

《燃气锅炉及固定式燃气轮机大气污染物排放标准》

（送审稿）编制说明

1.项目背景

1.1 任务来源

随着燃气轮机发电厂（以下简称“燃机电厂”）装机容量的不断增加，加之燃机电厂主要分布于环境容量有限的经济较发达地区和城市，燃气轮机氮氧化物排放问题愈来愈受到关注，北京、天津等地在国家大气污染物排放标准的基础上又出台了更为严格的氮氧化物排放标准。为贯彻落实《粤港澳大湾区发展规划纲要》中关于生态环境建设要求，对标世界一流湾区，以深圳建设中国特色社会主义先行示范区契机，进一步加强深圳市生态环境保护工作，深圳市应抓紧研究并制定相应的燃气轮机大气污染物排放。

在以天然气为主要化石能源结构的大背景下加强天然气使用终端关键设备的管控是深圳市未来环境管理的重点。2019年深圳市锅炉已全面完成“煤改气”改造工作，工业锅炉成为最主要的天然气使用终端，其污染物排放管理应放在突出位置，鉴于当前执行排放标准较为宽松，且燃气锅炉将作为生产生活的刚性需求长期存在，为保障城市发展的同时实现空气质量改善，保护人体健康，制定燃气锅炉大气污染物地方排放标准具有时代背景，且符合深圳市环境管理需求。

2018年12月，深圳市生态环境局委托西安热工研究院有限公司苏州分公司开展《燃气锅炉及固定式燃气轮机大气污染物排放标准》课题，主要研究内容包括：

（1）梳理国内外燃机环保排放现状，分析国内外燃机氮氧化物排放相关标准、政策以及已实施脱硝的燃机发电经济性和社会效益。

（2）实地调研全市在役燃机电厂氮氧化物排放和脱硝改造情况，结合调研和研究的情况，分析在不同排放限值下，全市燃机进一步降低氮氧化物排放浓度的技术和经济可行性，并提出燃机优选的环保指标，编制深圳市《燃气锅炉及固定式燃气轮机大气污染物排放标准》及编制说明。

（3）梳理国内外天然气锅炉环保排放现状，研究国内外燃气锅炉污染物排放相关标准、政策、分析已实施环保改造案例及其经济性和社会效益。

（4）实地调研全市在役燃气锅炉污染物排放和环保改造情况，结合调研和研究的情况，分析在不同排放限值下，全市燃气锅炉进一步降低污染物排放浓度的技术经济可行性，并提出燃气锅炉优选的环保指标，编制深圳市《燃气锅炉及固定式燃气轮机大气污染物排放标准》及编制说明。

1.2 主要工作过程

（1）立项阶段

臭氧污染防治一直是深圳市环境领域的重点问题，其前体物——氮氧化物的控制是防治工作的重要一环，在近几年的不断努力下，2022年底深圳市全面完成燃气工业锅炉的低氮燃烧改造，即氮氧化物排放浓度不高于30 mg/m³；2020年已完成全部燃气电厂降氮脱硝改造。加之2022年深圳市生态环境局和深圳市财政局联合印发的《深圳市大气环境质量提升补贴办法（2022—2025年）》，为推行更为严厉的排放标准提供了有利的环境和政策基础。

同时，在“深圳标准建设”，构建生态环境保护标准体系等工作要求，以及2019年8月《中共中央 国务院关于支持深圳建设中国特色社会主义先行示范区的意见》指导下，为提升深圳市氮氧化物排放浓度治理水平，深圳市生态环境局就《燃气锅炉及固定式燃气轮机大气污染物排放标准》提请立项申请，并于2022年5月11日，收到深圳市市场监督管理局通知，予以立项。

（2）起草阶段

2018年12月起，标准编制组进行了对国内外相关排放标准、污染防治技术、各类型燃气轮机燃烧技术发展状况、行业相关环保政策等内容的调研。对深圳市部分在役燃气轮机发电厂和在建燃气轮机发电厂开展现场调研工作，了解电厂生产工艺、机组运行工况变化、年发电状况、污染物排放水平、污染防治技术成本、管理状况等。同时，对北京、江苏等地燃气电厂的氮氧化物排放、低氮燃烧器和选择性催化还原烟气脱硝（SCR）改造现状、相关政策等方面进行了调研。

标准编制组也先后开展了燃气锅炉的国内外相关标准及防治技术的调研、深圳市燃气锅炉及其排放现状调研、国内燃气锅炉低氮改造技术实践调研、深圳市燃气锅炉适用控制技术分析等工作。收集深圳市燃气锅炉分布、保有量信息，结合2018年燃气锅炉专项测试数据，对燃气锅炉数量、容量分布以及现有排放状况进行了分析。

在广泛调研和技术交流的基础上，并依据现场测试结果的分析统计，以及在充分考虑技术达标率、相关管理部门意见的基础上，形成深圳市《燃气锅炉及固定式燃气轮机大气污染物排放标准》标准初稿及编制说明。同时，开展标准初稿及编制说明讨论会，重点对标准适用范围、污染物控制项目及指标、排放限值、监测分析方法、运行管理要求、成本效益分析等标准主要技术内容进行充分论证后确定，形成了标准文本及其编制说明征求意见稿。

（3）征求意见阶段

本次燃气锅炉及固定式燃气轮机大气污染物排放标准通过3种方式广泛征求意见，分别为：通过内部系统向相关机关单位征求意见、在深圳市生态环境局门户网站上公示向人民群众广泛征求意见，以及邀请行业内专家开展专家咨询论证会。

内部征求意见方面，深圳市生态环境局于2022年5月，向24个局内部门、单位，19个局外单位发送征求意见稿，获得反馈37份，汇总意见建议30条，均进行了采纳修改。

社会公示方面，深圳市生态环境局于2022年5月26日，在其门户网站上对标准正文和编制说明进行了公示，公示时长2个月，收到回复94条，相关回复93条，其中群众十分关心燃气锅

炉氮氧化物限值情况，涉及回复92条，进行了统一回复。

专家咨询论证方面，深圳市生态环境局于2022年8月1日邀请国内5位行业内专家，对标准内容及相关材料进行咨询论证，在专家咨询论证会上，相关专家共提出3条建议，均进行了采纳修改。

2023年9月4日，根据征求意见情况进一步修改完善，形成标准送审稿。

1.3 燃气轮机相关标准研究

1.3.1 欧盟

(1) 《大型燃烧企业大气污染物排放限制指令》（2001/80/EC）

1988年欧共体发布了适用于12个国家的热功率大于50 MW燃烧装置的大气污染物排放限值即88/609/EEC导则，又于1994年和2001年两次对指令作了修改。

现行的欧盟《大型燃烧企业大气污染物排放限制指令》（2001/80/EC）规定了燃天然气的燃气轮机组NO_x排放限值执行50 mg/m³，燃用除天然气外的气态燃料和燃油机组NO_x排放限值执行120 mg/m³；对燃用气态燃料的燃气轮机组的颗粒物及SO₂无排放控制要求。

燃气轮机NO_x排放限值是指烟气中含氧量在15%，机组负荷在70%及以上时的排放限值。

(2) 大型火力发电厂最佳可行技术（BAT）

1996年9月，欧盟执委会提出了污染综合防治指令（IPPC指令）。指令要求成员国建立包括制订排放限值、推广最佳可行技术（BAT）的许可制度。2008年1月，欧盟推出综合污染防治指令2008/1/EC，根据该指令欧盟制订了一些行业的最佳可行技术参考文件（简称BREF），要求企业优先达到文件规定的排放限值，以此作为发放排污许可证的依据。

对于燃气电厂中基于最佳可行技术下的NO_x及一氧化碳排放水平见表1-1。对新建燃气轮机而言，干式低氮燃烧（DLN）为最佳可行技术。对于现有燃气轮机，水或蒸汽喷射或者转换为DLN技术为最佳可行技术。对多数燃气轮机而言，SCR也被视为最佳可行技术。一氧化碳总是作为燃烧过程的中间产物出现，最大限度地减少一氧化碳排放的最佳可行技术是完全燃烧，并结合良好的锅炉设计、运用高性能监控和过程控制技术以及燃烧系统的维护。

表 1-1 基于最佳可行技术的 NO_x 排放水平

电厂类型	与最佳可行技术相关的排放水平 (mg/m ³)		O ₂ 含量 (%)	备注
	NO _x	CO		
燃气轮机				
新建燃气轮机	20-50	5-100	15	干式低氮燃烧或SCR
现有燃气轮机的DLN	20-75	5-100	15	干式低氮燃烧用作改造
现有燃气轮机	50-90	30-100	15	水和蒸汽喷射或SCR
CCGT（联合循环燃气轮机）				
无补充燃烧的新 CCGT（HRSG）	20-50	5-100	15	干式低氮燃烧或SCR
无补充燃烧的现有 CCGT（HRSG）	20-90	5-100	15	干式低氮燃烧或水和蒸汽喷射或 SCR
有补充燃烧的新	20-50	30-100	15	干式低氮燃烧或低NO _x 锅炉（就锅炉

CCGT (HRSG)				而言) 或SCR或SNCR
有补充燃烧的现有 CCGT (HRSG)	20-90	30-100	15	干式低氮燃烧或水和蒸汽喷射以及 低NO _x 锅炉 (就锅炉而言) 或SCR或 SNCR
备注: DLN: 干式低氮燃烧; HRSG: 余热锅炉; CCGT: 联合循环燃气轮机; SCR: 选择性催化还原脱硝技术; SNCR: 选择性非催化还原脱硝技术。				

1.3.2 美国

美国环境保护的法律法规十分健全。其中与火电厂污染物控制关系十分密切、较重要的包括以下相关排放标准。

(1) 《新污染源排放标准》(NSPS)

为使固定污染源的排放符合排放标准,《清洁空气法》要求美国环保署制定和实施适用于新建或改建工业污染源的全国统一的新污染源排放标准(NSPS),该排放标准目前已经被用于对多种重点排放源,如发电厂、炼油厂、水泥厂、工业锅炉等污染物的排放控制。对于燃气轮机发电厂,在固定燃烧源排放标准中规定了燃气轮机发电机组的NO_x和SO₂排放限值,具体见表1-2。

表 1-2 固定式燃气轮机 NO_x 排放限值

燃气轮机类型	燃料类型	燃气轮机最大负荷 时热输入	排放标准	
		(MW)	ppm	mg/m ³
新建 汽轮机	天然气(电力驱动)	≤14.64	42	86
	天然气(机械驱动)	≤14.64	100	205
	天然气	>14.64~≤248.86	25	51
	燃气(除天然气外,电力驱动)	≤14.64	96	197
	燃气(除天然气外,机械驱动)	≤14.64	150	308
	燃气(除天然气外)	>14.64~≤248.86	74	152
新建、改建或 重建汽轮机	天然气	>248.86	15	31
	燃气(除天然气外)	>248.86	42	86
改建或重建汽 轮机	液体燃料	≤14.64	150	308
	天然气	>14.64~≤248.86	42	86
	燃气(除天然气外)	>14.64~≤248.86	96	197
位于北极圈以北(北纬66.5度)的汽轮机,运行低于 75%最大负荷的汽轮机,改建或重建的临海燃气轮机		≤30 MW 输出	150	308
		>30 MW 输出	96	197
独立于燃气轮机的热循环机组		所有类型	54	111

(2) 最佳可行控制技术(BACT)

为实现国家环境空气质量标准,各州和受污染的城市地区必须制定州实施计划。州实施计划必须要求在未达标地区新增的工业排放源实现“最低可得排放速率”(Lowest Achievable Emission Rate, LAER),该标准是针对具体设备的,基于技术的排放标准。对于已经达到国家环境空气质量标准的地区,州实施计划必须包含防止大气质量发生“重大恶化”的措施,并且要求新增污染源采用“最佳可得控制技术”(Best Available Control Technology, BACT),该标准也是针对具体设备的,基于技术的排放标准,可能与最低可得排放标准相同,也可能比最低可得排放标准宽松,取决于成本考虑。

以加州为例,1999年加州空气资源委员会(ARB)通过了《电厂选址和最佳可行控制技

术指导》，对于 ≥ 50 MW的燃气轮机发电厂，ARB推荐的基于BACT的大气污染物排放水平见表1-3。

表 1-3 加州对于 ≥ 50 MW 的燃气轮机发电厂的 BACT 排放限值

NO _x	CO	VOC	PM ₁₀	SO _x	NH ₃
联合循环及废热发电					
2.5 ppmvd (15%O ₂ 、1h 滚动平均) 或 2ppmvd (15%O ₂ 、3h 滚动平均)	6 ppmv (15%O ₂ 、3h 滚动平均)	2 ppmvd (15%O ₂ 、3h 滚动平均)	排放限值对应于天然气含硫量 15.09 ppm	≥5 ppmvd (15%O ₂)	
简单循环及废热发电					
5 ppmvd (15%O ₂ 、3h 滚动平均)	6 ppmv (15%O ₂ 、3h 滚动平均)	2 ppmvd (15%O ₂ 、3h 滚动平均)	排放限值对应于天然气含硫量 15.09 ppm	≥5 ppmvd (15%O ₂)	

