

对工业锅炉烟尘排放标准制定原则 和 方 法 的 探 讨*

邵 强

(中国医学科学院卫生研究所)

我国《工业“三废”排放试行标准》(GBJ4-73)中,对工业及采暖锅炉烟尘,规定允许排放浓度为200毫克/米³。经多年来试行,证明这一标准对大多数炉型来说要求偏严。标准并未反映对不同类型锅炉(燃烧方式)、烟囱高度的不同要求。制定标准时对锅炉设计、制造、除尘技术水平以及国家的经济能力也考虑不够。因此,将工业及采暖锅炉烟尘允许排放浓度一律定为200毫克/米³,是不够合理的,需要加以修订。

本文从实际情况出发,讨论工业锅炉烟尘排放标准的制订原则和方法(从大气扩散模式推算和按最佳实用技术制定),以供有关部门在修订标准时参考。

一、工业及采暖锅炉烟尘实际排放情况

自《工业“三废”排放试行标准》颁布以来,我所和有关部门对工业及采暖锅炉

(包括各种炉型、不同煤质、容量以及不同烟囱高度)烟尘排放浓度进行了大量的现场实测,表1是我们实测结果。

从中可见,除部分经改造的小型手烧炉和层燃炉烟尘排放浓度低于或接近试行标准规定之外,其余锅炉超标1.5~4.0倍,有的竟达10倍左右。

从测试结果分析,烟尘排放浓度超标不外乎以下三种情况:

1. 锅炉燃烧工况不佳,烟尘初始浓度过高(如有的链条炉、抛煤炉达6,610和10,085毫克/米³,煤粉炉高达50,000~60,000毫克/米³),加之锅炉所配除尘器实际热态运行效率较低,导致排放浓度严重超标(超标10倍以上);

2. 锅炉烟尘初始浓度高,所配除尘器实际热态运行效率只达到一定水平,排放浓度仍有较大幅度超标(超标4~6倍);

3. 烟尘初始浓度属中等,锅炉所配除尘

工业及采暖锅炉烟尘排放水平

表 1

锅 炉 型 式	蒸发量 (吨/时)	煤 种	烟 气 量 (标米 ³ /时)	烟尘初始浓度 (毫克/标米 ³)	除 尘 器		烟尘排放 浓 度 (毫克/标 米 ³)	与原《标 准》相比 超标倍数
					型 式	热态运 行效率 (%)		
1. 手 烧 炉 (机械引风)	1~2	煤	1,200~3,000	200~1,300	双级蜗旋	65~85	75~230	低于~接近
2. 往 复 炉 (机械引风)	2~4	煤及混煤	3,000~60,000	1,450~2,750	沉降室、PW 双级蜗旋多管旋风、 PW	70~80	420~1,980	1.1~9.0
3. 链 条 炉	4~8、20	煤及混煤	6,000~80,000	1,000~6,000		50~90	360~2,070	0.8~9.4
4. 抛 煤 炉	6.5~10	煤及杂煤	10,000~24,000	3,000~10,000	水膜旋风、玻管喷淋	70~86	800~2,900	3.0~13.4
5. 煤 粉 炉	10~40	煤 粉	20,000~50,000	20,000~50,000	水膜旋风+玻管喷淋	95	980~2,700	4.0~12.5
6. 沸 腾 炉	16	劣质白煤	20,000	40,000	水膜旋风+玻管喷淋	95	1800	8.0

注(1)根据北京市环境保护科学研究所测试资料。

* 本文承钮式如同志修改,特此表示感谢。

器实际热态运行效率基本符合标定水平,排放浓度仍有所超标(超标1~3倍)。

在所测试的锅炉中,属于第一类的是少数,属于第二类的大多是抛煤炉,煤粉炉及沸腾炉,属于第三类的大多数为链条炉。

从分析实测资料可知,如要使烟尘排放浓度不超过200毫克/米³,多数锅炉势必配置除尘效率极高的除尘器,有的炉型要求除尘效率高达95%~99%,这是与我国目前技术经济现状不相适应的。

