

600 MW 超临界锅炉微油点火试验研究

孙公钢¹，方毅波²，曲成刚²，杜志华²，池作和¹

(1. 中国计量学院，杭州 310018; 2. 杭州浙大天元科技有限公司，杭州 310007)

摘要：对某 600MW 超临界锅炉采用微油点火技术在冷炉启动过程中，炉内燃烧状况、汽温、汽压变化、受热面壁温变化等进行了详细的试验研究。试验结果表明：微油点火燃烧器在煤粉浓度很大的变化范围（0.2~0.6 kg 煤/kg 空气）内均可使煤粉稳定充分地燃烧，飞灰含碳量小于 30%，飞灰中挥发分含量小于 5%。锅炉受热面没有超温现象，水冷壁整体膨胀均匀，机组升温升压速率在规程允许范围内，燃烧器壁温始终保持在 300℃ 以下。微油点火改造取得的经济效益显著。

关键词：能源与动力工程；超临界锅炉；冷炉启动；微油点火；技术改造；经济性分析

火力发电厂燃煤机组传统点火方式需耗用大量燃油。据统计，一台 600MW 锅炉机组每次停炉后启动用油量约为 300 吨，按每年停炉 3 次计算，则其启动耗油约为 900 吨^[1]。虽然目前许多电厂采取了节油措施，但锅炉启动耗油量仍然很大。

微油点火技术可以大幅度降低机组启动油耗，与传统采用大油枪启动方式相比，可取得 90% 以上的节油效果。本文在介绍微油点火技术原理的基础上，对某台 600 MW 超临界锅炉采用微油点火进行冷炉启动过程中，燃烧状况、煤粉燃烧特性、汽温、汽压变化、受热面壁温变化及锅炉整体热膨胀情况等进行了详细的试验研究，并对采用微油点火技术后点火经济性和安全性进行分析，供相关技术人员参考。

1 机组情况概述

某电厂 600 MW 机组系上海锅炉厂生产的超临界参数变压运行螺旋管圈直流炉，锅炉型号为 SG1910/25.4-M006/007。采用单炉膛、一次中间再热、四角切圆燃烧方式，为平衡通风、固态排渣、露天布置、全钢悬吊结构 II 型燃煤锅炉。设计和燃用煤质为烟煤。锅炉的主要设计参数及燃料特性见表 1 和表 2。

燃烧器设置 6 层煤粉喷嘴，一次风与二次风采用间隔布置方式。锅炉四角共装有 12 只柴油大油枪，用于锅炉的启动和低负荷稳燃，单只大油枪出力为 3575kg/h，全部投运可带 30% 负荷。制粉系统采用中速磨正压直吹式系统。

表 1 锅炉主要设计参数

名称	BMCR	BRL
过热蒸汽流量/t·h ⁻¹	1913	1812
过热器出口蒸汽压力/MPa	25.4	25.28
过热器出口蒸汽温度/℃	571	571
再热蒸汽流量/t·h ⁻¹	1581	1502
再热器进口蒸汽压力/MPa	4.38	4.17
再热器出口蒸汽压力/MPa	4.16	3.98
再热器进口蒸汽温度/℃	312	305
再热器出口蒸汽温度/℃	569	569
省煤器进口给水温度/℃	282	279

表 2 锅炉燃料特性

名称	设计煤种	实际使用煤质
收到基碳/%	58.04	

收到基氢/%	3.62	
收到基氧/%	9.94	
收到基氮/%	0.7	
收到基全硫/%	0.7	
收到基全水份/%	13	10.05
收到基灰份/%	14	23.97
干燥无灰基挥发分/%	35	34.02
收到基低位发热量/MJ·kg ⁻¹	21.96	20.35

2 微油点火原理介绍

微油点火技术是用微量的油（40kg/h—60kg/h），通过专门设计的燃烧器，利用能级放大原理，点燃大量的煤粉（12~15t/h），从而达到节省锅炉启动和低负荷稳燃用油的目的。

