

基于低位发热量的燃气锅炉基准烟气量核算方法研究

燕 潇^{1,2}, 赵亚笛^{1,2}, 刘 晓^{1,2}, 宋光武^{1,2}, 孙成一^{1,2}, 齐立涛³

- 北京市生态环境保护科学研究院, 北京 100037
- 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037
- 北京市延庆区生态环境局, 北京 102199

摘要:烟气量是核算燃气锅炉污染物排放量的关键参数,但目前常规的烟气量核算方法存在一定的局限性。基于燃料的低位发热量,推导并建立了一种简洁实用的基准烟气量计算公式。研究表明,该方法的核算结果具有较高的精度和可靠性,相对误差均值在0.9%~3.8%之间。不同类型燃气的基准烟气量系数主要受可燃组分含量的影响,且其变化趋势与低位发热量一致,均随可燃组分含量的增加而升高。各类燃气按基准烟气量系数的排序为天然气>焦炉煤气>转炉煤气>高炉煤气。进一步分析发现,天然气低位发热量与甲烷(CH₄)含量呈负相关性,与其他碳氢化合物含量呈正相关,主要归因于其他烷烃组分的低位发热量普遍高于CH₄,CH₄含量增加通常伴随着其他碳氢组分含量的降低,从而导致整体低位发热量下降。高炉煤气和转炉煤气的低位发热量则均与一氧化碳(CO)含量呈正相关,与氮气(N₂)含量呈负相关。该基准烟气量计算公式采用了现行《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271—2014)中的烟气含氧量折算基准,不受实测过量空气系数的影响。该方法具有公式简洁、操作方便、数据可追溯、逻辑清晰等优点,可在现场条件受限的情况下,结合常规监测数据快速估算污染物排放量,适用于年度排放量、实时排放量及减排量等多种核算情景,具有广泛的应用前景与推广价值。

关键词:低位发热量;燃气锅炉;基准烟气量;核算方法

中图分类号:X703.5 文献标志码:A 文章编号:1002-6002(2025)04-0206-09

DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2025.04.19

Study on the Accounting Method of Flue Gas Volume from Gas-Fired Boilers Based on the Lower Heating Value

YAN Xiao^{1,2}, ZHAO Yadi^{1,2}, LIU Xiao^{1,2}, SONG Guangwu^{1,2}, SUN Chengyi^{1,2}, QI Litao³

- Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection, Beijing 100037, China
- National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China
- Yanqing District Ecology and Environment Bureau of Beijing, Beijing 102199, China

Abstract: Flue gas volume is a key parameter for calculating pollutant emissions from gas-fired boilers, but conventional calculation methods currently have certain limitations in application. In this study, a concise and practical formula for calculating benchmark flue gas volume is derived and established based on the lower heating value (LHV) of the fuel. The results show that the proposed method achieves a mean relative error ranging from 0.9% to 3.8%, indicating high accuracy and reliability. The benchmark flue gas volume coefficients for different types of gaseous fuels are primarily influenced by the content of combustible components, and their variation trend aligns with that of the LHV, both increasing with the rise in combustible content. The coefficients follow the order: natural gas > coke oven gas > converter gas > blast furnace gas. Further analysis reveals that for natural gas, the LHV is negatively correlated with methane (CH₄) content but positively correlated with other hydrocarbon components, primarily due to the higher LHV of other alkanes compared to CH₄. Thus, an increase in CH₄ content is usually accompanied by a decrease in the content of other hydrocarbon components, thereby leading to a decline in the overall LHV. For blast furnace gas and converter gases, the LHV is positively correlated with carbon monoxide (CO) and negatively correlated with nitrogen (N₂) content. The benchmark flue gas volume formula established in this study adopts the conversion benchmark of flue gas oxygen content in the current *Emission Standard of Air Pollutants for Boiler* (GB 13271-2014) and is not constrained by the

收稿日期:2023-10-07;修订日期:2024-03-05

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(8232031);国家自然科学基金资助项目(42207516);北京市生态环境保护科学研究院纵向科研项目(JZ2023-005);能源基金会资助项目(G-2310-35204);北京市西城区优秀人才培养项目(202030)

第一作者简介:燕 潇(1988-),女,山西晋城人,博士,研究员。

通讯作者:宋光武

measured excess air coefficient. Overall, this method offers advantages such as a concise formula, convenient operation, traceable data, and clear logic. It allows rapid estimation of pollutant emissions using readily available monitoring data under field constraints, making it suitable for a wide range of applications, including annual emissions, real-time emissions, and emission reduction assessments.

