

高温热网系统氮气稳压及效果

王德明^{1,2}, 龙腾锐¹, 罗成², 丁德渝²

(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: 高温热网系统运行过程中常因补水不及时而发生热水锅炉汽化甚至爆管事故, 系统的补水泵也常因补水频繁启动与停止而烧损其电机. 针对这些问题, 在热网系统中增设氮气稳压装置, 以实现高温热网系统较长时间的稳定补水和系统压力的相对稳定, 避免其热水锅炉因缺水而发生汽化和爆管事故, 以及避免系统补水泵因频繁启动和停止而烧损电机的现象. 利用热力学理论对氮气稳压的原理进行了分析, 论述了氮气在稳压过程中所经历的热力学状态和热力学过程, 推导出了有无氮气稳压装置时热网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热网系统运行稳定性和安全性的结论.

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: TU833

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)01-0120-06

在热网系统运行过程中, 由于设计与设备性能等方面的原因, 系统的运行压力将在一定的压力范围内运行, 压力过高或过低都将给系统运行带来安全事故, 甚至无法运行. 热网系统就是在某一压力上限和某一压力下限之间运行, 当系统的运行压力低至其运行压力下限时, 其补水泵将启动向系统补水, 直到系统压力升高到运动压力上限后, 补水泵才停止给系统补水. 在实际的运行过程中, 热网系统常常因补水不及时, 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动补水泵, 有利于热网系统(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^[1]采用给循环水泵安装报警装置的办法, 来防止锅炉水循环的停止来防止锅炉汽化事故的发生; 张学军等人^[2]将水冷壁和对流管束由自然循环改为强制循环模式, 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^[3]采用加强锅炉水质处理的方法, 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. Rezinskikh 等人^[4]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; Heimo Walter 等人^[5]对锅炉运行的稳定性进行了研究与分析. 在锅炉节能方面, 陈忠华等人^[6]对鼓风机、引风机以及炉排电机进行变频高速控制改造, 取得了较好的节能效果并提高了系统运行的可靠性. 在锅炉安全与稳定运行, 以及其节能方面, 人们进行了大量的研究与实践^[7-16].

对于常压低温热网系统补水的问题, 由于其水温低, 可采用膨胀水箱的方式来定压和补水. 然而, 对于高温热网系统, 其温度较高, 考虑到锅炉的结垢和腐蚀问题, 需要对补充水进行软化及除氧, 不能采用通常使用的膨胀水箱方式来定压和对系统进行补水. 而氮气是化学性质比较稳定且价廉易得的气体, 采用氮气稳压装置对系统进行稳压, 不会对锅炉及系统中的其它设备产生腐蚀.

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热力学过程进行了分析, 从而推导出有无氮气稳压装置的热网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热网系统运行稳定性和安全性的结论. 这为推广应用氮气稳压应用于高温热网系统提供了理论依据, 同时也证明了该稳压系统的可靠性和可行性.

收稿日期: 2010-05-17 修改稿日期: 2011-12-11

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, 重庆市人, 博士后, 主要从事节能技术的研究与应用.

1 氮气稳压工作过程

由于系统需要在一定的工作压力范围内工作,高于这个压力范围将会对其中的锅炉及其它设备产生损害,甚至危及到人与设备的安全运行;而低于这个压力范围将会使系统中锅炉发生汽化等事故,循环水泵产生汽蚀等问题,甚至整个系统的水无法正常循环.因此,在系统压力高到一定的程度时需要停止对系统补水,而压力低到一定的程度后则需要对其进行补水以维持系统的正常运行.在没有氮气稳压装置高温热网系统,这一工作完全是由补水泵来完成的,而有氮气稳压装置的高温热网系统,这一稳压与补水工作的绝大部分时间是由氮气稳压装置来完成的.

没有氮气稳压装置的高温热网系统由热水锅炉、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,高温热网水温度降低,再由循环水泵送入锅炉加热,进入下一循环.循环水在连续不断的循环过程中,由于泄漏等原因循环水量将逐渐减少,系统的压力将逐渐降低,当锅炉系统的压力降低到系统运行压力下限后,补水泵启动向系统补水,直到锅炉系统的压力升高到系统运行压力上限后补水泵才停止给系统补水.

