

# 在不同工况下 300 MW 锅炉过热器、再热器的特性试验研究

(哈尔滨锅炉厂有限责任公司) 辛志明 吴履琛 刘恒宇 武 勇  
(铁岭发电厂) 宋超翼 李国军 程革新 周松志

**摘 要:** 通过对锅炉稳定工况和动态工况的试验, 综合分析了过热器、再热器受热面在不同运行工况的壁温状况, 为解决过热器、再热器超温问题具有一定的参考价值。

**关 键 词:** 过热器; 再热器; 壁温特性

中图分类号: TK223.32

文献标识码: A

## 1 引言

300 MW 机组过热器和再热器超温爆管一直是困扰电厂正常安全运行的主要问题之一, 多年来, 各制造厂和有关高等院校、科研院所就此类问题进行过许多分析研究, 而现场运行试验研究, 特别是动态工况运行特性的试验研究未见报导不多。哈尔滨锅炉厂有限责任公司和铁岭发电厂合作, 在 2 号炉进行了全面的工业性试验。在锅炉多种运行工况下, 对过热器和再热器的各级受热面的吸热量分配变化、屏间热偏差和炉内、炉外壁温特性等方面进行综合试验分析, 为拟定合理的锅炉运行操作方式提供依据, 以确保过热器和再热器安全运行。

## 2 锅炉概况

铁岭电厂一期工程为 4 套 300 MW 机组, 已经全部投入运行, 锅炉为亚临界压力一次中间再热自然循环汽包炉, 均由哈尔滨锅炉厂有限责任公司设计制造, 其型号为 HG-1021/18.2-YM4(见图 1)。锅炉主要技术规范见表 1。锅炉设有五级过热器, 再热器分三级布置, 锅炉主蒸汽温度调节主要采用两级喷水减温, 辅以摆动燃烧器; 再热蒸汽温度调节以摆动燃烧器为主, 并设有事故喷水减温作为备用。锅炉制粉系统为正压直吹式, 配有 5 台 MPS-212 型

中速磨煤机, 每台磨煤机带一层煤粉燃烧器, 一次风系统和二次风系统相互独立, 预热器为三分仓回转式空气预热器, 锅炉配有 2 台一次风机, 2 台送风机, 2 台引风机构成平衡通风方式。

表 1 锅炉主要技术规范

名 称	符 号	数 据
	单 位	(MCR 工况设计值)
过热蒸汽流量	$G_{gr}/t \cdot h^{-1}$	1021
过热蒸汽温度	$t_{gr}/^{\circ}C$	540
过热蒸汽压力	$P_{gr}/MPa$	18.2
再热蒸汽流量	$G_{zr}/t \cdot h^{-1}$	825
再热器入口蒸汽压力	$P_{zr}^I/MPa$	3.83
再热器出口蒸汽压力	$P_{zr}^II/MPa$	3.62
再热器入口蒸汽温度	$t_{zr}^I/^{\circ}C$	324
再热器出口蒸汽温度	$t_{zr}^II/^{\circ}C$	540
给水温度	$t_{gs}/^{\circ}C$	278.3

## 3 试验工况与试验方法

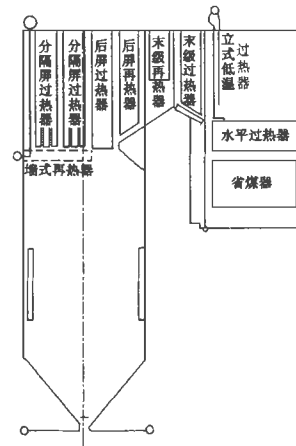


图 1 锅炉结构简图

### 3.1 试验工况

本次试验的工况包括: 水平烟道内气流分布特性的测量; 锅炉冷态启动试验; 锅炉稳定工况试验; 滑压、定压升降负荷试验; 停高加变给水温度试验。

### 3.2 试验方法

用转杯式风速仪在屏式再热器出口处测量该区域的风速沿炉宽方向上的分布; 用铠装热电偶在屏再出口测量沿炉宽方向上的烟温分布; 采用金属喷涂法在屏式再热器、末级再热器和末级过热器的前排管下弯头上部直段向火面安装炉内壁温测点, 测量各工况下的管壁温度; 在各级受热面进出口连接