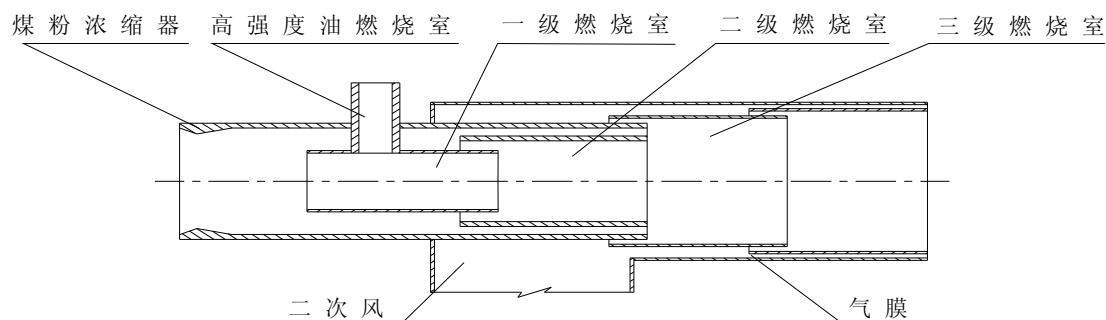


图1 微油冷态点火燃烧器结构示意图

图1为微油冷态点火燃烧器结构示意图。图中，一次风粉气流经过煤粉浓缩器时，产生中心浓缩，较高浓度的煤粉进入一级燃烧室，与高强度油燃烧室喷出的油火焰混合，煤粉颗粒受热、挥发析出、焦炭燃烧。

在煤质确定的情况下，煤粉浓度是煤粉气流着火特性最主要的影响因素，提高煤粉浓度有利于降低煤粉着火温度，提高煤粉燃烧效率。微油燃烧器设计中的煤粉浓缩装置可使进入一级燃烧室的煤粉具有较高的浓度，从而可以实现用微量的油先点燃一部分煤粉，然后再利用能量逐级放大的原理，最终点燃全部煤粉的目的。

考虑到煤粉在燃烧器中燃烧可能带来的烧损、结渣等问题的发生，微油燃烧器设计时采用气膜冷却风来使得燃烧器壁温在微油投用时能保持在安全允许范围之内，从而保证燃烧器能长期稳定的运行^[2]。

3 改造方案简介

根据煤质数据，结合微油改造经验，将B层一次风煤粉燃烧器改为微油点火燃烧器（见图2），高强度油燃烧室中微油油枪出力经计算设计为60kg/h。微油燃烧器的设计遵循下列一些重要原则：

(1) 微油燃烧器出口截面与原燃烧器基本相等。从而保证微油燃烧器出口动量与原燃烧器相等。(2) 煤粉浓缩器既要保证良好的浓缩效果（一级燃烧室煤粉浓度为平均煤粉浓度的2倍左右），又不能有很大的阻力。(3) 通过FLUENT计算，在燃烧器出口风速为25m/s时，微油燃烧器阻力为600Pa，与原燃烧器基本相当。(4) 由于采用中心浓缩，煤粉燃烧器NO_x排放量不增加。(5) 要考虑微油燃烧器的磨损，在微油枪的迎风面上加装陶瓷等耐磨材料。

对于直吹式系统，为了满足启动初期磨煤机起磨要求，解决磨煤机热风来源问题，故在磨煤机进口处冷热风混合前的冷风管道上增加一个暖风器，蒸汽来源为辅助蒸汽。图 3 为磨煤机暖风器加热系统图。暖风器的设计参数为：空气进、出口温度分别为 10℃和 180℃，设计空气流量 75t/h；暖风器自身重量约为 6.5t。

