

优秀科技论文集 (1990 ~ 1995)

河南电力试验研究所

一九九六年·郑州

前 言

科学技术是人类知识宝库中的核心组成部分,是生产力向前发展的动力,是第一生产力,是现代物质文明和精神文明的源泉。科学技术的进步迅速地改变着社会生产方式和生活方式,也改变着人类的思想方法和人类自身。人类认识世界能力的每一步提高都依赖于科学技术的进步。历史和现实都表明,人类所创造的财富中,科学技术的含量越来越高。

“八五”期间,我所广大科技人员紧密结合电力系统的生产实际开展科研工作,取得了丰硕的成果。经过提炼和总结,在国际、国内刊物上和学术会议上发表了大量的优秀文章,激励了广大职工的科研兴趣和工作热情。

为了总结与宣传我所科技人员在科技工作中做出的成绩,激发我所职工开展科学研究的积极性,活跃学术气氛,今年3月份我所举行了优秀科技论文评选活动。经所评委会评审,从提交给所里的130余篇科技文章中,共评出102篇优秀论文,其中一等优秀论文18篇,二等优秀论文38篇,三等优秀论文46篇。为便于交流,现将部分优秀论文汇编成册。

在论文汇编过程中,得到了论文作者和有关单位的支持与帮助,在此谨表谢意。

论文集编委会

1996年4月

编 辑 委 员 会

主 任： 刘毓珣

副 主 任： 李向荣 李成儒

委 员： 陈贻守 陈玉斌 周 宏

郑维邦 杨汝周 李冠华

孙 宁 李庆渝 阎安民

刘 煜 李 青 张丽琛

责任编辑： 阎安民 刘 煜

封面设计： 胡传杰

目 次

·热能动力工程·

国产首台 670t/h 调峰锅炉调峰性能试验研究	李冠华 贺鸿等(1)
200MW 调峰锅炉的性能试验研究	江得厚(9)
首阳山电厂 670t/h 调峰锅炉汽包寿命损耗在线监测系统	王春玉(18)
鹤壁火电厂 2 号锅炉 2 号制粉系统调整试验	刘奎玉 马林强等(24)
ZD—CBΦ3100 轴向型粗粉分离器性能试验研究	 刘奎玉 李冠华 陶云翼等(29)
670t/h 调峰锅炉汽包寿命损耗在线监测启停指导系统	江得厚 林洪书(36)
国内近期投产大型汽轮发电机组振动故障综述	袁立平 谭士森(38)
汽轮机动静部件磨损原因分析和防治措施	荆柏林 马欣生等(43)
汽轮发电机振动故障预警定量数据	谭士森(46)
提高 20 万 kW 汽轮机回热系统效率的研究与改进	马欣生等(51)
转子联轴器对轮松动缺陷的测试分析与诊断	袁立平(53)
200MW 汽轮机组中压缸启动及实践	荆柏林(58)
国产 200MW 汽轮机主油泵入口油压跌落原因及改进	周志平(62)
汽轮机振动故障危险分析和现场决策	谭士森(67)
推理流程图技术用于汽轮发电机振动故障诊断	谭士森(73)
中压缸启动和滑压运行的实践与认识	姚新杰 孙 宁(79)
郑州热电厂 4 号机组振动的处理和试验研究	袁立平 陈吉明等(87)
汽轮机转子弯曲原因分析与监测诊断	袁立平 罗剑斌(91)
T2A.300.30.2F1044 型机组动态特性试验研究	周志平 黄雅罗(95)
Z 厂汽轮机转子轴弯曲与直轴工艺控制	罗剑斌 袁立平 谭士森(99)
电动机和励磁机异常振动问题的诊断与处理	罗剑斌等(106)
发电厂旋转机械轴承振动测量的探讨	谭士森等(112)
汽轮机节能技术研究与实践	马欣生 荆柏林 卢允谦(118)

·金属学和金属工艺·

焦作电厂 1、2 号炉主蒸汽管道带裂纹状缺陷运行可靠性试验研究	 秦鸿义等(128)
---------------------------------------	-----------------

小管径对接焊缝超声波探伤方法的研究及应用	汪 毅 王传玉 董银成(136)
用超声波衍射法判定表面开口裂纹的深度	董银成 王传玉 徐根生(139)
电厂主蒸汽管道碳化物二次相分离试验简介	薛金来(142)
670t/h、1000t/h 锅炉过热器联箱管座爆破原因分析	秦鸿义(146)
SG-1000-170-555/555 型锅炉主蒸汽管流量法兰断裂事故分析	秦鸿义(151)
汽轮机转子中心孔现场用打磨设备	董银成等(158)

·电机电器和高电压工程·

用 PSPICE 建立的 GTO 模型	朱庆翔 黄超峰(160)
低气压对玻璃板表面污闪电压的影响	黄超峰等(166)
河南电网污区划分及实施的几个问题	杨源龙 孙守信(171)
220kV 电力变压器进行中性点局部放电试验的必要性	华盘勇(174)
信阳平桥电厂 8 号机组无功摆动的原因分析及其消除	尤儒臣等(178)
防止负序电流烧损发电机的有效措施	尤儒臣 陈其亮(182)
绝缘油电阻率与油介损关系的探讨	王志萍 沈芑(187)
同步发电机全相全压异步启动的计算与分析	李保炎(189)
河南 500kV 电网断路器合闸电阻取舍的研究	陈守聚 张 科(196)
变频谐振装置耐压试验等效性研究	郑维邦等(202)
河南电网三年防污工作回顾与展望	杨源龙 孙守信(205)
河南电网近年来外绝缘污闪情况分析	杨源龙 孙守信(210)
郑州变电站 500kV 单相自耦变压器现场局部放电试验	华盘勇(215)
焦作电厂双分裂变压器事故的调查分析	华盘勇(220)
QFS-125-2 型汽轮发电机定子绕组绝缘击穿的原因	尤儒臣等(224)
用测量绝缘表面电位寻找电机绝缘缺陷和漏水部位	李银贵 尤儒臣(228)
检测运行高压电气设备过热隐患的研究	张国庆 杨源龙 刘跃凯(232)
高压电器设备接头过热判定标准的研究	张国庆 刘跃凯等(236)
调峰汽轮发电机转子绕组滑移层的应用与介绍	李保炎等(214)
铁磁谐振的新型消谐方法	陈守聚(246)
地电位在 500kV 调试测量中的影响	陈守聚(248)
一种简单易行的系统电容电流测量方法—人工不平衡法	陈守聚(250)

