

# HFETR 自然循环能力分析研究

徐涛忠, 段天元

(中国核动力研究设计院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 针对高通量工程试验堆 (HFETR) 的运行特点, 本文利用 RELAP5/MOD3 程序对 HFETR 进行了数值建模, 并结合反应堆实际运行工况, 采取了阶跃升功率法和积分功率法分析了系统压力和压力壳平均水温对 HFETR 最大自然循环能力的影响。结果表明: 系统在常压和带压工况下, HFETR 的最大自然循环能力分别为 0.9、2.0 MW。自然循环能力随运行压力的升高而增大, 随压力壳水温的升高而降低。本文基于计算数据与理论推导提出了预测不同平均水温下最大自然循环能力的关系式, 该公式具有指导反应堆实际运行的工程意义。

**关键词:** 高通量工程试验堆; 系统压力; 平均水温; 自然循环能力

中图分类号: TL333 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0198-06

## Analysis and Research on Natural Circulation Capacity of HFETR

XU Tao-zhong, DUAN Tian-yuan

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** For the operating characteristics of HFETR, the numerical model of HFETR was established by RELAP5/MOD3 to analysis the maximal natural circulation capacity. Combining with the reactor running condition, the influence of the system pressure was analyzed by ascending power in step method and the pool water temperature on natural circulation characteristics was analyzed by integral power method. The results show that the natural circulation capacity are 0.9 and 2.0 MW separately under low pressure and high pressure, the natural circulation capacity increases as the running pressure increases, however the natural circulation capacity decreases as the coolant temperature increases in the pressure vessel. Based on the computational result and the theoretical deduction, a correlation was proposed to predicate the relationship between the natural circulation mass flow and the core power under different coolant temperatures.

**Key words:** HFETR; system pressure; average coolant temperature; natural circulation capacity

高通量工程试验堆 (HFETR) 是中国第 1 座高通量研究堆, HFETR 正常的冷却方式是在冷却泵的驱动下, 冷却剂从上至下流过堆芯。在停堆或低功率运行工况下, 可不开冷却

泵, 而依靠元件盒内被加热的水与反射层内冷水之间的密度差产生的浮升力来使水循环流动冷却反应堆元件。

HFETR 实际自然循环工况下存在两个问

收稿日期: 2010-05-14; 修回日期: 2010-07-31

作者简介: 徐涛忠 (1985—), 男, 山东济南人, 研究实习员, 硕士, 从事反应堆热工水力研究

题: 1) 除气加压系统是否开启; 2) 长期冷停堆时, 压力壳的平均水温随季节而变化。

本工作利用 RELAP5/MOD3 程序将堆芯内燃料元件分为热管与平均管, 建立 HFETR 数值模型, 采用单通道模型分析 HFETR 在不同系统压力下和不同压力壳水温下的最大自然循环能力。

## 1 系统压力对最大自然循环能力的影响

在 HFETR 系统中, 调节系统压力的主要有除气加压系统与容积补偿器。除气加压系统中的加压泵提供给系统 1.02 MPa 的压力, 而容积补给器主要起系统压力微调作用。

根据 HFETR 相关试验可知, HFETR 在低功率运行时, 容积补偿器关闭, 而除气加压系统根据任务情况来决定是否开启。显然, 在除气加压系统开启时, HFETR 系统压力维持在 1.02 MPa 左右; 而在除气加压系统关闭、泄压阀开启的情况, 反应堆系统与大气连通, HFETR 系统压力维持在常压。因此, 本节专门分析这两种工况下的最大自然循环能力。

对自然循环能力的研究是采取阶跃提功

率方法, 即在反应堆为零功率的工况下, 阶跃提升反应堆功率, 在每个档位上运行一段时间, 待热工参数稳定后, 提取其相关数据进行分析。

### 1.1 系统带压工况下的自然循环能力

调试反应堆为静态零功率, 压力壳内平均水温为 15.65 °C。在 HFETR 阶跃提升功率过程中, 除气加压系统一直开启, 提供给一回路系统 1.02 MPa 的静压, 不考虑除气加压流量。