Keywords: lower heating value; gas-fired boilers; benchmark flue gas volume; accounting method

准确核算污染源排放量有助于全面掌握污染物排放规律,为探究大气污染成因、制定科学的减排方案和实现空气质量预报预警等提供重要的基础数据和信息^[1-4]。同时,污染源排放量核算贯穿于生态环境保护各项制度。首先,排放量是排污许可制度的重要数据产出,为规范固定源排污行为、提高生态环境部门执法监管效能提供了重要依据^[5];其次,排放量是核算环境保护税的基础数据,对排放量的准确计算有助于科学核算环境保护税,进而推动绿色排污机制的落实。根据《排污许可证申请与核发技术规范 锅炉》(HJ 953—2018)^[6],锅炉排污单位一般排放口的废气污染物实际排放量由排放浓度和烟气体积决定,因此,烟气体积是排放量核算中的关键参数。

截至目前,烟气体积的核算方法主要包括现场实测法、理论公式计算法和经验公式法等。现场实测法是通过测量断面烟气平均流速,结合断面面积计算烟气体积。皮托管法是最常见的流速测定方法,适用的流速范围为 5~25 m/s。但锅炉排污单位的烟囱的设计流速一般为 7~9 m/s,且锅炉日间实际运行负荷一般约为 50% (一般最高不超过 70%),导致实测流速往往低于皮托管法的检定范围下限^[7-8]。另外,烟囱内的烟气流动往往不均匀,可能同时存在高速、中速、低速和回流区域,导致很难保证对应测点上的测量结果能准确代表烟气的真实流速,进而对实际排放量准确核算造成影响。因此,环境监察中可能会出现排放量高估等现象^[9-11]。此外,根据本课题组前期参加生态环境监察的实践经验,部分燃气锅炉监测点位设置不规范,不具备流速测定条件,导致通过监测流速来校核烟气体积的目的无法达成。

理论公式计算法是指根据燃气燃烧化学反应方程式,计算燃料完全燃烧所生成的烟气体积。该方法较为科学,是目前较为准确的烟气体积估算方法^[12]。但工业锅炉一般缺少实测燃料组分数据,因此,现实中使用该方法计算烟气体积比较困难。该方法的应用场景多限于工业设计、科学研究中的理论计算。

常规经验公式法(如环境统计、环境普查中采用的方法)通常基于燃气消耗量及产污系数计算烟气体积^[13]。然而该方法往往缺少科学依据或数据来源,未详细标注适用条件(如未区分干烟气和湿烟气的计算条件),并且实际应用表明其计算结果误差较大,导致该方法在精确核算场景下的适用性受限。

针对上述问题,本研究提出一种基于低位发热量的改进型燃气锅炉烟气体积计算方法。该创新方法已被纳入国家环境保护标准《排污许可证申请与核发技术规范 锅炉》(HJ 953—2018),并得到成功应用。该方法基于物料平衡原理,理论依据充分;计算过程透明,数据可追溯;不受额外约束条件限制;操作简单,可结合现场常规监测数据快速估算,降低了对采样点位规范性的要求。下文将对该方法的理论基础、推导过程、验证分析和实际应用进行系统阐述。

1 公式推导

1.1 样本来源

本研究采用中国特种设备检测研究院提供的燃油(气)燃烧器型式试验检测数据作为基本样本,通过测定燃气中的组分构成及水分含量等关键参数,采用《天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法》(GB/T 11062—2020)中的公式计算低位发热量^[14]。作为国家权威检测机构,该院具备气体燃料燃烧器的定型型式检测资质,并通过了 ISO 质量管理体系认证,确保了数据的权威性和可靠性。实验数据来源于燃烧器燃料适用性评估研究,完全排除了商业利益干扰,具有客观公正性。

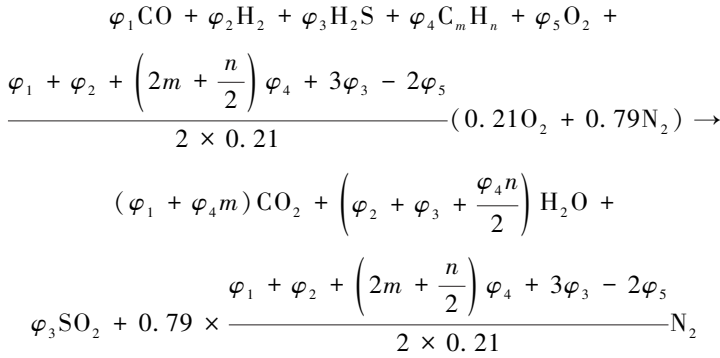
调研发现,我国常用的燃气锅炉燃料类型主要分为天然气、高炉煤气、转炉煤气和焦炉煤气。根据数据的可获得性,分别收集了各种燃料的甲烷(CH₄)、乙烷(C₂H₆)、异丁烷(*i*-C₄H₁₀)、氧气(O₂)、氮气(N₂)、二氧化碳(CO₂)、一氧化碳(CO)、氢气(H₂)、硫化氢(H₂S)等含量,以及高

位发热量与低位发热量等数据。在数据清洗中,剔除了明显不可用的数据,最终选取67组全要素数据为样本,其中燃料类型为天然气、焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气的样本数分别为28、16、14、9组。

1.2 理论烟气的计算

根据燃料的燃烧化学反应方程式,将燃料完全燃烧所需的空气量定义为理论烟气的量。本研究假定:

①气体燃料中包含的可燃和惰性组分包括CO、H₂、H₂S、C_mH_n(其中m和n分别代表碳和氢的原子数)、O₂、N₂和CO₂,其摩尔分数分别为φ₁、



根据该反应方程式可计算出单位体积气体燃烧所需的理论空气量(V₀,以干空气计):

$$V_0 = \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \left(2m + \frac{n}{2}\right) \varphi_4 + 3\varphi_3 - 2\varphi_5}{2 \times 0.21} \quad (1)$$

