中国实验快堆蒸汽发生器启动工况研究

吴 强,纪西胜,牛敬娟,张焕旗,谢海昕
(中国原子能科学研究院 快堆研究设计所,北京 102413)

摘要:中国实验快堆蒸汽发生器为直流式,启动方式与压水堆核电厂的有较大区别,启动过程较为复杂。本文对中国实验快堆蒸汽发生器启动工况进行了研究,并将运行参数与理论设计参数进行了比较。结果表明,运行参数理论计算值与试验值基本吻合。提出了蒸汽发生器启动运行的优化方案,以指导运行人员操作,有效地保障了中国实验快堆功率运行试验的开展。

关键词:中国实验快堆;直流式;蒸汽发生器;启动工况
中图分类号:TL382 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2015)09-1606-05
doi:10.7538/yzk.2015.49.09.1606

Research on Startup Condition of Steam Generator in China Experimental Fast Reactor

WU Qiang, JI Xi-sheng, NIU Jing-juan, ZHANG Huan-qi, XIE Hai-xin
(*China Institute of Atomic Energy*, *P. O. Box* 275-34, *Beijing* 102413, *China*)

Abstract: The steam generator in China Experimental Fast Reactor (CEFR) is direct flow type, and the steam generator startup of CEFR is quite different and more complicated than that of PWR. In this paper, the startup condition of steam generator was studied, and the operation parameters were compared with theoretical design parameters. The results show that the calculated theoretical value of operation parameters is basically coincident with test value. The optimized startup program of steam generator for guiding operator was also introduced. The optimized procedure to start up the steam generator is proposed for guiding operators, and it effectively ensures the power operation test of CEFR.

Key words: China Experimental Fast Reactor; direct flow type; steam generator; startup condition

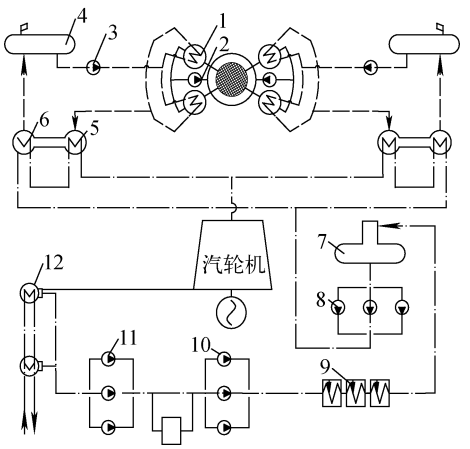
中国实验快堆(CEFR)的主要系统设置和物理参数选择与大型快堆电站相同。实验快堆充分利用固有安全性并采用多种非能动安全技术,无需厂外应急,安全性已达到第4代核能系统的要求[1]。直流式蒸汽发生器启动过程中水汽两相自由液面尚无监测手段,所以快堆蒸汽发生器启动初期相比压水堆更易出现水动力不稳定现象,系统运行操作较为困难。因此,为避

收稿日期:2014-05-30;**修回日期:**2014-12-04
基金项目:863计划资助项目(2007AA05A201)
作者简介:吴 强(1977—),男,安徽无为人,高级工程师,硕士,从事快堆三回路系统与设备调试及运行研究

免在启动过程中触发系统保护参数，须优化启动参数，探索最佳运行方式。本文在 CEFR 多次启动试验基础上，对蒸汽发生器启动工况进行详细分析，阐述启动方式优化后的影响和成功实践经验。

1　蒸汽发生器功率启动

CEFR 主热传输系统采用钠-钠-水三回路布置形式，其设计热功率为 65 MW，电功率为 20 MW。三回路系统的工作流程为：除氧器 190 ℃给水经给水泵升压后送入蒸汽发生器，吸收核热后转变成压力为 14 MPa、温度为 480 ℃的过热蒸汽，进入汽轮机做功；乏蒸汽进入凝汽器被循环水冷却后，冷凝水经凝结水泵及升压泵升压，在低压加热器中连续吸收汽轮机抽汽热量，进入除氧器持续被加热至 190 ℃，实现三回路水和蒸汽的闭式循环。蒸汽发生器作为主热传输系统中三回路系统的关键设备，其安全稳定运行对于保证电站的负荷因子有着非常重要的意义。CEFR 主热传输系统简图示于图 1。