1.3.3 中国香港

香港电厂最佳可行方法指导说明（A GUIDANCE NOTE ON THE BEST PRACTICABLE MEANS FOR ELECTRICITY WORKS BPM 7/1）。该条例规定了为达到最佳可行方法所需的最低要求。适用于1991年1月1日后建成的大于等于以下数值的所有单位【燃煤电厂： ≥ 200 MW（电输出功率）；燃气电厂： ≥ 15 MW（电输出功率）；燃油电厂（调峰电厂）： ≥ 15 MW（电输出功率）】。

对于燃气轮机组，规定的排放限值（燃烧过程中）为：

颗粒物—5 mg/m³（2小时平均）；

SO₂—10 mg/m³；

NO_x（NO₂）—90 mg/m³。

1.3.4 中国

我国现行的《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223—2011），2011年1月提出，其中规定的新建燃用天然气的燃气轮机组颗粒物、SO₂及NO_x排放限值分别为5 mg/m³、35 mg/m³和50 mg/m³。

表 1-4 《火电厂大气污染物排放标准》中燃气轮机组排放标准（mg/m³）

燃料和热能转化设施类型	污染物项目	适用条件	限值（mg/m ³ ）
以气体为燃料的锅炉或燃气轮机	颗粒物	天然气锅炉及燃气轮机组	5
		其他气体燃料锅炉及燃气轮机组	10
	SO ₂	天然气锅炉及燃气轮机组	35
		其他气体燃料锅炉及燃气轮机组	100
	NO _x （以NO ₂ 计）	天然气锅炉	100
		其他气体燃料锅炉	200
		天然气燃气轮机组	50
		其他气体燃料燃气轮机组	120

1.3.5 北京市

北京市《固定式燃气轮机大气污染物排放标准》（DB11/ 847—2011）中规定新建燃用天然气的燃气轮机组颗粒物、SO₂及NO_x的排放限值分别为5 mg/m³、20 mg/m³和30 mg/m³。

1.3.6 天津市

天津市《火电厂大气污染物排放标准》（DB12/ 810—2018）中规定现有、新建燃用天然气的燃气轮机组NO_x的排放限值分别为35 mg/m³、30 mg/m³。未对颗粒物、SO₂排放浓度进行了限定。

1.3.7 江苏省

江苏省2021年《固定式燃气轮机大气污染物排放标准》（DB32/ 3967—2021）中规定现有、新建燃用天然气的燃气轮机组NO_x的排放限值分别为30 mg/m³、15 mg/m³。

1.3.7 本文件与国内外燃气轮机标准对比

本文件与主要国家、地区及国际组织同类标准的对比可以发现，本文件严于国内外的国家标准以及国内地方标准，仅较美国（BACT 或 LAER）略为宽松。

表 1-5 国内外燃气轮机组排放标准对比分析

地区		NO _x	粉尘	SO ₂
国外标准	欧洲（EC）	50 mg/m ³	无要求	无要求
	欧洲（BAT）	20-50 mg/m ³	无要求	无要求
	美国（NSPS）	25 mg/m ³	无要求	无要求
	美国（BACT 或 LAER）	5 mg/m ³ （联合） 10 mg/m ³ （简单）	无要求	排放限值对应于天然气含硫量 15.09 mg/Nm ³
	日本	70 mg/m ³	无要求	无要求
国内标准	中国	50 mg/m ³	5 mg/m ³	35 mg/m ³
	北京	30 mg/m ³	5 mg/m ³	20 mg/m ³
	天津	35 mg/m ³ （现有） 30 mg/m ³ （新建）	5 mg/m ³	5 mg/m ³
	江苏	30 mg/m ³ （现有） 15 mg/m ³ （新建）	5 mg/m ³	5 mg/m ³
本文件		15 mg/m ³ （现有） 15 mg/m ³ （新建）	5 mg/m ³	5 mg/m ³

1.4 燃气锅炉相关标准研究

1.4.1 国内燃气锅炉相关标准调研

（1）2014年5月16日国家发布了《锅炉大气污染物排放标准》（GB 13271—2014），规定了大气污染物特别排放限值，提高了各项污染物排放标准。2014年7月1日起，强制性国家标准《锅炉大气污染物排放标准》（GB 13271—2014）开始正式实施。

表 1-6 在用燃气锅炉大气污染物排放限值浓度

污染物项目	限值（mg/m ³ ）
颗粒物	30
二氧化硫	100
氮氧化物	400

表 1-7 新建燃气锅炉大气污染物排放限值浓度

污染物项目	限值 (mg/m ³)
颗粒物	20
二氧化硫	50
氮氧化物	200

表 1-8 燃气锅炉大气污染物特别排放限值

污染物项目	限值 (mg/m ³)
颗粒物	20
二氧化硫	50
氮氧化物	150

(2) 北京市地方标准《锅炉大气污染物排放标准》(DB11/139—2015)。2015 年 5 月,北京市修订并发布《锅炉大气污染物排放标准》该标准重点加严了锅炉 NO_x 排放限值,接近发达国家最严的锅炉排放标准,详见下表。

表 1-9 北京市新建工业锅炉大气污染物排放浓度限值

污染物 (mg/m ³) \ 执行时间	2017 年 3 月 31 日前的新建锅炉	2017 年 4 月 1 日起的新建锅炉
颗粒物	5	5
二氧化硫	10	10
NO _x	80	30

表 1-10 北京市在用锅炉大气污染物排放浓度限值

污染物 (mg/m ³) \ 执行时间	高污染燃料禁燃区内	高污染燃料禁燃区外
	2017 年 4 月 1 日后	标准实施之日起
颗粒物	5	10
二氧化硫	1	20
NO _x	8	150

(3) 上海市地方标准《锅炉大气污染物排放标准》(DB31/387—2018)

上海市 2018 年 6 月发布了《锅炉大气污染物排放标准》,标准中加严燃气锅炉 NO_x 排放限值,见表 1-11。

表 1-11 上海市燃气工业锅炉 NO_x 排放限值

锅炉分类	实施日期	NO _x 排放限值 (mg/m ³)
在用锅炉	标准实施之日起	150
	2020 年 10 月 1 日起	50
新建锅炉	标准实施之日起	50

(4) 天津市地方标准《锅炉大气污染物排放标准》(DB12/151—2016)

2016 年天津市修订了《锅炉大气污染物排放标准》（DB12/ 151—2016），标准中加严了燃气工业锅炉 NO_x 排放限值，见表 1-12。

表 1-12 天津市燃气工业锅炉 NO_x 排放限值

分类	NO _x 排放限值 (mg/m ³)
在用	150
新建	80

(5) 广东省地方标准《锅炉大气污染物排放标准》（DB44/ 765—2019）

表 1-13 广东省燃气工业锅炉 NO_x 排放限值

锅炉分类	实施日期	NO _x 排放限值 (mg/m ³)
在用锅炉	标准实施之日起～2020 年 7 月 1 日	150
	2020 年 7 月 1 日起	150
新建锅炉	标准实施之日起	150
特别排放限值	2021 年 1 月 1 日起	50

(6) 河北省地方标准《锅炉大气污染物排放标准》（DB13/ 5161—2020）中规定，自本文件实施之日起，新建锅炉执行表 1-14 规定的大气污染物排放限值。

表 1-14 大气污染物排放浓度限值

污染物项目	NO _x 排放限值 (mg/m ³)
颗粒物	5
二氧化硫	10
氮氧化物（以NO ₂ 计）	50

(7) 太原市 2019 年度燃气锅炉低氮改造工作方案

1) 改造后氮氧化物排放浓度不高于 30mg/m³。

2) 对于已经达到 50mg/m³ 排放标准的天然气锅炉，可以不进行低氮改造，维持正常运行即可。

1.4.2 国外燃气锅炉相关标准调研

部分国家的燃气锅炉颗粒物、二氧化硫、氮氧化物排放限值水平如下表所示。

表 1-15 国外燃气锅炉排放限值 (mg/m³)

标准类别	颗粒物	二氧化硫	氮氧化物
美国加州	/	/	18-60
欧盟	/	/	170
法国	5	35	100-350
芬兰	/	/	170-400
德国	5	10	100-150

标准类别	颗粒物	二氧化硫	氮氧化物
日本	30-100	-	120-300
世界银行（污染预防和控制手册 1998）	/	/	320

1.4.3 本文件与国内外燃气锅炉标准对比

表 1-16 汇总了国内各省市现行标准规定的燃气锅炉颗粒物、SO₂ 和 NO_x 的排放限值。从表中可知，本文件与国内标准相比，颗粒物、二氧化硫、氮氧化物均达到国内较严格水平，并且低于当前最严格的北京市地方标准。

表 1-16 国内燃气锅炉大气污染物排放浓度限值（mg/m³）

标准号	锅炉类型		NO _x	SO ₂	颗粒物
本文件	新建	标准实施之日起	30	10	5
	在用	标准实施之日起 1 年后			
国家标准 GB 13271—2014	新建		150	50	20
	在用		400	100	20
	特别排放限值		150	50	30
北京市地方标准 DB44/ 765—2015	新建		30	10	5
	在用		80	10	5
上海市地方标准 DB31/ 387—2018	新建		50	10	10
	在用	标准实施之日起-2020 年 10 月 1 日	150	20	20
		2020 年 10 月 1 日起	50	10	10
河北省地方标准 DB13/ 5161—2020	新建	标准实施之日起	50	10	5
	在用	2021 年 6 月 1 日起	50	10	5
天津地方标准 DB12/ 151—2016	新建		80	20	10
	在用		150	20	10
广东省地方标准 DB44/ 765—2019	新建		150	50	20
	在用	标准实施之日起-2020 年 7 月 1 日	150	50	20
		2020 年 7 月 1 日起	150	50	20

2 深圳市燃机及燃气锅炉现状及发展趋势

2.1 深圳市燃机现状

2.1.1 燃机行业规模及现状

深圳市第一座燃气轮机发电厂深圳南天电力有限公司于 1995 年 5 月投产，经过二十余年的发展，截止到 2019 年底，燃机机组容量已投运 478 万千瓦。深圳市严格控制燃煤发电机组建设，积极发展燃气轮机发电厂，建成南天电力、南山热电、大唐宝昌、广前电力、华电深圳、中海油深圳等多座燃气轮机发电厂，如表 2-1 所示。

表 2-1 深圳市现有在运和在建燃气机组装机情况（适用于本文件的现有机组）

序号	项目名称	机组类型	装机规模（万千瓦）	所在地区
合计			478	
已投运机组（20 套）				
1	深圳南天电力有限公司	调峰	3×22	福田区
2	深圳市广前电力有限公司	调峰	3×39	南山区
3	深圳南山热电股份有限公司南山热电厂	调峰	3×18	南山区
4	深圳能源集团股份有限公司东部电厂	调峰	3×39	大鹏新区
5	深圳钰湖电力有限公司	调峰/热电联产	2×18	龙岗区
6	深圳大唐宝昌燃气发电有限公司	调峰	2×18	龙华区
7	华电国际电力股份有限公司深圳公司	热电联产	2×20	坪山区
8	中海油深圳电力有限公司	调峰	2×18	大鹏新区

2.1.2 燃机企业地理分布

深圳市固定式燃气轮机主要集中在南山、福田、龙岗及大鹏新区等地区。

2.1.3 燃机电厂主机现状

深圳市固定式燃气轮机由三菱、GE、阿尔斯通等公司生产制造。在运机组中，三菱燃机 6 台、GE 燃机 12 台、阿尔斯通燃机 2 台。

2.1.4 燃机氮氧化物排放量估算

根据深圳市“十三五”电力发展规划，“十三五”期间燃气轮机机组容量将达到 478 万千瓦，其中 F 级燃机容量预计达到 211 万千瓦，E 级燃机容量预计达到 267 万千瓦。假定所有燃机年利用小时按 5000 小时计，F 级燃气轮机机组标准状态下 15%基准氧含量时干烟气量为 5 立方米每千瓦时，E 级燃气轮机机组标准状态下 15%基准氧含量时干烟气量为 6.4 立方米每千瓦时，在不采取烟气脱硝情况下，氮氧化物按达标排放 50 毫克每立方米计，每年排放的氮氧化物约 6.9 万吨。

虽然燃气轮机机组氮氧化物排放的初始浓度不高，但由于其单位发电量的烟气排放量大（燃煤电厂的标准烟气量是 3.5 立方米每千瓦时），故其氮氧化物排放总量相对较大，与深圳市“十三五”期间氮氧化物的减排要求不匹配，与大气环境改善要求也存在一定的差距。因此，需要进一步采取措施减少燃机机组氮氧化物的排放。

2.2 世界燃机技术发展趋势分析

燃气轮机技术的发展从上世纪 20 年代进入工业应用，90 年代以来，由于联合循环技术的成熟发展，机组效率整体得到较大提高，燃机在发电领域中得到了迅速发展，是当前应用较广的先进发电技术，如美国燃气轮机发电装机容量占总装机容量的比例已经超过 40%。