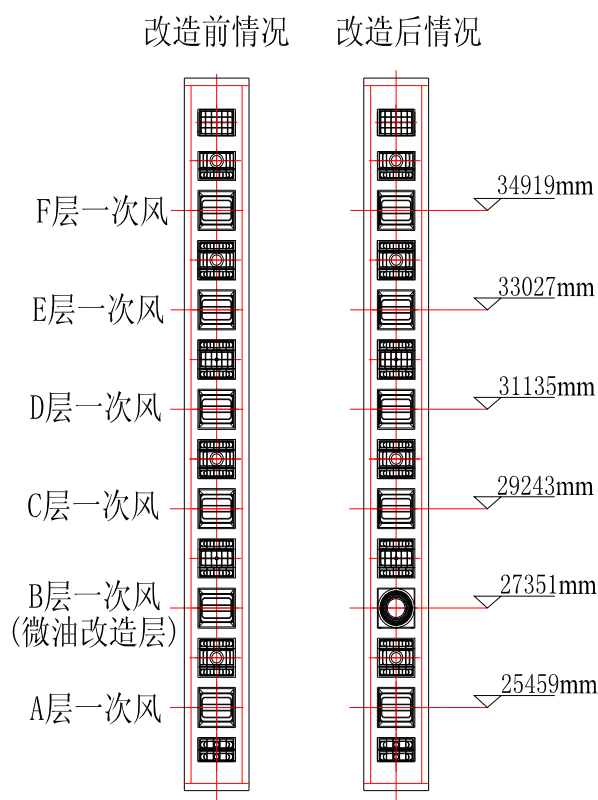


图 2 改造前后燃烧器布置图

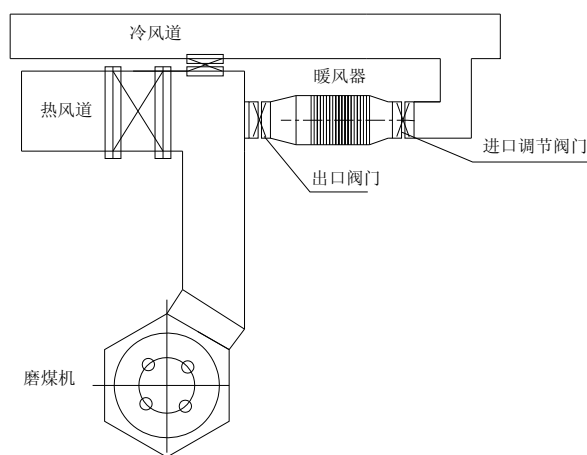


图 3 磨煤机暖风加热系统图

4 机组启动升温升压过程

本 600MW 超临界锅炉，在大修后的启动过程中因遇到一些设备上的问题，致使启动时间长达 92 小时。整个大修后的启动过程，全程使用微油点火。下面以消缺后的最后一次完整启动，说明微油点火过程中各参数的变化^[3]。

开启一次风风机，控制 B 磨通风量为 62 t/h 左右，打开 B 磨暖风器辅助蒸汽，将磨煤机入口风温加热到 160℃左右，该过程约需 15 分钟。投用给煤机，控制给煤量约 15t/h，磨煤机出口温度约

为 62℃。此时，四根微油枪已经点燃，并在一级燃烧室中形成一个高温的“火核”，当煤粉通过微油燃烧器时，煤粉被迅速引燃。现场观察，从微油燃烧器喷出的煤粉燃烧状况始终稳定，火焰明亮，炉膛煤火检信号显示有火，炉膛负压波动小。温度测量结果表明，燃烧器喷出火炬温度为 1050℃左右。图 4 为机组启动阶段磨煤机给煤量和通风量随时间的变化曲线。在启动初始阶段，煤粉浓度仅为 0.24 kg 煤/kg 空气。整个启动过程中，煤粉浓度在 0.2~0.6 kg 煤/kg 空气范围内变化（如图 5 所示）。说明微油点火燃烧器对煤粉浓度的变化具有很强的适应性。通过煤量的增减即可实现对机组升温升压速率的控制。

图 6 为锅炉启动期间每隔 2 小时取样分析得到的飞灰中含碳量和焦炭中挥发份含量随时间的变化曲线。由图可见，点火初期，在炉膛较冷状态下，飞灰含炭量较高，为 30%左右；随着炉膛温度不断升高，煤粉着火条件改善，飞灰中焦炭含量逐渐降低；而飞灰中挥发份含量始终在 0~3%范围内变化。从测试数据可以看到，煤粉具有良好的燃尽率，飞灰中的挥发份已经基本燃尽。由于焦炭的着火温度在 650℃—750℃之间，而尾部受热面的烟温比焦炭燃烧温度低，因而可以保证锅炉尾部受热面不会产生“二次燃烧”。

