

排气筒烟气出口流速对污染物最大落地浓度的影响及数值模拟

王传英

上海建科环境技术有限公司

DOI:10.32629/eep.v9i2.3092

[摘要] 本文分析了大气环境污染对人类健康、生态环境及气候造成的危害。文章利用《环境影响评价技术导则大气环境》(HJ 2.2-2018)中的估算模型,数值模拟分析了排气筒烟气出口流速(v_s)的变化会导致污染物最大落地浓度(ρ_{max})的相应变化。数值模拟计算分析表明,排气筒烟气出口流速(v_s)增加,污染物最大落地浓度(ρ_{max})相应减小。本文利用估算模型(AERSCREEN)对上海市浦东新区某喷漆房案例进行数值模拟,证实当 v_s 从5m/s增加至30m/s时,污染物最大落地浓度(ρ_{max})下降幅度可达80%以上。本研究为优化排气筒直径、烟气出口流速等运行参数的设计和降低环境风险提供了理论依据。

[关键词] 大气环境污染; 排气筒烟气出口流速(v_s); 污染物最大落地浓度(ρ_{max}); 烟气抬升高度; 估算模型(AERSCREEN); 数值模拟

中图分类号: X131.1 文献标识码: A

Influence of Flue Gas Exit Velocity on Maximum Ground-Level Pollutant Concentration and Numerical Simulation

Chuanying Wang

Shanghai Jianke Environmental Technology Co., Ltd

[Abstract] This paper analyzes the hazards of atmospheric environmental pollution to human health, ecological systems, and climate. Using the estimation model from the 《Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment—Atmospheric Environment (HJ 2.2-2018)》, a numerical simulation was conducted to analyze how changes in the exhaust gas outlet velocity (v_s) of a stack affect the corresponding changes in the maximum ground-level concentration of pollutants (ρ_{max}). The numerical simulation results indicate that an increase in the exhaust gas outlet velocity (v_s) leads to a corresponding decrease in the maximum ground-level concentration of pollutants (ρ_{max}). Using the estimation model (AERSCREEN), a case study of a spray booth in Pudong New Area, Shanghai, was numerically simulated. The results confirmed that when v_s increases from 5m/s to 30m/s, the maximum ground-level concentration of pollutants (ρ_{max}) decreases by more than 80%. This study provides a theoretical basis for optimizing the design of operational parameters such as stack diameter and exhaust gas outlet velocity, as well as for reducing environmental risks.

[Key words] Atmospheric environmental pollution; Exhaust gas outlet velocity (v_s); Maximum ground-level concentration of pollutants (ρ_{max}); Plume rise height; Estimation model (AERSCREEN); Numerical simulation

1 引言

随着工业化项目的不断建设及投入运行,排入大气环境中的气体污染物的量也逐年攀升。大气环境污染是一个极其复杂的全球性问题,其影响从局部的人体健康到全球的气候变化。排气筒出口参数(内径、温度、出口流速)是影响大气污染物扩散的关键人为可控因素,其中排气筒烟气出口流速(v_s)的影响机制复杂且至关重要。本文将对排气筒烟气出口流速(v_s)与污染物最大落地浓度(ρ_{max})关系进行定量计算分析,为建设项目排气筒烟气出口流速(v_s)设计和环境管理提供指导。

2 大气污染的危害

大气污染系指由于人类活动或自然过程引起某些物质进入大气中,达到一定浓度,持续足够长的时间,并因此而危害了人们的舒适、健康和福利或危害了生态环境^[1]。大气污染会危害人类的身体健康、破坏全球的生态系统、引起全球的气候变化等。

