

粉煤灰矿物学资源属性和环境属性

王武名¹, 韩 丽²

1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国地质大学 材料科学与化学工程学院, 武汉 430074

摘 要: 粉煤灰一直被认为是固体废物, 其资源属性和环境属性未能得到认可。本文从矿物资源角度, 将粉煤灰“传统”的固体废物概念转变到“非传统”的矿物资源上来, 提出了粉煤灰的矿物学资源属性和环境属性, 探讨了它作为矿物资源在建材、化工和农业等领域的应用, 阐明其环境属性。粉煤灰的环境效应体现在对陆地生态系统和水生生态系统影响与危害。然而, 粉煤灰在治理环境污染和保护生态方面也有着积极的作用, 如处理废水、烟气脱硫和合成环境功能材料等。

关 键 词: 粉煤灰; 矿物学资源属性; 环境属性; 环境效应; 环境功能材料

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2007) 04-0382-07

Mineralogical Resource Attribute and Environmental Attribute of Fly Ash

WANG Wu-ming¹, HAN Li²

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Faculty of Material Science and Chemical Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Fly ash was used to be considered as just a kind of solid waste regardless of its resource attribute and environmental attribute. This paper has changed fly ash from the conventional conception of solid waste to unconventional conception of mineral resource, defined the resource attribute and environmental attribute of fly ash, discussed possible application of fly ash to the fields of construction, chemical industry, and agriculture as an unconventional mineral resource. It was indicated that fly ash has special environmental attribute, as it was badly influenced or harmful to the terrestrial ecosystem and hydrophilic ecosystem, but it could play important and positive role for treating environment pollution and protecting ecosystem, such as for treating wastewater, desulfurizing smoke, and synthesizing new environmental materials, etc.

Key words: fly ash; mineralogical resource attribute; environmental attribute; environmental effects; environmental function material

电力产业的固体废物粉煤灰, 大量侵占农田并严重污染环境。我国一个中型发电厂每排放 10 万吨粉煤灰, 要缴纳约 250~300 万人民币的排放费, 欧洲排放同样量的粉煤灰需缴纳约 60~200 万美元。处理和利用粉煤灰已受到广泛关注^[1~6]。

固体废物是对环境危害较大的污染源。不同来源的固体废物的矿物成分、化学成分不同。固体废物中的化学成分的富集可形成环境地球化学异常, 影响生态环境, 因而需要研究其生态环境地球化学效应和固体废物应用技术, 使之成为可被利用的材料。

1 粉煤灰的矿物学资源属性

矿物资源是指自然界中产生或人类非生产目标活动中产生的具有一定化学成分和晶体结构、在数量上和质量上能满足工农业生产和生活要求、可开发利用的物质。包括在技术经济已开发利用的矿产资源和受到技术经济环境因素制约而未能开发利用的矿物资源, 也包括固体废物^[7]。解决未来社会矿产资源需求的重要途径就是发现非传统矿产资源, 以替代或弥补传统矿产资源的紧缺。非传统矿产资源是指受目前技术、经济及环境因素的限制尚未被

收稿日期: 2007-01-28 收到, 06-28 改回

第一作者简介: 王武名(1977—), 男, 博士研究生, 从事环境矿物学及环境矿物材料学的研究。E-mail: wmwang@pku.edu.cn.

认识、发现或未能开发利用的矿产;包括非传统矿产、非传统方法、非传统矿业和非传统矿产经济四个方面^[8]。因此,粉煤灰“传统”的固体废物概念应转变到“非传统”的矿物资源上来。而对于一种矿物资源首先应从资源矿物学角度进行研究^[9]。

1.1 粉煤灰矿物学特点

煤粉燃烧形成粉煤灰。因而,其化学成分与含量因煤的产地、燃烧方式和程度等不同而异。表1是我国36个粉煤灰的化学组成,其中氧化硅、氧化铝及氧化铁约占85%,与火山灰成分相似^[10,11]。

表1 粉煤灰的化学组成^[12]

