DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2019.10.009

超超临界直流炉给水控制策略研究与设计

Research and design of feedwater control strategy for an ultra-supercritical once-through boiler

辛志波
XIN Zhibo

（西安热工研究院有限公司，西安　710054）
（Xi'an Thermal Power Research Institute Company Limited, Xi'an 710054, China）

摘　要：以安徽某发电公司超超临界直流炉为研究对象，在机组启动调试过程中，深度优化给水控制策略，使其满足各种工况下机组所需给水量。在机组稳态、动态负荷及辅机故障快速减负荷（RB）工况下，验证优化后的给水控制策略的稳定性。工程实践表明，该控制策略满足该发电公司 1 000 MW 机组安全稳定运行时的给水量，可为其他同类机组给水系统的调试及优化调整提供借鉴。

关键词：给水控制；直流炉；超超临界；RB；水煤比；焓值控制
中图分类号：TK 32　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1674-1951(2019)10-0039-05

Abstract: Taking an ultra supercritical once through boiler in an Anhui power company as research object, the feed water control strategy during the commissioning of the unit was optimized to meet the demand of water supply under different operating conditions. The stability of the optimized feed water control strategy was verified under steady state, dynamic variable load and Run back (RB) conditions. The control strategy meets the requirement of water supply in the safe and stable operation of the Anhui power company. It can be used as reference for the debugging and optimizing adjustment of feed water system of other 1 000 MW ultra supercritical once-through boilers.

Keywords: feedwater control; once-through boiler; ultra supercritical; RB; water-coal ratio; enthalpy control

1　设备概述

安徽某发电公司六期工程锅炉采用超超临界参数变压运行螺旋管圈直流炉，一次中间再热、单炉膛单切圆燃烧、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构塔式布置。锅炉为上海锅炉厂有限公司引进 Alstom Power 公司 Boiler Gmbh 的技术生产的 SG-3100/27.9-M540 型锅炉，最小直流负荷为 30% 锅炉最大连续蒸发量（BMCR），本体系统配 30% BMCR 容量的启动循环泵。锅炉采用直吹式制粉系统，每台锅炉配置 6 台中速磨煤机，BMCR 工况时，5 台投运，1 台备用。汽轮机为上海汽轮机有限公司和德国 SIEMENS 公司联合设计制造的超超临界、一次中间再热、单轴、四缸四排汽、双背压、九级回热抽汽、反动凝汽式、N1000-27/600/600 型汽轮机，采用高、中压缸分缸布置，高压缸为单流型，中压缸和低压缸均为双流型。给水系统设计 2 台 50% BMCR 容量的汽动给水泵（以下简称汽泵），无电动给水泵。机组分散控制系统（DCS）采用 Ovation 3.5.0 系统。

锅炉启动调试过程中，根据现场实际情况设计给水控制策略，策略须满足各种工况下机组的给水量，并在机组稳态、升/降负荷过程中进行验证。

2　给水控制系统简介

直流炉不同于汽包炉，没有固定的汽水分界面。进入锅炉后，给水的加热、蒸发和水蒸气的过热都是在受热面上连续进行的，不需要在加热中途进行汽水分离，因此直流炉没有自然循环锅炉的汽包[1]。但是在锅炉启动初期，系统参数未达到要求时，直流炉通过启动分离器将汽水分开，工作原理类似于汽包，此时锅炉以湿态方式运行；随着负荷和燃料量的增加，分离器储水箱液位和锅炉循环水流量逐渐减少，当燃料量增加且锅炉达到最小流量时，进入分离器的工质全部是蒸汽，此时锅炉以干态方式运行[2]。

本工程启动系统配有锅炉启动循环泵，与自然

收稿日期：2019-03-06；**修回日期**：2019-04-09

循环锅炉相比,其金属水冷壁的储热量和工质的储热量较少,使蒸发系统的热惯性减小。锅炉先启动炉水循环泵建立水循环,然后再点火,使水冷壁吸热均匀、温差减小、保持同步膨胀。循环泵创造了有利的启动条件,允许适当加快燃料投入速度,减少了锅炉启动时间,并节省启动燃料。