2.1 危害人类的身体健康

空气中的污染物可以通过人类的呼吸系统直接进入人体,对人类的呼吸系统和其他系统造成最直接的伤害。空气中的

污染物也可通过皮肤接触和食物链累计进入人体内,对人类的神经系统、生殖系统、消化系统等造成不可逆的伤害。

2.2 破坏全球的生态环境

部分企业会向大气环境中排放氮氧化物和硫氧化物,这些氮氧化物和硫氧化物会形成“酸雨”,酸雨排入水体中导致水体酸化,排入土壤中导致土壤酸化,酸雨落到建筑物上导致建筑物受到腐蚀。氟氯烃(CFCs)、哈龙等消耗臭氧层物质(ODS)的排放,会导致平流层臭氧层变薄,形成“臭氧空洞”,使得更多有害的紫外线到达地面,增加人类患皮肤癌、白内障的风险。大气中的含氮化合物沉降到土壤和水体中,会使水体富营养化,导致藻类疯狂生长,消耗水中氧气,使水体中鱼类和其他水生生物缺氧死亡,破坏水体生态平衡。

2.3 对全球气候的影响

随着大气环境中的甲烷、二氧化碳等温室气体不断增加,将产生全球的温室效应,温室效应将导致全球气候变暖,全球气温上升,从而引发冰川融化、海平面上升、极端天气出现更加频繁。温室效应对全球的水资源和人类居住环境都构成威胁。

3 理论基础与影响机制

3.1 地面最大浓度简介

估算模型(AERSCREEN)核心算法是基于高斯扩散模式。假设高斯扩散模式中的高架连续点源扩散模式公式中 σ_y/σ_z 不随距离 x 变化而为一常数,再经过一些简单运算后,可求出污染物最大落地浓度的计算公式,见公式(1)^[1]:

$$\rho_{\max} = \frac{2Q}{\pi \bar{u} H^2 e} \cdot \frac{\sigma_z}{\sigma_y} \quad (1)$$

式中: ρ_{\max} —排气筒中污染物最大落地浓度, g/m^3 ;

Q —排气筒中污染物排放源强, g/s ;

\bar{u} —排气筒出口处平均风速, m/s ;

H —排气筒有效高度,排气筒几何高度 H_s 和烟气抬升高度 ΔH 的加和, m ;

σ_y —距原点 y 处烟流中污染物在 y 向分布的标准差, m ^[1];

σ_z —距原点 z 处烟流中污染物在 y 向分布的标准差, m ^[1];

根据霍兰德(Holland)公式,中性大气条件下,烟气抬升高度见公式(2)^[1]:

$$\Delta H = \frac{v_s D}{\bar{u}} \left(1.5 + 2.7 \frac{T_s - T_a}{T_s} P_a D \right) = \frac{1}{\bar{u}} (1.5 v_s D + 9.6 \times 10^{-3} Q_H) \quad (2)$$

$$Q_H = 0.35 P_a Q_v \frac{T_s - T_a}{T_s} \quad (3)$$

式中: v_s —排气筒中烟气出口流速, m/s ;

D —排气筒的出口内径, m ;

T_s —排气筒出口处烟气温度, K ;

T_a —大气环境温度, K ;

P_a —大气压力, hPa ;

Q_v —排气筒的烟气流量, m^3/s ;

QH —排气筒烟气的热释放率, kW 。

3.2 影响机制分析

3.2.1 排气筒烟气出口流速(v_s)对烟气抬升高度 ΔH 的影响

烟气从排气筒排出后,会因烟气自身的热浮力和初始动量继续上升一段距离,这段距离称烟羽抬升高度(ΔH)。烟囱的有效源高 H 应为烟囱的几何高度 H_s 与烟气抬升高度 ΔH 之和^[1]。

由公式(2)可以得出,在排气筒出口内径、烟气温度、出口处平均风速、环境压力和温度等参数都不变时,当排气筒出口处的烟气出口流速(v_s)发生变化时,排气筒的烟气抬升高度(ΔH)也相应的发生变化。

烟气抬升的动力来自动量和浮力两个方面。排气筒出口处烟气的流速(v_s)越大,烟气向上喷射的初始动能就越大,有利于通过动量作用使烟羽抬得更高,这一现象称为动量抬升。

随着排气筒烟气出口流速(v_s)的提高,高速喷射的烟气会增强与周围冷空气的混合作用,导致烟气温度迅速降低,浮力效应减弱,进而抑制烟羽的抬升高度(ΔH)。

虽然排气筒烟气出口流速(v_s)增大带来了更多的初始动量,但由此引发的剧烈卷吸对浮力的负面消耗远大于动量增加带来的正面收益。因此,排气筒烟气出口流速(v_s)增大的净效果是烟气抬升高度(ΔH)降低。