Table 1 The chemical compositions of fly ash %					
成分	平均值	波动范围	成分	平均值	波动范围
SiO ₂	50.6	33.9~ 59.7	Al ₂ O ₃	27.2	16.5~ 35.4
Fe ₂ O ₃	7.0	1.5~ 15.4	CaO	2.8	0.8~ 10.4
MgO	1.2	0.7~ 1.9	SO ₃	0.3	0~ 1.1
Na ₂ O	0.5	0.2~ 1.1	K ₂ O	1.3	0.7~ 2.9
烧失量	8.2	1.2~ 23.5			

粉煤灰是晶体矿物和非晶体矿物的混合物。矿物组成的波动范围较大。经X射线衍射分析^[12]证明,晶体矿物有石英、莫来石、赤铁矿、磁铁矿、氧化镁、生石灰和无水石膏等,非晶体矿物有玻璃体和次生褐铁矿,其中玻璃体含量占50%以上。

粉煤灰矿物颗粒的成分、粒径大小、形态各不相同(图1)。按形状可分为珠状颗粒和渣状颗粒。前者包括漂珠、空心沉珠(空心微珠)、复珠(子母珠)、密实沉珠(实心沉珠)和富铁玻璃珠等;渣状颗粒包括海绵状玻璃渣粒、碳粒、钝角颗粒、碎屑和粘聚颗粒等^[12]。粉煤灰粒径为0.001~0.1mm(图2),粒径分布范围较粉质粘土和粉质砂土窄。美国粉煤灰主要为粉砂级颗粒(占63.2%)^[14]。颗粒组成直接影响粉煤灰的质量。

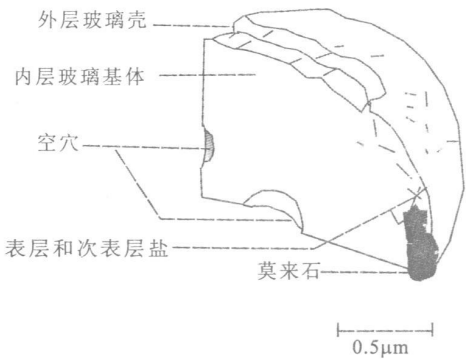


图1 粉煤灰颗粒的物理模型^[13]

Fig. 1 The physical model of fly ash particles

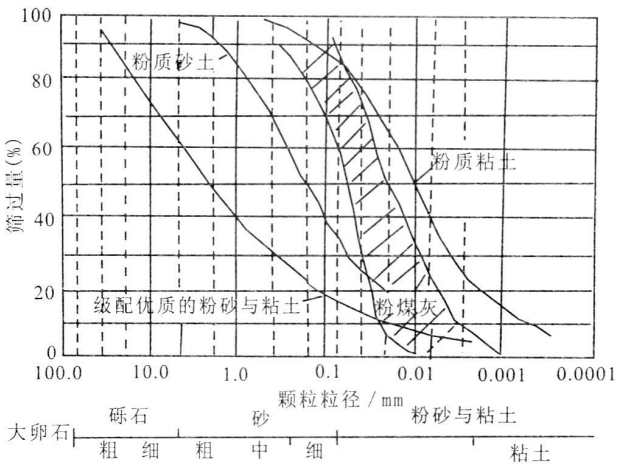


图2 粉煤灰的粒度分布^[12]

Fig. 2 The size distribution of fly ash particles

粉煤灰的组成决定其性质的差异。含碱金属和碱土金属元素使pH值升高(达11~12或更高);有较多O—Si键,与水作用后,颗粒表面出现大量羟基,具显著的亲水性、吸附性和表面化学活性;但未燃尽的碳粒则是疏水的^[15,16]。粉煤灰的基本物理性质见表2。

表2 粉煤灰的物理性能^[14]

Table 2 The physical properties of fly ash		
项目	范围	均值
密度/g·cm ⁻³	1.9~ 2.9	2.1
堆积密度/kg·m ⁻³	531~ 1261	780
密实度(%)	25.6~ 47.0	36.5
筛余量		
80 μm	0.6~ 77.8	22.2
45 μm	13.4~ 97.3	59.8
比表面积		
氮吸附法	0.8~ 19.5	3.4
透气法	0.1180~ 0.6530	0.3300
原灰标准稠度(%)	27.3~ 66.7	48.0
需水量比(%)	89~ 130	106
28 d 抗压强度比(%)	37~ 85	66

