

《锅炉大气污染物排放标准》 (征求意见稿) 编制说明

《锅炉大气污染物排放标准》编制组

2017年7月

目录

1 项目背景.....	1
1.1 任务来源.....	1
1.2 标准编制组.....	1
1.3 主要工作过程.....	1
1.4 修订的主要依据文件及资料.....	1
2 标准修订的必要性、原则及思路.....	2
2.1 必要性.....	2
2.2 原则.....	3
2.3 思路.....	3
3 国内外标准及氮氧化物控制技术调研.....	3
3.1 国内外锅炉排放标准调研.....	3
3.1.1 国内标准.....	3
3.1.2 国外标准.....	5
3.2 国内外锅炉低氮排放技术调研.....	7
3.2.1 燃气（油）锅炉低氮治理技术.....	7
3.2.2 生物质锅炉 NO _x 治理技术.....	13
3.2.3 燃煤锅炉 NO _x 治理技术.....	14
4 本市锅炉情况.....	15
4.1 上海市清洁能源替代工作执行情况.....	15
4.2 锅炉数量及构成.....	16
4.3 锅炉排放现状.....	17
5 标准主要技术内容及排放限值的确定.....	18
5.1 标准文本及架构.....	18
5.2 标准限值的确定.....	20
5.2.1 烟尘.....	20
5.2.2 二氧化硫.....	21
5.2.3 氮氧化物.....	21
6 本标准限值及国内外相关限值的比较.....	22
7 标准实行的技术经济及环境效益分析.....	23
7.1 达标排放技术分析.....	23

7.1.1 烟尘达标排放技术分析	23
7.1.2 二氧化硫达标排放技术分析	23
7.1.3 氮氧化物达标排放技术分析	24
7.1.4 汞及其化合物达标排放技术分析	24
7.2 技术经济分析	24
7.3 环境效益分析	25
7.3.1 减排效果的计算方法	25
7.3.2 超标情况预测	25
7.3.3 减排量计算结果	25
8 贯彻实施标准的建议	25

1 项目背景

1.1 任务来源

为贯彻落实《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国大气污染防治法》、《上海市大气污染防治条例》，推进国家《大气污染防治行动计划》和上海市《清洁空气行动计划（2013-2017）》的相关工作，进一步强化在燃油、燃气工业锅炉，减少工业锅炉排气污染影响，持续改善上海市大气环境质量，2017年初，上海市环保局下达了修订上海市《在锅炉大气污染物排放标准》地方标准的任务，旨在为本市下一阶段的燃油、燃气工业锅炉环保整治提供有力的手段和依据。

1.2 标准编制组

本标准是由以下单位协作编制。单位如下：

上海市环境监测中心	上海市环境科学研究院
上海市能效中心	江苏双良锅炉有限公司
上海工业锅炉研究所	

1.3 主要工作过程

2017年3月，成立标准修订编制组；

2017年3月，赴北京调研锅炉大气污染物排放标准制订及执行情况；

2017年4-5月，调研本市锅炉现状及大气污染物排放情况

2017年6-7月，向管理部门汇报锅炉标准编制情况

1.4 修订的主要依据文件及资料

本标准限值制定的主要依据如下：

《中华人民共和国大气污染防治法》（2015年8月29日第二次修订）

《上海市环境保护条例》（2016年10月1日实施）

《上海市大气污染防治条例》（2014年7月25日通过）

《锅炉大气污染物排放标准》（GB13271-2014）

《北京市锅炉大气污染物排放标准》（DB11/139-2015）

《天津市锅炉大气污染物排放标准》(DB12/151-2016)

《环保部关于锅炉标准执行的复函》(环函[2000]319号)

《2016年上海市大气污染物排放清单》

2 标准修订的必要性、原则及思路

2.1 必要性

近年来本市进行的清洁能源替代工作,有力地支撑了本市环境空气质量的改善。全市SO₂、PM₁₀和PM_{2.5}年均浓度降幅显著,较2010年,2016年的年平均浓度分别下降48%、27%和25%。与此同时全市NO_x的下降幅度偏小,仅为14%。这样的环境空气质量变化是由于上海市能源结构调整和清洁能源替代工作促成的。消减煤炭消费量、降低汽柴油中硫含量等措施是环境空气中SO₂、PM₁₀和PM_{2.5}浓度降低的重要原因。于此同时,上海市以柴油机和燃油(气)锅炉等稀薄燃烧源的燃料消费量不断攀升是造成NO_x降幅较小的原因。据测算,全市煤炭消费量逐年下降,较2010年,2016年的全市煤炭消费量下降了23%。但是,全市天然气和汽油消费量呈快速增长趋势,较2010年,2016年的全市天然气和汽油消费量分别上升了78%和51%。

2016年底,本市已全面完成中小锅炉清洁能源替代工作,并逐步推进集中供热锅炉的清洁能源替代。据初步统计,上海市现有各类锅炉5214台,其中燃气锅炉2757台(53%),燃油锅炉2020(39%)台。2014年的污染源排放清单中工业锅炉的PM和NO_x、SO₂占比分别36.8%和10%、34%,而2015年的清单显示工业锅炉的PM和NO_x、SO₂占比分别为0.8%和5.2%、11%。可以看到较清洁能源改造完成前,PM和SO₂的排放量占比分别降低98%和67%,而NO_x的排放占比下降率较低为48%,锅炉的主要污染物从PM变为NO_x。

在完成锅炉清洁能源改造和NO_x成为锅炉首要污染物的背景下,为进一步改善空气质量,贯彻国务院及环保部相关政策精神,为本市污染物总量减排、清洁能源替代等工作提供抓手,对上海市工业锅炉排放标准(DB31/387-2014)进行修订。

2.2 原则

基于上海市的能源结构的定位与调整方向，结合环境需求，上海市锅炉大气污染物排放标准的修订遵循以下原则：

(1) 服务于本市环境空气质量改善工作

锅炉使用过程中排放污染气体，致使大气污染，本标准旨在控制污染气体的排放，以改善本市的环境空气质量。

(2) 技术可行性和改进性原则

以现有排放水平为基础，以先进技术为依托，分析锅炉改造和排放控制技术的可行性，促进锅炉大气污染物控制技术进步。

(3) 经济合理性原则

标准的制定依据工艺成熟、成本合理的可行技术，同时逐步推进改善锅炉运行效率或者采用先进的污染控制技术，以具备可操作性。

2.3 思路

(1) 设定严格的大气污染物排放限值

新标准在《锅炉大气污染物排放标准》(DB31/387-2014)基础上对工业锅炉的烟尘、二氧化硫、氮氧化物、汞及其化合物的进行了严化，以实现改善环境空气质量的目的。

(2) 明确基准氧含量的适用情况

实测锅炉大气污染物排放浓度，应按 GB/T 16157 规定的过量空气系数进行折算。

(3) 以氮氧化物控制为重点

根据《2016 年上海市工业锅炉大气污染物排放清单》可知，氮氧化物是燃油、燃气锅炉超标的主要因素，因此本标准将控制氮氧化物的排放作为重点。

(4) 加强与排放许可证制度的衔接。

3 国内外标准及氮氧化物控制技术调研

3.1 国内外锅炉排放标准调研

3.1.1 国内标准

由于中国地域辽阔，经济发展水平差异较大，环境保护的压力也具有区域性，现有的锅炉大气污染物排放标准不能完全适应区域经济发展和环境保护的需要，地方政府和环保部门分别制定了符合地区特点的严于国家标准的地方锅炉大气污染物排放标准，我国锅炉大气污染物排放地方标准具有如下特点：

(1) 根据大气环境质量改善的需要，规定了严格的污染物排放限值。我国各地区的不同锅炉大气污染物的排放限值均低于国家标准。一般。大功率锅炉的排放限值严于小功率锅炉，经济发达地区、景区的标准严于较落后地区。

(2) 根据不同燃料的特性，制定相应的排放限值。我国各地区标准中，除北京市以外均根据燃料种类制定了不同的标准限值，燃煤锅炉、燃油锅炉和燃气锅炉的排放限值依次变严。

(3) 根据地方实际、锅炉功率对排放限值进行调整。广东省的锅炉排放标准中对不同的锅炉功率和锅炉所在地区的各污染物排限值做了不同的规定。

表 1 我国各地区《锅炉大气污染物排放标准》修订情况

地方	标准号	标准名称	实施日期
全国	GB 13271-2014	锅炉大气污染物排放标准	2014年7月1日
上海市	DB31/387-2014	上海市《锅炉大气污染物排放标准》	2014年10月1日
天津市	DB12/151-2016	天津市《锅炉大气污染物排放标准》	2016年8月1日
北京市	DB11/139—2015	北京市《锅炉大气污染物排放标准》	2015年7月1日
广东省	DB44/765-2010	广东省《锅炉大气污染物排放标准》	2010年11月1日
山东省	DB37/2374-2013	《山东省锅炉大气污染物排放标准》	2013年9月1日