其次,排放标准只笼统规定工业锅炉烟尘允许排放浓度,而未规定烟囱高度。

综上所述,有必要对原工业锅炉烟尘排放标准的修订原则和方法作进一步探讨。

二、关于制订工业锅炉

烟尘排放标准的指

导原则

1.从环境保护、节能、经济效益三方面综合考查,做到技术上可能,经济上合理,尽可能将烟尘降到最低水平,以收到良好的环境效益。

2.排放标准应体现对锅炉设计、制造和用户的管理有严格要求。

3.应体现我国能源政策、按不同炉型(燃烧方式)区别对待。对热效率低、煤耗大、烟尘大、污染严重的落后炉型(如手烧炉)应从严要求。

4.排放标准应明确规定执行期限,不同时期要求也应不同,一般说,远期严于近期标准。

5.我国幅员辽阔,各地区地理条件、气象条件差异极大,资源情况也不尽相同,可因地制宜、因煤制宜制订地方排放标准。

为在工业锅炉排放标准中体现上述原则,寻找合理的制订方法是很重要的,下面提出两种方法,结合实际加以讨论。

三、关于制定工业锅炉

烟尘排放标准的方法

(一)应用大气扩散模式推算排放标准

这种方法是应用大气扩散规律,以空气质量标准或卫生标准为依据,推算烟囱允许排放量,或者以空气质量标准或卫生标准为目标,依据烟囱的排放量,推算所需烟囱高度。这类方法虽然有其逻辑上的合理性,但其精确度和可靠性很大程度上取决于大气扩散模式本身。目前,在空气质量标准(或卫生标准)和排放标准之间所建立的数学模式,在实用上尚有其局限性。由于选用参数各异,用之推算排放标准未免有较大差别^{[1][2]}。

下面试选择烟气抬升高度计算式和烟气扩散式,推算不同烟囱高度下的排放量和排放浓度,从而判断由此途径确定的排放标准的可行性。

1.烟气抬升高度

烟气抬升高度是计算烟尘扩散稀释的重要参数。关于它的计算式很多,其常用的有Holland^[3]、Bosanquet^[4]、Lucas^[5]、Briggs^[6]、Con.C.A.W.E及Con.C.A.W.E(修正式)。为进行分析比较,给定一组烟囱高度、排气参数和气象参数,按以上诸式计算烟气抬升高度,结果见图1。

由图1看出,在诸式中以Holland式^[3]抬升最低,Bosanquet式^[4]及Lucas式^[5]最高,其它各式居中。因Holland式是用风洞试验结合现场观测得到的,对于排热率大的污染源计算来说产生误差比较大,故一些研究工作者认为该式偏于保守。Con.C.A.W.E式先是根据现场实测经回归分析后提出的,后又通过理论分析和进一步的实测进行了修正^[3]。美国TVA对六个电厂的实验认为该计算式可行,但也有人从多数实验资料的分析来看,认为 $\Delta H \propto u^{-\frac{3}{4}}$ 是不合适的。Briggs式^[6]是根据质量、动量和浮力通量

守恒原理，并作了一些假设后推导出的半理论、半经验抬升式。将 Briggs 式用于排率较大的燃煤锅炉烟气抬升，与实测数值有较好的吻合。Bosanguet 式及 Lucas 式都是根据理论模式与实测资料相结合而推导得来的，但经过实际验证，用此两式预报烟气抬升严重偏高，且分散性较大。

从以上分析，结合对工业及采暖锅炉排烟这类污染源的特性，看来在烟气热释放率 $Q_H > 500$ 千卡/秒时，可采用 Briggs 烟气抬升计算式，而在 $Q_H \leq 500$ 千卡/秒时，则采用两倍 Holland 烟气抬升计算式。

