

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.03.014



强迫与混合对流条件下水流顺掠冰柱 传热特性

孟凡康^{1,2}, 于航¹

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 辽宁工程技术大学建筑工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要:通过实验研究了对流与混合对流条件下水流顺掠冰柱融化过程的相界面移动规律及传热特性。改变冰柱初始尺寸、初始冰柱温度、水流速度与温度等参数,采用工业摄像机记录了冰柱相界面的移动规律,构建了影像实验数据与冰柱相界面传热系数之间的映射关系。通过对实验结果的分析与讨论,获得结论如下:不同速度条件下的平均相界面位置变化趋势相似,相界面随时间呈单调递减幂函数形式变化;平均对流换热系数随水流速度或水流温度的增加而增大,且平均对流换热系数随时间呈递增趋势变化;在不同水流速度或水流温度条件下, \overline{Nu} 随着 Gr/Re^2 先增大经过最高点后再减小;获得了水流顺掠冰柱融化过程 \overline{Nu} 与 Gr 、 Re 、 Pr 及 Ste 之间的经验关联式。

关键词:水流顺掠冰柱;融化传热;混合对流;实验研究

中图分类号:TK02 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2015)03-0102-06

Heat transfer characteristics of water flowing along icicle under forced and mixed convection

Meng Fankang^{1,2}, Yu Hang¹

(1. The School of Mechanical and Energy Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China;

2. The School of Architecture Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, 123000, P. R. China)

Abstract: Experiment is conducted to study The heat characteristics and moving regulation of phase change interface in the progress of water flowing along icicle under forced and mixed convection The mapping relationship between the experimental data and the heat transfer coefficient in phase change interface of icicle is established. With various initial dimensions of icicle, initial temperatures in icicle, velocities and temperatures of water, moving regulation of phase change interface of icicle is recorded using industrial cameras The results show that, The variation trend of each location of phase change interface is similar with different velocities, and the location of phase change interface decreases with time in a form of power function; the average convective heat transfer coefficient increase over time with the increase of velocity and temperature of water, with different velocities and temperatures of water, at first \overline{Nu} increases steadily with Gr/Re^2 , however it witnesses a fall trend after reach to the peak point. Empirical correlation of \overline{Nu} , Gr , Re , Prand Ste is established.

Key words: water flowing along icicle; melting heat; mixed convection; experimental research

收稿日期:2014-12-10

作者简介:孟凡康(1979-),男,博士生,主要从事外融冰传热特性研究,(E-mail)mfk3999147@126.com。

Received:2014-12-10

Author brief: Meng Fankang(1979-), doctoral candidate, main research interest: study on heat transfer characteristics of external melt ice, (E-mail)mfk3999147@126.com.

冰水相变传热问题广泛存在于自然界和工业领域,如水资源^[1]、空间应用技术^[2]及节能环保^[3-4]等方面。冰柱虽然形式简单,但是与外界换热过程中包含了相变传热的基本现象和特征,同时也是研究其他复杂形状、现象的基础,所以,已有一些学者对此问题进行了研究。Ho等^[5]采用有限差分数值模拟方法,考虑了水的密度反转特性,研究了水平放置冰柱的自然对流融化特征。Cheng等^[6]在水平圆管自然对流蓄冰研究过程中,通过高速摄像方法得到了相界面变化实验数据,基于准静态条件下,建立了蓄冰率与相界面对流换热系数的计算公式。Ameen等^[7]研究了冰柱置于一定气流温度条件下融化过程,获得了冰柱相界面移动规律。Yamada等^[8]对沉浸在盐水中的水平冰柱融化过程进行了实验研究,通过可视化的方法分析了流体瞬态流动和相界面的移动规律。Yamada等^[9]通过实验研究了相同条件下的饱和蒸汽和干空气与冰柱之间的融化过程。Scanlon等^[10]采用粒子图像测速法对垂直放置于水中的冰柱融化过程进行了实验,并对建立的数值模型进行了验证。Sugawara等^[11]用数值模拟方法研究了方腔中水平圆柱的冰/水相变问题,分别对凝固和融化两种过程进行了分析。

