

朝下网状镂空板壳结构临界沸腾换热研究

杨楠, 钟达文*, 廉学新, 王盼盼

华北电力大学核科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2024年10月28日; 录用日期: 2024年11月11日; 发布日期: 2025年1月9日

摘要

压力容器外部冷却(ERVC)是实现核电站堆芯熔融物滞留并限制放射性物质外泄的重要手段。在铜基体上制备了一种网状镂空板壳结构, 开展了朝下网状镂空板壳结构表面在常压饱和去离子水中的临界沸腾换热实验研究。实验对比研究了不同材质(铜和不锈钢)和几何参数对网状镂空板壳结构表面沸腾性能的影响。研究表明: 与光表面结构相比, 网状镂空板壳结构表面临界热流密度(CHF)显著增大, 增幅为67.9%~161.7%, 具有较好的工程应用前景。朝下网状镂空板壳结构表面的CHF随着倾角的增加而明显增加。与铜光表面相比, 不锈钢结构的壁面过热度显著增加, 基本达到150℃以上, 铜材质的网状镂空板壳结构较不锈钢结构具有更好的沸腾强化性能和更小的壁面过热度。

关键词

朝下表面, 临界热流密度, 强化换热, 堆内熔融物滞留

Study on Critical Boiling Heat Transfer of Downward Facing Surface with Reticular Hollow Shell Structure

Nan Yang, Dawen Zhong*, Xuexin Lian, Panpan Wang

School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: Oct. 28th, 2024; accepted: Nov. 11th, 2024; published: Jan. 9th, 2025

Abstract

External reactor vessel cooling (ERVC) is an important strategy for nuclear power plant to achieve the retention of molten materials in the reactor pressure vessel and limit the leakage of radioactive materials. A reticular hollow shell structure was prepared on a copper substrate, and critical boiling

*通讯作者。

文章引用: 杨楠, 钟达文, 廉学新, 王盼盼. 朝下网状镂空板壳结构临界沸腾换热研究[J]. 核科学与技术, 2025, 13(1): 36-48. DOI: 10.12677/nst.2025.131005

heat transfer experiments were conducted on the downward facing surface of reticular hollow shell structures in saturated deionized water at atmospheric pressure. The effects of different materials (copper and stainless-steel) and geometric parameters on boiling performance were conducted on the surface of reticular hollow shell structure. The research results show that the CHF of the reticular hollow shell structure surface is significantly increased compared with the smooth surface, with an CHF increase range of 67.9%~161.7%. With the inclination angle increases, the CHF on the downward facing surface of reticular hollow shell structure increases significantly. Compared with the copper plain surface, the wall superheat of stainless-steel structure significantly increases, basically reaching more than 150°C. The reticular hollow shell structure made of copper has better boiling enhancing performance and smaller wall superheat compared to stainless steel structure.

Keywords

Downward Facing Surface, Critical Heat Flux, Enhanced Heat Transfer, In Vessel Retention

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在碳达峰和碳中和目标下,核能具有寿期内碳排放量小、能量密度高和高效稳定的优点,可作为我国能源的基荷能源[1][2]。与传统的二代堆型相比,美国的 AP1000 [3]、中国的 HPR1000 [4]和 CAP1400 [5]在提高经济性的同时采用了大量的安全设计以确保反应堆的安全性。当发生严重事故时,压力容器外部冷却技术(ERVC)通过向压力容器外堆坑注水带走堆芯熔融物衰变热,从而将堆芯熔融物滞留在压力容器内,这是实现熔融物堆内滞留(IVR)的有效策略[6]。ERVC 的关键是下封头不同位置的热负荷要低于其临界热流密度(CHF),从而使下封头外表面一直处于核态沸腾状态以确保其完整性。IVR-ERVC 技术虽然在现有的反应堆上有足够的安全裕量,但更高功率的堆型需要提供更高的安全裕量和可靠性。因此如何在朝下曲面上获得更高的 CHF 是实现 IVR-ERVC 的迫切需求。

近年来对于如何有效提高 CHF 已经开展了大量的实验研究,主要从提高冷却剂的冷却能力和修饰压力容器表面两方面入手[7]。考虑到核电厂复杂的运行环境和提高冷却剂冷却能力有限两个因素,通过改进下封头外表面提高 CHF 的方案随着材料制备技术的发展变得更具有可行性。Zhong 等[8][9]设计了三角形网槽联通阵列孔(IGTAC)和针翅等沸腾强化表面,并在饱和去离子水中开展了朝下表面的沸腾换热性能实验,研究结果表明与光表面相比,IGTAC 和针翅表面显著增加 CHF 且最大 CHF 增强幅度为 200%;同时改进后的强化结构形成了以孔为稳定汽化核心、相互连通的沟槽为冷却水润湿途径的汽液转换路径,从而及时润湿加热表面提高 CHF。史昊鹏等[10]通过超音速冷气动力喷涂技术的先进增材制造技术(SCGS-AM)制造了梯形和三角形截面的跨尺度沟槽结构。结果表明跨尺度沟槽结构与同类型机械加工结构的强化效果同样具有显著强化效果,但跨尺度沟槽结构能进一步降低壁面过热度。

蜂窝多孔板可以在池沸腾过程起到保护加热表面、改善沸腾性能和提高传热效率的作用。在池沸腾换热过程中,蜂窝多孔板独特的孔道可以有效的分散冷却液,促进液体的流动,避免局部过热,延缓沸腾危机的出现。Wang 等[11]设计了多种不同规格的金属多孔板研究朝下表面流动沸腾的 CHF 性能,结果表明 CHF 的最大增长率为 1.7;同时表明蜂窝板的 CHF 值与换热面积有很强的线性关系。Mori 等[12]制备了单层的蜂窝结构多孔板以增强池沸腾的 CHF。多孔板大量的微孔使得冷却水在较强的毛细吸力作