3.2.2 排气筒烟气出口流速(v_s)对排气筒污染物的初始浓度影响

排气筒出口处的初始浓度的计算见公式(4)^[1]:

$$\rho_0 = Q/Q_v \quad (4)$$

$$Q_v = A \times v_s \quad (5)$$

式中: ρ_0 —排气筒出口处污染物初始排放浓度, g/m^3 ;

Q —排气筒出口处污染物排放源强, g/s ;

Q_v —排气筒出口处烟气流量, m^3/s ;

v_s —排气筒烟气出口流速, m/s ;

A —排气筒截面积, m^2 。

由公式(4)、公式(5)可见,在排气筒出口处污染物排放源强(Q)不变的情况下,排气筒出口处的烟气出口流速(v_s)增大,排气筒出口处污染物初始浓度降低。

综上所述,在排气筒出口处污染物排放源强(Q)不变的情况下,提高排气筒烟气出口流速(v_s)是降低其污染物最大落地浓度(ρ_{\max})最有效、最经济的工程手段之一。

4 数值模拟与案例研究

4.1 数值模拟

本次数值模拟用到的模型为《环境影响评价技术导则大气环境》(HJ 2.2-2018)附录A推荐的估算模型(AERSCREEN)。估算模型(AERSCREEN)适用污染源为点源(含火炬源)、面源(矩形或圆形)、体源,输出结果为短期浓度最大值及对应距离^[2]。估算模型所需最高和最低环境温度,一般需选取评价区域近20年以上资料统计结果,最小风速可取 $0.5m/s$,风速计最高取 $10m/s$ ^[2]。

本文以上海市浦东新区某个喷漆房排气筒为案例进行数值模拟,排气筒为点源,输出结果为1小时污染物最大落地浓

度 (ρ_{max}) 值。本次选取估算模型 (AERSCREEN) 进行数值模拟是合理的。

4.2 案例研究

本文以上海市浦东新区某个喷漆房排气筒为案例进行分析研究, 给出其固定参数: 污染物排放源强 Q 、烟囱几何高度 H_s 、出口内径 D 、烟气温度 T_s 等。喷漆房排气筒AERSCREEN估算模型参数见表1。

表1 估算模型计算参数表^[3]

参数		取值
城市/农村选项	城市/农村	城市
	人口数(城市选项时)	555万
最高环境温度/°C		40.0
最低环境温度/°C		-7.2
土地利用类型		城市
区域湿度条件		潮湿气候
是否考虑地形	考虑地形	否
	地形数据分辨率/m	/
是否考虑岸线熏烟	考虑岸线熏烟	否
	岸线距离/m	3500
	岸线方向/°	东

排气筒的出口直径应根据出口流速确定, 流速宜取15m/s左右^[4]。当采用钢管烟囱且高度较高时或烟气流较大时, 可适当提高出口流速至20~25m/s^[4]。

表2 估算模型非甲烷总烃、颗粒物的最大落地浓度 (ρ_{max}) 数值模拟表

污染源	污染因子	排气筒高度(m)	排气筒内径(m)	烟气出口温度(°C)	污染物排放速率(kg/h)	排气筒烟气出口流速(m/s)	最大落地浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
排气筒	非甲烷总烃	36	3.2	20	5.5	5	27.6
					5.5	10	13.8
					5.5	15	8.35
					5.5	20	6.72
					5.5	25	5.70
	颗粒物	36	3.2	20	4.4	5	22.1
					4.4	10	11.0
					4.4	15	6.68
					4.4	20	5.37
					4.4	25	4.56
				4.4	30	4.36	

本次数值模拟排气筒出口处的烟气出口流速 (v_s) 分别取5m/s、10m/s、15m/s、20m/s、25m/s、30m/s进行数值模拟计算。非甲烷总烃、颗粒物的最大落地浓度 (ρ_{max}) 数值模拟结果见表2。非甲烷总烃最大落地浓度 (ρ_{max}) 与烟气出口流速 (v_s) 关系见图1, 颗粒物最大落地浓度 (ρ_{max}) 与烟气出口流速 (v_s) 关系见图2。

