

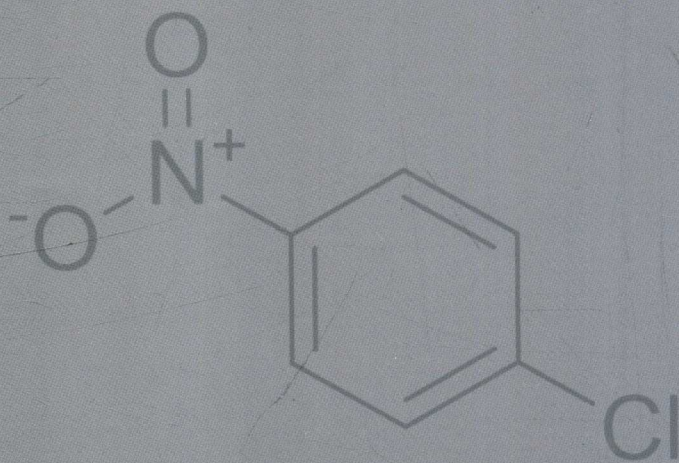
挥发性有机物污染控制系列丛书

VOCs

美国燃烧源 排放估算协议

EMISSIONS ESTIMATES FOR
COMBUSTION SOURCES OF UNITED STATES

闵 健 吕 巍 沙 莎 郭 森 庄思源 等 编译
梁 鹏 崔积山 审校



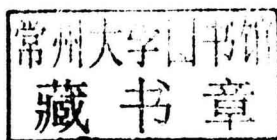
中国环境出版社

挥发性有机物污染控制系列丛书

美国燃烧源排放估算协议

闵 健 吕 巍 沙 莎 郭 森 庄思源 等 编译

梁 鹏 崔积山 审校



中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

美国燃烧源排放估算协议/闵健等编译. —北京: 中国环境出版社, 2017.8

(挥发性有机物污染控制系列丛书)

ISBN 978-7-5111-3253-6

I. ①美… II. ①闵… III. ①燃烧产物—污染物
排放标准—美国 IV. ①X-652

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 152713 号

出版人 王新程
责任编辑 李兰兰
责任校对 尹芳
封面设计 宋瑞



更多信息, 请关注
中国环境出版社
第一分社

出版发行 中国环境出版社

(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)

网 址: <http://www.cesp.com.cn>

电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn

联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)

010-67112735 (第一分社)

发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2017 年 8 月第 1 版
印 次 2017 年 8 月第 1 次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 15
字 数 300 千字
定 价 52.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载、违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

序

近几年,我国大部分地区均出现了持续性大面积灰霾天气,特别是经济发达地区,臭氧浓度也在持续上升,这一系列问题尤为突出。臭氧及 $\text{PM}_{2.5}$ 引起了人民群众的高度重视,对其主要前体物——挥发性有机物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 的控制已成为现阶段我国大气环境治理领域中的热点问题。

由于 VOCs 以无组织排放为主,自 2014 年起,在固定源的管控中,我国从石化行业入手,参考美国对 VOCs 的管控经验,以源项解析的思路进行全过程精细化管理。VOCs 的排放量与工艺选用、设备选材选型、过程控制、物料性质、外部环境等诸多因素有关,与单位产品并非简单线性关系。

经过多年的摸索和实践,我国在有组织排放源研究方面取得了较为成熟的经验,通过现场实测、类比监测、物料衡算等方法可以较为准确地掌握污染物排放规律,采取有效措施控制污染物的产生和排放;而在无组织排放源研究方面相对薄弱,在污染物的产生排放规律、有效控制措施方面尚不能满足环境管理的要求。

美国是最早开展 VOCs 污染治理的国家,在 VOCs 定义与表征、监测方法、排放量估算方法以及污染控制标准体系方面的研究较为全面和深入,是 VOCs 管理研究的首要借鉴对象。2008 年,美国对各个行业的 VOCs 排放总量进行统计,火电行业排在造纸、炼油、海上采油采气等行业之后位居第四大排放行业,排放总量约为 40 000 t。我国的电力工业始于 1882 年,截至 2008 年年底,