表 2 我国各地区 PM 排放限值 (mg/m³)

	说明	燃煤锅炉	燃油锅炉	燃气锅炉	生物质锅炉
全国	在用	80	60	30	
	新建	50	30	20	
	特别排放限值	30	30	20	
上海市	在用	20	20	20	20
天津市	在用	30	30	10	
	新建	20	10	10	
北京市	在用	5	5	5	5
	新建	5	5	5	5
广东省-珠三角	在用、新建扩建、改建	120	50	30	
广东省-其他	在用、新建扩建、改建	120	80	30	
山东省	在用、新建扩建、改建	30	30	10	

表 3 我国各地区 SO₂ 排放限值

	说明	燃煤 锅炉	燃油 锅炉	燃气 锅炉	生物质 锅炉
全国	在用	400	300	100	
	新建	300	200	50	
	特别排放限值	200	100	50	
上海市	在用	100	100	20	20
天津市	在用	100	50	20	
	新建	50	20	20	
北京市	在用	10	10	10	10
	新建	10	10	10	10
广东省-其他	在用、新建扩建、改建	400	300	50	
广东省-珠三角	在用、新建扩建、改建	500	400	50	
山东省	在用、新建扩建、改建	200	200	100	

表 4 我国各地区 NO_x 排放限值

	说明	燃煤 锅炉	燃油 锅炉	燃气 锅炉	生物质 锅炉
全国	在用	400	400	400	
	新建	300	200	150	
	特别排放限值	150	150	150	
上海市	在用	150	150	150	
天津市	在用	200	300	150	
	新建	150	80	80	
北京市	在用	80	80	80	80
	新建	30	30	30	30
广东省-其他	在用、新建扩建、改建	300	300	200	
广东省-珠三角	在用、新建扩建、改建	400	400	200	
山东省	在用、新建扩建、改建	300	250	250	

3.1.2 国外标准

欧盟仅对大型燃烧装置 (>50MW) 提出排放控制要求, 小于 50MW 的燃烧装置由成员国确定, 其中德国标准 (TA luft) 对小于 50MW 对使用燃煤、石油焦、型煤、燃油或木材发电、获得蒸汽或热水等锅炉制定排放标准。

美国联邦政府负责控制与管理 29MW 以上的锅炉, 对于 29MW 以下的锅炉, 联邦政府规定了二氧化硫和烟尘的排放限值。氮氧化物的排放限值由各州负责控制管理。相关的联邦法律为 40 CFR Part 63 Subpart DDDDD, 名称为 Industrial, Commercial, and Institutional Boilers and Process Heaters: National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants (NESHAP) for Major Sources。

加利福尼亚州的锅炉排放法规最为复杂和严苛。加州 ARB 将本地划分为 35 个地方空气污染控制区(APCD's) 和空气质量管理区(AQMD's), 每个控制区或管理区均颁布实施各自的污染物排放控制标准及控制计划。任何人的经营设施需要排放大气污染物的, 必须从当地的空气污染治理区 (APCD) 或空气质量管理区 (AQMD) 获得经营许可证。帝国县、圣地亚哥县、圣华金山 谷 圣路易斯奥比斯波县、圣巴巴拉县、文图拉县等五个县采用 APCD 许可对域内锅炉进行污染排放管理。羚羊谷、湾区、莫哈韦沙漠、萨克拉门托城区、南海岸、Yolo-Solano 等五个县采用 AQMD 许可对域内锅炉进行污染排放管理。而每个空气管理区均按照 APCD 或 AQMD 的精神制定符合自身实际的法规。

以圣迭戈 APCD 为例其辖区下以 6 条法规规定了锅炉的管理方法: 法规 19.2; 持续排放监测要求; 法规 68, 燃料燃烧设备 - 氮氧化物; 法规 68.1, NSP 的要求对于氧化物从氮燃烧设备; 法规 69, 发电蒸汽锅炉, 更换装置和新装置; 法规 69.2, 工业用及商用锅炉, 工艺加热器和蒸汽发生器; 法规 69.2.1, 小型锅炉, 工艺加热器和蒸汽发生器; 法规 69.5, 天然气热水器。

以南海岸 AQMD 为例其辖区下以 5 条法规规定了锅炉的管理方法: 方法 100.1, 连续气体排放取样的仪器分析仪程序; 法规 1146, 来自工业, 机构和商业锅炉, 蒸汽发生器和工艺加热器的氮氧化物的排放; 法规 1146.1, 小型工业, 机构和商业锅炉, 蒸汽发生器和工艺加热器中氮氧化物的排放; 法规 1147, 杂项来源的 NOx 减排; 法规 222, 根据第二条规定不需要书面许可的特定排放源的备案要求。

日本对于锅炉排放限值的确定方法依据污染物种类的不同有所区别。硫氧化物排放限值为 K 值法, 即 K 值乘以烟气有效高度的平方得到允许的排放体积速率, K 值为一个范围区间, 不同地区有不同的取值, 此外, 对燃料中的硫分含量和排放总量也做了规定。

下表为世界各国现行锅炉的 PM、SO₂ 和 NO_x 的排放限值。

表 5 世界各国\地区 PM 排放限值 (mg/m³)

	燃煤锅炉	燃油锅炉	燃气锅炉
美国	25-45	40-60	/
美国加州圣华金河谷	-	-	-
欧盟	110	110	/

法国	50-150	50-150	5
芬兰	55-140	50	/
德国	20-50	50	5
日本	50-300	150-300	30-100

表 6 世界各国\地区 SO₂ 排放限值 (mg/m³)

	燃煤锅炉	燃油锅炉	燃气锅炉
美国	170-1100	250	250-520
美国加州圣华金河谷	-	-	-
欧盟	1750	400	/
法国	850-2000	850-1700	35
芬兰	1100	1700	/
德国	350-1300	350	10
日本	-	-	-

表 7 世界各国\地区 NO_x 排放限值 (mg/m³)

	燃煤锅炉	燃油锅炉	燃气锅炉
美国	170	250	250
美国加州圣华金河谷	10-18	10-18	10-18
欧盟	350	300	200
法国	450-825	450-825	100-350
芬兰	275-550	500-900	170-400
德国	300-500	180-250	100-150
日本	400-600	530	120-300

3.2 国内外锅炉低氮排放技术调研

3.2.1 燃气（油）锅炉低氮治理技术

燃气锅炉由于天然气的理化特性导致其主要的污染物为氮氧化物。于此同时，由于上海市目前的普通柴油含硫量水平逐年降低，其首要污染物也主要为氮氧化物。目前主要通过改进燃烧技术来降低燃烧过程中 NO_x 的生成与排放，其主要途径有：降低燃料周围的氧浓度，减小炉内过剩空气系数，降低炉内空气总量，或减小一次风量及挥发分燃尽前燃料与二次风的混和，降低着火区段的氧浓度；在氧浓度较低条件下，维持足够的停留时间，抑制燃料中的氮生成 NO_x，同时还原分解已生成的 NO_x；在空气过剩的条件下，降低燃烧温度，减少热力型 NO_x 的生成。低氮燃烧技术一般可使 NO_x 的排放量降低 30%~60%。

3.2.1.1 低氮燃烧器技术

关于化石类燃料的 NO_x 生成机制的理论可见诸于各类文献，本文简要总结如下：

1. 热力型 NO_x (Thermal NO_x)，在高温烟气 (大于 1400°C 后) 显著增加，N 元素来源于空气中的 N₂；

2. 快速型 NO_x (Promp)，N 元素来源于助燃气体中的 N₂，生成量主要受氧气浓度和燃料与氧气化学当量比影响；

3. 燃料型 NO_x (Fuel NO_x)，N 元素来源于燃料中的氮成分，其生成主要受燃料中的氮成分和助燃气体中的氧气浓度影响。图综合展示了 NO_x 的来源于决定因素，低氮燃气燃烧器的技术原则则围绕着以下的核心理念不断地发展和演变。

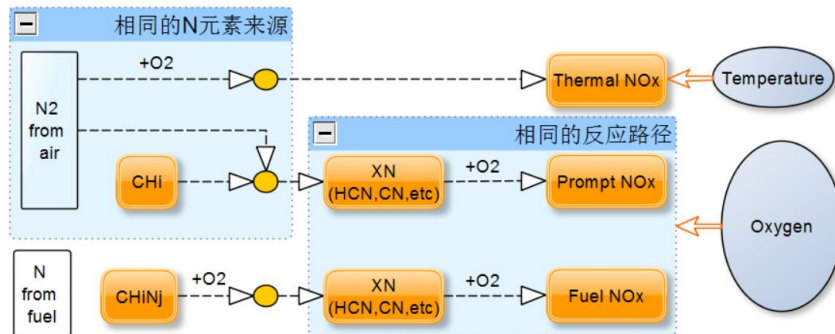


图 1 三种类型 NO_x 的生成源及主要影响因素

如上图所示，NO_x 的生成主要由烟气温度和氧气浓度决定。因此，当前工业中的燃气低氮燃烧技术的一个重要控制方式就是降低气体燃料燃烧过程中的烟气温度。降低烟气温度的核心指导原则：(1) 在时间将热量释放的峰值降低，降低化学反应速率、延长反应时间；(2) 在空间上将热量分散在更广阔的空间。