用下润湿表面,同时空隙提供了蒸汽逃逸通道以增强 CHF。实验结果表明与朝上直径 30 mm 平表面($\text{CHF} = \sim 1000 \text{ kW/m}^2$)相比 CHF 增长了约 2.5 倍。随后 Mori 等[13]提出了一种双层结构的蜂窝多孔板(HPP)强化表面,附着在加热面上的薄 HPP 具有微小孔隙和较强的毛细力,叠加在上部稍厚的 HPP 需要有足够大的空间容纳冷却水。实验结果表明双层结构蜂窝板的 CHF 提高到平表面的 2 倍以上(2000 kW/m^2),这是因为 HPP 一方面可以通过非常小的孔隙率向加热表面提供冷却水,并且同时可以在结构中容纳足够的冷却水以防止 HPP 在气泡悬浮过程中干涸从而发生沸腾危机。但双层结构的蜂窝多孔板通过粘合剂和不锈钢丝固定在加热表面,难以适用于压力容器下封头的实际运行环境。

在反应堆长寿期内,如何确保 RPV 下封头表面结构的可靠性是一个重要的指标。基于上述研究的设计思路和优点,本文提出一种新型网状镂空板壳结构,通过旋转可视化朝下平板表面沸腾换热系统,实验研究了铜和不锈钢两种网状镂空板壳结构表面的临界沸腾换热性能。

2. 实验装置与实验方法

2.1. 实验装置

本文通过可旋转朝下平板表面沸腾换热系统对不同材质和几何参数的网状镂空板壳结构表面进行了临界沸腾换热实验,模拟了压力容器下封头冷却过程。本文中换热表面完全水平朝下为倾角 0° ,垂直为倾角 90° 。

图 1 为可旋转朝下表面池沸腾换热系统图,整个池沸腾换热系统由辅助加热水箱、实验水箱、可旋转实验体、功率控制系统和数据采集系统等组成。实验水箱的可用容积为 $580 \text{ mm} \times 460 \text{ mm} \times 460 \text{ mm}$,实验水箱材料为不锈钢,外部包裹保温材料保持去离子水为饱和状态。去离子水在辅助加热水箱加热至饱和状态以消除不凝结气体对实验的影响,随后通过泵注入实验水箱进行循环加热预热实验系统。实验水箱的五个方向都有观察窗以方便观察和拍摄受热表面沸腾现象。为了准确检测实验过程中测试元件的实时温度,本实验采用 K 型热电偶,热电偶直径为 1 mm ,测量范围为 $0 \sim 1000^\circ\text{C}$ 。图 2 为实验组件的结构示意图,测试元件安装在厚度为 33 mm ,底面积为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的加热铜件上,加热铜件和测试元件之间通过导热性能良好的纳米导热硅脂减少两者之间的接触热阻。在测试元件正对的两侧各留有三个直径 1 mm 深度 10 mm 的小孔用来安装热电偶($T_1 \sim T_6$),以便实时监测测试元件在不同工况下,不同

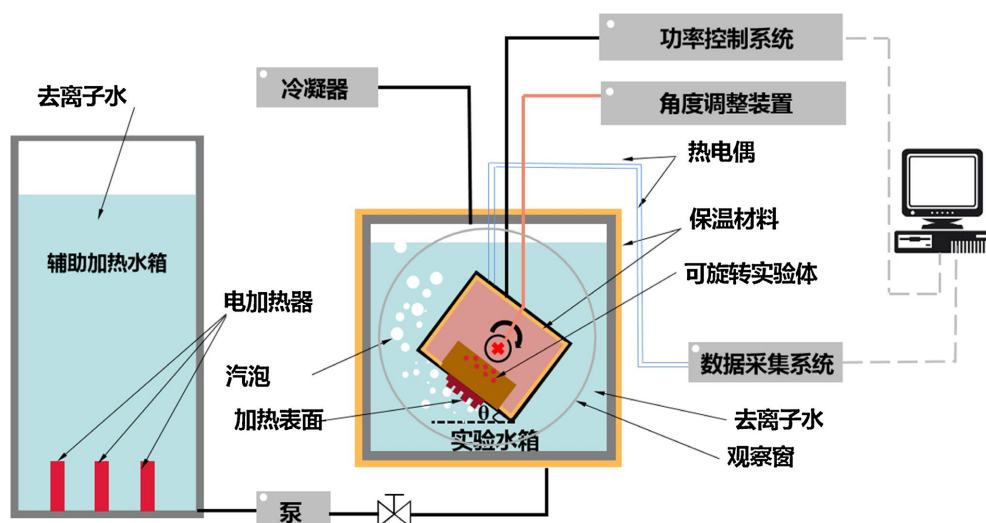


Figure 1. Diagram of pool boiling heat transfer system

图 1. 池沸腾换热系统图

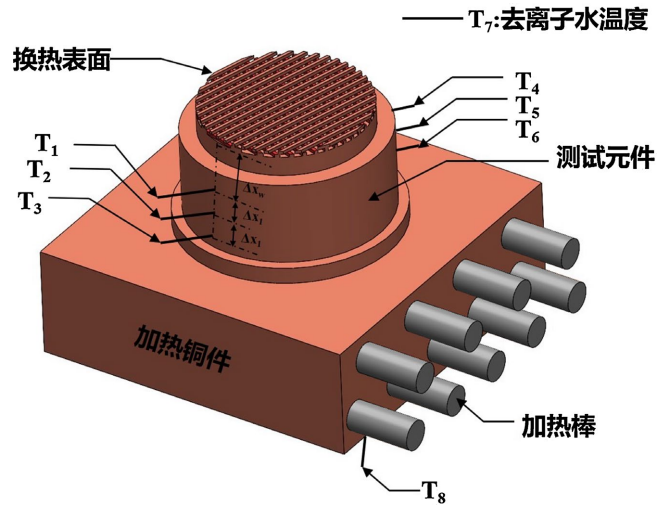


Figure 2. Schematic diagram of experimental component structure
图 2. 实验组件结构示意图

轴向位置的温度。最上方的两个温度测量孔距离测试元件铜基板 7 mm, 用 Δx_w 表示, 相邻两个温度测量孔距离为 5 mm, 用 Δx_1 表示。 $T_1 \sim T_3$ 温度测点的监测结果用于计算测试元件换热表面的实际热流密度, $T_4 \sim T_6$ 温度测点用于减少实验过程中的不确定性。 T_7 为测量的去离子水温度, T_8 为加热铜件背面温度, 防止加热器损坏。所有热电偶测量温度通过数据采集系统记录。