收稿日期: 1999-12-08; 修订日期: 1999-12-10

作者简介: 辛志明(1967-), 男, 黑龙江密山人, 工程师, 主要从事电站锅炉运行与新产品开发工作。通讯处: 150040 哈尔滨锅炉厂有限责任公司锅炉所

管上安装热电偶测点,测量各级受热面进出口工质温度,得到各级过热器、再热器的吸热分配;利用炉外壁温测点,测量末级过热器、后屏过热器、屏式再热器、末级再热器屏间的工质温度分布,求得各级受热面的屏间热偏差系数;通过主控 DAS 系统和温度巡检仪记录机组主要热力参数和受热面炉外壁温。

## 4 测试结果与分析

### 4.1 过热器和再热器焓增

#### 4.1.1 过热器焓增

过热器总焓增在 50%、70%、100%ECR 工况下,比设计值分别高出 14.7%、9.8%、16.2%,但焓增随负荷变化的趋势与设计值是一致的(见表 2)。焓增超出设计值的主要原因是火焰中心偏高,导致分隔屏和后屏过热器吸热量增加,末级过热器吸热量相对减少。在低负荷下风量偏大的因素起主导作用,末级过热器的吸热相对增大。

表 2 不同负荷下过热器焓增设计值与试验值的比较

%ECR	50.0		70.0		100.0	
	焓增差值 /kJ·kg <sup>-1</sup>	%	焓增差值 /kJ·kg <sup>-1</sup>	%	焓增差值 /kJ·kg <sup>-1</sup>	%
包墙、顶棚、低过	-115.5	-35.0	9.8	2.1	-35.8	-8.2
分隔屏	15.7	7.1	-77.9	-34.7	-34.3	-18.2
后屏	36.6	14.8	-1.4	0.0	-38.3	-17.7
末过	-63.3	-102.0	-35.4	-28.9	-46.6	-39.9
总计	-126.4	-14.7	-104.9	-9.8	-155.0	-16.2

#### 4.1.2 再热器焓增

除再热器焓增在 100%ECR 工况下比设计值高出 13.5%外,在 50%、70%ECR 工况下比设计值低 10%和 1%。从表 3 可以看出,由于高缸排汽温度偏高(在 50%ECR 高出设计值近 50℃),为维持再热蒸汽出口温度,只能增加喷水量以降低再热器系统的入口温度,同时风量又偏大,致使再热器系统的各段吸热量分配发生变化。墙再和屏再焓增的变化趋势呈对流特性。与设计相反,末再的对流特性更强。

表 3 不同负荷下再热器焓增设计值与试验值的比较

%ECR	50.0		70.0		100.0	
	焓增差值 /kJ·kg <sup>-1</sup>	%	焓增差值 /kJ·kg <sup>-1</sup>	%	焓增差值 /kJ·kg <sup>-1</sup>	%
墙再	49.3	24.7	20.5	11.2	-20.5	-12.6
屏再	-8.8	-3.6	-37.5	-15.0	-55.3	-23.7
末再	14.4	15.9	7.8	6.7	6.6	5.7
总计	54.9	10.2	-9.2	-1.7	-69.2	-13.5

### 4.2 炉外壁温

炉外壁温实质上代表着管内工质温度。图 2 至图 4 给出了屏再、末再和末过的最外圈炉外管壁温度在不同负荷状况沿炉宽方向的分布。设计给定的壁温报警值是通过选取该级受热面理论上工作环境最恶劣的管子进行壁温计算,同时考虑所选用的管材最终得出该管的报警值,作为该受热面的壁温报警值。从图中可以看出,最外圈的管壁温度均在设计给出的报警值以下,由于同屏管中最外圈管的热负荷是最高的,所以在稳定负荷工况下,管壁的运行状态是安全的。