我国发电装机容量达到 79 253 万 kW, 其中, 火电总装机容量达 60 132 万 kW, 约占总容量的 75.87%, 发电总量达到 34 334 亿 kW · h。但我国对火电行业的污染物排放管控主要集中在二氧化硫 (SO_2)、氮氧化物 (NO_x)、烟尘 (PM) 和汞及其化合物等, 对 VOCs 的管控尚属空白。

本书为“挥发性有机物污染控制系列丛书”之一, 其中包括美国国家环境保护局发布的《外部燃烧源污染物排放研究》(*External Combustion Sources*, EPA, AP-42, 第五版, 第一卷)和《内部燃烧固定源污染物排放研究》(*Stationary Internal Combustion Sources*, EPA, AP-42, 第五版, 第三卷)的中文译本。本书对各种燃烧物料的废气污染源进行分类归纳, 总结了不同污染源排放规律和各种污染因子 (其中包括了 SO_2 、 NO_x 、PM、CO、VOCs、微量金属等) 的处理技术及措施, 并分门别类地给出了大量的归纳性排放系数。

AP-42 燃料燃烧部分的内容为美国国家环境保护局 1995 年 1 月发布的第五版。本书的翻译出版, 将为我国企业、事业单位、环保部门的环境管理人员, 科研院校的研究、教学人员, 设计院、环境影响评价编制单位的技术管理人员等提供有益的帮助, 对挥发性有机物在污染源归类分析、环境影响评价、排污许可、环境执法、科研课题等方向的工作开展具有参考和借鉴意义。



前 言

为贯彻落实《大气污染防治行动计划》(国发〔2013〕37号),环境保护部环境工程评估中心组织翻译了《外部燃烧源污染物排放研究》(*External Combustion Sources*, EPA, AP-42, 第五版, 第一卷)和《内部燃烧固定源污染物排放研究》(*Stationary Internal Combustion Sources*, EPA, AP-42, 第五版, 第三卷)。主要内容为:第1章烟煤和次烟煤的燃烧,第2章无烟煤燃烧,第3章燃油燃烧,第4章天然气燃烧,第5章液化石油气燃烧,第6章木质废料在锅炉中的燃烧,第7章褐煤燃烧,第8章糖厂蔗渣的燃烧,第9章家用壁炉,第10章家用柴火炉,第11章废油燃烧,第12章固定式燃气涡轮发动机,第13章燃烧天然气的往复式发动机,第14章汽油和柴油工业发动机,第15章大型固定式柴油发动机和所有固定式双燃料发动机。本次翻译版本为第五版(1995年1月发布),本中文译本在该版本基础上对1996年2月、1996年10月及1998年9月等发布的删减或增补内容进行了相应的更新,更多详细内容可在EFIG主页(<http://www.epa.gov/oar/oaqps/efig/>)查阅相关文档。

燃料燃烧一直以来都是大气污染物排放大户,排放的污染物主要为二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)、烟尘、一氧化碳(CO)以及挥发性有机物(VOCs)等,排放形式包括有组织排放和无组织排放。因此,本书针对燃料燃烧污染物排放规律和水平的分析研究是极其重要的,特别是对VOCs和微量金属排放的研究。

燃料燃烧大气污染物的控制方法一般有燃料处理/替代、燃烧改良和燃烧后控制。燃料处理/替代包括煤炭的清洗、清洁能源替代（如气代煤等）；燃烧改良主要是指提高锅炉的燃烧效率等；燃烧后控制主要是指通过相应的装置（如脱硫装置、脱硝装置和除尘装置等）对标准污染物产生后进行控制，非标准污染物（如颗粒相金属）的排放也得到了控制[译者注：非标准污染物是指除化学气体污染物 CACs 以外的全部污染物，包括其他有毒和有害污染物。其中大部分污染物尚未深入研究，但与人体健康息息相关，例如，铅、苯、二噁英、呋喃、多氯联苯（PCBs）、农药、氨、硫化氢、花粉和孢子等]。