发电机—变压器组 220kV 断路器非全相运行事故分析与防止 郭子仁 孙新良 高 航(254)

安阳供电局司空变电站 1 号主变压器放电性故障部位查找 郭子仁 刘毓珣 吕志民等(257)

鼠笼式异步电动机断条状况和断条检测仪的研制 卢献国 赵 勇(262)

大型汽轮发电机组的磁化及退磁 卢献国(266)

·输配电工程、电力网及电力系统·

对与三峡电站相适应的火电补偿容量在华中电网合理分布的探讨 张立庆 周 宏 李向荣 刘遵义(270)

郑州 500KV 变电站静止无功补偿装置滤波器线圈过热分析处理 杨红旗 何南强 周 宏(277)

ASVG 用于改善河南电网稳定性的应用研究 ... 刘遵义 李向荣 刘毓珣(283)

电力负荷特性在线测辨—实验室及现场试验 李向荣 陈栋新等(291)

郑州 500kV 变电站静止无功补偿装置在线诊断及参数辨识 周 宏 何南强 杨红旗等(298)

无串联电抗器时电容器组追加投入涌流的计算方法 陈栋新 何南强 李向荣(305)

电网频率特性和负荷频率反馈 df/dt 的研究 王合贞 李向荣 陈栋新等(309)

ZK—1 型变电站电压无功综合自动控制装置 李西志 刘遵义等(320)

河南电网 220kV 变电站并联电容器组接线方式的试验研究 李向荣 何南强 陈栋新等(325)

电容器组串联电抗器 王合贞(344)

电力系统谐波阻抗计算 刘遵义 李向荣 何南强(350)

·电厂化学与环境保护·

炉水协调 PH—磷酸盐处理监控系统的研究与应用 邱武斌 李炳军 杨汝周等(355)

火电厂浓缩池溢流灰水回收利用技术的研究 李黔龙 吴文龙等(359)

丹河电厂 2 号机低压缸腐蚀原因分析研究 刘新霞 冯 宾(364)

高压汽包炉炉水处理方式的改进 杨汝周(369)

国产变压器油用于进口 500kV 变压器的研究 王少俊(374)

HDS—10 复合高效水质稳定剂配合石灰沉淀处理循环水	沈景润(377)
弱酸阳离子交换处理许昌市热电厂循环水的实践	沈景润(383)
用水烟气混合物消除碳酸钙垢	李黔龙 周雅南(388)
新型除氧剂二甲基酮肟的推广应用	刘新霞 冯 宾等(391)
混合水 PH 值预测计算方法的探讨——平衡常数求解法	刘 煜(395)
水库富营养化的发展与电厂温排水	刘 煜(403)
河南省火电厂的节水问题	杨汝周(409)
意大利变压器油的老化性能研究与评价	王少俊(413)
对运行中少油量电气设备绝缘油的常规检验周期和检验项目的几点看法	王少俊等(417)
运行中支柱式 SF ₆ 断路器气体含水量分布初探	王少俊(421)
首阳山电厂化学水处理设计浅评	沈景润(425)
冷原子荧光法测汞的最佳工作条件选择	吴文龙(427)
粉煤灰在废水处理中的应用	吴文龙 何凤鸣(432)
关于除尘器出口每小时标准干烟气量计算方法的讨论	刘 煜(435)
对电厂工程环境影响评价中若干问题的探讨	刘 煜(440)
关于水库中污染物随时间逐步累积的定量计算方法	刘 煜(446)
·电子、电测及继电保护等·	
一种适合于分散式测控系统的通讯控制器	王长亮 廖祥光 张江南(451)
识别相互接触和部分遮挡工件的结构化方法	王长亮等(454)
电力文图编辑系统	裴纯彦等(458)
35kV 三相电流互感器的现场校验	张家梁(461)
郑州变电站 500kV 主变励磁涌流、差动保护的有关特性分析及谐波对保护的影响	韩 平 李春林(464)
一种新颖的 5000 伏级高压高阻电桥装置	李耿和 袁茂奎(469)
提高火电机组移交水平的思路	范毓初 姚新杰 孙 宁(475)
一种新型 FP—1 数字式精密工频相位频率计	潘 辉 李耿和 张世昌(482)
发电机负序电流与 I _{2t} 微机检测装置	李庆渝 张 永(485)
对电测量仪表检定装置防止静电、漏电干扰屏蔽措施探讨	张 强(490)

国产首台 670t/h 调峰锅炉调峰性能试验研究

李冠华 贺 鸿 朱占发* 周鄂庭*

(带* 号者为外单位作者, 下同)

〔摘要〕首阳山电厂 200MW 机组锅炉 (DG670/13.73-9 型) 是我国首次设计制造的调峰锅炉。文章介绍了调峰锅炉调峰性能试验及低负荷运行的情况, 并提出评价与建议, 为国产调峰机组的设计制造与运行提供参考。

〔关键词〕电站锅炉 调峰性能 试验研究

近年来, 随着国民经济的迅速发展, 我国电网的用电结构发生了显著变化, 电网峰谷差日益增大, 就河南电网来说, 已达电网最高负荷的 30% 以上。为此, 势必要求大容量火电机组参与调峰, 以扩大电网的调峰能力。

