

# 热水锅炉补水系统氮气稳压及效果

王德明<sup>1</sup>, 龙腾锐<sup>1</sup>, 魏渝<sup>2</sup>, 罗成<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045 2 重庆电力高等专科学校 动力工程系, 重庆 400053)

**摘 要:** 利用热力学理论对氮气稳压的原理进行了分析, 并在热水锅炉补水系统中增设了氮气稳压装置。论述了氮气在稳压过程中所经历的热力学状态和过程, 导出了有无氮气稳压装置时热水锅炉系统补水周期之间的关系, 得出了有氮气稳压的热网系统具有较长补水周期并能提高系统运行稳定性和安全性的结论。由于补水周期延长, 补水泵的启停频率减小且使用寿命延长, 其电耗量也将相应减少, 并且还可以降低操作人员的劳动强度。

**关 键 词:** 热网系统; 热力学分析; 稳压; 安全性; 水泵; 锅炉

中图分类号: TK223.5; TU833

文献标识码: A

## 引 言

在热水锅炉系统运行过程中, 常常因补水不及时, 压力降低而出现锅炉汽化甚至爆管等事故, 其补水泵也常因补水频繁启动而浪费电能甚至烧损电机。保持压力稳定却又不频繁启停补水泵, 有利于系统(特别是其中的热水锅炉)的安全与稳定运行。

在锅炉安全与稳定运行方面, 孟建文采用给循环水泵安装报警装置的办法<sup>[1]</sup>, 以防止锅炉汽化事故的发生; 张学军等人将水冷壁和对流管束由自然循环改为强制循环模式<sup>[2]</sup>, 利用提高水循环流速的方法来防止锅炉汽化及爆管事故的发生; 张俊革等人采用加强锅炉水质处理的方法<sup>[3]</sup>, 并清除锅炉内泥渣和水垢的方法来防止锅炉爆管事故的发生; V. F. Rezniskiki等人提出了利用控制传热热阻参数和协调各运行参数等方法来提高锅炉运行的可靠性<sup>[4]</sup>; Heimo Walter等人对锅炉运行的稳定性进行了研究与分析<sup>[5]</sup>。在锅炉安全与稳定运行以及节能方面, 人们进行了大量的研究与实践。

对于常压低温热水锅炉系统, 由于是在低水温情况下常压运行, 可采用膨胀水箱的方式来定压和补水。然而, 对于温度较高的热水锅炉系统, 考虑到

锅炉运行压力较高, 不能采用通常使用的膨胀水箱方式来对系统进行定压和补水。为此, 根据氮气的化学性质比较稳定的特点, 可采用氮气稳压装置对系统进行稳压和补水。

通过增设氮气稳压装置, 系统获得了较好的稳压和补水效果, 避免了锅炉因缺水而发生汽化和爆管等事故, 且避免了补水泵因频繁启停而烧损电机的现象。文中对氮气稳压的工作机理进行了阐述, 并对其所经历的热力学状态和过程进行了分析, 导出了有无氮气稳压装置的热水锅炉系统补水周期之间的关系, 得出了有氮气稳压的热水锅炉系统具有较长补水周期并能提高系统运行稳定性和安全性的结论。

## 1 氮气稳压工作过程

热水锅炉系统的循环水因泄漏等原因会逐渐减少, 其压力也将逐渐降低, 当系统的压力降低到正常工作压力下限后, 补水泵启动向系统补水, 直到压力升高到正常工作压力上限后才停止补水。

无氮气稳压装置的热水锅炉系统由热水锅炉、循环水泵、补水泵以及换热器等组成, 如图 1 所示。锅炉将循环水加热到一定的温度后送往换热器, 循环水在换热器处放热, 将二次热网系统的水加热后送往热用户, 热水锅炉水温度降低, 再由循环水泵送入锅炉加热。热水锅炉系统压力降低到正常工作压力下限后的补水工作完全是由补水泵来完成的。

而有氮气稳压装置的热水锅炉系统由热水锅炉、循环水泵、补水泵、换热器以及稳压装置等组成, 其中稳压装置由稳压罐、氮气罐等组成, 如图 2 所示。在有氮气稳压装置的热水锅炉系统压力降低时, 稳压罐上部的氮气因压力降低而膨胀, 并将稳压

收稿日期: 2010-05-24 修订日期: 2010-06-04

基金项目: 十五科技攻关基金资助项目(2004BA604A-01)

