

文章编号: 0253-2409(2007)06-0722-05

## 烟气催化脱硝装置对多环芳烃排放特性的影响

陈进生, 袁东星, 洪有为, 郭娟

(厦门大学 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 通过对装有选择性催化还原 (SCR) 脱硝装置的燃煤锅炉排放烟气中的多环芳烃 (PAHs) 进行测试, 分析比较了工业锅炉排放的 PAHs 经过 SCR 脱硝装置前后的排放特性变化。实验结果表明, 烟气催化脱硝装置促进了 PAHs 含量的增加, 特别是低环多环芳烃含量的增加, 并提高了其毒性当量, 但对 PAHs 在气相与颗粒相的分布影响不大。

**关键词:** 烟气催化脱硝; 多环芳烃 (PAHs); 排放特性

**中图分类号:** X701 **文献标识码:** A

### Effect of catalytic de-NO<sub>x</sub> device on the emission characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbon in flue gas

CHEN Jin-sheng, YUAN Dong-xing, HONG You-wei, GUO Juan

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in flue gas emitted from a coal-fired power plant equipped with selective catalytic reduction (SCR) de-NO<sub>x</sub> device were determined. The concentrations and distributions of phase and type of PAHs in the flue gas at the outlet and inlet of the SCR device were compared. The results show that the SCR de-NO<sub>x</sub> device leads to the increase of concentrations and toxic equivalent of PAHs, especially the low rings of PAHs in the flue gas. However, the device has no significant influence on the PAHs partition between particle and the gas phase.

**Key words:** catalyst de-NO<sub>x</sub> device; PAHs; emission characterization

中国是世界上最大的煤炭生产国和消费国, 约有 70% 的电能来自燃煤发电机组。原煤本身含有的多环芳烃 (PAHs) 在高温燃烧下部分释放, 同时, 煤热解产生极小的碳氢自由基或碎片在高温下发生聚合, 生成稳定的非取代 PAHs。国内外对燃煤和垃圾焚烧过程 PAHs 的研究已积累了一定的成果<sup>[1-9]</sup>。在烟气 PAHs 的污染控制方面, 研究者们也采用催化氧化装置进行了一些小型的模拟实验<sup>[10-14]</sup>, 并取得了一定的效果。但在大型工业锅炉排放烟气中进行 PAHs 含量实验, 特别是考察烟气净化设施对 PAHs 排放特性影响的研究报道还很少, 仅有极少数有关除尘器影响的实验报道<sup>[15]</sup>。

本研究通过对某大型电厂燃煤锅炉排放的烟气经过选择性催化还原脱硝装置<sup>[16]</sup> (Selective Catalyst Reduction, 简称 SCR) 前后的 PAHs 排放特性的实验, 研究烟气中的 PAHs 在高温下通过脱硝催化反应器前后的含量、毒性及分布变化规律。

### 1 实验部分

1.1 试剂 PAHs 混标 (Mix16, SUPELCO, USA),

内有萘 (Nap)、芘 (AcPy)、芘 (AcP)、芴 (Flu)、菲 (PhA)、蒽 (AnT)、荧蒽 (FluA)、芘 (Pyr)、屈 (Chr)、苯并 [a] 蒽 (BaA)、苯并 [b] 荧蒽 (BbF)、苯并 [k] 荧蒽 (BkF)、苯并 [a] 芘 (BaP)、茚并 [1, 2, 3-c, d] 芘 (InP)、二苯并 [a, h] 蒽 (DbA) 和苯并 [g, h, i] 花 (BghiP) 等 16 种 PAHs。

替代物 (Su, AccuStandard, USA), 内含氘代芘 (d<sub>10</sub>-AcPy)、氘代菲 (d<sub>10</sub>-PhA)、氘代屈 (d<sub>12</sub>-Chr)、氘代芘 (d<sub>12</sub>-Pery)。内标物 (IS, Dr Ehrenstorfer, Germany) 为氘代荧蒽 (d<sub>10</sub>-FluA)。替代物在样品预处理前定量加入样品中, 随样品经历预处理和仪器分析的全过程。替代物的损失或玷污程度, 即回收率。内标物在每个样品预处理后、仪器分析前加入样品中, 同处理过的试样一起经历仪器分析的全过程, 内标物的作用是计算替代物的回收率<sup>[17]</sup>。

