

圆柱腔体内水凝固过程热对流实验研究

李 恒 白博峰 陆 军 郭烈锦

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要 本文通过匹配折射率和标定技术, 应用 PIV 测量了圆柱腔体内水在底部冷却过程中热对流的变化规律。实验发现了主流场的涡结构; 另外在底部拐角处出现新的涡, 并且不断向上推移; 冷却后期整个液相区出现流动反转现象, 靠近壁面处水向上流动, 中心区域水向下流动。因为存在着复杂的热交换和密度变化, 水在凝固过程中存在流动结构失稳, 使得液相区内发生强烈的热对流。最后流动强度减弱, 重新形成稳定结构。结合泰勒不稳定性分析, 本文对这一过程给出了合理解释。

关键词 PIV; 圆柱腔体; 热对流

中图分类号: O359 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2006)06-0977-04

EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL CONVECTION DURING THE WATER SOLIDIFICATION PROCESS IN CYLINDER CAVITY

LI Heng BAI Bo-Feng LU Jun GUO Lie-Jin

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract The thermal convection in cylindrical cavity during the solidification of water was studied by PIV with the techniques of refractive index matching and calibration under the condition that water was cooled at bottom. There was a vortex structure in the main liquid region. During the solidification process, a new small vortex flow occurred on the corner of cavity bottom and moved upward gradually. The original direction of vortex was reversed in liquid region at the final stage of cooling. The water which was close to the sidewalls flowed upward, and in the center region the water flowed downward. Instability of flow due to complex heat exchange and density variation leads to strong thermal convection in liquid region during the water solidification process. At the end of solidification process, intensity of flow decayed and the stable structure was rebuilt. This phenomenon was explained by Taylor instability analysis.

Key words PIV; cylinder cavity; thermal convection

1 引 言

在晶体生长、核反应堆冷却和洋流运动等方面广泛存在着热对流现象。由于水在 4°C 时存在密度最大值, 使其自然对流变得十分复杂^[1]。对于水的热对流研究主要采用数值模拟的方法^[2,3], 由于近些年来, 测量技术的不断提高, 激光全息^[4]、阴影照相^[5]和 PIV^[6,7]等技术也广泛应用于实验研究。

目前国内外实验主要是在方腔中进行的, 由于圆柱腔体结构的特殊性, 缺乏水在圆柱腔体内的自然对流实验数据, 对于水因为存在密度最大值而出现的结构不稳定现象也没有比较深入的实验研究。本文正是在解决 PIV 技术测量圆柱腔体所引起的折

射率不匹配问题和视场畸变的基础上, 研究水在凝固过程中, 液相区流场的变化规律, 结合泰勒不稳定性分析, 解释了水凝固过程中出现的结构失稳和重构现象。

2 实验方法

2.1 实验装置

图 1 为实验系统的示意图。基本原理是, 氮气进入到 DEWAR 中的紫铜盘管, 被冷却到一定的温度, 然后通过紫铜管排出, 对实验段进行冷却。冷端的温度可以通过调节阀进行控制。这套回路简单可靠, 温度控制精度高 ($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$), 对实验段本体流动冲

收稿日期: 2006-01-22; 修订日期: 2006-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50536040; No.50521604); 新世纪优秀人才支持计划 (No.NCET-04-0923)

作者简介: 李 恒 (1980-), 男, 陕西西安人, 硕士生, 主要从事晶体生长的双扩散对流实验研究。

击小。

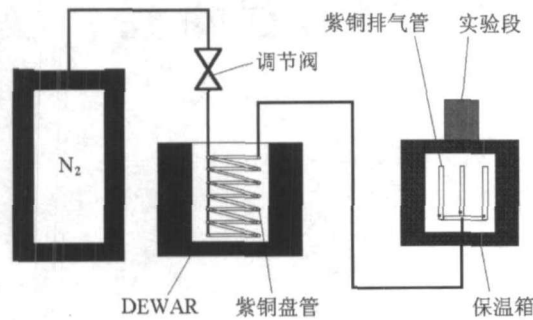


图 1 实验系统示意图

实验段由圆柱形石英玻璃视筒、石英玻璃平板、有机玻璃平板和紫铜板组装而成，如图 2 所示。石英玻璃的透光率可以达到 0.84 以上。石英玻璃视筒直径 50 mm、壁厚 2 mm、高度 50 mm，底部是厚度为 10 mm 的紫铜板，保证良好的导热性能。外部是石英玻璃平板组成的方腔，壁厚 5 mm。铜板底部冷却，利用铜-康铜热电偶来监测实验过程中的冷却温度。