公式(1)可进一步简化为

$$V_0 = 4.76 \left[0.5\varphi_1 + 0.5\varphi_2 + \left(m + \frac{n}{4}\right) \varphi_4 + 1.5\varphi_3 - \varphi_5 \right] \quad (2)$$

1.3 基准烟气的计算

锅炉燃烧过程中,如果仅提供理论空气量,常导致不完全燃烧,引发能源浪费,因此,实际供给空气量需高于理论值。将实际供给空气量与理论值的比值定义为过量空气系数(α)。同时,本研究引入了“基准烟气的量”的概念,将其定义为在基准含氧量条件下,燃料与空气充分燃烧所产生的干烟气的体积(以标准状态计,温度为273.15 K,压力为101325 Pa)。基准烟气的量包括三部分:完全燃烧产生的干烟气体积(V₁)、由于引入过量空气而增加的烟气体积(V₂)、燃料中不参与燃烧反应的惰性气体的体积(V₃)。

$$V_1 = \varphi_1 + \varphi_3 + m\varphi_4 + 0.79V_0 \quad (3)$$

φ₂、φ₃、φ₄、φ₅、φ₆、φ₇。

②空气为标准干空气,仅由N₂和O₂组成,两者的摩尔分数比为79:21。

③气体燃料与空气在燃烧设备中完全反应。其中,空气和燃料中的N₂及CO₂不参与化学反应;燃料中的固态氧可参与燃烧反应;含硫组分主要被氧化为二氧化硫(SO₂);氮氧化物(NO_x)的生成量较小,加之燃料的含氧量较低,在理论空气量计算中可忽略其影响。

根据气体燃料中各组分的含量,配平燃烧化学反应方程式:

$$V_2 = (\alpha - 1)V_0 \quad (4)$$

$$V_3 = \varphi_6 + \varphi_7 \quad (5)$$

基准烟气的量系数(V_{gy})是指在基准含氧量条件下,单位燃料与空气充分燃烧后生成的干烟气的体积,计算公式为

$$V_{gy} = V_1 + V_2 + V_3 = \varphi_1 + \varphi_3 + m\varphi_4 + 0.79V_0 + (\alpha - 1)V_0 + \varphi_6 + \varphi_7 \quad (6)$$

1.4 基于低位发热量的公式推导

燃烧产生的热量来源于燃料和空气(主要是O₂)之间的化学反应,因此其释放的热量不仅与燃料用量密切相关,也与参与反应的空气量(或产生的烟气的量)密切相关。燃料燃烧释放的热量等于其组分加权低位发热量与燃料消耗量的乘积,因此,单位燃料燃烧产生的烟气的量理论上应与低位发热量紧密相关^[15-16]。基于上述原理,本研究探讨了理论计算得到的基准烟气的量系数与燃料低位发热量之间的关系,并构建了基于低位发热量的基准烟气的量计算公式。

通过收集典型燃气组分数据和热值参数,计算基准烟气的量系数,研究建立标准状态下的基准烟气的量系数与燃气低位发热量之间的定量关系模型,结果如图1所示。采用EViews软件进行假设检验分析,若回归模型的P值小于0.05,则说明基准烟气的量系数与低位发热量之间存在线性关