以上文献主要集中于冰柱与一定形状内流体之间的自然对流或者强迫对流换热研究,而很少涉及强迫对流与混合对流条件下,水流顺掠冰柱表面的传热研究,尤其是冰柱与流体之间整个融化过程传热分析。本文基于对此问题的考虑,首先,建立水流顺掠冰柱表面实验台,改变冰柱初始尺寸,初始冰柱温度,水流速度与温度等参数,采用工业摄像机记录了冰柱相界面的移动规律;其次,构建了基于非接触测量的圆柱相界面对流传热系数计算方法;最后,通过对实验结果的分析与讨论,获得了 \overline{Nu} 与 Gr 、 Re 、 Pr 及 Ste 之间的经验关联式。为进一步研究冰柱与流体之间的传热研究提供了一定的经验和帮助。

1 建立实验

图1为实验台原理图。实验台主要由数据采集系统、流体输配系统、温度控制系统等组成。典型的实验流程如图1中所示,启动水泵通过阀门调节整个系统的流量给整个循环系统提供稳定流量的水流,并通过阀门调节整个系统的流量。开启恒温水箱中的电加热器和制冷机循环加热系统,经搅拌器搅拌后为恒温水箱中提供温度均匀的实验水源。经过调试保

证为测量段提供相应恒定温度和流量(由电磁流量计测量)。待上述各系统准备完毕时,从冷柜中取出连接吊架的冰柱并快速安装到测量段中,同时开启温度数据记录仪和图像采集系统。实验过程中要求保证冰柱的轴向方向与水流方向保持平行。实验结束后,冰柱融化过程影像保存在电脑中,用图像分析软件测量各个时刻冰柱相界面的变化情况。测量段中的水流流速由电磁流量计测量的流量除以测量段的水流断面面积获得。

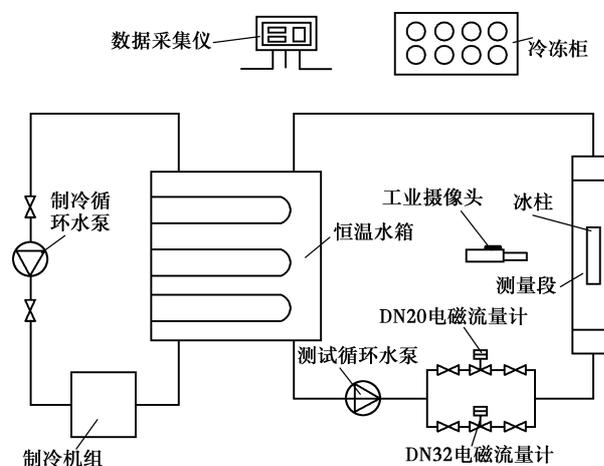


图1 实验台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laboratory bench

冰柱的制作过程为:取长度为500 mm的PVC管道,一端封闭,并注入450 mm深度的清洁水,在管道轴线上固定一根直径4 mm,长度500 mm的圆木棒,其表面预埋热电阻。在冷冻柜中冻结成型。取出冰柱并在冰箱中静止存放24 h,使冰柱内部温度场达到均匀。

4台工业摄像机垂直于冰柱轴向按45°空间顺序,且针对冰柱中间位置设置,共记录冰柱8个边的相界面随时间变化情况,由这八个边的变化规律近似代替整个截面的变化情况。其空间布置形式如图3所示。工业摄像头1、2、3、4分别记录冰柱0°和180°、45°和225°、90°和270°、135°和315°各边的相界面变化情况。

在正式实验之前进行了不同长度冰柱融化规律的比较实验,采用的冰柱长度分别为320,480,750及900 mm。图3为的冰柱(长为480 mm)不同时间融化典型图像,截面1、2、3、4、5分别位于冰柱轴向6等截面处,冰柱左端为来流方向。由实验得到,由于受到水流的冲刷和冰柱形状的影响,冰柱前段(截面2之前)相界面变化较为复杂,呈三维变化。冰柱后段

