

# 过冷却器结冰影响机制的实验

于航<sup>1</sup>, 詹光毅<sup>1</sup>, 孟二林<sup>2</sup>, 赵美<sup>1</sup>

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 苏州科技学院 环境科学与工程学院, 苏州 215009)

**摘要:** 从经典形核理论入手分析了过冷却器结冰的影响因素. 在此基础上, 搭建了过冷法制备冰浆实验台, 通过大量实验对过冷水在过冷却器内结冰过程展开研究, 结合边界层理论初步探究了流动与换热过程对过冷却器结冰的影响机制. 实验结果表明: 过冷水形核过程受换热壁面温度与流体扰动的共同影响; 当雷诺数  $Re$  较小或二次冷媒温度较低时的形核主要受换热壁温影响; 当  $Re$  数较大时的形核主要受到流体扰动的影响.

**关键词:** 过冷法; 过冷却器结冰; 流动与换热; 实验研究  
**中图分类号:** TK02 **文献标志码:** A

## Experimental Study on the Influence Mechanism of Icing in Supercooler

YU Hang<sup>1</sup>, ZHAN Guangyi<sup>1</sup>, MENG Erlin<sup>2</sup>, ZHAO Mei<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** This paper analyzed the factors that affect the freezing process in supercooler based on the classical nucleation theory. An ice slurry experiment bench was set up to survey freezing process in the supercooler. The impact mechanism of flow and heat transfer in supercooler was explored preliminarily, combining with boundary layer theory. The experimental results show that the supercooled water nucleation process is influenced by heat surface temperature and the disturbance of fluid. The nucleation is mainly affected by heat surface temperature when the  $Re$  number is small or secondary refrigerant temperature is low. Otherwise, the nucleation is mainly affected by the fluid disturbance when the  $Re$  number is large.

**Key words:** supercooled method; icing in supercooler; flow and heat transfer; experimental study

过冷法制冰系统具有系统简单、造价低、换热效率高优点, 得到国内外广泛关注. 但在制取过程中, 由于过冷水处于亚稳态, 易在过冷却器内提前解除过冷状态而结冰, 导致过冷却器发生冰堵, 影响系统运行的可靠性<sup>[1-3]</sup>.

国内外学者对过冷却器内结冰问题的研究主要集中在过冷却器结冰的影响因素: Wakamoto 等<sup>[4]</sup>使用过氧化氢处理铜表面减小换热壁面的粗糙度, 随着过氧化氢处理铜表面的次数增多, 过冷水的过冷度增大; Inaba 等<sup>[5]</sup>比较了过冷却器换热面积的影响, 发现即使换热面积相差两倍, 也对结冰影响不大, 表明换热面积对过冷水发生结冰的影响不大; 曲凯阳<sup>[6]</sup>提出了“实际最低不结冰温度”的概念, 该参数是基体表面固有性质, 认为  $Re$  在 0~10 000 范围内圆管内水流发生结冰的几率只与基体表面的“实际最低不结冰温度”有关; 高砂热学工业株式会社的研究表明过冷水能否保持稳定的过冷状态与水的流速、入口温度、出口温度、传热面的粗糙度均无关系, 只与传热的温度有关<sup>[7]</sup>; Okawa 等<sup>[8]</sup>使用碘化银充当固体杂质颗粒以此研究固体杂质颗粒对结冰的影响, 实验结果表明水的冻结温度与固体颗粒的尺寸和数量均无关系, 但与颗粒总表面积有关; Okawa 等<sup>[9]</sup>选择金属平板进行不同冷却速率下的结冰实验, 实验结果表明结冰发生的概率与冷却速率无关. 稻叶英男<sup>[10]</sup>认为在通常的流动状态下, 管内水的流动状态对结冰的发生没有影响; 何国庚等<sup>[11]</sup>提出当流速较小时, 水流动处于层流状态, 管内近壁面的水层温度梯度较大, 容易使过冷水提前消除过冷生成冰晶, 从而造成管内冻结; 冈田孝夫等<sup>[12]</sup>认为为了减少结冰现象的发生, 水流应比较规则, 避免漩涡, 管路不能有突扩、突缩或急弯等; 田中俊夫等<sup>[13]</sup>认为传热面附近水流速度应较高, 并提出了应在水的流动截面上产生回旋流以减少结冰; 刘良泉等<sup>[14]</sup>提出当