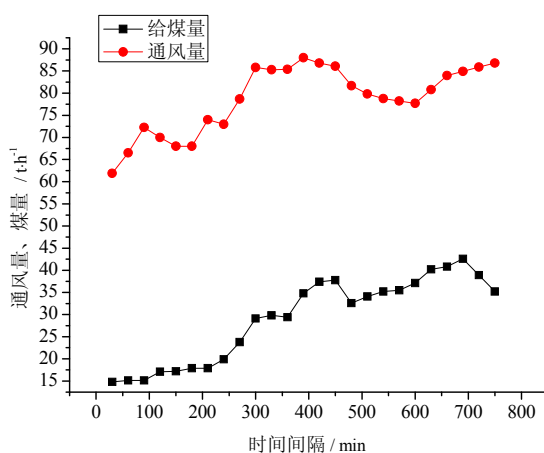


图 4 磨煤机给煤量和通风量随时间变化曲线

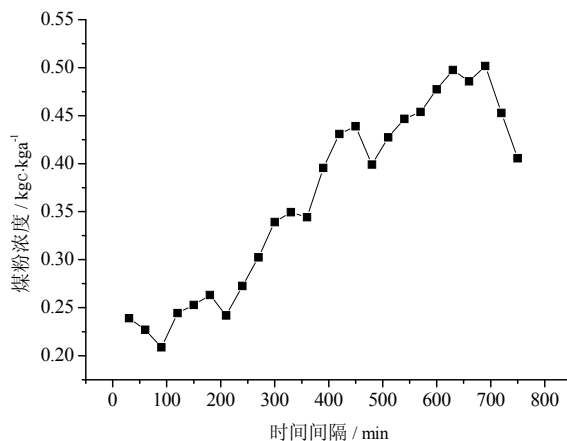


图 5 煤粉浓度随时间变化曲线

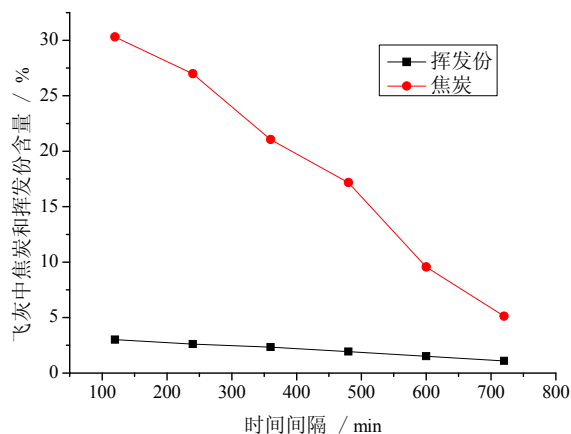


图 6 飞灰中碳和挥发份含量随时间变化曲线

微油燃烧器特有的气膜冷却风设计对燃烧器壁面可以起到非常好的冷却作用，防止了由于壁温超温可能带来的燃烧器烧损问题的发生；同时气膜风对壁面的吹扫减少了煤粉颗粒与壁面的接触，降低了燃烧器内部产生结渣的可能性。由图 7 可知，整个启炉阶段随着给粉量不断增加、负荷不断提高，锅炉每个角燃烧器的壁温不断升高，当单个燃烧器达到最大出力时，其壁温仍保持在 300℃ 以下，微油燃烧器运行安全稳定。