首阳山电厂一期工程两台 200MW 机组系东方锅炉厂与东方汽轮机厂的产品。是我国首次设计制造的带中间负荷的调峰机组, 分别于 1988 年 3 月和 1989 年元月正式投产。投运以来, 经过多方努力, 机组运行状况日渐完善。为了验证机组的调峰性能, 为今后调峰机组的设计制造及运行提供参考, 根据原能源部和机电部的要求, 河南电力试验研究所、首阳山电厂、东方锅炉厂等共同在 #1 机组进行试验。

锅炉调峰性能试验于 1991 年 7~9 月进行, 共计完成了冷态空气动力场试验、预备性试验、燃烧调整试验、负荷特性试验、低负荷试验、负荷变速率试验及最大

连续蒸发量试验。

通过试验以及低负荷运行实践表明, 在 200~100MW 负荷范围内锅炉运行可靠, 燃烧稳定, 能达到设计要求; 额定蒸发量能达到 670t/h; 试验中, 机组负荷为 200MW 时锅炉燃用混煤的热效率为 91.17%, 超过燃用义马煤的设计值 90.55%。

1 锅炉特性

1.1 设备概况

锅炉为 DG670/13.73-9 型, 其设计参数为: 额定蒸发量 670t/h, 主蒸汽压力 13.73MPa, 主蒸汽温度 540℃, 再热蒸汽进/出口压力 2.50/2.30MPa, 再热蒸汽进/出口 317/540℃, 再热蒸汽流量 587t/h, 给水温度 245℃, 排烟温度 157.5℃, 热效率 90.43%。设计煤种为河南义马长焰煤, 其特性列于表 1。

表 1 锅炉设计煤质特性表

名称	Car %	Har %	Oar %	Nar %	Sar %	Aar %	Mar %	Vdaf %	Q _{dw, ar} kJ/kg	K _{km}	DT ℃	ST ℃	FT ℃
数值	37.21	3.05	12.65	0.44	2.65	33.0	11.0	40.0	14654	1.35	1240	1290	1320

锅炉呈 Π 形露天布置, 固态排渣, 平衡通风。炉膛上部和水平烟道及后竖井中布置过热器和再热器, 过热器和再热器均

采用喷水减温。锅炉尾部是上、下级管式空气预热器和省煤器, 一、二次空气分开独立预热并将尾部分成位于前侧的二次空

气烟道和位于后侧的一次空气烟道。制粉系统采用冷一次风机正压直吹式，中速磨煤机（ZQM-216型）6台，燃烧器正四角布置，切圆燃烧，每角燃烧器分成上、中、下3组，四个角同一标高层上的一次风喷口连接一台磨煤机。

1.2 设计特点

该炉是按定-滑-定复合变压运行方式设计的调峰机组，其速率曲线示于图1。

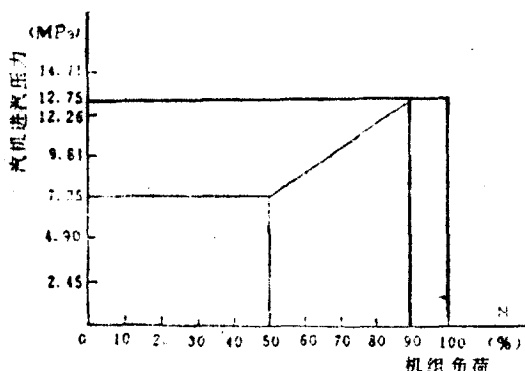


图1 机组复合运行模式

其中，100%~90%机组负荷为定压运行方式，其速率 $<5\%/min$ 。

90%~50%机组负荷为滑压运行方式。90%~70%机组负荷时其速率为 $3\%/min$ ，70%~50%时为 $2\%/min$ 。

50%机组负荷以下为定压运行方式。

机组整机寿命20万h，调峰低谷每年600次，热态启动每年100次，冷态启动每年10次，甩负荷带厂用电每年0.2次。整机冷态启动8h，热态启动（缸温 $400^{\circ}C$ ）2h。

考虑到设计煤种具有较强的结焦性，将燃烧器分3组布置，并且选用较低的断面热负荷、炉膛容积热负荷和炉膛出口烟温。

2 试验情况与结果分析

试验期间，高压加热器能正常投入，

给水温度为 $219.4\sim 240.0^{\circ}C$ ，保证了试验对给水温度值的要求。^{#2}磨煤机在试验前因故障而停用，影响了磨煤机投用方式的排列组合。锅炉设计燃用纯义马煤，但是投产以来，在180MW以上负荷时锅炉容易结焦，因此，试验期间仍燃用混煤（义马煤矿的千秋、常村、北露天、耿村、杨村等五个矿区的煤加部分小窑煤），其煤质特性及其与设计煤种的比较见表2。

表2 试验燃煤与设计煤种的比较

项 目	S_{ar} %	M_{ar} %	A_{ar} %	V_{daf} %	α_{netar} kJ/kg
试验 燃煤	0.65~ 1.57	11.71~ 13.30	21.58~ 29.95	36.32~ 40.42	16823~ 19263
设计 煤种	2.65	11.0	33.0	40	14654

2.1 预备性试验与燃烧调整试验

试验在常用负荷下（182.6~185.4MW）进行。

2.1.1 煤粉细度

试验中，制粉系统未进行调整，各磨煤机出口煤粉细度偏粗，且不够均匀，^{#3}磨尤甚， R_{90} 达30%~33.6%。影响了运行经济性。

2.1.2 送风量

预备性试验中测得炉膛出口过剩空气系数为1.11，锅炉燃烧处于缺氧状态。其原因是送风机配有喘振联锁保护装置，保护定值偏小，限制了风机出力，导致供风不足。

2.1.3 过热器区域结焦

从预备性试验及以往运行中锅炉燃用耿村、杨村等个别矿区义马煤的实践看，当锅炉处于长期高负荷运行时，高温过热器区域多次严重结焦。最严重时，由于复合硫酸盐高温腐蚀造成高过管子外表面金属严重耗损。究其原因，一是缺乏必要的混煤设备，不能保证掺烧比例，二是在运

