

超临界直流锅炉启动过程汽水膨胀的研究*

杨冬 陈昕宽 侯书海 毕勤成 杨仲明 李永兴
(西安交通大学) (哈尔滨锅炉厂)

[摘要] 本文建立了超临界直流锅炉启动过程汽水膨胀的计算模型,并用试验进行了验证。利用该模型计算了哈尔滨锅炉厂开发设计的 600 MW 超临界直流锅炉冷态、热态启动过程的汽水膨胀,为锅炉启动系统设计及拟定启动曲线提供了依据。

关键词 超临界压力 直流锅炉 汽水膨胀

中图分类号 TK229.54

0 前言

引进的上海石洞口第二电厂及哈尔滨电站设备集团公司自行开发设计的超临界压力火力发电机组均采用带内置式汽水分离器启动系统的超临界直流锅炉(锅炉正常运行时,汽水分离器并不解列,而是参与系统工作)。锅炉点火后,随着燃烧投入量的增加,水冷壁内工质温度逐渐升高,当燃料投入量达到某一值时,水冷壁中某处工质温度达到该处压力所对应的饱和温度,工质开始蒸发,形成蒸发点。由于蒸汽的比容相当大,这样就造成该处工质体积膨胀,导致局部压力升高,加速推动蒸发点后受热面内的工质向水冷壁出口方向流动,在短时间内可以将大量的水或汽水混合物挤出水冷壁,从而使水冷壁出口流量远大于进口流量,这即是直流锅炉启动过程中的汽水膨胀现象。影响启动过程汽水膨胀的主要因素有启动压力、给水温度、锅炉蓄水量、燃料投入速度及吸热量的分配^[1]。

利用计算机程序模拟计算启动过程汽水膨胀对锅炉启动系统的设计及锅炉运行具有重要的意义。通过对各种启动方案下的

汽水膨胀进行计算比较,即可拟定合理的启动曲线以使锅炉安全渡过膨胀期。在此基础上可以确定合理的汽水分离器容量与最高、最低水位、连接管道的布置及阀门的尺寸和通流能力。

1 汽水膨胀计算模型

不考虑水冷壁并联管的热力和水力不均匀性;不考虑金属壁的径向热阻,而沿轴向热阻为无穷大;工质与金属壁只在径向方向进行换热,而不考虑轴向换热;在同一截面内工质温度和速度分布是均匀的,并且工质只沿轴向流动而无内部环流;不考虑金属壁蓄热。在上述假设条件下,水冷壁内工质所遵循的守恒方程为^[2]:

质量守恒方程

$$\frac{\partial M}{\partial t} + F \frac{\partial d}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

能量守恒方程

$$q_{tr} = M \frac{\partial h}{\partial t} + \left(\frac{c_{MM}}{c_w} + m_w \right) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

动量守恒方程

* 国家自然科学基金资助项目

$$d\left(\frac{dq}{df} + u \frac{dq}{q}\right) + \frac{dp}{df} + dg \sin U + f_p = 0 \quad (3)$$

水冷壁沿工质流动方向划分 200个网格,计算初值取锅炉点火时刻各参数的实际测量值。若计算时刻所对应的时间为 f ,根据燃料投入量,可由炉膛传热计算得出炉膛吸热量。假设热流密度沿炉膛高度方向分布曲线的形式不随燃料投入量变化, f 时刻炉膛吸热量与 MCR 负荷时炉膛吸热量的比值再乘以 MCR 负荷时炉膛高度方向的热流密度即为 f 时刻的热流密度 $q(l, f)$ 按文献 [3]中所述方法求解方程 (2),得到工质焓分布 $h(l, f)$ 。比较每一网格中工质焓与该网格上一计算时刻 ($f - \Delta f$ 时刻)工质压力对应的饱和水焓,就能得到蒸发始点与蒸发区域。利用差分方法求解方程 (1),获得流量分布 $M(l, f)$ 。网格中密度 d 根据 $f - \Delta f$ 时刻压力与 f 时刻焓进行计算,当工质为汽水两相混合物时按均相模型计算密度 d 。