燃料燃烧大气污染物排放数据相对比较全面，因此，获得其工艺过程污染物的排放因子相对较容易。

参与本书翻译的人员有：闵健、吕巍、刘志学、郭森、庄思源、沙莎、王赫婧、冉丽君、梁睿和罗霖。本书审校由梁鹏、崔积山完成。

本书的翻译得到了环境保护部相关领导的帮助与支持。

本书的翻译工作十分复杂，我们尽了最大努力，力求忠于原文，并尽量试图表述清晰达意。另外，原文为 20 世纪文稿，选用的多为历史数据，本书的国际单位制和美制数据取值均和原文保持一致，供读者参考。

鉴于译校者的知识面和水平有限，仍会有不当之处，望广大读者不吝指正，以供再版时修改。

目 录

1 烟煤和次烟煤的燃烧	1
1.1 简述	1
1.2 燃烧装置.....	1
1.3 排放物	3
1.4 污染物控制.....	7
1.5 排放系数.....	12
1.6 参考文献.....	36
2 无烟煤燃烧	44
2.1 简述	44
2.2 燃烧装置.....	44
2.3 排放物	45
2.4 污染物控制.....	46
2.5 参考文献.....	52
3 燃油燃烧	54
3.1 简述	54
3.2 燃烧装置.....	54
3.3 排放物	55
3.4 污染物控制.....	59
3.5 参考文献.....	78

4	天然气燃烧	85
4.1	简述	85
4.2	燃烧装置.....	85
4.3	排放物	86
4.4	污染物控制.....	88
4.5	参考文献.....	93
5	液化石油气燃烧	95
5.1	简述	95
5.2	燃烧装置.....	95
5.3	排放物	96
5.4	污染物控制.....	96
5.5	参考文献.....	99
6	木质废料在锅炉中的燃烧	101
6.1	简述	101
6.2	燃烧装置.....	101
6.3	排放和污染物控制.....	102
6.4	污染物控制.....	103
6.5	参考文献.....	112
7	褐煤燃烧	119
7.1	简述	119
7.2	燃烧装置.....	119
7.3	排放物	121
7.4	污染物控制.....	123
7.5	排放系数.....	125
7.6	参考文献.....	137
8	糖厂蔗渣的燃烧	144
8.1	工艺过程说明.....	144

8.2	燃烧装置.....	145
8.3	排放物	145
8.4	污染物控制.....	145
8.5	参考文献.....	148
9	家用壁炉	153
9.1	简述	153
9.2	排放物和污染物控制.....	154
9.3	参考文献.....	157
10	家用柴火炉	159
10.1	简述	159
10.2	排放物.....	160
10.3	污染物控制.....	160
10.4	参考文献.....	167
11	废油燃烧.....	170
11.1	简述.....	170
11.2	排放物.....	170
11.3	污染物控制.....	171
11.4	参考文献.....	175
12	固定式燃气涡轮发动机	177
12.1	简述	177
12.2	工艺过程说明.....	177
12.3	排放物.....	179
12.4	污染物控制技术.....	182
12.5	参考文献.....	191
13	燃烧天然气的往复式发动机	193
13.1	简述	193

13.2	工艺过程说明.....	194
13.3	排放物.....	195
13.4	污染物控制技术.....	197
13.5	参考文献.....	207
14	汽油和柴油工业发动机	208
14.1	简述	208
14.2	工艺过程说明.....	208
14.3	排放物.....	209
14.4	污染物控制技术.....	211
14.5	参考文献.....	216
15	大型固定式柴油发动机和所有固定式双燃料发动机.....	218
15.1	简述	218
15.2	工艺过程说明.....	218
15.3	排放物和污染物控制.....	219
15.4	污染物控制技术.....	221
15.5	参考文献.....	226
	附件：计量单位换算表.....	229