本文采用单通道模型, 只需保证热管符合热工设计准则即可。

图 1 示出反应堆堆芯热工参数与功率的关系。由图 1a 可知, 自然循环总流量随功率单调递增。在一定的回路结构下, 单相自然循环流量由热源功率决定。随热源功率的变化, 呈现两个相异的稳态特性区<sup>[1]</sup>; 两区分界点的热源功率, 由回路结构确定, 其关系可表示为  $W \propto Q^m$ ,  $m$  是反映自然循环稳态特性参量与热源功率关系的特征值, 判断可知: 两相分界点以图中  $a$  点为界, 反应堆功率为 0~0.9 MW 时, 为一特性区, 拟合得到  $m=0.56$ ; 反应堆功率为 0.9~2.5 MW 时, 为一特性区, 拟合得到  $m=0.74$ 。

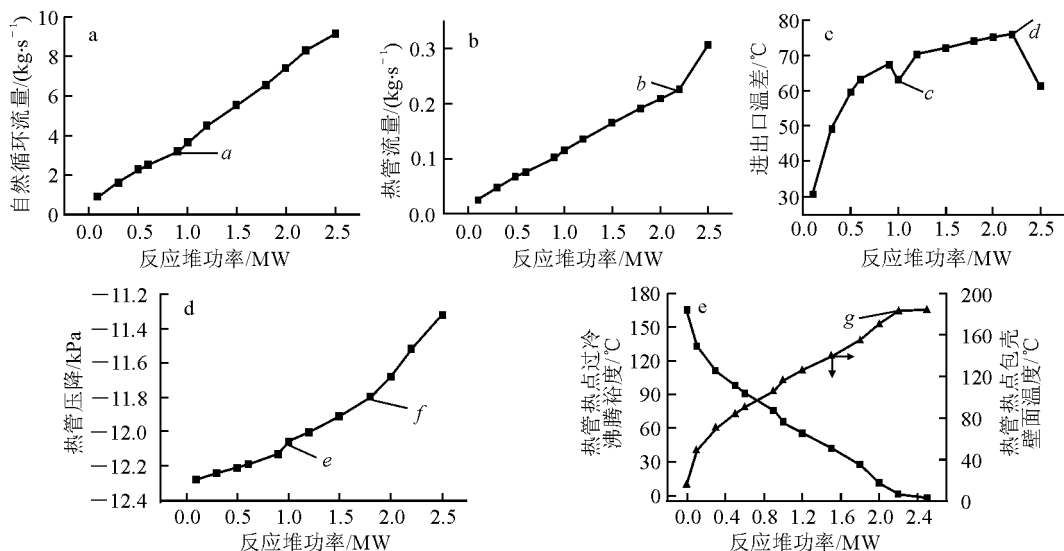


图 1 带压时热工参数与功率的关系

Fig. 1 Relationship between thermohydrodynamic parameter with power under high pressure

由图 1b 可得, 热管自然循环流量随反应堆功率单调递增, 在图中所示的  $b$  点后, 其变化趋势明显改变, 流量随功率快速递增。在装

置结构不变的情况下, 自然循环驱动压头由冷段和热段的密度差决定, 水的密度随温度的变化基本呈线性变化, 不可能造成流量的明显变

化<sup>[2]</sup>。由此可推断,造成流量变化的原因应是净蒸汽产生,使密度差大幅增加,造成流量增幅加大,而拐点应是净蒸汽产生点,即单相流动向两相过渡点。结果证明:反应堆功率为2.2 MW时,其热通道出口空泡份额大于0,由此可知反应堆功率为2.2 MW时,自然循环由单相转为两相。

图1c为热通道进出口温差与反应堆功率的关系。反应堆功率为0.1~2.0 MW时,进出口温差未随反应堆功率单调递增,c点相对于上一点进出口温差减小。这是因为在相同的功率下,当热通道进口水温较高时,热段冷却剂被加热到更高的温度,这种情况下,冷热段密度差要比进口水温较低时要大,从而导致自然循环驱动压头增大,流量增大,温差减小<sup>[3]</sup>。d点后,由于净蒸汽的产生,密度差增大,热通道自然循环流量增幅较大,致使进出口温差不升反降。

由图1d可知,热通道压降随反应堆功率

单调递增,压降随功率的变化被e、f点分为3段不同变化趋势的曲线。热通道压降由浮升力、重力、摩擦力决定,在不同的阶段,密度差随温差的变化呈现出不同的规律,从而热通道压降随功率的变化趋势也不同。

