

700 °C 亚临界无再热发电机组技术的经济性分析

屈柯楠, 阎维平, 孟岩

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 本研究对主汽温度达到 700 °C 等级时, 在基本参数相同的前提下分析对比了 18 MPa/720 °C 亚临界无再热 1 000 MW 自然循环机组与同容量 35 MPa/700 °C/720 °C 超超临界一次再热机组的技术经济性, 探讨了设计 700 °C 亚临界无再热机组的可行性。基于热力学卡诺循环效率的计算结果表明, 无再热机组汽轮机热耗率比一次再热机组增加了 465.73 kJ/(kW·h), 供电煤耗提高了 13.15 g/(kW·h)。全面考虑 700 °C 镍基高温钢材价格、标煤单价、贷款利率与机组年运行小时数等经济因素, 比较两机组在不同运行年限内折算的年投资成本差额。综合技术与经济性分析结果表明, 按当前预测的 700 °C 镍基高温钢材价格, 亚临界无再热机组全寿命年限的经济性明显优于超超临界一次再热机组。

关键词: 700 °C; 无再热; 热效率; 技术经济性

中图分类号: TK212.4 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.09.010

引言

提高蒸汽初参数(温度与压力)是提升火力发电机组效率最主要的途径, 近十几年, 主汽温度从 540 °C 提高到 600 °C 左右, 仅提升了 10%, 主汽压力从 9 MPa 提高 27 MPa, 并预计达到 30 MPa。蒸汽温度满足不了随压力成比例提高时, 只提高主汽压力采用再热循技术保证合理的排汽湿度并提高了机组热效率, 但随着压力提高, 给水泵能耗、承压部件壁厚与金属材料投资均大幅度增加; 再热系统不仅使初投资大幅度增加, 而且系统压损与管道散热损失增加, 运行维护难度加大, 对机组整体经济性都有影响。

预计在未来 10 年内主汽温度将达到 700 °C 等级^[1-5]。720 °C 主汽温度与亚临界压力相匹配满足机组无需再热达到合理排汽湿度。720 °C 亚临界自

然循环机组取消再热, 热效率有所影响, 但取消再热、主汽压力大幅度降低, 整个电站初投资将大大减少, 且亚临界自然循环机组控制维护简单方便, 运行更安全^[6]。本文对主汽温度在 700 °C 等级时, 降低主汽压力, 取消再热系统的 18 MPa/720 °C 亚临界无再热 1 000 MW 自然循环机组进行技术经济性分析。选取同等容量的 35 MPa/700 °C/720 °C 超超临界一次再热机组为对比机组, 利用等效卡诺循环计算循环热效率, 考虑主蒸汽压力大幅降低和取消蒸汽再热系统对机组在管道热效率、给水泵能耗, 蒸汽压损等方面的影响得到机组各运行经济参数。机组取消再热系统, 减少冷热一次再热管道, 锅炉取消再热器, 汽轮机缸体数减少, 初投资成本降低, 考虑 700 °C 镍基高温钢材价格、标煤单价、贷款利率与机组年运行小时数等经济因素, 比较两机组在不同运行年限内折算的年初投资成本差额与年燃煤成本差额, 对两机组进行综合技术与经济性分析。

1 热力学方法热效率计算模型

如图 1 所示任一理想热力循环均有与之等价的卡诺循环, 等价卡诺循环热效率等于平均放热温度与平均吸热温度之比。

实际循环热效率为等价卡诺循环热效率与汽轮机相对内效率的乘积, 如式(1)所示。采用此方法避免了不同热力系统回热参数变化对循环热效率的影响, 简化了计算过程, 有利于循环效率的对比分析。

$$\eta_t = \eta_c \cdot \eta_i = \left(1 - \frac{T_{m1}}{T_{m2}}\right) \cdot \eta_i \quad (1)$$

式中: T_{m1} —平均放热温度, °C, 由最终排汽压力决

收稿日期: 2015-12-08; 修订日期: 2016-04-09

作者简介: 屈柯楠(1991-), 女, 陕西宝鸡人, 华北电力大学硕士研究生。

定; T_{m2} —平均吸热温度, °C, 由循环吸热量和吸热过程熵增决定; η_i —实际循环热效率; η_c —等效卡诺循环热效率; η_i —汽轮机内效率。

