研究 [J]. 低温与超导, 2009(5):41-46. (Qing Chunyao, Xiao Rui, Song Wenji, et al. Study on ice slurry storing characteristics and its uniformity in ice storage tank [J]. Refrigeration, 2009(5):41-46.)

[13] 青春耀, 肖睿, 宋文吉, 等. 冰浆在蓄冰槽内的动态蓄冰过程模拟 [C]// 中国工程热物理学会年会, 2009.

[14] 田胜元, 萧曰嵘. 实验设计与数据处理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.

作者简介

赵美, 女(1987-), 硕士研究生, 上海同济大学机械与能源工程, 18801963892, E-mail: zhaomei8766@163.com。研究方向: 蓄能技术。

About the author

Zhao Mei (1987-), female, master, college of mechanic and energy engineering, Tongji University, 18801963892, E-mail: zhaomei8766@163.com. Research fields: energy storage technology.