2.2. 实验方法

稳态加热和瞬态淬火的实验方法都可以用来研究网状镂空板壳结构的沸腾换热性能。Dizon 等[14]对半球形容容器光表面和微孔涂层表面进行了瞬态淬火实验, 研究发现瞬态 CHF 值与稳态加热实验结果误差在 10% 内, 证明了该方法的可靠性。本研究采用瞬态淬火方法开展了朝下表面沸腾换热性能实验。瞬态淬火的具体过程是将测试元件加热到足够引起沸腾危机的温度, 随后立即注入饱和和去离子水将其完全浸没并达到膜态沸腾状态。本研究将测试元件的初始温度保持在 $310^\circ\text{C} \sim 320^\circ\text{C}$ 使其浸没后处于膜态沸腾。

换热表面的热流密度由瞬时温度 $T_1 \sim T_3$ 计算, 通过公式(1)得到。其中 k_{Cu} 表示铜的导热系数, dT/dx 为温度梯度。

$$q = -k_{Cu} \frac{dT}{dx} = -k_{Cu} \frac{3T_1 - 4T_2 + T_3}{2\Delta x_1} \quad (1)$$

换热表面的温度 T_w 和过热度 ΔT 由公式(2)和(3)计算, 其中 Δx_w 为 T_1 温度测点到换热表面的距离, T_f 为饱和和去离子水的温度。

$$T_w = T_1 - \frac{q \cdot \Delta x_w}{k_{Cu}} \quad (2)$$

$$\Delta T = T_w - T_f \quad (3)$$

实验过程中热电偶的测量精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。热流密度的不确定度由误差传递函数(4)确定, 结果显示热流密度的不确定度小于 5%。

$$\frac{\Delta q}{q} = \sqrt{\left(\frac{\Delta k_{Cu}}{k_{Cu}}\right)^2 + \left(\frac{3\Delta T_1 \cdot k_{Cu}}{\Delta x_1 \cdot q}\right)^2 + \left(\frac{4\Delta T_2 \cdot k_{Cu}}{\Delta x_1 \cdot q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_3 \cdot k_{Cu}}{\Delta x_1 \cdot q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x}{\Delta x_1}\right)^2} \quad (4)$$

3. 实验表面

图 3 为网状镂空板壳结构的三维模型，采用线切割加工网状镂空板壳结构，通过钎焊将网状镂空板壳结构和铜基体制备成一体。图 4 为网状镂空板壳结构几何参数示意图。几何结构参数包括下槽宽度 W_1 ，下槽间距 P_1 ，下槽深度 H_1 ，上槽宽度 W_2 ，上槽间距 P_2 和上槽深度 H_2 。表 1 为不同网状镂空板壳结构的几何参数，铜和不锈钢的网状镂空结构几何参数一一对应，便于实验结果的相互对照。

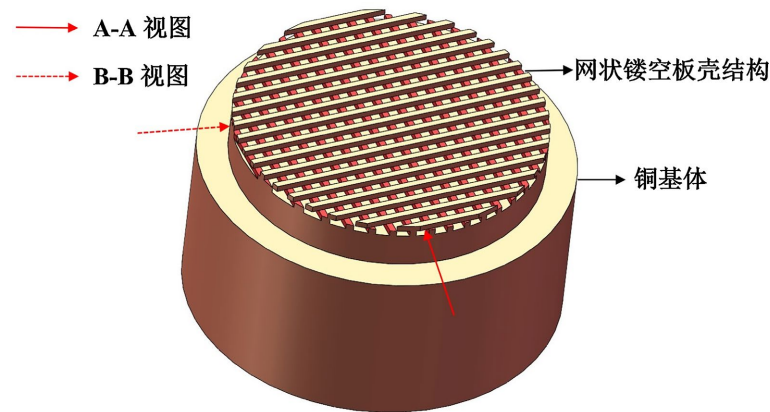


Figure 3. Three-dimensional model of a reticular hollow shell structure
图 3. 网状镂空板壳结构的三维模型

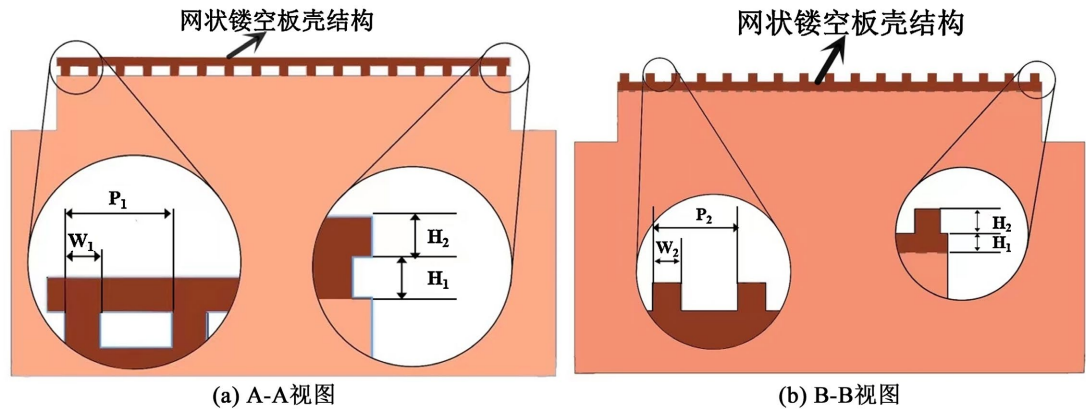


Figure 4. Cross section diagram of reticular hollow shell structure
图 4. 网状镂空板壳结构剖面图

Table 1. Geometrical parameter
表 1. 几何参数

No.	P1 (mm)	W1 (mm)	H1 (mm)	P2 (mm)	W2 (mm)	H2 (mm)	材质
Cu-1	3	2	2	3	2	2	铜
Cu-2	4	2	2	4	2	2	铜
Cu-3	4	2	2	4	3	2	铜
SS-1	3	2	2	3	2	2	不锈钢
SS-2	4	2	2	4	2	2	不锈钢
SS-3	4	2	2	4	3	2	不锈钢