### 4.3 炉内壁温

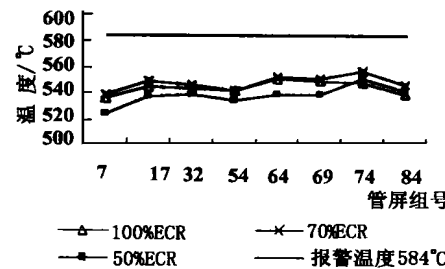


图 2 末级过热器最外圈管壁温度

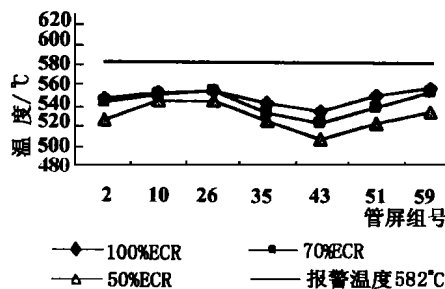


图 3 末级再热器最外圈管壁温度

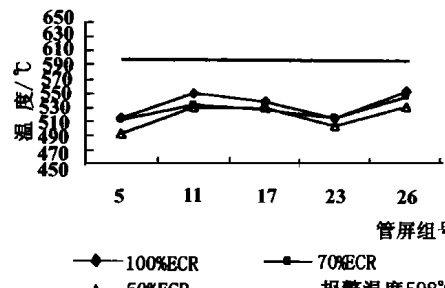


图 4 前屏再热器最外圈管壁温度

图 5 示出了炉内壁温随负荷的变化。从炉内壁温曲线上可以看出,炉内温随着负荷的增加而增加,同时总体壁温水平偏高。处于水平烟道右侧和入口在三通涡流区中的屏再 B5 管壁温水平最高,这是热偏差与水力偏差相叠加的结果。实际运行证明了这一点,该管在管材提高档次前常发生爆管。

炉内壁温测点采用金属喷涂法安装

热电偶,测量值是正误差,曾做过标定,试验值偏高 10℃~15℃。

### 4.4 偏差

### 4.4.1 流速偏差

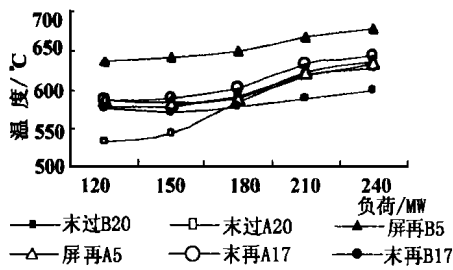


图 5 不同负荷下炉内壁温曲线

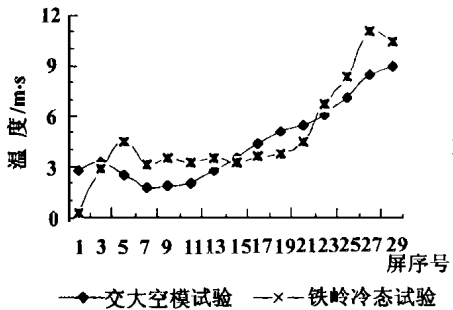


图 6 屏再出口气流速度分布

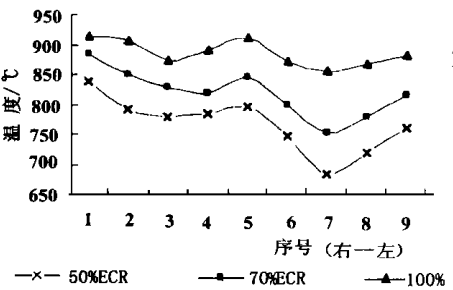


图 7 不同负荷下屏再出口烟温分布

图 6 示出了屏再出口沿炉宽方向的气流分布。从图 6 可以看出, 右侧气流速度明显高于左侧气流速度, 右侧最高达到 11 ~ 12 m/s, 左侧为 2 ~ 3 m/s, 右高左低的趋势与西安交大空模试验结果基本一致。

