

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20160015

朝下沟槽结构表面池沸腾换热

钟达文, 孟继安, 李志信

(清华大学航天航空学院, 工程热物理研究所, 北京 100084)

摘要: 核电站熔融物堆内滞留技术是一项关键的严重事故应对策略, 该策略已被核电站广泛采用。为增强核电站压力容器下封头外表面的沸腾换热能力, 实验研究了常压下朝下沟槽结构表面的池沸腾换热, 测量了倾角 5°、30°、45°、60° 和 90° 下热通量随壁面过热度的变化, 获得了相应倾角下的临界热通量 (CHF)。与光表面相比, 朝下沟槽结构表面的 CHF 可提高 65%~90%。实验观察发现, 在高热通量下朝下沟槽结构表面气泡运动形态存在蒸汽膜和波浪蒸汽层两种结构。分析表明, 沸腾换热显著增强、临界热通量大幅提高的原因是沟槽结构大幅增加了换热面积同时还明显改善了表面的润湿性。

关键词: 传热; 表面; 相变; 气泡; 临界热通量; 倾角

中图分类号: TQ 026.4

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2016) 09—3559—07

Saturated pool boiling from downward facing structured surfaces with grooves

ZHONG Dawen, MENG Ji'an, LI Zhixin

(Institutes of Engineering Thermal Physics, School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In-vessel retention is a key severe accident management strategy now widely adopted by some nuclear power plants. The saturated pool boiling heat transfer coefficients and critical heat flux (CHF) were measured from downward facing structured surface with grooves in deionized water to enhance the CHF. The orientations were 5°, 30°, 45°, 60° and 90° (vertical). The results showed that the nucleate boiling heat transfer coefficients and the local CHF for structured surface with grooves were consistently higher than those for plain surface. Compared with plain surface, the CHF increase could reach 65%—90% for structured surface. The vapor blanket and wavy vapor layer bubble structures with different CHF trigger mechanisms on the downward facing surface at high heat fluxes were observed on structured surface. The enhancement of the local CHF and the nucleate boiling heat transfer coefficients was mainly due to the significantly increase of heat transfer area and the grooves that effectively improve surface wettability.

Key words: heat transfer; surface; phase change; bubble; critical heat flux; orientation

引 言

自美国三哩岛核事故发生后, 研究人员发现,

将严重事故条件下的压力容器浸没在冷却水中能够实现堆内熔融物滞留压力容器的目的, 由此提出了堆内熔融物保持策略 (in-vessel retention, IVR)。

2016-01-06 收到初稿, 2016-05-31 收到修改稿。

联系人: 孟继安。第一作者: 钟达文 (1989—), 男, 博士研究生。

基金项目: 大型先进压水堆核电站重大专项子课题项目 (2011ZX06004-008); 国家重点基础研究发展计划项目 (2013CB228301)。

Received date: 2016-01-06.

Corresponding author: MENG Ji'an, mja@tsinghua.edu.cn

Foundation item: supported by the National Science and Technology Major Project of China (2011ZX06004-008) and the National Basic Research Program of China (2013CB228301).

目前在压水堆核电站中, IVR 已经成为缓解严重事故的一项关键措施。在核电站发生严重事故情况下, 通过非能动方式向反应堆腔室充水, 使压力容器底部下封头淹没, 在压力容器外部发生池沸腾换热冷却压力容器内部熔融物, 是实现 IVR 的一项重要策略^[1-4]。保证热量完全由池沸腾换热带走的关键在于使朝下换热表面的热通量不超过临界热通量。因此, 提高朝下表面沸腾换热的临界热通量、增强压力容器外表面的沸腾换热就显得格外重要。

