

燃煤电厂超细粉尘的危害及控制

高永华¹, 宏哲²

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西太原 030024;
2. 张家口市环保局 环境监测站, 河北张家口 075000)

摘要: 燃煤电厂超细颗粒物通常富集各种重金属元素, PAHs(多环芳烃类), PCDD/Fs(二恶英类)等有机污染物, 这些多为致癌物质和基因毒性诱变物质, 危害极大。吸附有重金属的PM_{2.5}对NO_x和SO₂起催化作用, 加剧了大气酸雨和光化学烟雾的形成, 是诱发臭氧层破坏的重要因素。国外近年来在这方面作了大量的观测和研究工作。对燃煤电厂超细粉尘的危害及控制进行了研究。

关键词: 燃煤电厂; PM_{2.5}; 危害; 控制

中图分类号: X503.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2010)03-0005-04

HARM AND CONTROL OF ULTRAFINE PARTICULATES IN COAL-FIRED POWER PLANTS

GAO Yong-hua¹, HONG Zhe²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Zhangjiakou City Environmental Monitoring Station, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: Fine particulates from power plants generally adsorb heavy metals, PAHs, PCDD/Fs and other organic pollutants, most of which easily result in cancer, gene mutation and do great harm. PM_{2.5} adsorbed heavy metals have catalysis for NO_x and SO₂, which exacerbate the forming of acid rain and photochemistry smog. It has been an important factor of destroying ozonosphere. External countries have made lots of observations and researches on it. Based on these, the thesis investigates the sources, characteristic, harm, and control of ultra fine particulates in coal-fired power plants.

Keywords: coal-fired power plants; PM_{2.5}; harm; control

在我国, 以煤炭为主的能源结构在较长时间内不会改变。目前每年煤炭消费量约12亿t, 其中80%通过燃烧被利用。煤炭从进厂到进入锅炉燃烧以及排灰等, 这些工序都会产生大量的粉尘, 其中的细粒子(Fine Particulates)即PM_{2.5}能在大气中长时间停留而造成严重的环境污染, 另外燃煤排放的PM_{2.5}通

常富集各种重金属元素(如As, Se, Pb和Cr等)和PAHs, VOCs等有机污染物, 这些多为致癌物质和基因毒性诱变物质, 对人体健康危害极大^[1-3]。近年来许多国家都将超细粉尘的研究作为热点, 而且制定了相应的排放标准, 然而目前我国尚未规定PM_{2.5}的排放标准。本文对超细粉尘的危害和控制做了比较详细的研究。

收稿日期: 2010-02-03

第一作者简介: 高永华(1982-), 女, 山西太原人, 硕士, 主要从事大气污染治理研究。

1 超细粉尘的定义

国际上通常将大气颗粒物分为粗颗粒物(空气动力学当量粒径 $Da \geq 10\mu\text{m}$)和细颗粒物($Da \leq 10\mu\text{m}$)两种,近年来研究发现 $Da \leq 2.5\mu\text{m}$ 的一类颗粒物(即超细颗粒物,也叫 $\text{PM}_{2.5}$),其理化性质较为特殊且与环境污染密切相关,对人体健康最为有害。各种粒径的颗粒物在大气中的分布情况如图 1 所示^[3]。

燃烧过程产生的粉尘多数粒径为 $0.1\sim 2.5\mu\text{m}$,俗称细粒子(Fine Particulates)或 $\text{PM}_{2.5}$,也称为肺颗粒物(可呼吸的粒子),意指能进入人体肺泡的颗粒。 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要成分通常为硫酸盐、硝酸盐、铵以及元素碳(EC)和有机碳(OC)^[4],另外还含有微量的多种痕量金属元素。