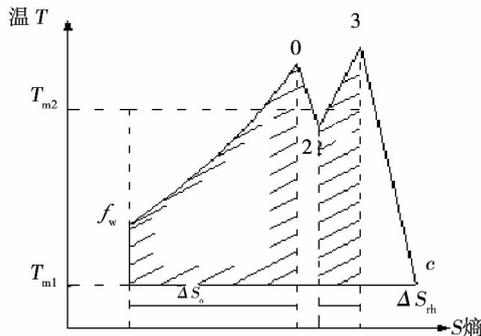


图 1 超临界一次再热动力循环系统温 - 熵曲线
Fig. 1 Temperature-entropy curves of a supercritical primary reheat power cycle system

$$T_{m2} = \frac{(h_0 - h_{fw}) + \alpha_{rh} \cdot (h_3 - h_2)}{(s_0 - s_{fw}) + \alpha_{rh} \cdot (s_3 - s_2)} \quad (2)$$

式中; h_0, h_{fw}, s_0, s_{fw} —新汽及给水比焓, J/kg、比熵值 J/(kg · k); h_2, h_3, s_2, s_3 —再热器进、出口比焓, J/kg、比熵值 J/(kg · k); α_{rh} —再热蒸汽量与新汽量之比值^[7]。

汽轮机组的发电热耗率 q 为:

$$q = \frac{3\ 600}{\eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_g} \quad (3)$$

式中: q —发电热耗率 kJ/(kW · h); η_m, η_g —机械效率和发电机效率。

对某现役 26.25 MPa/600 °C/600 °C 超超临界一次再热 1 000 MW 机组计算得到该机组汽轮机组发电热耗率为 7 316 kJ/(kW · h) 与其实际热耗率 7 328 kJ/(kW · h) 相比误差小在允许误差范围内, 验证此方法的可用性。

2 700 °C 亚临界无再热与超超临界再热机组运行经济性比较

再热循环增加一套蒸汽再热管路, 蒸汽压损增加做功能力降低, 文献 [10] 详细计算了 1 000 MW 机组蒸汽若无再热压损相当火电厂效率提高了 1.6% 机组多做功 1.6 MW; 管道热效率损失由给水管、新蒸汽管道、再热蒸汽管散热损失, 工质泄漏、

厂用蒸汽、锅炉连续排污六项损失组成, 无再热机组取消再热蒸汽管道散热损失, 参考文献 [11 ~ 12] 计算实例, 取无再热与再热机组管道热效率分别为: 97.684%、97.546%; 两机同为 1 000 MW 等级, 但无再热机组主汽压力远低于再热机组, 且给水泵仅需克服省煤器阻力, 大大降低给水泵所需能耗(焓升), 计算无再热与再热机组给水泵焓升分别为 24.13、53.49 kJ/kg, 给水泵焓升的不同在前文中已计入对循环热效率的影响, 在厂用电率中不再考虑, 结合当前已投运 1 000 MW 机组数据, 两机组厂用辅机功率耗电量(均采用汽动给水泵)可认为相当均取为 4.19%^[13], 热经济性对比如表 1 所示。

表 1 1 000 MW 机组无再热与一次再热循环的热经济性对比

Tab. 1 Contrast of the thermal cost-effectiveness of a 1 000 MW reheatless and primary reheat cycle unit

项目	无再热	再热
主蒸汽压力/MPa	18	35
主蒸汽温度/°C	720	700
再热蒸汽压力/MPa	—	6.3
再热蒸汽温度/°C	—	720
背压/MPa	0.004 9	0.004 9
给水温度/°C	320	320
给水泵焓升/kJ · kg ⁻¹	24.13	53.49
汽轮机热耗率/kJ · (kW · h) ⁻¹	7 332.70	6 866.97
再热压损发电损失/MW	0	-16
锅炉效率/%	94	94
管道效率/%	97.684	97.546
厂用电率/%	4.19	4.19
发电煤耗/g · (kW · h) ⁻¹	268.48	255.87
供电煤耗/g · (kW · h) ⁻¹	280.22	267.07
全厂净效率/%	43.89	46.06