1——中间热交换器；2——一回路钠泵；
3——二回路钠泵；4——缓冲罐；5——过热器；
6——蒸发器；7——除氧器；8——给水泵；
9——低压加热器；10——凝结水升压泵；
11——凝结水泵；12——凝汽器

图 1　CEFR 主热传输系统简图

Fig. 1　Sketch of main thermal transmission system for CEFR

CEFR 蒸汽发生器为直流式蒸发结构，由蒸发器模块和过热器模块组成（图 2），双环路、直管立式布置，钠走壳程，水/蒸汽走管程[2]。依据 CEFR 调试大纲，在蒸汽发生器事故保护系统静态试验结束后，三回路系统具备启动条件即可进行蒸汽发生器热态水冲洗工作。蒸汽发生器热态水冲洗工作结束后，反应堆具备了功率启动的先决条件。

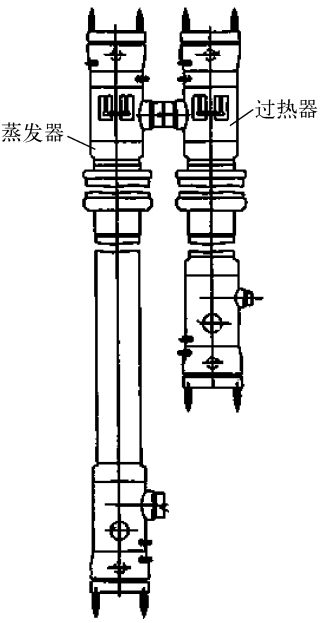


图 2　蒸汽发生器模块示意图

Fig. 2　Sketch of steam generator module

2　蒸汽发生器启动工况物理参数分析

2.1　启动工况简介

快堆蒸汽发生器启动工况涉及反应堆功率为 0～40%P_n（P_n 为额定功率），包含蒸发器暖管、蒸发器水工况、蒸发器水汽转换、过热器暖管、过热器汽工况和蒸汽发生器发电工况等物理过程[3]。除蒸发器水工况与一般电站启动调试过程类似外，其余物理过程均有工艺控制特殊要求。

在热态水冲洗阶段，反应堆尚未启动，三回路系统利用启动锅炉将除氧器加热至 190 ℃，进行水回路冲洗工作。水质合格后，利用启动锅炉蒸汽对蒸发器出口管道进行预暖，以避免管道振动及水击。

蒸发器水工况（0～9.45%P_n）运行过程为：蒸发器暖管完成后进行蒸发器注水，再启动反应堆并提升功率至水汽转换点进行水汽转换，蒸发器进入水汽两相区工作状态。其循环

流程为：凝汽器→凝泵→升压泵→轴封加热器→1#、2#、3#低压加热器→除氧器→给水泵→高压给水母管→蒸发器模块→启动扩容器→高疏→凝汽器，如图3所示。

蒸发器汽工况（9.45%P_n～14%P_n）运行过程为：水汽转换完成后，将蒸发器模块出口引出蒸汽至主蒸汽母管，投入旁排阀，建立蒸发器微过热蒸汽区工作状态。其循环流程为：凝汽器→凝泵→升压泵→轴封加热器→1#、2#、3#低压加热器→除氧器→给水泵→高压给水母管→蒸发器模块→主蒸汽母管→旁排管道→凝汽器。