目前世界上燃机制造厂家真正技术独立的大型燃机制造商主要源于四家，即美国通用电气公司（GE 公司）、美国西屋公司（WH 公司）、德国西门子公司（SIEMENS 公司）、瑞典的阿西亚-布朗勃法瑞（ABB 公司），其他制造商多为从这四家引进技术进行生产。当然，其他一些制造商通过技术消化、引进和发展，有些已经有了自己的技术特点和产品，如日本三菱

公司（MHI）已经成为原美国 WH 技术的代表。

目前国际上的燃气轮机机组水平大致可以分为三个等级，即：

①普及机组：以 GE 公司 E 系列为代表的燃气轮机，额定功率为 10 万千瓦（110-190MW）等级的机组，包括 SIEMENS 公司的 2000E 系列、ABB 公司（现属 GE 公司）的 GT13 等机组。国际上这些机组的使用已经成熟普及，目前我国部分机型也已经普及应用。

②主力机组：以 GE 公司 F 系列为代表的燃气轮机，额定功率为 20 万千瓦（200-260MW）等级的机组，包括 SIEMENS 公司的 4000F 系列、ABB 公司（现属 GE 公司）的 GT26 等机组。这些都是目前国际上燃机发电的主力机组，也是我国目前燃气-蒸汽联合循环首选的先进机组。

③发展机组：以 GE 公司 H 系列为代表的燃气轮机，额定功率为 40 万千瓦（400 MW 以上）等级的机组，包括 SIEMENS 公司的 8000H 系列等机组。这些机组代表了目前国际燃机的最先进水平，也是燃机的发展方向，在美国国家能源部资助的先进燃机透平系统计划（ATS）中也包括该系列机组。

根据设计资料和对厂商资料的调研，不同厂商、机组等级的氮氧化物（NO_x）排放情况见表 2-2，表中氮氧化物排放浓度均为设计值或最佳值，当负荷低于 50%或高于 100%时，排放会有所增加。

表 2-2 不同厂商、机组等级 NO_x 排放情况

等级	生产商	典型燃机型号	低 NO _x 技术	NO _x 排放浓度（15 %O ₂ ）
E 级	GE	MS9001E	初级低 NO _x 技术	25 ppm
			高级 DLN 燃烧室	15 ppm
	西门子	SGT5-2000E	初级低 NO _x 技术	25 ppm
	安萨尔多	AE94. 2	高级 DLN 技术	15 ppm
F 级	GE	MS9351-FA	初级 DLN 燃烧室	25 ppm
			DLN 2.6+燃烧室	9ppm
	三菱	M501F / M701F	DLN 燃烧室	15~25 ppm
	ABB（已被 GE 收购）	GT24 / GT26	EV 型燃烧器	25 ppm
			环形燃烧器	25 ppm
	西门子	SGT5-4000F	PMP 燃烧器	15 ppm
H 级	安萨尔多	AE94. 3A	DLN 燃烧室	15~25 ppm
	GE	9HA	高级 DLN 燃烧室	25 ppm
	三菱	M701J	高级 DLN 燃烧室	25 ppm
	西门子	SGT5-8000H	高级 DLN 燃烧室	25 ppm
	安萨尔多	GT36	轴向分级燃烧室	25 ppm

由表 2-2 可以看出，随着技术的提高，采用低氮燃烧技术机组的氮氧化物排放浓度明显降低，GE 公司产品 E 级为 25 ppm（50 mg/m³），利用高级 DLN 燃烧室可降至 15 ppm；GE 公司 F 级利用 DLN2.6+燃烧室可降至 9 ppm（19 mg/m³），西门子公司产品 F 级燃机利用 PMP 燃烧器可降至 15 ppm（案例较少），三菱公司 F 级为 25 ppm。H 级燃机由于透平前温度更高，在 50%负荷以上运行时氮氧化物排放浓度一般保证在 25 ppm 以下。

2.3 深圳市燃气锅炉现状

2.3.1 燃气锅炉区域分布

深圳下辖 6 个行政区和 4 个新区，2019 年深圳市区在册的燃气锅炉共 605 台，总容量 1828.59 蒸吨。各区燃气锅炉分布情况如图 2-1 所示。深圳市燃气锅炉台数分布为：宝安区（183 台）、南山区（71 台）、龙岗区（74 台）、福田区（42 台）、罗湖区（32 台）、盐田区（12 台）、大鹏新区（17 台）、龙华新区（79 台）、光明新区（47 台）、坪山新区（48 台）。其中，行政区台数占 68.4%，功能新区台数占 31.6%。容量分布为：宝安区（534.04 t/h）、南山区（171.17 t/h）、龙岗区（163.29 t/h）、福田区（113.23 t/h）、罗湖区（54.13 t/h）、盐田区（35.4 t/h）、大鹏新区（85.48 t/h）、龙华新区（278.25 t/h）、光明新区（233.22 t/h）、坪山新区 160.40 t/h）。其中，行政区容量占 58.6%，功能新区容量占 41.4%。可见行政区锅炉数量较多，但容量较小，功能新区燃气锅炉数量较少，平均单台容量较大。

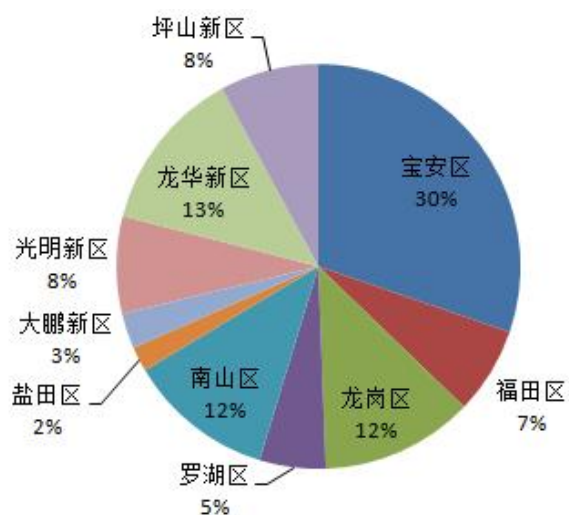


图 2-1 各区燃气锅炉分布

2.3.2 燃气锅炉容量分布

在燃气锅炉容量（M）分布方面，如图 2-2 所示， $M \leq 1\text{t/h}$ 的燃气锅炉，占燃气锅炉总量的 30.6%，容量占比约 5.6%； $1\text{t/h} < M \leq 3\text{t/h}$ 的燃气锅炉数量最多，占燃气锅炉总量的 41.0%，容量占比约 28.2%； $3\text{t/h} < M \leq 5\text{t/h}$ 的燃气锅炉数量占比约 13.4%，容量占比约 17.9%； $5\text{t/h} < M \leq 10\text{t/h}$ 的燃气锅炉数量占比约 11.7%，容量占比约 28.9%； $M > 10\text{t/h}$ 的燃气锅炉数量占比约 3.3%，容量占比约 19.4%。因此，从数量和容量分布来看，深圳市燃气锅炉以小型锅炉居多。

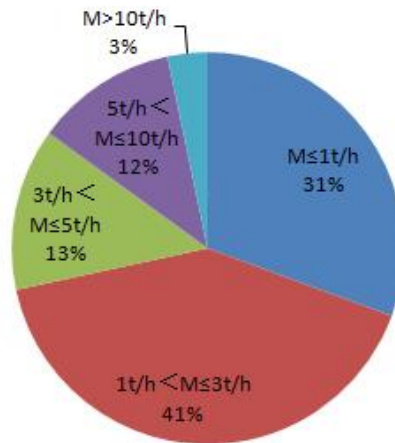


图 2-2 燃气锅炉不同容量区间的数量分布

3 标准制订的必要性

3.1 燃气轮机标准制订的必要性分析

3.1.1 深圳市相关产业政策及行业发展规划中的生态环境要求

2017年2月，深圳市人民政府发布“关于印发大气环境质量提升计划（2017-2020年）的通知”，通知要求：2020年底前，全市现有燃气发电机组通过低氮燃烧器改造或SCR脱硝改造，将E级发电机组额定工况下 NO_x 排放浓度控制在 25 mg/m^3 以下，F级发电机组额定工况下 NO_x 排放浓度控制在 15 mg/m^3 以下。通知对燃气轮机颗粒物 and SO_2 的排放限值没有明确规定。

2018年4月深圳出台了《2018年“深圳蓝”可持续行动计划》，要求燃气电厂2018年11月前通过改造使得所有机组氮氧化物排放均达到 15 mg/m^3 以下。

3.1.2 燃机行业发展带来的主要生态环境问题

随着燃气轮机发电厂规模的扩大，其排放的氮氧化物对城市环境质量的影响也会越来越大。一方面会导致地方空气质量中 NO_2 指标升高，另一方面会与VOCs等污染物发生复杂的光化学反应，导致 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 浓度升高。进一步削减燃气轮机的污染物排放对于改善周边城市的空气质量具有积极意义。

3.1.3 削减深圳市氮氧化物排放总量的需要

污染物减排是改善环境质量、解决区域性环境问题的重要手段。“十一五”期间国家通过实施 SO_2 减排措施，环境恶化趋势得到一定程度缓解，但总体环境形势依然严峻。大气污染突出表现在 SO_2 、 NO_x 等转化形成的细颗粒物污染加重，光化学烟雾频繁发生，许多城市和区域呈现复合型大气污染的严峻态势。因此，国家在“十二五”期间实施主要大气污染物 SO_2 总量控制的基础上将 NO_x 也纳入总量控制指标体系，实行统一要求、统一考核。

燃气轮机具有能源利用率高等诸多优势，总体大气污染物排放水平较低、但其单位发电量 NO_x 排放绩效较实施超低排放改造的燃煤机组更高（以 50 mg/m^3 排放现值测算），且 NO_x 排

放的总量逐年增加。根据规划，到“十三五”末，深圳市燃机总装机容量将达到 478 万千瓦。与此同时，天然气分布式能源系统是“十三五”期间深圳市鼓励发展的能源形式，由此带来的氮氧化物排放增量也不容忽视。

目前，深圳市内燃煤机组仅剩深能源妈湾电力公司，“十三五”期间深圳市氮氧化物排放总量削减和空气质量改善均将面临一定压力，必须对在运和新建燃气电厂氮氧化物排放进一步加严控制，否则燃机装机容量的迅速扩充将直接影响全省氮氧化物排放总量，抵消一部分燃煤电厂关停或脱硝治理的氮氧化物削减量。

3.1.4 持续改善深圳市环境空气质量的需要

固定式燃气轮机排放的主要污染物为 NO_x ， NO_x 排放对环境空气质量中可吸入颗粒物、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 O_3 均有较大影响，而 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 超标状况尚未得到明显缓解，因此必须通过采取严格控制措施降低深圳市 NO_x 的排放总量，才有可能进一步降低环境空气中污染物的浓度，从而达到持续改善深圳市环境空气质量的目标。

3.1.5 现行环保标准存在的主要问题

面对天然气发电的快速发展形势，深圳市目前还没有专门针对固定式燃气轮机的大气污染物排放标准，实际环境管理中只能采用国家标准。现有国家标准及广东省地方标准中各项指标过于宽松，目前很多电厂实际的 NO_x 排放值要低于国家标准，这不利于调动燃机电厂 NO_x 减排的积极性以及燃机技术水平的提高。

因此，急需根据深圳市已有燃机电厂实际情况和发展规划以及环境管理的需求，结合国内外先进的污染防治技术和成本分析，制定符合深圳市排放控制要求的固定式燃气轮机大气污染物排放标准，明确 NO_x 、 SO_2 和颗粒物的排放要求，凸显燃机电厂环保优势，并配套相应的监测、折算方法及运行管理要求，严格控制其大气污染物排放。

综上所述，深圳市《固定式燃气轮机大气污染物排放标准》的制定十分必要，标准实施后将有效削减 NO_x 排放、有效控制 NO_x 排放总量，对改善深圳市环境空气质量和保护人体健康具有十分重要的现实意义。

3.2 燃气锅炉标准制定的必要性分析

在能源结构优化调整的过程中，燃煤锅炉的比例有所减少，但燃气锅炉的用量却不断增大，燃气锅炉以天然气作为主要燃料，天然气燃烧产生的烟气中含大量的 NO_x 。

2018 年，深圳市人居环境委员会（后更名为“深圳市生态环境局”）对辖区内的 210 台燃气锅炉组织开展了排放现状污染源调查。根据调研结果， NO_x 均值水平为 93 mg/m^3 （@3.5% O_2 ），集中分布于 $80\sim 150 \text{ mg/m}^3$ （@3.5% O_2 ），基本符合《锅炉大气污染物排放标准》（GB 13271—2014）的特别排放限制要求。但与目前的低氮燃控技术相比较，仍有较大减排空间。

2015 年，北京市颁布并实施了地方标准《锅炉大气污染物排放标准》（DB11/ 139—2015），

该标准重点加严了燃气锅炉 NO_x 排放限值。目前该标准已实施多年，取得了预期的减排效益，并且极大地促进了燃气锅炉 NO_x 防治技术的发展，为深圳市制定地方标准提供了良好的基础和借鉴。