本工程干、湿态转换的条件为给水流量 > 最小给水流量(1 056 t/h)且锅炉主控输出 > 270 MW,延时 180 s,锅炉转为干态运行。当直流锅炉运行在干态模式时,汽轮机调节阀阀位、燃料量和给水流量的改变都会引起锅炉内部汽水分界面的改变,最终导致过热器出口主蒸汽(以下简称为主汽)温度大幅度变化。研究表明,燃料量或给水流量扰动时,汽水行程中各点工质焓值的动态特性曲线形状相似,而且越接近汽水行程的入口,惯性和滞后就越小。因此无论是采用煤跟水的控制还是采用水跟煤的控制都是取微过热蒸汽的焓值(或汽温)作为反映水煤比是否合适的标志[3]。通过焓值控制对给水流量实时修正,使水煤比始终在合理的运行范围内,确保机组安全、稳定运行。该机组给水系统如图 1 所示。

3　给水控制难点

直流锅炉是一个典型的多变量、强耦合、非线性的系统。它的控制对象可简化为三输入、两输出的控制系统[3],即当给水流量、燃料量、汽轮机阀位指令(汽轮机蒸汽流量)任一发生变化,主汽压力和机组负荷都会发生改变。由于没有汽包作为缓冲,各输入、输出变量间的耦合性更强,机组在满足电网负荷要求的前提下要保证主汽温度不超温、主汽压力不超压,并在此基础上维持机炉间的能量快速平衡,给水控制显得尤为重要。

本工程给水系统设计了高压加热器(以下简称高加)出口给水流量及省煤器出口给水流量 2 个流量,有的机组只设计其中 1 个流量。高加出口给水流量包含过热器减温水和高压旁路(以下简称高旁)减温水流量,省煤器出口流量为锅炉实际给水流量。单从控制方面来讲,2 个流量均可作为给水控制策略的过程值,但两者在具体控制策略上略有不同。高加出口流量包含一级过热器减温水流量,当减温水流量增大后,流经水冷壁的给水流量必然减少,若不调整给水流量,则会导致水冷壁超温、主汽温度升高,严重影响机组稳定运行;除此之外,需考虑减温水流量测量误差,测量偏差会导致主汽温度的控制效果变差。省煤器出口给水流量不包含减温水流量且全部流经水冷壁,这样有助于控制主汽温度,但不利于控制主汽压力。由于存在上述问题,给水流量的选择成为影响主汽温度及主汽压力控制的重要因素。

直流炉控制的核心就是水煤比[3],水煤比失调是导致主汽温异常的主要因素。水煤比变化 10% 将使过热汽温变化 80% 左右,严重影响机组的安全运行[4]。若通过改变给水流量控制主汽温度,存在较长时间的滞后;过热器减温水可以快速降低主汽温度,但减温水水量有限,仅能用作辅助减温。水煤比控制与锅炉主控相互耦合、相互影响,水煤比控制参数需整定合适,否则会导致机组协调控制不稳定。