正己烷、二氯甲烷、丙酮均为色谱纯 (Tedia Co., USA); 无水硫酸钠、硅胶、氧化铝均为分析纯 (国药集团化学试剂公司)。无水硫酸钠和氧化铝在使用前经 450 活化 4 h; 硅胶经 170 活化 8 h。

收稿日期: 2007-03-27; 修回日期: 2007-08-19。

联系人: 袁东星, E-mail: yuandx@xmu.edu.cn。

作者简介: 陈进生 (1970-), 男, 福建泉州人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事环境污染治理与环境化学分析研究。

**1.2 催化脱硝装置** 实验锅炉为上海锅炉厂制造的亚临界一次中间再热强制循环汽包炉, 额定蒸发量为 1 025 t/h, 型式为 SG-1025/17.47-M895。配有中速磨正压直吹式制粉系统、固态排渣、型布置、炉膛四角切向燃烧、燃料喷嘴上下摆动可调。

为降低燃烧过程生成的氮氧化物排放量, 在锅炉省煤器和空预器之间设置了 SCR 脱硝反应器, 脱硝效率为 60%。每台锅炉配 2 个反应器, 运行温度 320 ~ 380。每个反应器内设 2 层美国 Cometech 公司生产的蜂窝式整体块状催化剂 (体积为 73 m<sup>3</sup>), 其主要组分为 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·WO<sub>3</sub> (M<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) / TiO<sub>2</sub>, 其中的 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 是活性组分, TiO<sub>2</sub> 为载体, WO<sub>3</sub> 及 M<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为催化助剂。通过往烟道中喷入氨气 (NH<sub>3</sub>), 烟气中 NO<sub>x</sub> 与 NH<sub>3</sub> 混合均匀后在催化剂的作用下转化为氮气和水。

实验期间燃用的烟煤特性见表 1, 实验过程煤种不变。

表 1 煤种的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analyses of coal during experiment

Proximate analysis w <sub>d</sub> / %				Ultimate analysis w <sub>d</sub> / %			
M	A	V	FC	N	C	H	S
1.88	18.89	30.61	48.62	0.96	42.31	3.44	1.25

**1.3 PAHs 采样系统** 烟气取样点设在 SCR 脱硝反应器的入口与出口端, 烟气采样方法参照 EPA / Method 5<sup>[18, 19]</sup> 方法进行改进。烟气 PAHs 的等温采样系统见图 1。采样装置由采样探头、采样枪、玻璃纤维过滤器 (带恒温箱)、PAHs 吸收瓶、取样泵、流量计等部件组成。

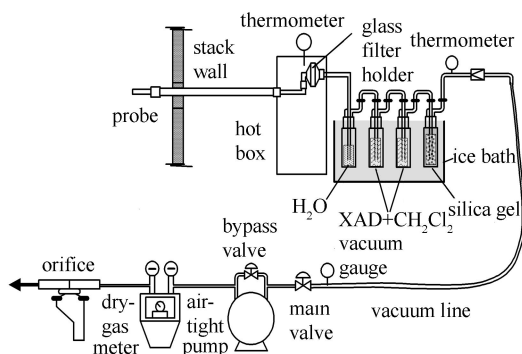


图 1 烟气 PAHs 等温采样系统示意图

Figure 1 PAHs isothermal sampling system in flue gas

为保证采样装置在高温下使用的可靠性以及 PAHs 在采样过程不发生损失, 采样枪材质选用不锈钢管内衬石英玻璃, 同时外缠加热带。取样枪温

度与取样部位的实际烟气温度接近, SCR 脱硝装置进出口的取样管温度分别在 350 和 130 左右。

玻璃纤维过滤器内置于恒温箱中, 防止 PAHs 在温度下降时沉积。烟气经石英纤维过滤器后, 分布在颗粒态相中的 PAHs 随烟尘被拦截。之后, 烟气进入装有去离子水的吸收瓶, 此吸收瓶主要起到冷却烟气的作用, 防止高温烟气烧损后续的 PAHs 吸附剂, 并吸附了少量水溶性较好的 PAHs 组分。水溶液中的 PAHs 视为气相中 PAHs 的组成部分。