综上所述，虽然我市燃气锅炉基本符合了 GB 13271—2014 所规定的特别排放限值要求，但与环境空气质量达标和阶段性改善目标仍有很大差距。应结合成熟有效的污染防治技术开展燃气锅炉减排工程，进一步缩小排放量与环境容量的差距。鉴于当前执行排放标准较为宽松，且燃气锅炉将作为生产生活的刚性需求长期存在，为保障城市发展的同时实现空气质量改善，保护人体健康，拟制定深圳市地方标准《燃气锅炉大气污染物排放标准》，对燃气锅炉的排污行为从严控制。

4. 污染物控制技术

4.1 燃气轮机大气污染物产排污情况及控制技术

4.1.1 燃气轮机主要生产工艺及产排污情况

燃气轮机运行过程中排放的大气污染物主要有：NO_x、颗粒物、SO₂。其次，不完全燃烧会产生微量浓度的 CH₄、CO、VOC 等，其排放量低，对环境的影响有限，因此不在本文件制定内容之内。在未安装任何脱硫除尘环保设施的情况下，SO₂ 和粉尘实际排放水平平均远低于《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223—2011）规定的排放限值，也优于超低排放燃煤机组的排放水平，NO_x 为燃机电厂的主要污染物。此外，燃气电厂运行过程中除生活废水外，基本无生产废水外排，其噪声通过防噪墙等降噪措施处理后也能达到国家环保标准要求。

燃气轮机运行过程中排放的 NO_x 是天然气燃烧时产生的，由于天然气中氮气含量极低，因此燃机烟气中的 NO_x 生成机理主要是热力型和快速型，其中以热力型为主。通过调整过量空气系数、燃料燃烧方式，降低燃烧区温度及燃烧室停留时间，可以降低 NO_x 的生成。需要注意的是，NO_x 中以 NO 为主，NO₂ 占比约 20 %（与燃煤烟气 5 %有较大差异），且随负荷、天然气成分等因素变化而变化。

燃气轮机运行过程中排放的颗粒物浓度很低，其主要来源有三个：①天然气和助燃空气中含有一定量的粉尘（浓度约数十微克以下）；②燃烧不完全产生的炭黑、有机物等；③余热锅炉等内部构件产生的脱落。

燃气轮机生产过程中排放的 SO₂ 是由天然气中微量的硫化氢等含硫物质燃烧产生的，排放浓度取决于天然气的品质。

4.1.2 燃机行业排污现状

4.1.2.1 燃机 NO_x 排放现状

2017年2月，深圳市人民政府发布“关于印发大气环境质量提升计划（2017-2020年）的通知”，通知要求：2020年底前，全市现有燃气发电机组通过低氮燃烧器改造或SCR脱硝改造。

2018年4月深圳出台了《2018年“深圳蓝”可持续行动计划》，要求燃气电厂2018年11月前通过改造达到《计划》要求，即所有机组NO_x均达到15 mg/m³以下。

2019年03月至2019年10月，标准编制组先后对深圳市8座在役燃机电厂进行了污染物排放现状调研，所调研机组基本上已完成脱硝改造，部分正在实施改造工作。根据调研情况，E型机组主要为美国GE机组和ALSTOM机组，F型机组主要为三菱机组。根据美国GE燃机最新低氮燃烧技术发展应用现状，12套GE机组普遍实施了低氮燃烧器改造，改造后的NO_x排放在15 mg/m³以内；其余8套三菱、ALSTOM机组则采取了烟气脱硝SCR改造，设计脱硝效率普遍在80%以上，改造后NO_x稳定在10-15 mg/m³。

4.1.2.2 颗粒物排放现状

由于燃料和助燃空气中的颗粒物含量很低，燃烧不完全产生的颗粒物量也很低，因此燃机实际颗粒物排放浓度很低。统计数值多数为0 mg/m³。

由于目前在线测量表计的量程普遍很大，计量精度较差，监测值仅做参考。建议更换监测限更低、量程更小、精度更高的颗粒物监测仪。

4.1.2.3 SO₂排放现状

由于目前在线测量表计的量程普遍很大，计量精度差，部分电厂SO₂数据甚至出现大量负值。此外，CH₄等气体会产生较大的干扰，特别是燃机启动阶段SO₂数据严重失真。因此，建议更换测量方式以及量程。

由于燃料中总硫含量较低，且燃烧后会稀释约32倍，排放的SO₂应该小于4 mg/m³(对应于天然气总硫含量60 mg/m³)。所统计电厂SO₂数值多数为0 mg/m³左右，个别厂较高与监测仪器精度和燃气品质有关。

4.1.3 污染防治技术

燃气轮机发电厂燃料主要为天然气，天然气是一种清洁燃料，燃料能够在燃气轮机燃烧室中实现完全燃烧，此类电厂的颗粒物、SO₂排放浓度很低，其主要大气污染物为NO_x，因此调研的重点是NO_x污染防治技术。

目前，常用的控制和减少燃机NO_x排放量的途径大致可归纳为两类，一是燃烧控制，即在燃烧过程中控制NO_x的生成量，包括喷水或喷蒸汽及低氮燃烧技术；二是末端治理，即从烟气中去除NO_x，主要技术有SCR脱硝技术、SCO脱硝技术。

4.1.3.1 低氮燃烧技术

(1) 原理

低氮燃烧技术是一种控制NO_x较经济的方法。干式低氮燃烧室的基本特征是：空气与燃料混合，燃烧通过两个连续的步骤进行。通过助燃空气和燃料在燃烧前混合，可实现均匀的温度分布和较低的火焰温度，从而降低NO_x的排放。目前，对利用天然气的燃气轮机组来说干式低氮燃烧室是一种非常成熟的技术。深圳市燃机GE型燃机电厂均采用了低氮燃烧技术，据统计改造后的NO_x排放浓度为均在15 mg/m³以下。

（2）燃烧器改造费用

要实现 15 mg/m^3 的排放要求，需要燃烧器升级改造或加装 SCR。根据对国内外燃机电厂的低氮燃烧器改造费用的调研发现，低氮燃烧器改造费用因燃机厂家、参数不同而不同。常见主流燃机燃烧器的改造费用如表 4-1 所示。从表中可看出，燃烧器改造费用从 3200 万元~1.2 亿元不等，F 级燃机燃烧器改造费用三菱>GE>西门子，GE 的 E 级燃机燃烧器改造费用约为 3200 万，西门子的 E 级燃机燃烧器不可改造升级，三菱的 E 级燃机燃烧器未有改造案例和费用数据。

表 4-1 不同厂家、等级燃机燃烧器改造费用

级别	F 级			E 级		
厂家	西门子	GE	三菱	西门子	GE	三菱
燃烧器改造费用	4000 万元	5000 万元	1.2 亿元	不可改造	3200 万元	未有案例

4.1.3.2 SCR 脱硝技术

（1）原理

SCR 脱硝技术是指在催化剂的作用下，用还原剂（如 NH_3 或尿素）将烟气中的 NO_x 还原为无害的氮气和水的技术。脱硝系统采用高温催化剂，反应温度一般为 $300^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ ，催化剂以 TiO_2 为载体，主要活性成分为 $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3$ （ MoO_3 ）等金属氧化物。为保证脱硝效率，反应温度条件非常重要。该技术已广泛应用于日本、欧洲和美国等国家和地区燃机电厂的烟气净化。该技术既能单独使用，也能与其他 NO_x 控制技术（如低氮燃烧技）联合使用，具有脱除效率高（可达 90 %以上）、无副产物、装置结构简单、运行可靠、便于维护等优点。

（2）建造、改造费用

SCR 脱硝设备建造、改造费用因首次建造与后期改造、燃机等级不同而不同。燃机相同功率等级、不同锅炉厂家的 SCR 脱硝设备建造、改造费用略有差异，价格可相差 200 万元左右；首次建造 SCR 脱硝设备的费用为 1000~1500 万元，后期改造 SCR 脱硝设备的费用为 1400~1800 万元，可知因后期改造的重新施工等原因使得后期改造 SCR 脱硝设备费用比首次建造 SCR 脱硝设备的费用高 200~600 万元；F 级燃机燃气电厂比 E 级燃机燃气电厂建造、改造 SCR 脱硝设备的费用高 200~500 万元。

（3）运行维护费用

SCR 脱硝设备运行维护费用因采用技术不同而不同。SCR 脱硝设备每年的运行维护费用总计 70~300 万元。运行费用为 50~172 万元，多数电厂在 90~170 万元。还原剂主要采用尿素热解、水解和氨水蒸发技术，部分未预留 SCR 脱硝设备位置的燃机电厂改造时尚需考虑余热锅炉内受热面改造。

4.2 燃气锅炉污染物控制技术分析

燃气锅炉根据燃料类型可细分为天然气锅炉、液化石油气锅炉、高炉煤气锅炉、焦炉煤气锅炉、转炉煤气锅炉、炭黑尾气锅炉、炼厂气锅炉等。各类煤气锅炉燃料气质组成复杂,受其前序工艺的影响气质组成会在一定范围内波动,因而其污染物控制技术的选择和实现应根据产气工艺和其他生产工艺的需要进行综合性、针对性的设计(包括燃料型污染物的预处理或后处理、燃烧过程控制系统节能等)而管道天然气气质相对稳定,波动性小,是目前燃气锅炉的最主要应用燃料,被广泛应用于工业生产和居民采暖,具有一定程度的通用性。天然气燃烧的主要产物为二氧化碳(CO_2)和水(H_2O),其产排放的大气污染物以氮氧化物(NO_x)为主,并伴有少量硫氧化物(SO_x)以及不完全燃烧产物。天然气燃烧产生的烟气来自锅炉烟囱有组织排放。燃气锅炉燃烧天然气过程中产生的二氧化硫及颗粒物含量均较低,因此,一般燃用清洁能源,无需特殊处理,即可满足标准排放要求。

4.2.1 低氮控制技术

NO_x 有很多种,但在天然气燃烧过程中产生的 NO_x 几乎是 NO 和 NO_2 ,通常把 NO 和 NO_2 称为 NO_x 。天然矿物燃料(天然气、煤炭、石油)燃烧过程中生成的 NO_x 主要是 NO ,体积分数约占90%左右,其余为 NO_2 。燃烧生成的 NO 排入大气后氧化成 NO_2 ,故大气中 NO_x 以 NO_2 为主。

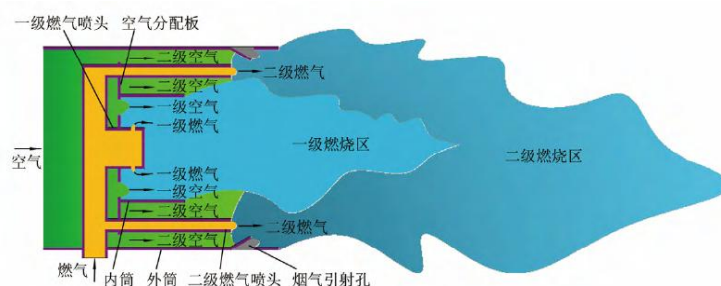
在天然气燃烧过程中 NO 的生成途径分为3种:热力型、快速型、燃料型。热力型 NO_x 是燃烧用空气中的氮气 N_2 在高温下(1500K以上)氧化而生成的;快速型 NO_x 是烃类燃料在过剩空气系数小于1条件下,即燃料过浓时燃烧产生;燃料型 NO_x 是燃料中含氮化合物在燃烧过程中氧化而生成的。由于天然气无含氮化合物,所以在燃烧过程中不产生燃料型 NO_x ;快速型 NO_x 生成量一般比热力型 NO_x 生成量小一个数量级。综上,天然气燃烧生成的主要是热力型 NO_x 。

4.2.2 分级燃烧技术

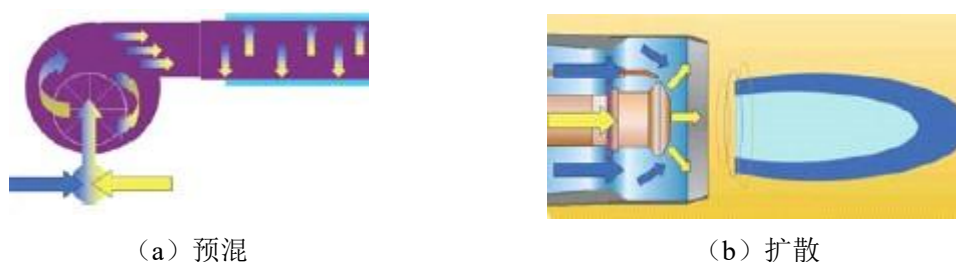
热力型 NO_x 的生成情况很大程度上取决于燃烧温度。在当量比接近1时下,燃烧温度达到最高;在贫燃或者富燃的情况下进行燃烧,燃烧温度会下降很多。运用该原理,分级燃烧技术被开发出来。分级燃烧大致可分为空气分级、燃料分级以及空气分级与燃料分级叠加技术三类,其基本原理都是在系统空燃比不变的条件下,将燃烧用风或燃料分阶段送入炉膛,避开当量比条件下的最高燃烧温度,减少热力型 NO_x 的生成,从而降低 NO_x 生成浓度。此外,该项技术在有效降低 NO_x 生成的同时 CO 排放水平也较低,因此至今被广泛使用。

