

文章编号: 0253 - 987X(2002)09 - 0925 - 04

螺旋管蒸汽发生器的瞬态流动与传热特性

白博峰¹, 郭烈锦¹, 王学兴²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 郑州机电工程研究所)

摘要: 针对快速和安全启动的要求, 实验研究了螺旋管蒸汽发生器在同步启动过程中的流动和传热特性, 并分析了各种参数对启动安全和启动时间的影响. 螺旋管的管圈直径和管道直径分别为 256 mm 和 0.011 mm. 启动的参数范围是: 最大加热流密度 600 kW/m^2 , 最大质量流速 $1\ 200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 最大实验压力 3.0 MPa. 由实验得到了启动过程的单相湍流、沸腾传热规律, 以及瞬态临界热负荷. 瞬态单相湍流传热和临界热负荷的规律与稳态的有明显不同. 瞬态湍流传热特性符合直管的 Dittus-Boelter 公式. 瞬态临界热负荷远远低于稳态的值, 瞬态沸腾传热与稳态条件下的相同.

关键词: 螺旋管蒸汽发生器; 瞬态传热; 启动; 临界热负荷

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A

Transient Flow and Heat Transfer in Helical Coil Steam Generator

Bai Bofeng¹, Guo Liejin¹, Wang Xuexing²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Zhengzhou Electromechanical Engineering Research Institute)

Abstract: The behaviors of flow and heat transfer in helical coil steam generator during the start-up processes were experimentally investigated. The coil diameter and the inner diameter of the tube are 256 mm and 0.011 mm, respectively. The ranges of test parameters were as follows: maximum heat flux was 600 kW/m^2 , maximum mass flux was $1\ 200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, maximum pressure was 3.0 MPa. The transient processes, named synchro-start-up processes, were investigated in a closed-cycle loop with deionized water, which is so referred because the pump load and the heat load were increased synchronously from zero. The influences of different factors on the start-ups were investigated to determine the optimized start-up operation for fast start-up and safety. The experimental results show that the transient single-phase heat transfer is less than that in stable state because of the weakened enhancement of heat transfer resulting from secondary flow and can be estimated with the Dittus-Boelter correlation which is used for the straight tube flow. The transient boiling heat transfer can be predicted by the correlation for steady-state case. The critical heat transfer phenomena during the synchro-start-up processes were analyzed and a criterion for the safety evaluations was proposed. It is found that the critical heat flux is much lower than that on the stable condition.

Key words: helical coil steam generator; transient heat transfer; start-up; critical heat flux

收稿日期: 2002 - 01 - 09. 作者简介: 白博峰(1971~), 男, 讲师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59995460 - 2).

在螺旋管蒸汽发生器的运行过程中会出现各种瞬态过程,要求设计和运行人员对瞬态过程中的流动和传热规律有较充分的了解。目前一些文献研究了直管内单相流或两相流在压力、流量或加热功率突增、突减时的流动和传热规律^[1,2],然而对多数蒸汽动力系统,实际瞬态过程往往是这3种情况同时发生。Celata等^[3,4]采用 Freon 12 作为工质,实验段为长 2.3 m、内径 7.7 mm 的直管,在 1.0~3.0 MPa 的参数范围内,实验研究了流量、压力、热负荷全部同时或两种同时变化条件下的传热规律。由于瞬态过程极其复杂,需要大量更深入的研究工作。

1 实验系统及实验方法

实验系统和实验段如图 1 所示。实验系统采用闭式循环回路,用不锈钢管连接组成,并用硅酸陶瓷纤维包覆。利用加热段管壁的电加热效应,直接通过大电流低电压的交流电,来加热管内的流动工质。系统压力由稳压器中的高压氮气提供。去离子水由屏蔽泵驱动,一部分经过旁路重新回到入口水箱,其余经过孔板流量测量系统,进入预热段,经初步加热后,再进入螺旋管蒸汽发生器,最后进入冷凝器,冷却后回到屏蔽泵的入口水箱。螺旋管用 $\delta 15 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的不锈钢管弯制而成,管圈直径为 256 mm,节距为 60 mm。

结合螺旋管蒸汽发生器快速和安全启动的要求,研究了同步启动方式的瞬态流动与传热规律。实验方法为首先使系统保持在确定的工况下,然后保持系统阀门的开度不变,去掉热负荷和主回路屏蔽泵,直到系统静止并冷却到一定温度;打开电加热系统,同时启动屏蔽泵,实验段的热负荷在短时间内从

最小值开始连续上升到某一设定值并维持不变。记录各参数的变化过程,测量参数包括实验段进出口工质温度、流量、外壁温、压力、压差、加热功率等,所有参数均通过 IMP 数据采集板和计算机进行采集。