高压旁路阀进口压力 p_{BP} 和蒸汽流量 M_{BP} 之间存在着如下的线性关系^[4]:

$$M_{BP} = YJ A \frac{p_{BP}}{\Theta_{BP}} \quad (4)$$

另外,根据质量守恒有:

$$M_{BP} = M_o + \int_{l_{WA}}^{l_{BP}} \frac{\partial M_D}{\partial t} dl \quad (5)$$

假设 f 时刻主蒸汽压力为 p_{BP} ,然后用式 (4)与式 (5) 分别计算 M_{BP} 。当二者误差小于一定范围时,认为假设的 p_{BP} 是正确的。否则重新假设 p_{BP} ,重复上述计算。 p_{BP} 与过热器系统压降相加即得 f 时刻汽水分离器压力 p_{WA} ,认为水冷壁出口压力与 p_{WA} 相等。根据式 (3),由水冷壁出口依次向下计算每一网格中的压力,计算时忽略加速压降,对汽水两相混合物采用均相模型计算摩擦压降。

f 时刻水冷壁进口工质流量与温度通过除氧器、锅炉给水管及省煤器的流动传

热计算获得^[5]。

2 试验验证

利用本文建立的数学模型对石洞口第二电厂 2号机组 600 MW 超临界直流锅炉冷态启动汽水膨胀过程进行了计算,并将计算结果与现场实际测量结果作了比较。水冷壁出口工质流量不易直接测量,因此通过测量汽水分离器水位与疏水量间接获得。汽水分离器布置在炉膛水冷壁出口和过热器系统进口之间。锅炉负荷低于 35% MCR 时,由炉膛上部水冷壁切向进入汽水分离器的工质是水和蒸汽两相混合物,分离下来的水进入再循环系统,蒸汽则进入过热器系统继续进行加热;负荷高于 35% MCR 时,汽水分离器中通过的是微过热蒸汽,此时汽水分离器仅起连接通道的作用。该次冷态启动锅炉点火时间 (1993年 7月 6日 22: 10) 取为时间零点,该时刻工质侧及烟气侧各参数取电厂实际测量值作为计算初值。1993年 7月 7日 5: 02汽轮机冲转,共历时 412分钟。

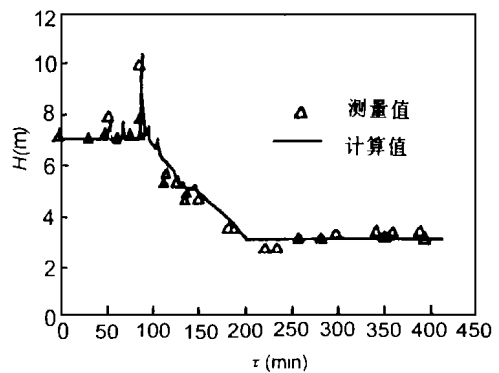


图 1 汽水分离器水位计算值与测量值的比较

图 1表明 49.6 min 时水冷壁出口工质汽化,出现汽水膨胀现象,水位 H 由 7 m 增加到 7.6 m,疏水量 D 也由 179.2 kg/s 增加到 203.6 kg/s,此时对应的燃烧率 E 为 10.5% (图 2),燃烧率 E 定义为启动过程燃

料投入量与 10% 负荷时燃烧投入量的百分比。89.7 min 时水位达到启动过程的最大值 10.3 m, 疏水量也达到高峰 235.8 kg/s (图 2), 对应的燃烧率为 13.8% (图 3)。此时主蒸汽升压速率为 0.184 MPa/min (图 3), 也为本次启动最高值。主蒸汽升压速率越快, 水冷壁内工质蓄量减少率也就越快, 汽水膨胀量则越大, 而主蒸汽升压速率又受燃料投入速度控制。因此为控制启动过程膨胀量以防止汽水分离器满水, 必须注意燃料的投入速度。可以看出, 汽水分离器水位及疏水量的计算值与测量值符合得比较好, 说明本文建立的启动过程汽水膨胀计算模型是正确的。