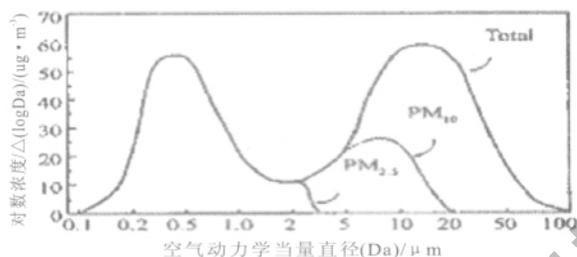


图 1 大气颗粒物的典型分布

2 燃煤电厂细粉尘的危害

由于 $\text{PM}_{2.5}$ 的比表面积大,表面活性强,吸附性强。易富集空气中有毒重金属、酸性氧化物、有机污染物、细菌和病毒等。我国研究认为污染元素在细颗粒中的富集因子比在粗颗粒物中的富集因子要高出许多倍^[4]。已有很多研究认为颗粒物上的重金属和有机物越多,其毒性越大^[5]。燃煤排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 以球形颗粒为主,但随着颗粒物粒径的减小,非球形颗粒的数量有所增加;多数 $\text{PM}_{2.5}$ 的表面并不光滑,不同粒径颗粒之间存在逐级吸附的现象^[2,5];图 2 为一燃煤电厂产生的 $\text{PM}_{2.5}$ 表面形状图^[2]。

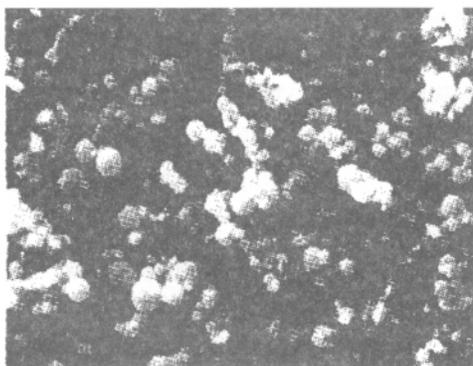


图 2 燃煤电厂产生的 $\text{PM}_{2.5}$

燃煤电厂煤炭燃烧过程直接排放的细粉尘粒径通常小于 $1\mu\text{m}$,称为一次粒子^[5]。这些细粒子在空气中停留时间长,引起大气能见度降低,成为导致环境恶化的重要因素;另外, $\text{PM}_{2.5}$ 在呼吸系统的吸收率很高,对人体健康方面的影响很大。国内外近年来在这方面作了大量的观测和研究工作。

2.1 对人体健康的影响

燃煤电厂超细颗粒物对人体健康的危害主要表现在“三致”作用^[3-5]:致癌、致畸、致突变。主要原因在于超细颗粒物通常富集各种重金属元素(如 As, Se, Pb, Cr 等)和 PAHs(多环芳烃类)、PCDD/Fs(二恶英类)等有机污染物^[2],这些多为致癌物质和基因毒性诱变物质,危害极大,其主要来源是矿物燃料的燃烧所致。国外大量研究资料表明,细颗粒物浓度上升与疾病的发病率、死亡率等密切相关,尤其是呼吸系统疾病及心肺疾病。

2.1.1 呼吸疾病

小于 $5\mu\text{m}$ 的粉尘会深入肺泡中,除 $0.4\mu\text{m}$ 左右的一部分能在呼气时排出之外,绝大部分都滞留在肺泡中形成纤维组织。导致呼吸机能障碍等各种疾病。

火电厂的煤尘一般是含有 10% 以下游离 SiO_2 的粉尘^[6]。锅炉尘一般是含有 10%~40% 游离 SiO_2 的粉尘。尘粒分散度高,直径小于 $5\mu\text{m}$ 的占 73%。除尘器、干灰输送系统及粉煤灰等综合利用作业场所的粉尘,也是含有 10%~40% 游离 SiO_2 的粉尘,粒径一般在 $15\mu\text{m}$ 以下, $5\mu\text{m}$ 以下的占相当份额。脱硫装置制粉系统的粉尘一般是含 10% 以下游离 SiO_2 的粉尘^[7,8]。

另外,燃煤电厂在焊接作业时,由于高温使焊药、焊接芯和被焊接材料融化蒸发,逸散在空气中的氧化冷凝而形成的颗粒极细的气溶胶,焊接气溶胶再冷凝后,形成极细的尘粒,这种焊接尘中 $1\mu\text{m}$ 以下的尘粒约占 90% 以上。