作者简介: 王德明(1968-), 男, 重庆人, 重庆大学博士后。

罐下部的水逐渐送入热水锅炉循环水系统中进行补水,直到压力降低到正常工作压力下后,补水泵才启动补水。在补水泵启动补水的过程中,系统压力升高,稳压罐中压力也同时升高,其中的氮气被压缩,罐中进水且水量增加,为稳压罐下一次给系统补水作好准备。在补水泵停止到下一次启动期间,系统的补水工作将由稳压罐来完成,并且具有较好的稳压效果。

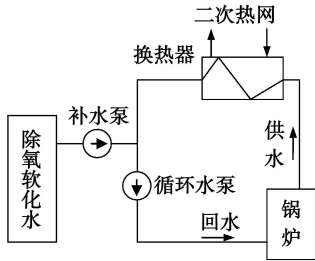


图 1 无稳压装置的高温热水锅炉系统

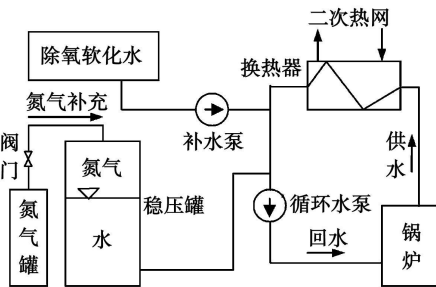


图 2 有稳压装置的高温热水锅炉系统

## 2 稳压过程的热力学分析

在氮气稳压装置对系统进行稳压的过程中,氮气存在着体积的变化,也伴随着能量的进出。如图 3 所示,当氮气被压缩时,即从状态点  $1(p_1, V_1)$  沿着  $P-V$  线移向状态点  $2(p_2, V_2)$ , 此过程为氮气随后膨胀补水蓄能,同时稳压罐内进水,达到状态点  $2(p_2, V_2)$  时,系统处于正常工作压力上限,补水泵停止运行;在系统随后的运行过程中,氮气随着系统压力的减小而逐渐膨胀,其中贮存的压力能逐渐释放并以膨胀功的形式将稳压罐下部的水逐渐压入到热水锅炉系统中进行补水,直到状态点  $1(p_1, V_1)$  (即正常工作压力下限)时才重新启动补水泵补水。

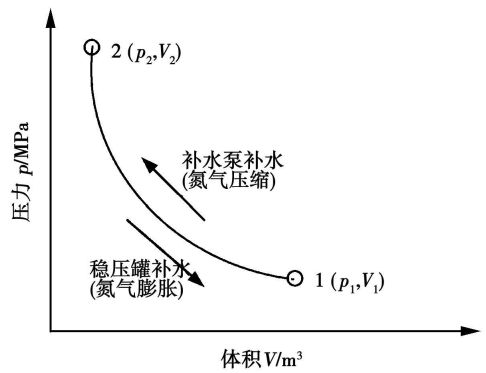


图 3 稳压氮气热力学过程

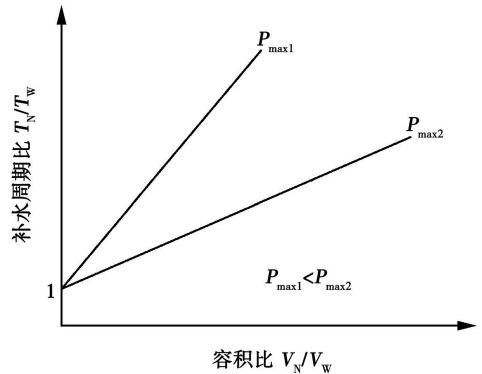


图 4 补水周期与稳压体积间的关系

从状态点  $1(p_1, V_1)$  到状态点  $2(p_2, V_2)$  是一个等温压缩过程,稳压罐中的氮气被压缩后所储存的能量为:

$$E = - \int_1^2 PdV = p_1 V_1 \ln \frac{V_1}{V_2} \quad (1)$$

式中:  $E$ —氮气在压缩过程中获得的能量,这个能量也是氮气在膨胀过程中释放出来的能量;负号—系统对氮气做功,  $J$   $P$ —压力,  $Pa$   $V$ —体积,  $m^3$ ; 下标 1—状态点  $1(p_1, V_1)$ ; 下标 2—状态  $2(p_2, V_2)$ 。