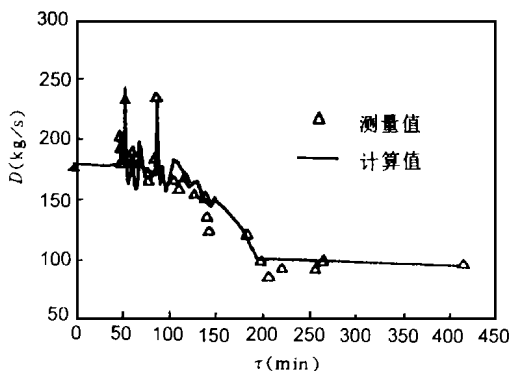


图 2 汽水分离器疏水量计算值与测量值的比较

从图 3 可以看出, 启动过程主蒸汽压力的计算值与测量值比较吻合, 表明主蒸汽压力 p_{BP} 的计算模型是正确的。

3 应用实例

为了适应国民经济高速发展对电力的需要, 提高电站的经济性, 哈尔滨电站设备集团公司组织完成了 600 MW 超临界火电机组方案设计, 哈尔滨锅炉厂负责其中锅炉部分设计。锅炉为 600 MW 超临界一次中间再热燃煤直流锅炉, 采用单炉膛、双烟道、倒 U 型全钢架悬吊结构, 按双鸭山烟煤设

计^[6]。本文计算了该锅炉冷态、热态启动过程的汽水膨胀, 为拟定合理的启动曲线使锅炉安全渡过膨胀期及锅炉启动系统设计提供了依据。启动过程升压曲线是参考石洞口第二电厂升压曲线及对升压速率的限制确定的。

图 4 为冷态启动计算结果。由锅炉点火至汽轮机冲转共需 125.6 min。启动初始水位维持 5 m 不变, 29.5 min 时水冷壁中工质开始汽化, 此时水位有些波动, 而对应的燃烧率为 5.3%。63.9 min 时水位达到启动过程最大值 6.4 m, 对应的燃烧率为 7.6%。此时主蒸汽压力上升, 水冷壁中工质储量减少, 减少的部分进入汽水分离器引起水位上升。62.4 min 时疏水量达到启动过程的最大值 248.5 kg/s, 是给水流量的 188.3 kg/s 的 1.32 倍, 它和水位达到最大值几乎是同时发生的。

图 5 为热态启动计算结果。模拟过程历时 10 min。锅炉点火时刻水位为 5 m, 2.2 min 时水位达到最大值 10.1 m, 对应的燃烧率为 30%。与此同时, 疏水量也达到最大值 395.7 kg/s, 是给水流量 188.3 kg/s 的 2.1 倍。可以看出, 热态启动的汽水膨胀量比冷态启动大, 因此必须通过对各种启动方案进行计算比较, 才能拟定升压过程, 以防止启动过程汽水分离器满水。

4 结论

利用本文建立的数学模型可以计算带有内置式汽水分离器启动系统的超临界直流锅炉启动过程的汽水膨胀。对石洞口第二电厂 2 号机组冷态启动的计算表明, 汽水分离器水位、疏水量与主蒸汽压力的计算值与现场测量值吻合得比较好。在此基础上, 计算了哈锅 600 MW 超临界直流锅炉冷态、热态启动过程的汽水膨胀, 结果表明热态启动的汽水膨胀量较大, 水位最高可达 10.1 m。计算结果为拟定启动曲线以使锅炉安全渡

