

基于生命周期评价的燃气工业锅炉 低氮燃烧技术综合评价*

李 磊¹ 王晓鹏¹ 马 虹² 熊凤吟³ 钟 玲⁴ 曹 磊^{4#}

(1.建筑材料工业技术情报研究所,北京 100024;2.北京市劳动保护科学研究所,北京 100054;

3.滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室,深圳大学土木与交通工程学院,广东 深圳 518060;

4.生态环境部环境发展中心,北京 100029)

摘要 针对燃气工业锅炉低氮燃烧技术的开发与应用实际,构建了覆盖资源能源、环境影响、技术功能、经济效益和社会影响 5 个维度共计 21 个指标的体系,对 5 种较多应用于低氮燃烧的技术(烟气内循环、燃料分级燃烧+烟气再循环、空气分级燃烧、水冷预混燃烧、贫燃预混燃烧)进行耦合生命周期评价(LCA)的综合评价。结果表明,针对中小型燃气工业锅炉,燃料分级燃烧+烟气再循环技术是较优选择。

关键词 生命周期评价 燃气工业锅炉 低氮燃烧技术 综合评价

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2022.07.012

Comprehensive assessment of low NO_x combustion technologies for gas industrial boiler based on life cycle assessment LI Lei¹, WANG Xiaopeng¹, MA Hong², XIONG Fengyin³, ZHONG Ling⁴, CAO Lei⁴. (1. Institute of Technical Information for Buildings Materials Industry, Beijing 100024; 2. Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing 100054; 3. Key Laboratory of Coastal Urban Resilient Infrastructures, College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen Guangdong 518060; 4. Environmental Development Centre of the Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029)

Abstract: Combining with the development and application of low NO_x combustion technology for gas industrial boilers, a system of 5 categories and 21 evaluation indicators was constructed involving resources and energy, environmental impacts, technical functions, economic benefits and social impacts. A comprehensive assessment method based on life cycle assessment was proposed and implemented for assessment of five typical low NO_x combustion technologies, including fuel gas internal circulation, fuel staged burning + flue gas recirculation, air staged combustion technology, water-cooled premix technology and lean premixed combustion technology. The results indicated that fuel staged burning + flue gas recirculation technology was the optimal choice for small- and medium-sized gas industrial boilers.

Keywords: life cycle assessment; gas industrial boilers; low NO_x combustion technology; comprehensive assessment

氮氧化物(NO_x)作为典型的大气污染物,既可造成光化学烟雾和酸雨污染,也是细颗粒物的重要前驱物。工业锅炉是 NO_x 排放的重点污染源之一,在现有能源结构优化调整的背景下,燃气工业锅炉占比不断加大,其排放的废气将成为 NO_x 的重要来源^[1-2]。《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271—2014)明确要求重点地区燃气锅炉 NO_x 的特别排放限值为 150 mg/m³。北京、天津、上海等多地发布地方性政策,排放要求在国家标准基础上均有所提高^[3]。国家统计局数据显示,2019 年工业锅炉产量

同比增长 22%^[4],煤粉、燃气、余热及生物质锅炉等产量更是日益增加,因此亟需遴选合理有效的燃气工业锅炉低氮燃烧技术,实现 NO_x 排放控制目标。

现有研究工作多围绕低氮燃烧技术的机理、运行效果及影响因素^[5-7]开展,较少关注技术的系统性表现,难以为决策者提供较全面系统的参考,因此本研究将针对燃气工业锅炉低氮燃烧技术的开发与应用实际,建立多维评价指标体系,对典型低氮燃烧技术开展基于生命周期评价(LCA)的综合评价^[8],为低氮燃烧技术的应用与推广提供系统性的理论依据与量化数据参考。

第一作者:李 磊,男,1984 年生,硕士,副研究员,高级工程师,主要从事技术评价、政策和标准研究。# 通讯作者。

* 国家重点研发计划项目(No.2017YFF0211803)。

1 评价对象与方法

1.1 典型燃气工业锅炉低氮燃烧技术

锅炉产生的 NO_x 是化石燃料与空气在高温燃烧时产生的,可分为热力型、快速型、燃料型 NO_x 。其中,燃气锅炉的 NO_x 主要为热力型 NO_x ,占 NO_x 产生总量的 95%^[9]。与燃煤相比,燃气锅炉尾气中 NO_x 较少,以烟气脱硝为代表的末端处理技术仅在尾气排放总量较大时才得以应用^[10]。因此,本研究主要针对适用于中小型燃气工业锅炉的低氮燃烧技术开展评价。根据京津冀部分企业燃气工业锅炉低氮燃烧改造现状与文献调研^[11-12],初步筛选出 5 种较多应用于低氮燃烧的技术(烟气内循环、燃料分级燃烧+烟气再循环、空气分级燃烧、水冷预混燃烧、贫燃预混燃烧),再开展综合评价。