近年来, 朝下表面池沸腾换热引起了广大研究人员的关注。Vishnev^[5]、El-Genk 等^[6]、Brusstar 等^[7]、Kim 等^[8]、Rouge^[9]实验研究了一维朝下平板表面沸腾换热状况; Theofanous 等^[10-11]研究了一维朝下曲面的沸腾换热状况; Chu 等^[12-13]、Haddad^[14]、Yang 等^[15]和 Noh 等^[16-17]则实验研究了三维朝下半球下封头外表面的沸腾换热状况。研究表明, 临界热通量随倾角的增大而增加(换热表面竖直布置时的倾角定义为 90° , 水平朝下布置时的倾角为 0°)。Yang 等^[15]研究了多孔涂层对朝下曲面的沸腾强化, 表明涂层能较好地强化沸腾换热, 提高临界热通量。然而多孔涂层技术目前还存在性能不稳定、寿命短、可靠性不足等缺陷, 对于核电站设计寿命 60 年的情况, 采用涂层强化朝下表面沸腾换热存在较大的不确定性。因此, 为了增强 IVR 的安全裕度, 迫切需要开发出性能优良、可靠性高、寿命长的强化沸腾换热的朝下结构表面。本文实验研究了朝下沟槽结构表面的沸腾换热性能, 测量了不同倾角下沸腾换热的临界热流。

1 实验装置和实验方法

实验装置由实验件系统、操作条件控制系统、数据采集系统等组成, 图 1 为实验装置照片。实验采用电加热的方法提供实验件沸腾换热所需热量, 通过调节电加热器功率控制换热表面的热通量, 实验通过观察换热表面沸腾时的气泡运动形态和测量实验件表面的温度变化来判断沸腾危机是否发生。

实验件系统包括可旋转水箱和实验组件, 其中可旋转水箱设置有 5 个观察窗, 可以方便地在任意倾角观察实验件表面的沸腾状况。实验组件密闭安装在旋转水箱中并可 360° 自由旋转, 实验组件包含实验件和实验件隔热固定组件, 实验件为带电加热棒的方形紫铜块 ($100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 75\text{ mm}$), 如图 2 所示, 内插 24 根长 136 mm、直径 9.22 mm、总功率为 24 kW 的电加热器, 24 根电加热器分 4



图 1 实验装置

Fig.1 Experimental apparatus

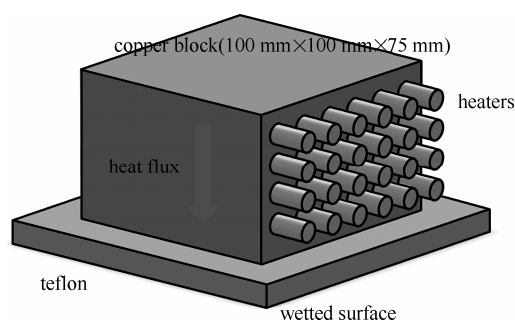


图 2 实验组件

Fig.2 Heater assembly

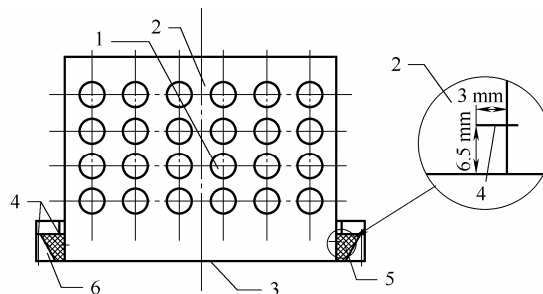


图 3 热电偶布置

Fig.3 Thermocouple arrangement

1—heater; 2—copper block; 3—hot surface; 4—thermocouples; 5—teflon;
6—stainless steel pressure plate

组均匀布置以保证热通量均匀。通过晶闸管整流器整流电源, 调节电加热器的电压, 从而控制实验件换热表面的热通量。实验件的一个平面即实验表面浸没在水中, 而其他表面密封在密闭空间并与水隔热, 为确保实验中沸腾传热仅发生在实验表面, 在实验件周边用隔热密封件包裹。同时将实验铜块、隔热密封件和其他密封件一起固定, 通过旋转转动机构就能自由控制平板的倾角。在离换热表面垂直距离 6.5 mm 处, 铜块两侧面各布置 5 个直径 0.5 mm