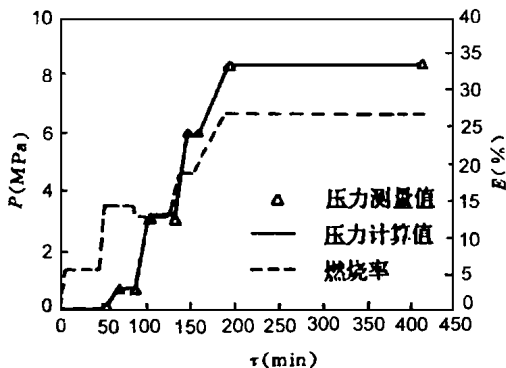


图 3 主蒸汽压力计算值与测量值的比较

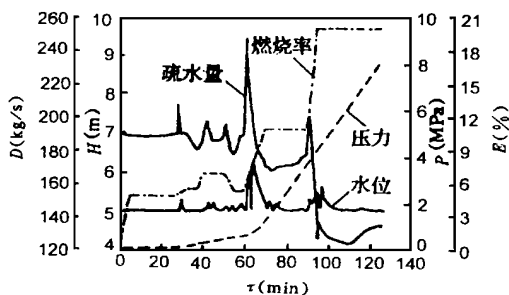


图 4 冷态启动汽水膨胀计算结果

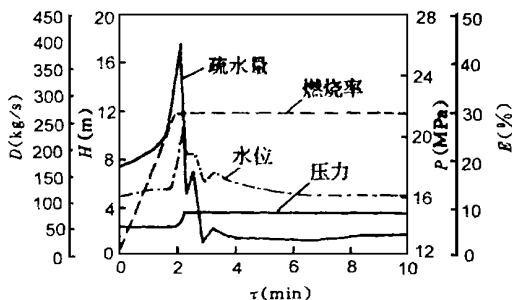


图 5 热态启动汽水膨胀计算结果

过膨胀期及锅炉启动系统设计提供了依据。

符 号 表

- A — 高压旁路阀瓣锥体和阀座间的最窄流通面积, m^2 ;
- c_M — 金属管壁比热, $J/(kg \cdot K)$;
- c_W — 工质比热, $J/(kg \cdot K)$;
- D — 汽水分离器疏水量, kg/s ;
- E — 燃烧率, %;
- F — 管道横截面积, m^2 ;
- f_p — 单位管长摩擦压降, Pa ;
- g — 重力加速度, m^2/s ;

- H — 汽水分离器水位, m ;
- h — 工质焓, J/kg ;
- l — 工质流动方向坐标, m ;
- l_{BP} — 高压旁路阀位置坐标, m ;
- l_{WA} — 汽水分离器位置坐标, m ;
- M — 工质质量流量, kg/s ;
- M_{BP} — 高压旁路阀进口蒸汽流量, kg/s ;
- M_D — 过热器中蒸汽流量, kg/s ;
- M_o — 汽水分离器出口蒸汽流量, kg/s ;
- m_M — 单位管长金属质量, kg ;
- m_W — 单位管长工质质量, kg ;
- p — 工质压力, Pa ;
- p_{BP} — 高压旁路阀进口蒸汽压力, Pa ;
- q — 炉膛高度方向热流密度, W/m^2 ;
- t_R — 水冷壁管外径, m ;
- u — 工质流速, m/s ;
- Y — 损失系数;
- α — 水冷壁管倾角, rad ;
- ρ — 工质密度, kg/m^3 ;
- Θ_{BP} — 高压旁路阀阻力系数;
- J — 临界流动函数;

参 考 文 献

- 1 陈学俊, 陈听宽. 锅炉原理. 北京: 机械工业出版社, 1979
- 2 丁萃青. 换热设备动态特性计算. 北京: 水利电力出版社, 1988
- 3 Dolezal R. Vorgange beim anfahren eines dampferzeugers. Vulkan-Verlag, Essen, 1977
- 4 Gericke B. Probleme bei der auslegung von anfahrregelventilen bei schnellstart-umlaufkesseln. BWK, 1975, 27(10): 383 - 386
- 5 陈听宽等. 超临界锅炉启动过程热力特性计算程序的开发. 西安交通大学, 哈尔滨锅炉厂, 1996. 6
- 6 王晓为. 变压运行超临界锅炉垂直水冷壁的传热与水动力研究. [硕士学位论文]. 西安交通大学能源与动力工程学院, 1994

