

# 棒束再淹没传热试验研究

史明哲 许国华

(中国原子能科学研究院反应堆工程技术研究所, 北京, 102413)

采用21根束棒元件研究系统压力对再淹没传热的影响。试验参数范围为: 系统压力为0.1—0.4MPa, 入口淹没率为14.5—39.5mm·s<sup>-1</sup>, 加热功率为0—0.116kW·m<sup>-1</sup>, 初始壁温为380—540℃, 入口水温为25—40℃。实验结果表明: 再湿速度、传热系数和骤冷温度随系统压力的增加而增加。

**关键词** 再淹没传热 束棒 传热系数

近年来, 国内已开展了以大气和以蒸汽为背压的圆管和束棒再淹没试验研究<sup>[1-3]</sup>, 对再淹没过程中的再湿现象以及热工参数对再淹没传热的影响进行了分析研究。

文献[3]采用21根束棒元件, 研究了定位架对再淹没传热的影响, 试验发现定位格架使其下游的元件表面温度明显下降, 传热系数增加, 在某些试验工况下, 定位架下游的传热系数比上游高70%。试验结果表明, 随着离定位架距离的增大, 定位格架对传热的影响逐渐减弱。本试验工作进一步研究了压力对束棒再淹没传热的影响, 试验用压力的变化范围为0.1—0.4MPa。

## 1 试验回路与试验方法

### 1.1 试验回路与试验段

试验回路如图1所示, 它由试验段、泵、涡轮流量计、预热器、快动作电磁阀、稳压器等组成。主回路与旁通回路的快速切换靠快动作电磁阀完成。

实验段由加热元件、上下导电铜管、上腔室、下腔室、流道外壳和夹带水收集器等组成。流道横向剖面图如图2所示。加热元件共21根, 它由不锈钢(1Cr18Ni9Ti)制成, 其外径为10mm, 长为1.5m, 壁厚为1.5mm。两侧的导电铜管长300mm。加热元件在流道内为正方形排列, 栅距为13.3mm。在4个角, 各有一根直径为6mm的不锈钢管, 试验时, 它们没有被通电加热。流道外壳

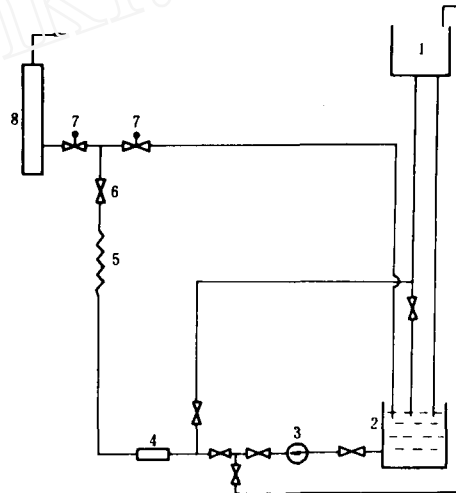


图1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic of test facility

1—高位水箱; 2—低位水箱; 3—泵; 4—涡轮流量计; 5—加热器; 6—调节阀; 7—快动阀; 8—实验段。

为不锈钢管,其内径为79mm。

为了判断再淹没过程中骤冷前沿的位置,测量加热元件不同位置的温度瞬态变化,在图2所示的A、B、C、D4根加热元件上,沿轴向布置了24付 $\phi 1.0\text{mm}$ 的镍铬-镍硅铠装热电偶。热偶安装如图3所示。并在4根加热元件上,距加热始端20mm处,各安装了一付热偶。从300mm开始,在300mm与1200mm之间,每隔100mm布置2付热偶(这2付热偶,布置在A、B、C、D4根加热元件中的2根上)。

在加热元件上,沿轴向共安装了3付定位格架。定位格架高36mm,壁厚0.4mm。定位架的结构、形状、尺寸与秦山电站所用的定位格架相同,但它由不锈钢制成。

为了研究定位格架对再淹没传热的影响,中间定位格架置于900mm热偶测点的上游位置。定位格架的上边沿位置距始端880mm,故热偶测点离定位架上边沿20mm。第一个定位格架置于500mm热偶测点的上游。定位格架的上边沿位置距始端487mm,热偶测点离定位格架上边沿13mm。