1 烟煤和次烟煤的燃烧

1.1 简述

煤是有机物和无机矿物质组成的复杂混合物，由植物埋藏地下经过漫长年代不断层层堆积而成。根据煤的天然变质程度，可将其按从褐煤到无烟煤的煤阶进行分类。煤阶不是按照单一指标，而是根据挥发分、固定碳、内在水分和氧含量等多个指标进行定义。一般而言，煤阶随着固定碳含量的增加而升高，随着挥发分和水分含量的减少而降低。

目前，烟煤是数量最多的一种煤，其特点为固定碳含量低于无烟煤，挥发分含量高于无烟煤。烟煤最突出的特点是挥发分和含硫量相对较高，而且易结渣、有黏性。次烟煤的水分和挥发分含量高于烟煤，含硫量低于烟煤，它可以代替烟煤作为某些烟煤锅炉的燃煤¹。烟煤的无矿物湿基热值一般为 10 500~14 000 Btu/lb（英热单位每磅，1 Btu=1 055.06 J，1 lb=0.453 592 kg）²，典型美国烟煤的原矿热值为 10 720~14 730 Btu/lb³。次烟煤的无矿物湿基热值为 8 300~11 500 Btu/lb，原矿热值为 9 420~10 130 Btu/lb³。煤的分类公式及表格可参见参考文献 2。

1.2 燃烧装置⁴

燃煤锅炉按类型、燃料和结构进行分类。锅炉类型可以通过以下方式确定：传热方式（水管锅炉、火管锅炉、铸铁锅炉）、传热表面的布置（立式锅炉、卧式锅炉、直管式锅炉、弯管式锅炉）以及燃烧方式（悬浮燃烧锅炉、层燃锅炉、流化床锅炉）。燃煤锅炉最常见的传热方式是水管传热，即锅炉的热烟气在传热管外

燃烧，而水、汽在管内流动。

燃煤水管锅炉包括煤粉锅炉、旋风锅炉、层燃锅炉、流化床锅炉和手动加煤锅炉。在层燃系统和大多数手动加煤装置中，燃煤主要在熔炉底部或炉排上燃烧。在流化床燃烧炉（Fluidized Bed Combustor, FBC）中，燃煤被送入含有吸附剂或惰性物质（通常为沙子）的床层，然后向上的气流使这些物质流化。在煤粉锅炉中，燃煤磨至与滑石粉类似的粉碎度（即至少 70% 的煤粒能通过 200 目筛网），然后在空气作用下通过燃烧器将其喷入熔炉内。由于煤粉悬浮在炉膛内，因此几乎可以在煤粉锅炉中完全燃烧。根据排出的灰渣是固体状态还是熔融状态，煤粉锅炉分为固态排渣炉和液态排渣炉。在固态排渣炉中，高熔点燃煤燃烧后产生干灰。在液态排渣炉中，低熔点燃煤燃烧后产生熔灰或熔渣。

按照燃烧器的类型和位置以及燃煤喷入熔炉的方向，煤粉锅炉分为两种不同的燃烧类型：墙式燃烧和四角切圆式燃烧。墙式燃烧锅炉包括：单面墙燃烧，即燃烧器安装在炉膛一面水平燃烧；前后墙对冲燃烧，即燃烧器安装在相对的两面墙上。四角切圆（或四角燃烧）式锅炉的燃烧器安装在炉膛的四个角，燃煤和空气沿切线喷入锅炉平面内的假想圆。旋风炉的燃煤粉碎后最大约为 4 目，但通常也将其归类为煤粉燃烧系统。旋风炉的煤粉在一次风的作用下切向进入卧式圆筒炉膛，较小的煤粒在悬浮中燃烧，较大的煤粒附着在燃烧室壁的熔渣层上。旋风锅炉属于高温液态排渣炉。

