

200 MW 富氧燃烧方案设计及技术经济研究

余学海¹,张 维²,廖海燕¹,吴东梅²

(1. 神华国华(北京)电力研究院有限公司,北京 100025;2. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院,四川 成都 610021)

摘要:针对200 MW富氧燃烧示范项目开展典型方案设计研究和经济性比较分析,采用模拟计算和设计分析相结合的方式,研究确定了新建、兼容富氧燃烧干湿循环锅炉炉膛尺寸和热负荷指标,并完成脱硫、脱硝及烟风系统方案设计。针对空气燃烧、富氧燃烧干/湿循环兼容、富氧燃烧干/湿循环新建等5种方案从技术指标、投资和运行成本3个方面进行比较分析,获得了综合指标最佳的富氧燃烧技术方案。

关键词:锅炉;富氧燃烧;设计方案;投资成本;经济性

中图分类号:TK229.63 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2015)06-0080-05

Design and economic research of 200 MW oxy-combustion scheme

YU Xuehai¹,ZHANG Wei²,LIAO Haiyan¹,WU Dongmei²

(1. Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100025, China;

2. Southwest Electric Power Design Institute, China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, China)

Abstract: Typical scheme research and economic analysis was carried out according to a 200 MW oxygen-enriched combustion demonstration project. Using theoretical calculation and design analysis, the furnace dimensions and heat load indexes of new compatible oxygen-enriched combustion boiler with drying and wetting cycle was determined. Meanwhile, desulfurization, denitration, air and flue gas system were also designed. The technical indicators, investment and running cost of five schemes were compared, and the best comprehensive indexes oxygen-enriched combustion scheme was gained.

Key words: boiler; oxy-combustion; design scheme; investment cost; economic performance

0 引 言

我国富煤贫油少气的资源状况,决定了煤在一次能源结构的主体地位难以改变,即使到2030年,煤在我国一次能源中的比重仍可能高于50%^[1-2]。以煤为主的能源结构决定了我国CO₂减排的长期性、独特性以及所面临的严峻形势^[3]。富氧燃烧碳捕集技术被认为是一种具有发展潜力的碳减排技术^[4],也是目前国内外研究的主要碳减排技术之一。国内外研究机构对富氧燃烧技术开展了理论研究和中试试验研究, Kimura等^[5]研究在O₂/CO₂气氛下火焰的燃点和火焰传播特性; Okazaki等^[6]研究

了CO₂再循环条件下降低NO_x生成的相关机理;郑楚光等^[7]对我国富氧燃烧的研发进展进行了综述,并开展了富氧燃烧机理及试验研究;薛宪阁等^[8]对富氧燃烧传热和污染物排放进行了研究;浙江大学开展了1000 MW燃煤锅炉富氧燃烧改造及NO_x排放的数值模拟计算,并进行了O₂/CO₂气氛下的燃烧特性试验研究^[9-10];但均未针对示范工程进行典型方案设计和多种方案技术经济比较。笔者结合200 MW富氧燃烧示范项目,研究确定了锅炉炉膛尺寸及热负荷指标,脱硫、脱硝和烟风系统设计方案,并通过多方案比较,获得综合指标最佳的富氧燃烧技术方案。

收稿日期:2015-06-16;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.06.020

基金项目:神华集团科技创新资助项目(中国神华科[2011]368号)

作者简介:余学海(1983—),男,四川宜宾人,高级工程师,从事褐煤干燥、富氧燃烧等洁净煤技术研究。E-mail: xuehai19832000@163.com

引用格式:余学海,张 维,廖海燕,等.200 MW富氧燃烧方案设计及技术经济研究[J].洁净煤技术,2015,21(6):80-84.

YU Xuehai, ZHANG Wei, LIAO Haiyan, et al. Design and economic research of 200 MW oxy-combustion scheme [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(6): 80-84.