因此,燃煤电厂产生的超细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 中含有的硅尘、煤尘、电焊尘等均会引起以胶原纤维增生为主的尘肺。肺组织胶原纤维性变是一种不可逆转的破坏性病理组织学改变,目前尚无使其消除的办法。

2.1.2 致癌

实验研究表明燃煤电厂颗粒物吸附许多复杂成分,如微量重金属 As、Se、Cd、Pb 和 Cr 大部分富

集在粒径小于 $2.1\mu\text{m}$ 的细颗粒上,可直接或间接作用于 DNA,引起 DNA 损伤、断裂或 DNA 加合物形成。除此之外,细颗粒物也可通过与细胞作用产生自由基间接作用于 DNA,诱导 DNA 链断裂。我国人群死亡率前 10 名中,因呼吸系统疾病而死亡者占城市总死亡率的第 3 位,而肺癌是常见的癌症死亡原因,并呈现逐年上升的趋势。DNA 损伤后若不能完全修复则可能引起肺癌。

另外,近年来研究发现发电机内产生一种黑色的含有石棉成份的粉尘^[9,10],它是一种致癌物质。它充滞于发电机内外风洞,不仅恶化了检修工人的劳动条件,而且严重危害工人的身体健康。燃煤电厂产生的 90% 的 $\text{PM}_{2.5}$ 可以进入呼吸系统,沉积于肺泡数周至数年,并进入血液循环,从而导致呼吸系统和其他病症,并有可能引发癌症,是对人体健康的危害最大的颗粒物^[9]。

国际标准化组织 (ISO) 提出的易引起儿童和成人肺部疾病的“高危险性颗粒物”为小于 $2.4\mu\text{m}$ 的颗粒物,属于 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究范围。细颗粒物不仅影响巨嗜细胞的非特异性免疫功能,同时也对特异性的细胞免疫造成损害^[9-11]。

2.2 环境恶化

粉尘越细即粒径越小,分散度越高,在空气中稳定性越好,越难以沉降。 $\text{PM}_{2.5}$ 在大气中的停留时间为 7~30 d^[12-16],不易扩散,可以远距离传输,成为导致环境恶化的重要因素。

$\text{PM}_{2.5}$ 能引起大气能见度降低,恶化空气质量。吸附有重金属的 $\text{PM}_{2.5}$ 对 NO_x 和 SO_2 起催化作用,加剧了大气酸雨和光化学烟雾的形成,是诱发全球气候变化、烟雾事件和臭氧层破坏等重大事件的重要因素;

3 防止粉尘危害的对策、措施及建议

为保护人体健康,美国环保局 1997 年对空气质量标准进行了修订,增加了 $\text{PM}_{2.5}$ 细颗粒的 24 小时和年平均限值;此排放标准,是基于质量浓度而制定的。该标准见表 1^[17]:

表 1 美国 $\text{PM}_{2.5}$ 空气质量标准

24h 平均值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	65
年平均值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	15

燃煤电厂排放的主要是二次气溶胶,即硫酸盐、硝酸盐和小部分固体颗粒。硫酸盐是煤燃烧过

程中最重要的一种颗粒物。控制燃煤电厂超细粉尘产生问题可以采取以下一些措施:

(1) 淘汰落后工艺,从技术上提高与改进,寻找新的替代技术与新型防尘材料或效率更高的除尘器,具体可见以下一些新的技术措施:

① 袋式除尘器。袋式除尘器是干法除尘中除尘效率最高的一种除尘设备,它除尘效率高,可达 99.99%,能保证排放浓度稳定小于 $50\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。能有效捕集对人体危害最大的 $5\mu\text{m}$ 以下的超细的微小颗粒。它对微细粉尘有更强的适应性。

② 涡轮除尘器。它能稳定、可靠地满足高温高粘附性微细粉尘的收集要求^[18]。

③ 使用微孔薄膜滤料对细粉尘有很高的捕集效率,运行阻力低,是很有发展前景的节能型环保新产品;

④ 发展输煤系统和锅炉燃烧系统联合除尘技术;