工业、商业和机构的绝大多数燃煤水管锅炉采用的都是层燃系统。燃煤配套的层燃单元多为小型设备，可分为三类：下部加料机、上部加料机和抛煤机。下部加料机通常采用水平加料单侧排灰或重力自动加料后侧排灰。上部加料机采用转动的炉排装置：将煤从炉斗加到不断转动的炉排上，炉排再将燃煤送入炉膛中。而抛煤机则使用机械或气动加煤装置将燃煤均匀散布到转动炉排的表面。燃煤喷入炉膛内或炉排上之后，悬浮燃烧的粉煤就会与快速燃烧的稀薄粉煤床层混合。悬浮燃烧的粉煤数量主要取决于粉煤颗粒的大小、成分和空气流速。一般而言，粉煤颗粒越细小、挥发分含量越高、水分越少，床层上悬浮的粉煤燃烧就会越充分，释放的热量也就相对越多。

虽然 FBC 在整个锅炉家族中的占有率不高，但是它近十年来发展迅猛，主要用于为工业、热电联供装置、独立发电厂和公共设施生成蒸汽。FBC 主要有两种：（1）常压流化床锅炉，在常压或接近常压下运行；（2）加压流化床锅炉，在 4~30 个标准大气压下运行。目前，常压流化床比加压流化床先进（或商业化），主

要包括鼓泡流化床和循环流化床两种类型，两者最根本的区别在于流化速度。鼓泡流化床流化速度相对较低，目的是减少固体从燃烧室的携带或淘析。循环流化床流化速度较高，从而可以增加固体的携带或循环。所有循环流化床锅炉和部分鼓泡流化床锅炉都是通过高温旋风捕获固体燃煤和床层材料，然后返回主燃烧室。相对于鼓泡流化床而言，循环流化床能够保持恒定的大容积循环率，减少停留时间。因此，循环流化床通常比鼓泡流化床燃烧效率更高，吸附性更好。

小型燃煤锅炉和熔炉广泛应用于工业、商业、机构或居民住宅，有时还可以手动加煤。最常见的燃煤火管锅炉有卧式火管锅炉（Horizontal Return Tubular, HRT）、苏格兰火管锅炉、立式火管锅炉和火室火管锅炉。有时铸铁锅炉也使用煤炭作为燃料，但需要手动给料。HRT 一般不使用煤而使用天然气或油作为燃料。苏格兰式火管锅炉或锅壳式锅炉的锅壳内同时包含锅炉和熔炉。立式火管锅炉通常为小型单烟道锅炉，多根火管与位于锅炉底部的水冷式燃烧室直接相通。火室火管锅炉内部是由外包钢的水套式燃烧室构成。火室火管锅炉也称为机车锅炉、短火室锅炉或紧凑型火室锅炉，采用机械加煤或手动加煤。

1.3 排放物⁴

煤炭燃烧后的排放物性质取决于煤阶、燃煤成分、锅炉类型、锅炉大小、燃烧条件、负荷率、控制技术类型和设施维护水平。烟煤和次烟煤燃烧的主要相关污染物为颗粒物（PM）、硫氧化物（SO_x）和氮氧化物（NO_x）。即使操作适当，锅炉一般也会排放一些未燃烧的可燃物，如一氧化碳（CO）和多种有机化合物。

1.3.1 颗粒物⁴

颗粒物成分和排放水平呈复变函数式变化，由锅炉燃烧方式、锅炉操作状况、污染控制设施和燃煤性质决定。燃煤锅炉中有些颗粒物排放无法控制，如煤炭燃烧后产生的灰渣以及未完全燃烧后产生的余碳。在煤粉锅炉系统中，煤炭几乎完全燃烧，因此排放颗粒物的主要成分是无机灰渣。