行上缺乏必要的监视调整手段, 三是炉膛吹灰器未投。另外, 缺氧燃烧也是结焦的重要原因之一。

2.1.4 燃烧调整试验

经过二次风配风均匀性调整, 炉内空气动力工况趋于合理, 运行状况得到改善。飞灰含碳量从调整前的 6.17% 降到 3.48%, 锅炉热效率由 89.48% 提高到 91.15%。

2.2 负荷特性试验

在机组 200MW、180MW、160MW、140MW 四个负荷工况下, 进行了负荷特性试验。

2.2.1 燃烧工况

在上述负荷变化范围内, 均维持四台磨运行, 即投入四层共 16 只火嘴。当改变负荷时, 通过调节各磨煤机的给煤量以适应负荷变化的要求, 毋需切除或投入火嘴。试验期间, 炉膛负压波动小, 燃烧器区域炉膛平均温度均在 1420℃ 以上, 燃烧是稳定的。

如上所述, 锅炉在较高负荷下缺风。当负荷大于 160MW 时, 实测低过后烟气含氧量为 1.93%~2.80%, 炉膛出口过量空气系数为 1.10~1.15, 炉内缺氧燃烧; 当负荷小于 160MW 时, 随着负荷下降, 氧量显著增大, 炉膛出口过量空气系数为 1.28~1.33, 风量充足。

2.2.2 过热汽温和再热汽温变化情况

在上述负荷变化范围内, 过热汽温和再热汽温大多可维持在 535℃ 左右。且甲乙侧偏差甚小, 能够满足安全运行之要求。

2.2.3 水循环的安全性

在整个试验负荷范围内, 炉膛四角隅处水冷壁管的循环水速在 1.00~1.49m/s 之间波动, 最小值亦远大于推荐的最低安全流速 0.4m/s。这表明, 水循环无倒

流、停滞现象, 是安全的。

2.2.4 锅炉热效率

排烟温度的实测值接近设计值。电负荷 200MW 时, 锅炉热效率为 91.17%, 超过燃用纯义马煤的设计值 90.55%。锅炉热效率与电负荷的关系曲线示于图 2。由图 2 可见, 当机组 160~180MW 负荷时, 锅炉热效率最高达 91.15%~91.32%。

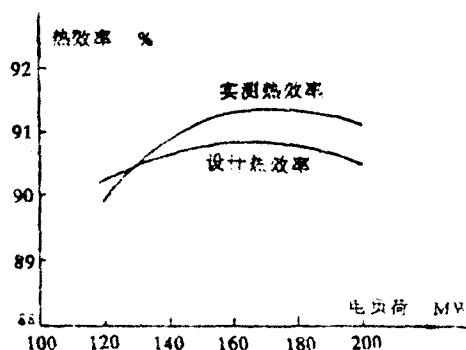


图 2 热效率与电负荷关系曲线

2.3 低负荷试验

由于辅机设备和系统的种种问题, 低负荷试验时投四台磨运行 (设计工况下应投运三台磨), 共进行两次 120MW 低负荷试验。

2.3.1 低负荷下炉内燃烧稳定性

炉内燃烧器区域平均温度为 1412~1421℃, 比 200MW 负荷时仅低 50℃ 左右; 温度分布较均匀, 燃烧稳定。在低负荷下, 锅炉连续运行 5 小时, 炉内温度变化不大, 各参数也在正常范围内波动。

试验中, 低温过热器后氧量维持在 6%~8%, 炉膛出口过量空气系数为 1.46~1.54, 与设计值相比, 风量偏大。

炉膛负压稳定, 可维持在 -20~-30Pa。

2.3.2 水循环的安全性

在试验工况下, 最低循环流速为 0.80m/s, 大于推荐的最低安全水速

0.4m/s。水循环是安全的。

2.3.3 低负荷运行的经济性

低负荷下，送风量偏大，尽管排烟温度比高负荷时有所降低，综合评价，仍使得排烟热损失增大，锅炉热效率随之下降，在试验工况 123MW 时，其值为 89.73%~90.21%，略低于相应的设计值（120MW 负荷锅炉设计热效率 90.25%）。可以推断，若适当减少送风量，则能进一步提高锅炉低负荷运行的经济性。

2.3.4 烟气酸露点与低温腐蚀

空气预热器结露和腐蚀，是限定最低稳定负荷的条件之一，低负荷（123MW）试验中，低过后氧量为 6.64%~7.33%，根据测量与计算，烟气的酸露点约为 52℃。空预器的最低计算壁温分别为 58.1℃、55.4℃，接近于烟气酸露点，可能产生低温腐蚀。考虑到煤质和运行工况变化，应投入热风再循环。

2.3.5 低负荷运行时制粉系统存在的问题

该炉原设计在 120MW 负荷运行时，投入三台磨煤机。但因原煤仓落煤斗结构设计欠佳，经常堵煤，造成磨煤机来煤中断；其次，锅炉自动点火装置因故无法投入，一旦灭火，不能及时恢复，因此，为防止磨煤机中断引起炉膛灭火，确保机组安全运行，在低负荷运行时，只好投用四台磨煤机。

这样每台磨的给煤量相对减小，一次风量相对偏大，这对锅炉稳燃有些不利；加之磨煤机入口冷，热风门不易调整，造成磨煤机出口风温过高，⁵磨出口风温曾达到 124℃。磨煤机入口风门存在缺陷，必须就地操作调节风温，大大增加了运行人员的工作量和劳动强度；而且，缺乏必要混煤手段，若调整不当或不及时，便有引起制粉系统发生爆炸的危险。

