

水平窄缝内多孔介质传热特性研究

扈本学^{1,2}, 徐彦峰³, 苏光辉^{1,2}, 秋穗正^{1,2}, 赵大卫^{1,2}, 巫英伟^{1,2}

(1. 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;

2. 西安交通大学 核科学与技术学院, 陕西 西安 710049; 3. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610041)

摘要: 对面朝下加热水平窄缝内多孔介质的传热特性进行了实验研究, 得到了不同工况下的沸腾曲线。通过比较各工况下的沸腾曲线得出: 多孔介质的存在大幅提高了面朝下加热水平窄缝内传热的换热系数, 尤其是沸腾段的换热得到了很大程度的强化; 提高窄缝宽度, 选用热导率高的固体微粒制作多孔介质等可提高多孔介质的换热能力。根据多孔介质传热的机理, 拟合出了面朝下加热水平窄缝内多孔介质的自然对流传热与核态沸腾传热关联式。

关键词: 面朝下加热; 水平窄缝; 多孔介质; 自然对流; 核态沸腾

中图分类号: TL364.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)05-0431-04

Characteristics of Heat Transfer for Narrow Gap on Horizontal Heated Surface With Porous Media

HU Ben-xue^{1,2}, XU Yan-feng³, SU Guang-hui^{1,2}, QIU Sui-zheng^{1,2},
ZHAO Da-wei^{1,2}, WU Ying-wei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: Experiments were carried out to study the characteristics of heat transfer on a downward-facing heated surface with porous media in narrow horizontal gap at atmosphere pressure using water as working fluid. The boiling curves were obtained under different conditions. The heat transfer increases significantly with porous media in the gap especially under boiling condition. The heat transfer in narrow horizontal gap can be enhanced by increasing the gap size and by using porous media with high thermal conductivity and appropriate porosity. Based on the mechanism of heat transfer in porous media, the correlations for natural convection and nucleate boiling were proposed to predict the heat transfer under the present condition.

Key words: downward-facing heated surface; narrow horizontal gap; porous media; natural convection; nucleate boiling

在反应堆严重事故中,如果堆芯不能得到充分冷却,堆芯材料可能会熔化并沉积在压力容器的底部。1979年,在美国三哩岛2号机组严重事故中,约19 t熔化的堆芯碎片堆积在下腔室底部,从而引起热斑,但压力容器并未被烧穿。这些现象表明,压力容器下封头冷却过程存在某种未被查明机理的传热方式。Su等^[1]认为:在三哩岛堆芯熔化严重事故中,熔化的控制棒、控制棒包层、控制棒导向管、燃料芯块等沉积在压力容器的底部并形成具有一定厚度的碎片床,随后由冷却剂的局部沸腾产生的蒸汽渗透进入多孔性的堆芯碎片床时,与堆芯碎片发生氧化反应而使堆芯碎片细化化,压力容器下封头由氧化放热产生的热量和衰变余热所加热,这对应着在三哩岛事故中压力容器上热斑的形成。被氧化的颗粒状碎片产生较大的毛细管作用,使水渗透到碎片床内而提供足够大的冷却能力,使热斑消失。

上述过程可用面朝下加热水平窄缝内多孔介质的传热来模拟。因此,研究面朝下加热水平窄缝内多孔介质的传热特性具有一定意义。本工作拟建立实验系统来研究面朝下加热水平窄缝内多孔介质的传热特性。

1 实验系统及内容

实验系统示于图1。该系统包括实验装置、数据采集系统和用以保持水位的辅助系统。加热部分是直径分别为100和300 mm、厚度为30 mm的不锈钢圆盘。圆盘置于长方形容器中,容器尺寸远大于加热圆盘,可忽略容器侧壁对窄缝内换热的影响。圆盘上部和侧面包有

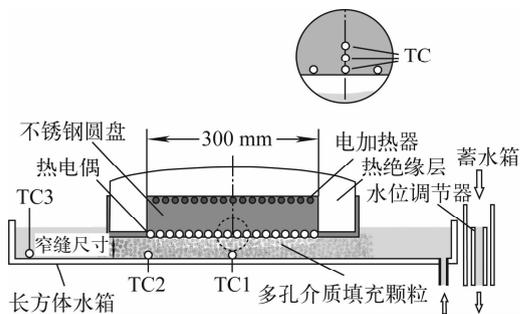


图1 实验系统

Fig. 1 Experimental apparatus

绝热材料,防止热量由圆盘外表面散失,确保仅下壁面与水有换热。

窄缝的尺寸可通过提升或降低不锈钢加热圆盘来调节。不锈钢圆盘顶部设有1层电加热器,每个电加热器(直径4.8 mm,长2.0 m)的最大热功率为3.12 kW。用直径1.6 mm的K型NiCr-NiSi热电偶测量温度,温度测量的不确定性为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,每个测点的竖直方向设有3个热电偶。