针对以上指导原则，在燃气燃烧器的设计及布置方案中有若干具体的实施措施：(1) 燃料分级：有烟气内循环、燃气和空气高速差配合等类型；(2) 空气分级：有燃烧器喷嘴的空气分级和炉膛空间上的空气分级；(3) 烟气再循环：有传统烟气再循环和 O₂/CO₂ 烟气再循环。

燃料分级，即燃料分成若干股注入较大的燃烧空间中进行燃烧，释放的热量被较大空间内的烟气吸收，从而使烟气的温度得到降低，该技术也称为“火焰分割”。相比较于中心单喷头的扩散火焰而言，燃料分级（火焰分割）的技术措施能明显地降低烟气的核心温度。另外，采用燃气与空气高速差的模式，则能实现：氧气浓度较低的烟气卷吸、大空间范围内的燃气燃烧、延迟与空气的混合燃烧过

程。

空气分级，即空气分成若干股喷入，实现燃气和空气在燃烧过程中有不同的空燃比。(1) 一种是燃气喷头中将空气分为若干圈；(2) 一种是在炉膛空间上空气分级，即燃烧器的主燃区为贫氧燃烧，空气分阶段地注入，从而使气体燃料分阶段地燃烧、逐渐地释放热量，最终降低烟气温度。核心机制在于：通过空气分级、造成气体燃料的不完全燃烧，同时不完全燃烧的烟气产物又能在一定程度上促进燃料型 NO_x 的还原机制： $\text{NO}_x + \text{CO} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{N}_2$ ； $\text{NO}_x \rightleftharpoons \text{XN}$ ($\text{HCN}, \text{CN} > \text{N}_2$)

燃料分级和空气分级对 NO 生成量的影响可以从图的曲线中得到直观的了解。到偏离正常空燃配比时会对 NO_x 的降低有较大的作用。燃料分级、空气分级对热力型 NO_x 会有明显的降低作用。在气体燃料燃烧领域中，尽管燃料型 NO_x 关注的并不多，但是在燃料成分复杂的化工领域，也需要特别的关注。

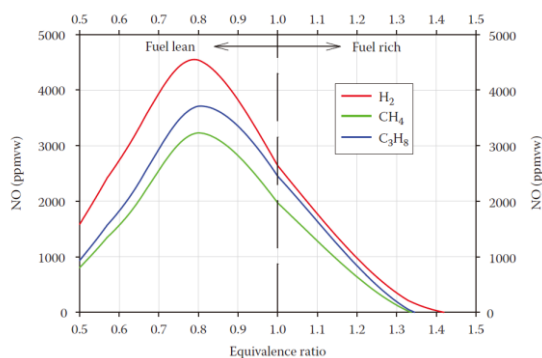


图2 燃料与空气化学当量比对 NO 生成量的影响

在气体燃料的燃烧中，快速型 NO_x 的生成机制值得关注，该机制将很大程度影响着低氮燃烧器技术的极限减排能力。快速型 NO_x 主要由碳氢活化基与空气中的氮气通过反应 ($\text{CH}_i + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{HCN} + \text{NH}$) 生成大量 NO 的前驱产物 HCN 、 CN 及 NH ，见图中 HCN 和 NH 被氧化生成 NO 的途径。现有的理论研究表明，快速型 NO_x 生成机制主要发生在较低温度、富燃料燃烧环境中，而燃料分级和空气分级所导致的烟气温度降低、局部空间的富燃料燃烧环境正好有利于快速型 NO_x 的生成。一般而言，表面燃烧器、空气分级燃烧器等燃气燃烧器所生成的 NO_x 中，大部分由快速型 NO_x 提供，因此，这一点需要在燃气燃烧器的设计过程中进行考虑。国际上一些先进水平采用高速燃气卷吸大量炉膛烟气的方式来减少快速型 NO_x 的生成。

烟气再循环而言，通过从尾部排放烟气抽取一部分比例的烟气与空气混合，

从而降低了助燃气体的氧气浓度，在降低了化学反应速率的同时，降低了火焰核心温度，从而避免大量热力型 NO_x 的生成。另外，再循环烟气中包含的 NO_x 气体可以通过 $\text{N}+\text{NO}$ 反应来降低 NO 的生成量，且氧气浓度的降低也能驱使 NO 反应体系的化学平衡朝 NO 生成量减少的方向偏移。在 O_2/CO_2 烟气再循环的方案中，该方案从根源上消除了热力型 NO_x 和快速型 NO_x ，只剩下燃料型 NO_x 的生成，而在 CO_2 为主要环境气体时，气体燃料的燃料型 NO_x 生成量会被极大的降低，可能达到理论上的净零排放，目前相关的技术还主要应用于减排压力更大的燃煤领域中。

3.2.1.2 分级燃烧技术

燃气工业锅炉低氮改造中，分级燃烧技术是实现 $80\text{mg}/\text{m}^3$ 排放标准最常规的燃烧技术之一。

分级燃烧又可分为空气分级与燃料分级两种。

空气分级燃烧是将所有空气分段送入，通常将理论空气量的 70-80% 作为一次风送入炉膛，使燃料在缺氧富燃料稳定着火燃烧（一次燃烧区），形成浓相核心火焰。由于燃烧速度和温度峰值降低，减少了热力型 NO_x 。其余空气以二次风或三次风形式送入，使燃料进入空气过剩区域（燃尽区），燃尽风的投入并迅速与燃烧产物混合，保证燃尽。虽然这是空气量很多，但由于火焰温度较低，在二次燃烧区不会产生较多的 NO_x ，因而总 NO_x 生成量得以控制。燃烧器实现空气分级燃烧是通过推迟混合，分级送入二次风或三次风控制燃烧过程。

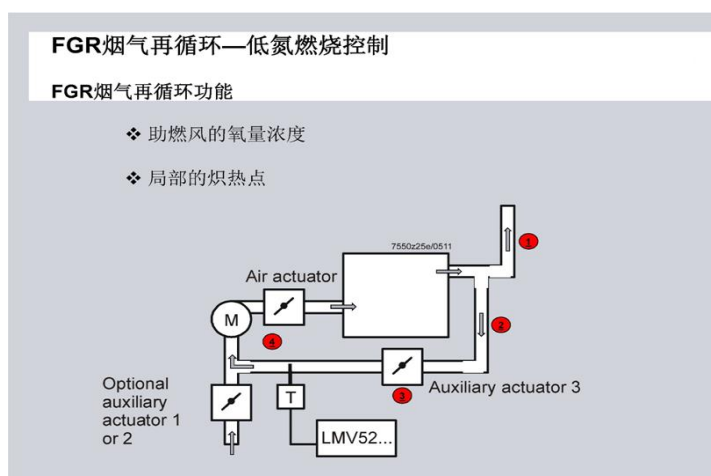
燃料分级燃烧是将燃烧过程中以及生成的 NO_x 还原为 N_2 ，采用二次燃烧，在欠氧燃烧形成活化原子团，用它还原主燃区产生的 NO_x 。该法是将炉膛内的燃料燃烧过程设计成三个区域：主燃烧区、再燃还原区、燃尽区。在主燃烧区后注入二次燃料形成还原气氛，在高温和还原气氛下生成碳氢原子团，并与主燃区形成的 NO_x 发生反应，将其还原。燃尽区送入燃尽风，完成燃尽过程。正常情况下，利用约 20% 的二次燃料可还原 NO_x 总量的 50%—60%。



图3 分级燃烧燃烧器本体及燃烧火焰图

3.2.1.3 烟气再循环技术

燃气锅炉低氮燃烧改造中,烟气再循环技术 FGR 是其中常用改造技术之一。将部分烟气回收进入燃烧器再次利用,进入炉膛的热风可提高效率,更节能。并在烟气口增加蝶阀。气再循环原理:将部分低温烟气直接送入炉内,或与空气(一次风或二次风)混合送入炉内,因烟气吸热和稀释了氧浓度,使燃烧速度和炉内温度降低,因而热力 NO_x 减少,可减少 60%-70%,一般烟气外循环 FGR 量不超过 15%。下图 4 所示为 FGR 系统示意图。