系。图 1 中的红线表示拟合直线,两侧红色阴影为 95%置信带与预测带。图 1 显示,大多数数据

点位于预测带范围内,表明拟合效果良好,验证了二者之间具有正线性关系。

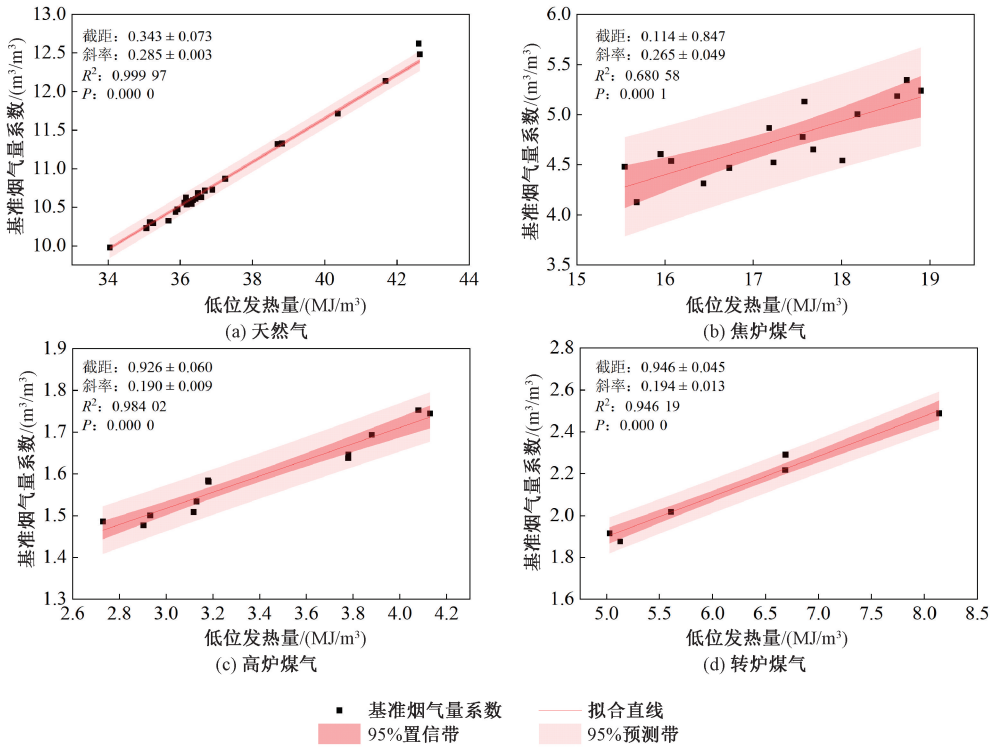


图 1 燃气锅炉基准烟气体积系数与低位发热量的线性关系

Fig. 1 The linear relationship between benchmark flue gas volume coefficients and lower heating value for gas-fired boilers

依据回归分析结果,分别建立适用于天然气、焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气的基准烟气体积系数与其低位发热量(Q_{net})之间的经验公式,依次如公式(7)~公式(10)所示。

$$V_{gy} = 0.285Q_{net} + 0.343 \quad (7)$$

$$V_{gy} = 0.265Q_{net} + 0.114 \quad (8)$$

$$V_{gy} = 0.190Q_{net} + 0.926 \quad (9)$$

$$V_{gy} = 0.194Q_{net} + 0.946 \quad (10)$$

对于使用多种气体燃料的混合燃烧工况,其综合基准烟气体积系数可采用各类燃料的体积分数加权平均得到。若混合气体中的天然气、焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气所占体积分数分别为 a 、 b 、 c 、 d ,则综合基准烟气体积系数计算公式为

$$V_{gy} = a \times (0.285Q_{net} + 0.343) + b \times (0.265Q_{net} + 0.114) + c \times (0.190Q_{net} + 0.926) + d \times (0.194Q_{net} + 0.946) \quad (11)$$

2 公式验证与误差分析

根据所收集的典型燃气组分数据,采用燃烧

化学反应理论计算方法核算基准烟气体积系数(简称理论基准烟气体积系数,记作 V'_{gy}),并与基于低位发热量推导公式计算得到的结果(简称公式推导基准烟气体积系数,记作 V_{gy})进行对比分析,结果见表 1。相对误差(RE)根据公式(12)计算。

$$RE = \frac{V_{gy} - V'_{gy}}{V'_{gy}} \times 100\% \quad (12)$$

从表 1 可知,天然气的公式推导基准烟气体积系数与理论基准烟气体积系数分别为 10.90 、 $10.81 \text{ m}^3/\text{m}^3$,两者的相对误差平均值为 0.9% ,相对误差在所有燃料类型中最小;高炉煤气与转炉煤气的相对误差较小,分别为 1.4% 、 2.1% ;焦炉煤气的理论基准烟气体积系数为 $4.74 \text{ m}^3/\text{m}^3$,公式推导基准烟气体积系数为 $4.69 \text{ m}^3/\text{m}^3$,相对误差平均值为 3.8% ,相对误差最大。因此,本文推导得到的基准烟气体积核算公式具备良好的精度和适用性,能够较准确地估算多种典型气体燃料的基准烟气体积,估算结果与理论值的相对误差总体较小。

3 影响因素分析

3.1 燃料种类对基准烟气量的影响

燃料完全燃烧后产生的烟气量主要取决于燃料中可燃组分的含量。可燃成分含量越高,低位发热量越高,燃烧生成的烟气量越大^[17]。为研究燃料类型对基准烟气量的影响,对不同类型燃料的低位发热量、基准烟气量与可燃组分含量进行分析,结果如图2所示。相较于其他燃料,高炉煤气的低位发热量最低,平均为 3.3 MJ/m^3 。这主要归因于高炉煤气中的可燃组分含量较低,仅为 25.8% ,因

此单位体积高炉煤气燃烧产生的基准烟气量也就低,其中调研样本的平均基准烟气量系数为 $1.55 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。相比之下,单位体积天然气燃烧生成的基准烟气量最高,均值达 $10.8 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。这主要归因于天然气具有较高的可燃组分含量(约为 97.3%),使其低位发热量显著高于其他燃料。调研数据显示,天然气的低位发热量因成分和来源不同而存在一定差异,范围在 $34.05 \sim 42.63 \text{ MJ/m}^3$ 之间。总之,基准烟气量系数与低位发热量变化趋势一致,均随着可燃组分含量的增加而增大;不同类型燃气按基准烟气量系数的排序为天然气>焦炉煤气>转炉煤气>高炉煤气。

表1 公式推导基准烟气量系数与理论基准烟气量系数的对比

Table 1 Comparison between formulae-derived and theoretical benchmark flue gas volume coefficients