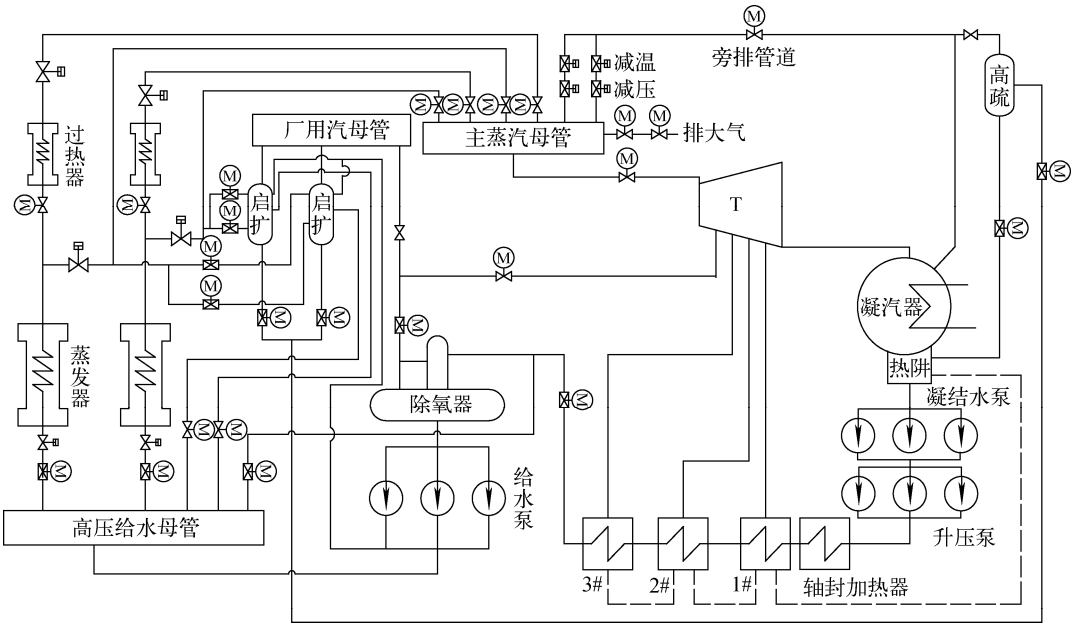


图3 CEFR三回路系统流程图

Fig. 3 Flow diagram of third circuit system for CEFR

过热器汽工况（14%P_n）运行过程为：继续提升功率至14%P_n后，利用主蒸汽内管道蒸汽对过热器模块出口连接管道进行预暖，再投入过热器模块。其循环流程为：凝汽器-凝泵→升压泵→轴封加热器→1#、2#、3#低压加热器→除氧器→给水泵→高压给水母管→蒸发器模块→过热器模块→主蒸汽母管→旁排管道→凝汽器。

蒸汽发生器发电工况（14%P_n～40%P_n）运行过程为：提升功率至26.5%P_n台阶下，冲转汽轮机，逐步关小旁排阀，直至切除旁排管道，连续提升功率转入发电工况运行。其循环流程为：凝汽器→凝泵→升压泵→轴封加热器→1#、2#、3#低压加热器→除氧器→给水泵→高压给水母管→蒸发器模块→过热器模块→主蒸汽母管→汽轮机→凝汽器。

2.2 数据来源

使用SAC-CFR软件进行蒸汽发生器理论计算分析，分析结果来源于文献[4]。为从海量快堆功率运行期间的数据记录中提炼出有效数据，本文参考国内电站试验导则，确定试验数据有效的原则是：反应堆分别在一定功率台阶（试验选取3%P_n、8%P_n、14%P_n、18%P_n、32%P_n、35%P_n）连续稳定运行4 h以上；压力、流量变化不超过2%；温度变化范围为－5～5 ℃。共处理有效数据2 000余个。

2.3 温度分析

图4示出蒸汽发生器启动温度曲线。从图4可得到如下结论。

1）在反应堆功率为0～14%P_n之间时，理论计算与实际运行值吻合较好。但在汽水转换工况后，过热器出口蒸汽温度、蒸发器出口蒸汽温度与理论计算结果相差较大，其中，过热器出口蒸汽温度低于理论计算值约10 ℃，蒸发器出口蒸汽温度高于理论计算值约25 ℃。进一步的热力分析结果表明，这种现象出现的原因在

于蒸发器出口过热度控制较高，约 60 ℃，导致二回路钠循环的热负荷集中在蒸发器模块。由于钠水式直流热交换器的蒸发器出口过热度是衡量蒸发器是否传热恶化的关键数据[5-7]，因此为避免蒸发器传热恶化，应将蒸发器出口过热度控制在 5～25 ℃之间。