磨煤机出口分离器挡板调节不灵，无法调整煤粉细度，这将影响到机组运行的安全性和经济性。

2.4 负荷变速率试验

按照机组复合变压运行方式（参见图 2），电负荷 200~180MW 为定压运行阶段。由于汽机调节阀不易控制，因此，进行该项试验时按滑压方式升降负荷。

本试验中采用了以下两种燃烧系统的调节方式：

a. 给煤量调节。通过改变给煤机的转速来实现。

b. 给煤量与一次风量同时调节。

表 3 负荷变速率试验一览表

试验序号	负荷变化幅度 MW	平均变负荷速率 %/min
1	183 ↓ 147	1.9
2	200 ↓ 180	1.9
	180 ↓ 140	2.1
3	142.5 ↑ 196	2.23
4	202 ↓ 180	6.6
	180 ↓ 132	2.6
5	142 ↑ 180	5.18
	180 ↑ 205	8.52

实际共进行以下 5 次试验（见表 3）。

该炉配备中速磨煤机冷一次风机正压直吹式制粉系统，且在试验中几乎所有的自动控制系统都无法正常投入，负荷变化率难以控制。

试验数据示于表 4。试验动态过程特性曲线示于图 3、图 4。

2.4.1 汽包壁温

汽包是锅炉最大最厚的高温高压厚壁部件。对其壁温变化率及上下壁温差、内外壁温差的限制，是决定负荷变化速率的重要因素。试验中汽包壁温差与电负荷、汽包压力的关系见图 5。

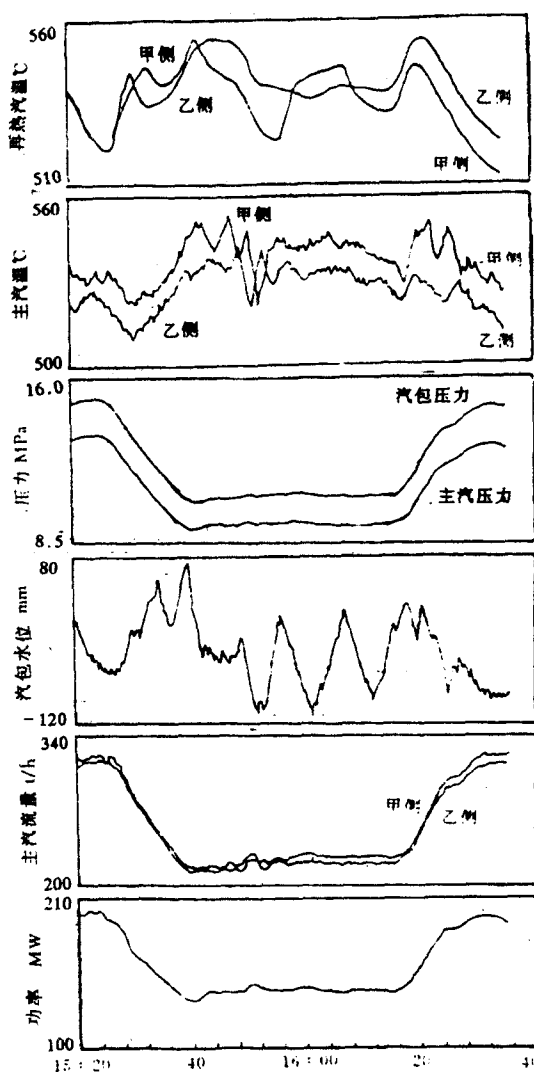


图3 第2、3次变负荷试验曲线

试验数据表明，测得的汽包上下壁温差均小于 40°C ，最大为 28.88°C （其中内壁上下温差尤低，均在 6.24°C 以内）。实测上部、下部内外壁温差最大值分别为 23.78°C 、 29.23°C ，其值均在制造厂“50% 负荷调峰运行允许温差曲线”的安全区内，满足要求。

汽包壁温的变化是由汽包内工质温度变化引起的。制造厂为保证汽包在使用期限内的寿命，规定升温速度为 $2^{\circ}\text{C} / \text{min}$ 。

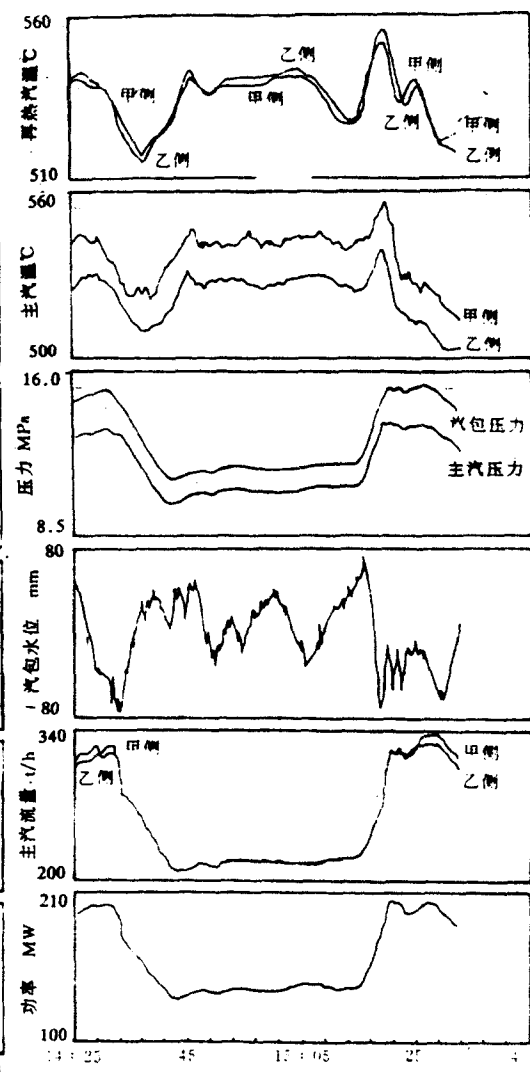


图4 第4、5次变负荷试验曲线

图5示出了本次试验的饱和温度的变化情况，其平均变化率参见表4，在负荷变化的三个阶段分别为 $0.5^{\circ}\text{C} / \text{min}$ 、 $-1.7^{\circ}\text{C} / \text{min}$ 、 $-2.4^{\circ}\text{C} / \text{min}$ ，瞬时最大值达 $6.8^{\circ}\text{C} / \text{min}$ 。造成饱和温度变化率较大的主要原因是采用了滑压运行方式，汽包压力变化幅度较大相应使汽包内工质饱和温度变化幅度也较大；加之手动操作升降负荷，变化速率难以控制，使得汽包内工质温度变化率较大。