1 煤质及研究原则

本项目设计煤种为陕西神木县锦界煤分选,煤

质特性见表 1。

根据煤质分析,设计煤种和校核煤种均具有易着火、易燃烬、中等结渣、中等沾污、中等磨损的特

表 1 煤质特性

项目	工业分析/%				$Q_{\text{net,ar}}^*$	元素分析/%					HGI	灰熔融性/°C			
	M_t	M_{ad}	A_{ar}	V_{daf}		C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	$S_{\text{t,ar}}$		DT	ST	HT	FT
设计煤质	10.5	7.19	16.97	38.51	22.21	58.99	3.57	0.80	8.64	0.53	52	1150	1180	1190	1200
校核煤质	12.23	8.5	19.2	35.2	21.10	55.05	3.46	0.94	8.32	0.8	53	1140	1150	1180	1180

注: * 单位为 MJ/kg。

性。200 MW 超高压锅炉采用 π 型布置,单炉膛,自然循环汽包炉,四角切圆燃烧或旋流对冲燃烧,挡板调温,固态排渣,平衡通风,全钢构架,全悬吊结构,同步脱硝。燃烧制粉系统采用中速磨冷一次风机正压直吹式系统,80% 左右的锅炉排烟量作为循环烟气与空分供应的氧气(纯度 $\geq 97\%$) 在一次、二次风机出口混合后,作为锅炉及制粉系统的一、二次风。

由于锅炉排烟中水蒸汽含量较高(约 20%),为防止制粉系统结露引起腐蚀和堵粉,需在脱硫装置前设置烟气换热装置(GGH),脱硫后设置烟气冷却器,先将烟气温度降低到约 32 °C (部分水蒸汽冷凝被去除,以使烟气出口含水率在 5% 左右),再将烟气加热至 80 ~ 90 °C,使得循环烟气高于水露点温度,避免一次风系统发生结露。根据二次循环烟气抽取位置不同,富氧燃烧的烟气循环系统可分为干循环(图 1)和湿循环(图 2)2 种。干循环和湿循环烟气系统的区别在于干循环的二次循环烟气是从烟气冷凝器后引出,而湿循环的二次循环烟气是从引风机后、GGH 之前的原烟气烟道上引出,循环烟气注氧后,经送风机升压,然后经空预器加热后,送入炉膛助燃。

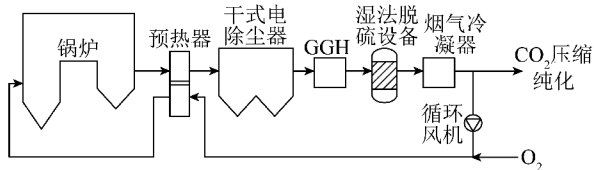


图 1 富氧燃烧干循环流程

1) 干循环燃烧系统

循环烟气温度较低(30 ~ 50 °C),由于烟气均需经过烟气净化系统,烟气净化系统处理的烟气量相比常规空气燃烧系统略有降低(约为常规锅炉的 3/4),相对湿循环系统投资较大;由于循环烟气

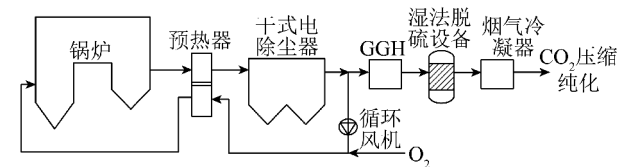


图 2 富氧燃烧湿循环流程

的含水量较低(约 5%),绝热火焰温度、炉内烟气流量等与空气燃烧时差异较小,燃烧稳定性较好;各风道流量与空气燃烧时最为接近,因此风机选型相对较易。

2) 湿循环燃烧系统

在脱硫设备之前抽取烟气,循环烟气温度较高(150 ~ 200 °C),可减少排烟热损失,同时由于烟气量的减少(约为常规锅炉的一半),后续烟气净化系统所需处理的烟气量降低,可以减小系统规模,降低成本;但由于循环烟气未经脱硫脱水处理,含水量高达 20%,炉内绝热火焰温度降低,燃烧器的稳燃相对困难。

2 富氧燃烧典型方案设计

对于常规燃煤电厂改造为富氧燃煤电厂,需要考虑富氧燃烧和空气燃烧的兼顾问题,锅炉和辅机需要兼顾空气燃烧和富氧燃烧的需要,因此在受热面布置、设备选型上更为困难,而新建富氧燃煤机组则无需考虑。由于烟气循环方式的不同,富氧燃烧需要研究以下 5 种技术方案:空气燃烧基准方案、富氧燃烧干循环兼容方案、富氧燃烧湿循环兼容方案、富氧燃烧干循环新建方案、富氧燃烧湿循环新建方案。由于锅炉布置和燃烧方式不同,富氧锅炉可以采用四角切圆燃烧和前后墙对冲燃烧 2 种方式。