4　给水控制策略

本工程给水采用“水跟煤”控制策略[2],此控制策略的优点为易控制主汽温度及水冷壁温度,可保

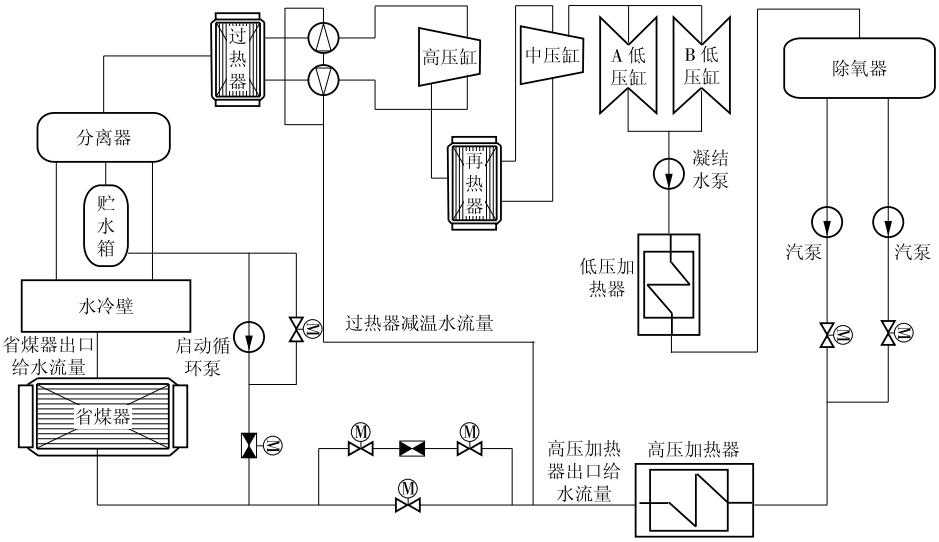

图 1　机组给水系统

Fig. 1　Water supply system in the unit

证机组运行过程中锅炉水冷壁不超温,使机组长期稳定、安全运行。选择一级过热器入口的焓值作为控制目标,使用焓值控制器的输出修正给水流量,保证机组水煤比稳定。正常运行时,焓值控制器输出应接近“0”,锅炉主控指令应近似且略高于机组负荷指令,利于动态变负荷。为防止锅炉水冷壁超温发生锅炉主燃烧跳闸(MFT),焓值控制设计超驰调节回路。当水冷壁出口集箱温度最大值大于分离器压力对应的温度 $f(x_3)$ 时超驰设定焓值,将焓值设定值设为分离器压力对应最小焓值($f(x_2)$) + 50 kJ/kg。水冷壁温度在正常范围内时,以 0.333 3 kJ/(kg · s)的速率柔性恢复到原焓值设定值上,过热器入口具体焓值设定逻辑如图 2 所示。

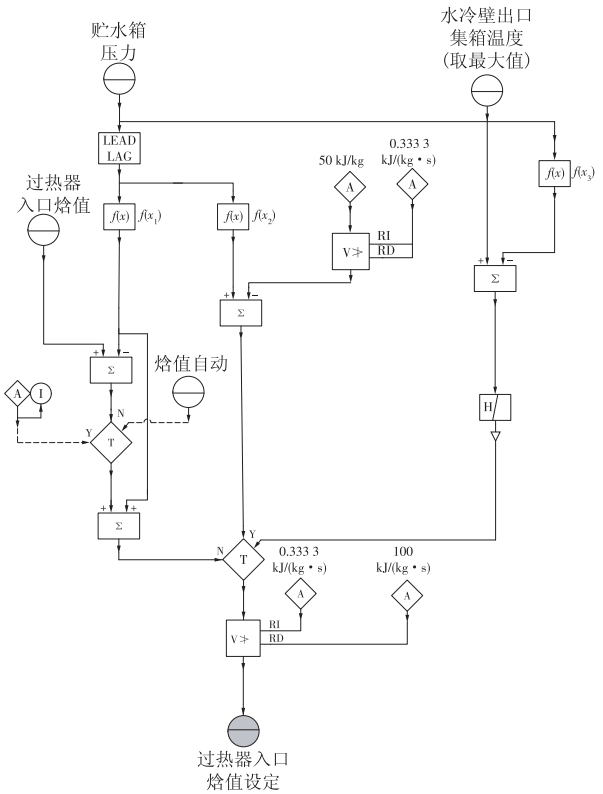

图 2　过热器入口焓值设定回路

Fig. 2　Enthalpy setting circuit at superheater inlet

锅炉湿态运行时,锅炉上水流量由启动循环泵出口流量和高加出口流量之和组成,高加出口流量由给水旁路调节阀调节。当锅炉转干态后,汽水分离器不再有汽水分离,给水流经水冷壁后全部转换为蒸汽。这时应将给水旁路切主路,停止启动循环泵,给水流量由 2 台汽泵控制,给水经过给水泵的压头依次通过预热器、蒸发器、过热器各受热面后变成过热蒸汽,最终进入汽轮机做功。

当锅炉转干态后,具体给水控制策略如图 3 所示,锅炉主控输出的负荷对应设计的给水流量作为锅炉主给水流量指令 $f(x_4)$,$f(x_4)$ 为根据现场调试的实际情况及锅炉厂的热力计算书得到的函数关系,见表 1。