烟气冷却降温后依次进入两个同样装有 XAD-4 树脂 + CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 混合吸附剂的两个吸收瓶, 前者作为气相 PAHs 的主要吸收瓶, 后者作为气相 PAHs 的保安吸收瓶。混合吸附剂中的 PAHs 为气相中 PAHs 的主要组成部分。

为保证吸收效果, 所有的吸收瓶均放在冰浴箱内。为避免带水的烟气损坏后续的真空抽气泵和流量计等采样装置, 同时有利于计算干态的烟气采样量, 烟气最后经过一个装有硅胶的吸收瓶。PAHs 采样流量控制在 5 L / m in, 采样时间 50 m in, 采样体积约为 0.25 m<sup>3</sup>。

**1.4 PAHs 的预处理**<sup>[20]</sup> 颗粒相 PAHs: 石英纤维滤膜拦截的粉尘连同滤膜一并移入 MSP-1000 型微波萃取仪的专用萃取罐内, 加入丙酮 / 正己烷萃取液及替代物 (Su), 在温度 80、压力 0.27 MPa 下萃取 25 m in。

水相 PAHs: 往去离子水吸收液加入替代物 (Su), 采用连续液液萃取。水浴温度控制在 60, 连续萃取 18 h。

气相 PAHs: 往 XAD-4 树脂 + CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 混合吸附剂加入替代物 (Su), 先进行树脂与二氯甲烷的分离, 再往 XAD-4 树脂加入新鲜二氯甲烷萃取液, 在超声萃取仪中萃取 25 m in, 合并萃取液。依次进行 3 次超声萃取。

上述萃取液分别经无水 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 过滤、真空旋转蒸发浓缩后, 移入装有三氧化铝 / 硅胶的层析柱得到纯化。净化液采用轻柔的氮吹浓缩至 0.5 mL ~ 1.0 mL, 浓缩后的净化液加入约 2 mL 的正己烷, 继续氮吹浓缩至 0.5 mL 左右, 此举使净化液的溶剂改为弱极性, 以便 GC-MS 的分析。最后加入内标物 (IS) 并移入进样瓶。

**1.5 PAHs 的分析** 采用 HP6890/5975B 色质联用仪分析 PAHs。其中: HP-5MS 柱长 30 m, 内径为 0.25 mm, 涂层厚度 0.25 μm; EI 离子源, 离子源温度 230, 电子能量 70 eV; 载气为氦气, 无分流进

样;进样口温度 280 ;程序升温为 60 起始,以 15 /min 升至 150 ,再以 3 /min 升至 210 ,最后以 10 /min 升至 300 (保持 5min);进样量 1 $\mu$ L。

**1.6 质量控制** 实验前对吸附树脂进行净化处理,采用除盐水与丙酮混合液浸泡树脂,并置于超声波仪内清洗;再用二氯甲烷与丙酮混合液浸泡树脂,之后进行真空干燥,最后用 250  $\mu$ m 的筛网筛选树脂,去除破碎的细小颗粒。根据采集的烟气量估算吸附

树脂用量,并在之后加装保安的树脂吸收瓶,防止吸附穿透。在样品预处理过程中加入替代物和内标物进行 PAHs 的回收率测试,结果表明,PAHs 的回收率为 54% ~ 76%;同时进行了空白加标实验,回收率为 66.5% ~ 97.7%。符合质量控制要求。