表 4 锅炉负荷变速率试验综合表

名称 \ 数 值 \ 试验序号		3	4	
负荷变化幅度, MW		142.5↑ 196	202↓ 180	180↓ 132
实际平均变负荷速率, %/min		2.23	6.6	2.6
汽温变化范围	主汽温, ℃	520.12~546.57	517.87~530.66	512.37~531.19
	再热汽温, ℃	517.73~553.12	527.63~538.10	514.31~530.47
汽包	外壁上下最大温差, ℃	28.88	21.72	23.14
	内壁上下最大温差, ℃	3.57	-1.56	6.24
	上部内外壁最大温差, ℃	20.02	10.79	-11.73
	下部内外壁最大温差, ℃	29.23	21.55	17.50
	饱和温度变化率, ℃/min	0.5	-1.7	-2.4
大屏出口管最高壁温, ℃		480.47	432.48	435.17
后屏出口管最高壁温, ℃		567.30	508.31	504.41
高过炉外管最高壁温, ℃		557.16	540.87	532.13
高再炉外管最高壁温, ℃		559.41	549.81	542.02
高过出口集箱最高壁温, ℃		543.10	548.08	543.78
高再出口集箱最高壁温, ℃		550.94	547.72	545.49

反过来, 汽包内工质温度的变化, 必然反映在壁温的变化上, 图 6 所示为汽包壁温在试验中的变化情况。由此图可以看出, 汽包的内壁温度在负荷变化范围内与工质温度有着相似变化规律; 而外壁温度的变化趋势与工质温度基本一致, 幅度却平缓得多。这样就造成了上下壁温差较小, 内外壁温差较大。

2.4.2 汽温情况

在负荷变化中, 汽温不易控制, 波动较大。当负荷从 202MW 降至 132MW, 主汽温在 512.37℃~531.19℃ 之间波动, 再热汽温在 514.31℃~538.10℃ 之间波

动; 负荷从 142.5MW 升至 196MW, 主汽温与再热汽温的变化范围分别为 520.12~546.57℃、517.73~553.12℃。由于汽温自动调节装置无法投入等原因。升负荷过程中出现了瞬时超温现象。

2.4.3 过热器与再热器管壁温度

试验中管壁温度的最大值见表 4, 除高过出口集箱外, 均发生在 142.5MW 升至 196MW 的过程中。集箱最高壁温 550.90℃, 在允许范围内; 受热面管子壁温, 后屏部分出口管、高过与高再个别炉外管存在瞬时超温, 其余正常。超温原因亦是汽温自动调节装置无法投入, 手动调