⑤ 发展循环流化床燃烧技术,此技术是近年来在国际上发展起来的新一代高效、低污染清洁燃烧技术,具有燃料适应性广、利于环境保护、负荷调节性能好等优点。

⑥ 在传统除尘器前设置预处理阶段,使超细颗粒物通过物理的或化学的作用团聚成较大颗粒后加以清除^[19]。

(2) 加强环境教育,提高公民普遍的环境意识,这是根本途径。对于现场操作人员应该对其进行防尘知识的安全教育和培训,提高其对粉尘危害和防治知识的认识,增强职工的自我保护意识。

参考文献:

- [1] Lucas M. Neas. Fine particulate matter and cardiovascular disease [J]. Fuel Processing Technology, 2000, 6: 55~67.
- [2] 赵承美, 孙俊民, 邓寅生等. 燃煤飞灰中细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 的物理化学特性 [J]. 环境科学研究, 2004, 17(2): 71~73, 80.
- [3] 徐杰英, 刘晶, 郑楚光. 燃烧源超细颗粒物的研究进展 [J]. 煤炭转化, 2003, 26(4): 16~20.
- [4] 杨复沫, 马永亮. 细微大气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 及其研究概况 [J]. 世界环境, 2000(4): 32~34.
- [5] L. Lillieblad, P. Wieslander. $\text{PM}_{2.5}$ Mercury emissions from a high ratio fabric filter a pulverized coal fired boiler [J]. Air Pollution, XL: 645~649, 2002.
- [6] 余剑明, 李丽. 火电厂粉尘危害及其防治对策. 广东电力 [J]. 广东电力, 1999, 12(5): 32~34.
- [7] 张炳文, 周振起. 发电厂输煤系统粉尘治理的一种新方法 [J]. 工业安全与防尘, 1997(3): 24~25.

- [8] 郑楚光,徐明厚,张军营,等.燃煤痕量元素的排放与控制[C].武汉:湖北科学技术出版社,2002.
- [9] Vouitsis, Elias.Ntziachristos, Leonidas; Samaras, Zissis.Particulate matter mass measurements for low emitting diesel powered vehicles: What's next? Progress in Energy and Combustion Science[J], v 29, n 6, 2003, 635~672.
- [10] Gigliotti C.Patania.F.The analysis of the fine and ultra fine dusts present in the atmosphere[A].11th.International Conference on Modeling Monitoring and Management of Air Pollution[C], SEP, 2003 Air Pollution, XL:695~699, 2003.
- [11] 李高富.论发电厂主要危害因素及防治对策[J].工业安全与防尘.2001, 27(6): 27~29.
- [12] 周振启.燃煤发电厂输煤系统粉尘污染治理技术[J].中国电力.1997, 30(8):56~58.
- [13] 张文丽,崔九思.空气细颗粒物(PM_{2.5})理化特性和生物效应监测[J].中国环境卫生, 2002, 5(1): 159~164.
- [14] 江刚.新的研究报告确认大气颗粒物与健康的关系[J].中国环境科学.2000, 30(5):292~295.
- [15] 纪宏舜,宋斐.简易脱硫除尘一体化技术方案的研究及其应用[J].中国电力.1999, 32(6):55~59.
- [16] US EPA office of Air and Radiation.Office of air quality planning and standards fact sheet-EPA's recommended final ozone and particulate matters standard(S).1997.
- [17] Dockery D W, Pope C A III, Xu X.et al.An association between air pollution and mortality in six U.S.cities .N engl J Med.1993, 329: 1753~1759.
- [18] 陈海焱.涡轮除尘技术.现代化工[J].2003, 23(1):49~51.
- [19] 魏凤,张军营,王春梅,郑楚光.煤燃烧超细颗粒物团聚促进技术的研究进展[J].煤炭转化.2003, 26(3):7~31,63.