煤灰可以沉积在锅炉中（底灰），也可以夹带在烟灰中（飞灰）。底灰和飞灰的分布比例直接影响颗粒物排放率，该比例取决于锅炉燃烧方法和炉膛类型（液态排渣或固态排渣）。锅炉负荷也直接影响颗粒物的排放，降低负荷可以减少颗粒物排放，但减少的幅度相差很大，这取决于锅炉类型、燃料和锅炉操作状况。

吹灰也是造成燃煤锅炉颗粒物间歇性排放的罪魁祸首，因为锅炉会定期采用蒸汽吹灰或空气吹灰的方法，去除炉膛、对流段、省煤器及空气预热器传热表面上的煤灰。

颗粒排放物可以分为滤过性颗粒物和冷凝性颗粒物。滤过性颗粒物通常是由玻璃纤维滤网捕获的颗粒(滤网位于方法 5 或方法 17 中取样器的前半部分)[译者注：方法 5 为采用等速采样法，并恒定温度 (120 ± 14) $^{\circ}\text{C}$ ，将颗粒物收集至玻璃纤维过滤器中。脱除未结合水后，获取颗粒物的质量，其中包括过滤温度以上凝结的任何物质。方法 17 为采用等速采样法，并维持堆温度，将颗粒物收集至玻璃纤维过滤器中。脱除未结合水后，获取颗粒物的质量。具体内容参考 EPA 关于该方法的相关文献]，通过滤网的蒸汽和颗粒直径一般小于 $0.3\ \mu\text{m}$ 。冷凝性颗粒物通常以气态排出，之后凝结成同相或异相气溶性粒子。从本质上讲，燃煤或燃油锅炉排出的冷凝性颗粒主要为无机物。

1.3.2 硫氧化物⁴

煤炭燃烧释放的气态 SO_x 主要是二氧化硫(SO_2)，另伴有少量三氧化硫(SO_3)和气态硫酸盐。这些混合物是有机硫和黄铁矿硫在煤炭的燃烧过程中氧化形成的。一般情况下，烟煤中约 95% 的硫会以气态 SO_x 的形式排放，而次烟煤在燃烧过程中释放的 SO_x 相对较少。一些次烟煤的煤灰偏碱性，因此一些硫分会在炉膛中发生反应，生成各种硫酸盐，留存在锅炉内或飞灰中。

1.3.3 氮氧化物⁵⁻⁶

煤炭燃烧释放的 NO_x 排放物主要是一氧化氮(NO)，另伴有少量的二氧化氮(NO_2)和百万分之一的一氧化二氮(N_2O)。 NO_x 是大气氮在燃烧火焰中热固化以及煤炭中的氮经过氧化形成的。高温下形成 NO_x 的实验检测表明， NO_x 的浓度与温度呈指数关系，并且与火焰中的氮气浓度、火焰中氧气浓度的平方根以及气体停留时间成正比⁷。旋风锅炉中氮气形成 NO_x 的转化率很高，但一般而言，燃料中只有 20%~60% 的氮气能够转化为 NO_x 。烟煤和次烟煤含氮量的重量百分比为 0.5%~2%，主要存在于芳香环结构的物质中。煤炭燃烧产生的 NO_x ，80% 来自燃料中自带的氮元素。

1.3.4 一氧化碳

燃烧源的 CO 排放率取决于燃料的氧化效率。精心控制燃烧过程可将 CO 排放率降至最低。因此, 如果燃烧装置操作失误或维护不当, 排放的一氧化碳(以及有机化合物)浓度会增加若干个数量级。小型锅炉、加热器和熔炉排放的 CO 和有机物, 一般高于大型燃烧器。这是因为小型装置的高温停留时间较短, 因此进行完全燃烧的时间也比大型燃烧器少。如果改良技术实施错误或装置设计失误, 那么用于减少 NO_x 排放的燃烧改良技术和设备会使 CO 的排放量增高。