左侧在 5 ~ 6 屏区域有一峰值, 右侧在 26 ~ 27 屏区域最高。从冷态流速的分布中可以得出结论, 四角切圆燃烧方式在水平烟道内存在着较大的流

速偏差。气流的偏转方向与切圆的旋转方向有关, 即切圆逆时针旋转, 水平烟道右侧风速较高。

### 4.4.2 烟温偏差

不同负荷下的屏再出口烟道分布见图 7, 由图 7 可以看出, 两侧烟道的偏差不大, 不超过 70℃。随着负荷的升高, 出口烟道逐渐升高, 两侧偏差则越来越小。沿烟道的宽度方向, 烟道总体呈现“W”形分布。

从气流偏差和烟道偏差的分析中可以看出, 水平烟道的两侧热偏差, 气流偏差是主要影响因素。

### 4.4.3 屏间偏差

在过热器和再热器中, 所谓的热偏差, 即是偏差管的焓增与平均焓增的比值。壁温计算中, 热偏差主要考虑管子的热力特性和水力特性的影响, 对偏

差的影响各占 6%, 合计 12%。表 4 给出了本次试验在额定负荷下的各级受热面的屏间热偏差系数。从中可以看出, 偏差系数除末级过热器外均高于壁温计算选取值。主要是由于设计中未考虑“T”型三通涡流对水力特性的影响及水平烟道两侧气流偏差对热力特性的影响。处于水平烟道入口的后屏过热器的屏间偏差最大, 因为最外圈管子直接接受火焰辐射, 同时这里沿炉宽方向上的烟气流速偏差也最大。

### 4.5 冷态启动

图 8 为冷态启动过程中, 炉膛出口烟温及过热器、再热器的壁温变化曲线。由图 8 可见, 在汽轮机冲转、升速、并网阶段, 炉膛出口烟温均不超过 538℃, 炉内壁温不超过 450℃, 证明再热器在关旁路汽轮机挂闸后的“干烧”状态下是安全的。投一台磨后, 烟温迅速上升, 过热器和再热器壁温亦随之升高。

表 4 额定负荷下的屏间热偏差

项 目	后屏过热器	末级过热器	屏式再热器	末级再热器
入口压力/MPa	18.35	17.72	3.84	3.78
入口温度/℃	442.9	488.8	374	493.4
入口焓/kJ·kg <sup>-1</sup>	3 079.4	3 245.7	3 155.6	3 432.42
出口压力/MPa	17.72	16.93	3.78	3.7
外圈出口平均温度/℃	507.2	544	535.9	549.04
外圈出口平均焓/kJ·kg <sup>-1</sup>	3 302.8	3 422.1	3 529.2	3 559.73
外圈平均焓增/kJ·kg <sup>-1</sup>	223.4	176.4	373.62	127.31
偏差管出口温度/℃	540.3	550.5	557	560
偏差管出口焓/kJ·kg <sup>-1</sup>	3 400.4	3 433.9	3 576.96	3 584.8
偏差管焓增/kJ·kg <sup>-1</sup>	321	188.2	421.36	152.4
热偏差系数	1.44	1.07	1.13	1.2

### 4.5.1 滑压升降负荷

锅炉设计通常仅考虑额定负荷及额定压力工况下的壁温计算, 一般不校核动态工况的管壁温度。滑压运行时, 主汽压力随负荷的变化而变化。当汽压降低时, 汽化潜热增加, 产汽量减少, 而热负荷的减小相对缓慢, 故不仅过热器, 并且再热器亦有壁温升高现象。只是再热器的升高幅度较小。滑压运行分隔屏和低过的壁温升幅相对较大, 最易超温, 以分隔屏和低过的最高温度点的变化作一曲线(见图 9 和图 10), 在滑降过程中, 壁温逐渐升高, 但均在报警值以下。在 36 分时开始滑升, 滑升初期较易超温, 幅度为 25℃~30℃, 时间约持续 15~20 分钟。这是由于滑升初期, 燃料量增加, 烟温和烟气流速较快发生变化, 而过热器内工质流量的变化有一延迟过