瞬态实验的参数范围如下:最大加热流密度 600 kW/m^2 ,最大质量流速 $1200 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$,最大实验压力 3.0 MPa。

2 实验结果与分析

2.1 启动过程及影响规律

同步启动屏蔽泵和加热系统时,壁温及流体温度随着外部电加热能量的加入而升高,壁温升高速度大于流体。由于流体温度远低于饱和值,因此系统在初期能够以稳定的形式运行。随着流体过冷度的降低及内壁温度的升高,最终满足汽泡产生条件,开始进入汽化阶段,实验段出口压力迅速升高,导致系统流量减小。环状流型出现后,由于流动阻力减小,流量开始回升,并在系统阻尼及泵的耦合作用下趋于稳定,启动结束。

实验研究了不同因素对启动时间与安全性的影响,规律如下:增加初始温度由于减少了系统蓄热量和蓄热时间,有利于缩短启动时间;减小流量容易发生壁温飞升现象,增加流量有利于启动过程中压力的稳定,但由于流体动能的增加,对流动的稳定不利;初始压力愈高,启动结束时的稳定压力越高,启动时间也越长,但有利于系统安全,当初始压力低时,流体汽化提前发生,易出现壁温飞升;热负荷对系统在启动过程中是否发生壁温飞升现象有重大影响,由于传热效率的限制,增加热负荷对缩短启动时间没有明显作用。

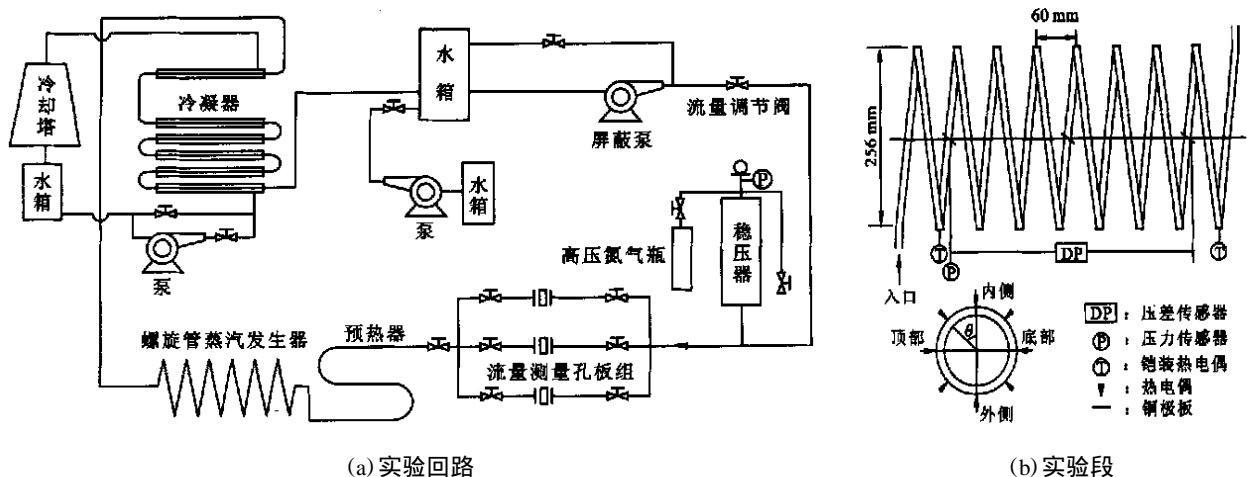
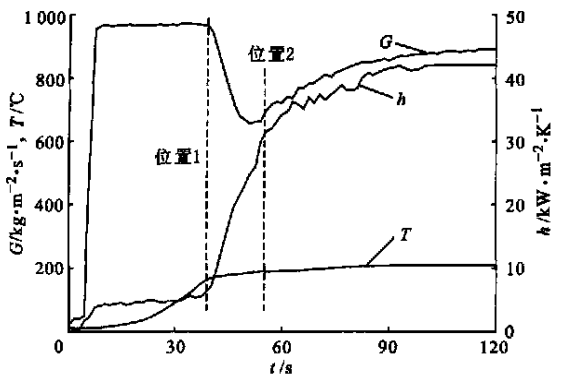