## 2 结果与讨论

**2.1 PAHs 总量变化** 燃煤锅炉排放烟气中 PAHs 经过 SCR 脱硝装置前后的体积质量与分布变化见表 2。

表 2 烟气中 PAHs 经过 SCR 脱硝装置前后的体积质量与分布变化

Table 2 Mass distribution of PAHs in flue gas at the outlet and inlet of SCR De-NO<sub>x</sub>

PAHs	Particle phase / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		De-ion water / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		Vapor phase / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	
	before SCR	after SCR	before SCR	after SCR	before SCR	after SCR
Nap	0.867	1.415	0.132	2.068	912.260	1715.761
AcPy	ND	ND	ND	ND	3.640	3.719
AcP	ND	ND	ND	ND	4.104	5.953
Flu	0.075	0.154	ND	ND	33.157	29.046
PhA	0.328	0.552	4.152	1.361	301.223	209.122
AnT	ND	ND	ND	ND	12.169	14.082
FluA	0.062	0.108	1.359	ND	35.858	23.410
Pyr	ND	ND	1.117	ND	16.864	9.263
Chr	ND	ND	ND	ND	ND	12.456
BaA	ND	ND	0.449	ND	1.679	246.820
BbF	ND	ND	ND	ND	ND	160.337
BkF	ND	ND	ND	ND	ND	ND
BaP	ND	ND	0.515	ND	3.285	ND
InP	ND	ND	ND	ND	ND	2.605
Dba	ND	ND	ND	ND	ND	2.293
BghiP	ND	ND	ND	ND	ND	2.932

ND: not detected

从表 2 可以看出,烟气中 PAHs 在经过装有钒钛催化剂的脱硝反应器前后总量变化较大。经过反应器后,PAHs 的总量增加了 83.3%,气相中萘的体积质量提高了 88.3%,成为 PAHs 总量增加的主要贡献源。在 320 ~ 380 及喷入还原性氨气的运行工况下,钒钛催化剂未能起到降解 PAHs 的作用,反而促进了萘的大量生成。图 2 是烟气中 PAHs 经过 SCR 脱硝装置前后的总量变化对比图。

脱硝催化剂中的钒、钛、钼、钨等金属元素处于元素周期表中的 IVB 和 VB 族,具有较强的吸附作用。金属表面通过范德华力吸附烟气中部分的自由基,从而在金属表面形成较高的自由基浓度,而自由基浓度的提高,则使 PAHs 的生成可能性大为增加。高温烟气中的  $\text{CH}_2=\text{CH}$  等烃类自由基在  $\text{V}^{5+}$  催化剂酸中心的吸附与活化下发生缩聚反应,形成大量的萘。

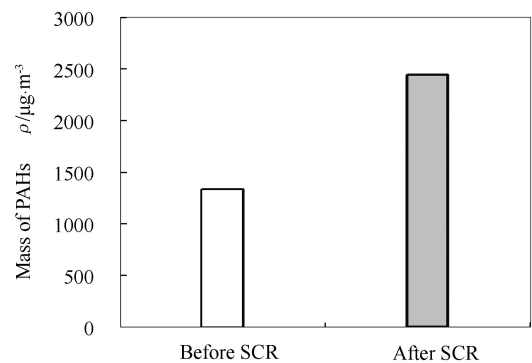


图 2 PAHs 总量变化对比图

Figure 2 Total mass of PAHs variety

李晓东等<sup>[21]</sup>在小型管式炉上研究铜和氧化铜催化剂对烟煤燃烧过程 PAHs 生成的影响,结果发现,铜会促进 PAHs 的生成。这是由于铜为 PAHs 的合成提供了活性中心。这一结果与本实验类似。

**2.2 PAHs 的相态分布变化** 图 3 为烟气中 PAHs

经过 SCR 脱硝装置前后的相态分布对比图。由图 3 可见, 烟气经过 SCR 脱硝装置前后颗粒相中单体 PAHs 种类未发生明显变化, 颗粒相中的 PAHs 均为 4 环以下的单体, 而且吸附的单体以萘为主; 另一方面, 气相中的 PAHs 含量与单体数量明显高于颗粒相中的 PAHs 含量。气相中的 PAHs 占总量的 99.9% 以上, 然而被飞灰颗粒吸附的 PAHs 占不到 0.1%。这说明脱硝装置的钒钛催化剂对 PAHs 在颗粒相与气相中的分布影响基本是等比例的。