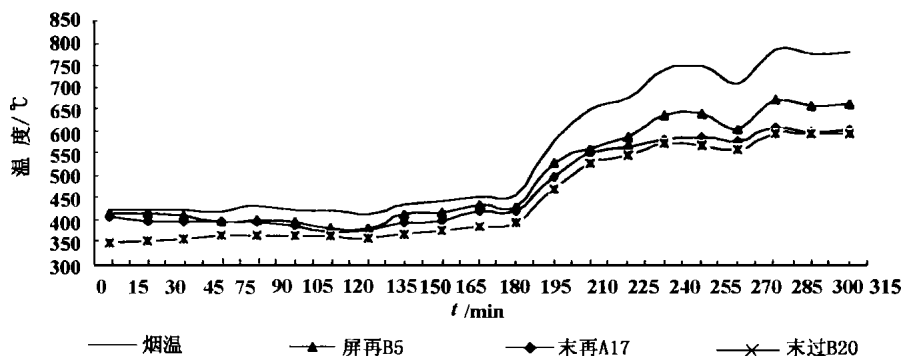


图8 冷态启动炉膛出口烟温及过热器再热器壁温曲线

程,在这段时间差内,壁温容易超温。所以在滑升初期,要降低燃料量的增加速度,严格控制负荷变化率。

#### 4.5.2 停高加

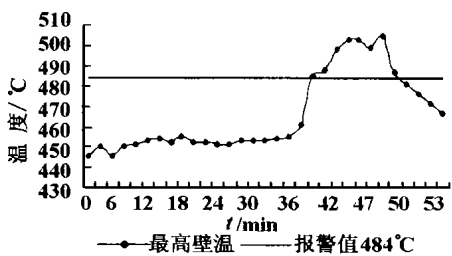


图9 滑压降升负荷分隔屏最高壁温曲线

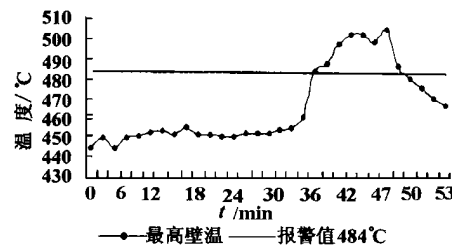


图10 滑压降升负荷分隔屏最高壁温曲线

给水温度的降低使经济器和水冷壁吸热量增加,需投入更多的燃料,极易造成过热器、再热器超温。本次试验负荷在250 MW时,各级受热面的壁温在报警值以下。在280 MW负荷下停高加时,过热器超温严重,只能降负荷试验。因此在停高

加时,应严格控制运行工况,在过热器、再热器壁温难以控制的情况下适当降负荷。

### 5 操作建议

5.1 鉴于沿炉膛宽度方向的热偏差主要是由于烟气流量偏差所致,可通过顶部风的反切消除或减轻气流的旋转强度。实践已经证明,反切顶部风对降低水平烟道的热偏差有显著效果。

5.2 300 MW 锅炉的过热器再热器受热面在高热负荷区域的102钢管普遍发生爆管事故,宏观检查均

发现存在严重的表面氧化,实际情况说明,钢102材料的高温抗氧化性较差,不宜用于600°C的工作温度。建议用TP304H、TP347H奥氏体不锈钢取代高热负荷区域的钢102珠光体耐热钢,提高管材的抗氧化性能。

5.3 当机组运行在变压区域而要迅速增加负荷时,负荷提升初期进一步打开汽机调速汽门,增加负荷,然后主汽压

力再逐渐升高到滑压运行压力曲线应有水平,这时,汽机调速汽门的开度也重新回到预定的位置。

5.4 锅炉运行要充分利用燃烧器的摆动功能,适时调节火焰的中心位置。严格控制入炉总风量,保证氧量在合理的范围内。

### 6 结论

(1) 锅炉稳定负荷运行,过热器和再热器的管壁温度均低于设计给定的报警值。

(2) 机组滑压运行,锅炉过热器尤其低温过热器和分隔屏过热器壁温超温严重。

(3) 锅炉冷态启动至并网前,炉膛出口温度不超过538°C。升负荷期间也未出现管壁超温现象。

(4) 烟气流速偏差与烟气温度偏差相比,前者是形成水平烟道热偏差的决定性因素。流速偏差随负荷的升高而增加,而烟温偏差却随负荷的升高而降低,但炉膛出口烟气温度总体水平升高。

