DOI:10. 3969/j. issn. 1674 - 1951. 2019. 10. 001

1000 MW 燃煤机组 SCR 脱硝系统 喷氨精细化改造

Delicacy control on ammonia injection for SCR denitration system in a 1000 MW coal-fired unit

王争荣,汪洋,夏怀鹏,孙路长,王云,郝正 WANG Zhengrong,WANG Yang,XIA Huaipeng, SUN Luchang,WANG Yun,HAO Zheng

(中国华电科工集团有限公司,北京 100070) (China Huadian Engineering Company Limited, Beijing 100070, China)

摘 要:燃煤电厂 SCR 烟道布置不合理及负荷变化均会导致反应器出口 NO₄ 质量浓度偏差大、局部氨逃逸率高 和空气预热器压差高等问题。以某1000 MW 机组 SCR 脱硝系统为研究对象,对烟道流场进行了摸底测试和 CFD 数值模拟,调整了反应器竖直烟道下部直角弯头的导流板方向和数量,使得烟气流场进一步均匀。在大流场趋于 一致的前提下,对 SCR 出入口烟道进行分区,每个分区分别设置若干检测点,测点位置与 SCR 喷氨格栅分区对 应,通过点对点反馈控制实现精细化喷氨。改造后的测试结果显示,任何工况下 A,B 侧出口 NO₄ 质量浓度偏差 均小于 20%,温度场分布趋于一致,在脱硝效率不变的情况下减少了氨逃逸率,提高了 SCR 系统运行的安全性。 关键词:燃煤电厂;SCR 脱硝系统;精细化喷氨;烟道分区;数值模拟;氨逃逸率

中图分类号:X 701 文献标志码:A 文章编号:1674-1951(2019)10-0001-07

Abstract: Unreasonable layout of SCR flue ducts and variable loads in coal-fired power plants can lead to large deviations of NO_x mass concentration at reactor outlets, high local ammonia-escape rate and large pressure difference of air preheaters. Taking the SCR denitration system of a 1000 MW unit as the research object, test and CFD numerical simulation for the flue flow field of the unit were carried out. Adjusting the direction and the number of deflectors in right angle elbows in the lower vertical flue ducts of the reactor made the flow field more uniform. Under the premise that the major flow field was converging, flue ducts at SCR inlet and outlet were partitioned. There were several measuring points in each partition, and they were corresponded to the SCR ammonia grid partitions, which realized the delicacy control on ammonia injection by point-to-point feedback. According to the test result after transformation, the NO_x concentration deviation on the side A and B of the outlet was less than 20%; under various working conditions, and the safety of SCR system was improved.

Keywords:coal-fired power plant; SCR denitration system; delicacy control on ammonia injection; partition of flue ducts; numerical simulation; ammonia-escape rate

0 引言

我国以煤炭为主的能源结构,使得燃煤电厂成 为主要的 NO_x 排放源,随着经济的增长,NO_x 排放量 急剧增加,随之出现了众多脱硝技术,其中选择性催 化还原(SCR)烟气脱硝技术由于其脱硝效率高、经 济性好、运行可靠和二次污染低等优点,成为目前应

收稿日期:2019-05-21;修回日期:2019-08-12 基金项目:中国华电科工科技项目(CHECKJ18-01-05) 用最广泛的烟气脱硝技术^[1]。脱硝效率和氨逃逸率 是 SCR 脱硝系统的 2 个重要性能指标,受烟气流 场、烟气与氨气的混合效果等因素影响。因此,喷氨 系统、SCR 反应器入口烟道及其内导流板的布置是 脱硝系统设计的关键^[2]。