(截面 5 之后)同样受到冰柱形状和绕流的影响,相界面变化较为复杂。而中间段(截面 2-5)部分在本文的实验工况下,其融化规律基本不受冰柱融化形状的影响,其融化规律相似,其他长度与 480 mm 长度冰柱的融化规律相同,所以选用长度为 480 mm 冰柱截面 4 处作为研究对象。

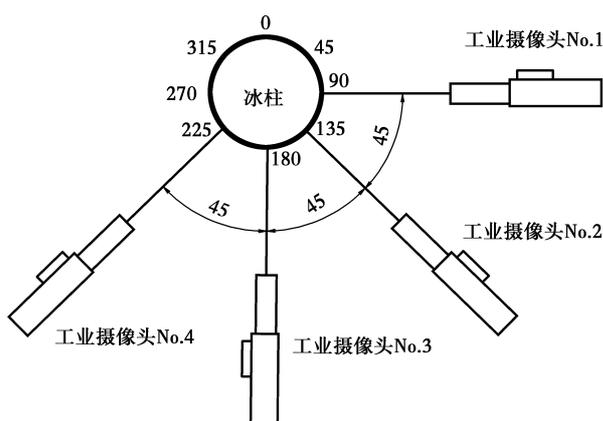


图 2 工业摄像头空间布置图

Fig. 2 Local layout of industrial cameras

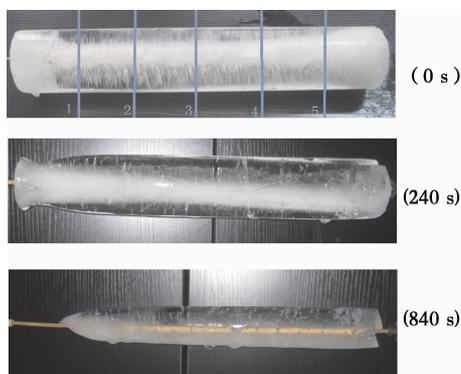


图 3 长度为 480 mm 冰柱不同时间融化图像

Fig. 3 Melting images of the 480 mm long icicle at different times

2 冰柱相界面对流传热系数计算方法

采用高速摄像实验方法研究冰柱相界面传热规律的缺点在于不能直接测量相变传热过程中显热量的变化,为了充分考虑显热传热在整个相变传热中的作用,需要计算冰柱内部温度分布,即需要构建影像实验数据与冰柱相界面传热系数之间的映射关系。

根据前期实验观察,除了冰柱前段和后段外,图 3 截面 4 处冰柱融化过程主要发生在径向方向,而轴向方向基本可以忽略,为了研究方便,假设冰柱融化过程为一维径向传热过程。如图 4 所示,研究对象为一半径为 H 的冰柱, H_1 为某计算时刻相界面

位置,融化温度为 T_m ,冰柱外界环境温度为 θ_0 , $\theta_0 > T_m$,冰柱外界对流换热系数为 h ,冰柱的初始温度为 T_0 , $T_n(t)$ 表示冰柱中心温度, r 表示沿冰柱径向坐标, t 表示时间, t_1 表示冰柱传热结束时间。 $T_0 < T_m$ 。冰柱的导热系数为 λ ,密度为 ρ ,融化潜热为 L ,外界水流的导温系数为 a 。

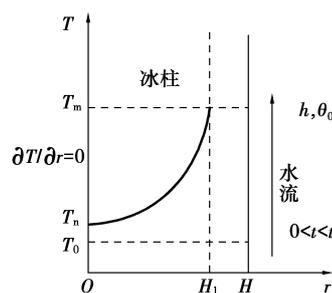


图 4 冰柱物理计算模型

Fig. 4 The physical calculation model of a length icicle

文献[12]在研究相变传热问题中,验证了 3 次多项式热平衡积分法相对于二次多项式、指数热平衡积分法等具有较高的计算精度。采用该方法对冰柱内部温度场进行近似求解。圆柱内部温度分布方程采用方程(1)形式^[12]。