过冷却器进出口压力差增大时,说明管内存在较多冰晶,这时增大制冰液体流速,使分离力大于冰晶粒子粘附力,可以防止冰层建立。

从以上文献可以发现,学者们在过冷却器结冰影响机制方面持有不同的学术观点,并且尚无理论依据能够对该问题进行解释. 本文对水在过冷却器内的结冰过程进行了大量的实验研究,并结合经典形核理论对其在不同工况下的结冰机制进行了分析。

## 1 过冷却器结冰的影响因素

过冷水的结冰过程主要包括过冷、形核、生长,其中形核过程对结冰起决定性作用<sup>[15-18]</sup>. 形核就是形成作为结晶中心的晶核,即液相的质点构成可以继续生长的、稳定的结晶相微粒. 形核过程分为均质形核与异质形核:在液相开始结晶的整个区域内,自发地、均匀地由液相原子或分子聚集形成新相晶核称为均质形核;在液相内部悬浮的固相质点表面或基底上形成晶核称为异质形核. 均质形核的发生需要非常大的过冷度. 由于自然界存在的液相中或多或少都存在异质颗粒,因此大多数形核都是异质形核<sup>[18]</sup>. 本文将影响异质形核的因素归纳如下:

### (1) 液相过冷度

液相的过冷度提供了相变的驱动力. 过冷度的增大能够减小形核过程所需的形核功,形核功是由体系内的能量起伏(热激动)提供,形核所需形核功越小,体系内的能量起伏越容易达到形核的临界值,即液相更容易生成临界晶核。

### (2) 润湿角

视异质晶核形状为球冠状,晶核表面与基底表面形成润湿角 $\theta$ ,如图 1 所示. 润湿角的大小决定了异质基底对形核的贡献程度,新生晶体与基底间的润湿角越小,润湿程度就越好,所需形核功越小,越容易生成临界晶核. 曲凯阳<sup>[6]</sup>提出的各基体表面所具有的“实际最低不结冰温度”正是与该基体表面所具有的润湿角有关,基体表面的润湿角对异质形核的影响决定着该基体表面的“实际最低不结冰温度”;Wakamoto 等<sup>[4]</sup>使用过氧化氢处理铜表面以及 Okawa 等<sup>[8]</sup>在水中添加碘化银充当固体杂质颗粒均与异质基底润湿角对形核过程的作用有关。

### (3) 体系能量涨落水平

体系内能量起伏提供了形核所需的形核功. 体系内能量涨落程度越大,各微观区的能量随时间在

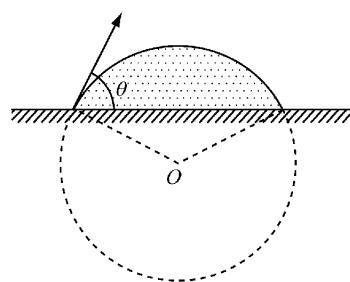


图 1 异质形核示意图<sup>[16]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of heterogeneous nucleation

平均值上下波动程度也越大,波动水平达到形核功的概率增加,更容易形成临界晶核。

过冷却器结冰实质上是管内流动与换热过程中的过冷水结冰现象. 本文认为流速对结冰的影响主要体现在流体扰动对结冰的影响,随着扰动增强,伴随速度脉动发生的温度脉动也越发强烈. 瞬时脉动使得体系内局部自由能波动程度加剧,当能量涨落水平达到临界尺寸冰核的阈值时,冰核自发生长结冰。