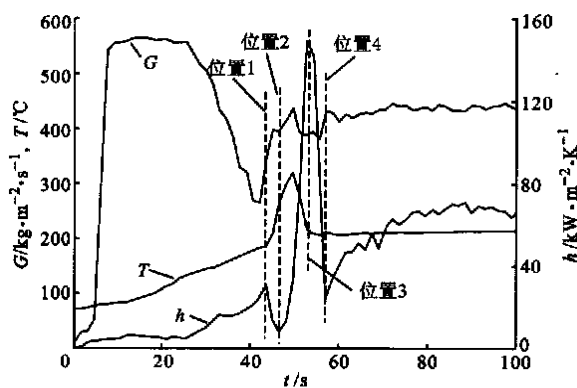
图 1 实验系统及螺旋管蒸汽发生器实验段

2.2 同步启动过程中传热系数的变化

图 2 给出了同步启动过程中传热系数的变化。为了分析方便,图中同时给出其他主要参数的变化过程。对于不出现壁温飞升的过程,见图 2a,传热系数在流量的稳定过程中保持恒定,尽管此时的壁温、流体温度和热负荷持续增加。图中的位置 1 对应传热系数开始急剧增加处,与流量开始急剧减小处所对应,位置 2 对应流量开始增加处。传热系数在位置 1 和位置 2 之间增加的速度最快,表明管内流体进入了沸腾传热阶段,在位置 2 之后,传热系数缓慢增加到最大并保持稳定。对出现壁温飞升的过程,见图 2b,传热系数的变化十分复杂,位置 1 对应传热系数从增加到减小的转变点,此处壁温开始急剧增加,这意味着临界热负荷的发生。传热系数在位置 2 处达到最小,在位置 2 之后,由于流量的恢复,传热改善,前阶段由于传热恶化的原因管壁所积蓄的大量热量此时释放,因此传热系数很高,在壁温恢复到正常值时(位置 3 处)达到最大。此后由于管壁热流密度的减小,在位置 4 处传热系数从最大降低到正常值。传



(a) 没有壁温飞升



(b) 发生壁温飞升

图 2 同步启动过程的质量流速 G 、壁温 T 、传热系数 h 的变化

热系数的变化过程说明,临界热负荷出现在壁温飞升的初始阶段,传热系数的增大或减小都滞后于壁温的升高或降低。

2.3 瞬态传热关联式

瞬态传热系数的实验结果见图 3。对瞬态单相紊流传热,将实验结果分别与 Rogers 关联式^[5]、稳态实验关联式、直管经典关联式

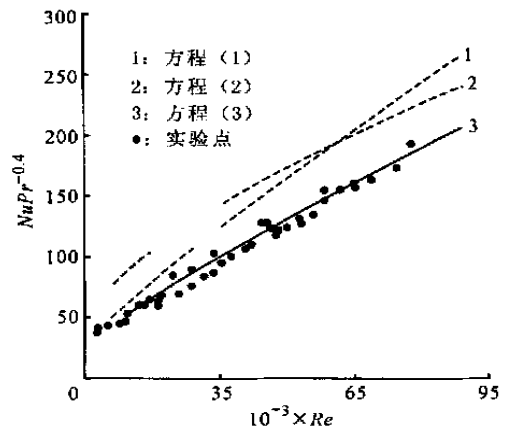
$$NuPr^{-0.4} = 0.023 Re^{0.25} (d/D)^{0.1} \quad (1)$$

$$NuPr^{-0.4} = 0.328 Re^{0.58}$$

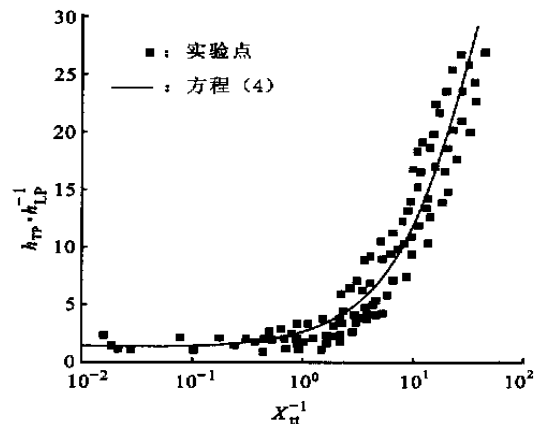
$$6 \times 10^4 < Re < 18 \times 10^4 \quad (2)$$

$$NuPr^{-0.4} = 0.023 Re^{0.8} \quad (3)$$

的计算结果进行了比较,表明瞬态传热系数比稳态的小 40%,而与直管公式的计算结果符合良好,说明在瞬态过程中螺旋管内的二次流对强化传热没有显著贡献。在二次流动过程中,热边界层内的热流体被运输到流动中心区与冷流体混合,因此热边界层越厚,就会有更多的热流体被冷却,这是二次流强化