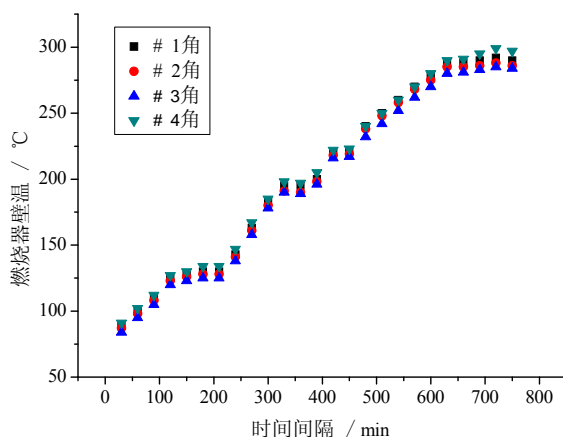


图 7 燃烧器壁温随时间变化曲线

图 8 为锅炉前墙、后墙及侧墙螺旋水冷壁出口金属平均温度随时间的变化曲线。由图可知，随着机组升温升压过程的进行，锅炉前墙、后墙及侧墙螺旋水冷壁出口金属平均温度随时间变化的趋势基本一致。同一时刻不同侧炉墙各螺旋水冷壁出口金属温度平均值大致相等，说明机组采用微油点火技术后，水冷壁受热比较均匀，锅炉升温升压速率平缓，不会造成因炉膛水冷壁膨胀不均匀而导致的螺旋水冷壁管焊口拉裂或张力板损坏等问题。

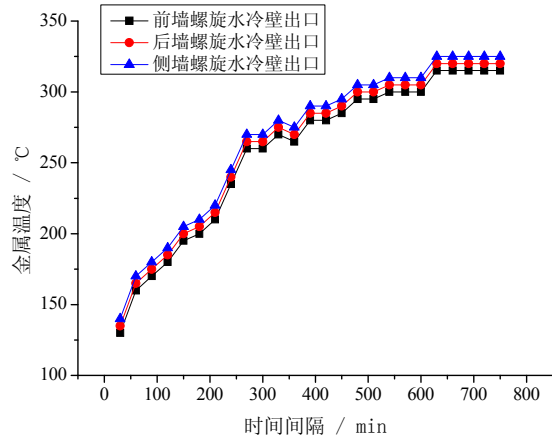


图 8 水冷壁螺旋管出口金属温度随时间变化曲线

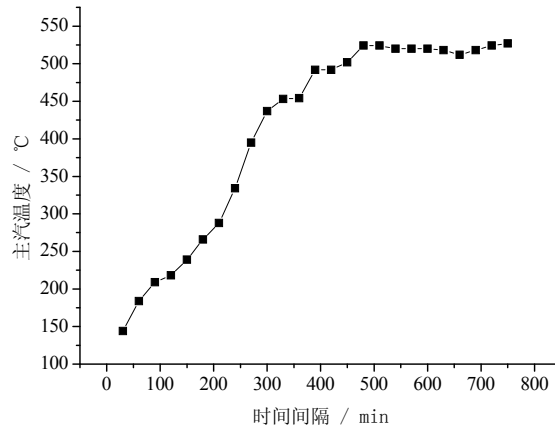


图 9 启动过程中主汽温度变化

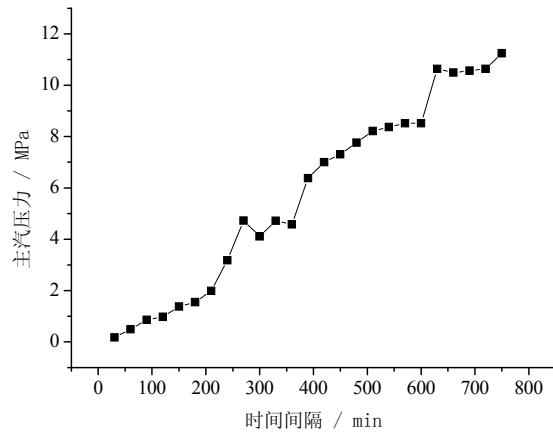


图 10 启动过程中主汽压力变化

图 9 和图 10 为微油点火过程中的升温、升压曲线。根据锅炉运行规程的规定，锅炉的升温速率每分钟不大于 1.5°C ，而升压速率应控制在 $0.05\sim 0.15\text{MPa}/\text{min}$ 之间。由图 9 可知，锅炉从完全冷态点火开始至机组达到 30% 负荷，微油点火退出运行为止，锅炉最大升温速率最大仅为 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，而机组升压速率始终保持在 $0.08\text{MPa}/\text{min}$ 以下。由此可见，当磨煤机的最小给煤量为 $15\text{t}/\text{h}$ 时，采用微油点火完全可以保证锅炉的升温、升压速率在允许的范围之内，且可以很方便地通过调整给煤量来保证锅炉的升温、升压。