稳压罐中的氮气在压缩或膨胀时,即在状态点  $1(p_1, V_1)$  和状态点  $2(p_2, V_2)$  之间的变化过程中,氮气的温度基本上保持不变,其状态变化过程为定温过程,于是有:

$$pV = C \quad (2)$$

式中:  $C$ —常数。

由式 (2) 可得氮气在状态点  $1(p_1, V_1)$  和状态点  $2(p_2, V_2)$  之间的体积变化量为:

$$\Delta V_N = - \frac{1}{p_2} V_N \Delta P \quad (3)$$

式中:  $\Delta V_N$ —氮气体积变化量;负号—氮气压力增大时体积减小,  $m^3$ ;  $V_N$ —氮气初态的体积,即系统处于

正常工作压力下限(稳压罐最低水位线)时稳压罐中氮气所具有的体积  $V_N$ ;  $P_2$ —氮气变化后终态的压力, 即正常工作压力上限时氮气压力,  $P_a$

热水锅炉系统中的循环水随着压力在其正常工作压力上限和下限之间的变化, 也将产生一定程度的压缩或膨胀, 其体积压缩或膨胀的量为:

$$\Delta V_w = -K_{nw} V_w \Delta P \quad (4)$$

式中:  $\Delta V_w$ —整个系统的循环水体积压缩或膨胀的量,  $m^3$ ;  $K_{nw}$ —水的定温压缩系数,  $Pa^{-1}$ ;  $V_w$ —整个系统的循环水体积,  $m^3$ ;  $\Delta P$ —压力变化量,  $Pa$ ; 负号—压力升高时, 体积增量为负, 即被压缩。

在系统的补水过程中, 没有氮气稳压的循环水系统每次补水的量为  $\Delta V_w$ ; 而有氮气稳压的循环水系统每次补水的量为  $\Delta V_w + \Delta V_N$ 。将正常工作压力上限  $P_2$  用  $P_{max}$  代替, 再根据式 (3) 和式 (4) 可得, 对于一个循环水量为  $V_w$  的热水锅炉系统, 在相同压力变化条件下, 有无氮气稳压的同一热水锅炉系统补水周期 (即上一次补水到下一次补水所经历的时间) 之间的关系为:

$$\frac{T_N}{T_w} = \frac{\Delta V_w + \Delta V_N}{\Delta V_w} = \frac{V_N}{K_{nw} P_{max} V_w} + 1 \quad (5)$$

式中:  $T_N$ —有氮气稳压的热水锅炉系统的补水周期,  $h$ ;  $T_w$ —没有氮气稳压的热水锅炉系统的补水周期,  $h$ 。由式 (5) 可知, 有氮气稳压装置的热水锅炉系统补水周期比没有氮气稳压装置的补水周期长, 即采用氮气稳压的系统在相同时间内水泵启动补水的次数较少。

由图 4 可知, 系统的正常工作压力上限越小, 有氮气稳压的系统相对补水周期越大, 这是因为其中循环水体积压缩量越小, 没有氮气稳压的系统补水的周期越短。图中曲线都经过 (0, 1) 点, 此点的有效稳压容积为零, 即没有氮气稳压, 其补水周期即为没有氮气稳压时的补水周期。

### 3 例 证

在通常情况下, 循环水的定温压缩系数约为  $K_{nw} = 4.6 \times 10^{-10} Pa^{-1}$ , 实际运行中的许多换热设备工作压力上限约为  $6 \times 10^5 Pa$  正常工作压力上限取  $P_{max} = 6 \times 10^5 Pa$  对于有效容积分别为 10 和 20  $m^3$  的稳压系统, 在不同的循环水容积条件下的相对补水周期如表 1 所示。

由表 1 可知, 当稳压氮气的有效容积不变时, 随着循环水容积的减小, 有氮气稳压装置的系统补水

周期与无氮气稳压装置的系统补水周期的比值逐渐增大, 氮气稳压装置发挥的作用越明显; 当循环水的容积不变时, 随着稳压氮气有效容积的增加, 有氮气稳压装置的系统补水周期与无氮气稳压装置的系统补水周期的比值增大, 也即稳压氮气的有效容积越大, 其补水周期越长。