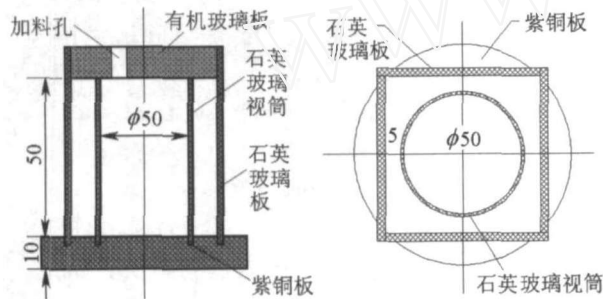


图 2 实验段本体主视图、俯视图

2.2 实验测量技术

2.2.1 PIV 系统设置 本实验应用德国 Lavisision 公司的 FLOWMASTER PIV 系统进行测量。激光器采用 Nd:YAG Gemini 200-15 激光器单脉冲能量为 200 mJ，产生波长为 532 nm 的绿光。CCD 相机为 Nikon ImagerPro4M，2048×2048 像素，保证了拍摄达到最佳效果。采用单帧模式拍摄，相邻照片的时间间隔为 1 s，通过互相关分析处理。示踪粒子选用 10 μm 镀银的中空玻璃微珠。

2.2.2 PIV 系统的标定 在测量圆柱腔体内的流场时，由于流体和壁面边界折射率不同，引起光束的偏折，使得流场测量结果发生畸变。本实验为消除圆柱体壁面折射率的影响，方腔体内充满与被测工质相同浓度的工质，这样就减弱了由于不同折射率所引起的测量误差，并且起到降低反射光的强度，

保护 CCD 相机的作用。

为了进一步降低由于折射率不同所带来的测量误差，采用特制的标定板，在实验前应用 PIV 对圆柱腔本体内的视场进行标定，应用标定得到的结果，对实验中所得到的数据进行修正，使得最后的处理结果更加准确。

3 实验结果与分析

3.1 测量结果与分析

稳定状态时，流体中的各种力是平衡的，但是在一定条件下，由于外界作用，这种平衡变得不稳定，甚至失稳而形成自然对流。粘性摩擦作用是对抗这种不稳定的主要因素，此外热传导作用也能阻碍失稳，这是因为传热趋向于减小不同区域的温度差。只有当温度差所引起浮力的失稳作用足以克服粘性和导热的致稳作用时，对流运动才能发生。对于单相流体，可以用 Rayleigh 数来描述这种形态的失稳条件：

$$Ra = \frac{g\alpha\Delta T l^3}{k\nu} \quad (1)$$

其中 g —重力加速度， α —热扩散系数， ΔT —温度差， l —特征尺寸， k —热导率， ν —运动粘度。这里的 ΔT 选取冷端温度和室温之差。Rayleigh 数的物理意义是流体的浮升力和粘性力之比，反映自然对流的产生和强度。已有研究表明^[9]，当 $Ra > 1100$ 时，对流开始形成，而当 $Ra > 10^8$ 时，将产生严重的紊流。通过计算，本实验径向 $Ra = 3573 > 1100$ ，因此可以发生热自然对流。

开始实验前，先将准备好的去离子水分别注入实验段本体和方腔内，注入高度为 45 mm，静置 1 个小时，使其充分稳定并达到室温 (27°C)。调整 PIV 系统到测量状态，选择圆柱腔体中心截面为测量面。实验开始，保持冷端温度为 -8°C。

实验开始 2 分钟后，腔体内水的流动趋于稳定。图 3 给出了此后不同阶段的流场测量结果。在冷却前期，液相区靠近垂直壁面的水向下流动，中心区域的水向上流动，形成比较大的涡，靠近底部的水从边缘向中心流动。这是因为圆柱壁的导热系数 (1.2 W·m⁻¹K⁻¹, 0°C) 大于水的导热系数 (0.55 W·m⁻¹K⁻¹, 0°C)，而圆柱壁与冷端铜板直接接触，因此，近圆柱壁侧的水温比远离壁面的水温更低，同时在轴向上，水温逐渐减小。该温度分布特点与 Bridgman 晶体生长系统相似。在径向形成比较大的温度梯度，靠近壁面的水向下流动，中心区域的水向上流动，中心区域靠近上侧的水由中心向壁面两侧流动，靠近下侧的水由壁面两侧向中心流动，