(上接第4页)

- [12] 徐佳.超滤作为海水淡化预处理工艺的应用研究和 Monte Carlo 模拟[D].青岛:中国海洋大学,2008.
- [13] J.D.Zhang, Y.W.liu, S.M.Gao, et al. Pilot testing of outside-in UF pretreatment prior to RO for high turbidity seawater desalination[J]. Desalination, 2006, 189:269~277.
- [14] 张敬东,刘炎伟,罗发奎,等.超滤用于高浊度海水淡化反渗透预处理的现场试验[J].武汉大学学报:工学版, 2007, 40(2): 74~78.
- [15] 刘继全.超滤在海水淡化预处理中的应用研究[D].上海:上海大学,2006.
- [16] 王兴戩,刘国田,张守彬.微絮凝/超滤组合工艺处理低浊度海水[J].天津城市建设学院学报, 2004, 10(1):30~32.
- [17] Pierre Cote, Joson Cadera, John Coburn, et al. A new immersed membrane for pretreatment to reverse osmosis [J]. Desalination, 2001, 139:229~236.
- [18] Peter H. Wolf, Steve Siverns, Sandro Monti. UF membrane for RO desalination pretreatment[J]. Desalination, 2005, 182:293~300.
- [19] 王洁如.华能玉环电厂海水淡化工程介绍 [J]. 电力建设, 2008, 29(2):51~57.
- [20] M.Mohesni, J.Jaber, M.Afonso. Desalination of brackish water by nanofiltration and reverse osmosis[J]. Desalination, 2003, 157: 167.
- [21] Uhlinger Robert A. Desalination method and apparatus utilizing nanofiltration and reverse osmosis membranes[P]. US, 6190556, 2001.
- [22] A.M.Hassan, M.A.K. Al-soft, A.S.Al-Amoudi, et al. A new approach to membrane and thermal seawater desalination processes using nanofiltration membranes (Part 1)[J]. Desalination, 1998, 118: 35~51.
- [23] A.M.Hassan, A.M.Farooque, A.T.M.Jamaluddin, et al. Ademonstration plant based on the new NF-SERO process [J]. Desalination, 2000, 131: 157~171.
- [24] Mohammad Abdul-Kareem Al-Soft. Seawater desalination - SWCC experience and vision[J]. Desalination, 2001, 135:121~139.
- [25] Ahmed S.Al-Amoudi, A. Mohammed Farooque. Performance restoration and autopsy of NF membranes used in seawater pretreatment[J]. Desalination, 2005, 178:261~271.
- [26] 王玉红,苏保卫,徐佳,等.纳滤膜脱盐性能及其在海水软化中应用的研究[J].工业水处理, 2006, 26(2):46~49.
- [27] 王玉红.纳滤特性及其在海水软化中的应用研究[D].青岛:中国海洋大学,2006.
- [28] 李晓明,王铎,高学理,等.纳滤海水软化性能及膜污染研究[J].水处理技术, 2008, 34(4):8~11.
- [29] 李晓明.海水纳滤软化过程中膜性能演变机制研究[D].青岛:中国海洋大学,2008.
- [30] 方慧慧,姜华,刘继全,等.纳滤膜在海水淡化中的应用研究[J].膜科学与技术, 2006, 26(1):50~54.
- [31] 陈益棠,陈雷.高回收率反渗透-纳滤海水淡化成本[J].水处理技术, 2004, 30(5):251~254.
- [32] Gyeong-Taek Lim, Hyung-Gon Jeong, In-Sun Hwang, et al. Fabrication of asilica ceramic membrane using the aerosol flame deposition method for pretreatment focusing on particle control during desalination[J]. Desalination, 2009, 238:53~59.
- [33] 徐南平,邢卫红,范益群.海水淡化中陶瓷膜预处理方法[P].中国, 200510041360.7, 2006.
- [34] 柏其亚,刘学文,冒亚峰,等.蜂窝陶瓷膜用于海水淡化预处理的初步研究 [A]. 第一届海水淡化与水再利用西湖论坛论文集[C], 2006.
- [35] 刘学文,柏其亚,范益群,等.陶瓷膜法海水淡化预处理工艺条件优化[J].水处理技术, 2007, 33(12):66~69.
- [36] 马敬环,秦竞蕊,黄锦言,等.陶瓷膜在海水淡化预处理中的应用研究[J].天津化工, 2007, 21(2):26~28.