## 2 实验设计

### 2.1 实验目的

本文从影响换热温度的二次冷媒入口温度以及表征流体流动特性的 Re 数出发,实验研究了这两个参数对过冷却器结冰的影响,以及流动与换热过程对过冷却器结冰的影响机制。

### 2.2 实验装置

本文搭建了如图 2 所示的过冷法制冰实验台,包括三个循环:制冷剂循环、载冷剂循环和过冷水循环。

过冷却器是过冷法制冰系统的关键部件,本实验台的过冷却器是一个特殊设计的套管式换热器:换热管段长 2 m,水在内管中流动,载冷剂(质量浓度为 30% 的乙二醇溶液)在外管中流动,且流动方向相反. 内外管均采用光滑铜管,并使用厚度为 20~200  $\mu\text{m}$  环氧树脂清漆作为过冷却器内管内壁面的涂层。

### 2.3 实验方案

按过冷水循环—载冷剂循环—冷剂循环的顺序依次启动系统. 水在过冷却器中冷却至过冷状态,在过冷却器出口获得较大过冷度后撞击平壁解除过冷状态,并在蓄冰槽中生成冰浆. 冰浆流经蓄冰槽出口的 200 目滤网时水中的冰晶被分离出来,冷水继续在系统中循环. 使用 Agilent 34970A 数据采集仪记

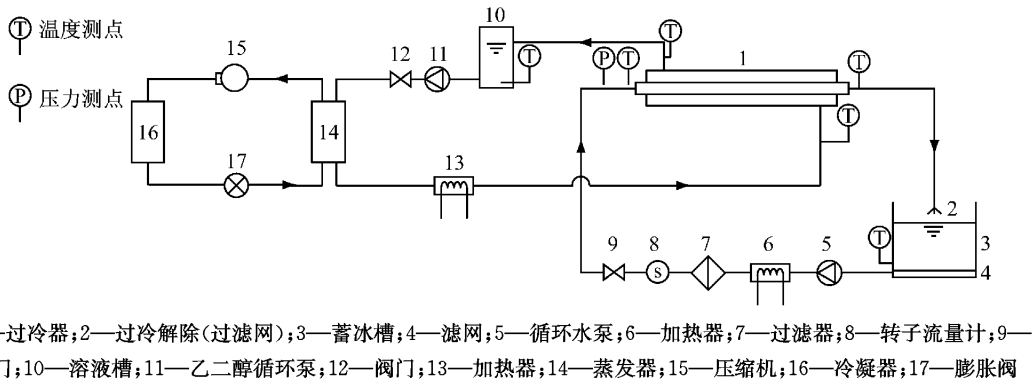


图 2 实验装置图

Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

录各个时刻过冷却器载冷剂进出口温度、过冷水进出口温度、蓄冰槽出口温度、过冷水循环流量和过冷水入口压力,并绘制成结冰过程曲线,至过冷却器内发生结冰时停机.实验工况见表 1.

表 1 实验工况

Tab.1 Experimental condition

过冷水 Re 数 $Re_w$	二次冷媒入口温度 $T_R$		
	-6 °C	-7 °C	-8 °C
2 820	I-1	II-1	III-1
5 640	I-2	II-2	III-2
8 460	I-3	II-3	III-3
11 280	I-4	II-4	III-4
14 100	I-5	II-5	III-5
16 920	I-6	II-6	III-6
19 740	I-7	II-7	III-7
22 560	I-8	II-8	III-8

### 3 实验结果

根据实验结果,本文将过冷却器结冰概括为两类.