燃料类型	理论基准烟气量系数/ (m^3/m^3)	公式推导基准烟气量系数/ (m^3/m^3)	相对误差最大值/%	相对误差最小值/%	相对误差 平均值/%
天然气	10.81	10.90	1.8	0.1	0.9
高炉煤气	1.58	1.60	4.5	0.1	1.4
焦炉煤气	4.74	4.69	7.6	0.2	3.8
转炉煤气	2.16	2.15	6.7	0.6	2.1

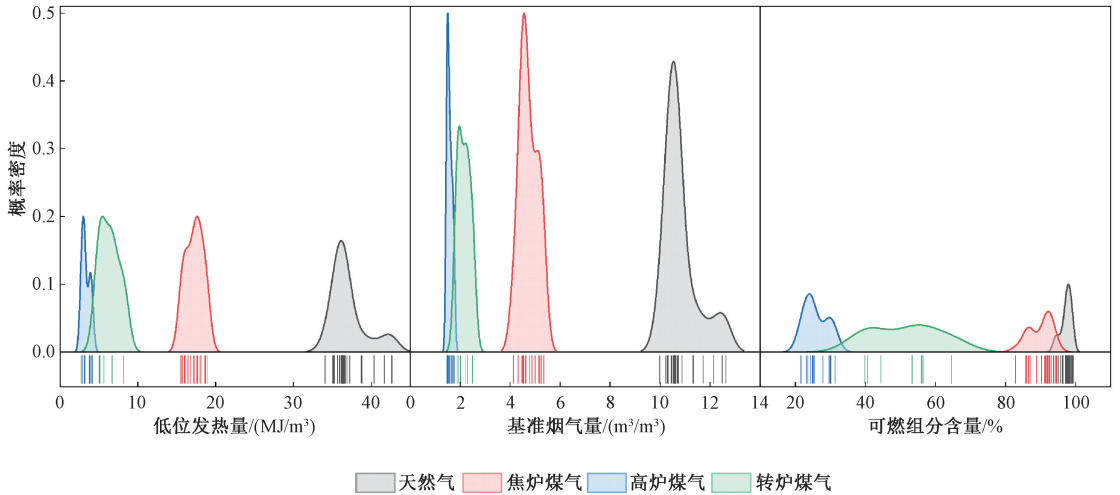


图2 不同类型燃料的低位发热量、基准烟气量与可燃组分含量

Fig. 2 The effect of fuel types on the lower heating value, benchmark flue gas volume and combustible fraction content

3.2 燃料组分对基准烟气量的影响

除可燃组分含量外,可燃组分的具体构成及占比也对基准烟气量具有显著影响。不同气体燃料的主要可燃组分构成差异明显,统计结果见表2。如表2所示,天然气主要是由 CH_4 及少量其他烷烃类化合物组成, CH_4 、 C_2H_6 含量分别为 92% 和 3% ;转炉煤气与高炉煤气分别由钢铁企业中转炉与高炉产生,组分相似,均以 N_2 、 CO 、 CO_2 为主,各组分占比略有差别;焦炉煤气由炼焦用煤

在焦炉中产生,主要成分为 CH_4 、 H_2 、 CO 、 N_2 。为研究不同可燃组分含量对烟气量的影响,本研究采用Origin软件中的统计模块,计算不同燃料的各种气体组分含量与低位发热量的相关系数(表2)。

在天然气中, CH_4 、 C_2H_6 、丙烷(C_3H_8)、正丁烷($n\text{-C}_4\text{H}_{10}$)、 $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ 、异戊烷($i\text{-C}_5\text{H}_{12}$)、正戊烷($n\text{-C}_5\text{H}_{12}$)及其他碳氢化合物的含量与低位发热量均在 0.05 水平上存在显著相关性,Pearson相

关系数分别为 -0.85 、 0.71 、 0.92 、 0.90 、 0.89 、 0.93 、 0.86 、 0.61 。低位发热量与 CH_4 含量呈现出负相关性,表明随 CH_4 含量的增加,低位发热量降低;与其他物种含量呈现正相关性,即随其他

物种含量的增加而增大。其原因可能是相同体积下的 CH_4 的低位发热量低于其他长链烷烃类^[18-19],因而 CH_4 的相对含量越高,其他烷烃组分的含量就越低,天然气的发热量也就越低。

表 2 低位发热量与燃料组分的线性关系
Table 2 The linear relationship between lower heating value and fuel fraction