4. 实验结果与分析

4.1. 实验方法

实验的准确性是研究网状镂空板壳结构沸腾换热的关键, 因此有必要进行实验的可靠性和重复性验证。Dizon 等[14]证明了稳态加热法和瞬态淬火法测试结果的相对误差小于 10%。Shi 等[15]使用本研究相同尺寸的圆形铜光表面进行了临界沸腾换热实验, 结果表明稳态加热和瞬态淬火的 CHF 相对误差小于 5%。为了进一步验证实验系统测量网状镂空板壳结构的准确性, 实验选择 Cu-1 在倾角为 5° 下进行稳态和瞬态实验的验证。图 5 为稳态加热和瞬态淬火实验的验证结果。通过稳态加热获得的 CHF 为 1442.5 kW/m^2 , 瞬态淬火得到的 CHF 为 1402.2 kW/m^2 , 因此两种方法的相对误差仅有 2.7%。

图 6 给出了铜和不锈钢网状镂空板壳结构 Cu-2 和 SS-1 在饱和去离子水条件下淬火曲线。为了确保

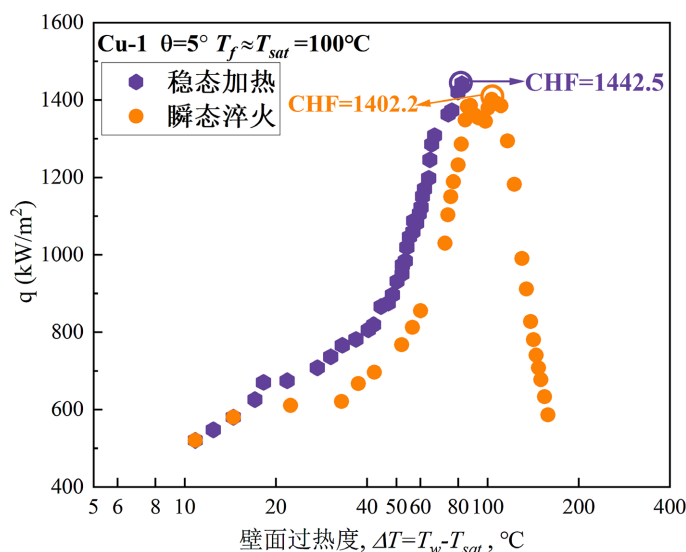


Figure 5. Verification of steady-state heating and transient quenching

图 5. 稳态加热和瞬态淬火实验的验证

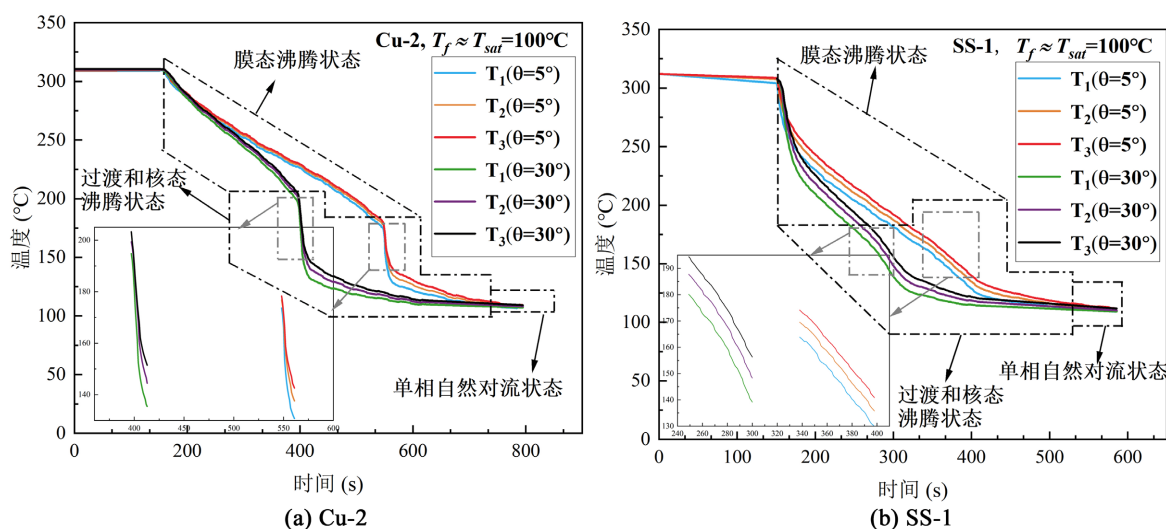


Figure 6. Quenching curve of heating surface under saturated deionized water conditions

图 6. 饱和去离子水条件下换热表面的淬火曲线

换热表面浸没液体后能够处于膜态沸腾,测试元件的初始温度为 $310^{\circ}\text{C}\sim 320^{\circ}\text{C}$ 。在饱和瞬态淬火过程中,随着时间的进行,表面的沸腾由膜态沸腾逐步转变为过渡沸腾、核态沸腾,最终转变为单相自然对流状态[16]。测试元件温度随着时间的推移逐渐下降,此时换热表面的部分汽膜破裂导致换热表面和冷却水接触,随后换热表面发生剧烈的沸腾,这种过程为过渡沸腾,过渡沸腾状态持续时间非常短暂,随后进入核态沸腾状态。随着测试元件温度进一步降低,换热表面进入单相自然对流状态。在一个典型的淬火曲线中第一个拐点为 Leidenfrost 点(最小热流密度点),此刻也标志着膜态沸腾状态的结束[17]。对于同一换热表面,倾角为 5° 下的沸腾状态转变时间大于倾角 30° ,这是因为在 30° 倾角下气泡更容易脱离换热表面。