由图1e可知,热管热点壁面温度随反应堆功率单调递增,在g点后,随着过冷沸腾的出现,汽化潜热带走大量热量及对流换热系数的增大,致使热点壁面温度增长缓慢。

功率为2.0 MW,壁面温度为170.27℃,过冷沸腾裕度为11.52℃,在安全限值以内。由此分析可知,HFETR在系统带压工况下的最大自然循环能力为2.0 MW。

本文对HFETR反应堆功率为2.0 MW时的热管进行了单独分析,图2a为热管冷却剂温度、包壳温度、芯体温度沿轴向由上至下的温度分布,从图中可看出,三者沿流动方向即由下至上逐渐增大。可得:热管热点位于热管轴向第1段,其包壳温度为170.27℃,符合安全限值。

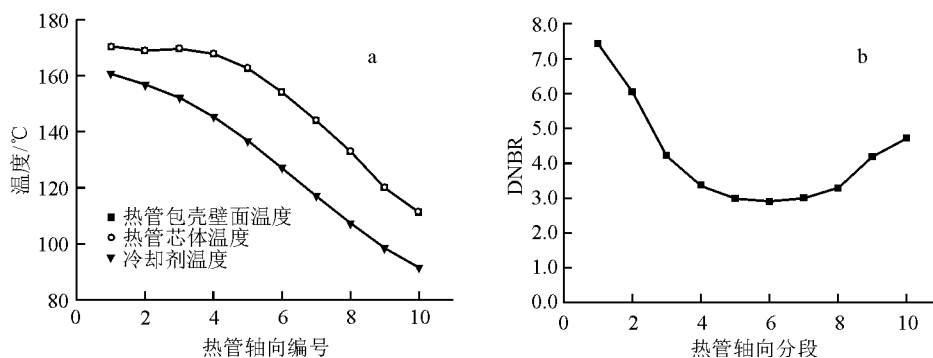


图2 带压时热管轴向温度分布(a)和DNBR分布(b)

Fig. 2 Distribution of axial temperature (a) and axial DNBR (b) in hot tube under high pressure

图2b为热管的DNBR沿轴向自上而下的分布,从图中可看出,在稳态自然循环工况下,热管的MDNBR为2.91,位于轴向第6段,符合热工安全准则。

通过以上分析可得出,HFETR在带压状态时,最大自然循环能力为2.0 MW,其最小DNBR值为2.91,过冷沸腾裕度为11.52℃。

## 1.2 系统常压工况下的自然循环能力

调试反应堆为静态零功率,压力壳内平均水温为15.38℃。在HFETR阶跃提升功率过

程中,卸压阀一直开启,反应堆一回路系统与大气连通,系统压力保持常压。

采用单通道分析法,只需保证热管符合热工设计准则即可。图3示出反应堆堆芯热工参数与功率的关系。由图3a可知,自然循环总流量随功率的增大而增大,在图中所示a点前后,自然循环流量随功率的变化趋势不同,由此可判断:反应堆功率为0~0.9 MW时,为一特性区,拟合得 $m=0.58$ ;反应堆功率为0.9~1.0 MW时,为一特性区,拟合得 $m=0.76$ 。

由图 3b 可得, 热管自然循环流量随反应堆功率单调递增, 在图中所示的 *b* 点后, 其变化趋势明显改变, 流量随功率递增较快。热源功率不同, 进出口温差不同, 驱动力不同, 造成了相异特性区, 使得热管流量在 *b* 点前后随功率的变化趋势也不同。

图 3c 为热通道进出口温差与反应堆功率的关系。反应堆功率为 0.1~1.0 MW 时, 进出口温差未随反应堆功率单调递增, *c* 点相对于上一点进出口温差减小。在结构固定的情况下, 自然循环驱动压头由进出口温差产生的密度差决定。较高进口温度下冷热段密度差要比进口水温较低时要大, 从而导致自然循环驱动压头

增大、流量增大、温差减小。

由图 3d 可知, 热通道压降随反应堆功率单调递增, 压降随功率的变化被 *d* 分为两段不同变化趋势的曲线。热通道压降由浮升力、重力、摩擦力决定, 在不同的阶段, 密度差随温差的变化呈现出不同的规律, 从而, 热通道压降随功率的变化趋势也不同。