目前,SCR 脱硝装置普遍存在反应器出口 NO_{*} 质量浓度偏差大、局部氨逃逸率高和空气预热器(以 下简称空预器)压差高等问题,随着国家节能环保要 求的不断提高,SCR 脱硝装置的高效稳定运行受到 普遍重视。依据超低排放标准,NO_{*}排放质量浓度 必须严格控制在 50 mg/m³(标态,6% O₂)以下,而较 低的 NO_x 排放质量浓度常伴随着较高的氨逃逸率, 逃逸的氨与烟气中的 SO₃ 反应生成硫酸氢铵,易造 成空预器堵塞,甚至会对下游除尘设备、低温省煤器 等造成不利影响^[3-5]。为此,很多学者和工程人员 相继提出了若干优化方案:最普遍的是通过调整烟 道和反应器入口的导流板^[6]或增设混合器^[7-8]来改 善流场或氨氮混合的均匀性;其次是对喷氨系统的 控制策略进行调整^[9-10],改善喷氨总量受其他因素 (如燃烧煤种、磨煤机组合方式)的干扰,目前已有 学者提出分区手动调节喷氨或增加多点取样等优化 手段^[11-14],但只适合某个特定负荷工况,不能满足 变负荷的要求。

本文以某发电公司 1000 MW 机组 SCR 烟气脱 硝系统作为研究对象,对不同负荷下的进、出口 NO_x 分布,氨逃逸率,温度分布以及氧含量进行试验并对 SCR 烟道流场进行数值模拟;通过分析 SCR 人口烟 道导流板的流场和氨氮混合效果,依据数值模拟结 果进行流场优化和分区喷氨控制优化调整,使 SCR 反应器出口 NO_x 质量浓度趋于一致,减少局部氨逃 逸量,保证电厂安全、稳定运行。

1 研究对象和试验方法

1.1 研究对象

某发电公司一期2×1000 MW 机组锅炉为东方 锅炉厂生产的超超临界变压运行本生直流炉,为 DG 3024/28.35 - Ⅱ1 型单炉膛、一次中间再热、平 衡通风、全悬吊 II 形结构、前后墙对冲燃烧方式、半 露天布置燃煤锅炉。烟气脱硝装置安装于锅炉省煤 器与空预器之间,每台锅炉设2 台 SCR 反应器,SCR 反应器进口烟道设有灰斗,采用蒸汽吹灰器吹灰。 脱硝装置采用混合型氨注射系统(AIG),布置于 SCR 入口竖直烟道上;采用蜂窝式催化剂,以"2 + 1"模式布置;脱硝系统采用液氨制备还原剂;入口 烟气中 NO_x 质量浓度为 300 mg/m³(标态),脱硝效 率为 82%。

机组负荷、燃烧方式(如燃烧煤种、磨煤机组合 方式、运行氧量、一次风率、燃尽风比率)等变化均 会导致 SCR 入口 NO_x 质量浓度场发生变化^[9],而当 前喷氨为手动调节^[15],不具备在线自动调节能力, 当 NO_x 质量浓度场分布与手动阀喷淋密度差异较 大时,极易导致局部氨逃逸率超标或局部脱硝效率 不达标等问题。该公司 [#]2 机组已进行了超低排放 改造,运行一段时间后空预器出现堵塞,导致炉膛负 压波动、三大风机电耗上升、排烟温度上升,对机组 的安全和经济运行造成不良影响。因此,增加在线 自动喷氨调节功能对减少氨逃逸率、提高脱硝效率 至关重要。

1.2 试验方法

该机组 SCR 喷氨系统目前仅配备了在线喷氨 总阀,不具备分区喷氨自动调节功能。SCR 喷氨截 面长度与宽度的比为 3~5,根据气体扩散原理,氨 分子做无规则运动,每个分区按近似方形进行划分, 可改善动态氨氮摩尔比的均匀性。

对 [#]2 机组 SCR 脱硝系统现有的喷氨母管进行 改造:锅炉 SCR 脱硝装置 A,B 侧各有 20 根喷氨管 道,与1 根氨气母管相连,现将相邻的4 根喷氨管道 分为1 组管道单元,A,B 侧最终各形成5 组喷氨管 道单元,与之连接的原母管也被划分为5 个独立单 元;同时,在脱硝装置 A,B 侧各新增1 根较粗的氨 气母管,原母管形成的5 个独立单元与新增母管设 置分区支管,形成5 组供氨支管,每根支管上设置分 区调节阀和流量计,每个支管均设有旁路管道和旁 路阀。

该工程在锅炉两侧 SCR 出口烟道各设置1组烟气取样检测装置和10根烟气采样管,10根烟气 采样管的出口汇集至烟气取样检测装置,每根取样 管上设置有气动阀,运行时可交替打开采样,分析 SCR 反应器出口 NO_x 质量浓度分布。分析系统将 所分析的质量浓度分布信号反馈至控制系统,控制 系统通过分区调节阀对10组喷氨分区单元进行精 细化喷氨控制。