2.1 锅炉本体

锅炉本体的设计是实现煤富氧燃烧技术的关键环节之一。锅炉富氧燃烧工况下,由于燃烧产物的

变化,与常规燃烧相比,其烟气成分存在较大差异,三原子气体大大增加,致使燃烧气氛变化,锅炉水冷壁、对流受热面的传热将发生变化,再加上烟气循环的影响,由此带来热力系统的变化^[11-12]。

富氧燃烧锅炉热负荷的选取目前主要通过小型实验研究和数值模拟计算结合,通过研究富氧燃烧条件下锅炉燃烧状况与空气燃烧工况,获得锅炉富氧燃烧条件下煤质的结渣特性,对锅炉主要热力指标选取提供指导。传统富氧燃烧研究认为,氧气比

例增加时,火焰温度提高,炉膛辐射换热增强,所需要的炉膛受热面积减小,炉膛容积也应相应减少^[13]。但根据3 MW 试验研究,在富氧工况下炉内主燃区和过热器屏底区域具有较高的CO浓度,结渣和高温腐蚀倾向加强,采用二次风偏转技术,增加下二次风动量,可在一定程度减弱壁面附近的还原性气氛^[14]。根据本项目煤质特性,结合燃烧器布置要求,采取较低的断面热负荷和容积热负荷,确定不同燃烧方式下锅炉炉膛尺寸及热负荷指标见表2。

表2 锅炉的炉膛尺寸及热负荷指标(BMCR 工况)

项目	空气兼顾富氧四角方案			干/湿循环四角方案		干/湿循环对冲方案	
	空气	干循环	湿循环	干循环	湿循环	干循环	湿循环
炉膛尺寸(宽×深×高)/m	11.92×10.88×42.2			11.92×11.92×42.2		12.96×10.88×42.2	
循环方式	空气	干循环	湿循环	干循环	湿循环	干循环	湿循环
容积热负荷/(kW·m ⁻³)	132.6	132.9	132.2	121.8	121.1	120.2	119.4
截面热负荷/(M·m ⁻²)	4.35	4.36	4.34	3.99	3.96	4.00	3.97
燃烧器区域壁面热负荷/(MW·m ⁻²)	1.52	1.53	1.52	1.46	1.45	1.42	1.41
炉膛出口烟温(后屏出口)/℃	1033	998	996	1039	1046	1038	1039

富氧燃烧干循环锅炉和富氧燃烧湿循环锅炉方案,由于循环烟气中氧浓度均为26%,炉内烟气量接近,通过计算和布置,可以采用同一锅炉方案。对于新建机组,富氧燃烧四角切圆锅炉方案与富氧燃烧前后墙对冲锅炉方案,锅炉热负荷指标选取基本一致,炉膛宽度、深度方向尺寸不同主要是根据燃烧器布置方式确定。由于锅炉燃用的煤质具有中等结渣特性,且富氧燃烧工况下锅炉的结渣倾向更强,新建机组炉膛尺寸略大于需要兼顾空气燃烧的改造机组,炉膛容积热负荷、断面热负荷和燃烧器区域壁面热负荷都略低。对于空气兼顾富氧方案,由于锅炉富氧燃烧工况的结渣倾向更强,为避免结渣,运行中应采取优化控制措施。

2.2 脱硝系统

对于富氧燃烧工况,由于锅炉燃烧器的布置形式对烟气参数基本没有影响,而干循环与湿循环方式对锅炉烟气参数的影响甚微。就脱硝技术而言,影响其整体方案设计的主要环节在于烟气参数(如烟气流大小)。因此,富氧燃烧干循环对冲燃烧、富氧燃烧干循环四角燃烧、富氧燃烧湿循环对冲燃烧以及富氧燃烧湿循环四角燃烧等4种锅炉方案烟气参数差异较小,可采用同一种脱硝布置形式以满足NO_x的排放要求。每台机组布置2台反应器,每台反应器拟设置3层催化剂层,采用“2+1”的模式,脱硝效率超过80%。