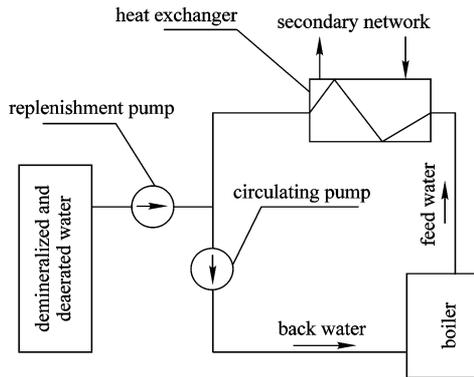


图 1 无稳压的高温热网系统

Fig. 1 The system without pressure stabilization

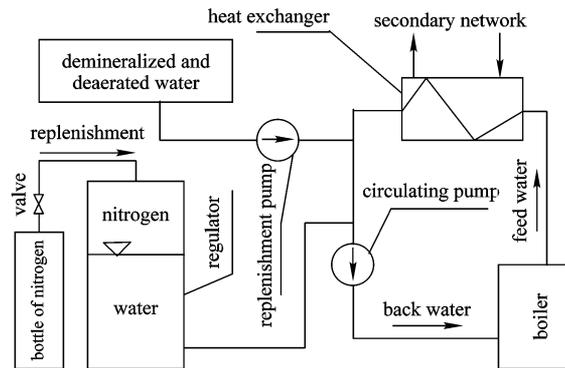


图 2 有稳压的高温热网系统

Fig. 2 The system with pressure stabilization

有氮气稳压装置的高温热网系统由热水锅炉、循环水泵、补水泵、换热器以及稳压装置等组成,而稳压装置由稳压罐、氮气罐等组成,如图 2 所示.在有氮气稳压装置的高温热网系统中,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,温度降低,再由循环水泵送入锅炉加热后进入下一循环.高温热网循环水在循环过程中,同样会由于泄漏等原因会使循环水量减少,系统的压力降低,同时安装在高温热网系统中的稳压罐的压力也将降低,稳压罐上部的氮气因压降而膨胀,并将稳压罐中下部的水逐渐送入高温热网循环水系统中进行补水,直到高温热网系统压力降低到系统运行压力下限后,补水泵启动,向高温热网循环水系统进行补水.在补水的过程中,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,罐中的水量增加,补水过程直到系统的压力升高到系统运行压力上限后才停止工作.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,直到系统压力降低到系统运行压力下限后才启动补水泵重新补水.

2 稳压过程的热力学分析

在有稳压装置的高温热网系统中,如图 2 所示,循环泵进口侧接入氮气稳压罐来的补水管,当锅炉运行压力降低时,稳压罐上部的氮气进行膨胀,将稳压罐下部的水压入循环水系统,这样可以使整个系统在很长的时间内保持正常工作压力范围内;当系统压力降低到系统正常工作压力下限时,利用补水泵对系统进行补水,将系统压力提升到系统正常工作压力上限,同时稳压罐中的氮气被压缩,也为氮气稳压罐补充了水,为下一周期的稳压罐补水做好了准备.氮气在稳压过程中,存在着其体积的变化,也伴随

着能量的进出.当氮气补压缩时,系统对其做功,此能量以压缩能的形式贮存在氮气中,当氮气膨胀时,贮存在其中的压缩能释放,并将稳压罐中的水压入系统.

当高温热网系统的工作压力降低到正常工作压力的下限状态点 $1(p_1, V_1)$ 时,如图3所示,补水泵启动对系统进行补水,同时,此时的氮气从状态点 $1(p_1, V_1)$ 沿着 pV 线到状态点 $2(p_2, V_2)$,系统对氮气加压使之进行压缩过程并将此压缩能贮存到氮气中,为氮气膨胀补水蓄能,稳压罐内进水,当达到状态点 $2(p_2, V_2)$ 时,热水锅炉系统达到正常工作压力上限,补水泵停止运行;由于系统正常渗漏,压力将逐渐减小,氮气也就随着压力的减小而逐渐膨胀,其中贮存的压缩能逐渐释放以之将稳压罐中下部的水逐渐压入到高温热网系统中,氮气进行膨胀过程,直到状态点 $1(p_1, V_1)$ 重新启动补水泵进行补水.