2. 烟气扩散式：

对于平原地区，中性气象条件和连续排放的单一污染源，烟尘排放量与地面烟尘最大浓度的关系可采用 Sutton 扩散式表示：

$$C_{max} = \frac{235Q_m}{\bar{u} H_e^2} \cdot \frac{C_s}{C_y}$$

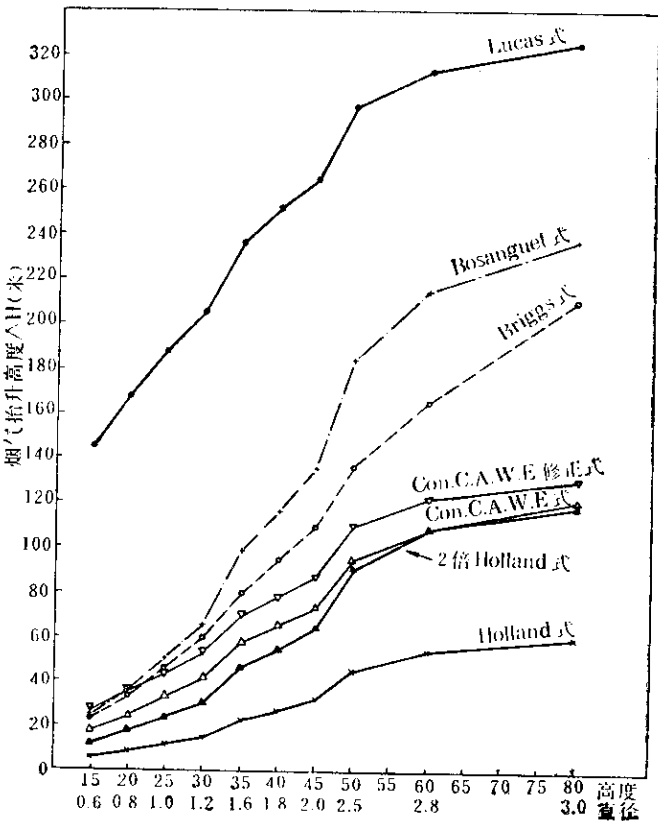


图 1 几个烟气抬升计算式的比较

当 C_{max} 、 $\bar{u}$ 、 $\frac{C_s}{C_y}$ 取一定值时，即可由

上式得出烟尘允许排放量与烟囱有效高度之间的关系式。如取 $C_{max} = 0.15$ 毫克/米³（居住区大气中烟尘日平均最高容许浓度值）， $\bar{u} = 3$ 米/秒， $C_s/C_y = 0.65$ ，并把根据烟气抬升式算出的烟囱有效高度的数值代入 Sutton 扩散式，则可得工业及采暖锅炉一定高度烟囱的烟尘排放量及排放浓度，结果见表 2。

如给定一组实测烟尘初始浓度，则按照大气扩散确定的允许排放浓度可提出对除尘效率的要求，结果见表 3。

由表 3 看出，在一定的烟囱高度下，手烧炉、往复炉、链条炉不需配置效率较高除尘器，即能保证地面烟尘浓度达到卫生标准。对抛煤炉，除尘器效率需要求 85% 左右，对此，目前国内先进的旋风除尘器能够

达到。但对煤粉炉、沸腾炉所要求的除尘效率则需很高，如采用湿式除尘器，则需两级，显然，这是我国目前经济、技术条件所难于办到的。

由以上分析可知，在相应的烟囱高度下，为保证地面烟尘浓度达到卫生标准，不同炉型对除尘器的要求相差悬殊，这说明单靠大气扩散模式推算排标，实际可行性较差。

同时，上述估算所依据的扩散式，只是特定条件下的近似式，影响烟气扩散的因素很多，所取排气参数和气象参数又有很大局限性，故制订工业锅炉烟尘排放标准的原则，对大气扩散模式的依赖性不能过高，这一途径可作为制订排放标准的辅助措施。直接影响排放浓度的关键因素是锅炉出口烟尘初始浓度和所配除尘器热态运行效率。应