#### (1) A 类结冰现象

A 类结冰过程如图 3 所示.制冰系统经过一定

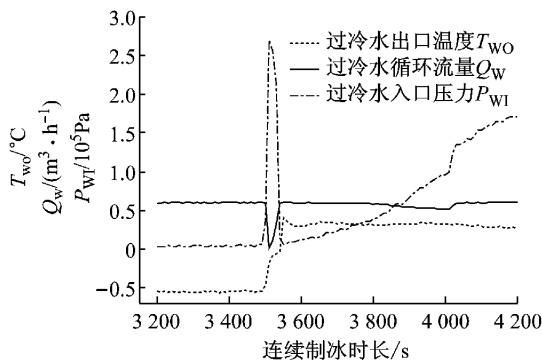


图 3 A 类结冰过程曲线

Fig.3 Category A freezing process curve

时间的连续稳定制冰(本例约 3 500 s)后,过冷水入口压力  $P_{wI}$  迅速升高至 0.27 MPa,同时过冷水循环流量  $Q_w$  迅速下降至 0,过冷水出口温度  $T_{wO}$  也迅速升高至 0.3 °C,表明过冷却器已结冰.该类结冰的共同特征是,过冷却器首先经历一个过冷水开始结晶并迅速完全堵塞管路的过程,但是由于管内所结的冰晶较疏松,受压后被流体带走,流体流动又迅速恢复.随后,过冷却器继续经历一个缓慢的结冰过程,并在过冷却器内壁面上形成一层致密、光滑的冰层.随着冰层不断增厚,过冷却器换热热阻逐渐增大,换热能力减弱,冰层增厚的速度变缓,直至水温升至 0 °C,冰层厚度不再增加.

#### (2) B 类结冰现象

B 类结冰过程如图 4 所示.连续制冰一段时间(本例约 4 200 s)后,过冷水入口压力  $P_{wI}$  与过冷水出口温度  $T_{wO}$  开始缓慢上升,过冷水循环流量  $Q_w$  基本不变.该现象表明,B 类结冰未引起过冷却器的完全堵塞,而是在贴近壁面处形成光滑且密实的冰层,冰层厚度缓慢增大,直至水温升至 0 °C,冰层厚度不再增加.

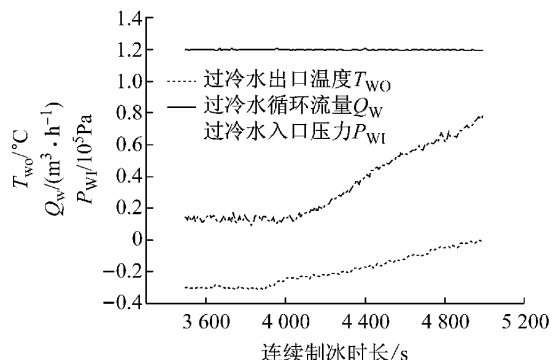
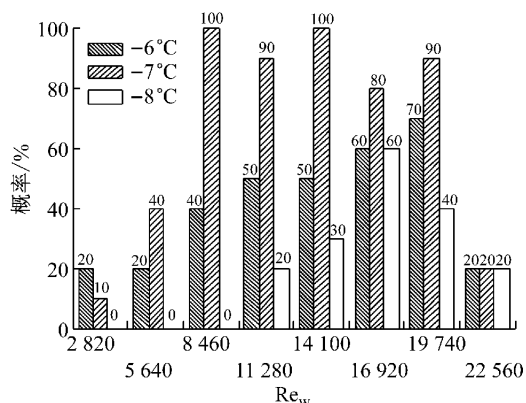