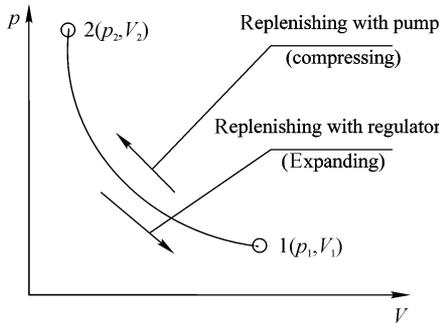


图3 稳压氮气热力学过程

Fig. 3 Thermodynamic process of the nitrogen

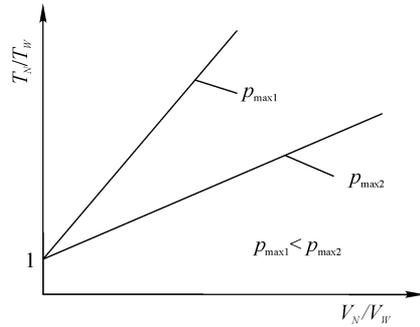


图4 补水周期与稳压体积间的关系

Fig. 4 The relation between T_N/T_W and V_N/V_W

在高温热网系统的运行过程中,其工作压力需要保持在一定的压力范围内,相应地稳压罐中的氮气压力也保持在一定的压力范围内,即如图3所示的状态点 $1(p_1, V_1)$ 和状态点 $2(p_2, V_2)$ 之间工作.推动氮气稳压过程的能量来源于稳压罐中氮气压缩功的存贮与释放,当氮气从状态氮气从点 $1(p_1, V_1)$ 到状态点 $2(p_2, V_2)$ 的过程,氮气被压缩,系统对氮气做功,该功转换为氮气的压缩能而储存起来;当氮气从状态氮气从点 $2(p_2, V_2)$ 到状态点 $1(p_1, V_1)$ 的过程,氮气膨胀,压缩过程中储存起来的压缩功释放出来,对系统做功,将稳压罐中下部的水压入到高温网系统中,从而达到系统补水的目的.

从状态点 $1(p_1, V_1)$ 到状态点 $2(p_2, V_2)$ 是一个等温过程,在稳压罐中氮气被压缩的过程中,它所储存的能量为

$$E = - \int_1^2 p dV = p_1 V_1 \ln \frac{V_1}{V_2} \tag{1}$$

式中负号表示氮气获得压缩功, p 为压力, V 为体积,下标1表示状态点 $1(p_1, V_1)$,下标2表示状态 $2(p_2, V_2)$.这个能量也是氮气在膨胀过程中释放出来的能量.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:

$$pV = C \tag{2}$$

在上式中,状态1和状态2及其中间状态的 C 都是相同的.由(2)式可得

$$V = \frac{C}{p} \tag{3}$$

$$\Delta V_N = V_2 - V_1 = C \left(\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_1} \right) = - p_1 V_1 \cdot \frac{p_2 - p_1}{p_1 p_2} = - \frac{1}{p_2} V_1 \Delta p \tag{4}$$

即氮气的体积变化量为

$$\Delta V_N = - \frac{1}{p_2} V_1 \Delta p = - \frac{1}{p_2} V_N \Delta p \tag{5}$$

式中: ΔV_N 为氮气的体积变化量,负号表示氮气压力增大时体积减小, V_N 为氮气初态的体积,即在压缩过程中,系统运动压力下限时稳压罐中氮气所具有的体积 $V_1, V_N = V_1$,这也是稳压罐最低水位线时氮

气所具有的体积, p_2 为氮气变化后终态的压力, 也即系统运动压力上限时对应的稳压罐氮气的压力。

而高温热网系统中的循环水, 随着压力在其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, 其体积压缩或膨胀量为

$$\Delta V_w = -K_{TW} V_w \Delta p \quad (6)$$

式中: K_{TW} 为水的定温压缩系数, V_w 为整个系统的体积, Δp 为压力变化量, 负号表示压力升高时, 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 ΔV_w ; 而有氮气稳压的循环水系统每次补水的量为 $\Delta V_w + \Delta V_N$. 将系统运行压力上限用 p_{\max} 代替, 再根据式(5)和式(6)可得, 对于一个循环水量为 V_w 的热网系统, 它的补水周期, 即上一次补水到下一次补水所经历的时间, 与具有氮气稳压的同一热网系统在相同的压力变化条件下的补水周期之间的关系为

$$\frac{T_N}{T_w} = \frac{\Delta V_w + \Delta V_N}{\Delta V_w} = \frac{V_N}{K_{TW} p_{\max} V_w} + 1 \quad (7)$$

式中, T_N 为有氮气稳压的循环水系统的补水周期, T_w 为没有氮气稳压的循环水系统的补水周期. 由式(7)可知, 有氮气稳压装置的循环水系统补水周期比没有氮气稳压装置的循环水系统补水周期长, 即采用氮气稳压的循环水循环在相同时间内水泵启动补水的次数少。

从图 4 可知, 当系统的上限压力越小, 有氮气稳压的系统相对补水周期更长, 这是因为循环水的体积压缩量更小, 没有氮气稳压的系统补水的周期更短. 图中曲线都经过(0, 1)点, 此时有效稳压容积为 0, 即没有氮气稳压, 其补水周期即为没有氮稳压时的补水周期。