表 1 热水锅炉系统的氮气稳压效果

循环水容积 / $m^3$	稳压氮气的有效容积为 10 $m^3$		稳压氮气的有效容积为 20 $m^3$	
	容积比 $V_N/V_w$	补水周期比 $T_N/T_w$	容积比 $V_N/V_w$	补水周期比 $T_N/T_w$
1 000	0.010 0	37.2	0.020 0	73.5
800	0.012 5	46.3	0.025 0	91.6
600	0.016 7	61.4	0.033 3	121.8
400	0.025 0	91.6	0.050 0	182.2
200	0.050 0	182.2	0.100 0	363.3

某油田热水锅炉系统循环水容积约为 800  $m^3$ , 在没有安装氮气稳压装置前, 系统水泵大约每 30 min 需启动补水一次, 每天补水约 50 次; 在安装氮气稳压装置后, 该热水锅炉系统在运行过程中, 每天启动水泵对系统进行补水的次数约为 1 次, 每周补水约为 8 次, 该系统有无氮气稳压装置的补水周期比为 43.8。在系统中安装的稳压装置有效氮气容积约为 10  $m^3$ , 该系统有无氮气稳压装置的理论补水周期比是 46.3 如表 1 所示, 实际运行的周期比是 43.8 实际运行情况与理论分析是吻合的。

该油田热水锅炉系统装设氮气稳压装置投入资金约 10 万元, 系统每年节约运行费用约 2.4 万元, 在技术经济分析中, 项目的投资偿还期计算为:

$$N = - \ln \left[ 1 - \frac{I \times i}{R} \right] / \ln(1 + i) \quad (6)$$

式中:  $N$ —投资偿还期, 年;  $R$ —每年的收益 (即系统每年节约的运行费用), 万元;  $I$ —总投资额, 万元;  $i$ —基准收益率, %。净现值计算为:

$$NPV = \sum A(P/A, i, n) - L \quad (7)$$

式中:  $NPV$ —净现值, 万元;  $A(P/A, i, n)$ —每年的收益折现, 万元。内部收益率计算为:

$$IRR = i + (j - i) NPV_1 / (NPV_1 - NPV_2) \quad (8)$$

式中:  $IRR$ —内部收益率, %;  $i$ —净现值为正而接近负时的折现率, %;  $j$ —净现值为负而接近正时的折现率, %;  $NPV_1$ — $i$  对应的净现值, 万元;  $NPV_2$ — $j$  对应的净现值, 万元。取基准收益率为 8%、项目使用寿命为 10 年, 通过式 (6)、式 (7) 和式 (8) 可得, 其

投资偿还期  $N=5.27$ 年,净现值  $NPV=6.10$ 万元,内部收益率  $RR=20.2\%$ 。从投资偿还期、净现值和内部收益率等技术经济指标看,该项目在经济上是可行的。

该油田热水锅炉系统增设氮气稳压装置后,不但提高了系统的安全性、稳定性,延长了系统补水的周期,还节约了补水泵消耗的电能,并降低了系统的运行费用,获得了一定的经济效益。

#### 4 结 论

对于热水锅炉系统,考虑到锅炉运行压力较高,不能采用膨胀水箱的形式对系统进行稳压和补水,可采用氮气稳压装置对系统进行稳压和补水。采用氮气稳压装置对热水锅炉系统进行稳压和补水后,整个系统运行时的主要优点如下:

- (1) 整个热水锅炉系统的补水周期延长,补水泵的启停频率降低且使用寿命也增加。
- (2) 由于补水泵启停次数减少,其耗电量也将相应减少。
- (3) 由于补水周期延长,系统中的热水锅炉也就不容易产生缺水汽化甚至爆管等事故,锅炉运行的安全性和稳定性都得以提高,从而也增强了整个系统运行的稳定性和安全性。
- (4) 由于补水泵启停频率减小,还可以降低操

作人员的劳动强度。

(5) 从例证还可看出,增设氮气稳压装置不但提高了系统的安全性、稳定性,延长了系统补水的周期,还节约了运行费用,获得了一定的经济效益。

另外,本氮气稳压装置补充水管是接到循环水泵进口侧的,它也可接到循环水泵的出口侧,同样可以起到稳压和补水的作用。但是相比较而言,接到循环水泵出口侧会使氮气处于较高的压力下工作,稳压过程所需的氮气量较多,氮气渗漏和扩散到水中的速度也较快,补充量和补气次数也会相应增加。