分级燃烧技术中(如图4-1所示), NO_x 排放水平的主要影响因素分为内在及外在两类,

其中：内在因素主要包括燃烧器的分级比例、再燃区 NO_x 浓度以及再燃区温度等，即燃烧器本体结构的不同会带来 NO_x 控制水平的差异；外在因素主要包括炉型、加热工质温度、助燃空气温度、燃料含氮量等。



4.2.3 贫燃预混燃烧技术



贫燃预混技术一般与金属表面网（或多孔介质蓄热体）联合使用，图 4-3 展示了一种贫燃预混燃烧器的火焰照片。金属表面网在贫燃预混技术的实现上具有如下功能：第一，金属表面织物将火焰分割为无数根小火焰，孔隙细小且均匀，确保了火焰分散的均匀性，可以避免形成局部高温区；第二，在火焰的辐射热作用下，金属表面织物维持了较高的温度，起到了对

预混气预热、点火的作用；第三金属表面织物的细小孔隙的长径比设计符合“熄火准则”，可以起到防止预混气回火的作用。

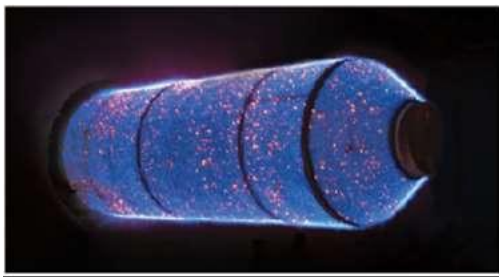


图 4-3 贫燃预混表面燃烧的火焰照片

贫燃预混燃烧技术的特点是火焰短，附着于燃烧表面，但稳定性较差，稳定燃烧的范围较小，必须采用防止离焰与回火的稳焰措施。该技术可将燃气锅炉的 NO_x 排放浓度控制在 $15\sim 30\text{ mg/m}^3$ 。

贫燃预混燃烧技术在使用过程中也存在诸多问题：一是贫燃预混技术仅在采用 1.5 以上的过剩空气系数时才可以将 NO_x 控制在 30 mg/m^3 以下，较高的过剩空气系数对锅炉热效率将产生一定的影响；二是天然气与空气中会含有不同程度的细小颗粒物，虽然可以通过在进风口、燃气管道上安装过滤器缓解堵塞的问题但环境颗粒物浓度高时平均每 3~5 天即需要对滤棉等进行清理或更换，后期清理、再调试的工作量大，对操作人员的素质要求较高；三是贫燃预混火焰根部的温度约 1500°C ，因此当金属表面网逐渐堵塞的情况发生或燃烧器在低负荷条件下运行时，火焰会逐渐附着在金属表面网，慢慢氧化金属层随着混合气的冲刷，将造成局部表面网氧化层脱落，孔隙变大，将不再起到结构防回火的作用，因而可能会出现回火、爆燃等安全事故。

4.2.4 烟气再循环技术

燃料燃烧温度的降低可以通过在火焰区域加入烟气来实现加入的烟气吸热从而降低了燃烧温度。通过将烟气的燃烧产物加入到燃烧区域内，不仅降低了燃烧温度，减少了 NO_x 生成；同时加入的烟气降低了氧气的分压，这将减弱氧气与氮气生成热力型 NO_x 的过程，从而减少 NO_x 的生成。根据应用原理的不同，烟气再循环技术可分为外部烟气再循环与内部烟气再循环。

烟气外循环（图 4-4）是指借助外部设备提供动力，将烟气从锅炉的出口通过一个外部管道接入燃烧器空气入口，通过燃烧器重新加入到炉膛内参与燃烧，实现对火焰的冷却，使 NO_x 在原有的基础上进一步降低。由于回引至燃烧区的烟气温度较低，借助动力设备辅助，系统所

需循环烟气量较小，烟气外循环的经济再循环量一般在 10-30%之间。

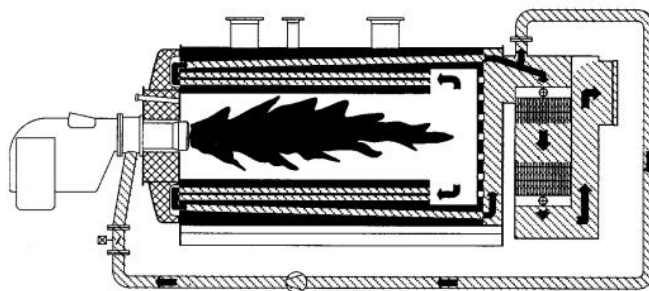


图 4-4 外部烟气循环系统

烟气内循环（图 4-5）是指通过燃烧器的结构设计依靠高速喷射气流的卷吸作用或者旋流燃烧器使得气流产生旋转达到烟气内循环效果。图 4-6a 中，燃烧器头部增加一个循环杯，中间通过高速气流，在压力差的作用下，烟气重新加入到燃烧区域中。图 4-6b 通过高速气流喷嘴和稳焰钝体达到烟气循环效果。由于高温烟气的卷吸一般借助高压燃气的高速射流来实现，且回引至燃烧区的烟气温度较高，因此如需达到较好的 NO_x 控制效果所需的循环烟气量较大，一般烟气内循环的经济再循环量为 50~70%，甚至更高。尽管内循环无需额外的动能输入，但必须要足够高的燃气压力以达到设计流速需求。

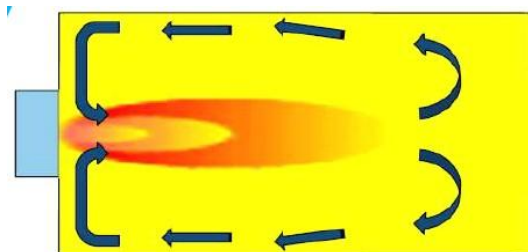


图 4-5 烟气内循环



图 4-6 烟气内循环：a) 再循环罩，b) 射流卷吸

烟气再循环技术的主要影响因素为烟气再循环率，再循环率越大，降 NO_x 效果越好；但当超过某一最佳数值时，惰性物质对可燃混合物的稀释作用可造成燃烧速率下降，引起缺氧、不完全燃烧甚至熄火的问题。因此，烟气再循环的最终降氮效果取决于燃烧器本体的火焰区温

度场的均匀性，即 NO_x 的排放浓度受火焰稳定性影响。

烟气外循环可以广泛应用于工业燃气锅炉的新建及低氮改造项目，一般与采用分级燃烧的低氮燃烧器联合应用。烟气内循环需要较高的燃气压力，需要进行燃气增压，在工程实施以及用气安全等方面要求较高，主要被应用于 14 MW 及以上规模的大型锅炉项目；从降氮效果来看，烟气内循环技术能够将 NO_x 控制在 80 mg/m³ 以内，与烟气外循环等技术耦合使用时，可以将 NO_x 控制在 30 mg/m³ 以内。

4.2.5 水冷预混技术

水冷预混技术是控制 NO_x 的一项重要实用技术，其基本原理仍然是通过降低火焰区的温度抑制热力型 NO_x 的生成。通过布置于火焰根部的高效传热水冷管将燃烧过程在燃烧区释放的一部分热量带走，从而降低火焰温度，达到低氮燃烧的目的。但若布置过多的水冷管，则会造成 CO 等不完全燃烧产物的形成，降低系统热效率，无法保证天然气的高效使用，因此水冷预混技术产品应是低温燃烧和充分燃烧相互平衡的技术实现。

此外，水冷预混技术还具有防止预混燃烧出现回火的功能，即布置于火焰根部的水冷管，由于其低温的性质，在出现回火的条件下可以通过机械结构和冷壁效应实现熄火，以保护燃烧系统的安全。与表面燃烧技术相比，水冷预混技术还具有无堵塞、低过剩空气系数等优势。

水冷预混冷凝锅炉可以实现低于 30 mg/m³ 的 NO_x 排放，在低回水温度条件下锅炉热效率较高，综合性能表现为“低排放、高效率”。由于余热回收器与锅炉本体结合为一体，机组更加紧凑，安装更方便，但也限制了其适用条件，即只能用于新建或改建项目，无法作为燃烧系统改造技术单独使用。与其他实施燃烧器置换的低氮技术相比，该类技术的应用造价较高；另外，为了保持布风的均匀性且避免预混腔存有大量的预混气采用水冷预混技术的锅炉单体规模不建议超过 4 t/h。

燃气锅炉 NO_x 燃烧控制技术的发展趋势以多种低氮技术耦合使用为方向，其主要目的是要平衡燃烧效率与排放特性。结合技术发展方向与燃烧优化技术，各种商用技术的多指标比较结果如表 4-2 所示。

在多指标考核燃烧优化控制技术的基础上，采用水冷预混、烟气外循环、分级燃烧技术的综合效果、系统平衡性较其他技术路线更好，其中水冷预混技术多用于小型新建或改建项目，符合未来分布式用能方式的发展方向；烟气再循环（外循环）技术适用性较强，可用于 1.4 MW 及以上燃气锅炉新建及改造项目；分级燃烧工程实施的可行性较强，仅需采用或置换采用分级燃烧的低氮燃烧器即可，对锅炉容量无限制要求。

表 4-2 商用低氮燃烧技术多指标对比

技术路线	安全性	NO _x 排放浓度 (mg/m ³)	锅炉效率	投资	运行费	适用性
分级燃烧	—	<80	—	低	—	无限制
贫燃预混	回火风险	<30	(-) 1-2%	中	高 (金属纤维、滤网更换、人工维护)	≤4t/h
水冷预混	结构防回火	<30	(+) 2-5%	高	有投资回报预期	≤4t/h
烟气内循环	—	<80	—	高	—	≥20t/h
烟气外循环	—	<30	(-) 4%	中	—	≥2t/h

5 标准主要内容及确定依据

5.1 主要章节内容

本文件主要包括：范围、规范性引用文件、术语和定义、大气污染物排放控制要求、大气污染物监测要求、实施和监督共 6 个章节。

5.2 范围

本文件规定了燃气锅炉及固定式燃气轮机烟气中二氧化硫、氮氧化物、颗粒物的最高允许排放浓度限值。

本文件适用于深圳市内的以天然气、液化石油气为燃料的单台额定出力大于或等于 0.1 t/h 的各种用途的燃气锅炉，燃气电厂的燃气蒸汽联合循环机组大气污染物排放控制，深汕特别合作区参照执行。

本文件适用于现有燃气锅炉及固定式燃气轮机的大气污染物排放管理，以及新建、改建和扩建项目环境影响评价、环境保护工程设计、竣工环境保护验收、排污许可及其投产后的大气污染物排放管理。

本文件不适用于移动式燃气轮机、固定式燃气内燃机发电机组、生物质气锅炉以及除供热锅炉以外用于燃气轮机的启动锅炉。

5.3 规范性引用文件

本章节包括了标准文本中规范性引用的文件。

5.4 术语和定义

本章节给出了适用于本文件的术语和定义，包括燃气锅炉、固定式燃气轮机、氧含量、大气污染物排放浓度限值、现有燃气锅炉、现有固定燃气轮机。本文件中出现的术语和定义主要参考《锅炉大气污染物排放标准》（DB44/ 765—2019）、《国家大气污染物排放标准制订技术导则》（HJ 945.1—2018）、广东省地方标准《锅炉大气污染物排放标准》（DB44/ 765—2019）、天津市《火电厂大气污染物排放标准》（DB12/ 810—2018）、江苏省《固定式燃气

轮机大气污染物排放标准》(DB32/ 3967—2021)北京市《固定式内燃机大气污染物排放标准》(DB11/ 1056—2013)中的相关术语和定义。其中,

标准文本3.1燃气锅炉参照DB44/ 765—2019中的相关定义。

标准文本3.2固定式燃气轮机参照DB32/ 3967—2021中的相关定义。

标准文本 3.3 氧含量参照 HJ 945.1—2018、GB 13271—2014 中的相关定义。

标准文本 3.4 大气污染物排放浓度限值参照 DB11/ 1056—2013 中的相关定义。

标准文本 3.5 现有燃气锅炉参照 DB12/ 810—2018 中的相关定义。

标准文本 3.6 现有固定燃气轮机参照 DB12/ 810—2018 中的相关定义。

5.5 大气污染物排放控制要求

燃气轮机生产过程中排放的大气污染物主要有:颗粒物、SO₂、NO_x。其次不完全燃烧会产生微量浓度的CH₄、CO、VOC等,特别是稳定负荷阶段浓度很低,现有监测仪器难以监测,且其总排放量低,对环境影响有限,因此不在本文件制定内容之内。

虽然固定式燃气轮机对SO₂和颗粒物排放无环保控制措施,且SO₂排放水平取决于燃料含硫量,考虑到国内对燃烧源排放标准体系规定的均为颗粒物、SO₂和NO_x三项污染物,因此考虑与国家标准衔接一致,仍按三项污染物进行考核。即本次标准制定针对的大气污染物为颗粒物、SO₂、NO_x。