(a) 紊流传热



(b) 沸腾传热

图 3 瞬态传热系数的实验结果

传热的基本原理^[6]。在瞬态过程中,由于管内没有建立起充分发展的流动,热边界层很薄,因此二次流强化传热效果不明显,紊流流动是螺旋管内强化传热的主要形式。

瞬态沸腾传热系数可以用稳态的实验关联式进行预测

$$h_{TP}/h_{LP} = 1.0 + 1.85(1/X_{tt})^{0.466} \quad 1/X_{tt} < 1.32 \quad (4a)$$

$$h_{TP}/h_{LP} = 2.54(1/X_{tt})^{0.720} \quad 1/X_{tt} > 1.32 \quad (4b)$$

式中: h_{TP} 是瞬态沸腾传热系数; h_{LP} 是液相单独流动时的对流换热系数,采用式(1)计算; X_{tt} 是 Lockhart-Martinelli 参数。实验结果说明对于沸腾这一强烈的换热过程,流动及加热条件瞬态变化对传热的最终结果没有影响。本文认为这可能是由于加热管壁的滞后效应,使得流体侧加热条件变化相对缓慢的原因。

2.4 瞬态临界热负荷

研究瞬态临界热负荷对蒸汽发生器的安全启动与运行有重要的指导意义,它可直接用于确定启动过程是否安全。通过前面的分析知道,启动过程中的传热恶化是在主流为过冷的条件下发生的,是偏离核态沸腾(DNB)现象,主要受局部的流动与传热过程控制。采用 Bo 数($Bo = q/Gh_{fg}$)和无量纲压力的形式,对实验数据进行处理,结果见图4。瞬态临界热负荷可以用下式进行预测

$$Bo = q_c/Gh_{fg} = (0.2 + 5.0 P/P_{cr}) \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中: q_c 、 G 、 h_{fg} 、 P_{cr} 分别是临界热负荷、质量流速、汽化潜焓和临界压力。

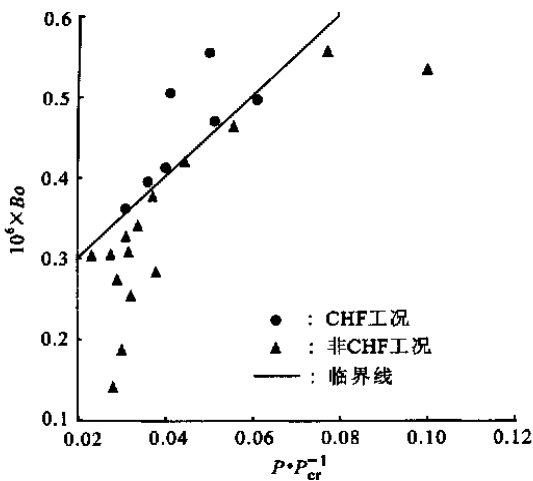


图4 瞬态临界热负荷实验结果

实验结果表明,瞬态临界热负荷水平远远小于

稳态的水平^[7],这意味着临界热负荷在瞬态过程中提前发生。需要注意的是,瞬态临界热负荷与具体的瞬态过程有很大关系,不同的瞬态过程的临界热负荷水平并不完全相同。

3 结论

增加初始温度有利于缩短同步启动的时间,在同步启动过程中出现单相流动的亚稳定阶段,有利于启动的安全;在瞬态过程中螺旋管较直管没有强化传热的作用,瞬态紊流传热系数比稳态条件下的值低40%,可以用直管的 Dittus-Boelter 关联式进行计算;对瞬态沸腾传热系数,可以用稳态条件下的关联式进行计算;瞬态临界热负荷比稳态条件下的值低,本文得到了实验关联式(5)。

参考文献:

- [1] Obukhov S G. Boiling heat transfer in the case of sudden increase in heat load [J]. Heat Transfer Research, 1993, 25(1): 97~101.
- [2] Fukuda K, Shiotsu M, Hata K, et al. Transient boiling heat transfer from initial steady state caused by rapid depressurization [J]. Nuclear Engineering and Design, 1994, 149: 97~110.
- [3] Celata G P, Cumo M, D'Annibale F, et al. CHF in flow boiling during pressure transients [A]. Particulate Phenomena and Multiphase Transport: V. 2 [C]. Washington, D C: Hemisphere Pub, 1988. 207~223.
- [4] Celata G P, Cumo M, D'Annibale F, et al. CHF during transients caused by the simultaneous variations of pressure, power, and/or flow rate [A]. Second International Symposium on Multiphase Flow and Heat Transfer, Xi'an, 1989.
- [5] Rogers G F, Mayhaw Y R. Heat transfer and pressure loss in helically coiled tubes with turbulent flow [J]. Int J Heat and Mass Transfer, 1963, 7: 1 207~1 216.
- [6] Dravid A D, Smith K A, Merrill E W, et al. Effect of secondary fluid motion on laminar flow heat transfer in helically coiled tube [J]. AIChE J, 1971, 17(5): 1 114~1 122.
- [7] Jensen M K, Bergles A E. Critical heat flux in helically coiled tubes [J]. ASME J Heat Transfer, 1981, 103: 660~666.

(编辑 荆树蓉)