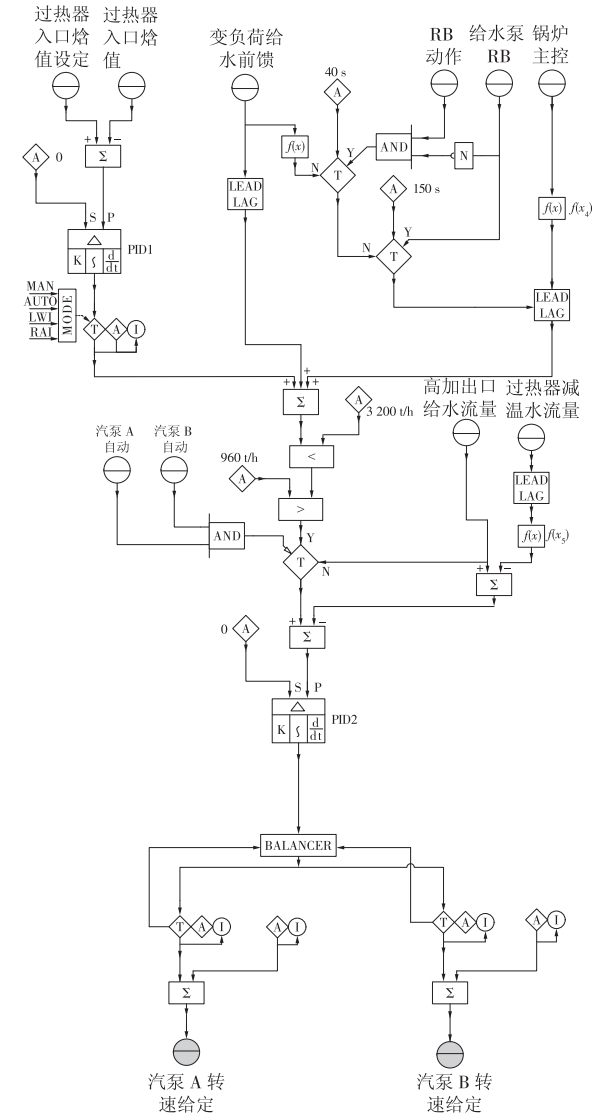

图 3　给水控制策略

Fig. 3　Feedwater control strategy

表 1　锅炉主控输出对应给水流量

Tab. 1　Feedwater flow corresponding to boiler main control outputs

锅炉主控输出/MW	给水流量设定/(t · h^{-1})	锅炉主控输出/MW	给水流量设定/(t · h^{-1})
0	1 020	700	1 890
300	1 020	750	2 020
400	1 270	900	2 420
500	1 420	1 000	2 700
600	1 635	1 050	2 840
650	1 760	1 200	3 150

水煤比控制采用一级过热器入口焓值作为控制目标,焓值控制输出叠加到主给水流量指令上,经过限幅后得到最终的给水流量指令。本工程给水流量过程值采用高加出口给水流量(包含减温水流量)。因其更易控制主汽压力,避免了由于减温水流量测

量不准导致的主汽压力波动。但采用此处给水流量也会带来一个缺点，当过热器减温水流量增加后流经水冷壁的给水流量相应减少，导致中间点温度波动，最终导致主蒸汽温度不稳定。为了避免此工况，在控制策略中增加了相应的控制逻辑，如图 3 中 $f(x_5)$ 所示。当过热器减温水流量大于 50 t/h 时，相应增加锅炉给水流量，具体修正情况根据现场调试决定，调试最终确定值见表 2。给水泵在故障快速减负荷（RB）工况时，给水主控设计一台汽泵跳闸，平衡回路会强制升另一台运行汽泵的转速，然后转为比例－积分－微分控制器（PID）调节，控制器输出分别控制 2 台汽泵转速。另外需注意 RB 工况时切换给水滞后时间，保证中间点温度在可控范围内，机组安全运行。

表 2　过热器减温水流量对给水流量的修正

Tab. 2　Modification of desuperheating water flow on feedwater flow　　t/h

过热器减温水流量	增加给水流量	过热器减温水流量	增加给水流量
0	0	200	40
50	0	300	60
100	20		

5　实际应用

控制策略修正完成之后进行负荷变动试验，验证该控制策略的正确性及稳定性。

5.1　减温水流量变化对系统影响

机组发电机额定功率为 1 000 MW，满负荷稳态运行，过热器减温水总流量变化为 50 t/h，给水流量稳定在 2 800 t/h，中间点温度变化 2 ℃，主汽压波动 0.1 MPa，具体参数变化过程如图 4 所示。由此变化过程可知，当过热器减温水流量（q_m = 50 ~ 220 t/h）增加后，通过修正高加出口实际给水流量，调整锅炉所需最终给水流量，使主汽温度（t = 500 ~ 600 ℃）及主汽压力（p = 10.0 ~ 30.0 MPa）稳定。实践表明，该控制策略减温水流量增加时，并不会导致其与总给水流量的比例失调，能够保证机组安全、稳定运行。