根据大气扩散确定的排放量及排放浓度

表 2

烟囱高度H (米)	15	20	25	30	35	40	45	50	60	80
烟囱出口直径d(米)	0.6	0.8	1.0	1.2	1.6	1.8	2.0	2.5	2.8	3.0
烟气流速(米 ³ /时)	10,180	21,710	33,930	61,070	108,570	137,410	203,580	318,090	443,340	508,940
L(标米 ³ /时)	6,570	14,010	21,900	39,420	70,070	88,690	131,390	205,200	286,130	328,460
烟气出口速度v ₀ (米/秒)	10	12	12	15	15	15	18	18	20	20
烟气抬升高度ΔH(米)	7.3	12.3	16.2	25.5	37.3	54.8	72.7	99	130	158.5
烟囱有效高度H ₀ (米)	22.3	32.3	41.2	55.5	72.3	94.8	117.7	149	190	238.5
烟尘排放量G(公斤/时)	5.27	11.06	18.00	32.67	55.44	95.31	146.92	235.45	382.86	603.27
烟尘排放浓度c(毫克/米 ³)	802	789	822	829	791	1,075	1,118	1,147	1,338	1,837

按大气扩散确定允许排放浓度后各种锅炉对除尘效率的要求(%)

表 3

炉 型	烟 尘 初 始 浓 度 (毫克/米 ³)	烟 囱 高 度 (米)									
		15	20	25	30	35	40	45	50	60	80
		除 尘 效 率 (%)									
手 烧 炉	1,000	20	21	18	—	—	—	—	—	—	—
往 复 炉	2,000	—	—	—	59	67	46	44	—	—	—
链 条 炉	2,530	—	—	—	67	69	58	56	—	—	—
抛 煤 炉	7,340	—	—	—	—	—	85	85	84	—	—
煤 粉 炉	24,100	—	—	—	—	—	96	95	95	94	92
沸 腾 炉	31,200	—	—	—	—	—	97	96	96	96	94

该在可能条件下降低锅炉出口烟尘初始浓度，提高除尘效率，而控制这两个指标，按最佳实用技术途径加以确定比较现实。

(二) 按最佳实用技术原则制订

这种方法侧重于从污染控制技术和生产管理角度提出，它与空气质量标准（或卫生标准）并无直接联系。最佳实用技术的基本含义系指这种技术（方法）在现阶段属于最佳，而又可能在同一类型的工厂中推广采用。这种方法在技术上可行，在经济上也可行。根据这一原则制定的排放标准，虽也有可能空气质量达不到空气质量标准的要求，但可使空气达到尽可能清洁的程度。

现对与烟尘排放有关的最佳实用锅炉工艺水平及最佳实用除尘技术水平作一分析：

1. 各种炉型的特点及锅炉出口烟尘初始浓度

(1) 手烧炉：蒸发量在1吨/时以下的小型手烧炉，燃烧工况比较差，加煤时产

生较浓黑烟，排烟温度也比较高，一般没有机械引风装置，靠自然引风，由于通风强度低，锅炉出口烟气流速慢，故随烟气流夹带出的烟尘较少。

蒸发量为1吨/时以上的手烧炉燃烧工况也比较差，加煤时烟尘瞬时浓度也比较高，但排烟温度略低，有机械引风装置，烟尘量大于前者。

(2) 层燃炉（机烧）：蒸发量在2吨/时以上机烧层燃锅炉，如链条炉、往复炉排和振动炉排，燃烧工况比较好，锅炉出口粉尘浓度属于中等，尘粒较粗，只要配以适当除尘器，可使烟尘排放浓度降至较低水平。

(3) 抛煤炉：锅炉出口烟尘浓度大于机烧层燃炉，烟尘比较粗，采用较高效率的除尘器，能大幅度降低烟尘浓度。

(4) 煤粉炉：燃烧工况好，热效率高，但烟尘初始浓度远比层燃炉高，因燃烧完全，烟尘呈灰白色，且烟尘粒度较细，对

除尘器的要求高。

(5) 沸腾炉：燃烧工况好，热效率高，锅炉出口烟尘浓度极高，且烟尘粒度较细，对除尘器的要求极高。

在工业锅炉的排放标准中，烟尘初始浓度是一项极为重要的数据，应以大量实测数据为依据，经综合分析后确定。表 4 是建议采取的数据。

各类锅炉的初始烟尘浓度 表 4

炉 型	初始烟尘浓度(毫克/米 ³)		
	最 低	最 高	平 均*
手烧炉(1吨/时以下,自然引风)	116	1300	1000
链条炉	514	5610	2500
往复炉排**	1450	2753	2000
抛煤炉	3663	10085	5500
煤粉炉	20080	69500	20000
沸腾炉	31200	—	40000