4.2. 铜网状镂空板壳结构实验结果与分析

不同结构的铜网状镂空板壳结构表面在朝下倾角 5° 和 30° 下瞬态淬火实验获得的热流密度随着壁面过热度的变化如图 7~9 所示。表 2 为所有测试表面的 CHF 及其在不同倾角下相对于圆形铜光表面的增长百分比。不难发现对于所有的铜网状镂空板壳结构表面,其 CHF 随倾角的增加逐渐增加,朝下倾角效应明显[10] [18]。同时与铜光表面相比,铜网状镂空板壳结构的 CHF 在各个倾角下都得到有效地增强。在倾角 5° 时,最小 CHF 和最大 CHF 分别在 Cu-2 和 Cu-3,分别为 1338.8 kW/m^2 和 1593.2 kW/m^2 ,较铜光表面 CHF 增幅为 67.9% 和 100.0% 。在倾角 30° 时,Cu-3 的 CHF 达到了 2341.7 kW/m^2 ,较铜光表面 CHF 增幅为 161.7% 。由 Cu-1 到 Cu-3 的实验结果可知,铜网状镂空板壳结构表面可以显著提高 CHF,由于网状镂空板壳结构表面独特的几何结构增加了换热面积和气泡成核点密度,同时形成了新的汽液转换途径,及时带走壁面热量的同时延缓膜态沸腾的产生,类似与双层蜂窝多孔板结构[13]。因此,铜网状镂空板壳结构的 CHF 远高于铜光表面,基本达到了相同倾角下铜光表面的 1.68 倍。相比于 Cu-1 和 Cu-2, Cu-3 在所有测试倾角下具有最高的 CHF,因此可以设计一种单元组合式网状镂空板壳结构的压力容器,在低倾角下使用 Cu-3 结构以最大限度地提高压力容器在 ERVC 措施下的安全裕量。

4.3. 不锈钢网状镂空板壳结构实验结果与分析

不锈钢网状镂空板壳结构 SS-1, SS-2 和 SS-3 瞬态淬火实验的热流密度随壁面过热度的变化如

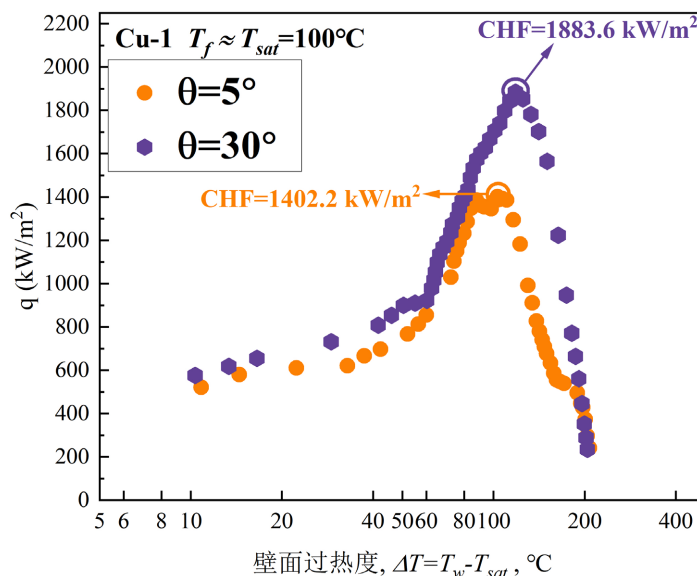


Figure 7. Variation of Cu-1 heat flux with wall superheat

图 7. Cu-1 热流密度随壁面过热度的变化

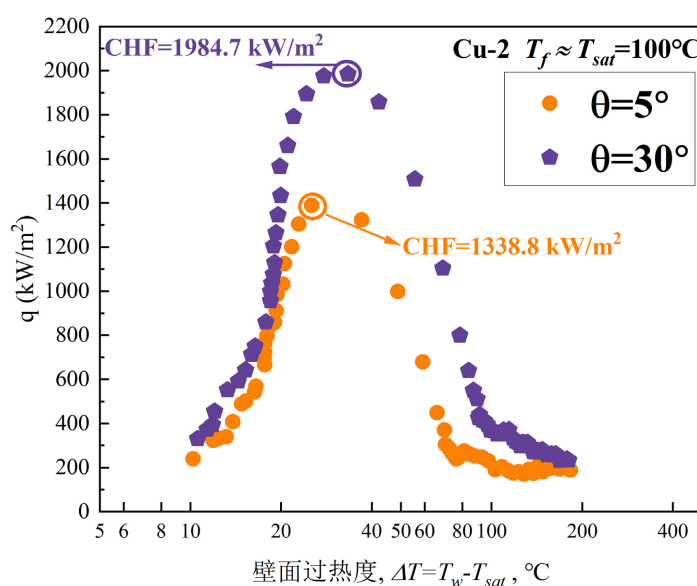


Figure 8. Variation of Cu-2 heat flux with wall superheat

图 8. Cu-2 热流密度随壁面过热度的变化

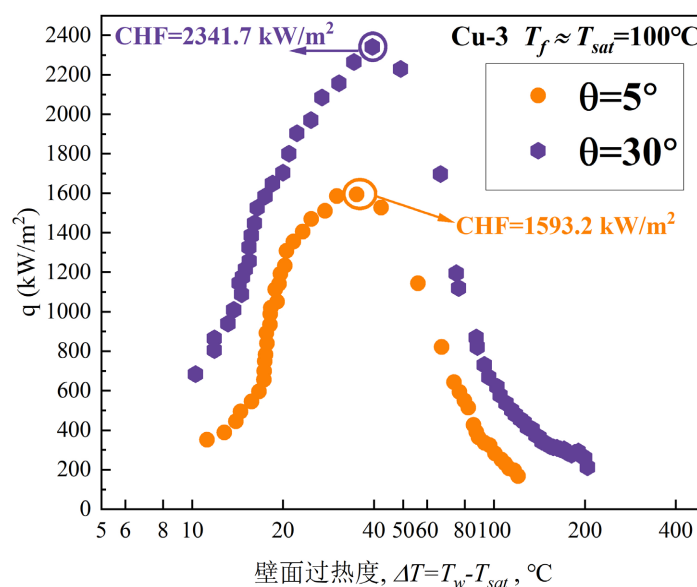


Figure 9. Variation of Cu-3 heat flux with wall superheat

图 9. Cu-3 热流密度随壁面过热度的变化

图 10~12 所示。从表 2 对比可以发现，相较于铜光表面，不锈钢网状镂空板壳结构 CHF 有明显增强，但增强幅度略低于铜网状镂空板壳结构。在倾角 5° 时，最小和最大的 CHF 分别为 1385.4 kW/m^2 和 1536.2 kW/m^2 ，较铜光表面 CHF 增幅为 73.7% 和 92.6%。在倾角 30° 时，最大 CHF 发生在 SS-3，CHF 值为 1733.6 kW/m^2 ，是铜光表面的 1.94 倍。不锈钢网状镂空板壳结构的 CHF 基本达到了相同倾角下铜光表面的 1.74 倍。相对于铜网状镂空板壳结构，不锈钢网状镂空板壳结构 CHF 发生在很高的壁面过热度，基本达到了 150°C 以上。这是因为相对于铜，热导率低的不锈钢不能及时将热量传递至换热界面。朝下换热表面的气泡受到生长力、表面张力和浮力的作用而紧贴换热表面，此时作用力的合力阻碍着气泡的分离。随着