成分	天然气			转炉煤气			高炉煤气			焦炉煤气		
	占比/%	Pearson 相关系数	P 值	占比/%	Pearson 相关系数	P 值	占比/%	Pearson 相关系数	P 值	占比/%	Pearson 相关系数	P 值
CH_4	92.3	-0.85	0.00	—	—	—	1.0	0.78	0.12	22.2	0.67	0.00
C_2H_6	3.1	0.71	0.00	—	—	—	—	—	—	1.2	-0.87	0.32
C_3H_8	1.1	0.92	0.00	—	—	—	—	—	—	1.0	0.38	0.62
$n\text{-C}_4\text{H}_{10}$	0.3	0.90	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$i\text{-C}_4\text{H}_{10}$	0.2	0.89	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$i\text{-C}_5\text{H}_{12}$	0.1	0.93	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$n\text{-C}_5\text{H}_{12}$	0.1	0.86	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
其他碳氢化合物	0.1	0.61	0.00	—	—	—	—	—	—	2.5	0.53	0.10
N_2	1.2	-0.25	0.19	29.6	-0.98	0.00	55.8	-0.65	0.01	6.0	-0.68	0.00
CO_2	1.4	0.28	0.15	18.9	0.05	0.90	16.6	-0.49	0.08	2.7	-0.49	0.05
CO	0.0	—	—	50.0	0.99	0.00	24.3	0.90	0.00	6.8	-0.29	0.27
O_2	0.0	-0.11	0.59	0.5	-0.40	0.29	0.6	0.42	0.17	0.7	-0.57	0.02
H_2	0.0	-0.16	0.42	1.0	0.52	0.36	1.7	0.15	0.68	56.9	0.42	0.11
He	0.1	-0.26	0.17	—	—	—	—	—	—	—	—	—
合计	100.0	—	—	100.0	—	—	100.0	—	—	100.0	—	—

注:“—”表示不涉及。

对于高炉煤气和转炉煤气,低位发热量均与 CO 含量呈正相关性,与 N_2 含量呈负相关。这表明随着 CO 含量的增加,高炉煤气和转炉煤气的低位发热量增大;而 N_2 作为惰性气体,其含量增加则会稀释可燃组分,降低两类燃料的低位发热量。焦炉煤气的低位发热量与 N_2 、 CO 、 O_2 含量均呈显著负相关性。

3.3 过量空气系数对烟气量的影响

从公式(6)可知,当过量空气系数大于 1 时,随着其进一步增大,烟气量也会相应增大。这是因为在富氧氛围下燃烧时,为提高 O_2 浓度,必须引入更多空气,从而带入大量 N_2 。 N_2 在燃烧过程中基本不参与化学反应,主要起到稀释作用,最终会直接进入烟气中,导致烟气体积增加。因此,过量空气系数的增大会显著提高实际烟气量。本研究建立的基于低位发热量的烟气量计算公式是以基准含氧量为基础进行核算,因此,过量空气系数对基准烟气量无影响。根据《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271—2014),锅炉排放的污染物实测浓度需折算为基准含氧量浓度,这与本研究中的基准烟气量计算过程所采用的基准含氧量条件相一致,从而有助于简化污染物排放量的

核算过程^[20]。

4 公式应用

4.1 重构燃气锅炉烟气量排放因子

采用基于燃料组分分析数据的理论计算方法,可较为准确地获得燃料的基准烟气量,因而在条件允许的情况下,应优先采用此方法。在环境管理实践中,由于缺乏详尽的燃料组分数据,可采用本研究建立的基于低位发热量的核算公式来估算基准烟气量。当低位发热量的实际数据不可获得时,还可根据其经验值进行估算,从而确定基准烟气量系数,实现对燃气锅炉烟气排放因子的重构。本研究对不同燃料的低位发热量分布情况进行了检验,结果表明,相关数据均呈正态分布,其 95% 置信区间及不确定度详见表 3。

从表 3 可看出,不同燃料的低位发热量的不确定度介于 $\pm 2.2\%$ ~ $\pm 11.5\%$,整体不确定度较低;而基于低位发热量重构得到的排放因子的不确定度略低,范围为 $\pm 2.2\%$ ~ $\pm 6.5\%$ 。这说明该方法在估算基准烟气量方面具有较高的准确性。

表3 重构排放因子的不确定度分析结果
Table 3 The uncertainty analysis of reconstructed emission factors

燃气类型	低位发热量			排放因子		
	总体均值的估计值/ (MJ/m ³)	95%置信区间/ (MJ/m ³)	不确定度/%	估计值/ (m ³ /m ³)	95%置信区间/ (m ³ /m ³)	不确定度/%
天然气	36.60	(35.8,37.4)	±2.2	10.78	(10.5,11.0)	±2.2
焦炉煤气	17.98	(17.4,18.5)	±3.1	4.88	(4.7,5.0)	±3.0
高炉煤气	3.42	(3.1,3.7)	±8.3	1.61	(1.6,1.7)	±3.3
转炉煤气	6.43	(5.7,7.2)	±11.5	2.15	(2.0,2.3)	±6.5

综上所述,本研究建立的基准烟气体核算方法具有逻辑清晰、数据可追溯、使用条件明确等优势,重构燃气锅炉经验排放因子的方法相较于传统方法更具实用性,可为实际环境管理中的排放量评估与核算提供有效支撑。

4.2 构建排放量核算方法

根据《排污许可证申请与核发技术规范 锅炉》(HJ 953—2018)^[6],采用实测法核算 NO_x 实际排放量(E)的计算公式如下:

$$E = \sum_{k=1}^t (C_k \times Q_k) \times 10^{-9} \quad (13)$$

式中: C_k 为污染物在第 k 小时的自动实测平均排放浓度(标态干基),mg/m³; Q_k 为第 k 小时的平均干烟量(标态),m³/h; t 为核算时段内的污染物排放时长,h。

如前文所述,实测法存在一定劣势,会造成测量结果无法反映实际排放量。本研究将 Q_k 作进一步分解:

$$Q_k = \lambda_k \times F_N \times V_{gy} \times \frac{\alpha_k}{\alpha_0} \quad (14)$$