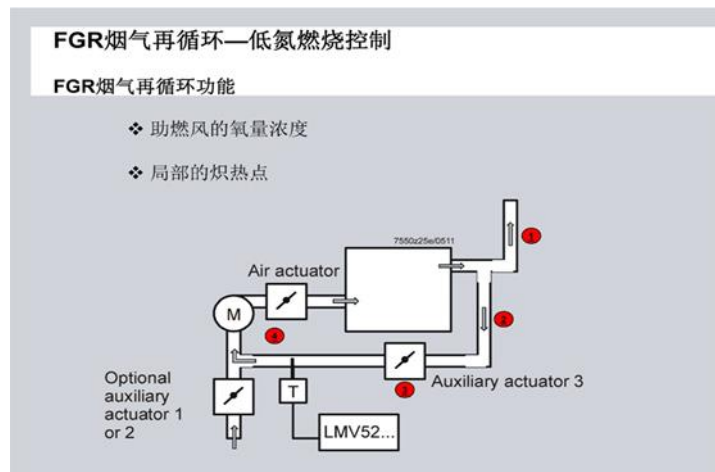


图 4 FGR 系统示意图

FGR 系统采用耐高温不锈钢喉口，无需耐火材料，提高喉口质量，降低根部温度，降低 NO_x 产生。为达到安全运行，控制系统严格按照燃烧控制安全的 SIL3 标准制定方案。控制系统采用燃烧管理器作为燃烧点火程序控制、阀组程序检漏和燃烧比例调节控制单元。管理器具备满足 SIL3 燃烧安全标准，双 CPU 互相验证运行，以保证运行安全可靠（这时一般 PLC 控制所达不到的要求）。同时燃烧管理器针对 FGR 方案具备烟气温度的触发启动功能（锅炉冷态启动后根据排烟温度触发 FGR 运行）和烟气温度补偿功能（解决烟气温度的变化引起密度变化，从而使得与新风混合后燃烧空燃比的改变得以补偿）。系统另外配置 PLC 和触摸屏作为数据采集监控单元。这里 PLC 不参与燃烧程序控制和调节。PLC 与燃烧管理器通讯，采集燃烧运行数据和状态，通过触摸屏组态的人机画面显示，以达到监控锅炉燃烧运行。同时 PLC 还采集锅炉运行参数和状态（如回水温度显示，排烟温度显示，锅炉缺水、水循环、超温超压连锁以及风机变频控制等）作为整个系统运行个监控，以保证锅炉高效、低排放、安全运行。

3.2.1.4 表面燃烧技术

燃气锅炉低氮改造中，采用表面燃烧技术是降低 NO_x 排放浓度的有效途径之一。

表面燃烧燃烧器的工作原理是：均匀混合后的燃气、空气混合物压入辐射器头部，并在辐射器表面层的外表面内进行燃烧，使辐射表面形成炽热的火焰，向外辐射能量。表面燃烧燃烧器实现燃料在燃烧反应之前，与助燃空气进行预混合，燃料喷出后，在燃烧头前部表面燃烧盘上快速燃烧。由于加快 O₂ 与燃料的燃烧

反应速度，从而降低高温时 NO_x 的生成量，同时遏制 O 与 N 的反应。表面燃烧技术在 CO 达标， O_2 : 3.5%时，最终达到 NO_x 排放 $20\sim 30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

但目前表面燃烧技术也存在一些缺陷，主要表现为：容易引起回火、难以控制混合率，太高易回火，太低低氮效果不好、为防止回火和降低调整混合率难度，燃烧器需附加其他技术措施，从而对燃烧器使用寿命有所影响、表面燃烧盘（金属织物）有一定的使用寿命，维护费用会增加。



图 5 表面燃烧燃烧器示意图

3.2.2 生物质锅炉 NO_x 治理技术

当前生物质锅炉 NO_x 控制技术主要包括，空气分级低氮燃烧技术、烟气再循环低氮燃烧技术、多点烟气再循环低氮燃烧技术及马丁和 GFE 低氮燃烧技术。其中生物质空气分级低氮燃烧技术是指，将燃烧所需要的空气量分成两级送入，使第一级燃烧区内空气的过量系数在 0.8 左右，燃料在缺氧的富燃料条件下燃烧，使得燃烧速度和温度降低，因而抑制了热力型 NO_x 的生成。同时，燃烧生成的 NO 和 CO 进行还原反应，以及燃料氮分解成中间产物相互作用或与 NO 还原分解，抑制燃料型 NO_x 的生成。

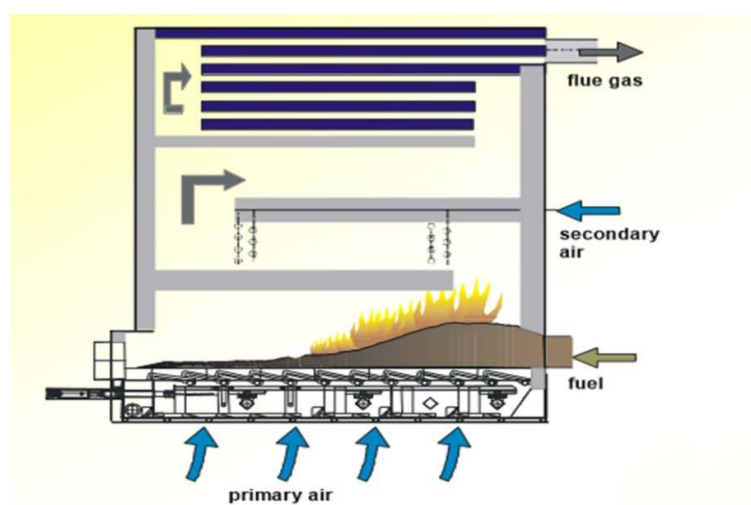


图 8 生物质空气分级燃烧技术

3.2.3 燃煤锅炉 NO_x 治理技术

燃煤工业锅炉 NO_x 治理技术主要可分为：选择性催化还原法（SCR）脱硝技术，分级燃烧技术，选择性非催化还原法（SNCR）脱硝技术。

SCR 法具有脱硝效率高（85%-90%）的优势，在电厂锅炉脱硝被广泛应用。但由于尾部专用设备一次性投资大，且烟气通过催化剂的阻力增大了锅炉尾部的阻力以及催化剂每三年需要更换，运行成本高。

分级燃烧脱硝的基本原理是在炉排和炉膛之间建立还原燃烧区，先缺氧燃烧，燃煤在缺氧条件下燃烧也抑制了自身燃料型 NO_x 产生，从而实现锅炉燃烧过程中的 NO_x 减排。分级燃烧脱硝技术可有效降低的 NO_x 排放，可达到 25~30% 的 NO_x 脱除率；一次投资大，需要适当周期实施改造，同时链条炉排分级燃烧脱硝运行工况也比较难调整和实施。

SNCR（选择性非催化还原）技术是一种成熟的脱硝技术，目前在电站锅炉脱硝系统、尤其是水泥窑炉脱硝以及垃圾焚烧锅炉脱硝系统上得到了广泛的运用。该法将氨水（质量浓度 20%~25%）或尿素溶液（质量浓度 10%~50%）通过雾化喷射系统直接喷入炉膛合适温度区域（850~1100℃），雾化后的氨与 NO_x（NO、NO₂ 等混合物）进行选择性非催化还原反应，将 NO_x 转化成无污染的 N₂。SNCR 工艺的 NO_x 脱除效率主要取决于反应温度窗口、NH₃ 和 NO_x 的化学计量比、混合程度、反应时间等。研究表明 SNCR 工艺的温度控制至关重要，最佳反应温度是 950℃~1050℃，若温度过低，NH₃ 的反应不完全，容易造成 NH₃ 泄漏；而温度过高，NH₃ 则容易被氧化为 NO_x，抵消了 NH₃ 的脱除效率。温度过高或过低都会导致还原剂的损失和 NO_x 脱除率下降。脱硝效率较低，在 40%-60% 范围。

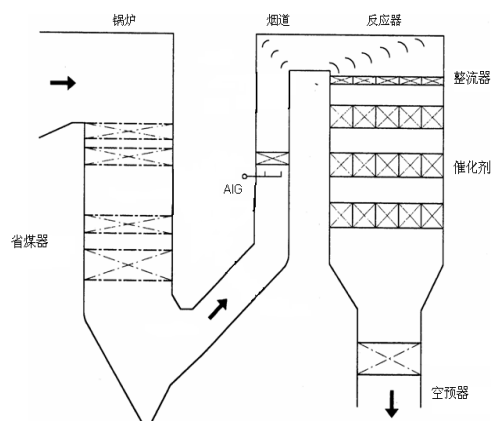


图 9 选择性催化还原法（SCR）脱硝示意图

3.3 不同低氮技术的比较

下表对市场上主流的低氮燃烧技术进行了比较。可知分级燃烧+FGR 等技术路线可以将氮氧化物控制在 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，贫燃预混、水冷预混等方式虽然对氮氧化物有较好的控制，但在安全性上应予以重视。