由图 3e 可知, 热管热点壁面温度随反应堆功率单调递增。当反应堆功率为 0.9 MW 时, 壁面温度为 105.58 °C, 过冷沸腾裕度为 5.49 °C, 在安全限值以内。由此分析可知, HFETR 在系统常压工况下的最大自然循环能力为 0.9 MW。

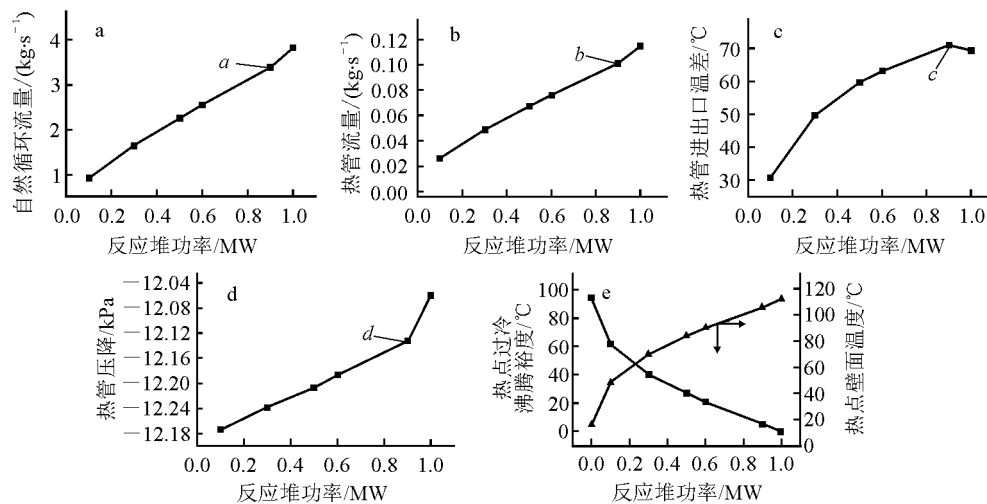


图 3 常压时堆芯热工参数与功率的关系

Fig. 3 Relationship between thermohydrodynamic parameter with power under common pressure

图 4a 为热管冷却剂温度、包壳温度、芯体温度沿轴向由上至下的温度分布, 从图中可看出 3 者数值即由下至上逐渐增大。由图可得, 热管热点位于热管轴向第 1 段, 其包壳温度为 105.58 °C, 符合安全限值。

图 4b 为热管的 DNBR 沿轴向自上而下的分布, 从图中可看出, 在稳态自然循环工况下, 热管的 MDNBR 值为 3.94, 位于轴向第 5 段, 符合热工安全准则。

通过以上分析可得出, HFETR 在常压状态时, 最大自然循环能力为 0.9 MW, 其最小 DNBR 值为 3.94, 过冷沸腾裕度为 5.49 °C。

综上所述: 1) 对于一定自然循环结构,

单相自然循环稳态特性参量由反应堆功率决定, 随着功率的变化, 呈现出两个相异的稳态特性区, 对 HFETR 系统, 分界点反应堆功率为 0.9 MW; 2) HFETR 系统带压时的自然循环能力更大, 提高系统压力, 增大热管出口冷却剂温度的容忍度, 从而提供热管进出口温差, 进而可以增大自然循环能力。

## 2 压力壳平均水温对 HFETR 最大自然循环能力的影响

在 HFETR 压力壳内形成稳定的自然循环后, 堆芯内的余热将传递到压力壳内的冷却剂中, 压力壳内水容积较大, 平均水温升温较慢。因此,

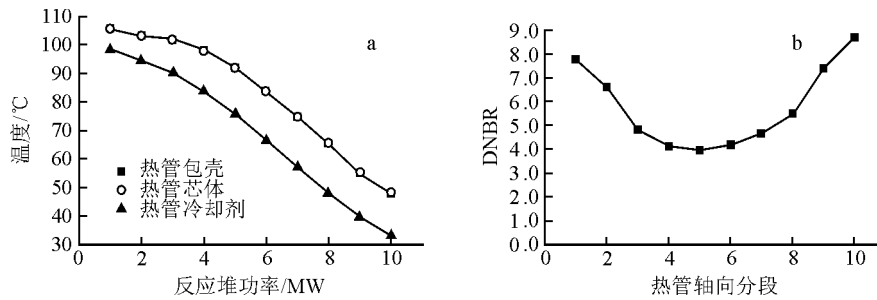


图4 常压时热管轴向温度分布(a)和DNBR分布(b)