此外,由于采用SCR脱硝工艺控制NO_x时会增加氨逃逸,因此增加对氨逃逸排放的限值。

结合广东省地标《锅炉大气污染物排放标准》(DB44/ 765-2019),本文件燃气锅炉受控污染物项目为:烟气中颗粒物、二氧化硫、氮氧化物。

5.5.1 燃气轮机污染物排放限值的确定及依据

本文件规定了NO_x、SO₂和颗粒物三种大气污染物的最高允许排放浓度,其中NO_x是固定式燃气轮机重点控制的污染物。依据现有控制技术和运行管理水平,标准确定的NO_x、SO₂和颗粒物排放浓度限值分别为:15 mg/m³(现有和新建机组)、5 mg/m³和5 mg/m³。

5.5.1.1 NO_x排放限值的确定及依据

深圳市大部分已经建成投运的燃气电厂均只采用低氮燃烧技术,设计NO_x排放浓度为50 mg/m³(氧含量15%),从对以上电厂的监测结果来看,NO_x排放浓度依据E级和F级机组可分别达到30和50 mg/m³以下。

深圳市的燃机为在2018年底NO_x排放达到15 mg/m³的排放要求,共有8台GE PG9171E机型燃机均选择了DLN1.0+低氮燃烧器升级改造(由于时间短且大多未有SCR预留空间),从目前运行效果看,基本达到排放要求。

深圳市内目前在役F级机组,未预留SCR位置但余热锅炉为卧式锅炉可通过适当改造安装SCR装置,通过技术改造实现15 mg/m³排放标准。

深圳市内目前在役E级机组,三菱、阿尔斯通、机组虽然难以进行低氮改造实现15 mg/m³

排放标准，但余热锅炉基本上具备 SCR 改造条件。GE、三菱机组，预留 SCR 位置或者具备 SCR 改造条件。

因此，综合目前技术改造的可行性，深圳市燃机机型现状以及深圳市环境质量改善的迫切要求，要求现有机组进行低氮燃烧或脱硝改造，降低 NO_x 排放水平。拟定自本文件实施之日起，NO_x 排放执行 15 mg/m³ 的限值要求。

5.5.1.2 SO₂ 排放限值的确定及依据

目前欧盟、美国、日本等发达国家相关电厂排放标准未对 SO₂ 排放限值提出具体要求；我国香港地区对燃气电厂 SO₂ 提出 10mg/m³ 排放限值要求；我国现行《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223—2011）要求现有和新建燃气轮机组的 SO₂ 排放执行 35 mg/m³ 的限值；上海市《锅炉大气污染物排放标准》（DB31/ 387—2007）中规定现有及新建燃气轮机 SO₂ 排放限值为 20 mg/m³；广东省《火电厂大气污染物排放标准》（DB44/ 612—2009）中规定现有及新建燃气轮机组 SO₂ 最高允许排放浓度为 20 mg/m³；北京市《固定式燃气轮机大气污染物排放标准》（DB11/ 847—2011）中规定现有及新建燃气轮机组 SO₂ 最高允许排放浓度为 20 mg/m³。

燃气轮机排放的 SO₂ 取决于天然气中的总硫，因此天然气的品质决定了燃机 SO₂ 的排放水平。由于燃气轮机一般是使用的通过长管道传输的天然气（一类气）或液化天然气（LNG），因此根据相关天然气的品质可推算出燃气轮机 SO₂ 排放水平。所以固定式燃气轮机无须对 SO₂ 排放采取环保控制措施。

根据目前 CEMS 在线监测数据显示，SO₂ 的平均排放浓度一般在 0.5 到 2.52 mg/m³。但目前的测量仪器存在以下问题：①测量精度不高，达不到监测限（甚至出现大量负值）；②在启动阶段，CH₄ 的干扰较严重，导致 SO₂ 浓度严重失真。

因此，综合考虑到实际天然气品质引起的 SO₂ 浓度以及现有测量仪器的精确性，标准建议自实施起 SO₂ 排放执行 5 mg/m³ 排放限值。

5.5.1.3 颗粒物排放限值的确定及依据

由于天然气和空气中的颗粒物浓度很低（约数十微克），且不完全燃烧和内部构件（如保温棉）脱落产生的颗粒物量也很低，因此一般认为燃气轮机燃烧产生的颗粒物可以忽略不计。

从调研结果来看，美国、日本和欧盟国家相关排放标准未对颗粒物排放限值提出具体要求；我国现行《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223—2011）燃气轮机组的颗粒物排放执行 5 mg/m³ 的限值；上海市锅炉大气污染物排放标准（DB31/ 387—2007）中规定现有及新建燃气轮机组颗粒物排放限值为 30 mg/m³；香港《电厂最佳可行方法指导说明》中规定对于燃气轮机组，颗粒物排放限值为 5 mg/m³（2 小时平均）。北京地区标准（DB11/ 847—2011）相关规定中要求颗粒物不大于 5 mg/m³。

综合考虑上述情况，地方标准不能比国家标准宽松的原则、在线颗粒物监测仪器对 10mg/m³ 以下浓度的颗粒物监测准确度较差、且现有燃机颗粒物浓度排放低且除尘改造的经济

性较差，以及标准的完整性等因素，本次颗粒物排放标准仍然参照 GB 13223—2011 和 DB11/847—2011 中的规定，按 5 mg/m³ 的排放限值要求。

5.5.1.4 氨排放限值的确定及依据

由于固定式燃气轮机采用 SCR 脱硝装置后，烟气排放中会产生氨排放。为有效防止脱硝装置产生的二次污染问题，应该提出氨逃逸的控制指标。

现行北京标准的氨逃逸规定为 2.5 mg/m³，折合约 3.3 ppm。《火电厂烟气脱硝工程技术规范 选择性催化还原法》（HJ 562—2010）中提出“氨逃逸浓度应小于 2.5 mg/m³”。

目前燃气电厂中仅部分安装了氨逃逸在线连续监测系统，监测方法一般为傅里叶转化红外光谱法和激光法，运行中发现氨逃逸的 CEMS 系统监测结果并不准确。

根据 Electric Power Research Institute (EPRI) 汽轮机手册的建议，在余热锅炉里经过 SCR 催化剂的流场分布比较均匀的前提下，将氨逃逸从 5 ppm 进一步降低到 2 ppm 并不需要许多的附加催化剂体积。这种情况下降低氨逃逸到 2 ppm 的比较直接的方法有：增加催化剂体积（一般增加 10%到 15%），或改善速度分布-利用流场模型来改善速度分布，使得 NH₃/NO_x 分布的标准方差从 5-10%降低到 3%。

因此，建议本文件中氨逃逸的浓度要求与《火电厂烟气脱硝工程技术规范 选择性催化还原法》（HJ 562—2010）中的要求相同，应小于 2.5 mg/m³。

5.5.1.5 排气筒的确定及依据

目前，国家标准《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223—2011）针对燃气电厂烟囱并未设定高度要求。

北京地区由于空气质量差，NO_x 环境容量小，NO_x 落地浓度要求低，因此针对烟囱制定了高度要求，例如单台燃气轮机额定功率在 200MW-350MW 范围内的烟囱最低高度规定为 80m。对烟囱达不到规定高度的机组，北京地方标准中也提出了相应的处置要求，即其 NO_x 最高允许排放浓度按标准正文中特定的修正公式计算。举例说明如下：某单台燃气轮机功率为 250MW 机组烟囱最低高度标准规定为 80m，若该机组烟囱高度为 60m，达不到规定高度，则该机组执行的排放浓度需按公式计算确定， $C = C_0 \times (h/h_0)^2 = C_0 \times (60/80)^2 = 0.5625 C_0$ ，即按标准限值的 56.25%执行，则该烟囱高度对应 NO_x 最高允许排放浓度执行 16.87 mg/m³（对应于 30 mg/m³）。

假如深圳市与北京市设置同样的烟囱高度要求，则深圳市燃机电厂在现有烟囱条件下降氮达标难度较大。通过前期调研，深圳市部分燃气电厂的烟囱高度达不到要求。

燃气电厂通过加装SCR脱硝装置，降氮效率一般在70%。深圳市F级燃气电厂均难以达到上述排放限值（8.44或5.86 mg/m³）。相比北京地区，深圳市燃气机组分布相对分散，深圳市环境质量状况较好，环境容量尚可，因此参照国家标准，深圳市地方标准不再对现有烟囱高度设定要求。新建燃气轮机烟囱最低高度及距周围居民住宅的距离通过环境影响评价确定，且需高出周围200m半径范围内的建筑物3m以上。

5.5.2 燃气锅炉排放限值的确定

深圳市人居环境委员会组织开展了燃气锅炉排放状况专项调查，共对辖区内 210 台锅炉进行了多个负荷的监测，共收集 210 组测试数据。

（1）颗粒物：样本的测试数据中，颗粒物含量均较低，均不高于 5 mg/m^3 ，即燃气锅炉燃用清洁燃料基本可以达到 5 mg/m^3 以下。故本文件在用和新建燃气锅炉颗粒物排放均执行 5 mg/m^3 的限值要求。

（2）二氧化硫：样本的测试数据中， SO_2 含量均较低，均不高于 10 mg/m^3 ，即燃气锅炉燃用清洁燃料即可满足本文件要求。故本文件在用和新建燃气锅炉二氧化硫排放均执行 10 mg/m^3 的限值要求。

（3）氮氧化物：样本的 NO_x 质量浓度算术均值为 93 mg/m^3 ($@ 3.5\% \text{O}_2$)，最大值 364 mg/m^3 。小于 30 mg/m^3 的样本量占 13.3%， $30\text{-}50 \text{ mg/m}^3$ 的样本量占 7.1%， $50\text{-}80 \text{ mg/m}^3$ 的样本量占 11.0%，而样本量最大集中于 $80\text{-}150 \text{ mg/m}^3$ 区间，占样本总量的 64.3%。按照广东省《锅炉大气污染物排放标准》(DB44/ 765-2010)，燃气锅炉氮氧化物低于 150 mg/m^3 ，虽然样本的达标率为 96%，但依然有较大减排空间，因此参照目前最严格的北京市《锅炉大气污染物排放标准》(DB 11/ 139—2015)，新建和在役锅炉执行氮氧化物排放浓度不高于 30 mg/m^3 的限值要求。

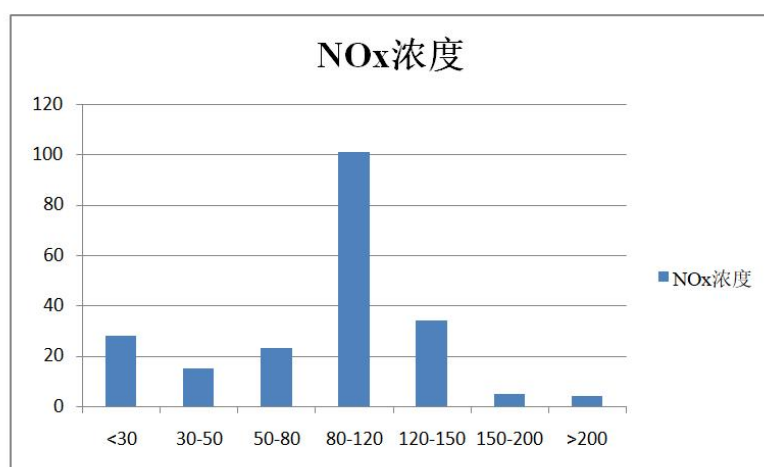


图 5-1 燃气锅炉 NO_x 排放浓度分布情况

5.6 大气污染物监测要求

污染物采样与监测需有利于本文件的具体执行，有利于生态环境保护主管部门对企业进行监督性检查，因此本文件中明确了采样和监测相关标准依据，以便参照实施。

5.6.1 监测分析方法及要求

应在污染物排放监控位置设置规范的永久性烟气监测孔、采样平台和排污口标志，应符合 HJ 75 的有关规定。

单台燃气轮机额定功率 $\geq 10 \text{ MW}$ 的联合循环机组应安装烟气排放连续监测装置，并符合

HJ 75 和HJ 76的有关规定，且按《污染源自动监控管理办法》和有关法律法规的规定执行。

固定式燃气轮机大气污染物的监测应按照HJ/T 373的要求进行监测质量保证和质量控制。监测用烟气分析仪应符合JJG 968的规定。

固定式燃气轮机大气污染物的采样方法、采样频次、采样时间，应按照 GB/T 16157、HJ/T 397 和 HJ 75 的规定执行。

5.6.1.1 颗粒物监测适用性说明

颗粒物监测方法情况如下：

(1) 《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》（GB/T 16157）规定了在烟道、烟囱及排气筒等固定污染源排气中颗粒物的测定方法和气态污染物的采样方法，适用于各种锅炉、工业炉窑、及其他固定污染源排气中颗粒物的测定和气态污染物的采样。该标准适用于浓度高于 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 的测量，因此不适用于本文件。

(2) 《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》（HJ 836）规定了测定固定污染源废气中低浓度颗粒物的重量法，适用于各类燃煤、燃油、燃气锅炉、工业窑炉、固定式燃气轮机以及其它固定污染源废气中颗粒物的测定；适用于低浓度颗粒物的测定，当测定结果大于 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 时，表述为 $>50\text{mg}/\text{m}^3$ ；当采样体积为 1m^3 时，本文件方法检出限为 $1.0\text{mg}/\text{m}^3$ 。