的K型铠装热电偶,如图3所示。通过傅里叶导热定律计算获得换热表面的平均壁温;2个直径1mm的热电偶布置在换热表面附近的去离子水中,用于测量水温;2个直径1mm的热电偶布置在铜块顶部,用于监测实验件顶部的温度,以免实验件和电加热器超温烧毁。

实验过程中通过操作控制系统调节热水箱内的水温和压力,使水箱内去离子水处于饱和态;通过控制水冷机组将实验过程中多余的热量排入环境。数据采集系统主要包括热电偶、压力变送器以及高速摄影仪、功率变送器等数据采集和监控设备。所有测点的温度、压力、电压和电流信号都经过数据采集系统输入计算机实时显示并存储。在给定倾角下,逐步提升加热功率,使实验件在设定功率下的换热达到稳态工况,从而获得热通量和壁面过热度随时间的变化曲线。当发生沸腾危机时,壁面温度飞升,为保证整个实验件的安全,切断加热器的电源,记录相关数据。

电加热器尺寸、热电偶插孔孔径以及插孔距换热表面的距离使用游标卡尺测量,不确定度为 $\pm 0.02\text{ mm}$,热电偶测温不确定度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,实验过程中的误差主要来自于晶闸管整流器调节功率所造成的波动和热电偶测温误差。在接近临界热通量时,热通量的增加幅度控制在3%以内,沸腾危机发生的判据为温度出现 $5\sim 15^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 的急剧跃升,临界热通量为温度急剧跃升时的热通量与前一个稳定状态时的热通量的算术平均值。换热表面的热通量由式(1)计算

$$q = \eta \frac{Q}{A} = \eta \frac{VI}{L^2} \quad (1)$$

表面温度由式(2)计算

$$T_w = T_m - \frac{q}{\lambda x} \quad (2)$$

热通量 q 的不确定度为4.0%。表面温度 T_w 的不确定度为5.0%。

2 实验表面

实验表面-沟槽结构表面如图4所示,其中,沟槽结构表面的沟槽宽度 B 为1mm,深度 K 为1mm,间距 S 为2mm,沟槽结构表面相对于光表面的面积增加率为98%。在实验之前,提前使用丙酮擦拭换热表面,去除换热表面的污渍。