$$T(r, t) = A + Br + Cr^3 \quad (1)$$

其中: A 、 B 、 C 为多项式的系数。

参考文献[12],针对研究对象经前期计算研究,在没有发生相变之前的传热过程非常短暂,忽略了此过程的传热影响。且认为传热开始后,温度渗透深度已经达到了冰柱中心。根据以上假设及条件,冰柱内部导热控制方程,边界层能量方程及其定解条件如下:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad 0 < t < t_1 \quad r \in [0, H_1] \quad (2)$$

$$\rho L \frac{dH_1}{dt} = \lambda \frac{\partial T}{\partial r} + h(\theta_0 - T_m) \quad r = H_1 \quad (3)$$

$$T = T_n(t) \quad r = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad r = 0 \quad (5)$$

$$T = T_m \quad r = H_1 \quad (6)$$

将式(4)、(5)、(6)分别带入式(1)可以得到: A

$$= T_n(t), B = 0, C(t) = \frac{T_m - T_n(t)}{H_1^3}$$

冰柱内部温度场可以表示为

$$T(r, t) = T_n(t) + \frac{T_m - T_n(t)}{H_1^3} r^3 \quad (7)$$

对方程(2)在 $r \in [0, H_1]$ 范围内进行积分,可

以获得如下方程

$$\frac{6\alpha(T_m - T_n(t))}{H_1} = -(T_m - T_n) \frac{dH_1}{dt} + H_1 \frac{dT_n(t)}{dt} \quad (8)$$

式(3)可表示为:

$$\rho L \frac{dH_1}{dt} = 3\lambda \frac{T_m - T_n(t)}{H_1} - h(\theta_0 - T_m) \quad (9)$$

$$h = \frac{3\lambda}{(\theta_0 - T_m)} \frac{T_m - T_n(t)}{H_1} - \frac{\rho L}{(\theta_0 - T_m)} \frac{dH_1}{dt} \quad (10)$$

从式(10)中可以看出,对流换热系数 h 的计算与 $T_n(t)$ 、 $\frac{dH_1}{dt}$ 及 H_1 等参数有关,除了 $T_n(t)$ 外,

$\frac{dH_1}{dt}$ 及 H_1 等参数可以通过非接触测量方法直接获得。 $T_n(t)$ 的值由冰柱轴心相应位置的热电阻测量获得。

3 结果与讨论

图 5 和图 6 分别表示不同速度条件下平均相界面位置和平均对流换热系数随时间变化图,6 组实验参数均为初始水流温度 16°C ,初始冰柱直径 80 mm ,冰柱初始温度 -8°C 。从图 5 中可以看出,不同速度条件下平均相界面位置(由工业摄像机拍摄的 8 个边平均获得)变化趋势相似,相界面随时间呈单调递减幂函数形式。随着速度的增加冰柱完全融化的时间减小,即在单位时间内融化速率增大。

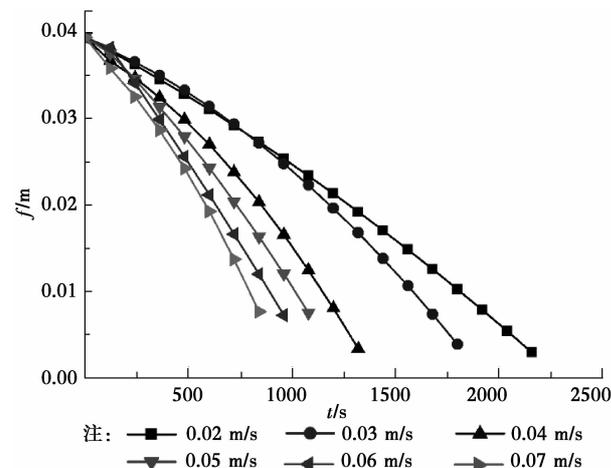


图 5 不同速度条件下平均相界面位置随时间变化图
Fig. 5 Variation of average location of phase change interface with time in different velocity condition