对于空气兼顾富氧燃烧工况,空气燃烧条件下的烟气量较大,富氧燃烧干湿循环条件下的烟气量相对空气燃烧时均要小30%(而干、湿循环烟气量基本相当)。为使烟气在脱硝烟道、反应器以及催化剂孔内的流速处于合理的范围,空气燃烧、富氧(干循环或湿循环)所需的烟道和反应器截面大小应有所不同。因此,脱硝装置应设置多烟道多反应器,通过控制脱硝反应器的运行数量来使脱硝系统适应锅炉在空气燃烧或富氧燃烧时的不同工况。

2.3 脱硫系统

烟气脱硫装置采用双回路石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺,燃煤设计/校核煤种含硫量为0.53%/0.8%,在富氧燃烧湿循环工况下,燃煤设计/校核煤种SO₂质量浓度约4249/6797 mg/m³(标态、干基、6%O₂),脱硫装置效率99.5%。脱硫烟气系统不设置旁路烟道,设置脱硫增压风机,吸收塔布置在烟囱侧面。对于空气燃烧方案和干循环新建/兼容方案,引风机及脱硫增压风机合并设置;湿循环新建方案设置2台引风机和1台增压风机;湿循环兼容方案设置2台引风机和2台增压风机,脱硫采用双塔并联,布置在烟囱两侧。

2.4 烟风系统

燃烧器布置方式对富氧燃烧烟风系统影响较小,但锅炉需在常规空气燃烧模式下启动并达到一定负荷,待锅炉处于稳定状态,再切换至富氧燃烧工

况。因此,一、二次风机入口设置两路吸入口:一路取自环境空气,在常规空气燃烧模式下使用;一路取自烟气,在富氧燃烧模式下使用。

2.4.1 富氧燃烧干循环方案

引风机出口的全部烟气依次通过 GGH、脱硫装置和烟气冷却器后,烟气分为:作为一次循环烟气;作为二次循环烟气;剩余部分至 CO₂ 压缩纯化装置完成碳捕集。

一次循环烟气经一次风机升压后,与注入的氧气混合成为一次风。一路送至空预器,加热后的热一次风与冷一次风按磨煤机要求的入口温度混合后,进入磨煤机作为干燥剂和输送风;同时,密封风机抽取部分冷一次风,对磨煤机进行密封,防止煤粉外漏。二次循环烟气经二次风机升压后,与注入的氧气混合成为二次风。二次风全部送至空预器,加热后的热二次风进入炉膛作为助燃风。

2.4.2 富氧燃烧湿循环方案

引风机出口烟气分成两路,一路进入二次风机,升压后与注入的纯氧混合成为二次风,经空预器加热后,热二次风进入炉膛作为助燃风;另一路依次通过脱硫装置和烟气冷却器后,一部分经 GGH 升温至 90 ℃ 后,作为一次循环烟气,剩余烟气至 CO₂ 压缩纯化装置完成碳捕集。

2.4.3 空气兼顾富氧燃烧方案

富氧燃烧干、湿循环兼顾方案与富氧燃烧干、湿循环新建方案基本相同,区别在于烟风系统及设备需同时满足锅炉空气燃烧工况下长期稳定运行。

3 方案技术经济比较

基于上述煤质和设计方案,进行 200 MW 富氧燃烧多方案技术经济比较,各方案中的设备投资根据设计工况下的选型参数,由设备厂家提供,运行费用根据设备选型结果进行煤耗、电耗测算获得。

3.1 主要技术指标

由于富氧燃烧采用烟气再循环,锅炉效率较空气燃烧高,可以实现高浓度 CO₂(≥80%)富集,但空分系统耗电量高,供电煤耗大幅度降低,各方案技术指标见表 3(切圆燃烧和对冲燃烧方案指标相同)。

3.2 初投资

对于富氧燃烧,新建方案由于锅炉进行了优化设计,投资略有降低,但由于需要烟气冷却和再循环,脱硝及辅助设备投资增加,兼顾方案则除了满足空气燃烧外,还需要满足富氧燃烧需要,因此投资增