5.2　变负荷工况下的给水控制

机组负荷由 700 MW 升至 850 MW，具体参数变化过程如图 5 所示。负荷（P）变化幅度为 300 ~ 900 MW，机组负荷变化率 10 MW/min，动态主汽温度（t，500 ~ 700 ℃）最大偏差 8 ℃，动态主汽压力（p = 7.0 ~ 22.0 MPa）最大偏差 0.3 MPa，负荷最大偏差为 5.0 MW。图 5 中：h 为焓值，2 500 ~ 3 000 kJ/kg；q_{m1} 为减温水修正后高加出口流量，1 200 ~ 2 400 t/h；q_{m2} 为给水设定流量，1 200 ~ 2 400 t/h。

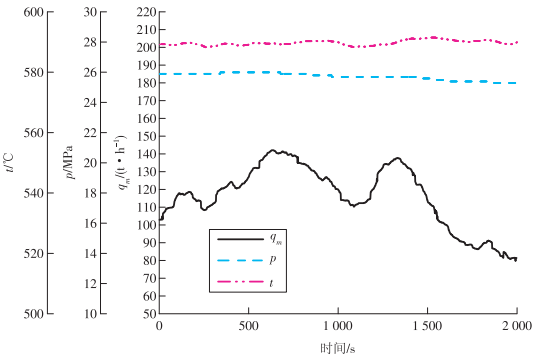

图 4　减温水流量变化时系统各参数变化趋势

Fig. 4　Trends of various parameters changing with the desuperheating water flow

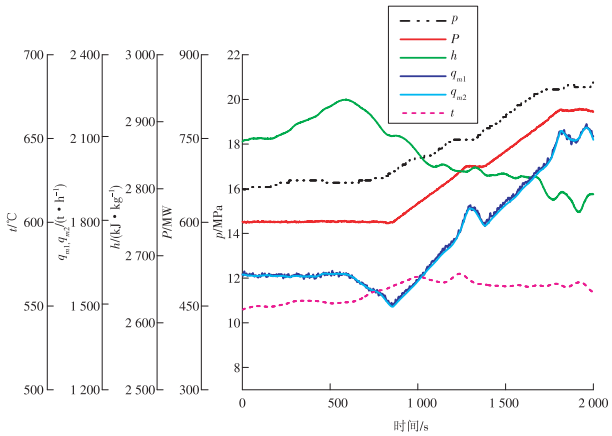

图 5　升负荷时各参数变化趋势

Fig. 5　Trends of various parameters during loading up

机组负荷由 800 MW 降至 600 MW，具体参数变化过程如图 6 所示。P 的变化幅度为 650 ~ 1 000 MW，机组负荷变化率 10 MW/min，动态主蒸汽温度（t = 500 ~ 700 ℃）最大偏差 7 ℃，动态主蒸汽压力（p = 12 ~ 24 MPa）的最大偏差 0.3 MPa，负荷最大偏差为 4.5 MW。图 6 中：h 为 2 400 ~ 3 000 kJ/kg；q_{m1}，为 1 500 ~ 2 700 t/h；q_{m2} 为 1 500 ~ 2 700 t/h。

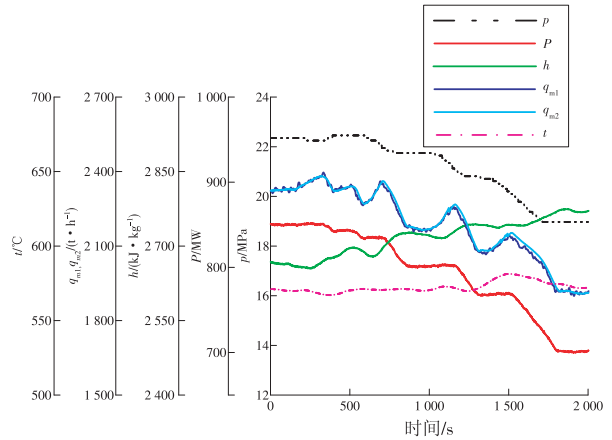

图 6　降负荷时各参数变化趋势

Fig. 6　Trends of various parameters during derating

由图4—5可知，变负荷工况下，主汽温度及主

汽压力的调节精度满足 DL/T 657—2015《火力发电厂模拟量控制系统验收测试规程》,本控制策略可保证机组快速、准确达到目标负荷,并在目标负荷安全运行。

5.3　辅机 RB 工况下的给水控制

机组负荷稳定在 900 MW,2 台给水泵运行,运行人员手动打闸 1 台小汽轮机,触发给水泵 RB 动作。分析整个过程,由于 RB 动作开始时快速切除磨组,炉膛压力有一定波动,但能快速恢复,说明锅炉烟风系统工况基本稳定;高加出口给水流量初期偏差大,但随着另一台给水泵转速增大,出力增加后逐渐恢复正常,给水指令按着预设的降速率下降,给水流量能快速调整到目标流量,各金属受热面无超温现象,其他各主要参数均可在安全范围内自动调节,给水控制满足要求,机组运行平稳。