Fig. 4 Distribution of axial temperature (a) and axial DNBR (b) in hot tube under commom pressure

压力壳内平均水温对 HFETR 的最大自然循环能力有着重要影响<sup>[3]</sup>；其次，反应堆冷停堆后，压力壳内的平均水温随季节的不同也有所变化。

基于上述考虑，结合 HFETR 实际运行工况，研究了压力壳平均水温为 11、15、24 °C 对 HFETR 自然循环的影响。参考以往低功率升负荷过程计算，假定提升功率的过程为阶跃变化，不考虑密度反馈与多普勒反馈。

反应堆功率由零功率提升至不同档位，稳定运行 3 600 s，判断堆芯内热工参数是否符合 HFETR 热工水力设计准则，利用积分功率来分析压力壳平均水温对自然循环的影响。

#### 1) 压力壳内平均水温为 11 °C

11 °C 压力壳平均水温下，堆芯功率、热通道过冷沸腾裕度及热管热点壁面温度示于图 5。由图 5 可得，当反应堆功率为 2.0 MW 时，热管的过冷沸腾裕度为 5.23 °C，符合 HFETR 最小安全裕度限值条件。对应的热管热点壁温为 160.491 °C，位于热管轴向自上至下第 1 段。通过计算同时得到了此功率条件下热管的 MDNBR=3.89。

综上分析可得：压力壳内平均水温为 11 °C 时，HFETR 自然循环期间，堆芯的最大积分功率为 0.083 MW·d。

#### 2) 压力壳内平均水温为 15 °C

15 °C 压力壳平均水温下，堆芯功率、热通道过冷沸腾裕度及热管热点壁面温度示于图 6。由图 6 可得，当反应堆功率为 1.8 MW 时，热管的过冷沸腾裕度为 7.71 °C，符合 HFETR 最小安全裕度限值条件。对应热管热点壁温为 160.491 °C，位于热管轴向自上至下第 1 段。通过计算得到此功率下热管的 MDNBR=4.33。

综上分析可得：压力壳内平均水温为 15 °C 时，HFETR 自然循环期间，堆芯的最大积分功率为 0.075 MW·d。

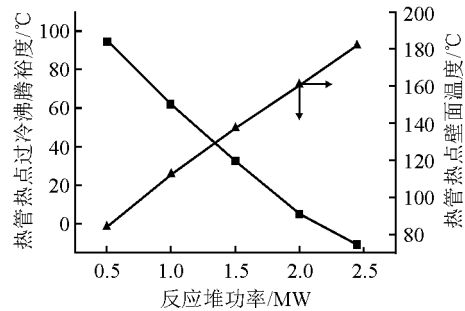


图5 平均水温 11 °C 时热点壁温、过冷沸腾度与功率的关系

Fig. 5 Hot point temperature and margin of subcooled boiling vs. power at average water temperature 11 °C

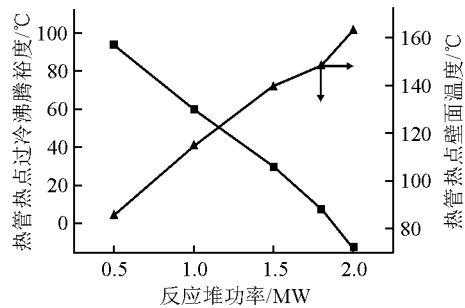


图6 平均水温 15 °C 时热点壁温、过冷沸腾度与功率的关系

Fig. 6 Hot point temperature and margin of subcooled boiling vs. power at average water temperature 15 °C

#### 3) 压力壳内平均水温为 24 °C

24 °C 压力壳平均水温下，堆芯功率、热通道过冷沸腾裕度及热管热点壁面温度示于图 7。由图 7 可得，当反应堆功率为 1.5 MW 时，热管的过冷沸腾裕度为 9.93 °C，达到 HFETR 最小安全裕度限制条件。对应的热管热点壁温为 145.529 °C，位于热管轴向自上至下第 1 段。热同时通过计算得到了此功率条件下热管的 MDNBR=4.89。