温滞后于负荷变化。

2.4.4 汽包水位与蒸汽品质

负荷变化，会引起汽包水位波动，尤其该炉的自动给水调节装置不能投入，手

动操作使得水位波动幅度增大。试验中的水位情况见图 3、图 4。

过热蒸汽品质， SO_2 含量在 $17\mu\text{g/L}$ 以内，小于规程规定值。

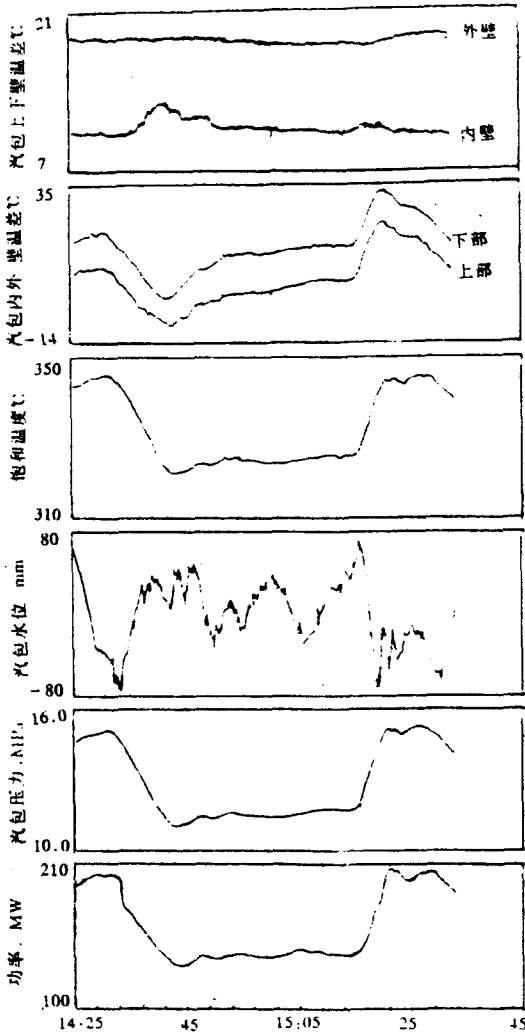


图 5 汽包壁温差与电负荷、汽包压力关系曲线

2.4.5 水循环的安全性

试验中连续监测了水冷壁管内工质流速。结果表明，负荷变速率试验中水循环速度波动很小，且都大于 1.0m/s ，水循环是安全的。

2.5 锅炉最大连续蒸发量试验

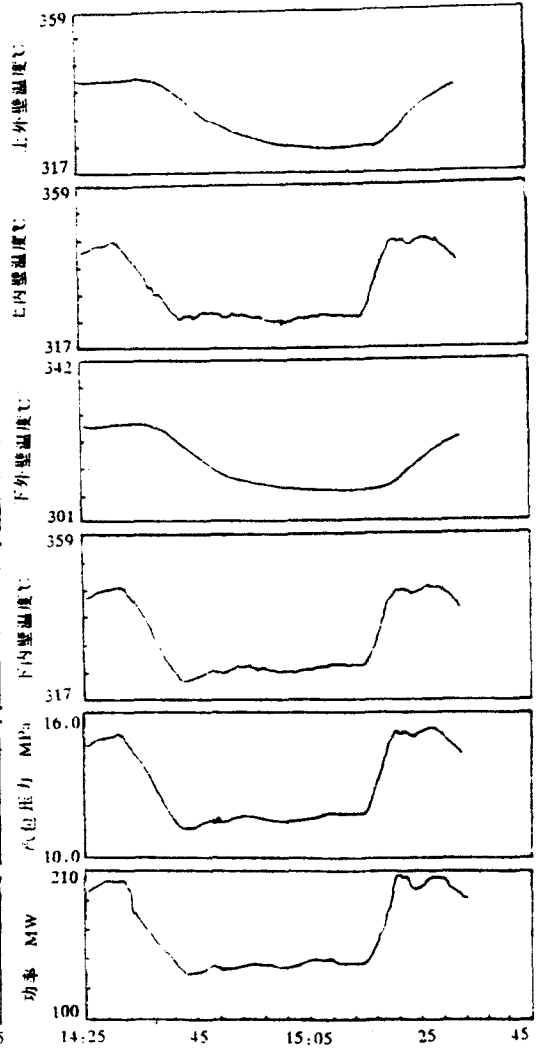


图 6 汽包壁温变化情况

在旁路系统不能投用的情况下要实现此项试验是很难的。在采取了过热器短时空排汽、维持调节级后汽压和略降低凝汽器真空度等措施后实现了锅炉 683t/h 负荷运行。

最大蒸发量试验时，锅炉燃烧稳定，主

汽参数均在允许值内波动, 电功率维持在 205~210MW 之间, 锅炉平均连续蒸发量为 683t/h, 水循环安全可靠 (循环水速均大于 1.2m/s), 此时, 锅炉热效率为 90.26%。

3 锅炉低负荷运行情况

1993 年 11 月 22, #2 炉甲炉吸风机因轴承损坏而停用, 乙侧吸风机单独运行, 负荷被迫降至 100MW。当时, 锅炉燃用混煤 (义马煤加部分小窑煤), 制粉系

统处于设计状态投三台磨运行, 不投油助燃连续维持低负荷长达 10h 左右。主要运行参数见表 5。

在低负荷 100MW 左右运行时, 炉膛负压波动小, 燃烧稳定, 汽温汽压符合要求, 且制粉系统运行正常, 磨煤机出口温度未超限。同时, 汽机汽缸膨胀及高、中、低缸胀差没有明显变化, 均处于允许范围, 高压加热器正常投入, 用除氧器汽源供给汽封用汽可以满足要求。

表 5 锅炉低负荷运行主要参数汇总表

名称	电负荷 MW	主蒸汽			再热汽		给水温度 ℃	炉膛负压 × 10Pa	排烟温度 ℃
		流量 (甲/乙) t/h	压力 (甲/乙) MPa	温度 (甲/乙) ℃	压力 (甲/乙) MPa	温度 (甲/乙) ℃			
数值	102	154/167	8.8/8.8	538/537	0.97/0.97	535/543	220	-3	140

4 结论及建议

(1) 首阳山电厂的运行实践和 #1 炉性能试验结果表明, 作为我国首次设计的 200MW 调峰机组的锅炉在设计上基本成功, 具有一定的调峰能力, 在 200~100MW 范围内锅炉运行可靠, 燃烧稳定, 主要参数与出力基本达到设计值。试验期间, 锅炉燃用混煤 (义马煤加部分小窑煤), 经测定, 电负荷在 200MW 时锅炉热效率为 91.17%, 超过燃用纯义马煤的设计值 (90.55%); 当电负荷为 160~180MW 时, 锅炉热效率最高, 其值为 91.15%~91.32%。

(2) 试验期间, 锅炉的不投油稳燃负荷做到 120MW, 在该负荷下燃烧稳定、水循环可靠。由于种种原因, 更低负荷试验未能进行。

(3) 负荷变化速率控制在 3%/min 以内锅炉是安全的。在调节手段完善的条件下, 负荷按此速率变化是可行的。

(4) 该型锅炉能达到额定蒸发量 670t/h, 蒸汽参数符合设计要求, 锅炉热效率为 90.26%。

(5) 主汽温与再热汽温难以控制。由于减温水调节阀漏流, 汽温自动装置无法投入, 且再热器减温系统存在问题, 减温水量偏低, 使汽温波动较大, 尤其在变工况时, 容易出现超温。应完善减温系统, 提高自动装置的可靠性。

(6) 制粉系统长期存在原煤落煤斗堵煤问题, 易造成磨煤机来煤中断; 由于磨煤机入口冷、热风门不易调整, 造成磨煤机出口温度偏高, 应设法解决。另外, 试验中 #3 磨煤机粗粉分离器调整困难, R_{90}

(下转第 17 页)

200MW 调峰锅炉的性能试验研究

江得厚

〔摘要〕介绍了首阳山电厂一期工程 $2 \times 200\text{MW}$ 带中间负荷调峰机组的设计特点和调峰性能试验情况。试验结果表明：主机运行可靠稳定，具有一定调峰能力，各主要参数及出力基本达到设计值，因此认为 200MW 调峰机组设计是成功的。

〔关键词〕 200MW 调峰锅炉 性能 试验 复合变压运行

随着国民经济的发展，电力系统用电结构发生变化，电力系统调峰问题更加突出，因此安装具有灵活性、适应性的可靠调峰机组尤为重要。首阳山电厂一期工程 $2 \times 200\text{MW}$ 火电机组就是我国首次设计制造的带中间负荷的调峰机组。为验证该机组调峰性能，河南电力试验研究所、首阳山电厂、东方锅炉厂、东方汽轮机厂共同对首阳山电厂 1 号机组进行了调峰性能试验。