SCR 装置优化

2.1 摸底试验和流场优化

对机组1000 MW 工况下的 SCR 脱硝反应器入口 NO_x质量浓度场、温度场、速度场进行摸底测试,并利用计算流体力学(CFD)软件进行数值模拟,根据模拟结果对现有导流板进行优化,增加了 SCR 入口烟道扩张段的导流板数量,对竖井段导流板长度和角度进行了调整。图1—4 为扩张段和竖井弯道导流板优化前、后的结构模型,图 5—7 为优化前、后的流场效果图。

通过图 5—7 可以看出,对扩张段导流板和竖井 弯道导流板进行优化后,烟道截面流场得到了很好 的改善,烟道阻力降低,喷氨下游烟道截面和首层催 化剂上游截面流场都得到进一步优化,速度场更加 均匀。

2.2 分区布置方案

此次 SCR 精细化喷氨改造测量层采用"5 分 区、10 点测量"设计方案,每侧 SCR 出口烟道沿长 度方向布置 10 个测点,2 个测点为1 个取样分区,2





图 5 优化前、后反应器中心截面纵剖面流场 Fig. 5 Flow field of the longitudinal section of



图 6 优化前、后喷氨下游截面流场 Fig. 6 Flow field in downstream cross section of ammonia injection before and after optimization



图 7 优化前、后首层催化剂上游截面流场 Fig. 7 Flow field in upstream cross section on the first catalyst layer before and after optimization

个测点的平均值代表 1 个分区的喷氨情况,每个测 孔有 3 个测量深度,布置情况如图 8 所示。

执行层根据对应的测量分区所得 NO_x 质量浓度分布情况,通过总量控制阀、分区调平阀、支管调 节阀三级阀门的串联控制来进行分区调节,使 NO_x







质量浓度分布更加均匀。

3 工程改造

3.1 测量层

原机组 SCR 出口烟道 NO_x 质量浓度测量时只 有出口烟道中部布置的 3 个测点,所测数据不能代 表整个出口烟道 NO_x 质量浓度的平均值。此次改 造增设测量层,实现 SCR 出口 NO_x/O₂ 质量浓度的 分布式巡测和混合采样测量,为执行层和控制层提 供基础数据,具体布置如图 9 所示。测量层主要包 括多点取样枪、取样管路与控制阀、NO_x/O₂ 在线分 析仪以及管路吹扫子系统。多点取样枪均匀布置在 SCR 出口烟道截面,抽取烟气的管路需进行保温,避 免管内产生冷凝液。测量层采用 10 点测量设计,与 上游喷氨阀组一一对应,在 SCR 出口至空预器出口 段布置抽气取样管,利用系统负压进行大流量取样。 抽气管均呈较大倾角或垂直布置,无积灰倾向,辅以 热一次风反吹,避免堵灰,测量完成后烟气回至空预 器出口烟道。

3.2 执行层

原机组喷氨格栅的喷氨量仅由喷氨总阀在线调 节,喷氨总阀可改变由负荷变化引起的总需氨量,但 不能在线调节烟道截面各区域喷氨量。执行层是在 喷氨总管和喷氨支管之间增设分区喷氨调平阀和分 区喷氨次母管,实现虚拟分区。根据测量层和控制层 分析结果,对总阀和分区阀进行串联控制和调节,总 量控制阀实时自动控制喷氨总量,分区调平阀根据 SCR 出口质量浓度场定时自动调节每个分区的喷氨 量,具体布置如图 10 所示。同时,喷氨分区调平阀还 进行了冗余设计,设有旁路分区调平阀的上游支管装 设氨流量计,以校验分区调平阀的调节效果。

3.3 控制层

新增精细化喷氨系统控制层与机组分散控制系统(DCS)通信,实时获取 SCR 系统相关性能参数,结合测量层和执行层的工作参数,自成一套完整的SCR 喷氨控制系统。总量控制阀的控制可由新增的控制系统独立完成,也允许原 DCS 单独控制,可实现无扰切换,此次改造不改变原 DCS 对硬件系统的适应性。分区调平阀则由新增的控制系统独立控制,与总量控制阀的控制解耦设计,根据测量层反馈的 NO_x/O₂ 质量浓度巡测分布值,对分区调平阀进行定期调整,分区调节阀设定上、下限,在设定范围内调节,避免对喷氨总量控制阀造成扰动。