由表2、图1、图2可见, 排气筒烟气出口流速 (v_s) 越大, 非甲烷总烃和颗粒物的最大落地浓度 (ρ_{max}) 就越小。当排气筒烟气出口流速 (v_s) 在5~15m/s时, v_s 增加越大, 最大落地浓度 (ρ_{max}) 下降越快。当排气筒烟气出口流速 (v_s) 大于15 m/s时, 最大落地浓度 (ρ_{max}) 下降比较缓慢。因此, 综合考虑污染物地面浓度控

制与运行能耗, 建议将排气筒烟气出口流速 (v_s) 设定在15m/s左右^[4], 以实现环境与经济性的平衡。

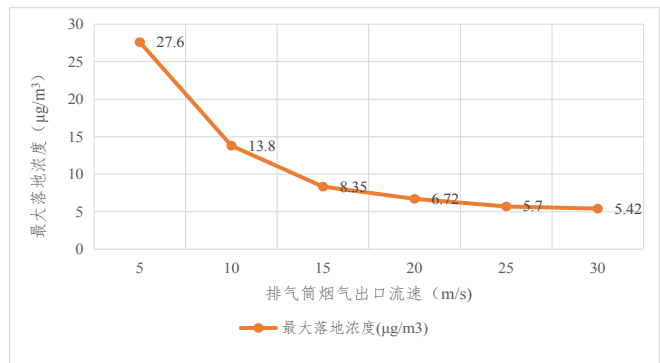


图1 非甲烷总烃最大落地浓度 (ρ_{max}) 与烟气出口流速 (v_s) 关系图

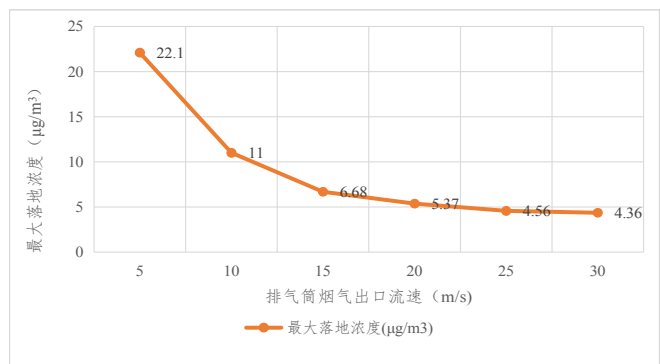


图2 颗粒物最大落地浓度 (ρ_{max}) 与烟气出口流速 (v_s) 关系图

5 结论

本文计算分析结果表明, 在特定的气象和污染物排放量条件下, 排气筒烟气出口流速 (v_s) 越大, 非甲烷总烃和颗粒物的最大落地浓度 (ρ_{max}) 就越小; 排气筒烟气出口流速 (v_s) 上升增加到一定数值后, 再增加其烟气出口流速 (v_s) 对减少污染物最大落地浓度 (ρ_{max}) 的贡献明显减小。综合考虑污染物地面浓度控制与运行能耗, 建议将排气筒烟气出口流速 (v_s) 设定在15m/s左右^[4], 以实现环境与经济性的平衡。

[参考文献]

- [1]郝吉明,马广大,王书肖.大气污染控制工程[M].4版.北京:高等教育出版社,2021:87-96.
- [2]生态环境部,环境影响评价技术导则大气环境HJ2.2-2018[S],北京:中国环境科学出版社,2018.
- [3]上海建科环境技术有限公司,(2024),《东方航空技术有限公司国际化航空维修服务平台项目环境影响报告书》(环境影响报告书,报批稿,委托单位内部资料);
- [4]生态环境部,大气污染治理工程技术导则HJ2000-2010[S],北京:中国环境科学出版社,2011.

作者简介:

王传英(1984--),女,汉族,上海人,硕士研究生,中级工程师,研究专业方向: 环境影响评价。