1 中间负荷调峰机组应具有的特性及可能的运行方式

根据国内外调峰技术研究的结果，认为带中间负荷的机组在调峰中要具备以下特性：（1）有良好的启停特性，启动损耗小，运行可靠，热应力及寿命损耗小。（2）燃煤锅炉在不投油情况下有很好的低负荷运行性能。（3）有快速变负荷能力。（4）有较满意的低负荷经济性，在调峰过程有较高的热效率。

一般来说，低谷时间小于 5 小时采用 50% 低负荷调峰方式较好，低谷时间在 5 ~ 10 小时宜用少汽无负荷调峰方式。国产 200MW 和 300MW 机组热态启动时间较长，辅机不适于频繁启停，而且两班制涉

及很多安全问题，除非负荷低谷时间大于 11 小时，否则不宜采用两班制调峰运行方式。

由于变压运行的优点较多，是大容量火电机组技术发展的趋势，因此，首阳山电厂决定机炉设计时按变压运行方式，全变压运行方式对电网负荷变化反应迟缓，难以满足电网调频要求，所以机组设计时按复合变压运行方式（见图 1）。

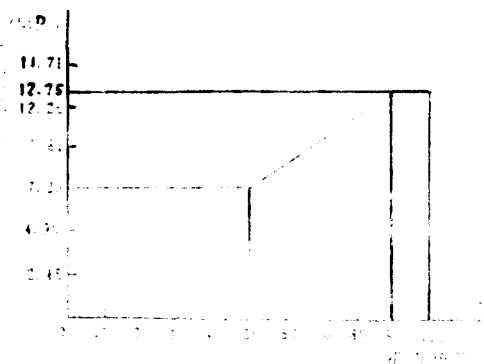


图 1 机组复合运行模式

2 复合变压运行机组调峰性能指标要求

2.1 机组最低负荷确定

低负荷时炉膛燃烧强度低、燃烧不稳，特别是煤质不稳定，对着火和稳燃都不利。低负荷时水循环会恶化，因此在设

计时应对水循环考核计算, 同时要考虑个别过热器管壁超温过热和造成过热器、再热器汽温偏差。由于排烟温度低、烟气流速低, 在低负荷时还要考虑避免一次风管堵粉。

由于考虑到低负荷运行的经济性和上述各种因素, 机组最低负荷定为额定负荷的 50% 为宜。

2.2 负荷变化率的确定

由于采用变压运行方式, 负荷变化率主要取决于锅炉方面的限制因素:

(1) 汽包上下壁温差是限制机组负荷变动的关键, 降低汽包上下壁温差才能提高负荷变化率, 减少附加应力。

(2) 主蒸汽压力随负荷变化, 汽包内的饱和水汽温度随之相应变化, 温度变化率过快将对汽包产生低周疲劳损伤, 根据国内几个单位所作的试验研究和计算, 汽包温度变化率控制在 $2\text{C}/\text{min}$ 是安全的。

(3) 负荷变化过快, 将引起过热和再热汽温大幅度波动或超温、低温引起两侧汽温偏差大, 还会引起汽包水位大幅度波动, 影响汽水品质。另外, 负荷变化率还要考虑到主蒸汽管道、联箱等厚壁无件的温度变化率限制。

经过综合考虑, 负荷升降率确定定压段为 $5\%/ \text{min}$; 复合变压运行段为 $3\%/ \text{min}$ 。

2.3 机组整机寿命的确定

机组整机寿命为 200kh, 调峰低谷每年 600 次, 热态启动每年 100 次, 冷态启动每年 10 次, 甩负荷带厂用电每年 0.2 次。整机冷态启动 8h, 整机热态启动 (缸温 400C) 2h。

2.4 复合变压运行低负荷调峰对自动控制及仪表的影响

在变压运行时, 汽水特性随负荷而变化, 调节对象的动态特性不同负荷和压力

下有所不同, 因此, 调节器的整定参数要能跟踪调整, 水位表及流量表要能自动修正和补偿。

3 锅炉本体的设计特点

东方锅炉厂针对机组调峰的要求, 考虑到自然循环锅炉调峰有一定局限性, 又燃用易结焦的义马煤的不利因素, 设计制造时采取了必要的技术措施。

3.1 燃料特性

设计燃料为河南义马烟煤, 其发热值低、灰份大、氧份高、挥发份高、灰熔点低、属于劣质烟煤;

3.2 制粉系统

采用 6 台 ZQM-216 型中速磨正压直吹系统, 并采用冷一次风机。由于义马煤水份高, 影响磨煤机出力, 为此用约 320C 的热空气作干燥剂。

3.3 锅炉本体

为适应带中间同荷运行, 锅炉为 II 型; 四角切圆燃烧; 炉膛上部布满屏式过热器; 采用管式空气预热器, 双级布置。

(1) 汽包。为减少循环应力, 筒体壁厚为 90mm, 材质 BHW35 钢板。汽包允许的温度变化速率为 $169.8\text{C}/\text{h}$, 在变压运行时, 能够满足 $3\%/ \text{min}$ 负荷变化速度的要求。

(2) 炉膛。为解决义马煤结焦问题, 并考虑到适应低负荷运行, 在炉膛设计时, 主要采用如下技术措施: 适当扩大炉膛断面, 降低炉膛截面热负荷; 提高炉膛高度, 降低炉膛容积热负荷和出口烟温; 炉膛采用全焊膜式水冷壁结构; 加大火嘴到冷灰斗拐角和屏底的距离。

(3) 燃烧器。燃烧器结构和布置的设计, 既要解决炉膛的结焦问题, 也要解决低负荷稳燃问题。燃烧器四角布置, 正反