加更多。切圆燃烧各方案初投资比较见表 4,对冲燃烧方案锅炉设备投资较切圆燃烧方案增加 400 万元,其他相同。

表 3 各方案主要技术指标

项目	空气燃烧	富氧燃烧 干循环	富氧燃烧 湿循环
机组台数/台	1	1	1
发电功率/MW	200	200	200
年利用小时/h	5000	5000	5000
年发电量/10 ⁸ kWh	10	10	10
锅炉保证效率/%	92.5	93.8	94.3
管道效率/%	99	99	99
发电标煤耗/(g·kWh ⁻¹)	319.94	315.51	312.30
发电热效率/%	38.44	38.98	39.38
发电厂用电率/%	10.04	31.97	31.38
供电标煤耗/(g·kWh ⁻¹)	355.65	463.78	455.11
供电效率/%	34.58	26.52	27.02
CO ₂ 浓度/%	~14.6	≥80	≥80

注:表为纯凝工况数据,空分压缩机按电驱考虑。

表 4 各方案初投资比较(一台炉) 万元

项目	空气燃 烧基准	富氧燃 烧干循 环新建	富氧燃 烧湿循 环新建	富氧燃 烧干循 环兼容	富氧燃 烧湿循 环兼容
锅炉设备	12400	11700	11700	12400	12400
脱硝系统	2600	2800	2800	3500	3500
锅炉主要辅机设备	2653.8	4324.6	4171.2	4426.6	4403.3
脱硫系统	3401.4	3401.4	2981.4	3410.4	4959.8
空分系统	—	29200	29200	29200	29200
总计	21055.2	51426	50852.6	52937	54463.1
差值	基准	30370.8	29797.4	31881.8	33407.9

3.3 运行费用

富氧燃烧方案锅炉效率提高,耗煤量降低,但辅助设备阻力增加,运行费用增加,由于烟气量降低,新建方案脱硝、脱硫系统运行成本降低,但湿循环兼容方案配置了 2 套脱硫系统,运行费用增加。各方案运行费用比较见表 5。

3.4 方案比较

富氧燃烧由于增加了空分装置,与常规空气燃烧方案相比,投资增加较多,其中富氧湿循环新建方案初投资最低,富氧湿循环兼容方案初投资最高,主要原因是富氧湿循环兼容方案在富氧和空气工况下烟气量相差较大,采用同一套脱硫系统无法满足排放要求,因此设置了 2 个吸收塔。

表5 各方案运行费用比较(一台炉) 万元

项目	空气燃	富氧燃	富氧燃	富氧燃	富氧燃
	烧基准	烧干循	烧湿循	烧干循	烧湿循
		环新建	环新建	环兼容	环兼容
锅炉设备年运行费用	17620	17338	17247	17358	17266
脱硫系统年运行费用	455	364	364	455	455
锅炉主要辅机 设备年运行费用	534.6	979.8	961.2	985.5	940.8
脱硫系统年运行费用	516.5	511.5	408.2	511.5	679.4
年运行费用总计	19126.1	19193.3	18980.4	19310	19341.2
年运行费用差值	基准	67.2	-145.7	183.9	215.1
按20年折现	基准	659.8	-1430.5	1805.5	2111.9

在年运行费用方面,富氧燃烧锅炉效率较高,耗煤量较小,锅炉设备运行费用较常规空气燃烧方案低260万~373万元/a,但由于富氧燃烧方案的烟风系统阻力较大,锅炉辅机的运行费用较常规空气燃烧高约450万元。空分系统采用电驱动时运行费用主要是电耗,影响机组供电煤耗,在机组技术指标上体现。因此,富氧湿循环新建方案年运行费用最低,富氧湿循环兼容方案最高。

综合考虑技术指标、初投资和运行费用,富氧湿循环新建方案最优,富氧湿循环兼容方案虽然降低了供电煤耗,但投资和运行费用高,经济性差。

4 结 论

1) 根据富氧燃烧碳捕集技术特点,结合煤质特性,获得了200 MW富氧燃烧锅炉本体、脱硫脱硝及烟气系统典型设计方案;

2) 通过投资、运行费用及技术指标比较,获得了综合指标最佳的富氧燃烧技术方案;

3) 富氧燃烧碳捕集技术为燃煤电厂控制CO₂提供了技术方案,但由于空分能耗较高,总体经济性下降,研究开发适用于富氧燃烧的低能耗空分技术将有利于富氧燃烧技术的发展和工业化应用。

参考文献:

[1] 方君实. 转变煤炭工业发展方式 推进煤炭工业科学发展[N]. 中国能源报, 2010-10-11(16).