1.2 评价方法及流程

综合评价方法包括层次分析法、模糊综合评价、灰色聚类法、TOPOSIS 等多种评价方法。本研究采用了广泛应用的模糊综合评价方法对典型的低氮燃烧技术进行分析,以便最大化地耦合定性定量指标,实现指标精准量化^[13-14]。

为系统评价低氮燃烧技术的资源环境影响,本研究引入 LCA 作为资源环境指标的核算方法。首先初步筛选典型技术,确定技术评价对象,再构建涵盖资源、能源、环境、技术、经济、社会影响等信息的多维评价指标体系,然后对指标进行实地、问卷、专家与文献调研,确定权重及指标量化方法,最后比较分析参评对象指标量化的综合评价结果,给出技术推荐建议。将 LCA 融合于综合评价中,通过发挥 LCA 方法资源环境影响评价的系统性优势,形成一种新的框架来解决环境技术评价问题,既可全面评价防治技术潜在的污染转移可能性,又可全面地考察技术应用的功能特征。

2 技术评价与讨论

2.1 评价指标体系构建

在确立评价目标的前提下,通过相关资料收集、调研及咨询等方式初选,确保指标全面性及代表性,构建了覆盖资源能源、环境影响、技术功能、经济效益和社会影响 5 个维度共计 21 个指标的体系,指标中除技术评价的一般定性指标,也加入了 NO_x 减排率、锅炉本体热效率变化、烟气排放含氧量等特征功能指标,以及能反映跨介质污染转移潜势的损害人

体健康、生态系统等间接环境影响指标,符合评价目标的全面性要求。

2.2 评价指标量化方法

2.2.1 数据收集

针对燃气工业锅炉低氮燃烧技术,结合国家重点研发计划项目(No.2017YFF0211803),课题组在此前大量数据和文献的基础上开展了研究,并实测了 38 台中小型燃气工业锅炉(1~20 t/h),对河北省某地级市开展补充问卷调研,收回有效问卷 12 份。低氮燃烧技术评价指标清单信息具体见表 1。

2.2.2 LCA

应用 LCA 开展资源能源及间接环境影响类指标核算。燃气工业锅炉低氮燃烧技术实施手段多为既有锅炉改造,需要的资源能源投入较少。在 LCA 过程中,将功能单位设置为同样规格的锅炉供应同等热力时所应用的低氮燃烧技术,以此为基础来量化能源资源消耗和污染物排放。低氮燃烧技术的 LCA 系统覆盖低氮燃烧设备的改造和使用过程,包括改造过程低氮燃烧器等设备资源的投入、运行过程能源的投入,以及 NO_x 、CO 等大气污染物的排放。

2.2.3 指标量化比较

将所有评价指标分为定量和定性指标,并用相应的方法进行统一量化处理。对于定性指标,引入模糊统计分析法,根据最大隶属度原则,构建隶属度函数,再通过文献调研进行等级赋值;对于定量指标,越大越优型数据采用效益型指标公式量化,对于越小越优型数据采用成本型指标公式量化。最终,使指标量化结果分布于[0,1]。

2.3 综合分析与评价

燃气工业锅炉低氮燃烧技术评价指标涉及资源能源消耗和技术功能等多个领域,指标之间互相影响较小,数据之间关联性较弱,本研究列出的指标涵盖了一些定性指标,如复杂性与安全性,层次分析法能较好解决涵盖定量、定性因素的综合性指标系统决策问题,通过建立层次递阶模型、构造判断矩阵,本研究的权重结果见表 2。

5 种技术的一级指标综合评价结果见图 1。指标的重要性参考已有研究^[15],将技术功能与经济效益作为重点属性进行评价。

技术功能在一级指标中权重最大,符合技术评价的研究目标。从技术功能分析,燃料分级燃烧+烟气再循环技术具有绝对的优势,由于其市场份额较大,应用时间长,相关的技术理论和设备构造研究已非常成熟,而且经调研发现,该技术应用较普遍;

表 1 低氮燃烧技术评价指标清单信息
Table 1 Indicators inventory of low NO_x combustion technology evaluation