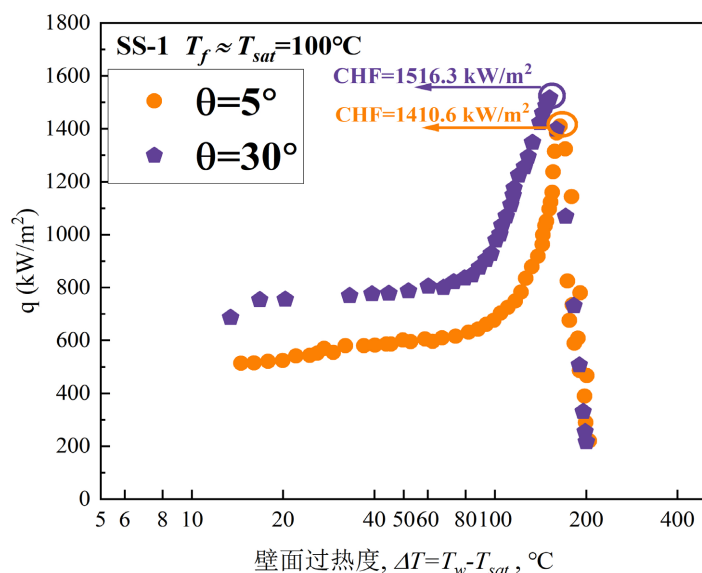


Figure 10. Variation of SS-1 heat flux with wall superheat

图 10. SS-1 热流密度随壁面过热度的变化

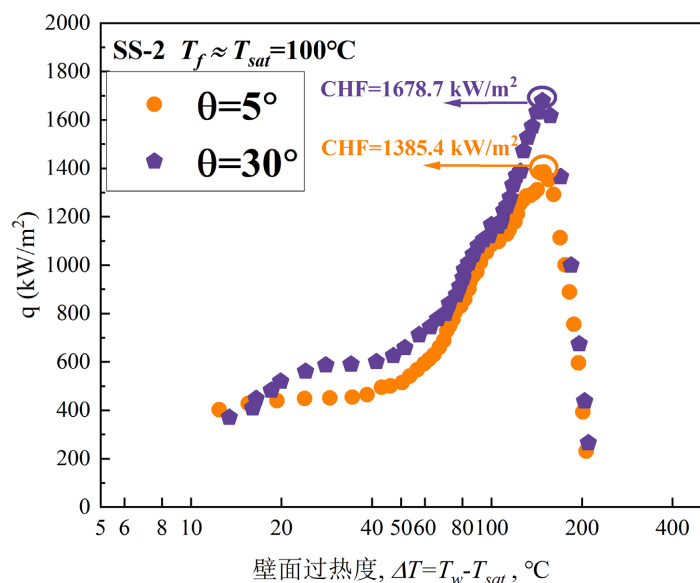


Figure 11. Variation of SS-2 heat flux with wall superheat

图 11. SS-2 热流密度随壁面过热度的变化

蒸汽质量的逐渐增加汽泡所受浮力作用越来越突出，汽泡逐渐产生滑动，汽泡将沿着换热表面滑动并聚集，最终以较大的滑动速度离开换热表面。

4.4. 几何参数和材质对网状镂空板壳结构池沸腾的影响

由表 1 可知，铜和不锈钢网状镂空板壳结构互为参照。Cu-2 和 Cu-3 相比，Cu-3 具有更宽的上槽宽度 W2。实验结果表明 Cu-3 的 CHF 较 Cu-2 相比在两个倾角下都得到了有效提高。同样对比不锈钢材质的 SS-2 和 SS-3，SS-3 在两个倾角下的 CHF 均比 SS-2 高。这是因为更宽的上槽宽度 W2 会增加换热表面的有效换热面积，如表 2 所示，有效换热面积的增加可以提供更多的汽化核心，从而提高热量传递的

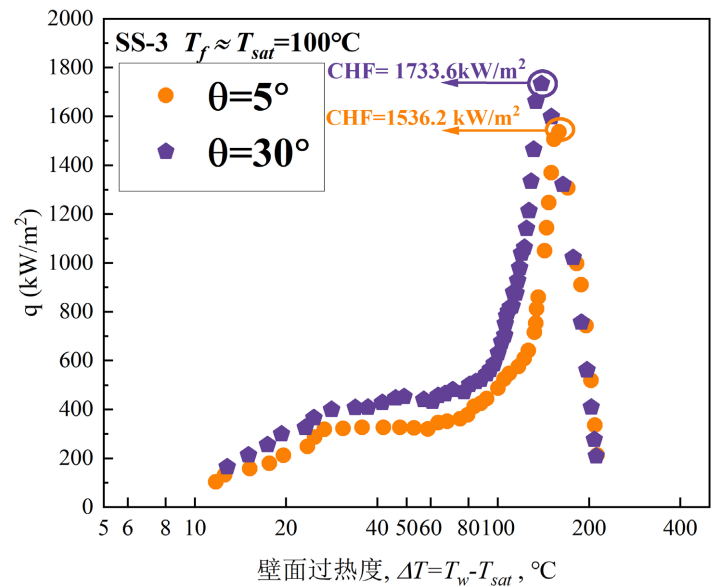


Figure 12. Variation of SS-3 heat flux with wall superheat
图 12. SS-3 热流密度随壁面过热度的变化