对于直径为300 mm的圆盘,共有37个在不同位置的热电偶测量温度,其中的28个热电偶靠近圆盘表面。为测量热流密度,在同一位置处沿垂直方向距离圆盘表面8.2、4.9、1.6 mm处设3个测点,即在圆盘中心正下方处测量水温的测点TC1、边缘处的测点TC2和靠近容器边缘处的测点TC3。

直径为100 mm的圆盘的热电偶的测点与直径为300 mm的情况类似。

实验过程中将球形固体颗粒置于窄缝中,形成多孔介质传热层。颗粒的直径与窄缝的尺寸为同一数量级。

在0.1 MPa下,采用逐步提升加热功率的方法对直径为100和300 mm圆盘不同间隙尺寸内的各种多孔介质传热特性进行实验研究,由数字采集系统记录保存实验结果。

2 不同实验条件下沸腾曲线的比较

水平窄缝内多孔介质传热可分为自然对流区、过冷沸腾区、核态沸腾区、过渡沸腾区及膜态沸腾区。

2.1 多孔介质的存在对换热性能的影响

加热圆盘直径 $d=300\text{ mm}$ 、窄缝尺寸 $s=6\text{ mm}$ 的填充铝球与 $s=7\text{ mm}$ 的无填充颗粒时的沸腾曲线示于图2。图中, q 为热流密度, Δt_w 为壁面过热度。

由图2可知,6 mm下含铝多孔介质的传热系数远高于7 mm下纯水的传热系数,而依据文献[2],6 mm下水的传热系数会小于7 mm下水的传热系数,所以,6 mm下含铝多孔介质的传热系数远高于6 mm下纯水的传热系数。于是可得:在其他条件相同的前提下,多孔介质的存在大幅促进了面朝下加热的窄缝传热。在未发生沸腾时,铝的热导率远高于水的热导率,这极大地促进了传热;发生沸腾后,一

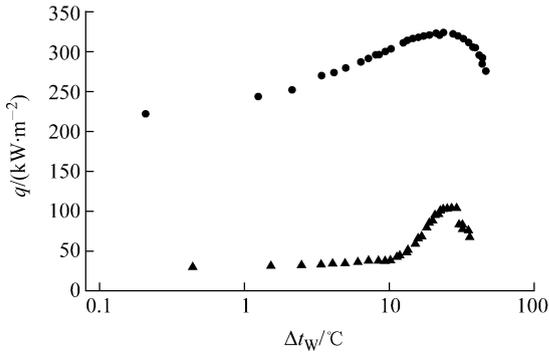


图2 多孔介质对换热性能的影响

Fig. 2 Effect of porous media on heat transfer

●——填充介质为铝球, $s=6$ mm; ▲——纯水, $s=7$ mm

方面铝的热导率远高于水的热导率促进传热,另一方面铝球的部分表面温度会高于水的饱和温度,铝球表面也会产生气泡,这极大促进了沸腾换热。基于以上两点,含铝多孔介质的存在大幅促进了面朝下加热的窄缝传热。