总量控制阀的控制采用"前馈+反馈+自学 习"的系统设计方式:"前馈"依赖机组负荷和燃烧 方式相关的参数;"反馈"依赖所测平均 NO_x 质量浓 度,包括原烟气在线监测系统(CEMS)所测 SCR 出 口 NO_x 质量浓度、新增测量层所测 SCR 出口 NO_x 质 量浓度以及烟囱处环保监测点 NO_x 质量浓度;"自



图 9 测量系统布置 Fig. 9 Measurement system layout





图 10 执行层布置

Fig. 10 Arrangement of the execution layer

学习"是根据稳定工况下积累的特征数据实现精确 前馈,减少对反馈的依赖,提高系统控制的时效性和 可靠性。同时,将温度场信号引入控制系统,实现各 分区温度检测优化控制,提高 SCR 系统运行的安 全性。

分区 1

分区 2

度进行网格化测量,测量结果见表1。

4.2 不同工况下 SCR 出口 NO_x 质量浓度及相对标准偏差

在符合试验要求和条件的时段内,采用烟气分析仪对 SCR 出口 NO_x 质量浓度进行网格化测试(见表2),按照以下公式计算出口 NO_x 质量浓度相对标准偏差 C_v,计算结果见表3。

$$C_{v} = \frac{\sigma}{\rho_0} \times 100\% \quad , \qquad (1)$$

mg/m³

4 优化后测试试验

4.1 不同工况下 SCR 入口烟气 NO_x 质量浓度

改造后,对A,B侧SCR入口烟气NO_x质量浓

	表1	不同工况下 SCR)	、口 NO_x 质量 浓	建 分布	
Tab. 1	Average mass co	oncentration of NO _x at S	SCR inlets under	different working	conditions

				~			-	
负荷率/%	测证	式位置	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	均值
		深度1	298	244	295	319	363	
	A 侧	深度2	301	245	267	308	370	298
100		深度3	297	229	270	324	344	
100 -		深度1	421	357	357	275	280	
	B 侧	深度2	422	360	344	280	280	336
		深度3	420	356	338	274	280	
		深度1	240	247	223	225	226	
	A 侧	深度2	242	245	223	225	226	232
75		深度3	242	247	221	225	226	
75 -	B 侧	深度1	234	269	275	235	211	
		深度2	234	268	277	235	211	246
		深度3	239	271	281	239	214	
		深度1	147	152	151	164	152	
	A 侧	深度2	144	152	154	164	151	153
50		深度3	144	154	152	165	152	
30 -		深度1	166	176	186	181	162	
	B 侧	深度2	166	174	185	182	162	174
		深度3	166	176	185	181	161	

表 2 不同工况下 SCR 出口 NO, 质量浓度分布

	Tab. Average mass concentration of NO _x at SCR outlets under different working conditions mg/						mg/m^3						
负荷率/%	测证	【位置	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7	测点 8	测点 9	测点 10	均值
		深度1	27	29	32	24	33	40	42	29	40	42	
	A 侧	深度2	28	29	32	24	34	40	42	29	39	43	34
100		深度3	28	29	30	24	34	40	42	28	38	43	
100		深度1	42	45	33	33	35	23	38	45	47	34	
	B 侧	深度2	42	45	32	33	35	23	38	45	48	34	37
		深度3	42	45	33	32	35	23	38	45	48	33	
		深度1	30	32	42	25	32	32	29	29	27	32	
	A 侧	深度2	29	32	42	25	32	32	29	29	27	32	31
75		深度3	30	32	42	25	31	32	30	29	27	32	
15		深度1	25	24	26	24	35	34	37	38	37	32	
	B 侧	深度2	25	24	26	24	35	34	37	38	37	32	31
		深度3	26	24	25	24	36	34	37	38	37	33	
		深度1	24	27	22	29	31	22	24	25	30	27	
	A 侧	深度2	24	27	23	30	31	23	24	25	31	28	26
50		深度3	24	27	23	29	32	23	24	25	30	28	
50		深度1	24	24	26	26	31	26	36	25	30	24	
	B 侧	深度2	24	24	26	27	31	27	36	26	30	24	27
		深度3	24	26	26	27	30	27	37	25	30	24	