3 实验结果

图5显示了沟槽结构表面在5个倾角下的热通

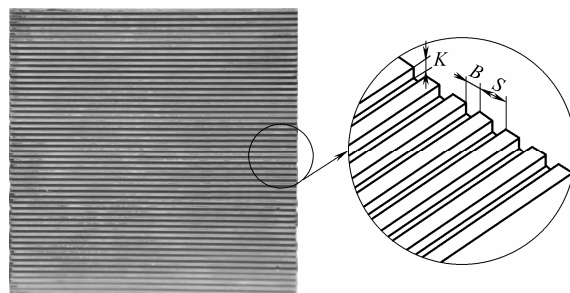


图4 沟槽结构表面

Fig.4 Structured surface with grooves

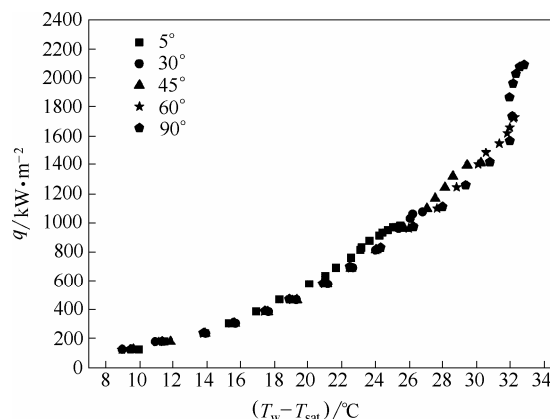


图5 沟槽结构表面的沸腾曲线

Fig.5 Boiling curves for structured surface with grooves

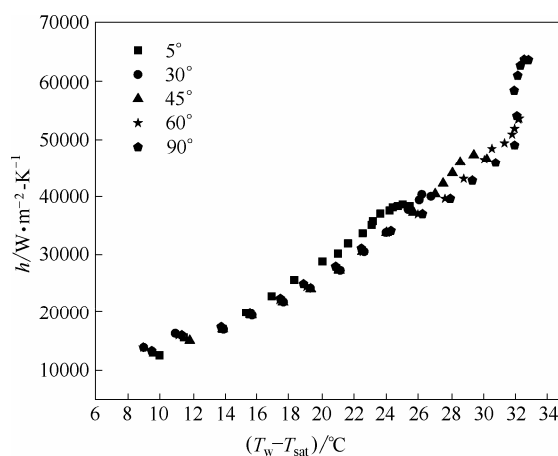
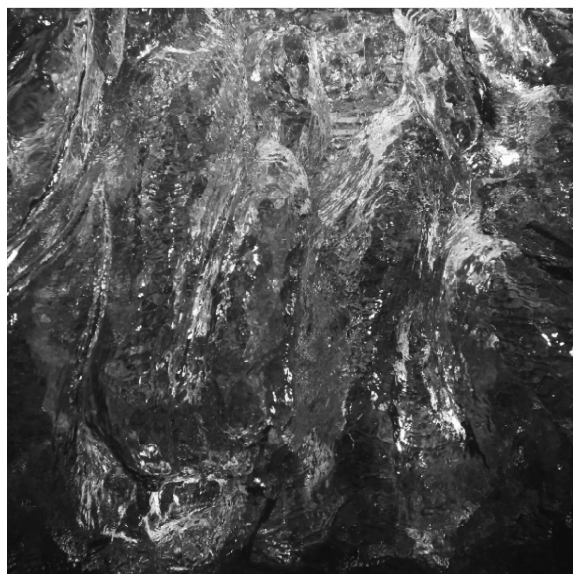


图6 传热系数随壁面过热度的变化

Fig.6 Heat transfer coefficient vs superheat

量随壁面过热度的变化。从图中可以看出,热通量随壁面过热度增加而增加,CHF随着倾角的增大而增大。图6为沟槽结构表面的沸腾传热系数随壁面过热度的变化,表明传热系数随壁面过热度的增加而增大。图7(a)为倾角 90° 、热通量约 $130\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 时换热表面的沸腾状况,沟槽结构表面的沟槽使得在较小的过热度下汽化核心就能被激活。由图7可以看到气泡大部分从沟槽内产生,并形成稳定的汽化核心。随着热通量的增加,换热表面的气泡逐渐

(a) $q=130 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ (b) $q=390 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ (c) $q=1111 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 

(d) CHF

图 7 倾角 90°时换热表面的沸腾状况

Fig.7 Pool boiling photographs on tested surface at $\theta=90^\circ$

增多,同时气泡相互聚合形成较大的气泡,如图7(b)、(c)所示,大气泡逐渐覆盖整个换热表面,从图中可以观察到沟槽结构能够更好地减少气泡聚合,有利于打破气液两相流的边界层,利于提高换热壁面的润湿性能。在热通量较高时,沟槽结构能改善换热表面的润湿性能,从而使沸腾换热显著增强,延迟沸腾危机的到来,CHF 大幅提高。图7(d)为倾角 90°、换热表面发生临界危机时的沸腾状况,图中显示气泡在换热表面形成一层很薄的气膜覆盖整个换热表面,换热表面和水之间的换热主要依靠辐

射换热进行,气膜表面脱离的气泡数量很少,同时相比于核态沸腾,膜态沸腾的气泡变小,并且伴随巨大噪声。

前期实验测量了朝下光表面的 CHF 随倾角的变化规律^[18],其中,光表面和沟槽结构表面在不同倾角下的 CHF 及对应的壁温见表1。从表可以看出,相比于光表面,沟槽结构表面 CHF 的增幅可达 65%~90%,而且,倾角越大,沸腾换热强化效果越明显。在倾角 0°时测得的 CHF 为 $956 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$,增加 65%;在倾角 90°时,CHF 最高达到 2075