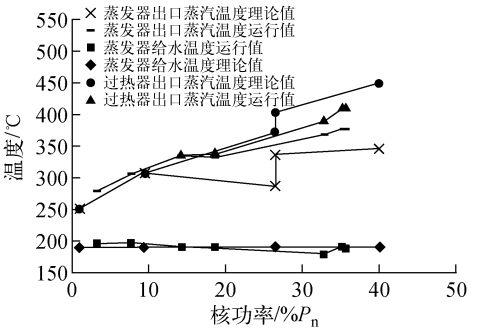


图 4　蒸汽发生器启动温度曲线

Fig. 4　Temperature curve of SG startup

2）给水温度在±10 ℃偏差情况下，对蒸发器出口和过热器出口温度影响并不显著。

3）理论温度曲线表明，在 26.5%P_n 功率台阶下，蒸发器出口和过热器出口温度存在阶跃现象，实际运行试验均无法实现温度突升。

2.4　压力分析

图 5 示出蒸汽发生器启动压力曲线。由图 5可得到如下结论。

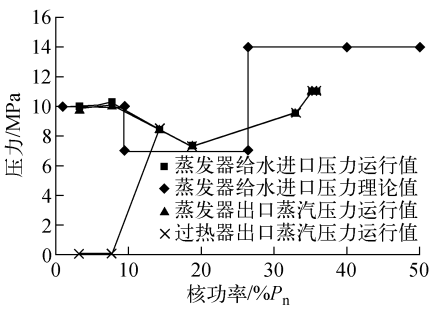


图 5　蒸汽发生器启动压力曲线

Fig. 5　Pressure curve of SG startup

1）蒸汽发生器设计压力曲线与实际运行曲线存在较大不同，特别是在反应堆功率达 26.5%P_n 附近，实际蒸汽发生器压力存在一近似于开口向上抛物线形状。这是因为在水汽转换过程中，如瞬间降压易引起系统压力突变，故水汽转换过程采用了缓慢降压过程。在水汽转换工况完成后，蒸汽发生器给水进口压力、蒸发器出口蒸汽压力、过热器出口蒸汽压力曲线均吻合较好。

2）反应堆功率达到 26.5%P_n 后，理论值与蒸汽发生器实际运行值不同，其原因为由于蒸汽发生器启动升压速率和蒸发器出口过热度的限制，压力一直缓慢提升，以确保蒸汽发生器安全。

2.5　流量分析

图 6 示出蒸汽发生器启动蒸汽流量曲线。由图 6 可到如下结论。

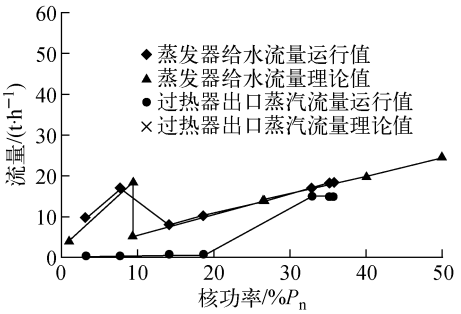


图 6　蒸汽发生器启动蒸汽流量曲线

Fig. 6　Steam flow curve of SG startup

1）过热器出口蒸汽流量运行值曲线与过热器出口蒸汽流量理论值曲线完全一致，约在反应堆功率达 26.5%P_n 后，实际运行中的过热器蒸汽出口流量接近于蒸发器出口蒸汽流量。理论计算值与实际运行值存在偏差的原因为：理论计算时，将过热器与蒸发器视为同时投入运行。实际运行工况中，当蒸发器出口产生微过热蒸汽后，蒸发器内已形成较为稳定的汽水两相工作区。再投入过热器时，最大程度缓解了水变汽之后因为体积膨胀给三回路系统带来的压力冲击。图 6 也表明，蒸汽发生器工况计算中，蒸汽发生器水工况仅需单独考虑蒸发器模块投入（过热器不投入），而在 14%P_n 功率台阶以上，蒸发器模块和过热器模块才应共同计算分析。

2）在反应堆功率达 30%P_n 后，过热器蒸汽出口流量实际运行值与理论值较为接近，偏差产生的原因是，实际运行工况中，在蒸发器出口进入启动扩容器有一股小流量蒸汽用于除氧