注*：系综合分析数据，并非表中最低、最高数据之平均值。
**：引用北京市环境保护科学研究所实测数据。

2.对工业锅炉所配除尘器的最佳实用水平分析

用于工业锅炉的除尘器效率有较大差异，这当然与各类除尘器结构特点有关，但也与烟尘粒度，安装情况及运行管理（漏风率、负荷变更、煤种）等因素有关，其中干式除尘器热态运行平均效率大体分为四种类

型：70~80%，80~85%，85~90%，90~95%，而湿式除尘器除尘效率虽较高，但实测热态运行效率多在95%以下，故从最佳实用技术原则着眼，结合大气扩散模式，对各类锅炉在不同烟囱高度下的除尘效率可按表 5 的要求选配。考虑到我国除尘技术水平的发展和能力，可分为两期标准。

按各类锅炉出口烟尘初始浓度(表 4)和所配除尘器应达到的热态运行平均效率(表 5)可以提出确定各类锅炉烟尘浓度排放标准的方案。

(三)烟尘浓度排放标准推荐方案

本文推荐以最佳实用技术为主，大气扩散模式为辅，两者结合的制订排放标准方法。按照这种方法制订的排放标准，在我国目前技术经济条件下能够实现，又能保证一定的空气质量，故是合理的、可行的。

按照两种途径相结合的方法，由表 4 及表 5 确定的工业及采暖锅炉允许烟尘排放浓度的推荐数据列于表 6。

为了检验这种制定方法的合理性、可行性，我们对达到标准后可能出现的地面烟尘最大浓度进行了估算。估算时采用的烟气抬升计算式、扩散计算式以及所采用的排气参数、气象参数同表 2，估算结果如图 2 和图 3 所示。

由图 3 看出，在各种烟囱高度下，手烧炉、往复炉排及链条炉排如烟尘排放浓度符

根据最佳实用技术原则对各类锅炉的除尘要求(%) 表 5

标准类别 烟囱高度(米) 炉 型	第 一 期 标 准			第 二 期 标 准		
	15~19	20~39	40~49	15~19	20~39	40~49
手 烧 炉	70			80		
往复炉排	85	80	75	90	85	80
链条炉排	85	80	75	90	85	80
抛 煤 炉	90	85	80	92	90	85
煤 粉 炉	—	95	94	—	96	95
沸 腾 炉	—	—	95	—	—	96

工业及采暖锅炉允许排放浓度 (毫克/米³)

表 6

标准 类型 烟囱 高度(米) 炉 型	第 一 期 标 准			第 二 期 标 准		
	15~19	20~39	40~49	15~19	20~39	40~49
手 烧 炉	300			200		
往 复 炉 排	300	400	500	200	300	400
链 条 炉 排	375	500	625	250	375	500
抛 煤 炉	550	825	1100	440	550	825
煤 粉 炉	—	1000	1200	—	800	1000
沸 腾 炉	—	—	2000	—	—	1600