表 8 市场上典型低氮燃烧技术组合比较

技术路线	分级燃烧 +FGR	FGR 型燃烧 器+FGR	自由射流 +FGR	贫燃预混	水冷预混
安全性	无	无	无	回火、爆燃	结构防回火
燃烧效率	无显著影响	无显著影响	无显著影响	需要高过量空气系数	无显著影响
锅炉效率	(-) 4‰	(-) 4‰	(-) 4‰	(-) 1-2%	(+) 2-5%
投资	低	低	高	中	高
运行费	无	无	无	高(金属纤维、滤网更换、人工维护)	有投资回报预期
NOx 排放	<50mg/m ³	<50 mg/m ³	<50 mg/m ³	<30 mg/m ³	<30 mg/m ³
其他	适合所有吨位	2t/h 以上适用	燃气压力需求较高	燃气、空气较脏, 易堵	小容量适用

4 本市锅炉情况

4.1 上海市清洁能源替代工作执行情况

随着国家《大气污染防治行动计划》和《上海市清洁空气行动计划(2013-2017年)》(沪府发[2013]83号)的相继出台,2015年累计完成燃煤锅炉、窑炉清洁能源替代、关停2442台,超额完成年初计划1964台的目标任务,三年累计完成燃煤(重油)锅炉和工业窑炉关停和替代5153台,全面完成了本市中小燃煤(重油)锅炉和窑炉的清洁能源替代任务,可减少分散用煤285万吨,减少二氧化碳排放416万吨、二氧化硫约3.42万吨、氮氧化物约2万吨、烟尘约1.14万吨。本市中小燃煤(重油)锅炉清洁能源替代工作推进到了一个新的局面,为本市近几年环境空气质量的改善起到了重要作用。

近年来本市进行的清洁能源替代工作,有力地支撑了本市环境空气质量的改

善。全市 SO_2 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度降幅显著，较 2010 年，2016 年的年平均浓度分别下降 48%、27% 和 25%。与此同时全市 NO_x 的下降幅度偏小，仅为 14%。这样的环境空气质量变化是由于上海市能源结构调整和清洁能源替代工作促成的。消减煤炭消费量、降低汽柴油中硫含量等措施是环境空气中 SO_2 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低的重要原因。

4.2 锅炉数量及构成

上海市现有锅炉 5214 台，其中燃气锅炉 2757(53%) 台，燃油锅炉 2020(39%) 台，燃煤锅炉 79 (1%) 台，电锅炉 259 (5%) 台，生物质锅炉 55 (1%) 台，其他各类锅炉 44 (1%) 台。上海市现有燃气锅炉的平均额定功率为 3.4MW，高于燃油锅炉的平均额定功率的 1.4MW。燃油锅炉中额定功率 3MW 及以下的锅炉占总燃油锅炉的 91.2%，燃气锅炉中额定功率 5MW 及以下的锅炉占总燃气锅炉的 88.8%。燃气锅炉中额定功率为 1~2MW 的数量最多。燃油锅炉中额定功率为 0.5~1 的数量最多。

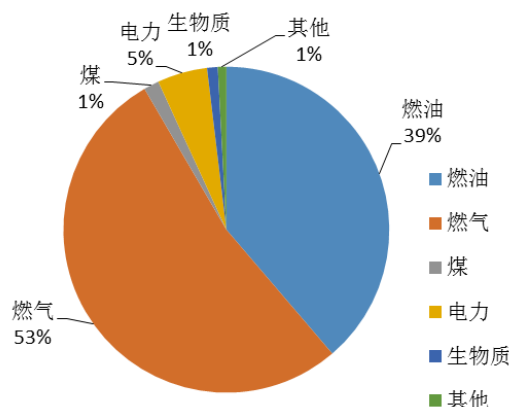


图 10 上海市工业锅炉构成

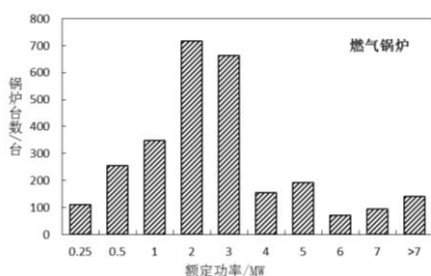


图 11 上海市燃气锅炉额定功率分布

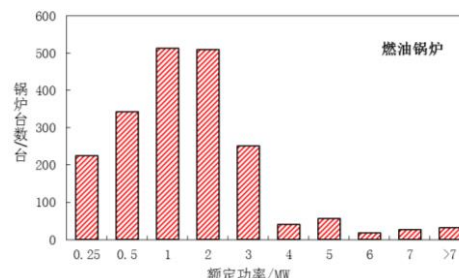


图 12 上海市燃油锅炉额定功率分布

从上海市区的锅炉数量分布来看，除清浦区、崇明区以外郊区的锅炉数量明显多于中心城区。其中浦东新区的燃油、燃气锅炉远多于其他区县，占全市燃气

锅炉总量的 24%左右。另外，松江、青浦、浦东、嘉定和奉贤等郊区的燃油锅炉数明显多于长宁、徐汇等城区，反映了郊区对工业燃油锅炉的需求量大的同时，也表明城郊各区天然气管网建设的滞后。

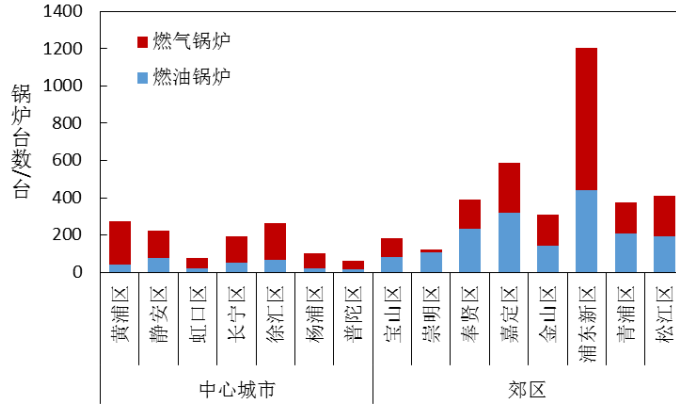


图 13 上海市各区县燃油锅炉数量分布

4.3 锅炉排放现状

下图 6、图 7 所示为上海市部分燃气、燃油锅炉的排放水平分布。样本为 115 台次燃油锅炉，241 台次燃气锅炉，统计对象中有 70% 的锅炉未进行改造，30% 未填报改造情况。数据为 356 台次各类燃油、燃气工业锅炉例行环保检测的结果。

根据调研结果燃油锅炉的 PM、SO₂ 和 NO_x 的平均值分别为为 19±43mg/m³、59±141mg/m³ 和 155±148mg/m³。按照现有标准，燃油锅炉的 PM (20mg/m³)、SO₂ (100mg/m³) 和 NO_x(150 mg/m³)的合格率分别为 97.7%、96.0%和 80.8%。

根据调研结果燃气锅炉的 PM、SO₂ 和 NO_x 的平均值分别为 9±5mg/m³、15±12mg/m³ 和 98±48mg/m³。按照现有标准，燃气锅炉的 PM (20mg/m³)、SO₂ (20mg/m³) 和 NO_x(150 mg/m³)的合格率分别为 100.0%、100.0%和 77.8%。

从排放情况来看，燃油锅炉的各项污染物指标的排放水平要高于燃气锅炉，且燃油锅炉的污染物标准差高于燃气锅炉。燃料油硫含量较高、燃料雾化不均匀造成燃油锅炉较燃气锅炉的 PM 和 SO₂ 较高。而燃油较高的绝热燃烧温度是燃油锅炉 NO_x 排放较高的原因。与此同时从排放分布来看，燃油锅炉的 PM、SO₂ 和 NO_x 的排放的标准差明显大于燃气锅炉，PM 和 SO₂ 的标准差差异是由于不同燃油锅炉使用燃料的品质差异较大，NO_x 的标准差差异是由于燃油锅炉的技术水平差距较大。