图 4 B 类结冰过程曲线

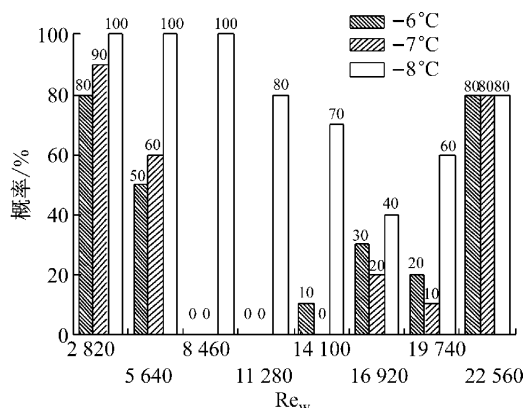
Fig.4 Category B freezing process curve

### (3) 概率分析

由于结冰的发生具有随机性, 实验中各工况分别重复实验 10 次, 图 5 是各类结冰的发生概率统计结果. 由图可知, 在过冷水雷诺数  $Re_w \leq 5640$  或载冷剂温度  $T_R \leq -8^\circ\text{C}$  时, 有超过一半的情况发生了 B 类结冰; 随着  $Re_w$  的增大, 当  $5640 < Re_w \leq 19740$  时, 发生 A 类结冰的概率增大, 尤其在载冷剂温度  $T_R = -7^\circ\text{C}$  的工况下, 各组实验发生 A 类结冰的概率均超过了 80%; 继续增大  $Re_w$ , 当  $Re_w > 19740$  时, 发生 B 类结冰的概率又开始增大.



a 发生 A 类结冰的概率



b 发生 B 类结冰的概率

图 5 发生各类结冰的概率

Fig. 5 Probability of occurring all categories freezing process

## 4 分析与讨论

根据边界层理论与经典形核理论, 在层流底层与紊流核心区中影响结冰的主导因素不同: 层流底层中黏滞力占绝对优势, 流体保持层流特征, 能量涨落水平小, 且越贴近壁面处过冷度越大, 形核功较小; 而紊流核心区的流体扰动剧烈, 伴随发生剧烈的温度脉动, 使得体系内局部自由能波动程度加剧, 能

量涨落水平较大, 但过冷度小于层流底层, 形核功较大.

当过冷水雷诺数  $Re_w \leq 5640$  或载冷剂温度  $T_R \leq -8^\circ\text{C}$  时易发生 B 类结冰. 这与何国庚等<sup>[11]</sup>得出的当流速较小时管内易结冰的实验结果相符, 但本文认为这主要是由于此时的换热壁面温度对形核起主导作用, 形核过程发生在层流底层, 冰核沿壁面生长并形成环状冰层; 随着管壁冰层厚度增加, 换热热阻增大, 导致结冰过程比较缓慢.

随着过冷水  $Re$  数增大, 当  $5640 < Re_w \leq 19740$  时, 流体扰动增强, 此时发生 A 类结冰的概率增大. 这与冈田孝夫等<sup>[12]</sup>得出的为减少结冰现象的发生, 水流应比较规则, 避免漩涡的结论基本相符, 但  $Re_w$  的取值不能过低, 否则易发生 B 类结冰. 对于 A 类结冰, 流体扰动对形核起主导作用, 形核过程发生在紊流核心区, 临界冰核迅速向四周生长并在浮力及扰动作用下粘附于壁面, 直至完全堵塞管路. 但是, 由于生成的冰晶较疏松, 在流体压力作用下被冲开带走. 同时, 由于壁面粘滞力的作用, 大于临界粒径的残留冰晶即成为继续二次形核过程的冰核.

继续增大过冷水  $Re$  数, 当  $Re_w > 19740$  时, B 类结冰发生的概率重新增大. 这是因为随着过冷水  $Re$  数增大, 管内流体的冲刷力增大, 紊流核心区中所形成的临界冰核在生长过程中大部分冰晶就已被流体冲刷带走, 只残留少量冰晶粘附于壁面, 因此呈现出与 B 类结冰类似的特征. 由于该类结冰的形核主要受到扰动作用, 其形核过程仍发生于紊流核心区, 因此在本质上仍为 A 类结冰.

## 5 结论

本文通过大量的实验和对实验数据的分析, 得到以下主要结论:

(1) 过冷水形核过程受换热壁面温度与流体扰动的共同影响;

(2) 可以将过冷却器结冰概括为 A、B 两类结冰现象;

(3) 当  $Re$  数较小或二次冷媒温度较低时的形核主要受换热壁温影响. 换热壁温越低, 形核越容易在壁面处生成并形成环状冰层, 发生 B 类结冰.