编号	指标	烟气内循环	燃料分级燃烧+ 烟气再循环	空气分 级燃烧	水冷预 混燃烧	贫燃预 混燃烧
1	一次能源消耗相对占比/%	99	100	97	97	98
2	二次能源消耗相对占比/%	100	100	100	100	100
3	化石能源耗竭效应	0.004 59	0.005 73	0.005 15	0.004 77	0.004 68
4	耗材易得性	不涉及耗材	较易得	不涉及耗材	不涉及耗材	较易得
5	资源耗竭效应	3.07	3.84	3.46	3.20	3.13
6	NO_x 排放值/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	30~80	27	24	20	10
7	损害人体健康	2.43	3.04	2.70	2.50	2.44
8	损害生态系统	1.82	2.28	2.05	1.90	1.86
9	NO_x 减排率/%	30~40	77.5	63.0	73.0	85~90
10	其他污染物(以 CO 为例)减排率/%	0	90	80	0	0
11	条件适用性	大于 20 t/h	锅炉额定功 率没有限制	较少应用在 燃气锅炉	≤ 4 t/h	≤ 20 t/h
12	复杂性	易于改造	技术改造较难	技术改造 难度适中	只能用于新建 或改建项目	技术改造后期清理 再调试工量大;对操 作人员素质要求较高
13	安全性	火焰不稳定,但无 安全事故发生	安全系数高	安全系数较高	技术结构 防回火,安 全系数一般	外网会慢慢氧化,造 成局部表面氧化层 脱落,无法防回火,存 在一定的安全隐患
14	成熟度	商业化应 用较多	属于国内 工业示范	燃气锅炉 应用较少	市场应用少	属于工业示范, 在美国应用广泛
15	烟气含氧量变 化量/百分点	2	3~4	0	4~5	6~7
16	热效率变化量/百分点	0.4	0.5	2.7	2~5	2.0
17	改造补贴	补贴适中	补贴低	无	约占 1/3,但技 术前期投资高	约占 1/3,技术 前期投资一般
18	副产物处置成本	无	有	有	无	有
19	运营成本	无	无	无	有运营成本,但也 有投资回报	高(涉及金属纤维、 滤网更换、人工维护)
20	工作时长/($\text{h} \cdot \text{a}^{-1}$)	2 200	5 000	2 400		4 800
21	工作收入/($\text{元} \cdot \text{h}^{-1}$)	15	10	30	0	30

贫燃预混燃烧技术表现位列第二,该技术是近两年国内工程实践常应用的技术;水冷预混燃烧技术位列第三,在项目应用中表现出一定的技术优势,特别是小型燃气锅炉领域能更好发挥技术特色。

烟气内循环技术的经济效益表现最佳,主要是因为该技术应用无运营成本且具有一定的改造补贴,该技术也被相关研究认定是一种可实现不增加成本、空间,通过技术本身降低 NO_x 排放的燃烧技术。燃料分级燃烧+烟气再循环与水冷预混燃烧技术差别较小,其中水冷预混燃烧技术虽然投资高,但有投资回报和改造补贴,而燃料分级燃烧+烟气再循环技术没有运营成本且投资低,因此综合表现出经济效益相对较高的状态。空气分级燃烧技术对经济效益产生不利的影响最高,该技术改造期间未获

得补贴,同时在燃气工业锅炉中应用较少。环境影响的指标权重较低,但社会关注度较高。环境影响方面,烟气内循环对 NO_x 的减排有限,通常需要跟其他低氮燃烧技术相结合,因此环境影响方面表现较差^[16]。贫燃预混燃烧技术本身能使 NO_x 降到较低水平,因此对 NO_x 具有较大的减排潜力,环境影响综合表现最好。资源能源、社会影响的指标权重相对较低,暂不进行详细分析。

最终,烟气内循环、燃料分级燃烧+烟气再循环、空气分级燃烧、水冷预混燃烧、贫燃预混燃烧技术的综合评分分别为 0.285 48、0.346 28、0.286 69、0.323 67、0.336 72,其中燃料分级燃烧+烟气再循环技术成为最佳选择技术,对比该领域现有低氮燃烧技术推广情况和发展趋势发现,本研究最佳选择

表2 燃气工业锅炉低氮燃烧技术评价指标权重
Table 2 Weight of evaluation indicators of low NO_x combustion technology for gas industrial boiler