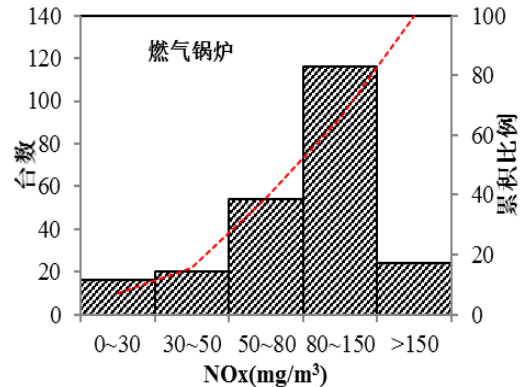
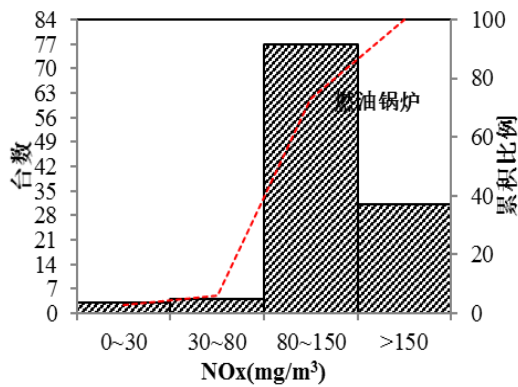
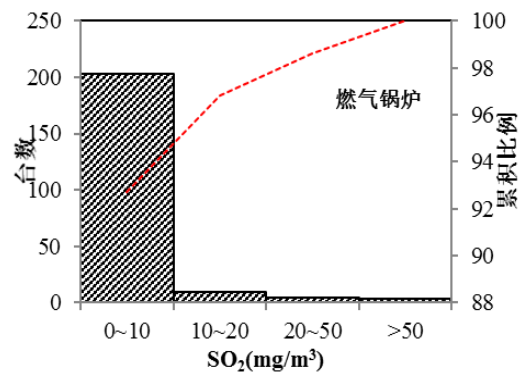
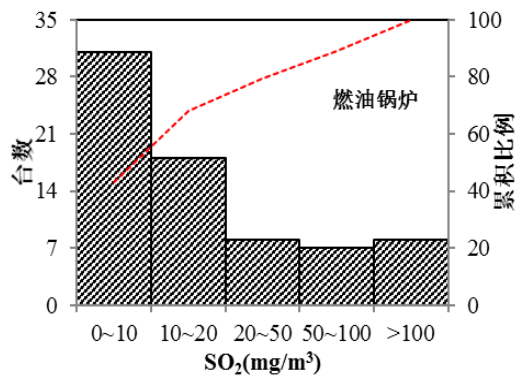
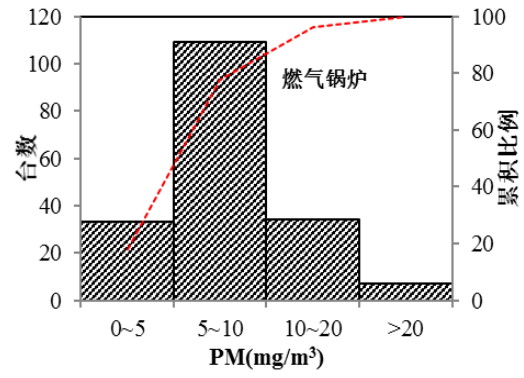
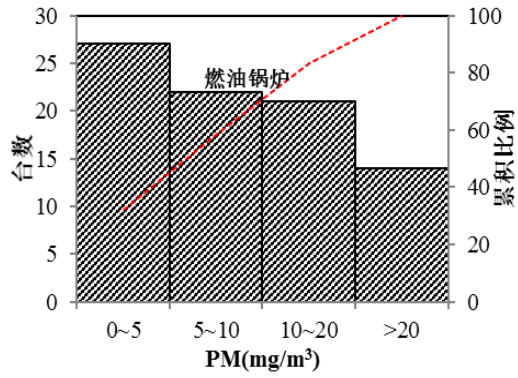


图 14 上海市部分区县燃油锅炉排放分

图 15 上海市部分区县燃气锅炉排放

布

分布

5 标准主要技术内容及排放限值的确定

5.1 标准文本及架构

本标准包括范围、规范性引用文件、术语和定义、技术内容大气污染物排放控制要求、监测、标准实施与监督共 6 章，另有两个规范性附录。本标准规定了锅炉大气污染物排放控制要求、监测和标准实施与监督等内容。

本标准规定了锅炉大气污染物排放控制要求，监测以及标准的实施与监督等

内容。

本标准适用于上海市范围内锅炉大气污染物的排放管理，以及新建、改建、扩建项目的环境影响评价、环境保护设施设计、竣工环境保护验收及其投产后的大气污染物排放管理。

本标准适用于以燃煤、燃油、燃气、生物质成型燃料等为燃料的单台出力 65t/h 以下的蒸汽锅炉、各种容量的热水锅炉及有机热载体锅炉；各种容量的层燃炉、抛煤机炉。

使用型煤、石油焦、油页岩、煤矸石、水煤浆、重油、渣油等燃料的锅炉，参照本标准中燃煤锅炉的污染物排放控制要求执行；使用轻柴油等其他液体燃料的锅炉，参照本标准中燃油锅炉的污染物排放控制要求执行；使用高炉煤气、焦炉煤气、醇醚燃料（如甲醇、乙醇、二甲醚等）及其他气体燃料的锅炉，参照本标准中燃气锅炉的污染物排放控制要求执行。

有机热载体锅炉应按照相应燃料类型确定适用标准。

本标准不适用于以生活垃圾、危险废物及其他非危险废物为燃料的锅炉。

本标准适用于法律允许的污染物排放行为。新设立污染源的选址和特殊保护区域内现有污染源的管理，按照《中华人民共和国大气污染防治法》、《中华人民共和国环境影响评价法》、《上海市环境保护条例》、《上海市大气污染防治条例》等法律、法规、规章的相关规定执行。

自本标准实施之日起至2020年12月31日，在用燃煤、燃油及燃气锅炉执行表9规定的排放限值。

表9 在用锅炉大气污染物排放限值（单位：mg/Nm³）

锅炉类别	烟尘	二氧化硫	氮氧化物（以NO ₂ 计）	汞及其化合物（以Hg计）	烟气黑度（林格曼黑度，级）	监控位置
燃煤锅炉	20	100	150	0.03	1	烟道或烟囱
燃油锅炉		100				
燃气锅炉		20				

自2020年1月1日起，在用燃煤、燃油及燃气锅炉执行表10中规定的排放限值。自本标准实施之日起，新建燃煤、燃油及燃气锅炉执行表10规定的排放限值。

表 10 新建锅炉大气污染物排放限值（单位：mg/Nm³）

锅炉类别	烟尘	二氧化硫	氮氧化物（以 NO ₂ 计）	汞及其化合物（以 Hg 计）	烟气黑度（林格曼黑度，级）	监控位置
燃煤锅炉	禁排				1	烟道或烟囱
燃油锅炉	10	20	50 ⁽¹⁾ 80 ⁽²⁾			
燃气锅炉		10	50			

注：（1）位于本市外环线区域内的燃油锅炉执行该限值。
（2）位于本市外环线区域外的燃油锅炉执行该限值。

鉴于生物质锅炉的排放特征及本市生物质能源综合利用的综合考虑，自本标准实施之日起，在用及新建燃生物质锅炉执行表11规定的排放限值。

表 11 生物质锅炉大气污染物排放标准（单位：mg/Nm³）

锅炉类别	烟尘	二氧化硫	氮氧化物（以 NO ₂ 计）	汞及其化合物（以 Hg 计）	一氧化碳	烟气黑度（林格曼黑度，级）	监控位置
燃生物质锅炉	20 10 ⁽¹⁾	20	150	0.03	100	1	烟道或烟囱

注：（1）新建燃生物质锅炉自实施之日起执行该限值，在用燃生物质锅炉自 2020 年 1 月 1 日起执行该限值。

5.2 标准限值的确定

5.2.1 烟尘

据调研，北京地标烟尘为 5mg/m³，天津新建锅炉燃煤为 20mg/m³，燃油及燃气为 10mg/m³。本标准拟定在用锅炉（过渡期标准）烟尘限值为 20mg/m³，新建锅炉限值为 10mg/m³。新标准下，燃油锅炉达标率为 58.3%，燃气锅炉达标率为 77.6%。

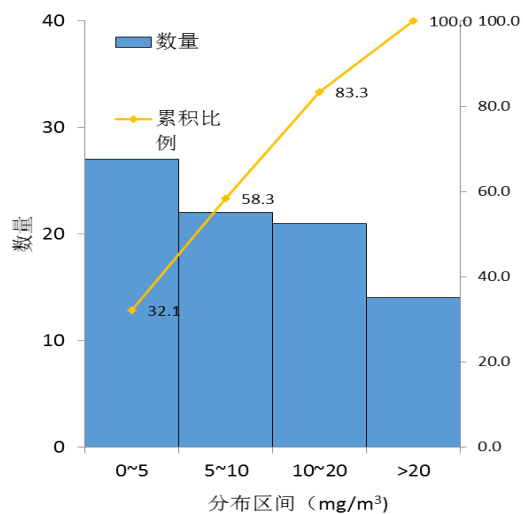


图 19 燃油

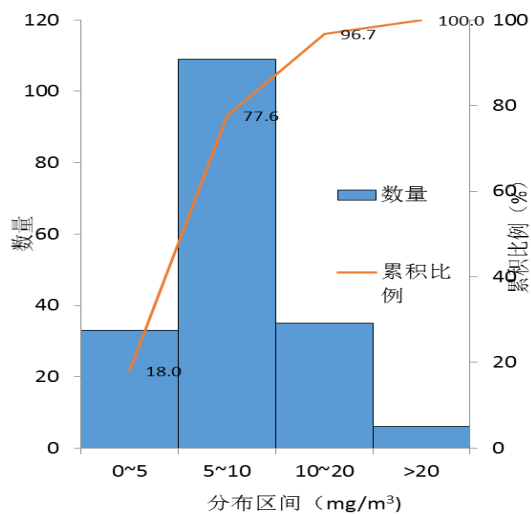


图 20 燃气

表 10 烟尘的标准限值

PM	燃煤		燃油		燃气	
北京	5,10 (禁燃区外)					
天津	30	20	30	10	10	10
拟设定值	10					

5.2.2 二氧化硫

据调研，北京地标新建为 $10\text{mg}/\text{m}^3$ ，在用为 $10\text{mg}/\text{m}^3$ （禁燃区内）， $20\text{mg}/\text{m}^3$ （禁燃区外），天津新建锅炉燃煤为 $50\text{mg}/\text{m}^3$ ，燃油及燃气为 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 。上海市在用锅炉（过渡期标准）二氧化硫保持原标准，新建锅炉拟收严至 $35\text{mg}/\text{m}^3$ （燃煤锅炉）， $20\text{mg}/\text{m}^3$ （燃油锅炉）， $10\text{mg}/\text{m}^3$ （燃气锅炉）。新标准下，燃油锅炉达标率为 68.1%，燃气锅炉达标率为 92.7%。