$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$, 增加 90%。图 8 显示了实验中的沟槽结构表面、光表面的 CHF 和 Yang 等^[15] CHF 性能的对比结果, 从图中可以看出沟槽结构表面和涂层表面的 CHF 性能明显好于光表面, 同时沟槽结构表面的 CHF 随着倾角的增大而增大, 但涂层表面的 CHF 随着倾角的增大, 先减小后增大, 在小倾角下, 沟槽结构表面明显高于涂层表面, 但随着倾角的增大, 两者的 CHF 性能逐渐相当。实验表明沟槽结构表面相比于涂层表面 CHF 性能更为优良, 同时考虑到结构可靠性和寿命, 沟槽结构表面能更为有效可靠地增强 IVR 安全裕度。

表 1 不同倾角下光表面和沟槽结构表面的 CHF 及对应的壁温 (饱和温度 100°C)

Table 1 Local CHF limits at various orientation for plain surface and structured surface ($T_{\text{sat}}=100^\circ\text{C}$)

Orientation / $^\circ$	CHF/ $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$		CHF increase/%
	Plain surface	Structured surface	
5	607	956	65
30	700	1090	68
45	856	1437	72
60	990	1659	77
90	1111	2075	90

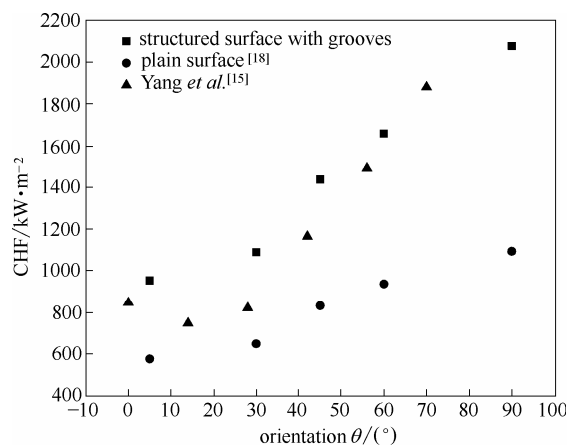


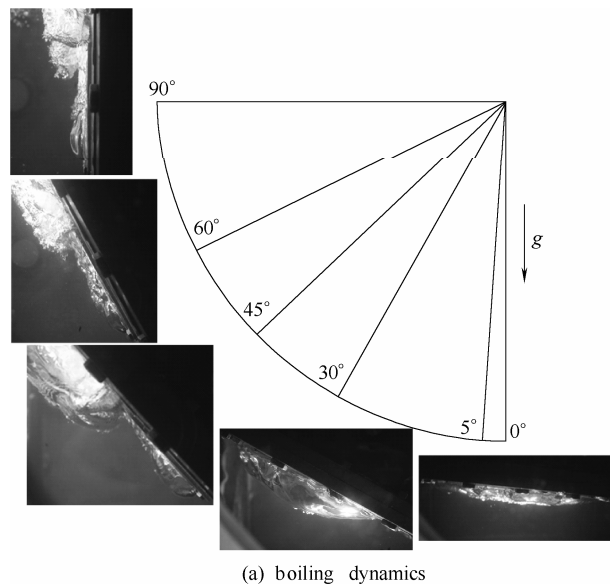
图 8 沟槽结构表面及光表面和涂层表面 CHF 对比

Fig.8 Comparison of plain surface and structured surface for orientation effect on CHF

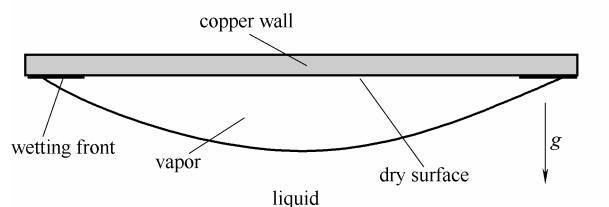
4 沸腾换热机理分析

实验观察记录的朝下沟槽结构表面高热通量时在不同倾角下的气泡运动形态, 如图 9 所示, 此时的气泡结构可以分为蒸汽膜结构和波浪蒸汽层结构。如图 9(a)所示, 在倾角为 5° 时, 气泡持续长大, 和相邻气泡聚集成蘑菇状气泡群并覆盖换热表面, 由于换热表面朝下布置造成气泡难于逃逸并不断聚