$$\sigma = \sqrt{\sum (\rho_i - \rho_0)^2 / (n - 1)}, \qquad (2)$$

$$\rho_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \rho_i, \qquad (3)$$

式中: ρ_0 为平均质量浓度; ρ_i 为某测点质量浓度;n 为测点数量; σ 为标准偏差。

表 3	不同工况下 SCI	R出口烟道 NO _x	质量浓度 C_{x}	值
-----	-----------	-----------------------	--------------	---

Tab. 3 The C_y of NO_x mass concentration at SCR outlets

u	nder different w	orking conditions	%
负荷率/%	A 侧	B 侧	均值
100	19.1	19.7	19.4
75	14.4	18.5	16.4
50	12.1	13.7	12.9

4.3 氨氮摩尔比和氨逃逸率计算

在符合试验要求的时段内,根据试验测得的 NO_x质量浓度,计算系统的脱硝效率、氨氮摩尔比及 氨逃逸率,见表4—5。

由表5可知:通过精细化喷氨改造之后,烟道截

面的氨氮摩尔比分布比较均匀,很好地实现了氨氮 的均匀混合;在保证系统各工况脱硝效率满足设计 要求的情况下,可控制整个界面的氨逃逸率小于 2.28 mg/m³。

表 5 氨氮摩尔比及氨逃逸率

Tab. 5 Ammonia-nitrogen molar ratio and

ammonia-escape rate							
测试位置	负荷率/%	氨逃逸率/ (mg·m ⁻³)	氨氮摩尔比				
	100	2.06	0.900				
A 侧	75	1.94	0.878				
	50	1.03	0.873				
	100	2.14	0.902				
B 侧	75	2.05	0.888				
	50	1.64	0.885				

4.4 烟气温度分布测试

SCR 反应器的催化剂对工作温度有所要求,高

7	€ ₩	加九平月入	ረኆ		
Tah 4	Der	nitration	efficien		

昭瑞兴李

± 4

存共立 / 01	0 氏县八粉/01	实测 NO _x 质量浓度/(mg・m ⁻³)		折算后 NO _x 质量浓	昭北苏本本/01				
_	贝何平/%	02 顶重力数/ 1/2 一	人口	出口	入口	出口	一 肮阳效平/ %		
	100	2	510	57	401	45	89		
	75	2	385	50	305	41	87		
	50	4	263	43	232	39	83		

• 7 •

于 400 ℃时,催化剂即会烧结。温度太低,则影响催 化剂活性,造成 NH₃ 与 SO₃ 反应形成硫酸氢氨,引 起空预器堵塞或下游设备腐蚀。因此同样需要测量 SCR 出、入口烟道截面温度,测量均值见表 6。

表6 SCR 出、入口温度平均值

 Tab. 6
 Average temperature at SCR

		outi	ets and ini	ets		Ľ
A 共 支 /0	А	侧	В	侧	均	值
贝何平/ %	入口	出口	人口	出口	人口	直 出口 357 338 324
100	360	356	373	357	366	357
75	339	333	360	342	349	338
50	330	318	347	330	339	324

由表6可知,截面所有温度测量值均在310~ 380 ℃之间,满足催化剂的工作温度范围,可以保证 催化剂的正常活性,避免催化剂中毒。各工况下温 度场分布 *C*,值均小于1.5。

5 结论

(1)对机组1000 MW 工况进行 SCR 脱硝反应 器入口 NO_x 质量浓度场、温度场、速度场进行摸底 测试,并利用 CFD 软件进行数值模拟,根据模拟数 据对现有导流板进行了优化,使得烟气流场进一步 均匀。

(2)对 SCR 反应器进行了精细化喷氨改造,对 SCR 进、出口烟道进行同时分区,根据气体运动扩散 规则,测量层采用 5 分区、10 点测量设计方案。喷 氨侧新增一级母管,将原母管作为次级母管,原母管 分割成 5 个控制单元,每个分区管上布置有分区调 平阀和流量计,对改善 SCR 出口 NO_x 质量浓度分布 均匀性、控制氨逃逸率效果显著。