形成典型的涡。

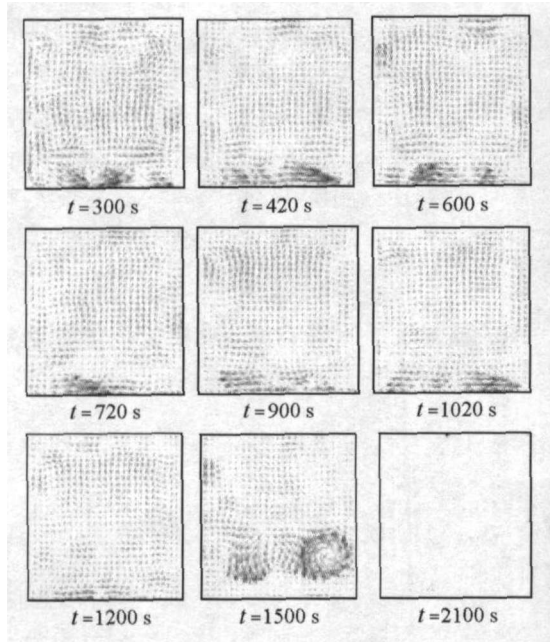


图3 水凝固过程中的流场变化(速度量级 10^{-6} m/s)

随着冷却过程的进行,液相区内温度梯度逐渐变小,水的流动速度也就逐渐变小。靠近壁面向下流动的水,在底部发生了流动方向的变化,绕过底部拐角区域,改向中心流动。这是因为水的温度一直降低,当水温降到 4°C 时,密度达到最大值,其首先出现的位置位于底部拐角处。附近流动的水不能推动它流动,从其附近绕流,流向中心区域。

随后,在底部拐角附近形成新的小涡。这是因为聚集在拐角处的水温继续降低,密度比 4°C 的时候要小,受浮升力作用,开始有向上流动的趋势。随着密度最大层不断向上推移,浮升力增大,终于底部的水克服了自身的重力和上部水的压力,向上流动,周围的水补充过来,从而形成涡。随着水温的降低,涡不断向上推移。

25 分钟后,底部开始凝固。这时水的流动速度已经变弱,由于最大密度层的位置已经非常靠上,先前沿着壁面向下流动的水,已经完全改变方向,向上流动,中心区域的水向下流动,出现流动翻转现象。小涡继续向上移动。35 分钟后,冰层的厚度增加,水的流动速度几乎停止。

水被冷却 6 分钟后,出现了流动结构失稳现象,如图 4 所示。首先在底部铜板上出现一个白色薄层,层界面相对比较平整。随着温度的降低,界面向上推移,层向上扩展,形成了一个中部高于周围的凸层结构。21 分钟后,层最上端达到 5 mm 时,界面中部

发生破裂,界面下白色水溶液从破裂处分为两股柱状向上排出,排出速度比较大,向周围扩散极少,非常集中,原先底部白色薄层消失。当高密度水柱扩展到 10 mm 高度时,不再向上扩展,开始向水平方向扩散,两股柱状结构相互混合,形成团状结构,然后向周围扩散,颜色逐渐变淡(密度变小)。最终团状结构消失,扩散完毕。团状结构扩散后期,液相区底部开始出现层界面和分层结构,界面比较平整,但是左部向下倾斜。整个失稳、重构过程历时 4 分钟,随后底部水开始凝固。



图4 流动结构的失稳和重构

这里观察到的白色物质是沉积在实验段底部的示踪粒子群,它们的密度略大于初始水的密度。冷却开始时底部水温度降低,当密度增大到与底部的示踪粒子群密度相当时,有大量的示踪粒子能够悬浮在底部很薄的一层水中,出现白色薄层。随着液相区内温度降低,与底部示踪粒子群密度相当的水层厚度增加,但是底部靠近壁面拐角处的水温度低,流动速度比较大,并且存在着小涡结构,很难在这部分区域内形成大量示踪粒子的聚集,因此形成了白色凸层结构。当底部水层的温度到 4°C 时,密度达到最大值,此后密度开始减小,在浮升力作用下,有向上运动的趋势,但是仍然无法克服自身的重力和上部水的压力,这也是形成白色凸层结构的一个原因。随着最大密度层向上推移,凸层内水的浮升力超过重力和压力时,系统失稳,凸面破裂,凸层内的水通过破裂处开始向上部排出,流动速度比较大,