注:据我国68个火力发电厂的粉煤灰物理性质统计

1.2 粉煤灰矿物资源属性的利用前景

粉煤灰玻璃体含有大量化学内能、大量游离态Al₂O₃、SiO₂和金属氧化物(K₂O、Na₂O、Fe₂O₃、MgO);其颗粒微细,比表面积大,易于与其他物质形成新的物相。因此,粉煤灰可作为无机非金属资源用于建材、建工、陶瓷及化工领域。

粉煤灰的活性、形态效应和微集料效应,使其能广泛用作建筑材料。其本身略有或没有水硬胶凝性能,但当以粉状和有水存在时,能在常温特别是在水热处理(蒸汽养护)条件下与Ca(OH)₂或其他碱土金属氢氧化物发生化学反应,生成具有水硬胶凝性

能的化合物,成为强度和耐久性较强的材料,如混凝土、水泥、烧结砖和砌块^[17~22]。

空心微珠以其质轻、中空、熔点高、导热系数小、热稳定性强和耐压强度大等优点而成为轻质耐火保温隔热材料,或作为填料广泛应用于塑料、橡胶、树脂、人造大理石等材料;在石油、化工、精密陶瓷、航空航天等领域也有广阔的利用前景^[23~25]。低铁质玻璃微珠和多孔玻璃体具良好的烧结性,可作为陶瓷制品的原料^[26]。其中的莫来石是耐火材料的重要原料之一。

粉煤灰的粒径相当于粉砂土,主要成分有 Si、Al、Fe、Ca 和多种重金属元素与稀有元素(Cd、Se、As、Fe、Zn、Cu、Mo、B),是植物生长所必需的,尽管其含量差异很大,但均比土壤高,可为土壤提供一定数量的微量元素。粉煤灰中的磁珠,可增强土壤磁性,可用于改良土壤、矿山剥离物和废弃物的改土造田和肥料^[16,27~30]。农业上用粉煤灰改良粘性土、酸性土和盐化潮土,可降低粘粒含量,增加孔隙率,提高含水量和田间持水量,提高土壤温度和肥力,改善土壤性质^[12,16]。

粉煤灰中铝盐及其他有用元素的提取试验表明,煤中有工业价值的稀有元素(Ga、Ge)通常富集在细粒飞灰中,达到工业品位时即可提取^[6]。也有人报道过用粉煤灰合成白炭黑的实例^[31]。

利用粉煤灰作为非均相催化剂可催化 H_2O_2 和 NaClO 氧化 CN^- ^[32,33]。以粉煤灰、活性剂、硫酸为原料,经活化、陈化、浸泡、焙烧可制得固体酸催化剂,并应用于草酸二乙酯的合成^[34]。

粉煤灰中未燃尽碳粒可能是不利组分,但分选后可作吸附剂或活性炭原料。

2 粉煤灰的环境属性

环境矿物学是研究天然矿物与地球表面各个圈层间交互作用及其反映自然演变、防治生态破坏、净化环境污染和参与生物作用的科学^[9]。粉煤灰的环境属性研究是探讨其污染环境、破坏生态和影响人类健康的本质及其防治方法,研究治理环境污染的基本性能及其与微生物的交互作用。

2.1 粉煤灰的环境效应

粉煤灰堆积会产生扬尘,污染大气,危害人体健康;排入河道会淤塞河流,污染水质。当前的处置方法主要有填埋和贮灰池存储。王起超^[35]指出粉煤灰处置过程对陆地生态系统主要的不利效应是灰中潜在毒性物质对土壤和地下水的污染,生长在灰上植物成分改变,增加潜在毒性物质通过食物链的传

递和循环;水生生态系统可能通过灰场流出物和地表径流的输入,或渗透和污染地下水,影响水质和生物相;灰场流出物使水电导、浊度、水温升高,主要生态效应与水的 pH 值及元素浓度有关。

土壤中可溶盐、硼及其他潜在毒性元素含量高,会导致元素不均衡、土壤板结和硬化。研究指出, Pb、Cd 等重金属元素的迁移行为与 pH 值有关^[36]。粉煤灰中重金属的生物效应与土壤的 pH 值有很大的关系。因此,施用粉煤灰时要注意土壤和农作物中重金属的积累^[27]。实验表明,纯粉煤灰上种植的作物果实中²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra 的比活度超过国家标准(食品中天然放射性核素 GBn54-81),有不安全因素^[37],施用含氟粉煤灰时要考虑适当的作物^[38]。粉煤灰作建材使用时也应考虑其放射性。