式中: λ_k 为负荷率; F_N 为额定功率下的单位时间燃料消耗量,m³/h; V_{gy} 为基准烟气体系数; α_k 为过量空气系数; α_0 为基准过量空气系数。

将公式(14)代入公式(13),则排放量为

$$\begin{aligned} E &= \sum_{k=1}^t (C_k \times \lambda_k \times F_N \times V_{gy} \times \frac{\alpha_k}{\alpha_0}) \times 10^{-9} \\ &= F_N \times V_{gy} \times \sum_{k=1}^t [\lambda_k \times (C_k \times \frac{\alpha_k}{\alpha_0})] \times 10^{-9} \end{aligned} \quad (15)$$

根据《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271—2014)^[20],大气污染物基准含氧量折算浓度为

$$C_b = C_k \times \frac{\alpha_k}{\alpha_0} \quad (16)$$

在手工监测条件下,若污染物的核算周期与监测频次保持一致,可实现对实际排放量的最优

精度估算。此时, C_b 在核算周期内可近似视为常数,因此公式(15)可进一步简化为

$$E = F_N \times V_{gy} \times C_b \times \sum_{k=1}^t \lambda_k \times 10^{-9} \quad (17)$$

式中: $\sum_{k=1}^t \lambda_k$ 为核算周期内锅炉的平均负荷, $F_N \times$

$\sum_{k=1}^t \lambda_k$ 为核算周期内锅炉的燃料消耗量。

将 $F_N \times \sum_{k=1}^t \lambda_k$ 记为 F_i ,则公式(17)可进一步简化为

$$E = F_i \times V_{gy} \times C_b \times 10^{-9} \quad (18)$$

以北京市某供热公司为例,该公司于2019年取得排污许可证,拥有两台燃料为天然气的热水锅炉,单台容量均为7 MW。经测试,天然气的低位发热量为34.05 MJ/m³;2023年,两台锅炉的天然气的消耗量分别为76.95万 m³和1.52万 m³;两台锅炉共用一根烟囱,年均 NO_x 排放浓度为38 mg/m³。由此,根据本研究建立的公式(7)可快速计算出两台锅炉的基准烟气体系数,均为10.05 m³/m³。结合天然气用量及 NO_x 排放浓度,核算得到的 NO_x 年度排放量分别为293.8 kg和7.4 kg,合计301.2 kg。

综上所述,本研究提出的基于低位发热量的基准烟气体核算公式简洁,操作便捷,无需附加约束条件,可结合现场易获取的监测数据快速实现污染物排放量估算。

4.3 支撑生态环境监察

污染源自动监控技术已成为污染源管控的重要手段之一,然而在实际运行过程中仍存在诸多问题。例如,部分设备采用生产厂家运营模式,存在因选型不当或工况匹配性不足导致的运行异常问题。此类运营模式下的数据质量问题具有隐蔽性特征,采用常规监管手段往往难以对其进行有效识别,严重影响监测数据的可靠性和执法的有效性^[21]。

本研究建立的基准烟气体核算方法为生态环

境监察提供了一种新的技术路径。例如,部分烟卤因监测点位设置不规范,不具备流速测定条件,致使无法通过流速监测手段对烟气量进行校核。在此情况下,可基于本研究建立的烟气量排放因子,结合燃气消耗量,快速核算基准烟气量,并将其与在线监测系统测得的烟气量数据进行比对,从而实现在线监测系统监测数据的准确校验,为环境监察工作提供技术支撑和方向指引。

此外,该方法还可用于校验在线监测系统的速度场系数。在某些宽幅(当量直径大于5 m)监测断面的应用场景中,受限于测试手段,往往难以实测获得断面的平均流速。此时,可利用本研究基于燃气组分建立的基准烟气量计算公式,结合烟温与 O_2 实测浓度,反推出监测断面的平均流速,进而计算监测点位的速度场系数,并与系统内置值进行对比,以校验其合理性与准确性。

5 结论

1) 本研究提出的基准烟气量核算公式以基准含氧量为基础,不受实测过量空气系数的制约,可有效简化排放量核算流程,提升核算结果的稳定性和可比性。

2) 本研究建立的基准烟气量核算方法具有逻辑清晰、数据可追溯、使用条件明确等优势,重构燃气锅炉经验排放因子的方法相较于传统方法更具实用性,适用于年度排放量、实时排放量及减排量等多种核算场景,可为环境管理提供有力的技术支撑。

参考文献 (References):

[1] AN J Y, HUANG Y W, HUANG C, et al. Emission Inventory of Air Pollutants and Chemical Speciation for Specific Anthropogenic Sources Based on Local Measurements in the Yangtze River Delta Region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021, 21(3): 2 003-2 025.

[2] GU C, ZHANG L, XU Z D, et al. High-Resolution Regional Emission Inventory Contributes to the Evaluation of Policy Effectiveness: A Case Study in Jiangsu Province, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2023, 23(7): 4 247-4 269.

[3] 昌敦虎, 周继, 李曼, 等. 与我国环境管理对接的大气污染源排放清单分析 [J]. 中国环境监测, 2022, 38(5): 18-26.