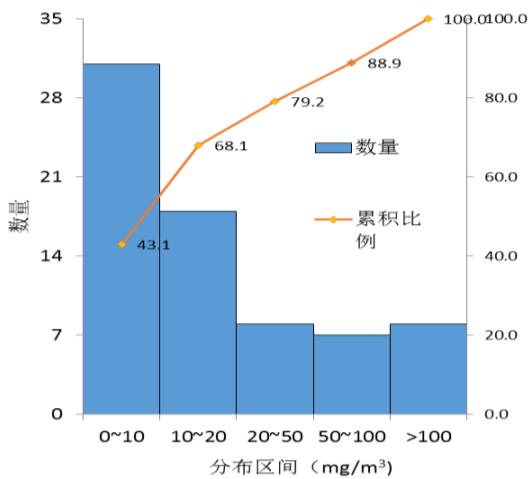


图 21 燃油

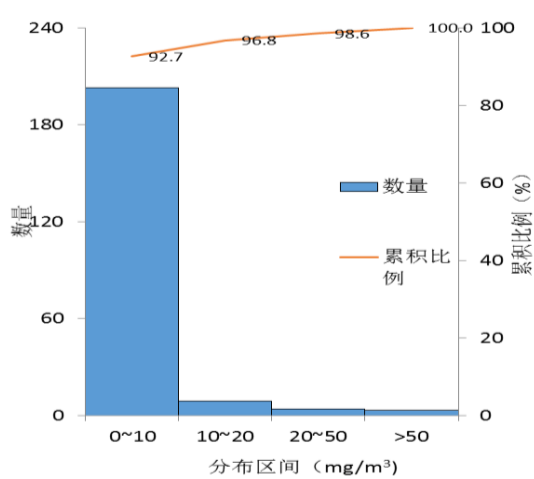


图 22 燃气

表 11 二氧化硫标准限值

SO ₂	燃煤		燃油		燃气	
北京	10,20 (禁燃区外)					
天津	100	50	50	20	20	20
拟设定值	禁排		20		10	

5.2.3 氮氧化物

据调研，北京地标新建为 $30\text{mg}/\text{m}^3$ ，在用为 $80\text{mg}/\text{m}^3$ （禁燃区内）， $150\text{mg}/\text{m}^3$ （禁燃区外），天津新建锅炉燃煤为 $150\text{mg}/\text{m}^3$ ，燃油及燃气为 $80\text{mg}/\text{m}^3$ 。上海市在用锅炉（过渡期标准）氮氧化物保持原标准，新建燃气锅炉拟收严至 $50\text{mg}/\text{m}^3$ ，考虑到天然气管网覆盖率等因素考虑，燃油锅炉拟收严至 $50\text{mg}/\text{m}^3$ （外环内区域） $80\text{mg}/\text{m}^3$ （外环外区域）。新标准下，燃油锅炉达标率约为 6.1%，燃气锅炉为 15.7%。

相对烟尘、二氧化硫而言，氮氧化物的达标率较低，目的通过标准倒逼本市锅炉进行低氮氧化物改造。

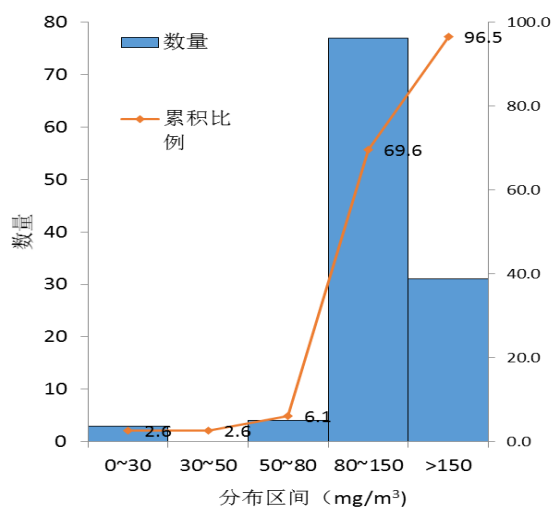


图 23 燃油

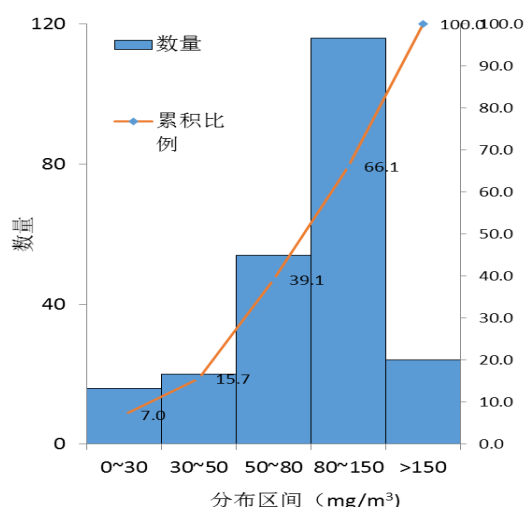


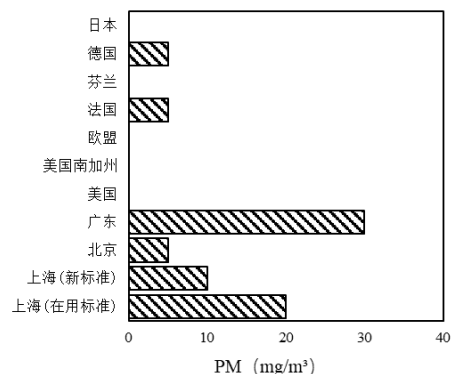
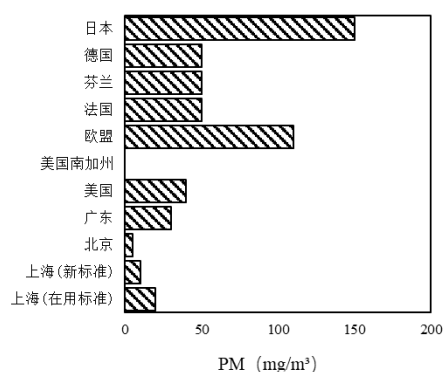
图 24 燃气

表 12 氮氧化物标准限值

NOx	燃煤	燃油	燃气
北京	30 (4月1日起新建), 80 (4月1日前新建), 150 (禁燃区外)		
天津	200	150	300
拟设定值	禁排	50	50

6 本标准限值及国内外相关限值的比较

图 25 为各种大气污染物的上海市现行标准及新标准与国际内外标准的比较。燃油锅炉和燃气锅炉 PM 的新标准限值相对现行减少一半，但是仍低于北京和美国加州现行标准；SO₂ 的新标准接近或等于北京的现行标准；NO_x 的新标准高于北京现行标准但低于美国南加州现行标准。各项污染物排放限值均达到国际较严格水平。