图 11 为汽水分离器出口压力和高再出口压力变化。由于旁路的作用，高再的压力变化较主汽压力的变化比较缓慢。图 12 为点火过程分离器出口工质温度和高再出口工质温度变化。在分离器出口压力为 6.3MPa 时，工质对应此压力下的饱和温度应为 278℃，而此时分离器出口工质温度为 281℃，分离器出口工质有 3℃过热度。在冷炉点火初期，燃料的发热量主要用于加热给水，水冷壁产生的蒸汽流量较小，而为了保证水冷壁的质量流速，采用带循环泵的启动系统，大量的工质在启动系统中进行循环。由于产生的蒸汽量小，蒸汽在过热器在点火初期升温速率较快。

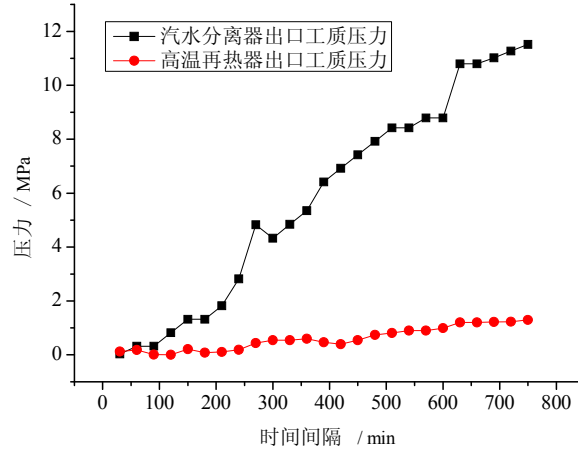


图 11 微油点火升压曲线

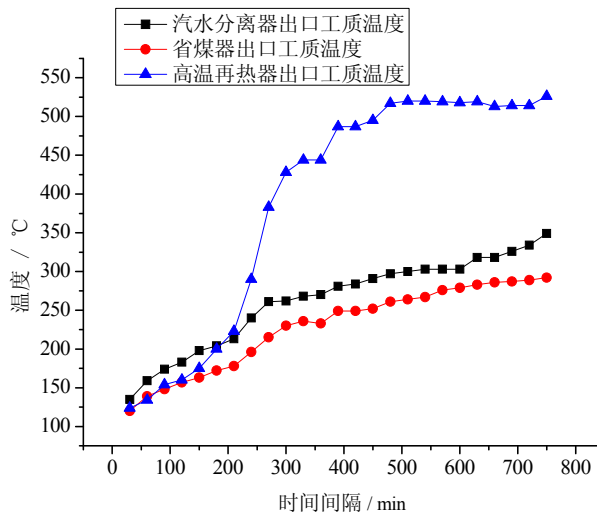


图 12 微油点火升温曲线

通过对上述锅炉启动过程中参数变化曲线的描述，可以看出锅炉经过微油点火技术改造后，机组升温、升压曲线与锅炉规程规定的升温、升压曲线吻合较好，锅炉启炉时的升温升压速率均在规程允许的范围之内，不会因升温升压速率过快导致热应力过大，影响机组安全运行。

5 微油点火改造前后经济性分析

本次机组经微油技术改造后，点火启动过程全程使用微油点火，未投用大油枪系统助燃；但是由于机组遇到一些其它设备上的问题，致使启动时间比较长，整个过程共历时 92 小时。每只大油枪的出力为 3575kg/h，微油枪平均出力为 60kg/h，共节省燃油量 1293.52t（见表 3）。由于以煤代油燃烧，煤的热值为 20350kJ/kg，煤的燃烧率按 80% 计算，则点火时消耗煤量 3321t，0# 柴油和燃煤分别按 5500 元/t、650 元/t 价格计算，则此次点火过程与采用传统大油枪点火启炉方式相比，节省资金约 495 万元，经济和社会效益十分显著。