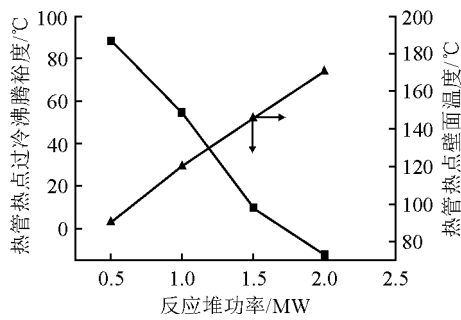


图7 平均水温 24 °C 时热点壁温、过冷沸腾度与功率的关系

Fig. 7 Hot point temperature and margin of subcooled boiling vs. power at average water temperature 24 °C

综上分析可得:压力壳内平均水温为 24 °C 时, HFETR 自然循环期间, 堆芯的最大积分功率为 0.063 MW·d。

将压力壳平均水温与相应的积分功率拟合示于图 8。拟合得出了 HFETR 积分功率与压力壳内平均水温的关系式:

$$N_i = 0.044 + 0.073 \exp(-T/17.4)$$

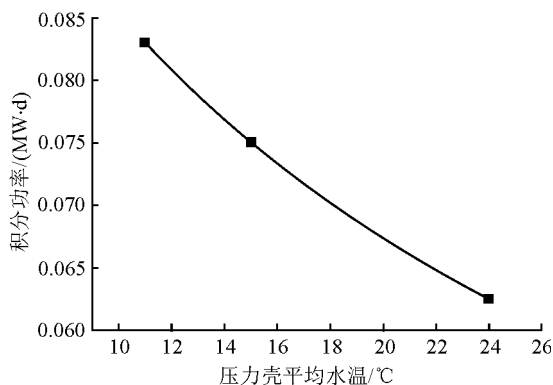


图8 堆芯积分功率与压力壳平均水温的关系

Fig. 8 Relationship between integral power of core with average temperature in pressure vessel

此关系式表明: HFETR 利用自然循环排出冷却堆芯时, 压力壳平均水温影响着自然循环进行的程度, 最终表现为压力壳内平均水温决定堆芯积分功率的大小。压力壳内平均水温越低, 可以对堆芯积分功率越大。

此关系式可以计算不同季节, 反应堆冷停堆后, 自然循环可以带出的最大积分功率, 对于 HFETR 的运行具有直接的参考意义。

### 3 小结

1) HFETR 低功率运行时, 根据任务不同, 决定其加压系统是否开启。因此, 分析了系统压力对 HFETR 自然循环能力的影响。可得: 系统带压时, 其最大自然循环能力为 2.0 MW; 系统常压时, 其最大自然循环能力为 0.9 MW; HFETR 单相自然循环相异特性区分界点反应堆功率为 0.9 MW;

2) 结合积分功率法, 分析了 HFETR 压力壳内平均水温对自然循环的影响。得出: 不同压力壳水温下, 可以带出的堆芯积分功率。压力壳内平均水温越低, 自然循环可以带出的堆芯积分功率则越大, 并拟合出关系式, 此关系式可以计算不同季节, 反应堆冷停堆后, 自然循环可以带出的最大积分功率, 对于 HFETR 的运行具有直接的参考意义。

### 参考文献:

- [1] 杨祖毛, 王飞, 王文康, 等. 闭回路单相自然循环稳态特性研究[J]. 核动力工程, 1999, 20 (3): 219-222.  
YANG Zumao, WANG Fei, WANG Wenkang, et al. Investigation on steady-state performance of single-phase natural circulation for enclosed loop[J]. Nuclear Power Engineering, 1999, 20(3): 219-222(in Chinese).
- [2] 田文喜, 秋穗正, 王甲强, 等. 中国先进研究堆稳态自然循环能力分析[J]. 核动力工程, 2007, 28 (2): 13-18.  
TIAN Wenxi, QIU Suizheng, WANG Jiaqiang, et al. Study on steady natural circulation capacity of CARR[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(2): 13-18(in Chinese).
- [3] 谭思超, 张红岩, 庞凤阁, 等. 单相-两相自然循环过渡点的实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26 (3): 364-366.  
TAN Sichao, ZHANG Hongyan, PANG Fengge, et al. Experimental research on transition point from single-phase to two-phase natural circulation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2005, 26(3): 364-366(in Chinese).