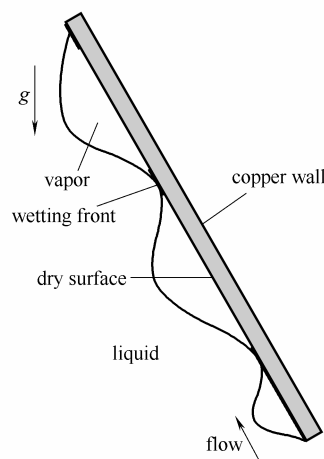
集成大气泡群直到气泡群到达换热表面的边界, 气泡开始以大气泡的形态逃逸换热表面, 冷却液体迅速润湿换热表面, 开启新一轮气泡生长周期。图 9(b)为蒸汽膜结构示意图, 换热表面的边界总是被冷却液体反复润湿, 但冷却液体难以进入到换热表面的中心区域, 以致中心区域容易产生干涸点, 随着热通量的增加, 干涸区域扩大并相互连成片, 直



(a) boiling dynamics



(b) schematic diagram of vapor structure on downward facing surface



(c) schematic diagram of interfacial instability on near vertical surface

图 9 朝下表面高热通量时气泡形态与气泡结构

Fig.9 Boiling dynamics on structured surface at CHF—for five orientations and vapor structures

至覆盖整个换热表面,从而引发沸腾危机。

如图 9(a)所示,当倾角大于 30°时,气泡在浮力作用下容易沿着换热表面朝上逃逸,由于气液界面不稳定从而导致气液界面呈波浪形,波动的气液界面有利于液体润湿换热表面,增强沸腾换热。Mudawar 等^[19]和 Kim 等^[20]曾报道过类似的气液界面不稳定周期现象,同时他们提出了转折角的概念,认为这个倾角在 15°附近,本文实验结果发现转折角在 30°附近,造成这种差异的原因可能在于实验件尺寸、实验条件等因素的影响。图 9(c)显示了一个倾斜表面上的波浪蒸汽层结构,气泡的动态行为显示润湿界面形成在气液界面接近换热表面时,换热表面的边界也同样被润湿。冷却液体在压力和表面张力的作用下流向干涸表面,沟槽结构的存在大大增强了换热表面的润湿性,从而能够大幅提高沸腾传热系数,延缓沸腾危机的到来。当热通量增加到足够大后,润湿界面的润湿速率低于冷却液体的蒸干速率,沸腾危机被触发。

5 结 论

相比于光表面,朝下沟槽结构表面能大幅增强沸腾换热强度,CHF 可提高 65%~90%,而且,倾角越大,沸腾换热强化效果越明显。实验观察发现了朝下表面高热通量下气泡运动形态存在蒸汽膜结构和波浪蒸汽层两种结构,转折角在 30°附近。朝下沟槽结构表面 CHF 大幅增加的原因在于,沟槽结构在大幅增加换热面积的同时显著改善了换热表面的润湿性。

符 号 说 明

- A —— 换热面积, m^2
 B —— 沟槽宽度, m
 g —— 重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
 I —— 电流, A
 K —— 沟槽深度, m
 L —— 正方形换热表面的长度, m
 Q —— 电加热器功率, W
 q —— 热通量, $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$
 S —— 沟槽间距, m
 T —— 温度, $^{\circ}\text{C}$
 V —— 电压, V
 x —— 热电偶测点和换热表面的距离
 λ —— 热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 η —— 考虑实验件散热损失的保温系数