2.2 窄缝尺寸对换热的影响

多孔介质固体颗粒为直径 5 mm 的 Al_2O_3 圆球,圆盘直径 $d=100$ mm,窄缝尺寸分别为 5 和 12 mm 时的沸腾曲线示于图 3。

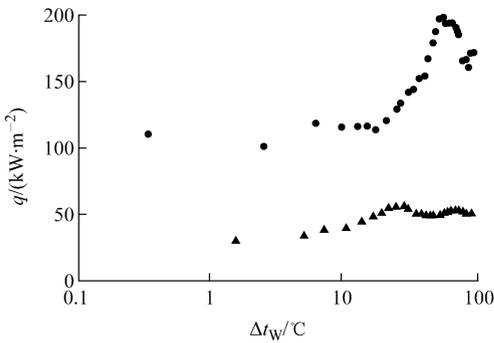


图3 窄缝尺寸对换热性能的影响

Fig. 3 Effect of gap size on heat transfer

●—— $s=12$ mm; ▲—— $s=5$ mm

由图 3 可得:其他条件不变,增加窄缝尺寸,自然对流段及沸腾段换热均极大地增强。窄缝尺寸越大,越有利于窄缝流体与窄缝外流体的搅混,因此,传热系数也越大。

2.3 颗粒热导率对换热性能的影响

多孔介质固体颗粒为直径 5 mm 的小球, $s=5$ mm,圆盘直径 $d=100$ mm,固体颗粒材料分别为 Al_2O_3 和 ZrO_2 时的沸腾曲线示于图 4。

Al_2O_3 的热导率在 $t=0\sim 100$ °C 时为 $30\sim 40$ $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$; ZrO_2 的热导率在 $t=0\sim 100$ °C 时约为 1.6 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$ [3]。

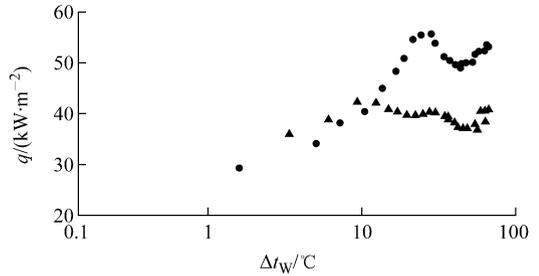


图4 固体颗粒热导率对换热性能的影响

Fig. 4 Effect of thermal conductivity for solid particles on heat transfer

材料:●——氧化铝;▲——氧化锆

由图 4 可知:在其他条件相同的前提下,选用高热导率的固体颗粒会促进传热,尤其是沸腾段的传热会明显增强。在自然对流段或低壁面过热度情形下,两者的传热系数相当,这是由于 Al_2O_3 和 ZrO_2 的导热性能并不是很好,且小球与壁面接触面很小,固体颗粒的导热只占传热的很小部分,而窄缝内传热以水的导热及自然对流为主,故两者的传热性能相当。但在沸腾段或高壁面过热度时, Al_2O_3 小球热导率高,小球部分表面的温度超过 100 °C,可形成新的产生气泡的壁面,这会极大促进沸腾换热, ZrO_2 的热导率低,产生气泡的壁面面积相对小些,因此,采用 Al_2O_3 小球时的传热明显强于采用 ZrO_2 小球时的传热。

3 模型的建立及关联式

3.1 自然对流

对于窄缝传热,特征尺寸有两种选取方法:窄缝宽度 s 或圆盘直径 d 。本工作选取 s 作为特征尺寸,选取 $t_f=(t_{TC1}+t_{TC2}+t_{TC3})/3$ 作为定性温度[2]。

对于竖壁自然对流换热,在 t_w-t_∞ 为定值时,导热介质为多孔介质的经验关系式[4]为:

$$Nu_{pr} = 0.444Ra_{pr}^{0.5} \quad (1)$$

其中, $Nu_{pr} = hx/\lambda_m$, $Ra_{pr} = g\beta\Delta tKx/\alpha_m$, h 为局部换热系数, x 为介质到竖壁端点的距离, g 为重力加速度, β 为水的膨胀系数, Δt 为换热温

差, ν 为水的运动粘性系数, K 为渗透率(对于球状颗粒, $K = d_p^2 \Psi^2 / 18(1 - \Psi)^2$ [5]), 其中, d_p 为颗粒的直径, Ψ 为多孔介质的孔隙率), $\alpha_m = \lambda_m / (\alpha_p)_f$, λ_m 为平均热导率, $\lambda_m = (1 - \Psi)\lambda_s + \Psi\lambda_f$, λ_s 与 λ_f 分别为固体及水的热导率。

对于水平窄缝内多孔介质的自然对流换热, 可类比得到其换热关联式的形式如下:

$$Nu_p = C(Ra_p)^n \quad (2)$$

其中, $Nu_p = hs / \lambda_m = qs / \lambda_m \Delta t$, $Ra_p = g\beta\Delta t K s / \nu_f \alpha_m$, ν_f 为水的运动粘性系数。