(5) 过热器和再热器各级受热面管壁温度最高的管子均在管屏最外圈,且管入口在入口联箱三通附近。这是由于集箱引入管的“T”型三通区域存在一次和二次涡流,造成该区域的流量分配不均,使某些支管的流量减小。

(6) 屏间偏差除末级过热器外其它均超过设计给定值12%。这是由于壁温计算并未考虑三通涡流及出口烟气热偏差对壁温的影响。

#### 参考文献

[1] 陈学俊,陈听宽. 锅炉原理. 北京:机械工业出版社,1987年.  
 [2] 姜义道,李永兴,刘明仁. 四角切圆燃烧大容量电站锅炉切圆参数场偏置问题的研究. 动力工程,1994(5).

(复 编)

continuous on-line soot blowing. It can reduce the flue gas resistance by 100 - 400 Pa and lower the exhaust gas temperature by 5 ~ 10 °C. In addition to achieving significant economic benefits, the above unit enjoys a high potential for wide engineering applications. **Key words:** soot blowing, pulsed gas, air heater, computer-based monitoring

船用主锅炉的改进设计 = **Marine Main Boiler Improved Design** [刊, 中]/Chen Qinglong (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 41 ~ 42

A brief description is given of the marine main boilers currently manufactured in the People's Republic of China. Based on the analysis of some difficult issues involved in an improved design the author has proposed a new design scheme for academic discussion. **Key words:** marine main boiler, improved design, scheme

在不同工况下 300 MW 锅炉过热器, 再热器的特性试验研究 = **Experimental Study of the Boiler Superheater and Reheater Characteristics of a 300 MW Unit under Various Operating Conditions** [刊, 中]/Xin Zhiming, Wu Luchen, Liu Hengyu (Harbin Boiler Co. Ltd.), et al // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 43 ~ 46

Through the tests of a boiler under steady and dynamic operating conditions a comprehensive analysis is conducted of the wall temperature profiles of a superheater and reheater at various operating conditions. The suggestions given in the present paper can be helpful for solving overheating problems of the superheater and reheater. **Key words:** superheater, reheater, wall temperature characteristics

近流线数值计算方法在四角切圆燃烧炉膛中的应用 = **Application of Quasi-streamline Numerical Simulation Method for a Boiler Furnace with Tangential Firing** [刊, 中]/Zhang Ze, Wu Shaohua, Qin Yukun (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 47 ~ 49

A numerical simulation method incorporating a composite coordinates grid system, strong non-uniform staggered grid arrangement and a staggered calculation mode was described in this paper. This method has been employed for the first time to perform a detailed computation of the three-dimensional flow field characteristics of a large-sized boiler furnace. The latter features a tangential firing mode with the use of burner nozzles of a sophisticated construction. Because of this, the false diffusion problem in the calculation domain caused by a relatively large included angle between a resultant speed direction and grid line one has been solved relatively well. Furthermore, a comparison with industrial test results shows that the numerical simulation method can quite accurately reflect the flow field characteristics in a boiler furnace combustion zone. A quasi-streamline numerical simulation is thus effectively realized. **Key words:** numerical simulation, false diffusion, quasi-streamline method, tangential firing

链条炉排的分层模型 = **Zoned Model for a Chain Grate** [刊, 中]/Zhu Jinrong (Nanjing Electrical Power Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 50 ~ 51

After the establishment of a mathematical zoned model for a chain grate some turbulence simulation tests were conducted. The test results were in full agreement with theoretical ones. The model can reflect the effect of air distribution on combustion results. **Key words:** boiler, chain grate, air distribution on a zone-by-zone basis, mathematical model

空冷塔内外流场的数值分析 = **Numerical Analysis of the Inner and Outer Flow Field of an Air-cooling Tower** [刊, 中]/Zhang Xiaodong, Zheng Yonggang, Wang Qingzhao (North China Electrical Power University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 52 ~ 54

With the use of a numerical simulation method the performance of a natural draft air-cooling tower working in a cross-wind has been investigated. By consulting the Heller type air-cooling system employed at Fengzhen Power Plant in Inner Mongolia an analysis was conducted of a specific calculation example. The analytical calculation results bring forth a perfor-