因此，《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》（HJ 836）适用于固定式燃气轮机大气污染物排放标准中颗粒物手工监测分析要求。

5.6.1.2 SO_2 监测适用性说明

SO_2 颗粒物监测方法情况如下：

(1) 《固定污染源废气 二氧化硫的测定 非分散红外吸收法》（HJ 629）规定了测定固定污染源有组织排放废气中 SO_2 的非分散红外法，适用固定污染源有组织排放废气中 SO_2 的瞬时监测和连续监测，该方法的检出限为 $3\text{mg}/\text{m}^3$ ，测定下限为 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 。

(2) 《固定污染源废气 二氧化硫的测定 便携式紫外吸收法》（HJ 1131）规定了固定污染源废气中二氧化硫的便携式紫外吸收法，适用于固定源废气中二氧化硫的测定，方法检出限为 $2\text{mg}/\text{m}^3$ ，测定下限为 $8\text{mg}/\text{m}^3$ 。

上述标准规定了固定污染源废气中 SO_2 的测定方法，适用于固定式燃气轮机大气污染物排放标准中 SO_2 监测分析要求。

5.6.1.3 NO_x 监测适用性说明

(1) 《固定污染源排气中氮氧化物的测定 盐酸萘乙二胺分光光度法》（HJ/T 43）适用于固定污染源有组织排放的 NO_x 测定。当采样体积为 1L 时，该方法的定性检出浓度为 $0.7\text{mg}/\text{m}^3$ ，定量测定的浓度范围为 $2.4\sim 208\text{mg}/\text{m}^3$ 。更高浓度的样品，可以用稀释的方法进行测定。该方法适用于本排放标准。

(2) 《固定污染源废气 氮氧化物的测定 非分散红外吸收法》（HJ 692）规定了测定

固定污染源废气中 NO_x 的非分散红外吸收法,适用于固定污染源废气中 NO_x 的测定。该方法 NO_x (以 NO_2 计) 的检出限为 $3\text{mg}/\text{m}^3$, 测定下限为 $12\text{mg}/\text{m}^3$ 。

(3) 《固定污染源废气 氮氧化物的测定 便携式紫外吸收法》(HJ 1132) 规定了固定污染源废气中氮氧化物的便携式紫外吸收法,适用于固定源废气中氮氧化物的测定,一氧化氮的方法检出限为 $1\text{mg}/\text{m}^3$, 测定下限为 $4\text{mg}/\text{m}^3$, 二氧化氮的方法检出限为 $2\text{mg}/\text{m}^3$, 测定下限为 $8\text{mg}/\text{m}^3$ 。

上述标准规定了固定污染源废气中 NO_x 的测定方法,适用于固定式燃气轮机大气污染物排放标准中 NO_x 监测分析要求。

5.6.1.4 氨监测适用性说明

《环境空气和废气 氨的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 533), 规定了测定环境空气和工业废气中氨的纳氏试剂分光光度法,适用于环境空气中氨的测定,也适用于制药、化工、炼焦等工业行业废气中氨的测定。该方法检出限为 $0.5\text{ }\mu\text{g}/10\text{ mL}$ 吸收液,当吸收液体积为 50 mL , 采气 10 L 时,氨的检出限为 $0.25\text{ mg}/\text{m}^3$, 测定下限为 $1.0\text{ mg}/\text{m}^3$, 测定上限 $20\text{ mg}/\text{m}^3$ 。当吸收液体积为 10 mL , 采气 45 L 时,氨的检出限为 $0.01\text{ mg}/\text{m}^3$, 测定下限 $0.04\text{ mg}/\text{m}^3$, 测定上限 $0.88\text{ mg}/\text{m}^3$ 。

《空气质量 氨的测定 离子选择电极法》(GB/T 14669), 规定了测定工业废气中氨的氨气敏电极法。适用于测定空气和工业废气中的氨。该方法检出限为 10 mL 吸收溶液中 $0.7\text{ }\mu\text{g}$ 氨。当样品溶液总体积为 10 mL , 采样体积 60 L 时,最低检测浓度为 $0.014\text{ mg}/\text{m}^3$ 。

上述标准规定的环境空气和废气中氨的测定方法,适用于固定式燃气轮机大气污染物排放标准中氨手工监测分析要求。

5.6.1.5 连续监测方法

《固定污染源烟气 (SO_2 、 NO_x 、颗粒物) 排放连续监测系统技术要求及检测方法》(HJ 76) 规定了固定污染源烟气 (SO_2 、 NO_x 、颗粒物) 排放连续监测系统的组成结构、技术要求、性能指标和检测方法,适用于固定污染源烟气 (SO_2 、 NO_x 、颗粒物) 排放连续监测系统的设计、生产和检测。该标准由于覆盖内容全面,因此也适用于固定式燃气轮机大气污染物 (SO_2 、 NO_x 、颗粒物) 排放连续监测系统技术要求及检测方法。

固定式燃气轮机应按照国家或地方自行监测及信息公开的相关管理办法和排污许可证要求,按照《环境监测管理办法》《污染源自动监控管理办法》以及《排污单位自行监测技术指南 火力发电及锅炉》(HJ 820) 等规定的要求,建立自行监测制度,制定监测方案,对大气污染物排放状况及其对周边环境质量的影响开展自行监测,保存原始监测记录,并公布监测结果。

5.6.1.6 监测负荷

HJ 397 中对固定源废气监测工况有明确规定。建设项目竣工环境保护验收监测应在工况稳定、生产负荷达到设计生产能力的 75%以上 (含 75%) 情况下进行;对于无法调整工况达

到设计生产能力的 75%以上负荷的建设项目。（1）可以调整工况达到设计生产能力 75%以上的部分，验收监测应在满足 75%以上负荷或国家及地方标准中所要求的生产负荷的条件下进行；（2）无法调整工况达到设计生产能力 75%以上的部分，验收监测应在主体工程稳定、环保设施运行正常，并征得环保主管部门同意的情况下进行，同时注明实际监测时的工况。国家、地方相关标准对生产负荷另有规定的按规定执行。

因此，本文件中固定式燃气轮机大气污染物的监测负荷按照 HJ/T 397 的规定执行。

5.7 燃气轮机达标判定要求

5.7.1 手工监测达标判定要求

HJ/T 397中明确规定了固定污染源排放废气中颗粒物与气体污染物监测的手工采样频次和采样时间，废气的采样以连续1小时的采样获取平均值，或在1小时内，以等时间间隔采集3~4个样品，并计算平均值，固定燃气轮机属于固定排放源，因此本排放标准以此作为手工监测方法达标判定要求的依据。手工监测大气污染物排放浓度小于等于标准限值时，即属于达标排放。

5.7.2 在线自动监测达标判定要求

在线自动监测方法对应达标判定要求目前并无明确规定，参考HJ/T 397中手工监测方法达标判定要求和HJ 76固定污染源烟气（SO₂、NO_x、颗粒物）排放连续监测系统技术要求及检测方法执行，以1小时平均浓度作为达标判定依据。即本文件中污染物浓度排放限值均为自然小时内平均的基准氧含量浓度值。

（1）欧盟达标评判方法

欧盟2010/75/EU指令第三章第39条款中规定，如果采用连续在线监测手段，对一个日历年内的小时监测数据评估结果如果满足以下所有的条件则认为已经满足该标准规定的排放限值：

- a. 有效的月平均值没有超过排放限值；
- b. 有效的日平均值没有超过排放限值的110%；
- c. 95%有效的小时平均值不超过排放限值的200%。

值得注意的是，欧盟该条款中规定在计算上述污染物排放平均值时，不考虑以下非正常运行时间段内的在线监测数据：

- 1）使用低硫燃料的燃烧装置，因低硫燃料严重短缺导致供应中断时，可给予最长6个月的责任减免，免于服从SO₂排放限值。
- 2）使用气态燃料的燃烧装置，因气体突然中断不得不改用其他燃料，并为此需配备废气净化设施时，可给予不超过10天的责任减免（如必须保障能源供应的除外），免于服从相关排放标准限值。
- 3）减排设施发生故障，可豁免单次不超过24h，且连续12个月内累计不超过120h。
- 4）燃烧装置启动和停机时间段豁免。

（2）美国达标评判方法概述及统计指标

美国排放标准《Standards of Performance for Electric Utility Steam Generating Units》(CFR40-Part60-subpartDa) 中40-Pa服从条款中规定：对于2011年5月4日之后新建、改建的机组，按照30个锅炉运行日滚动平均值来判定是否满足限值要求；SO₂和NO_x排放限值适用于所有运行时段，颗粒物排放限值适用于启停机以外的时间段，即启停机阶段的颗粒物排放可豁免。

(3) 达标判定办法

综合考虑到广东燃机排放的实际情况、减排技术能力以及监测可行性，本文件中采用日均值作为判定是否达标的依据。

固定式燃气轮机大气污染物排放浓度应折算为基准氧含量排放浓度作为达标判定的依据。大气污染物浓度基准氧含量浓度（按15%计算）的换算，可参照公式（1）。

$$\rho = \rho' \times \frac{21 - \varphi(O_2)}{21 - \varphi'(O_2)} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

ρ ——大气污染物基准氧含量排放浓度，mg/m³；

ρ' ——实测的大气污染物排放浓度，mg/m³；

$\varphi'(O_2)$ ——实测的氧含量；

$\varphi(O_2)$ ——基准氧含量。

5.7.3 豁免负荷

由于燃机在启动的各个阶段燃料配比和燃烧模式不同，因此氮氧化物的排放浓度也存在明显差异。相比预混火焰，扩散火焰温度更高，产生的热力型氮氧化物高。因此需了解不同负荷下氮氧化物排放情况，以便掌握燃机的排放规律。

根据深圳市燃机排放水平调研，获知在低负荷阶段，特别是80%的燃机负荷以下，氮氧化物排放浓度容易出现峰值。

北京市、天津市现行地方标准中对燃气电厂联合循环机组启停机时的排放没有明确规定，标准编制组在此次调研前关注了燃气电厂联合循环机组启停机时在国际上排放的相关规定，发达国家根据每一个燃机机组的实际情况来制定启停机排放标准，此种做法需要大量时间制定相应标准。

由于燃机在启停阶段燃烧模式为扩散模式，此时NO_x排放会比机组投入AGC后高出许多，但若要根据每一个燃机机组的实际情况来制定启停机排放标准需要大量的时间，所以标准编制组此次只对北京、江苏、深圳部分燃气电厂冷启、温启、热启、停机时间及最低稳定负荷调研，了解和掌握调峰、供热、常规发电三种典型机组的启停时间，为深圳市相关标准确定豁免负荷及启停豁免时间提供参考与建议。

根据调研结果来看，不同燃机厂家、不同燃机等级的燃气电厂冷启、温启、热启、停机时间区别不大，F级燃机电厂机组启机时间比E级燃机电厂机组启机时间略长。建议深圳市可据

此确定调峰、供热、常规发电三种典型机组的启停豁免时间。

由于启停机阶段以及负荷低于 80%的时段，燃气轮机的 NO_x 排放浓度较高，然而目前尚没有成熟可靠的减排技术能解决所有机型在此时段的排放超标问题。因此，本文件对于启动与停机阶段及燃气轮机负荷低于 80%的时段，不考核 NO_x 的排放。

5.7.4 污染物浓度计算方法

本文件中所指的“1 μmol/mol (1 ppm) NO_x相当于2.05 mg/m³的质量浓度”的具体含义和计算解释如下：本文件中NO_x以NO₂计的含义不是指两者相等，而是指先将烟气中的NO换算为NO₂后再与实测NO₂数据相加得到以NO₂计的NO_x排放浓度，即首先将烟气中实测NO浓度乘以1.53（NO₂与NO分子量之比46/30）换算为NO₂浓度后再与实测NO₂浓度相加得到。可按下面公式折算。

（1）NO、NO₂ 测试结果为质量浓度（mg/m³）时，合计的 NO₂ 质量浓度公式为：

$$C = \frac{46A}{30} + B \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- C——合计的 NO₂ 质量浓度（mg/m³）
- A——NO 质量浓度（mg/m³）
- B——NO₂ 质量浓度（mg/m³）

（2）NO、NO₂ 测试结果为体积浓度（ppm）时，折算并合计的 NO₂ 质量浓度公式为：

$$C = \frac{46 \times (m + n)}{22.4} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- C——折算并合计的 NO₂ 质量浓度（mg/m³）
- m——NO 体积浓度（ppm）
- n——NO₂ 体积浓度（ppm）

5.8 燃气轮机运行管理要求

为确保脱硝装置的脱硝效果和正常运行，本文件提出了脱硝系统的运行管理要求：首先是要求脱硝装置按照相关规定实施有效的运行管理，应符合《火电厂烟气治理设施运行管理技术规范》（HJ 2040）的要求；第二是为防治二次污染，脱硝系统的氨逃逸浓度应小于 2.5 mg/m³（干基，标准状态），在实际应用中，选择性催化还原法（SCR）容易实现更低的氨逃逸率。