6　结束语

根据现场实际情况,本工程选择高加出口给水流量作为机组给水控制的过程值,同时给水控制策略考虑机组减温水流量对过热器蒸汽温度影响,通过修正高加出口给水实际流量值,实时修正给水流量与减温水流量的比值,在机组主汽压力及主汽温度控制中取得了良好的控制效果;此外,为防止水冷壁超温锅炉 MFT 动作,设计给水焓值超驰调节回路;RB 动作时,改变给水设定滞后时间,防止水冷壁超温或主汽温度下降过快。该给水控制策略可满足机组在动态及稳态时的给水流量,能够保证机组正常、安全、稳定运行,并可为其他同类型机组的给水控制策略提供借鉴。

参考文献:

[1]樊泉桂,闫维平,闫顺林,等. 锅炉原理[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
[2]张雨飞. 超超临界火电机组热工控制技术[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
[3]赵志丹,高奎,陈志刚,等. 超超临界机组模拟量控制系统的调试及优化[M]. 北京:中国电力出版社,2016.
[4]李俊娇,赵伟华. 超临界 600 MW 机组给水控制策略[J]. 自动化应用,2015(4):67 – 68.

(本文责编:陆华)

作者简介:

辛志波(1989—),男,陕西西安人,工程师,工学硕士,从事新建火电机组分系统及整套启动调试方面的工作(E-mail:xinzhibo@ tpri. com. cn)。

(上接第 11 页)放均匀、氨逃逸率较低且空预器差压平稳等优点。

参考文献:

[1]罗志,牛国平,王晓冰,等. 分区混合动态喷氨技术工程应用[J]. 热力发电,2018,47(8):125 – 131.
[2]方明成,刘玉强,王润明,等. SCR 脱硝系统喷氨优化调整试验研究[J]. 华电技术,2018,40(9):61 – 65.
[3]梁俊杰,张战锋,周健,等. SCR 烟气脱硝系统运行全过程数据分析[J]. 热力发电,2018,47(12):93 – 99.
[4]周健,梁俊杰,黄飞,等. 应用 SCR 氨喷射技术解决空预器硫酸氢铵堵塞问题[J]. 电站系统工程,2018,34(3):46 – 48.
[5]黄德保,马大卫,何军,等. 超低改造后 SCR 脱硝氨逃逸表问题分析及处理措施[J]. 电力科技与环保,2019,35(1):25 – 27.
[6]何金亮,金理鹏,卢承政,等. 燃煤电站 SCR 烟气脱硝系统运行典型故障诊断[J]. 中国电力,2016,49(8):148 – 153.
[7]赵利,李志峰,万季霖,等. SCR 脱硝系统运行中存在的问题分析[J]. 华电技术,2016,38(6):71 – 72.
[8]曹玮. 热电厂 SCR 系统反应器流场均匀性数值模拟研究[J]. 华电技术,2015,37(4):64 – 66.
[9]隋秀坤. 330 MW 机组 SCR 脱硝系统运行特性分析[J]. 华电技术,2015,37(6):5 – 6.
[10]方明成,刘玉强,王润明,等. SCR 脱硝系统喷氨优化调整试验研究[J]. 华电技术,2018,40(9):61 – 65.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

郝正(1981—),男,河北石家庄人,工程师,从事环保技术和热工控制技术研究(E-mail:haoz@ chec. com. cn)。

胡小夫(1985—),女,山东乳山人,高级工程师,工学博士,从事火电厂节能环保方面的工作(E-mail:huxf@ chec. com. cn)。

王云(1973—),男,贵州兴义人,工程师,工学硕士,从事电厂热工自动化及数字化技术的研究(E-mail:wangyun@ chec. com. cn)。

汪洋(1980—),男,河北保定人,高级工程师,工学硕士,从事烟气余热利用及流场模拟方面的研究(E-mail:wangyang@ chec. com. cn)。

沈宪明(1972—),男,湖北广水人,高级经济师,从事环保技术研究及工程管理方面的工作。

李伟(1971—),男,安徽全椒人,高级工程师,从事环保技术研究及工程管理方面的工作。

王桦(1977—),男,山东莱阳人,工程师,从事环保技术研究及工程管理方面的工作。