依据文献[2], 特征尺寸取窄缝尺寸 s 。然后依次加入修正因子 Pr 、 Δt 、 λ_f / λ_s 、 s/d , 最后采用多元线性回归方法可得如下拟合结果:

$$Nu_p = 1.1 \times 10^{-5} (Ra_p)^{1.272} Pr^{2.95} \cdot \Delta t_w^{-0.269} (\lambda_f / \lambda_s)^{0.187} (s/d)^{0.186} \quad (3)$$

式(3)的适用条件为: 0.1 MPa 下面朝下加热水平窄缝内多孔介质的自然对流段传热, 且 s/d 较小。式(3)对本实验结果的预测相对误差示于图 5。

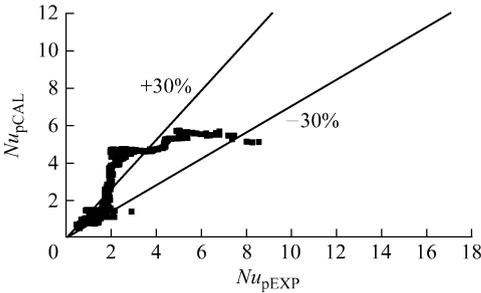


图 5 自然对流段式(3)的相对误差

Fig. 5 Relative error of Eq. (3) for natural convection

3.2 核态沸腾

对于水的核态沸腾传热, 在 0.1~4 MPa 压力下, 米海耶夫推荐大容器饱和沸腾的计算式为 $h = \Delta t_w^{2.33} p^{0.5}$ 。对于 0.1 MPa 下大容器内水的沸腾, 则上式转化为 $h = C_1 \Delta t_w^{2.33}$, C_1 为系数, 在此亦加入多孔介质的两个修正项 $\Psi / (1 - \Psi)$ 、 λ_f / λ_s 及窄缝修正项 s/d , 采用多元线性回归方法可得如下拟合结果:

$$h = 1.37 \times 10^4 (\lambda_f / \lambda_s)^{-0.317} \cdot \Delta t_w (s/d)^{0.127} (\Psi / (1 - \Psi))^{-0.0679} \quad (4)$$

式(4)的适用条件为: 0.1 MPa 下面朝下加热水平窄缝内多孔介质的核态沸腾段传热, 且 s/d

较小。式(4)对本实验结果的预测相对误差在 $\pm 30\%$ 以内(图 6)。

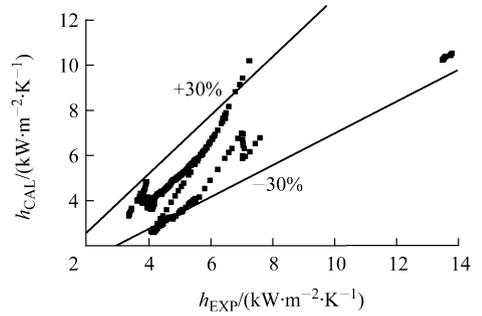


图 6 核态沸腾段式(4)的相对误差

Fig. 6 Relative error of Eq. (4) for nucleate boiling

4 结论

本工作进行了不同工况下面朝下加热水平窄缝内多孔介质的传热实验, 得到水平窄缝内多孔介质的传热系数远高于相同条件下纯水的传热系数的实验结果。选用高热导率的固体颗粒构造多孔介质, 增加窄缝宽度, 减小圆盘直径将会促进水平窄缝内多孔介质的换热。本工作给出了水平窄缝内多孔介质自然对流段及核态沸腾段传热的实验关联式, 并利用实验数据进行了验证。

参考文献:

- [1] SU G H, SUGIYAMA K, AOKI H, et al. Experimental study on coolability of particulate core-debris bed with oxidation (II): Fragmentation and enhanced heat transfer in zircaloy debris bed [J]. Nuclear Science and Technology, 2006, 43(5): 537-545.
- [2] SU G H, SUGIYAMA K. Natural convection heat transfer of water on a horizontal downward facing stainless steel disk in a gap under atmospheric pressure conditions [J]. Annals of Nuclear Energy, 2007, 34: 93-102.
- [3] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 物性数据手册: 无机卷 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 261-262.
- [4] IELD D A, BEJAN A. Convection in porous media [M]. New York: Springer-Verlag, 1992: 79-83.
- [5] 刘光尧. 渗透系数概念发展的回顾 [J]. 工程勘察, 1997(2): 34-38.
LIU Guangyao. Development of conception of permeability coefficient [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1997(2): 34-38(in Chinese).