从图 6 中可得,在不同速度条件下,平均对流换热系数变化趋势相似,且随着时间变化呈递增趋势。另外,随着速度的增加,平均对流换热系数增加,同

时总融化时间减小。

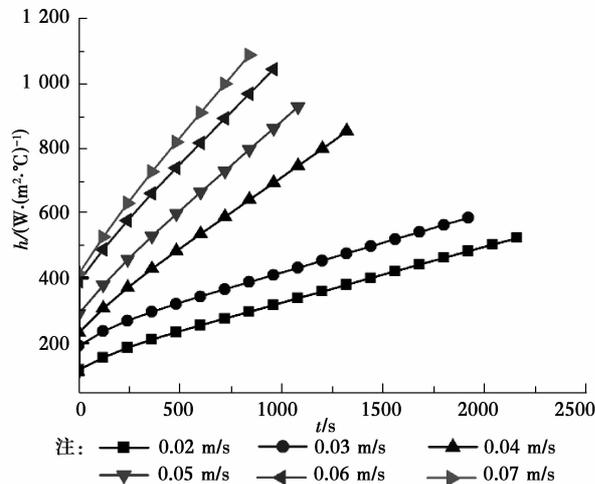


图 6 不同速度条件下平均对流换热系数随时间变化图
Fig. 6 Variation of average convective heat transfer coefficient with time in different velocity condition

图 7 表示不同速度条件下 \overline{Nu} 随 Gr/Re^2 变化图,6 组实验的参数均为初始水流温度 16°C ,初始冰柱直径 80 mm ,冰柱初始温度 -8°C ,各速度条件下的 \overline{Nu} 随 Gr/Re^2 变化趋势相似。随着速度的增加对应的 Gr/Re^2 区间范围越来越小,而 \overline{Nu} 值则越来越大。另外,在各水流速度条件下, \overline{Nu} 随着 Gr/Re^2 的变化规律是先增大经过最高点后再减小。分析其原因,是由于融化开始时,冰柱的半径最大,平均对流换热系数最小,而随着融化的进行,平均对流换热系数变大,而半径越来越小,从而造成 \overline{Nu} 在融化过程某处形成最大值。以流速为 0.06 m/s 实验工况

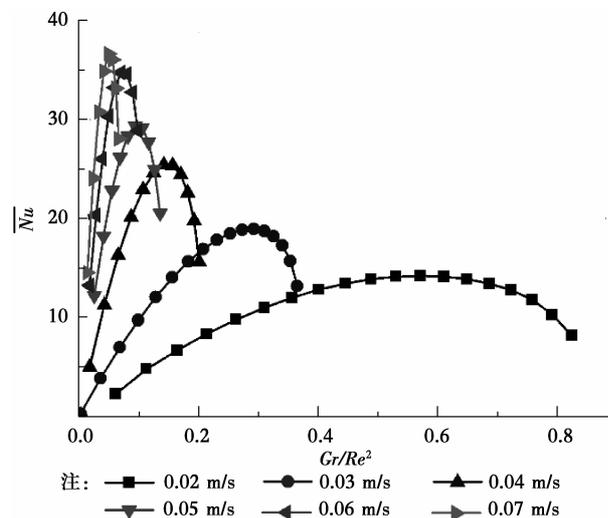


图 7 不同速度条件下 \overline{Nu} 随时间变化图
Fig. 7 Variation of \overline{Nu} with time in different water velocity condition

为例,对流换热系数为 $661 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$,冰柱半径为 0.0299 m 时, \overline{Nu} 最大值为 34.76 。

图 8 表示不同初始水流温度条件下平均对流换热系数随时间变化图。其实验工况如下:冰柱初始温度 -8C ,冰柱直径为 80 mm ,水流流速为 0.06 m/s 。从图中可获得,在各初始水流温度条件下,平均对流换热系数随时间变化趋势相似,且随着时间变化呈递增趋势。另一方面,随着水流温度的增加,平均对流换热系数增加,同时总融化时间减小。