(3)对机组改造后不同工况 SCR 脱硝反应器 出、入口 NO_x 质量浓度场和温度场进行测试,结果 显示:100%负荷率工况下,A,B 侧 SCR 出口截面的 NO_x 质量浓度相对标准偏差分别为 19.1%和 19.7%; 75%负荷率工况下,A,B 侧 SCR 出口截面的 NO_x 质 量浓度相对标准偏差分别为 14.4%和 18.5%;50% 负荷率工况下,A,B 侧 SCR 出口截面的 NO_x 质量浓 度相对标准偏差分别为 12.1%和 13.7%。各工况 下温度场分布 C_v 值均小于 1.5,温度在 310~380℃ 之间,催化剂活性得以保证,同时将温度场信号引入 控制系统,提高了 SCR 系统运行的安全性。

参考文献:

- [1] 王虎, 马丽群, 王志强, 等. 350 MW 机组 SCR 脱硝系统喷 氨优化研究[J]. 神华科技, 2017, 15(9): 57-60.
- [2]徐妍,李文彦. SCR 脱硝反应器导流板的结构设计[J].

热力发电,2008,37(10):49-52,54.

- [3]马双忱,金鑫,孙云雪,等. SCR 烟气脱硝过程硫酸氢铵 的生成机理与控制[J]. 热力发电,2010,39(8):12-17.
- [4] 王乐乐,孔凡海,何金亮,等.超低排放形势下 SCR 脱硝
 系统运行存在问题与对策[J].热力发电,2016,45(12):
 19-24.
- [5]钟礼金,宋玉宝.锅炉 SCR 烟气脱硝空气预热器堵塞原因 及其解决措施[J]. 热力发电,2012,41(8):45-47,50.
- [6]李壮扬,苏乐春,宋子健,等.660 MW 燃煤机组 SCR 流场 模拟优化与喷氨优化运行[J].洁净煤技术,2017,23
 (4):47-52,11.
- [7]董建勋,于遂影,祁宁,等.火电厂 SCR 脱硝反应器均流 与混合技术试验研究[J]. 热力发电,2006,35(10):70-73,77.
- [8] 吕太,赵学葵,王潜. 燃煤机组 SCR 脱硝系统氨氮混合优 化[J]. 热力发电,2016,45(7):13-20,26.
- [9]刘锋,金晶.1000 MW 超超临界机组 SCR 脱硝喷氨控制 策略的优化与改进[J].浙江电力,2018,37(3):68-72.
- [10]武宝会,崔利.火电厂 SCR 烟气脱硝控制方式及其优化 [J]. 热力发电,2013,42(10):116-119,126.
- [11]汤元强,吴国江,赵亮. SCR 脱硝系统喷氨格栅优化设 计[J]. 热力发电,2013,42(3):58-62.
- [12] 孙胜,何建乐,刘法志. SCR 脱硝系统喷氨格栅优化调 整试验研究[J].环境与发展,2018,30(2):110-111.
- [13]方朝君,金理鹏,宋玉宝,等. SCR 脱硝系统喷氨优化及 最大脱硝效率试验研究[J]. 热力发电,2014,43(7): 157-160.
- [14] 毛奕升,吴智鹏,张孝天.火电厂 SCR 脱硝系统喷氨优 化调整及烟气取样方法改进[J].中国电力,2017,50
 (4):167-171.
- [15]李德波,廖永进,曾庭华,等.SCR 脱硝系统喷氨格栅调整 试验关键问题探究[J].广东电力,2016,29(7):11-15.
 (本文责编:刘芳)

作者简介:

王争荣(1984—),男,陕西咸阳人,工程师,工学硕士, 从事电厂节能和环保技术的研究(E-mail:wangzr@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)。

夏怀鹏(1981—),男,宁夏隆德人,工程师,工学硕士, 从事结构有限元分析和设备研发(E-mail:xiahp@chec.com. cn)。

孙路长(1976—),女,河南南阳人,高级工程师,硕士, 从事电厂大气污染控制技术的研究(E-mail:sunlc@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)。

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(E-mail:haoz@chec.com.cn)。