作者简介 杨冬男 1967年生. 1993年毕业于西安交通大学热能工程专业, 获硕士学位. 现为西安交通大学讲师, 主要从事电站锅炉锅内过程的研究. (通讯处 710049 西安交通大学能动学院多相流国家重点实验室)

(渠源 编辑)

超临界直流锅炉启动过程汽水膨胀的研究 = **A Study of the Water Swell in Supercritical Once-through Boilers During Start-up** [刊, 中] / Yang Dong, Chen Tingkuan, Hou Shuhai, Bi Qingcheng (Xi'an Jiaotong University), Yang Zhongmin, Li Yongxing (Harbin Boiler Works) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -161~ 164

A mathematical model is set up for calculating the water swell in a supercritical pressure once-through boiler during its start-up. The model has been verified through tests and was used to calculate the water swell during a cold-state and hot-state start-up process in a 600 MW supercritical pressure once-through boiler designed and developed by Harbin Boiler Works. All the above has provided a basis for the design of boiler start-up systems and the drawing-up of start-up curves. **Key words** supercritical pressure, once-through boiler, water swell

三通型汽轮机电-压力转换器的研究 = **A Study of Three-way Electro-pressure Converter for a Steam Turbine Regulating System** [刊, 中] / Wei Jianhua (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -165~ 167

Described in this paper is the principle of an imported electro-pressure converter for use in a steam turbine regulating system. The electrical control principle and mechanical structure features of a home-made three-way electro-pressure converter are also discussed with its experimental curves presented. **Key words** steam turbine regulation, electro-hydraulic converter

汽轮发电机转子扭振模型修改 = **Modification of a Turbogenerator Rotor Torsional Vibration Model** [刊, 中] / Guo Li, Sheng Xiaomin (Hunan University), Cheng H S (American Northwestern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -168~ 170

In connection with the establishment of a precise turbogenerator rotor torsional vibration model this paper discusses the modification with the help of test-obtained incomplete modalities of a concentrated parametric model set up by a finite element method, making it within the required frequency range to coincide with the measured dynamic characteristics. Given in this paper are the results of calculation for a home-made 200 MW turbogenerator unit. **Key words** turbogenerator, rotor, torsional vibration

大港电厂 328 MW 汽轮机凝汽器数值模拟与特性分析 = **Numerical Simulation and Characteristics Analysis of 328 MW Turbine Condenser of Dagang Power Plant** [刊, 中] / Zhu Guangyu, Li Hongmei (Xi'an Jiaotong University), Tang Ming (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -170~ 174

By the use of a numerical method calculated was the flow and heat transfer process on the condenser shell side of a 328 MW steam turbine condenser imported from Italy. An analysis is given of the rationality of the condenser design. The results of the analysis show that the layout of the condenser tube bank features rationality in certain aspects but there is room for improvement. Hence, the operating pressure may be slightly higher than the design pressure. **Key words** condenser, numerical simulation, analysis

蓄冰空调变风量系统工程可行性分析 = **The Analysis of Engineering Feasibility of VAV in an Ice Storage-assisted Air Conditioning System** [刊, 中] / Liu Zhenyan, Yu Guangbao, Ding Yihong (China National University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -175~ 177

Proposed in this paper is a new concept concerning the use of variable air flow rate air feeding system in the ice storage assisted air-conditioning system. An analytical study is performed of its engineering feasibility. The results of the study have shown that the setting-up of the variable air flow rate air feeding system in the above-cited air conditioning system will not only reduce the cold load but also lower operation cost. In addition, it can eliminate the major defect in the ice storage-assisted air conditioning system, namely the serious mismatching of loads. The authors have also through specific engineering cases analyzed engineering economics. **Key words** ice storage-assisted air conditioning, variable air flow, system feasibility

循环流化床中贴壁回探流的机理试验研究 = **An Experimental Study of Wall-adhered Return Flow Mechanism in a Circulating Fluidized Bed** [刊, 中] / Guang Xin, Niu Changshan, Gu Yaping, et al (Xi'an Jiaotong