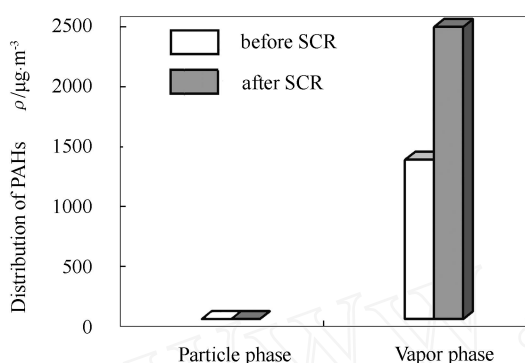


图 3 PAHs 相态分布对比图

Figure 3 Phase distribution of PAHs variety

2.3 PAHs 的环数分布变化 图 4 为烟气中 PAHs 经过 SCR 脱硝装置前后的环数分布对比图。

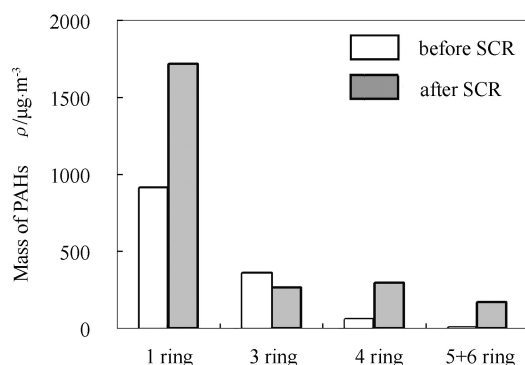


图 4 PAHs 环数分布对比图

Figure 4 Ring distribution of PAHs variety

## 参考文献:

- [1] 王小刚, 李海滨, 王小波, 向银花, 赵增立, 陈勇. 不同垃圾焚烧炉排放的 PM<sub>10</sub> 中多环芳烃的研究 [J]. 燃料化学学报, 2006, 34(6): 721-725.  
(WANG Xiao-gang, LI Hai-bin, WANG Xiao-bo, XIANG Yin-hua, ZHAO Zeng-li, CHEN Yong. PAHs in PM<sub>10</sub> emitted from different waste incinerators [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, 34(6): 721-725.)
- [2] PISUPATI S V, WASCO R S, SCARONIA W. An investigation on polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from pulverized coal combustion systems [J]. J Hazard Mater, 2000, 74(1-2): 91-107.
- [3] CHEN Y, BIX, MAIB, SHENG G, FU J. Emission characterization of particulate/gaseous phases and size association for polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion [J]. Fuel, 2004, 83(7-8): 781-790.
- [4] dos SANTOS C Y M, de ALMEIDA AZEVEDO D, de AQUINO NETO F R. Atmospheric distribution of organic compounds from urban areas near a coal-fired power station [J]. Atmos Environ, 2004, 38(9): 1247-1257.
- [5] YANG H-H, CHEN C-M. Emission inventory and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere at a suburban area in Taiwan [J]. Chemosphere, 2004, 56(10): 879-887.
- [6] LIC-T, MIH-H, LEE W-J, YOU W-C, WANG Y-F. PAH emission from the industrial boilers [J]. J Hazard Mater, 1999, 69(1): 1-11.