3 应用实例

在通常情况下, 循环水的定温压缩系数约为 $K_{TW} = 4.6 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$, 实际运行中的许多换热设备工作压力上限约为 $6 \times 10^5 \text{ Pa}$, 循环水的正常工作压力上限取 $p_{\max} = 6 \times 10^5 \text{ Pa}$, 对于有效容积分别为 10 m^3 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。

表 1 高温热网系统的氮气稳压效果

Tab. 1 The running results of the system with nitrogen regulating device

Volume of the circulating water/ m^3	Effective volume of the nitrogen is 10 m^3		Effective volume of the nitrogen is 20 m^3	
	V_N/V_w	T_N/T_w	V_N/V_w	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

从表 1 中的数据可见, 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大; 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。

某油田高温热网系统循环水容积约为 800 m^3 , 在没有安装氮气稳压装置前, 系统水泵大约每半小时需启动补水一次, 每天补水约 50 次; 在安装氮气稳压装置后, 该高温热网系统在运行过程中, 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, 其有效氮气容积约为 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(见表 1), 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。

在该油田高温热网系统中, 水泵为两用一备, 每台水泵的电机功率为 5.5 kW , 在系统没有安装稳压装置以前, 每次补水时间约为 5 min , 一天补水约 50 次, 水泵每年的用电量约为 $8\,000 \text{ kWh}$; 在系统安装稳压装置以后, 每次补水时间约为 1 h , 每周补水约 8 次, 水泵每年的用电量约为 $2\,400 \text{ kWh}$. 安

装稳压装置后,补水泵每年节约用电约 5 600 kWh. 按每 kWh 电价 0.8 元进行计算,安装稳压装置后,补水泵每年节约用电费用约为 4 500 元. 在没有安装稳压装置以前,补水泵电机每年要烧损约三到四次,每年维修水泵的费用约为 20 000 元. 安装氮气稳压装置后,每年补充氮气的费用约为 500 元,但没有水泵电机被烧损的情况发生,节省了补水泵因烧损电机而产生的维修费用. 因此安装氮气稳压装置后,补水泵每年的运行费用节约了 24 000 元.

由于目前国内银行的五年以上贷款年利率约为 6%, 在对该油田高温热网增设稳压装置项目进行技术经济分析中,基准收益率的选取应大于银行的贷款利率,在对增设氮气稳压装置项目的技术经济分析中,取基准收益率 i_c 为 8%,使用寿命按 10a 进行计算. 项目的投资偿还期按下式计算:

$$N = -\frac{\ln\left(1 - \frac{L \times i_c}{R}\right)}{\ln(1 + i_c)} \quad (8)$$

式中: N 为投资偿还期,年; R 为每年的收益(即整个供水系统每年节约的运行费用),万元; L 为总投资额,万元; i_c 为基准收益率,%. 净现值按下式计算:

$$NPV = \sum A(P/A, i_c, n) - L \quad (9)$$

式中: NPV 为净现值,万元; $A(P/A, i_c, n)$ 为每年的收益折现,万元. 内部收益率按下式计算:

$$IRR = i_1 + (i_2 - i_1) NPV_1 / (NPV_1 - NPV_2) \quad (10)$$

式中: IRR 为内部收益率,%; i_1 为净现值为正而接近负时的折现率,%; i_2 为净现值为负而接近正时的折现率,%; NPV_1 为 i_1 对应的净现值,万元; NPV_2 为 i_2 对应的净现值,万元.

该油田高温热网系统增设氮气稳压装置项目所投入的资金约为 10 万元、每年节约的运行费用约为 2.4 万元、基准收益率取 8%、项目使用寿命取 10a,将这些数据代入式(8)、式(9)和式(10)对各技术经济指标进行计算,其投资偿还期 $N = 5.27a$,即只需 5.27 年就能回收投入资金成本,小于使用寿命 10a;净现值 $NPV = 6.10$ 万元,大于 0;内部收益率 $IRR = 20.2\%$,大于基准收益率. 从该项目的投资偿还期、净现值和内部收益率等各项技术经济指标看,该项目在经济上都是可行的,具有一定的经济效益.

该油田高温热网系统增设氮气稳压装置,不但提高了系统的安全性、稳定性,延长了系统补水的周期,还节约了补水泵消耗的电能,并降低了补水泵的运行费用,获得了一定的经济效果.

4 结 语

采用氮气稳压装置对热网系统进行稳压后,整个系统运行时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,降低了补水泵的运行费用,获得了一定的经济效果.