CHANG Dunhu, ZHOU Ji, LI Man, et al. Analysis on the Integration of Air Pollutant Emission Inventory with Environmental Management in China [J]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38(5): 18-26.

[4] 周景博, 王鑫, 修瑞临, 等. 大气污染源排放清单与环境统计数据比较分析 [J]. 中国环境监测, 2021, 37(2): 83-88.

ZHOU Jingbo, WANG Xin, XIU Ruilin, et al. Comparative Analysis of Atmospheric Pollutant Inventory and Environmental Statistics [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, 37(2): 83-88.

[5] 周景博, 吕卓, 周敬峰, 等. 环境统计与排污许可衔接的工业源排放核算研究 [J]. 中国环境监测, 2022, 38(2): 52-60.

ZHOU Jingbo, LYU Zhuo, ZHOU Jingfeng, et al. Research on Emission Estimation of Industrial Pollution Sources Considering the Connection Between Environmental Statistics and Discharge Permit [J]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38(2): 52-60.

[6] 生态环境部. 排污许可证申请与核发技术规范 锅炉: HJ 953—2018 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.

[7] 国家质量技术监督局. 皮托管: JJG 518—1998 [S]. 北京: 中国计量出版社, 1998.

[8] 国家环境保护总局科技标准司. 固定源废气监测技术规范: HJ/T 397—2007 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.

[9] 钱丛昊. 燃煤电厂排放烟气流速与气体污染物排放量测量方法的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.

[10] 陈斌, 全继红, 罗四国, 等. 固定污染源烟气在烟道中流速分布的研究 [J]. 中国环境监测, 2014, 30(6): 171-175.

CHEN Bin, QUAN Jihong, LUO Siguo, et al. Study on Velocity Distribution of Flue Gas from Stationary Sources [J]. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(6): 171-175.

[11] 陶冶, 李强, 张爱丽, 等. 超声波流速仪在烟气流速测量中的应用 [J]. 中国环境监测, 2014, 30(6): 179-183.

TAO Ye, LI Qiang, ZHANG Aili, et al. Ultrasonic Flow Meter in the Flue Gas Flow Measurement Applications [J]. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(6): 179-183.

[12] 汪永祥, 王德彬. 采用煤低位发热量计算烟气量方法的探讨 [J]. 吉林电力, 2008, 36(5): 11-14, 53.

- WANG Yongxiang, WANG Debin. Discussion on Flue Gas Amount Calculation with Coal Low Heating Value [J]. Jilin Electric Power, 2008, 36(5): 11-14, 53.
- [13] 生态环境部. 关于发布《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》的公告: 公告 2021 年第 24 号 [A]. 2021-06-11.
- [14] 全国天然气标准化技术委员会. 天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法: GB/T 11062—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [15] 颜正, 赵川, 陈小兵. 基于燃烧空气及烟气量的燃煤机组标准煤耗率计量方法[J]. 热力发电, 2020, 49(2): 83-87.
- YAN Zheng, ZHAO Chuan, CHEN Xiaobing. Method for Measuring Standard Coal Consumption Rate of Coal-Fired Units Based on Combustion Air and Flue Gas Quantity [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2): 83-87.
- [16] 颜正, 肖仁杰, 黄鹏, 等. 基于烟气监测数据的标准煤耗率计量方法[J]. 能源科技, 2023, 21(4): 51-55.
- YAN Zheng, XIAO Renjie, HUANG Peng, et al. Method for Measuring Standard Coal Consumption Rate Based on Monitoring Data of Flue Gas [J]. Energy Science and Technology, 2023, 21(4): 51-55.
- [17] 张星, 王子兵, 徐杰, 等. 不同气体燃料燃烧特性及热特性分析[J]. 节能, 2022, 41(2): 15-19.
- ZHANG Xing, WANG Zibing, XU Jie, et al. Analysis of Combustion Characteristics and Thermal Characteristics of Different Types of Gas Fuels [J]. Energy Conservation, 2022, 41(2): 15-19.
- [18] 李伟龙, 王佰仟. 煤制气中甲烷、氢气含量变化对发电气耗的影响[J]. 河南科技, 2016, 35(17): 146-148.
- LI Weilong, WANG Baiqian. Influence of Methane and Hydrogen Content on Power Generation Gas Consumption in Coal Gasification [J]. Journal of Henan Science and Technology, 2016, 35(17): 146-148.
- [19] 牛家强, 刘如迪, 耿建辉. 燃气特性对发动机性能参数的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2016, 33(1): 5-9, 50.
- NIU Jiaqiang, LIU Rudi, GENG Jianhui. Influences of Gas Characteristics on Engine Performance Parameter [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2016, 33(1): 5-9, 50.
- [20] 环境保护部. 锅炉大气污染物排放标准: GB 13271—2014[S]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- [21] 赵红伟. 关于污染源在线监测管理的探讨[J]. 中国环保产业, 2019(8): 57-59.
- ZHAO Hongwei. Probe Into Supervisory Control and Management of Pollution Sources on Line [J]. China Environmental Protection Industry, 2019(8): 57-59.