加热元件采用交流电直通的加热方法。电功率由1台30kW大电流变压器供给,由调压器调节加热功率。在流道外壳的外面,绕有电阻丝,可通电加热。电阻丝外面是保温材料。在上腔室四周也绕有电阻加热丝,试验时它可通电加热,使上腔室壁温保持在与系统压力对应的饱和温度上。

## 1.2 测量系统

再淹没过程中,入口水温及加热元件壁面温度的瞬态变化由镍铬-镍硅热电偶测量。加热元件二端的电压由数字电压表测量,通过加热元件的电流由互感器配精密电流表测量。进入试验段的冷却水流量由涡轮流量计配频率计测量。在试验段出口处安装了1台压力变送器,用它来测量试验段出口压力。试验中,测量了加热元件壁温、压差、入口淹没率、入口水温、流道外壳壁面温度、加热元件两端电压及流过加热元件的电流等参数。

## 2 试验方法与实验范围

本试验按如下方法进行:

(1)再淹没开始前,先使用旁通回路。冷却水不进入试验段,而是通过旁通回路,回到低位水箱。调节流量,使流量达到预定值。调节高位水箱内的加热器或入口预热器的加热功率,使入口水温达到预定值。调节稳压器内加热元件的加热功率,使系统压力稳定在所要求的数值。

(2)加热元件通电加热,元件壁温不断上升。待元件壁温达到预定值时,快速改变加热元件上的加热功率,使它达到要求的数值。在此同时,快动作阀迅速动作,切断旁路,冷却水以要求

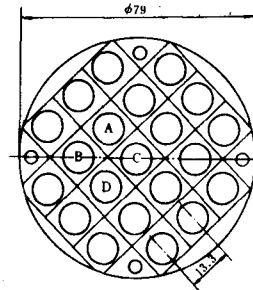


图2 流道横向剖面图

Fig. 2 Cross section of channel

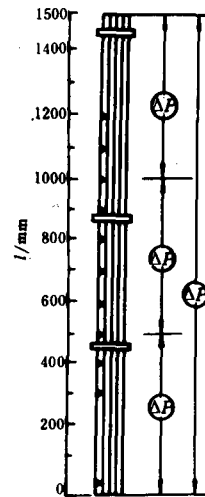


图3 加热元件

Fig. 3 Heating element

的流量从底部注入试验段。再淹没瞬态过程开始。

(3)在试验过程中,连续记录元件壁温、入口水温、试验段出口压力、入口淹没率及加热功率等各种参数。

(4)当整个加热元件表面被再湿以后,切断施于加热元件的加热功率,停止数据记录,结束一次试验。

(5)电磁阀动作,停止向试验段注水,冷却水从旁通流入低位水箱。

(6)放掉试验段内的水,准备开始下一次试验。

试验范围:

试验参数范围如下:试验段出口压力  $p$ : 0.1—0.4MPa,入口淹没率  $U_{in}$ : 14.5—39.5mm·s<sup>-1</sup>,加热元件初始壁温  $T_{wi}$ : 380—540℃,入口水温  $T_{in}$ : 25—40℃,加热功率  $P_p$ : 0—0.116kW·m<sup>-1</sup>。

### 3 试验结果

文献[3]曾研究了束棒再淹没过程中,各热工参数的变化对骤冷温度、再湿速度、传热系数的影响。本试验结果与文献[3]的试验结果基本上是一致的,所以本文不再作进一步的分析与讨论。这里主要分析讨论系统压力对再淹没传热的影响。在每一次试验过程中,均连续记录了加热元件表面温度的瞬态变化过程。

再湿速度的整理主要根据壁温瞬态变化曲线来进行的。壁温的变化反映了再淹没过程中传热工况与流动工况的变化情况,壁温的瞬态变化也给出了元件表面达到再湿的时间。由图4可以看到系统压力对再湿速度的影响。图中给出了4种不同压力下的试验结果。在这些试验中,加热功率为0.11kW·m<sup>-1</sup>,初始壁面温度为450℃,入口水温为25℃,由图可以看到,随着压力的增大,再湿速度明显增大。本试验结果与文献[2]的试验结果基本相同。