参考文献 References

- [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.
MENG Jian-wen. Harm of vaporization of water in hot water boiler and preventive measure[J]. Shanxi architecture, 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.
ZHANG Xue-jun, FAN Xian-min, LI Zhi-hong, et al. Hot water boiler water wall and prevention of evaporation [J]. Special equipment Safety Technology, 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.
ZHANG Jun-ge, LU Su-xia. Analysis of a pipe crack accident of hot water boilers[J]. Forestry Labour Safety, 2006, 19(2): 42-43.
- [4] REZINSKIKH V F, GRIN E A, and BUKIN Y A. Operation reliability and prospects of continuation of service of the thermomechanical equipment of the surgut gres-2[J]. Power Technology and Engineering, 2005, 39(3): 156-159.
- [5] WALTER H, LINZER W. Investigation of the stability of a natural circulation two-pass boiler[J]. Heat Mass Transfer, 2006(42): 562-568.
- [6] 陈忠华, 刘伟然, 郭凤仪, 等. 燃煤热水锅炉节能控制改造[J]. 煤矿机电, 2008 (1): 100-102.

- CHEN Zhong-hua, LIU Wei-ran, GUO Feng-yi, et al. Transformation of energy saving control for coal-fired hot water boiler[J]. Coal mine electromechanical equipment, 2008 (1): 100-102.
- [7] WANG D, YANG T, WEN Z, et al. A mathematical model for optimized operation and control in a CDQ-Boiler system[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 12(5): 390-393.
- [8] ZOU T, LIU HH B, LI S Y. A practical predictive control algorithm for integral processes and a case study in boiler level system[J]. High Technology Letters, 2005, 11(3): 263-267.
- [9] XU M, LI S Y. The real time cascade generalized predictive control and application to a boiler circuit system[J]. High Technology Letters, 2005, 11(2): 193-196.
- [10] VAGNER A A. Raising the reliability, efficiency, and ecological safety of operation of the BKZ-210-140F boiler transferred to stage firing of Kuznetsk coal in a U-shape flame[J]. Power Technology and Engineering, 2004, 38(3): 159-163.
- [11] TALER J, DZIERWA P, TALER D. Optimum heating of pressure components of large steam boilers[J]. Forsch Ingenieurwes, 2009(73): 83-192.
- [12] OSINTSEV V V, SUKHAREV M P, TOROPOV E V, et al. Improvement of the process of fuel firing on BKZ-210-140F boilers[J]. Power Technology and Engineering, 2007, 41(1): 34-40.
- [13] VASILENKO G V, ZAREMBO V I, SLOBODOV A A. Transport of contaminants with boiler water steam[J]. Power Technology and Engineering, 2005, 39(5): 290-291.
- [14] GOLYSHEV L V and DOVGOTELES G A. Optimization of regimes for the feed of highly concentrated culm-anthracite coal dust for burning in a TPP-210A boiler[J]. Power Technology and Engineering, 2007, 41(3): 171-175.
- [15] 战 威, 马和宝. 常压热水锅炉供热系统[J]. 工业锅炉, 2008, 110(4): 51-52.
ZHAN Wei, MA He-bao. Heating supply system of normal atmosphere boiler[J]. Industrial boiler, 2008, 110(4): 51-52.
- [16] 杜少俊, 杨宇亮. 工业热水锅炉水循环故障原因分析[J] 太原理工大学学报, 2005, 36(5): 603-605.
DU Shao-jun, YANG Yu-liang. Cause analysis of water circulating breakdown of industrial hot-water boiler[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36(5): 603-605.

Nitrogen regulating and its effects in the heating network system

WANG De-ming^{1,2}, LONG Teng-rui¹, LUO Cheng², DING De-yu²

- (1. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2. Department of Power Engineering, Chongqing Electric Power College, Chongqing 400053, China)

Abstract: In the running of the high-temperature heating network system, the vaporization and tube rupture accident of the hot water boiler frequently occur without water replenishment in time, and the motor of the water replenishment pump is also burned out due to water replenishment with its starting and stopping. To solve these problems, an additional nitrogen regulating device is installed in the heating network system so as to achieve a longer time on the pressure stability of the system without the vaporization and tube rupture accident of the hot water boiler, and to void water replenishment pump motor burning out due to its frequent start and stops. According to thermodynamic theory, the working process of the nitrogen regulator is analyzed, and the thermodynamic state and processes of the regulating nitrogen in the device discussed. The water replenishment cycle relationship between the system with the regulating device and without regulating device is obtained, and that the system with nitrogen regulating device has longer water replenishment cycles and this can improve pressure stability and security.

Key words: WANG De-ming, Post-doctoral, Chongqing 400045, P. R. China, Tel: 0086-13983229796, E-mail: dm-wang4@sina.com heating network system; thermodynamic analysis; pressure stability; security; pump; boiler