由图 4 可见, 烟气中 PAHs 经过 SCR 脱硝装置后, 环数的分布变化较大, 其中的 2 环 PAHs 由于萘的生成, 数量增加; 4 环以上的 PAHs 由于苯并 (a) 芘、芘并 (1, 2, 3-cd) 芘、二苯并 (a, h) 芘及苯并 (g, h, i) 芘的生成, 含量增幅也较大; 只有 3 环的 PAHs 含量略有下降。

2.4 PAHs 的毒性当量变化 为了定量评价不同 PAHs 排放对环境的危害, 本研究采用了毒性当量 (TEQ) 的概念<sup>[22]</sup>。其定义是: 设 B[a]P 的毒性当量因子 (TEF, Toxic Equivalent Factor) 为 1, 将其他 PAHs 对人体的危害性和 B[a]P 对人体的危害进行比较, 根据其对人体危害的强弱确定其毒性当量因子。然后将各 PAHs 的排放浓度和其毒性当量因子相乘, 各乘积值累加所得的数值就是毒性当量 (TEQ), 用公式表示  $TEQ = \sum (TEF \times \text{排放浓度})$ 。经过 SCR 催化剂后, 虽然毒性最强的 B[a]P 含量减少了, 但由于生成大量萘、苯并 (a) 芘和苯并 (b) 芘, 总的毒性当量大幅增加。