上述现象主要是因为随着压力的提高,流体的物性将产生变化,使再淹没过程中传热系数有所提高,从而也影响了元件的再湿速度,使其速度加快。

图5为再淹没过程中传热系数随时间的变化曲线。图中给出了3种不同压力下的试验结果。在这些试验中,入口淹没率为31.5mm·s<sup>-1</sup>,元件加热功率为0.11kW·m<sup>-1</sup>,初始壁温为450℃,入口流体温度为25℃,测点位置为800mm。由图可以看到,随着压力的增加,传热系数有所增大。

图6给出了3个不同压力下骤冷温度的数据。由图可见,随着压力的升高,骤冷温度提高。这与文献[2]、[4]的结果基本一致。Kim 和 Lee 系统地整理了堆外低压试验数据,得到了与上述类似的结论。

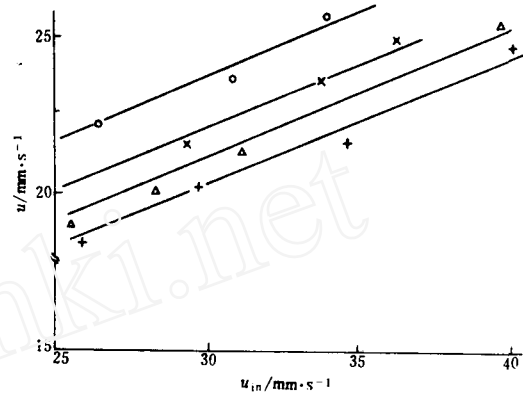


图4 压力对再湿速度的影响

Fig. 4 Effect of pressure on rewetting velocity

$P_p = 0.11 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $T_{wi} = 450^\circ \text{C}$ ;  $T_{in} = 25^\circ \text{C}$ .

○ —  $p = 0.4 \text{ MPa}$ ;  $\Delta$  —  $p = 0.27 \text{ MPa}$ ;

× —  $p = 0.19 \text{ MPa}$ ; + —  $p = 0.1 \text{ MPa}$ .

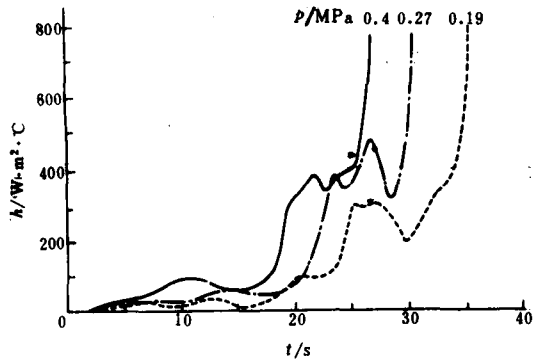


图5 压力对传热系数的影响

Fig. 5 Effect of pressure on heat transfer coefficient

$U_{in} = 31.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $P_p = 0.11 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $T_{wi} = 450^\circ\text{C}$ ;

$T_{in} = 25^\circ\text{C}$ ;  $Z = 800 \text{ mm}$ .

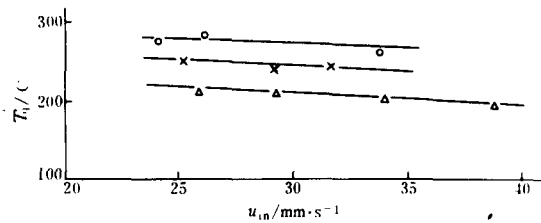


图6 压力对骤冷温度的影响

Fig. 6 Effect of pressure on quench temperature

$P_p = 0.11 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $T_{wi} = 450^\circ\text{C}$ ;  $T_{in} = 25^\circ\text{C}$ ;  $Z = 800 \text{ mm}$ ;  $\times$ — $p = 0.19 \text{ MPa}$ ;  $\circ$ — $p = 0.4 \text{ MPa}$ ;  $\Delta$ — $p = 0.1 \text{ MPa}$ .