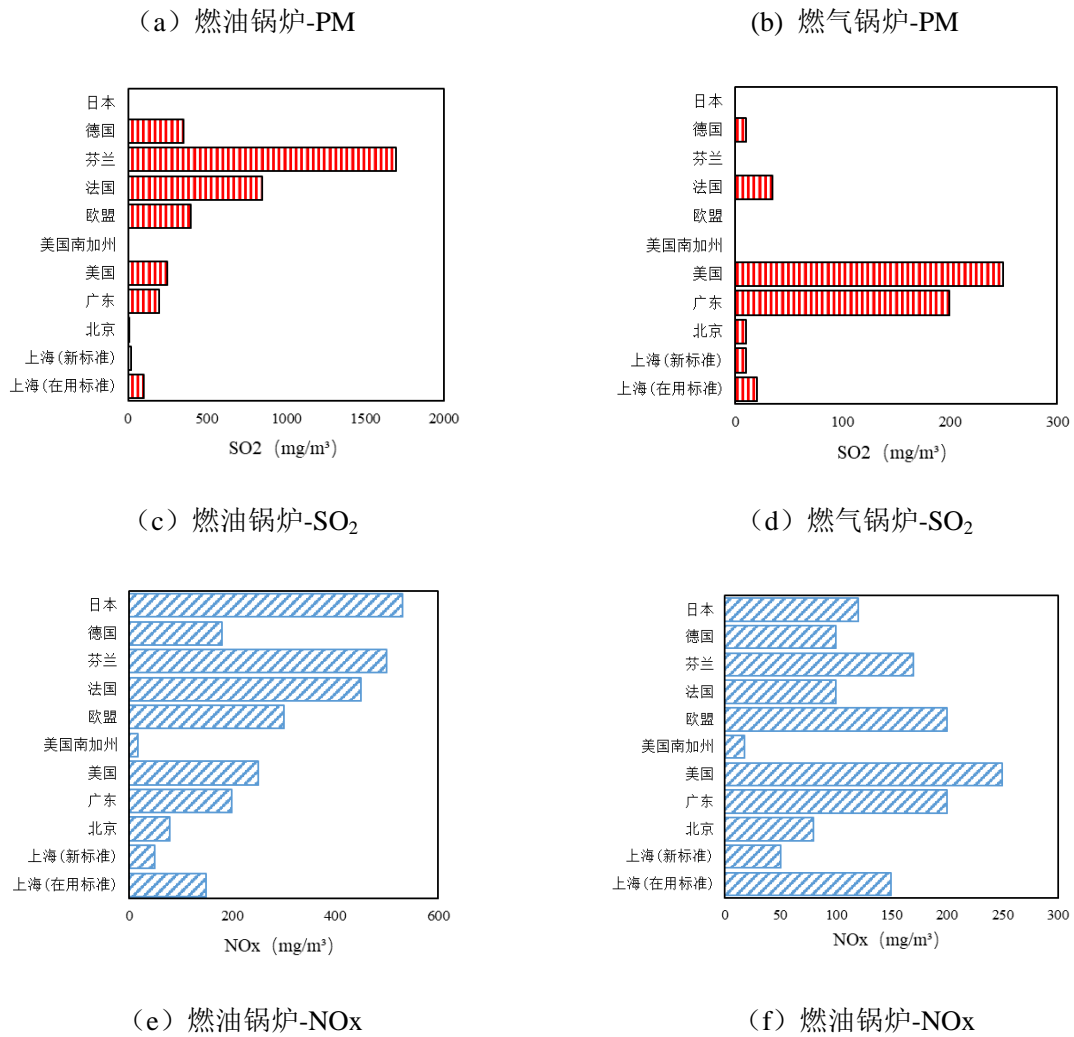


图 25 国内外标准比对

7 标准实行的技术经济及环境效益分析

7.1 达标排放技术分析

7.1.1 烟尘达标排放技术分析

本修订稿中燃油及燃气锅炉烟尘限值均为 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 。烟气除尘技术已经较为成熟，燃油锅炉中通过燃用普通柴油也可达到本标准限值。燃气锅炉燃用清洁燃料即可满足标准要求。

7.1.2 二氧化硫达标排放技术分析

本修订稿中燃油、燃生物质锅炉二氧化硫限值为 $20\text{mg}/\text{m}^3$ ，燃气炉为 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 。本修订稿标准进一步严化了二氧化硫限值，促使相关企业进一步优化及加强脱硫设施运营管理。燃重油的锅炉可以通过燃用低硫份油、安装烟气脱硫设施或清洁

能源替代达到此限值。根据测试数据，使用清洁能源的燃气锅炉达标应无问题。

7.1.3 氮氧化物达标排放技术分析

本修订稿中燃气锅炉为 $50\text{mg}/\text{m}^3$ ，外环线内燃油锅炉为 $50\text{mg}/\text{m}^3$ ，外环线外燃油锅炉为 $80\text{mg}/\text{m}^3$ 。燃油、燃气锅炉可使用低氮燃烧器技术、分级燃烧技术和烟气再循环技术、表面燃烧技术等低氮燃烧技术降低排放水平。分级燃烧+烟气再循环(FGR)技术可以达到 $80\text{mg}/\text{m}^3$ 的排放水平，分级燃烧+烟气再循环(FGR)可以达到 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 的排放水平，表面燃烧+烟气再循环(FGR) $30\text{mg}/\text{m}^3$ 的排放水平。根据本课题组的测试数据，采用合适的低氮技术组合的燃、油气锅炉达到 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 的排放水平是可行的。

7.1.4 汞及其化合物达标排放技术分析

本修订稿中燃煤锅炉汞及其化合物限值为 $0.03\text{mg}/\text{m}^3$ 。目前工业锅炉汞排放数据不多，一般而言，除尘、湿法脱硫设备对烟气中汞有协同脱除作用，配备了完善除尘、脱硫设施的工业锅炉可满足此标准限值。

7.2 技术经济分析

按照 2012 年环统数据，本市工业锅炉总数约为 13000 蒸吨。锅炉高效除尘脱硫改造每蒸吨按 10 万元计，低氮氧化物改造每蒸吨按 4 万元计。对于氮氧化物指标，根据 NO_x 控制目标的不同，其技术经济分析分为以下几种（表 13）：

表 13 氮氧化物技术经济分析

NO _x 控制目标	适用技术	低氮改造成本			运行成本分析
		供应商	每蒸吨单价/万元	总蒸吨成本/亿元	
80 mg/m ³	分级燃烧+烟气再循环(FGR)	进口	7.50	8.0	燃烧氧量控制比较好，调节比比较高，锅炉的日常运行能耗不增加
		国产	3.75	4.0	
50 mg/m ³	分级燃烧+烟气再循环(FGR)	进口	10.00	8.9	燃烧氧量控制比较好，调节比比较高，锅炉的日常运行能耗不增加
		国产	5.00	4.5	
30 mg/m ³	表面燃烧+烟气再循环(FGR)	进口	12.50	10.1	燃烧效率较常规燃烧器低，可能会增加 5%-10% 的运行成本，同时锅炉满负荷出力可能会降低 10% 以上，可能有安全性影响
		国产	6.25	5.1	

7.3 环境效益分析

7.3.1 减排效果的计算方法

本标准减排量计算方法如下式所示：

$$Q = A \cdot (EF_{i\text{现状}} - EF_{i\text{达标}})$$
$$Q = A^{\text{燃油}} \cdot (EF_{\text{现状}}^{\text{燃油}} - EF_{\text{新标准}}^{\text{燃油}}) + A^{\text{天然气}} \cdot (EF_{\text{现状}}^{\text{天然气}} - EF_{\text{新标准}}^{\text{天然气}})$$

Q：减排量；

A：燃料的活动量；

EF_{现状}：燃料现状的排放因子；

EF_{新标准}：燃料达标的排放因子。

7.3.2 超标情况预测

通过对上海市各个区县的锅炉排放实测和排放清单计算，预测新标准下上海市工业燃油、燃气锅炉超标情况如下：

在新标准下，燃油锅炉的烟尘、二氧化硫和氮氧化物的超标率分别为 41.7%、31.9%和 93.9%，燃气锅炉的烟尘、二氧化硫和氮氧化物的超标率分别为 22.4%、7.3%和 84.3%。

7.3.3 减排量计算结果

按照本市 2016 年排放清单数据，燃油、燃气锅炉的烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放总量分别为 0.68 万吨、0.88 万吨、0.03 万吨。经计算得到本市燃油、燃气锅炉经过改造烟尘、二氧化硫、氮氧化物总的减排量分别为 0.01 万吨、0.43 万吨、0.29 万吨。

8 贯彻实施标准的建议

为保证本标准的顺利实施，课题组提出建议如下：

(1) 本标准在修订时考虑与现行标准的连续性，设定了过渡期的排放限值，但由于本标准严化幅度较大，现有锅炉需进一步优化运行或改造方可达标，故希望在标准颁布后加大宣贯力度，组织对相关人员的培训促使排污单位从事锅炉管理和运行人员理解掌握理解本标准的内容，尽早规划准备。

(2) 锅炉大气污染物的排放与燃料品质密切相关，尤其是使用清洁能源的

燃气锅炉，除采用低氮燃烧技术外，并无烟尘及二氧化硫控制措施，故实施本标准需要加强对燃气品质的监管，控制污染从源头着手。

(3) 鼓励、引导和扶持国内有技术实力的工业锅炉生产、设计单位，针对新标准开展工业锅炉的低氮燃烧技术开发、锅炉炉体优化匹配工作，为市场提供能够满足低氮要求的国产工业锅炉。

(4) 开展负荷变动（出力情况）对锅炉氮氧化物排放浓度影响研究。

(5) 开展对各区县生物质锅炉大气污染物排放状况的摸底调查及评估。