由表 1 所列计算结果, 虽无再热机组汽轮机热耗率增加了 465.73 kJ/(kW · h), 但蒸汽无再热压损可多发电 16 MW 相当于发电煤耗降低了 4.36 g/(kW · h), 管道热效率提高了 0.138%, 且给水泵焓升约为一次再热机组的 45%, 综合结果是无再热机组供电煤耗高 13.15 g/(kW · h) 机组净效率低 2.17%。

3 700 °C 亚临界无再热与超超临界再热机组经济技术比较

3.1 初投资成本比较

在当前 600 °C 超超临界一次再热 1 000 MW 机组建设费用约 50 亿元人民币的基础上,对主汽参数增加到 700 °C 机组初投资增加成本进行估算。按欧洲市场采用的热耗价格 1 kJ/kW · h 对应的汽轮机价格差是 13.2 万欧元,两机组不同汽机热耗可估算两机组汽机造价差值^[14];有计算指出 600 °C 一次再热机组 2 × 1 000 MW 主蒸汽管道和再热蒸汽管道的价格约 3 亿元,蒸汽参数提高到 700 °C 时价格可能上升至 25 亿元以上^[3]。

蒸汽温度从 600 °C 提高到 700 °C 锅炉吸热量增加,无再热机组高温过热器受热面面积增加,取消再热器,且机组主汽压力大幅度降低,18 MPa 压力等级下理论管壁厚度约为 35 MPa 压力等级下的三分之一,增加汽包金属投资与压力降低承压管壁厚减小节省金属投资相抵消,按当前镍基高温钢材的预测价格约为现在 600 °C 材料的 4 倍 78 万元/t 左右,计算两机组锅炉侧增加投资成本,在镍基高温钢材价格为 78 万元/吨时,700 °C 两种机组相对 600 °C 一次再热机组,机组各部分建设费用增加情况如图 2 所示。

由图 2 可得,无再热机组取消再热管道,四大管道投资远远低于再热机组约为其 1/6,过热器的投资亦因管壁厚度减小仅为一次再热机组的 1/3 为 2.87 亿,且无再热机组取消再热器该单项投资减少了 0.64 亿。

目前低成本镍基高温材料也在研究中,随着镍基高温材料研究技术的成熟与发展,耐高温 700 °C 等级金属价格将有所下降,随着材料价格降低,700 °C 两种机组相对 600 °C 一次再热机组,机组整体建设费用增加情况如图 3 所示。

由图 3 可得,镍基高温钢材价格为 78 万元/t 时,再热机组初投资成本增加了 24.95 亿元,无再热机组初投资成本增加了 2.12 亿元,无再热、再热两机组初投资成本分别为:5 212 和 7 495 元/kW;假如高温金属材料降至与当前 600 °C 材料价钱相当

13 万元/t 时,无再热机组投资低于 600 °C 一次再热机组相对减少 0.96 亿,无再热、再热两机组投资成本分别为:4 060 和 5 327 元/kW。

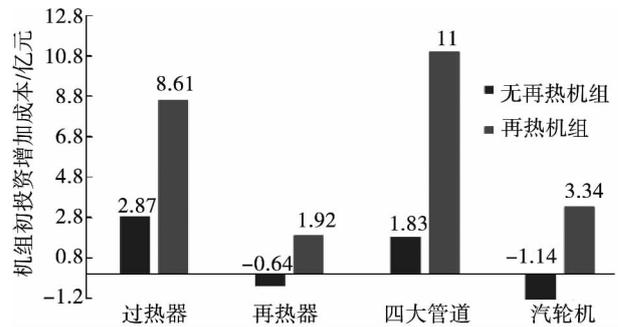


图 2 镍基高温钢材价格为 78 万元/t 时,两机组初投资增加成本分布图

Fig. 2 Chart showing the distribution of the cost added to the initial investment of the two units when the price of nickel-based high-temperature steel material is RMB 780 000/ton