(4) 当  $Re$  数较大时, 流体扰动增强, 冰晶形核受流体扰动的影响增强, 受换热壁温的影响降低. 当流体扰动越强烈, 管内流体的冲刷力越大, 形核过程主要发生在紊流核心区, 本质上发生 A 类结冰.

## 参考文献:

- [1] Yoon J I, Moon C G, Kim E, *et al.* Experimental study on freezing of water with supercooled region in a horizontal cylinder[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2001, 21(6): 657.
- [2] Castaing-Lasvignottes J, David T, Bedecarrats J, *et al.* Dynamic modelling and experimental study of an ice generator heat exchanger using supercooled water [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(20): 3644.
- [3] Inaba H, Inada T, Horibe A, *et al.* Preventing agglomeration and growth of ice particles in water with suitable additives[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2005, 28(1): 20.
- [4] Wakamoto S, Nakao K, Tanaka N, *et al.* Study of the stability of supercooled water in an ice generator [J]. *ASHRAE Transactions-American Society of Heating Refrigerating Airconditioning Engineers*, 1996, 102(2): 142.
- [5] Inaba H, Takeya K. Influence of certain factors on supercooling phenomenon of still water[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, 1993, 59(567): 3557.
- [6] 曲凯阳. 过冷水制取的基础与应用研究[D]. 北京:清华大学, 2000.  
QU Kaiyang. The fundamental and applied research of supercooled water preparation [D]. Beijing: Tsinghua University, 2000.
- [7] 曲凯阳,江亿. 日本过冷水动态制冰研究开发现状[J]. *暖通空调*, 1998, 28(3): 31.  
QU Kaiyang, JIANG Yi. Research and development status in dynamic freezing of supercooled water in Japan[J]. *HV&AC*, 1998, 28(3): 31.
- [8] Okawa S, Saito A, Minami R. The solidification phenomenon of the supercooled water containing solid particles [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2001, 24(1): 108.
- [9] Okawa S, Saito A, Suto H. The experimental study on freezing of supercooled water using metallic surface[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25(5): 514.
- [10] 曲凯阳,江亿. 各种因素对过冷水发生结冰的影响[J]. *太阳能学报*, 2003, 24(6): 814.  
QU Kaiyang, JIANG Yi. Factors affecting supercooled water freezing occurrence [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2003, 24(6): 814.
- [11] 何国庚,吴锐,柳飞. 过冷水法冰浆制取的实验设计与分析[J]. *低温与超导*, 2006, 34(4): 303.  
HE Guogeng, WU Rui, LIU Fei. The experimental design and analysis of ice slurry generator based on supercooled water methods [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2006, 34(4): 303.
- [12] 冈田孝夫,小此木时雄,林利雄. 蓄热用制冰法装置[J]. *公开特许公报*, 1989, 昭 64-90973.
- [13] 田中俊夫,岩本嘉夫,角屋正人. 遇冷卻水の製造方法[J]. *公开特许公报*, 1988, 昭 63-271074.
- [14] 刘良泉,刘志强,王小倩,等. 冰浆生成器中抑制冰粘附的研究[J]. *真空与低温*, 2011, 17(3): 140.  
LIU Liangquan, LIU Zhiqiang, WANG Xiaoqian, *et al.* The study on prevention of ice adhesion in ice slurry generator [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2011, 17(3): 140.
- [15] 徐祖耀. 相变原理[M]. 北京市: 科技出版社, 2000.  
XU Zuyao. Phase transition principle [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [16] 张克从. 近代晶体学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
ZHANG Kecong. Modern crystallography [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [17] 张寅平. 相变贮能——理论和应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996.  
ZHANG Yiping. Phase change energy storage—theory and application [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1996.
- [18] 方大成. 凝固科学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
FANG Dacheng. Scientific basis of solidification [M]. Beijing: Science Press, 2013.