其中夹带着大量的示踪粒子。当水柱到达一定高度时,受以下因素的影响速度减小,不再向上扩展:

(1)周围液相区温度大于水柱的温度,通过热交换,水温升高,密度增大;(2)水柱向上的过程中要克服重力、粘性力和摩擦力的影响,动能减小。这时水柱中夹带的示踪粒子的密度与水密度相差较大,开始向周围扩散,由于密度较大,向上扩散难度大,因此主要是向下部和水平方向扩散。从流场图中可以看出,当水柱出现时,液相区底部流场被破坏,变得紊乱,并逐渐向上影响整个液相区内的流动。这是因为,底部水温度较低,从凸层排出后,与上部温度较高的水相混合;同时,结冰的过程中要释放潜热,加热了靠近冰层的水,这样在液相区内存在复杂的热交换和密度变化,从而形成强烈的热对流。在系统失稳、重构的过程中,流场中的流动明显分为两层:上层流动结构开始阶段变化不大,当稳定被破坏后,很快又能得到恢复;下层流动结构受影响很大,变得非常复杂;两层之间存在一个界面,其位置在水柱所到达最高处附近,也是系统最终稳定后,形成的分层结构的最上层附近。因为水是单组元液体,分层主要是由于液相区内密度不同造成的。

由于液相区内的换热被强化,整个系统趋于稳定,示踪粒子最后充满这个液相区。系统稳定后,出现稳定的分层结构,水从下部开始凝固。界面不完全是由于腔体边界条件没有完全对称所引起的。

这种现象的物理机制是水在凝固过程中流动结构的失稳、重构过程。根据泰勒不稳定性分析,对于密度分别为 ρ_1 和 ρ_2 两种流体间的界面,如果上层流体密度 ρ_1 大于下层流体的密度 ρ_2 ,应存在临界波长 L_c ,当扰动波长 $L < L_c$ 时界面才是稳定的。当 $L > L_c$ 时,界面失稳,系统稳定性被破坏。此时系统内因为存在温度和密度的不均匀,要进行自我调整,发生扩散和强烈的热对流,最终达到另一稳定结构。

4 结 论

本文通过匹配折射率和标定技术,应用 PIV 技术测量了圆柱腔体内去离子水在底部冷却过程中热

对流的变化规律,揭示了凝固过程中液相区的热对流流动结构特征及其变化规律。圆柱管壁的导热系数和水在 4°C 时存在密度最大值,这两个因素对流动结构有很大影响,主流区域出现涡结构,随后在底部拐角处出现新的涡,并且向上推移,冷却后期出现流动反转现象。水在凝固前存在流动结构的失稳、重构过程,这是由于液相区内扰动波长大于稳定条件的临界波长造成的,而系统通过对流、扩散等方式能够建立另一个稳定结构。

致 谢 感谢毛靖儒研究员、林梅老师、王顺森硕士在实验测量方面提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] Z Ilken, A Erek. A Correlation for Planar Solidification of Water. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 1996, 23(5): 679-685
- [2] A Osoric, R Avila, J Cervantes. On the Natural Convection of Water Near Its Density Inversion in an Inclined Square Cavity. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 4491-4495
- [3] M Mamou, L Robillard, P Vasseur. Thermoconvective Instability in A Horizontal Porous Cavity Saturated with Cold Water. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1999, 42: 4487-4500
- [4] J I Yoon, C G Moon, E Kim, et al. Experimental Study on Freezing of Water with Supercooled Region in a Horizontal Cylinder. *Applied Thermal Engineering*, 2001, 21(??): 657-668
- [5] T J Scanlon, M T Stickland. An Experimental and Numerical Investigation of Natural Convection Melting. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 2001, 28(2): 181-190
- [6] S Y Wang, C X Lin, M A Ebadian. Study of Double-Diffusive Velocity During The Solidification Process Using Particle Image Velocimetry. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1999, 42: 4427-4445
- [7] S Y Wang, C X Lin, M A Ebadian. Vortex Flow of Low Concentration $\text{NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ Solution During The Solidification Process. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1999, 42: 4153-4163
- [8] C Ghenai, A Mudunuri, C X Lin, et al. Double-Diffusive Convection During Solidification of Metal Analog System ($\text{NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$) in a Differentially Heated Cavity. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, 28: 23-35
- [9] 周尧和, 胡壮麟, 介万奇. 凝固技术. 北京: 机械工业出版社, 1998