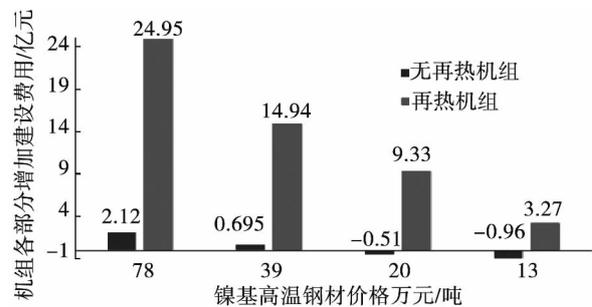


图 3 700 °C 两种机组相对 600 °C 一次再热机组,机组整体增加建设费用随镍基高温钢材价格的变化

Fig. 3 Changes of the construction cost added to the investment in the two units as a whole having an initial temperature of 700 °C relative to a primary reheat unit having an initial temperature of 600 °C with a decrease of the price of nickel-based high-temperature steel materials

3.2 两机全寿命年限差额收益比较

按现行贷款利率 $I = 4.90\%$,两机组年利用小时数 5 000 h,标煤价格 600 元/t,镍基高温钢材价格 78 万元/t,年固定费率 $N = (1 + I)^n \times I / ((1 + I)^n - 1)$, n 为偿还年限,计算无再热机组在偿还年限为

20、30、40 年时相对再热机组投资差额,结果如表 2 所示。

表 2 不同贷款偿还年限无再热机组相对再热机组投资差额表

Tab. 2 Balance sheet of the investments in areheatless unit relative to a reheat unit when the numbers of the years for paying off the loans are different

项目	偿还年限/年		
	20	30	40
贷款利率/%	4.90		
年利用小时数/h	5 000		
年发电量/kW·h	5×10^9		
标煤价格/元·t ⁻¹	600		
发电煤耗差值/g·(kW·h) ⁻¹	+13.15		
发电标煤年成本差额/亿元	+0.394 5		
初投资总差额	-22.83		
年固定费率	0.079 56	0.064 31	0.057 48
年投资成本/亿元	-1.816 4	-1.468 2	-1.312 3
年投资差额/亿元	-1.421 9	-1.073 7	-1.091 8

注“-”表示无再热机组低于再热机组,“+”表示无再热机组高于再热机组

由表 2 可得,无再热机组初投资总额比无再热机组减少投资 22.83 亿元,虽每年发电煤耗成本高于再热机组 0.394 5 亿元,但初投资成本投入少,在机组设计全寿命年限 30 年内,年投资差额小于无再热机组,整体经济优势明显。计算还表明,只有当镍基高温钢材价格降低至 24 万元/t 时,两机组年投资差额为零,整体经济优势相当,当标煤价格高达 900 元/t 时,镍基高温钢材价格降到 38 万元/t 时,两机组整体经济优势相当。

4 结 论

18 MPa/720 °C 亚临界无再热 1 000 MW 自然循环机组与同等容量的 35 MPa/700 °C/720 °C 超超临界一次再热机组,计算结果表明:

(1) 在分析对比两机组在管道热效率、给水泵能耗、蒸汽压损等方面的影响得无再热机组比一次再热机组汽轮机热耗率增加了 465.73 kJ/(kW·h),供电煤耗增加了 13.15 g/(kW·h),机组净效率降低了 2.17%;

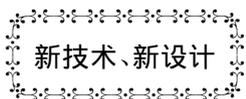
(2) 全面考虑 700 °C 镍基高温钢材价格、标煤单价、初投资、贷款利率与机组年运行小时数等经济因素,比较两机组不同偿还年限内年投资差额,综合技术与经济性分析结果表明,在机组设计全寿命年限 30 年内,700 °C 镍基高温钢材价格昂贵的条件下,无再热机组经济性优于再热机组,当 700 °C 镍基高温钢材价格降低或标煤单价增加,无再热机组整体经济优势下降。

参考文献:

- [1] 迟成宇,于鸿鑫,谢锡善.世界 700 °C 等级先进超超临界电站关键高温材料[J].世界钢铁 2013 02:42-59+63.
CHI Cheng-yu, YU Hong-xiao, XIE Xi-shan. Critical high-temperature materials for use in 700 °C class world advanced ultra-supercritical power plants[J]. World Iron & Steel 2013 2:42-57.
- [2] 杨根盛,李忠,杨定华,等.700 °C 先进超超临界发电技术的开发与进展[J].锅炉制造 2013 04:1-4+7.
YANG Gen-sheng, LI Zhong, YANG Ding-hua, et al. Development and progress of 700 °C advanced ultra-supercritical power generation technologies[J]. Boiler Manufacturing 2013(4): 1-4.
- [3] 毛健雄.700 °C 超超临界机组高温材料研究的最新进展[J].电力建设 2013 08:69-76.
MAO Jian-xiong. Latest advances in the development of high-temperature materials for use in 700 °C ultra-supercritical units[J]. Electric Power Construction 2013 34(8): 69-76.
- [4] 徐炯,周一工.700 °C 高效超超临界火力发电技术发展的概述[J].上海电气技术 2012 02:50-54.
XU Jiong, ZHOU Yi-gong. A general description of 700 °C effective ultra-supercritical thermal power generation technologies[J]. Journal of Shanghai Electrical Technology 2012 11:50-54.
- [5] 姚明宇,张广才,聂剑平.高效燃煤机组关键技术研究进展[J].热力发电 2012 08:1-5+23.
YAO Ming-yu, ZHANG Guang-cai, NIE Jian-ping. Advances in the study of critical technologies for high efficiency coal-fired units[J]. Thermal Power Generation 2014 01:1-7.
- [6] 阎维平.超临界蒸汽参数发电技术发展评述[J].电力科学与工程 2014 01:1-7.
YAN Wei-ping. A review of the supercritical steam parameter power generation technologies[J]. Electric Power Science and Engineering 2014 01:1-7.
- [7] 沈士一.汽轮机原理[M].北京:中国电力出版社,2007:196-197.
SHEN Shi-yi. Steam turbine principles [M]. Beijing: China Electric Power Press 2007.
- [8] 王培红.给水泵焓升在汽轮机热力系统经济性分析中的计算

- 方法[J]. 江苏电机工程, 1994, 02: 42-47.
- WANG Pei-hong. Method for calculating the enthalpy rise in a feedwater pump in the cost-effective analysis of a steam turbine thermal system[J]. Jiangsu Electric Machinery Engineering, 1994, 11: 42-47.
- [9] 方超. 给水泵焓升在汽轮机热耗计算中的处理方法[J]. 汽轮机技术, 1990, 02: 28-33.
- FANG Chao. Method for calculating the enthalpy rise in a feedwater pump in calculating the heat rate of a steam turbine[J]. Steam Turbine Technology, 1990, 11: 28-33.
- [10] 杨晓伟, 周少祥. 机组再热循环热经济性及参数匹配分析[J]. 热电技术, 2011, 01: 8-11.
- YANG Xiao-wei, ZHOU Shao-xiang. Thermal cost-effectiveness of the reheat cycle of a unit and analysis of the parameter matching[J]. Thermoelectric Technology, 2011, 01: 8-11.
- [11] 石奇光, 薛玉兰, 马庆. 关于发电厂管道热效率的反平衡算法及其分析[J]. 华东工业大学学报, 1997, 19(3): 99-105.
- SHI Qi-guang, XUE Yu-lan, MA Qing. Method for reverse balance calculating the thermal efficiency of the pipelines in a power plant and its analysis[J]. Journal of East China University of Technology, 1997, 19(3): 99-105.
- [12] 霍焕广, 石奇光, 杨燕玲, 等. 1 000 MW 二次再热火电机组管道热效率对系统热经济性的影响[J]. 动力工程学报, 2014, 01: 77-84.
- HUO Huan-guang, SHI Qi-guang, YANG Yan-ling, et al. Influence of the thermal efficiency of the pipelines on the thermal cost-effectiveness of the system of a 1 000 MW secondary reheat thermal unit[J]. Journal of Power Engineering, 2014, 01: 77-84.
- [13] 刘慧军, 胡建忠, 袁军. 1 000 MW 机组循环水泵厂用电率计算方法的探讨[J]. 电力建设, 2011, 02: 76-79.
- LIU Hui-jun, HU Jian-zhong, YUAN Jun. Exploratory study of the method for calculating the plant-service power rate of the circulating water pumps in a 1 000 MW unit[J]. Electric Power Construction, 2011, 02: 76-79.
- [14] 朱宝田, 苗迺金, 雷兆团, 等. 我国超超临界机组技术参数与结构选型的研究[J]. 热力发电, 2005, 07: 1-6+2.
- ZHU Bao-tian, MIAO Nai-jin, LEI Zhao-tuan, et al. Study of the technical parameters and structure type selection for ultra-supercritical units in China[J]. Thermal Power Generation, 2005, 07: 1-6.