图 5 是烟气中 PAHs 经过 SCR 脱硝装置前后的毒性当量对比图。

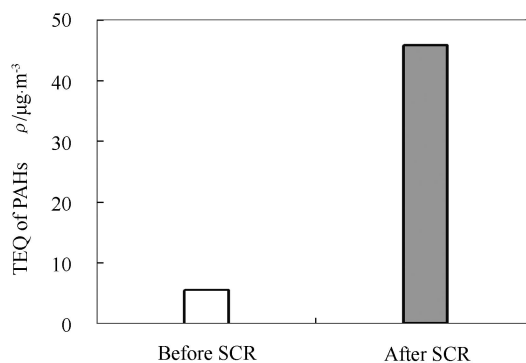


图 5 PAHs 毒性当量对比图

Figure 5 Toxic equivalent of PAHs variety

从图 5 可以看出, 经过 SCR 脱硝催化剂的作用后, 烟气中 PAHs 的毒性当量上升了 7 倍。

- [7] 李晓东, 祁明峰, 尤孝方, 严建华, 池涌, 倪明江, 岑可法. 烟煤燃烧过程中多环芳烃生成研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 127-132  
(LI Xiao-dong, QI Ming-feng, YOU Xiao-fang, YAN Jian-hua, CHI Yong, NI Ming-jiang, CEN Ke-fa Study on the formation of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) mechanisms in bituminous coal combustion process [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 127-132.)
- [8] 晏蓉, 朱海晶, 刘皓, 尹鹤龄. 河南贫煤不同温度燃烧烟气中环烃类产物的分析研究 [J]. 分析实验室, 1996, 15(2): 13-16  
(YAN Rong, ZHU Hai-jing, LIU Hao, YIN He-ling Studies on compositions of product from combustion of Henan coal at different temperatures [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 1996, 15(2): 13-16.)
- [9] 李核, 李攻科, 陈洪伟, 张展霞, 李拓, 王伯光. 微波辅助萃取-气相色谱-质谱法测定大气可吸入颗粒物中痕量多环芳烃 [J]. 分析化学, 2002, 30(9): 1058-1062  
(LI He, LI Gong-ke, CHEN Hong-wei, ZHANG Zhan-xia, LI Tuo, WANG Bo-guang Determination of trace polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric particulate using microwave-assisted extraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2002, 30(9): 1058-1062.)
- [10] KLINGSTEDT F, KALANTAR NEYESTANAKIA, LINDFORS L-E, SALMIT, HEIKKILÄ T, LANE E. An investigation of the activity and stability of Pd and Pd-Zr modified Y-zeolite catalysts for the removal of PAH, CO, CH<sub>4</sub> and NO<sub>x</sub> emissions [J]. Appl Catal A, 2003, 239(1-2): 229-240.
- [11] KLINGSTEDT F, KALANTAR NEYESTANAKIA, BYGGINGSBACKA R, LINDFORS L-E, LUNDEN M, PETERSSON M, TENGSTRÖM P, OLLONQVIST T, VÖYRYNEN J. Palladium based catalysts for exhaust aftertreatment of natural gas powered vehicles and biofuel combustion [J]. Appl Catal A, 2001, 209(1-2): 301-316
- [12] GABRIEL J, BALDRIAN P, VERMA P, CAJTHAML T, MERHAUTOVÁ V, EICHLEROVÁ I, STOYTCHEV I, TRNKA T, STOPKA P, NERUD F. Degradation of BTEX and PAHs by Co(II) and Cu(II)-based radical-generating systems [J]. Appl Catal B, 2004, 51(3): 159-164.
- [13] WEBER R, SAKURAIT, HAGENMAIER H. Low temperature decomposition of PCDD/PCDF, chlorobenzenes and PAHs by TiO<sub>2</sub>-based V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub> catalysts [J]. Appl Catal B, 1999, 20(4): 249-256
- [14] 叶华, 周志刚, 郑大威, 郑菁英, 戴乾圆. 钯催化剂性能及其对燃煤烟气中多环芳烃的催化净化 [J]. 环境科学, 1999, 20(5): 58-61.  
(YE Hua, ZHOU Zhi-gang, ZHENG Da-wei, ZHENG Jing-ying, DAI Qian-huan Performance and application of supported palladium catalysts to eliminate PAHs in waste gas of burning coal [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1997, 20(5): 58-61.)
- [15] 祁明峰, 李晓东, 曹志勇, 尤孝方, 严建华, 岑可法. 湿法除尘器对多环芳烃排放控制的研究 [J]. 热力发电, 2004, 33(1): 18-22  
(QI Ming-feng, LI Xiao-dong, CAO Zhi-yong, YOU Xiao-fang, YAN Jian-hua, CEN Ke-fa Study on effects of a wet scrubber upon controlling the PAHs emissions [J]. Thermal Power Generation, 2004, 33(1): 18-22.)
- [16] 陈进生. 嵩屿电厂烟气 SCR 脱硝工艺及特点分析 [J]. 电力环境保护, 2006, 22(6): 40-43.  
(CHEN Jin-sheng The technology and character analysis for flue gas denitrification SCR system in Songyu power plant [J]. Electric Power Environmental Protection, 2006, 22(6): 40-43.)
- [17] 李权龙, 袁东星, 陈猛. 替代物和内标物在环境样品分析中的作用及应用 [J]. 海洋环境科学, 2002, 21(4): 46-49.  
(LI Quan-long, YUAN Dong-xing, CHEN Meng Function and application of surrogate and internal standard in environmental sample analysis [J]. Marine Environmental Science, 2002, 21(4): 46-49.)
- [18] SHU Y Y, TEY S Y, WU D K S. Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in airborne particles using open-vessel focused microwave-assisted extraction [J]. Analytica Chimica Acta, 2003, 495(1-2): 99-108
- [19] YAN R, ZHU H, ZHENG C, XU M. Emissions of organic hazardous air pollutants during Chinese coal combustion [J]. Energy, 2002, 27(5): 485-503.
- [20] 张军, 袁东星, 陆志强, 马丽. 九龙江口红树林区表层沉积物中多环芳烃含量与来源研究 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2003, 42(4): 499-503.  
(ZHANG Jun, YUAN Dong-Xing, LU Zhi-qian, MA Li Contamination and source of polycyclic aromatic hydrocarbons in surficial sediments of mangrove areas in Jiulong river estuary [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2003, 42(4): 499-503.)
- [21] 李晓东, 曹志勇, 祁明峰, 尤孝方, 严建华, 岑可法. 铜及氧化铜对煤燃烧过程多环芳烃排放的影响 [J]. 燃料化学学报, 2003, 31(6): 548-552  
(LI Xiao-dong, CAO Zhi-yong, QI Ming-feng, YOU Xiao-fang, YAN Jian-hua, CEN Ke-fa Influence of copper and cupric oxide on PAHs emissions during coal combustion [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2003, 31(6): 548-552.)
- [22] NISBET I C T, LaGOY P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. Regul Toxicol and Pharmacol, 1992, 16(3): 290-300.