由于定位格架的存在,再淹没过程中,定位格架下游出现早湿现象。从图7可以看到,在距加热段入口900mm处比800mm处骤冷时间要早,即在那里提前出现骤冷。这是由于定位格架的存在,使其下游传热增强的缘故。从图7也可以看到定位格架下游(900mm)的传热系数大于其上游(800mm)的传热系数。引起再淹没过程定位架下游传热系数的原因如下:

(1)流体的扰动:对单相流体流动,在定位格架对对流传热的影响,已作了比较充分的研究<sup>[5,6]</sup>。实验表明,由于定位格架的存在,使流动边界层在那里断开,流动产生扰动,因此在定位格架下游,传热系数增加。与单相流动一样,在再淹没二相传热过程中,定位格架使蒸汽流动受到干扰,从而使其下游传热增强。

(2)液滴的破碎与飞溅:在液滴通过定位格架时,部分液滴撞击定位格架。液滴被破碎,成为直径更小,数量更多的小液滴。这些小液滴中,有一部分通过定位架后,撞击元件表面,使元件表面温度下降。同时,液滴破碎后,总的传热表面增大,因此能有效地从过热蒸汽中吸收热量,使过热蒸汽温度下降,从而使元件表面向蒸汽的传热量增加。

试验结果表明,骤冷温度不但与压力有关,还与距加热段始端位置有关。在加热段始端,骤冷温度比较高,随着距始端距离的增加,骤冷温度下降。一般说来,元件上部能得到较好的预冷,骤冷温度比较低。

试验结果还表明,定位格架下游骤冷温度下降了。这是因定位格架下游的传热系数比较

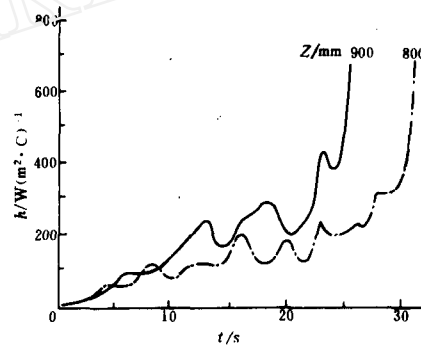


图7 定位格架对传热系数的影响

Fig. 7 Effect of grid spacer on heat transfer coefficient

$p = 0.1 \text{ MPa}$ ;  $P_p = 0.11 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $U_{in} = 25.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$T_{in} = 25^\circ\text{C}$ ;  $T_{wi} = 450^\circ\text{C}$ .

大,元件表面得到较好的预冷,因此骤冷温度也相应降低。但第一个定位格架对再淹没传热的的影响很小。对它下游的元件表面温度影响很小,对传热系数影响也很小。同样它对下游表面的再湿时间和骤冷温度的影响也很小。这是由于第一个定位格架距加热元件始端较近,再湿前沿到达第一个定位格架前,蒸汽产生量与液点夹带量都比较小。

通过实验得到如下结论:试验结果表明,随压力提高,加热元件表面传热系数增大。再湿速度也随压力升高而加快,骤冷温度随压力升高而升高。

### 参 考 文 献

- 1 颜迪民,许国华,周润彬.管状试验段底部淹没时的再湿传热.工程热物理学报,1985,6(1):63-65.
- 2 许国华,陈明星.水在加热表面上的再湿传热.中国工程热物理学会,1984.
- 3 陈明星,许国华,贾桂英.定位架对再淹没传热的影响.原子能科学技术,1989,23(5):29-36.
- 4 Chung, MK. Experiment Study on Reflood Phenomena. SRW-18, 1978.
- 5 Hoffman HW. International Development in Heat Transfer Part III-V. 1961.
- 6 许国华.定位架对元件表面传热的影响.原子能科学技术,1987,21(5):523-527.

## THE REFLOODING HEAT TRANSFER EXPERIMENT IN ROD BUNDLE

SHI MINGZHE XU GUOHUA

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275, Beijing, 102413)

### ABSTRACT

Experiments are performed for investigating the effect of system pressure on reflooding heat transfer. The test section is a rod bundle with 21 rods. The test parameter is in the range of 0.1—0.4 MPa for system pressure, 14.5—39.5 mm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> for inlet reflood flow rate, 0—0.116 kW·m<sup>-1</sup> for heating power, 380—540℃ for initial wall temperature and 25—40℃ for inlet temperature, respectively. The experimental results show that rewetting velocity is increased, heat transfer coefficient and quench temperature are all increased with system pressure.

**Key words** Reflooding heat transfer Rod bundle Heat transfer coefficient