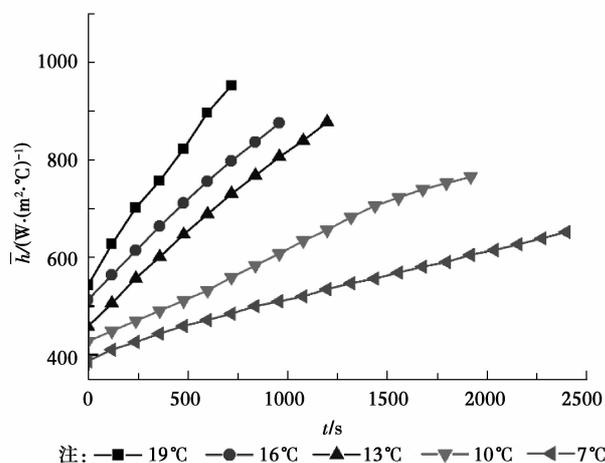


图 8 不同水流温度条件下平均对流换热系数随时间变化图
Fig. 8 Variation of average convective heat transfer coefficient with time in different water temperature condition.

图 9 表示不同水流温度条件下 \overline{Nu} 随 Gr/Re^2 变化图,6 组实验的参数均为初始水流速度 0.06 m/s ,初始冰柱直径 80 mm ,冰柱初始温度 -8C ,各速度条件下的 \overline{Nu} 随 Gr/Re^2 变化趋势相似。由于 7C 水流温度工况下特性温度所对应的膨胀系数为负值,所以图中 7C 所对应的 Gr/Re^2 数值应为负值,本文为了统一起见,按照正值来计算(下同)。从图中可以看出,在某一水流温度条件下, \overline{Nu} 随着 Gr/Re^2 的变化规律是先增大,经过最高点后再减小。其原因与前述不同速度条件下 \overline{Nu} 随 Gr/Re^2 变化原因相同。

为了获得 \overline{Nu} 与 Gr, Re, Pr 及 Ste 之间的经验关联式,本文总共进行了 132 组有效实验,其中水流速度分别为: $0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06$ 及 0.07 m/s ,冰柱直径分别为: $60, 70, 80$ 及 105 mm ,水流温度分别为: $7, 10, 13, 16$ 及 19C ,冰柱初始温度分别为 $-5, -6.5, -8, -10$ 及 -12C 。经过整理,获得了冰柱融化过程 \overline{Nu} 的经验关联式

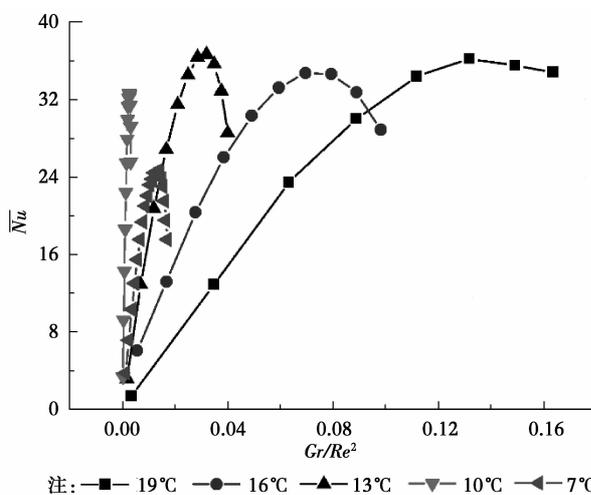


图 9 不同速度条件下平均对流换热系数随时间变化图
Fig. 9 Variation of \overline{Nu} with time in different initial water temperature condition

如下:

$$\overline{Nu} = \frac{hR}{\lambda_f} = 0.043877Re^{0.88001}Gr^{0.00272}Pr^{-0.12652}Ste^{-0.00982} \quad (11)$$

式中: R 为冰柱初始半径; λ_f 为特性温度下水流导热系数。其适用区间为: $350 \leq Re \leq 2750$, $0.0018 \leq Gr/Re^2 \leq 1.91$, $9.73 \leq Pr \leq 13.05$, $0.034 \leq Ste \leq 0.081$ 。以上准则数中所涉及的热物性参数的取值,均依据特性温度 $T_f = (T_{\infty} + T_m)/2$,其中 T_{∞} 为测量段水流温度。式(11)的方差值为 0.906 。实验结果及式(11)计算结果的比较见图 10。从图 10 中可见,实验值与计算值存在不同,究其原因,是由于本文计算模型的简化,测量系统误差及计算参数的不确定度等原因产生。