[2] 徐敏杰, 胡兆光, 谭显东, 等. 中国中长期能源和电力需求及碳排放情景分析[J]. 中国电力, 2012, 45(4): 101-107.

[3] 俞建洪. 锅炉与CO₂减排[J]. 工业锅炉, 2004, 83(1): 10-14.

[4] 王海亮, 王运军, 魏继平, 等. 富氧气氛下煤粉燃烧产生污染物排放研究进展[J]. 锅炉技术, 2014, 45(2): 41-43.

[5] Kimura N, Omata K, Kiga T, et al. The characteristics of pulverized

coal combustion in O₂/CO₂ mixture for CO₂ recovery[J]. Energy Conversion and Management, 1995, 36(6/9): 805-808.

[6] Okazaki K, Ando T. NO_x reduction mechanism in coal combustion with recycled CO₂[J]. Energy, 1997, 22(2/3): 207-215.

[7] 郑楚光, 赵永椿, 郭欣. 中国富氧燃烧技术研发进展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(23): 3856-3864.

[8] 薛宪阔, 刘彦丰. O₂/CO₂燃烧技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2008, 14(1): 57-61.

[9] 游卓, 王智化, 周志军, 等. 1000 MW燃煤锅炉富氧燃烧改造及NO_x排放的数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(11): 2080-2086.

[10] 骆仲泐, 毛玉如, 吴学成, 等. O₂/CO₂气氛下煤燃烧特性试验研究与分析[J]. 热力发电, 2004, 33(6): 14-18.

[11] Tan Y, Croiset E, Douglas M A, et al. Combustion characteristics of coal in a mixture of oxygen and recycled flue gas[J]. Fuel, 2006, 85(4): 507-512.

[12] Liu F, Guo H, Smallwood G J. The chemical effect of CO₂ replacement of N₂ in air on the burning velocity of CH₄ and H₂ premixed flames[J]. Combust Flame, 2003, 133(4): 495-497.

[13] 阎维平, 米翠丽. 富氧煤粉燃烧锅炉概念设计研究[J]. 热力发电, 2011, 40(2): 1-7.

[14] Guo Junjun, Liu Zhaohui, Wang Peng, et al. Numerical investigation on oxy-combustion characteristics of a 200 MWe tangentially fired boiler[J]. Fuel, 2015, 140: 660-668.

(上接第79页)

[8] Thanh D B Nguyen, Young-II Lin, Won-Hyeon, et al. Experiment and CFD simulation of hybrid SNCR-SCR using urea solution in a pilot-scale reactor[J]. Computers and Chemical Engineering, 2010, 34(10): 1580-1589.

[9] 董建勋, 李辰飞, 王松岭, 等. 还原剂分布均匀对SCR脱硝性能影响的模拟研究[J]. 电站系统工程, 2007, 23(1): 20-22.

[10] 郭婷婷, 刘汉强, 杨勇平, 等. 基于数值模拟的1000 MW燃煤机组SCR脱硝系统设计[J]. 电站系统工程, 2010, 26(5): 61-64.

[11] 毛剑宏, 宋浩, 吴卫红, 等. 电站锅炉SCR脱硝系统导流板的设计与优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(6): 1124-1129.

[12] 毛剑宏, 蒋新伟, 钟毅, 等. 变截面倾斜烟道导流板对AIG入口流场的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(8): 1453-1457.

[13] Cheng Junfeng, Zeng Hancan, Xiong Weili, et al. Research and test for reducing NO_x emission of a 300MW lean coal-fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 157-160.

[14] Chen Lingshan, Zhang Weijiang. Simulation modeling and experiment to reduction of NO_x emission by using SCR control system[J]. Electric Information and Control Engineering, 2011, 13(10): 734-737.

[15] Patankar, Suhas V. Numerical heat transfer and fluid flow[M]. Taylor and Francis Group, 1980: 14-16.