Table 2. CHF and CHF increase for all test surfaces at different inclination angles
表 2. 在不同倾角下所有测试表面的 CHF 和 CHF 增幅

倾角(°)	铜光表面 CHF (kW/m²)	Cu-1 CHF (kW/m²)@CHF 增幅(%)	Cu-2 CHF (kW/m²)@CHF 增幅(%)
5	797.4	1402.2@75.8	1338.8@67.9
30	895.0	1883.6@110.5	1948.7@121.8
Cu-3 CHF (kW/m²)@CHF 增幅(%)	SS-1 CHF (kW/m²)@CHF 增幅(%)	SS-2 CHF (kW/m²)@CHF 增幅(%)	SS-3 CHF (kW/m²)@CHF 增幅(%)
1593.2@100.0	1410.6@76.9	1385.4@73.7	1536.2@92.6
2341.7@161.7	1516.3@69.4	1678.7@87.6	1733.6@93.7

能力，提高池沸腾的换热效率。对于具有相同几何参数、不同材质的网状镂空板壳结构，在倾角为 5°时 CHF 增幅差别不大，最大的 CHF 增强百分比之差为 Cu-3 和 SS-3，仅 7.4%。当倾角为 30°时，相同几何参数情况下，铜网状镂空板壳结构具有更高的 CHF 增幅，Cu-3 的 CHF 达到了 2341.7 kW/m²，较 SS-3 高 608.1 kW/m²。由图 13 可知，Cu-3 的面积增加比 α (结构表面面积相比光表面的增加百分比) 和孔隙率 β 分别为 297.52% 和 0.373，在三种几何参数中属于中等水平，但 Cu-3 在两个倾角下获得了最高 CHF。同样，此结论适用于不锈钢网状镂空板壳 SS-3。因此面积增加比 α 和孔隙率 β 不能作为衡量结构表面沸腾强化效果的单一标准，应该综合考虑各方面因素的影响。

4.5. CHF 实验值与现有研究对比

将现有文献中不同类型的强化结构表面在朝下倾角下的 CHF 结果与本研究中的网状镂空板壳结构表面进行对比，所有实验研究均是在常压饱和和去离子水中进行。如图 13 所示，表面类型覆盖了：(1) 网状镂空板壳结构；(2) 铜光表面[10]；(3) SS304 半球容器光表面和冷喷涂涂层表面[19]；(4) 分体冷喷

涂表面[20]; (5) 跨尺度梯形沟槽结构表面[10]; (6) 三角形网槽连通阵列孔结构(IGTAC) [8]和针翅(pin fin)表面[9]; (7) 双层蜂窝多孔板(HPP)表面[21]。

如图 13 所示, 六个网状镂空板壳结构表面的 CHF 在所有强化结构表面中处于较高水平, 初步证明网状镂空板壳结构具有增强 CHF 的特性。不同研究人员的强化表面在形状、大小以及实验系统上存在差异, 直接比较 CHF 难以评估结构的优劣性。与铜光表面相比, 网状镂空板壳结构大幅度增加 CHF, 最小的 CHF 增强百分比为 67.9%。IGTAC 表面和 pin fin 表面的 CHF 在低倾角时处于同一水平, 由于这两种表面为方形 100 mm × 100 mm, 导致换热表面形状和尺寸对 CHF 结果有影响。对于分体冷喷涂表面, 根据“朝下倾角效应”可知其 CHF 在倾角 5° 时小于网状镂空板壳结构; 当倾角 30° 时分体冷喷涂表面的 CHF 达到了 1300 kW/m² 的量级, 远小于网状镂空板壳结构表面。Cu-3 在所有倾角下具有最高的 CHF 强化幅度, 而其它网状镂空板壳结构表面基本与梯形跨尺度沟槽结构表面持平, 但值得注意的是 SS-1 在倾角 30° 时 CHF 强化幅度较小。上述结果对比说明结构合理的网状镂空板壳结构具有显著的 CHF 强化能力。

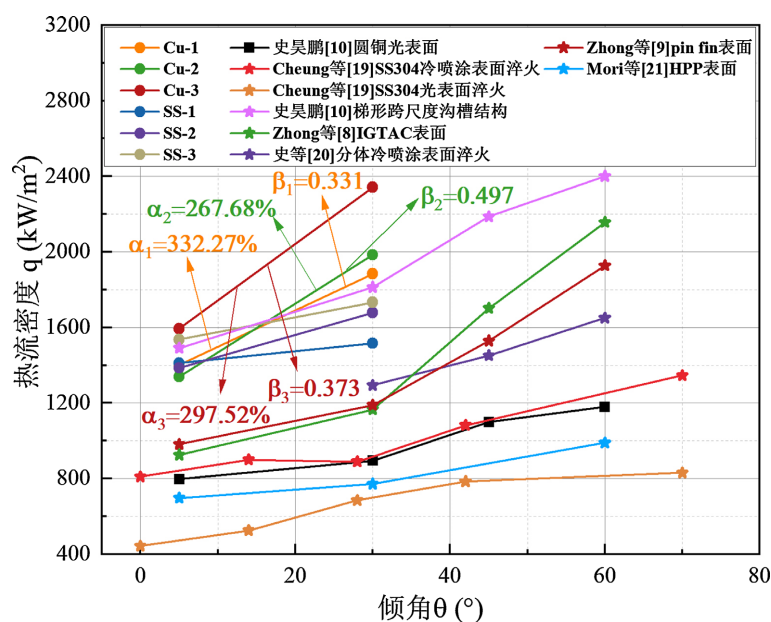


Figure 13. Variation of critical heat flux with inclination angle for different surfaces
图 13. 不同表面的临界热流密度随倾角的变化

5. 结论

本研究基于汽液两相路径分离可增强 CHF 的理念, 结合成熟的制造技术在铜基体上制备了一种网状镂空板壳结构, 利用可旋转朝下平板表面沸腾换热实验系统进行了瞬态淬火实验, 研究了其沸腾换热性能, 结论如下:

- (1) 网状镂空板壳结构表面相比于铜光表面显著增强 CHF, 沸腾强化效果明显, CHF 增幅至少 67.8%。
- (2) 倾角明显影响朝下网状镂空板壳结构表面临界沸腾换热性能, CHF 随倾角的增加而增加。
- (3) 不锈钢和铜材质的网状镂空板壳结构均能增强 CHF, 但铜网状镂空板壳结构的 CHF 增强幅度更大且具有更小的壁面过热度。
- (4) 几何参数对网状镂空板壳结构的临界沸腾换热性有明显的影晌, Cu-2 和 SS-2 增加上槽宽度 W2 能有效的增加 CHF。理论上存在最佳的几何参数, 需综合考虑换热面积增加、气泡脱离阻力和冷却液润湿等各方面因素。

基金项目

本研究得到了北京市自然科学基金(3192035)、国家自然科学基金(51706068)和中央高校基本科研业务费专项资金资助(2024MS051)等支持。

参考文献

- [1] 邢继, 高力, 霍小东, 等. “碳达峰、碳中和”背景下核能利用浅析[J]. 核科学与工程, 2022, 42(1): 10-17.
- [2] Sadiq, M., Shinwari, R., Usman, M., Ozturk, I. and Maghyreh, A.I. (2022) Linking Nuclear Energy, Human Development and Carbon Emission in BRICS Region: Do External Debt and Financial Globalization Protect the Environment? *Nuclear Engineering and Technology*, **54**, 3299-3309. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.03.024>
- [3] Esmaili, H. and Khatib-Rahbar, M. (2005) Analysis of Likelihood of Lower Head Failure and Ex-Vessel Fuel Coolant Interaction Energetics for Ap1000. *Nuclear Engineering and Design*, **235**, 1583-1605. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2005.02.003>
- [4] Xing, J., Song, D. and Wu, Y. (2016) HPR1000: Advanced Pressurized Water Reactor with Active and Passive Safety. *Engineering*, **2**, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2016.01.017>
- [5] 胡腾, 常华健, 薛艳芳, 等. CAP1400 熔融物堆内滞留试验验证研究[J]. 中国核电, 2018, 11(4): 466-470.
- [6] Tsai, F., Lee, M. and Liu, H.C. (2017) Simulation of the In-Vessel Retention Device Heat-Removal Capability of AP-1000 during a Core Meltdown Accident. *Annals of Nuclear Energy*, **99**, 455-463. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.09.052>
- [7] 李少鹏. 冷喷涂多孔金属涂层与表面织构的构筑及其临界热流密度强化效果研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 2021.
- [8] Zhong, D., Sun, J., Meng, J. and Li, Z. (2018) Effects of Orientation and Structure Geometry on Boiling Heat Transfer for Downward Facing IGTC Surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **123**, 468-472. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.007>
- [9] Zhong, D., Meng, J., Li, Z. and Guo, Z. (2015) Critical Heat Flux for Downward-Facing Saturated Pool Boiling on Pin Fin Surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **87**, 201-211. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.001>
- [10] 史昊鹏. 朝下冷喷涂结构表面临界沸腾强化换热实验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2022
- [11] Wang, L., Khan, A.R., Erkan, N., Gong, H. and Okamoto, K. (2017) Critical Heat Flux Enhancement on a Downward Face Using Porous Honeycomb Plate in Saturated Flow Boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **109**, 454-461. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.113>
- [12] Mori, S. and Okuyama, K. (2009) Enhancement of the Critical Heat Flux in Saturated Pool Boiling Using Honeycomb Porous Media. *International Journal of Multiphase Flow*, **35**, 946-951. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.05.003>
- [13] Mori, S., Maruoka, N. and Okuyama, K. (2018) Critical Heat Flux Enhancement by a Two-Layer Structured Honeycomb Porous Plate in a Saturated Pool Boiling of Water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **118**, 429-438. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.100>
- [14] Dizon, M.B., Yang, J., Cheung, F.B., Rempe, J.L., Suh, K.Y. and Kim, S. (2003) Effects of Surface Coating on Nucleate Boiling Heat Transfer from a Downward Facing Surface. *Proceedings of the ASME 2003 Heat Transfer Summer Conference*, Volume 2, 403-411. <https://doi.org/10.1115/ht2003-47209>
- [15] Shi, H., Li, S., Zhong, D., Meng, J., Luo, X., Zhang, X., et al. (2021) CHF Enhancement of Downward-Facing Saturated Pool Boiling on the SCGS-Modified Surfaces with Multi-Scale Conical Pin Fin Structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **181**, Article ID: 121848. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121848>
- [16] Lee, C.Y., Chun, T.H. and In, W.K. (2014) Effect of Change in Surface Condition Induced by Oxidation on Transient Pool Boiling Heat Transfer of Vertical Stainless Steel and Copper Rodlets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **79**, 397-407. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.030>
- [17] Kim, H., DeWitt, G., McKrell, T., Buongiorno, J. and Hu, L. (2009) On the Quenching of Steel and Zircaloy Spheres in Water-Based Nanofluids with Alumina, Silica and Diamond Nanoparticles. *International Journal of Multiphase Flow*, **35**, 427-438. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.02.004>
- [18] Kim, Y.H. and Suh, K.Y. (2003) One-Dimensional Critical Heat Flux Concerning Surface Orientation and Gap Size Effects. *Nuclear Engineering and Design*, **226**, 277-292. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2003.07.003>
- [19] Sohag, F.A., Beck, F.R., Mohanta, L., Cheung, F., Segall, A.E., Eden, T.J., et al. (2017) Effects of Subcooling on

- Downward Facing Boiling Heat Transfer with Micro-Porous Coating Formed by Cold Spray Technique. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **106**, 767-780. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.091>
- [20] 史昊鹏, 廖炜铖, 钟达文, 等. 朝下针翅结构表面稳态临界沸腾换热实验研究[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(12): 2337-2343.
- [21] Mt Aznam, S., Mori, S., Sakakibara, F. and Okuyama, K. (2016) Effects of Heater Orientation on Critical Heat Flux for Nanoparticle-Deposited Surface with Honeycomb Porous Plate Attachment in Saturated Pool Boiling of Water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **102**, 1345-1355. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.004>