5.9 燃气锅炉污染物采样与监测要求的必要性

污染物采样与监测需有利于本文件的具体执行，有利于生态环境保护主管部门对企业进行监督性检查，因此本文件中明确了采样和监测相关标准依据，以便参照实施。

5.10 实施与监督

在任何情况下,设备使用单位均应遵守本文件的大气污染物排放控制要求,采取必要措施保证污染防治设施正常运行。各级生态环境保护主管部门在对锅炉使用单位进行监督性检查时,可以现场即时采样或监测结果作为判定排污行为是否符合排放标准以及实施相关环境保护管理措施的依据。

6 实施本文件的成本效益分析

6.1 实施标准的环境效益

(1) 通过分析深圳市燃气电厂 NO_x 排放现状及现有减排技术潜力,同时结合各种减排技术的性价比和技术可控性,对深圳市燃气电厂 NO_x 优选排放限值提出如下意见:现有与新建机组 NO_x 排放限值均设定为 15 mg/m^3 ;

(2) 目前已经完成改造和正在建设的机组实施新标准后, NO_x 排放总量降低约 70%。

(3) 通过对燃机脱硝环境效益分析,将现有机组 NO_x 排放限值设定为 15 mg/m^3 ,有利于改善区域环境空气质量,环境空气质量效益较明显。

(4) 颗粒物与雾霾天气的形成密切相关, SO_2 、 NO_x 是国家严格控制的两大约束性指标。实施本文件燃气锅炉限值后,在削减污染物排放量方面,将起到一定的积极促进作用,具有较好的环境效益。标准的实施,将提高锅炉烟气 NO_x 的排放标准,减少 NO_x 排放总量,有利于我市大气污染治理计划的顺利实施和环境空气质量改善。

6.2 实施本文件的成本分析

根据前文的讨论,深圳市未来燃气轮机现有机组、新建机组均执行 15 mg/m^3 的排放标准。由于 2020 年以后核准建设的机组目前无法预测机组大小及规模,因此本次仅对现有机组实施本文件的成本进行分析。

(1) 对 GE 公司 E 级机组,实现 15 mg/m^3 排放标准,有低氮燃烧改造和加装 SCR 脱硝装置二种方案可供选择,原厂低氮燃烧改造方案投资远高于 SCR 脱硝方案,本次测算暂按 SCR 脱硝方案。对于立式锅炉且未预留 SCR 空间的电厂加装 SCR 脱硝装置难度很大,建议采用低氮燃烧改造实现 15 mg/m^3 排放标准,本次暂按 3200 万元计算投资。

(2) 其他 E 级机组主机厂家宣传也可通过低氮燃烧改实现 15 mg/m^3 排放标准,改造费用约 1500 万元,但业绩较少,本次测算暂按 SCR 脱硝方案考虑,如未来技术成熟后,也可采用低氮燃烧改造方案。

(3) 深圳市现役 F 级机组通过低氮燃烧器改造难以达到 15 mg/m^3 。根据深圳低氮燃机改造经验,除立式锅炉且未预留 SCR 位置的电厂难以加装 SCR 脱硝装置,其它情况均可以采用 SCR 脱硝,绝大部分具备改造的条件,可以通过改造达到 15 mg/m^3 。

（4）年运行费用包括设备折旧费、物料消耗费用、阻力增加引起的燃料增加的费用、年大修费用、催化剂更换费用和 NO_x 减排而少交的排污税、人工工资及福利、利息财务费用。设备折旧费按 10 年折旧率计算，催化剂按 3 年更换一次，电厂已有还原剂储备和供应的可与原还原剂一致考虑，本次改造还原剂暂按氨水设计，设备大修费率按 2.5%测算。

方案的成本分析见表 6-1。

表 6-1 NO_x 减排成本分析

序号	机组级别	SCR 情况	单台机组			发电成本 (分/kWh)
			预估投资 (万元)	年成本 (万元)	年环境效益 (吨)	
1	400 MW (F 级)	有预留	3400	736	385	0.33
2	400 MW (F 级)	未预留	3800	768	385	0.35
3	400 MW (F 级)	已安装	1200	535	385	0.22
4	200 MW (E 级)	有预留	1400	490	231	0.45
5	200 MW (E 级)	卧式未预留	1600	523	231	0.48
6	200 MW (E 级)	立式未预留	3200	592	231	0.60
7	总计		170700	44081	20548.5	

7 标准实施的过渡期

虽然我市固定式燃气轮机基本符合了 DB44/ 765 所规定的特别排放限值要求，但与环境空气质量达标和阶段性改善目标仍有很大差距。本文件结合成熟有效的污染防治技术开展固定式燃气轮机减排工程，进一步缩小排放量与环境容量的差距。鉴于当前执行排放标准较为宽松，且固定式燃气轮机将作为生产生活供电供热的刚性需求长期存在，为保障城市发展的同时实现空气质量改善，保护人体健康，拟尽快实施本文件，对固定式燃气轮机的排污行为从严控制。因此，自本文件实施起，新建固定式燃气轮机即开始实施。现有固定式燃气轮机因需通过低氮燃烧器改造或选择性催化还原（SCR）脱硝等相对成熟且成本可控的技术升级改造。

目前为止，深圳市固定式燃气轮机由三菱、GE、阿尔斯通等公司生产制造。在运机组中，三菱燃机 6 台、GE 燃机 12 台、阿尔斯通燃机 2 台。根据调研情况，E 型机组主要为美国 GE 机组和 ALSTOM 机组，F 型机组主要为三菱机组。根据美国 GE 燃机最新低氮燃烧技术发展应用现状，12 套 GE 机组普遍实施了低氮燃烧器改造，改造后的 NO_x 排放在 15 mg/m³ 以内；其余 8 套三菱、ALSTOM 机组则采取了烟气脱硝 SCR 改造，设计脱硝效率普遍在 80% 以上，改造后 NO_x 排放可控制在 10-15 mg/m³。

深圳市现有固定式燃气轮机，通过低氮燃烧器改造或选择性催化还原（SCR）脱硝等技术改造后，均可以实现 NO_x 排放浓度低于 15 mg/m³，但需要进一步进行燃烧器低氮运行调整或

SCR 脱硝系统还原剂制备、喷射系统的低负荷运行调整以及进行喷氨优化、流场优化等。因此，须为企业预留足够的设备调试时间，在本文件实施前，固定式燃气轮机能够稳定运行且符合新的排放标准，同时考虑老旧产品退出市场时间等，建议为企业预留一定的过渡期，且过渡期为 1 年。

虽然我市燃气锅炉基本符合了 DB44/ 765 所规定的特别排放限值要求，但与环境空气质量达标和阶段性改善目标仍有很大差距。本文件结合成熟有效的污染防治技术开展燃气锅炉减排工程，进一步缩小排放量与环境容量的差距。鉴于当前执行排放标准较为宽松，且燃气锅炉将作为生产生活的刚性需求长期存在，为保障城市发展的同时实现空气质量改善，保护人体健康，拟尽快实施本文件，对燃气锅炉的排污行为从严控制。因此，自本文件实施起，新建燃气锅炉即开始实施。而现有燃气锅炉需通过分级燃烧、预混燃烧、烟气再循环等相对成熟且成本可控的技术升级改造。

截止 2022 年，深圳市燃气锅炉已经全面完成低氮改造，虽可以实现 NO_x 排放浓度低于 30 mg/m³，但存在部分锅炉运行不稳定、不能持续稳定低排放、不完全燃烧、燃料消耗量大等问题。因此，须为企业预留足够的设备调试时间，在本文件实施前，燃气锅炉设备能够稳定运行且符合新的排放标准，同时考虑老旧产品退出市场时间等，建议为企业预留一定的过渡期，且过渡期为 1 年。

8 标准中涉及专利等知识产权的说明

本文件不涉及专利等知识产权问题。

9 重大意见分歧的处理依据和结果的相关说明

本文件在制定过程中没有出现重大意见分歧。

10 标准的实施建议

（1）本文件控制的三种污染物中颗粒物及 SO₂ 是不需要采取控制措施的，只要机组正常运行即可满足要求，需要采取措施控制的污染物为 NO_x。目前对新建机组而言需要采取先进的低氮燃烧技术或低氮燃烧技术及 SCR 脱硝技术的组合就可将 NO_x 排放控制在标准规定的限值内。对于现有机组而言，改造途径有两条：一是将机组燃烧部分现有低氮燃烧装置改为较先进的燃烧装置，目前最先进的低氮燃烧技术，NO_x 排放浓度能够达到 15 mg/m³；二是余热锅炉改造为加装 SCR 脱硝装置的设备。

（2）由于本文件与现行标准变化幅度较大，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

人员理解掌握本文件的内容，尽早规划准备。

（3）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，并无颗粒物及二氧化硫控制措施，故实施本文件需要加强对燃气品质的监管，控制污染从源头着手。

11 其它需要说明的事项

11.1 关于楼宇型天然气分布式能源未纳入标准的解释

通过对现阶段主流燃机厂家单机额定功率的调研，了解到深圳市内现有燃机的单机额定容量普遍符合如表11-1分布情况。

表 11-1 深圳市燃机机组的单燃机额定功率分布情况

级别	F 级			E 级			E 级以下
厂家	西门子	GE	三菱	西门子	GE	三菱	西门子
单台燃气轮机额定功率 P(MW)	293	256	270/324	168	128	144	52
分布区间	250-330			50-170			

同时，依据国内《燃气分布式供能站设计规程》（DL/T 5508—2015），楼宇型天然气分布式能源（功能站单机容量低于 10 MW）总装机容量小，同时各项目原动机配置差异大（内燃机或燃气轮机）。目前应用燃气轮机作为原动机的能源站均未配置汽轮机，仅配套余热利用设备（余热锅炉、溴化锂机组或燃气锅炉等）进行热电冷三联供。

以上设备选型、系统配套等因素对 NO_x 排放具有重大影响，难以对楼宇型燃气分布式能源站制定统一标准。为了避免将楼宇型分布式能源站划规为燃机电厂参与环保考核，项目组建议将燃机机组的功率下限设置为 10 MW。标准编制组建议深圳市生态环境部门对楼宇型分布式能源站开展深入研究，下一步出台科学的针对楼宇型燃气分布式能源站的排放标准。

11.2 执行标准时间

本文件将固定式燃气轮机组分为两类，第一类是按新建、扩建、改建燃气轮机；第二类是现有燃气轮机。自本文件实施之日起，新建固定式燃机轮机执行表 11-2 中规定的固定式燃气轮机大气污染物排放限值。自本文件实施之日起至 2024 年 12 月 31 日的 1 年过渡期内，现有固定式燃机轮机仍执行 DB44/ 765 的规定。自 2025 年 1 月 1 日起，现有固定式燃机轮机执行表 11-2 中规定的最新燃气轮机大气污染物排放限值。

表11-2 固定式燃气轮机大气污染物排放浓度限值（mg/m³）

固定式燃气轮机分类	实施日期	二氧化硫	氮氧化物	颗粒物
现有固定式燃气轮机	标准实施之日起-2024年12月31日 过渡期内	35	50	10
	2025年1月1日起	5	15	5
新建固定式燃气轮机	标准实施之日起	5	15	5

自本文件实施之日起，新建燃气锅炉执行表 11-3 中规定的燃气锅炉大气污染物排放限值。自本文件实施之日起至 2024 年 12 月 31 日，现有燃气锅炉仍执行 DB44/ 765 的规定。自 2025 年 1 月 1 日起，现有燃气锅炉执行表 11-3 中规定的最新燃气锅炉大气污染物排放限值。

表11-3 燃气锅炉大气污染物排放浓度限值（mg/m³）

锅炉分类	实施日期	二氧化硫	氮氧化物	颗粒物
现有燃气锅炉	标准实施之日起至2024年12月31日过渡 期内	50	150	20
	2025年1月1日起	10	30	5
新建燃气锅炉	标准实施之日起	10	30	5

实测的烟囱入口排气中二氧化硫、氮氧化物、颗粒物的排放浓度应执行GB/T 16157的规定，按公式（1）折算到基准氧含量时对应的排放浓度。基准氧含量按照表11-4的规定执行。

$$\rho = \rho' \times \frac{21 - \varphi(O_2)}{21 - \varphi'(O_2)} \dots\dots\dots (1)$$

式中：
 ρ ——大气污染物基准氧含量排放浓度，mg/m³；
 ρ' ——实测的大气污染物排放浓度，mg/m³；
 $\varphi'(O_2)$ ——实测的氧含量；
 $\varphi(O_2)$ ——基准氧含量。

表11-4 基准氧含量

分类		基准氧含量（%）
天然气锅炉	单台出力>65t/h 锅炉	3.0
	单台出力≤65t/h 锅炉	3.5

11.3 其它说明

固定式燃气轮机是相对移动式而言的，移动式燃气轮机主要指航空及舰船用燃气轮机，因此本文件不适用于航空及舰船用燃气轮机。同时，也不适用于供热锅炉以外启动锅炉、生物质气锅炉。