#### 参考文献:

- [1] 孟建文. 热水锅炉锅水汽化的危害和预防措施[J]. 山西建筑, 2009 35(21): 187-188.
- [2] 张学军, 范宪民, 李志宏, 等. 热水锅炉水冷壁的汽化与防止[J]. 特种设备安全技术, 2006(5): 12-13
- [3] 张俊革, 吕素霞. 对一起热水锅炉爆管事故的分析[J]. 林业劳动安全, 2006 19(2): 42-43.
- [4] REZNSKIKN V F GRNE A BUKNYU A. Operation reliability and Prospects of continuation of service of the thermomechanical equipment of the substation[J]. Power technology and engineering 2005 39(3): 156-159.
- [5] HEMO WALTER WLADMIR LNZER. Investigation of the stability of a natural circulation two-pass boiler[J]. Heatmass trans. fer 2006 42: 562-568.

(编辑 陈 滨)

新技术、新设计

### 汽轮机装置冷凝器的现代化改造

据 2010 年 2 月“Теплоэнергетика”的报道,核电站和火力发电站汽轮机的冷凝器主要决定了动力装置的效率。冷凝器运行状况的质量对核电站动力装置的经济性有重要影响,核电站冷凝器的单位蒸汽流量远大于火力发电站冷凝器的流量。

某些情况下,破坏冷凝器的运行会减少动力装置的输出功率并降低其可靠性。

采用耐腐蚀材料可以保证管系固定在管板上的可靠性和密封性,防止停机腐蚀。正确选择中间管板的跨距,可以减小振动。管束的有效布置可以使冷凝器的运行可靠并且经济。

在进行 K-1000-60/1500 型汽轮机侧进汽冷凝器的现代化改造时,增加了换热面积,采用了薄壁管,提高了平均真空度。这些措施使动力装置的输出功率增加了 3.2 MW,并提高了冷凝器自身的可靠性。

普遍认为, TBC 的主要破坏型式是在涂层间热氧化物周围,其粘结涂层上面的陶瓷涂层剥离和破裂。

(吉桂明 摘译)

and reheaters. The tube rupture due to an overtemperature of a superheater and reheater directly affects the safe operation and cost effectiveness of their unit. Hence, calculation of wall surface temperature and life loss rate of a boiler superheater and reheater in a power plant is very important. The authors have performed a study of the calculation of the life loss rate of the superheater and reheater of a Soviet Union made T1182 type boiler. According to the model for calculating the life loss rate of superheaters and reheaters of boilers presented by the authors with No. 1 boiler of a power plant serving as an example, the life loss rate of the boiler superheater and reheater was calculated as  $\lambda = 0.22141$ . Therefore, the foregoing can provide a basis for developing an on-line monitoring and fault diagnosis system in the future, which can accurately predict wall surface temperature and service life of a boiler superheater and reheater. Key words: boiler superheater, reheater, lifetime loss rate.

热水锅炉补水系统氮气稳压及效果 = Nitrogen based Pressure Stabilization and Its Effectiveness of the Makeup Water System of a Hot Water Boiler [刊, 汉] WANG Deming, LONG Tengrui (College of Urban Construction and Environment Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400045), DING Deyu, LIU Cheng (Department of Power Engineering, Chongqing College of Electric Power, Chongqing, China, Post Code: 400053) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 319 ~ 322

By utilizing the thermodynamic theory, analyzed was the principle for nitrogen based pressure stabilization. A nitrogen based pressure stabilization device was additionally installed in the makeup water system of a hot water boiler. The thermodynamic state and process of nitrogen experienced during the pressure stabilization were described and the relationship of the makeup water periods of the hot water boiler system with and without a nitrogen based pressure stabilization device, obtained. As a result, the authors came to a conclusion that the heating network system with a nitrogen based pressure stabilization device enjoys a relatively long makeup water period and can enhance the stability and safety of the system during its operation. As the period of the makeup water pump is prolonged, its startup and shutdown frequency decreases and its service life is extended, its power consumption will be reduced accordingly, therefore the labor intensity of the operators can be lightened. Key words: heating network system, thermodynamic analysis, pressure stabilization, safety, water pump, boiler.

船用增压锅炉风烟系统的流体网络模型 = Fluid Network Model for the Air and Flue Gas System of a Marine Turbocharged Boiler [刊, 汉] FEI Jingzhou, MA Xiuzhen (College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 323 ~ 327

The air and flue gas system of a turbocharged boiler and its turbocharged unit enjoy a very strong thermal coupling relationship, the resistance characteristics of which have an important influence on theirmatching performance. For