器自身加热(图 3),这导致了进入过热器的蒸汽流量低于蒸发器出口蒸汽流量。

3 蒸汽发生器启动优化措施

温度分析结果表明,在 14%P_n 水平之上,由于运行中蒸发器出口过热度(约 60 ℃)偏高,导致蒸发器和过热器出口蒸汽温度偏离设计值。因此,蒸汽发生器压力在此工况下应根据出口过热度进行适时调整,及时投入过热器及旁路排放系统,确保蒸发器模块和过热器模块共同转入汽工况稳定运行,将过热度控制在5~25 ℃之间。

压力分析结果表明,在蒸汽发生器注水后,蒸发器工作压力不得低于 6 MPa 运行。在蒸发器汽水工况转换阶段,采用给水泵转速和给水调节阀共同调节降压以平滑实现降压汽化,降压速率为 0.1 MPa/min,降压过程中需密切注意启动扩容器压力的波动,防止水汽化瞬间引起压力突增触发系统安全阀动作,以最大程度地确保蒸发器水动力工况稳定。由于快堆的直流式蒸汽发生器汽水工况转换与一般电站不同之处在于采用降压汽化,在蒸汽发生器启动调试过程中试图采用有别于降压汽化的方法,即三回路系统维持状态不变,反应堆持续提升功率以使水系统进入汽化状态。试验结果表明,此种启动过程下,二回路钠温变化趋势不显著,三回路水汽转换点形成较为模糊,且蒸汽发生器状态易对运行人员产生误导。

流量分析结果表明,蒸汽发生器在汽工况下流量最小约为 6 t/h,约为额定流量(48 t/h)的 12%。低流量的设计对于运行人员的工况调节提出了更高要求。为避免触及反应堆给水流量保护引发非计划停堆,在过热器暖管工况下,工艺控制应遵照以下原则:1) 两环路并联运行时,1 个环路阻力变化会引起两个环路流量重新分配,故疏水操作宜两环路同时进行;2) 由于蒸发器模块水侧体积(0.37 m^3)较小,任意与蒸发器模块相连接的阀门动作均易引起压力的大幅波动,故主蒸汽系统用于暖管的阀门应手动调节以控制最低预暖蒸汽流量;3) 过热器模块和蒸发器模块接通前应充分预暖,过热器内蒸汽过热度至少在 5 ℃以上方可接通过热器模块。此外,在汽工况(14%P_n)至发电工况(40%P_n)之间,蒸发器出口至启动扩容器段存在约 5 t/h 左右的蒸汽用于加热除氧器,该工况下过热器入口流量低于设计值,对过热器换热存在不利因素。这表明在功率启动过程中,应减少在启动工况的停留时间,须尽快将启动工况转换到发电工况,以将除氧器加热热源切换至正常汽轮机抽汽加热状态,保证蒸汽发生器运行安全。

4 结论

CEFR 直流式蒸汽发生器在运行工艺上有其特殊性,通过在 CEFR 蒸汽发生器试运行期间的工况分析和试验验证,优化了启动方案,最终保证了 CEFR 低功率运行试验的顺利完成,为大型快堆核电站设计提供了参考。

参考文献:

[1] 张东辉. 钠冷快堆安全分析[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2002.

[2] 蒸汽发生器设计说明书[R]. 北京:中国原子能科学研究院,1997.

[3] 凯达洛夫 B B,巴尔捷涅夫 B H,法拉克申 M P,等. 蒸汽发生器 SG-33 运行手册[M]. 下诺夫格罗德:俄罗斯液压机设计试验局,2000.

[4] 中国实验快堆稳态运行工况分析报告[R]. 北京:华北电力大学核科学与工程学院,2010.

[5] 郭正荣,张宝峰. 蒸汽发生器运行极限计算[J]. 中国核电,2012,9(3):225-227.
GUO Zhengrong, ZHANG Baofeng. The calculation principle for steam generator operating limits[J]. China Nuclear Power, 2012, 9(3): 225-227(in Chinese).

[6] WILLBYETAL C. Material choices for the commercial fast reactor steam generator[R]. London: BNES, 1978.

[7] International Working Group on Fast Reactors. Specialists' Meeting on Theoretical and Experimental Work on LMFBR Steam Generator Integrity and Reliability with a Particular to Leak Development and Detection[C]. Netherlands: [s. n.], 1983.