表 3 微油点火方式与传统点火方式经济性比较

	油枪出力 /kg·h ⁻¹	油枪 个数 /只	投运 时间 /h	用油量 /t	节约 用油 /t	节约率/%
微油点火 方式	60	4	92	22.08		
传统点火 方式	3575	4	92	1315.6	1293.52	98.3

6 结论

(1)对于燃用烟煤的锅炉，微油点火燃烧器在煤粉浓度较大的变化范围内（0.2~0.6 kg/kg）内均可稳定充分地点燃煤粉，并取得了 98.3%的节油率。

(2)对于燃用烟煤锅炉，在冷炉点火初期，由于炉膛较冷，导致飞灰含碳量较高，为 30%左右；随着炉膛温度不断升高，煤粉着火条件改善，飞灰含碳量逐渐降低；而飞灰中挥发份含量始终在 0%~3%范围内变化，说明微油点火技术具有较高的煤粉燃尽率，只要设计合理，可以确保锅炉尾部受热面不会产生“二次燃烧”现象。

(3)微油点火燃烧器壁温在整个启炉阶段始终保持在 300℃以下，运行安全可靠，说明特殊设计的气膜风所提供的冷却、吹扫作用可有效防止燃烧器烧损、结渣问题的产生。

(4)对于超临界机组，采用微油点火技术水冷壁点火期间吸热较为均匀，不会引起因热偏差因产生的管子过热、承重机构受损等问题。

(5)启炉阶段主蒸汽升温速率最大仅为 1℃/min，升压速率始终在 0.08 MPa/min 以下，均在规程允许范围之内。

(6)本次微油改造点火启动过程全程使用微油点火，未投用大油枪助燃；此次点火过程与采用传统大油枪点火启炉方式相比，节约用油约 1294t，节省资金约 495 万元，具有良好的社会和经济效益。

参考文献

- [1] 池作和,孙公钢. 微油点火燃烧器一级燃烧室结构数值模拟研究[J]. 热力发电, 2007, 11: 20-24.
- [2] 池作和. 燃用劣质煤电站锅炉低负荷稳燃、防结渣及减轻烟温偏差研究[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.
- [3] 杭州浙大天元科技有限公司. 600MW 微油点火技术改造调试报告[Z]. 内部资料, 2008.

Experimental Investigation on a 600 MW Supercritical Boiler With the Technology of Oil-saving Ignition

SUN Gong-gang 1, FANG Yi-bo 2, DU Zhi-hua 2, CHI Zuo-he 1

(1. China Jiliang University, Hangzhou 310018;

2. Hangzhou Zheda Tianyuan Science & Technology Co.ltd, Hangzhou 310007)

ABSTRACT: Experimental studies were carried out on a 600 MW supercritical boiler that was ignited by the technology of oil-saving ignition. The combustion status, variation of steam temperature and pressure, and wall temperature of heat exchange surfaces were investigated. Test results demonstrated that the pulverized coal is able to be combusted fully and stably in the oil-saving ignition combustor, at a wide range of pulverized coal concentration from 0.2 to 0.6 kg/kg, and the wall temperature of the combustor remains less than 300 °C. It was also shown that the wall temperature of heat exchange surfaces is also not overheated, which expands uniformly, and the rising rate of the steam temperature satisfies the requirement of operation rules. In addition, compared to the cases using conventional ignition techniques, the economical benefit by employing the technology of oil-saving ignition is pronounced.

KEY WORDS: energy and power engineering; supercritical boiler; cold starting; oil-saving ignition; technical retrofit; economical analysis

作者简介:

孙公钢（1981-），西安交通大学在读博士研究生，中国计量学院能源工程研究所讲师，从事电站锅炉低污染燃烧和气固多相流测量等方面的研究和教学。

E-mail: gonggang_sun@cjl.edu.cn

联系电话：13758134900

地址：浙江省杭州市下沙高教园区中国计量学院热能工程系

邮编：310018