一级指标名称	一级指标权重	二级指标名称	二级指标权重	三级指标名称	三级指标权重
资源能源	0.10	能源消耗	0.67	一次能源消耗相对占比	0.50
				二次能源消耗相对占比	0.25
		资源消耗	0.33	化石能源耗竭效应	0.25
				耗材易得性	0.50
环境影响	0.10	直接影响	0.67	资源耗竭效应	0.50
				NO_x 排放值	1.00
		间接影响	0.33	损害人体健康	0.67
				损害生态系统	0.33
技术功能	0.50	污染物去除率	0.40	NO_x 减排率	0.75
				其他污染物减排率	0.25
		技术特征	0.40	条件适用性	0.35
				复杂性	0.16
经济效益	0.27	生产效率变动	0.20	安全性	0.14
				成熟度	0.35
				烟气含氧量变化量	0.50
				热效率变化量	0.50
社会影响	0.03			改造补贴	0.40
				副产物处置成本	0.20
				运营成本	0.40
				工作时长	0.50
				工作收入	0.50

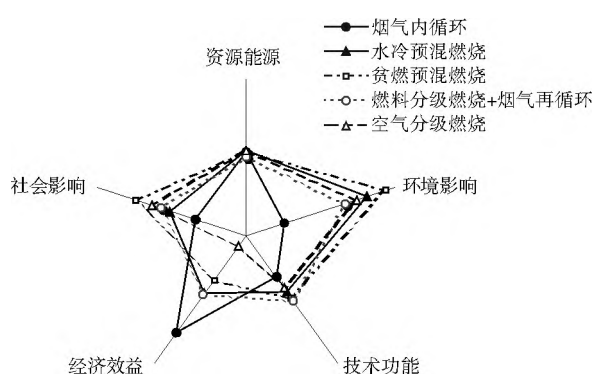


图1 一级指标综合评价结果

Fig.1 The evaluation results of the primary indicators

技术与目前多项研究推荐的技术一致。贫燃预混燃烧技术排列第二,且具有最低环境影响及最佳社会影响。

3 结 语

(1) 应用耦合 LCA 的综合评价方法,开展中小型燃气工业锅炉低氮燃烧技术综合评价。燃料分级燃烧+烟气再循环技术的综合评分最高;贫燃预混燃烧技术排列第二,且具有最低环境影响及最佳社会影响;烟气内循环技术具有最佳经济效益。

(2) 本研究的燃气工业锅炉低氮燃烧技术评价过程可作为不同空气污染控制技术评价研究的参

考。本研究所建立的指标体系和评价模型,可以应用于其他大气污染防治技术的综合评价。

参考文献:

- [1] 宋少鹏.基于烟气再循环的工业锅炉天然气低氮燃烧研究[D].北京:清华大学,2016.
- [2] 何玉晶.燃气锅炉低氮技术及运用分析[J].科技风,2019(23):158-159.
- [3] 薛亦峰,聂滕,周震,等.北京市燃气工业锅炉 NO_x 排放及空气质量影响分析[J].环境科学与技术,2014,37(12):118-122.
- [4] 国家统计局.工业主要产品产量[EB/OL].[2021-07-27].<https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=A01&zbs=A02091M&sj=202106>.
- [5] 陈亚娟,温金涛,李六军,等.小型燃气锅炉低氮燃烧技术应用效果对比分析[J].区域供热,2019(2):54-56.
- [6] 周宏斌,刘小见,周磊,等.燃气锅炉超低氮燃烧器技术应用研究[J].石化技术,2020,27(1):340-348.
- [7] 崔名双,李小炯,苗鹏,等.低 NO_x 燃气燃烧技术研究进展[J].洁净煤技术,2020,26(2):24-33.
- [8] XIONG F, PAN J, LU B, et al. Integrated technology assessment based on LCA: a case of fine particulate matter control technology in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 268:122014.

(下转第 917 页)

相关关系,表明总氨浓度的增加均有利于 NO_2 和 SO_2 向 $\text{PM}_{2.5}$ 转化。

(4) 基于 WRF-CMAQ 模式系统模拟,去除所有人为源氨排放能使研究时段内 $\text{PM}_{2.5}$ 平均值下降 $4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$,贡献率约 13.9%。随着酸性污染气体减排空间的减少,评估典型及重点行业的氨排放削减潜力,落实氨的减排控制对于经济有效地促进 $\text{PM}_{2.5}$ 的进一步减排有重要意义。

参考文献:

- [1] LIU M X, HUANG X, SONG Y, et al. Ammonia emission control in China would mitigate haze pollution and nitrogen deposition, but worsen acid rain[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(16): 7760-7765.
- [2] VAN DAMME M, CLARISSE L, WHITBURN S, et al. Industrial and agricultural ammonia point sources exposed[J]. Nature, 2018, 564(7734): 99-103.
- [3] LIN Y F, HUANG K, ZHUANG G S, et al. A multi-year evolution of aerosol chemistry impacting visibility and haze formation over an Eastern Asia megacity, Shanghai[J]. Atmospheric Environment, 2014, 92: 76-86.
- [4] WANG Y, ZHANG Q Q, HE K, et al. Sulfate-nitrate-ammonium aerosols over China: response to 2000-2015 emission changes of sulfur dioxide, nitrogen oxides, and ammonia[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(5): 2635-2652.
- [5] MATSON P, LOHSE K A, HALL S J. The Globalization of nitrogen deposition: consequences for terrestrial ecosystems[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2002, 31(2): 113-119.
- [6] KRUPA S V. Effects of atmospheric ammonia (NH_3) on terrestrial vegetation: a review [J]. Environmental Pollution, 2003, 124(2): 179-221.
- [7] PINDER R W, GILLILAND A B, DENNIS R L. Environmental impact of atmospheric NH_3 emissions under present and future conditions in the eastern United States[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(12): 12808.
- [8] KUROKAWA J, OHARA T, MORIKAWA T, et al. Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000-2008: regional emission inventory in Asia (REAS) version 2[J]. Atmospheric Chemistry Physics, 2013, 13(4): 10049-10123.
- [9] 董文焯, 邢佳, 王书肖. 1994~2006 年中国人源大气氨排放时空分布[J]. 环境科学, 2010, 31(7): 1457-1463.
- [10] 王跃思, 李文杰, 高文康, 等. 2013~2017 年中国重点区域颗粒物质量浓度和化学成分变化趋势[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 50(4): 453-468.
- [11] 叶代启, 刘锐源, 田俊泰. 我国挥发性有机物排放量变化趋势及政策研究[J]. 环境保护, 2020, 48(15): 23-26.
- [12] 邢志杰. 氨排放控制对策研究[J]. 绿色科技, 2019(8): 91-92.
- [13] 尹沙沙, 郑君瑜, 张礼俊, 等. 珠江三角洲人为氨源排放清单及特征[J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1146-1151.
- [14] 董艳强, 陈长虹, 黄成, 等. 长江三角洲地区人为源氨排放清单及分布特征[J]. 环境科学学报, 2009, 29(8): 1611-1617.
- [15] 王平. 南通市人为源大气氨排放清单及特征[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(10): 25-28.
- [16] 张灿, 周志恩, 翟崇治, 等. 重庆市主城区 NH_3 排放估算及分布特征分析[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(10): 65-70.
- [17] 房效凤, 沈根祥, 徐昶, 等. 上海市农业源氨排放清单及分布特征[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(12): 2177-2185.
- [18] FERM M. Atmospheric ammonia and ammonium transport in Europe and critical loads: a review [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 51(1): 5-17.
- [19] STREETS D G, BOND T C, CARMICHAEL G R, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(21): 8809.
- [20] 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 节水灌溉稻田氨挥发损失及影响因素[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 35-39.
- [21] 丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 等. 2015 年北京城区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 及前体气体的污染特征[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1307-1316.

编辑:黄 苇 (收稿日期:2022-01-20)

(上接第 910 页)

- [9] 姚芝茂, 武雪芳, 滕云, 等. 燃用天然气锅炉 NO_x 的排放特征与管理控制[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(11): 88-92.
- [10] 赵培培, 郭铭玉, 纪娜, 等. 用于燃气锅炉的低温氨气选择性催化还原催化剂研究进展[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(11): 1310-1314.
- [11] 宋少鹏, 卓建坤, 李娜, 等. 天然气供热锅炉低氨燃烧技术研究现状[J]. 供热制冷, 2016(2): 18-21.
- [12] LIANG Z, CHEN H, ZHAO B, et al. Synergetic effects of firing gases/coal blends and adopting deep air staging on combustion characteristics [J]. Applied Energy, 2018, 228: 499-511.
- [13] ZHAO X, HWANG B G, GAO Y. A fuzzy synthetic evaluation approach for risk assessment: a case of Singapore's green projects[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 115: 203-213.
- [14] 申海龙. 基于组合评价法的装配式混凝土建筑工程质量评价[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [15] 许洪雪. 贫燃预混旋流火焰的非稳态燃烧行为研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [16] 宋少鹏, 卓建坤, 李娜, 等. 燃料分级与烟气再循环对天然气低氨燃烧特性影响机理[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6849-6858.

编辑:黄 苇 (收稿日期:2021-08-11)