1.3.5 有机化合物

与 CO 排放类似, 有机化合物的排放率也取决于锅炉燃烧效率。因此, 燃烧方式改良, 即改变燃烧停留时间、温度或紊流, 会增加或降低烟气中有机化合物的浓度。

有机排放物包括挥发性、半挥发性和冷凝性有机化合物, 有些存在于煤炭中, 有些则是不完全燃烧的产物 (Product of Incomplete Combustion, PIC)。有机排放物主要是未燃烧气相烃类的标准污染物, 包括烷烃、烯烃、乙醛、乙醇、取代苯(如苯、甲苯、二甲苯和乙苯)⁸⁻⁹。

多氯二苯并二噁英和多氯二苯并呋喃 (Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins / Polychlorinated Dibenzofurans, PCDD/PCDF) 的排放也来自煤炭燃烧, 主要对环境造成影响的是四氯到八氯二噁英和呋喃。二噁英和呋喃的排放与燃烧过程中有机物的分解程度以及大气污染控制设施内的反应有关。大气污染控制设备中, PCDD/PCDF 的形成主要取决于烟气的温度, 通常在温度达到 $450\sim 650^\circ\text{F}$ 时最有可能形成。

其余有机排放物大多来自燃烧源的凝聚相化合物。这些化合物几乎都归类于多环有机物 (Polycyclic Organic Matter, POM), 其中包括多环芳烃 (Polynuclear Aromatic Hydrocarbons, PNA 或 PAH)。由于煤炭的结构较为复杂, 所以煤炭燃烧的排放物中, 多环有机物比较常见。

1.3.6 微量元素

煤炭燃烧过程中还会排放微量元素, 排放量通常取决于以下几个因素:

- 金属本身的物理和化学特性;

- 金属离子在燃煤中的浓度；
- 燃烧条件；
- 所用颗粒控制装置的类型及其按颗粒大小的除尘效率。

一些微量金属集中在燃烧器释放的特定颗粒流（如底灰、集灰或烟气颗粒）中，另一些微量金属则不在这些颗粒流中¹⁰。根据这种分配规律，微量金属可划分为不同类别¹⁰⁻¹²，通常包含以下三大类：

- 1类：基本集中在飞灰和底灰中的元素；含有少量或不含小颗粒的元素。如锰、铍、钴、铬。
- 2类：相对于底灰，在飞灰中含量更高的元素；颗粒越小含量越高的元素。如砷、镉、铅、铈。
- 3类：气相中排出的元素，主要是汞，有些情况下是硒。

对1类金属排放的控制与颗粒物总排放量的控制相关，对2类金属排放的控制则取决于细颗粒的采集。由于颗粒控制装置的效率各不相同，因此这两类金属的排放率也大相径庭。3类金属易挥发，所以颗粒控制对这类金属的排放控制效果不明显。

1.3.7 酸性气体

除了排放 SO_2 和 NO_x 外，煤炭燃烧过程中还会排放氯和氟，其中以氯化氢（ HCl ）和氟化氢（ HF ）为主，另有少量的氯气和氟气。燃料中含有的部分氯离子和氟离子会被飞灰或底灰吸收。 HCl 和 HF 都溶于水，因此通过酸性气体净化系统很容易控制。

1.3.8 无组织排放

无组织排放是指工业生产方法中，由于泄漏、材料搬运、操作控制不当、转换不充分及存储不足而造成的污染物。大多数现代工业设施和燃烧源产生的飞灰，都可以通过气动系统和封闭系统进行处理，方法是采用小型织物过滤器或其他除尘装置将飞灰排出，因此可将无组织颗粒物排放量降至最低。粉煤灰从筒仓运送到卡车或火车车厢的过程中，有时也会发生无组织颗粒的排放。

1.3.9 温室气体¹³⁻¹⁸

CO_2 、 CH_4 和 N_2O 都是煤炭燃烧过程中生成的排放物。燃煤中几乎所有的