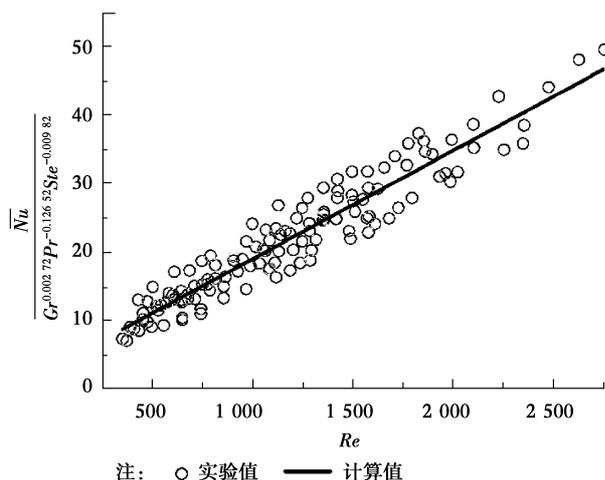


图 10 无量纲准则数关联式
Fig. 10 Correlations for dimensionless criterion

4 结论

实验研究了强迫与混合对流条件下水流顺掠冰柱融化过程的相界面移动规律和传热特征,通过对实验结果的分析 and 讨论,可以得到结论如下:

1) 构建了影像实验数据与冰柱相界面传热系数之间的映射关系。

2) 不同速度条件下的冰柱相界面位置变化趋势相似,相界面随时间呈单调递减幂函数形式变化。

3) 平均对流换热系数随水流速度或水流温度的增加而增大,且平均对流换热系数随时间变化呈递增趋势变化。

4) 在不同水流速度或水流温度条件下, \overline{Nu} 随着 Gr/Re^2 先变大经过最高点后,再减小。

5) 获得了水流顺掠冰柱融化过程 \overline{Nu} 与 Gr 、 Re 、 Pr 及 Ste 之间的关联式。

参考文献:

- [1] Sahagian D. Global physical effects of anthropogenic hydrological alterations: sea level and water redistribution [J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 25(1):39-48.
- [2] Biele J, Ulamec S, Hilchenbach M, et al. In situ analysis of Europa ices by short-range melting probes [J]. *Advance in Space Research*, 2010, 48(4): 755-763.
- [3] Choi I S, Kim J D, Kim E. Experimental characteristics of a storage tank on a harvest-type ice storage system [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(7):1407-1412.
- [4] Soltan B K, Ardehali M M. Numerical simulation of water solidification phenomenon for ice-on-coil thermal energy storage application [J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44(1):85-92.
- [5] Ho C J, Chen S. Numerical simulation of melting of

ice around a horizontal cylinder [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1986, 29(9): 1359-1369.

- [6] Cheng K C, Indaba H, Gilpin R. Effects of natural convection on ice formation around an isothermally cooled horizontal cylinder [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1988, 110:931-937.
- [7] Ameen F R. Stagnation-line melting of ice cylinders transverse to warm air flow [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1994, 17(6):381-390.
- [8] Yamada M, Fukusako S, Kawanami T, et al. Melting heat transfer characteristics of a horizontal ice cylinder immersed in quiescent saline water [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(18): 4425-4435.
- [9] Yamada M, Okada M. Enhancement of the melting of an ice cylinder by the combination with the condensation of a saturated steam flow [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2001, 6(1):43-56.
- [10] Scanlon T J, Stickland M T. An experimental and numerical investigation of natural convection melting [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2001, 28(2):181-190.
- [11] Sugawara M, Komatsu Y, Beer H. Melting and freezing around a horizontal cylinder placed in a square cavity [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2008, 45(1): 83-92.
- [12] Myers T G, Mitchell S L, Muchatibaya G. Unsteady contact melting of a rectangular cross-section material on a flat plate [J]. *Physics of Fluids*, 2008, 20(10): 1-12.
- [13] Hao Y L, Tao Y X. Heat transfer characteristics of melting ice spheres under forced and mixed convection [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2002, 124(5):891-903.

(编辑 胡玲)