(刘瑶 编辑)



6.5 MW 燃气轮机的低压涡轮

据《Gas Turbine World》2014~2015 年年手册报道, 单轴 MGT6100 燃气轮机具有直接连接到后部的转子部分的不冷却的 2 级轴流低压涡轮部分。功率输出轴从发动机前端伸出。

双轴 MGT6200 燃气轮机具有在气动力学上被连接到燃气发生器的 2 极轴流自由动力涡轮。该动力涡轮针对双轴可变速运行被优化。它在 45%~105% 设计速度的整个广泛的速度范围内运行, 最大转速为 12 600 r/min。

在悬臂式转子中的 2 个涡轮轮盘利用 Hirth 细齿花键连接被装配到轴的前端, 该细齿花键连接把机械功传递到被驱动设备。利用枞树形叶根把带叶冠并锁定的叶片固定到空气冷却的轮盘上。

动力涡轮轴被 2 个可倾瓦块轴承支承, 后部可倾瓦块轴承和 1 个可倾瓦自位推力轴承结合, 以便平衡轴向推力。

(吉桂明 摘译)

words: wind turbine blade ,aeroelastic tailoring ,modal

700 °C 亚临界无再热发电机组技术的经济性分析 = **Analysis of the Cost-effectiveness of the 700 °C Subcritical Reheat-less Power Generation Unit Technology** [刊 ,汉] /QU Ke-nan ,YAN Wei-ping ,MENG Yan (College of Energy Source ,Power and Mechanical Engineering ,North China University of Electric Power ,Baoding ,China , Post Code: 071003) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(9) . -58 ~62

When the steam temperature can not further increase ,to increase the main steam pressure and adopt a reheat cycle can enhance the thermal efficiency of the thermal cycle of a unit. However ,with an increase of the pressure ,the energy consumption rate of the feedwater pumps ,wall thickness of the pressure components and the investment in the metal materials will all increase by a great margin. A reheat system will not only make the initial investment increase substantially but also force the pressure loss of the system and the heat dissipation loss in the pipelines to increase and heighten the operation difficulty. When the main steam temperature attains a level of 700 °C ,under the precondition of the basic parameters being identical ,the cost-effectivenesses of a 18 MPa/720 °C 1 000 MW subcritical reheat-less natural cycle unit and a 35 MPa/700 °C /720 °C 1 000 MW ultra-supercritical primary reheat unit were analyzed and contrasted and the feasibility of designing a 700 °C subcritical reheat-less unit was also exploratorily investigated. The calculation results based on the Carnot cycle in the thermodynamics show that the heat rate of the steam turbine of a unit without any reheat will increase by 465.73 kJ/(kW · h) and the power supply coal consumption rate will increase by 13.15 g/(kW · h) when compared with those of a primary reheat unit. Such economic factors as the prices of Ni-base high temperature steel materials for use at or above 700 °C ,the unit price of standard coal ,loan interest rate and annual operation hours of the units etc. were taken into account in a comprehensive way and the balances of annual investment costs in both units converted in various numbers of years in operation were also compared. The comprehensive cost-effective analytic results show that the cost-effectiveness of the subcritical reheat-less unit in the number of years of the whole service life will be obviously superior to that of an ultra-supercritical primary reheat unit. **Key words:** 700 °C ,reheat-free ,thermal efficiency ,cost-effectiveness

链条锅炉复合燃烧炉内特性的数值模拟研究 = **Numerical Simulation and Study of the In-furnace Compound Combustion Characteristics of a Chain Grate Boiler** [刊 ,汉] /SAI Qing-yi ,YAN Hao-wen ,ZHANG Zhong-xiao (Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200090) ,CHEN Bao-ming (Huazhibang Science and Technology Stock-holding Co. Ltd. ,Shanghai ,China ,Post Code: 200090) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(9) . -63 ~68

With a 35 t/h chain grate boiler in a chemical plant serving as the physical model ,the CFD software Fluent was adopted to perform a numerical simulation and calculation of the characteristics of the speed field and temperature field in the furnace of a chain grate boiler before and after the reconstruction by using the compound combustion technology. The calculation results show that after the reconstruction by using the compound combustion technology ,