下角标

- m —— 平均
 w —— 壁面
 sat —— 饱和

References

- [1] HENRY R E, FAUSKE H K. External cooling of a reactor vessel under severe accident conditions [J]. Nucl. Eng. Des., 1993, **139**(1): 31-43.
- [2] REMPE J L, SUH K Y, CHEUNG F B, *et al.* In-vessel retention-recent efforts and future needs [C]// Proceedings of the Sixth International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety. Nara, Japan, 2004, Paper ID N6P045.
- [3] REMPE J L, SUH K Y, CHEUNG F B, *et al.* Insights from investigations of in-vessel retention for high powered reactors [C]// Proceedings, 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics. Avignon, France, 2005, Paper No. 271.
- [4] REMPE J L, SUH K Y, CHEUNG F B, *et al.* In-vessel retention strategy for high power reactors final report [R]. INEEL/EXT-04-02561, Idaho National Laboratory Report, 2005.
- [5] VISHNEV I P. Effect of orienting the hot surface with respect to the gravitational field on the critical nucleate boiling of a liquid [J]. Journal of Engineering Physics, 1973, **24**(1): 43-48.
- [6] EL-GENK M S, GUO Z. Transient boiling from inclined and downward-facing surfaces in a saturated pool [J]. Int. J. Ref., 1993, **16**(6): 414-422.
- [7] BRUSSTAR M J, MERTE J H, KELLER R B, *et al.* Effects of heater surface orientation on the critical heat flux (I): An experimental evaluation of models for subcooled pool boiling [J]. Int. J. Heat Mass Trans., 1997, **40**(17): 4007-4019.
- [8] KIM J, SUH K. One-dimensional critical heat flux concerning surface orientation and gap size effects [J]. Nucl. Eng. Des., 2003, **226**(3): 277-292.
- [9] ROUGE S. SULTAN test facility for large-scale vessel coolability in natural convection at low pressure [J]. Nucl. Eng. Des., 1997, **169**(1/2/3): 185-195.
- [10] THEOFANOUS T G, SYRI S. The coolability limits of a reactor pressure vessel lower head [J]. Nucl. Eng. Des., 1997, **169**(1): 59-76.
- [11] THEOFANOUS T G, TU J P, SALMASSI T, *et al.* Quantification of limits to coolability in ULPU-2000 configuration: CRSS-02.05.3 [R/OL]. Santa Barbara: Center for Risk Studies and Safety University of California, 2002. <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0216/ML021620559.pdf>.
- [12] CHU T Y, BAINBRIDGE B L, SIMPSON R B, *et al.* Ex-vessel boiling experiments: laboratory- and reactor-scale testing of the flooded cavity concept for in-vessel core retention (I): Observation of quenching of downward-facing surfaces [J]. Nucl. Eng. Des., 1997, **169**(1/2/3): 77-88.
- [13] CHU T Y, BENTZ J H, SLEZAK S E, *et al.* Ex-vessel boiling experiments: laboratory-and reactor-scale testing of the flooded cavity concept for in-vessel core retention (II): Reactor-scale boiling experiments of the flooded cavity concept for in-vessel core retention [J]. Nucl. Eng. Des., 1997, **169**(1/2/3): 89-99.
- [14] HADDAD K H. An experimental and theoretical study of two-phase boundary layer flow on the outside of curved downward-facing

- surfaces [D]. PA: Pennsylvania State University, 1996.
- [15] YANG J, DIZON M B, CHEUNG F B, *et al.* CHF enhancement by vessel coating for external reactor vessel cooling [J]. Nucl. Eng. Des., 2006, **236**(10): 1089-1098.
- [16] NOH S W, SUH K Y. Critical heat flux in various inclined rectangular straight surface channels [J]. Exp. Therm. Fluid Sci., 2014, **52**: 1-11.
- [17] NOH S W, SUH K Y. Critical heat flux for APR1400 lower head vessel during a severe accident [J]. Nucl. Eng. Des., 2013, **258**: 116-129.
- [18] ZHONG D W, MENG J A, LI Z X, *et al.* Critical heat flux for downward-facing saturated pool boiling on pin fin surfaces [J]. Int. J. Heat Mass Trans., 2015, **87**: 201-211.
- [19] HOWARD A H, MUDAWAR I. Orientation effects on pool boiling critical heat flux (CHF) and modeling of CHF for near-vertical surfaces [J]. Int. J. Heat Mass Trans., 1999, **42**(9): 1665-1688.
- [20] KIM Y H, KIM S J, KIM J J, *et al.* Visualization of boiling phenomena in inclined rectangular gap [J]. Int. J. Mul. Flow, 2005, **31**(5): 618-642.