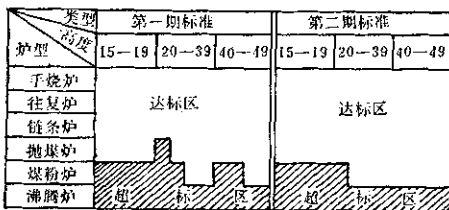


图 2 烟尘地面浓度达标区与超标区

合规定，则地面烟尘浓度均不超过卫生标准所规定的居住区烟尘最高允许浓度 0.15 毫克/米³ (日平均值)。

抛煤炉和煤粉炉在不同烟囱高度下，地面烟尘浓度不超标点相应为 A、B、C、D。在 A、B、C 三点，排放浓度的界限值

比推荐方案中的允许排放浓度值略小。而 D 点排放浓度界限值为 1200 毫克/米³。由此分析可知，抛煤炉、煤粉炉如烟尘排放浓度符合规定，只有在烟囱高度不小于 50 米时，地面浓度才不超标，而对沸腾炉，即使采用 50 米高烟囱，地面浓度仍超标。从图 3 中看出，在排放浓度为 1600 及 2000 毫克/米³ 时，地面浓度分别为 0.2 及 0.25 毫克/米³，超标倍数分别为 0.3 及 0.6 倍。对这类锅炉，需从功能区域的划分上加以控制。

应该指出，采用 Sutton 扩散模式估算锅炉烟尘地面最大浓度有其局限性，对于这类污染物，应用倾斜高斯扩散——沉积模式估算会更为合适，但这方面的资料表明^[7]，

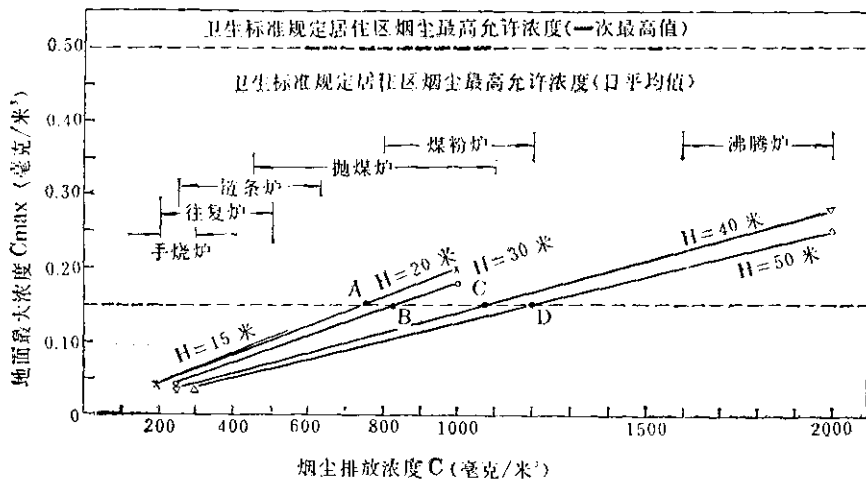


图 3 对各类型工业锅炉达到规定排放浓度所造成的地面烟尘浓度的验算

(下转第 77 页)

(上接第69页)

在中性和不稳定条件下,由于湍流作用所造成的垂直扩散能力远远大于因重力作用所造成的垂输送,因此在这两种状态下,由于重力作用所造成的地面浓度峰值被大气湍流效应所淹没,而只有在稳定条件下,重力沉降作用才被突出出来,造成地面浓度随距离的变化出现多峰现象。通常,制定排放标准多采用中性条件作为典型大气状态,故本文估算时未计及烟尘的重力沉降对地面浓度的影响,当然,在稳定条件下,地面烟尘浓度会相应增加。

参 考 文 献

[1] 钮式如,环境保护,(5),4~7(1979)。

- [2] A.C.Stern, *Air Pollution*, V, 572-585, 3rd Ed., Academic Press, New York, 1977.
- [3] H.Moses & M.R.Kraimer, A.P.C.A., 22(8), 621-630, (1972).
- [4] [日]通商产业省, 屠文定译, 大气污染防治技术, 148~154, 中国建筑工业出版社, 北京, (1975)。
- [5] D.H.Lucas, D.J.Moore and G, Spun, *Int.J.Air Water Poll.* 7, 473-500, (1963).
- [6] G.A.Briggs, *Plume Rise*, A.E.C Critical Review Series, U.S.Atomic Energy Commission, TID-25075, Div. of Technical Information, 1-14, (1969).
- [7] 陈泮勤, 环境科学, 3(1)59~65(1982)。