2.2 粉煤灰在环境保护中的应用

粉煤灰有较大的比表面积和固体吸附性能;其中的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和碳粒等无机离子有交换特性和很强的吸附脱色作用。因此,粉煤灰是一种良好的环境功能材料,可以用来吸附处理含有害物质的废弃物。

(1) 处理废水:粉煤灰中大量 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 和未燃尽碳具多孔性和大的比表面积,有很好的吸附和沉降作用。其处理废水的机理有吸附作用(物理吸附和化学吸附)、凝聚作用和沉淀作用。

粉煤灰对处理城市生活污水、工业废水、含重金属离子废水、含 PO_3^{4-} 废水等都很有效^[39,40],能较好地去除 COD、BOD 和色度等^[40]。处理电镀废水时对 Cr^{6+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 的去除率分别可达 98.6%、97.8%、98.1% 和 99.3%^[41];用盐酸改性粉煤灰结合亚铁离子处理电镀废水时, Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 的去除率可达 98.38% 和 96.73%^[42]。处理低浓度含油废水的出水水质可达标^[43]。粉煤灰对造纸废水的处理效果很好^[44]。用改性粉煤灰处理造纸废水, COD、BOD、SS 和色度的去除率分别达 81.5%、80.7%、99.1% 和 90.4%^[45]。粉煤灰处理含表面活性剂废水的效果也不错^[46,47]。

粉煤灰中 CaO 的含量对重金属离子的去除效果影响重大。两种土耳其粉煤灰去除 Cr^{6+} 和 Cd^{2+} 的效果明显:2 h 都达到了吸附平衡,且对 Cd^{2+} 的比 Cr^{6+} 大;对 Cd^{2+} 的吸附量随溶液中 Cd^{2+} 含量的增加而提高,对 Cr^{6+} 则相反。粉煤灰中 CaO 的含量愈大,对 Cr^{6+} 和 Cd^{2+} 的去除效果愈明显。粉煤灰对 Cd^{2+} 的吸附符合 Langmuir 吸附等温线,不符合

Freundlich 吸附等温线, 对 Cr^{6+} 的吸附两者都不符合。据此, 认为在土耳其可用高钙粉煤灰处理含 Cd^{2+} 废水^[48]。用六种不同组成的粉煤灰处理含 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 废水的实验表明, 当粉煤灰用量分别为 0.2~10g/L 和 0.075~3.5g/L 时, Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 的去除率最大, 并都与 CaO 含量有关。

粉煤灰吸附水中磷时受 pH 值的影响较大, 中性条件下磷的去除率最高; 在磷浓度为 5 mg/L 时, 磷的去除率达 64%^[50]。

粉煤灰经处理后还可用作废水处理混凝剂。如粉煤灰中加入黄铁矿烧渣和适量氯化钠, 在一定温度下用盐酸浸提制成混凝剂, 可用于处理造纸废水、制药废水、制革废水都取得了较好的效果^[51]。

粘土中掺入 5%~30% 的粉煤灰可制得渗透性极小(小于 $1.00 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$) 的衬里材料; 掺入 20% 时, 可用作废水处理装置的衬里和覆盖物^[52]。

(2) 脱硫剂: 粉煤灰中含有 CaO 等碱性物质, 能吸收溶于水的 SO_2 , 水合 SO_2 电离出的 H^+ , 中和浸取液中的 OH^- , 降低吸收剂的 pH 值, 利于溶出金属离子; 溶液中形成 OH^- 离子。溶液中的 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 等离子在酸性条件下可催化硫的氧化, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 形成沉淀物, 与失效粉煤灰液一起排出。因此, 粉煤灰可用来脱除燃煤烟气中的 SO_2 , 生成无害的硫酸盐类。中小型电站燃煤烟气的脱硫, 一般用飞灰和炉渣水脱硫, 若燃煤的 Ca/S 值较小时, 需另加石灰等碱性物质^[53]。

粉煤灰烟气脱硫工艺按反应产物形态分湿法、半干法和干法三种。目前湿法烟气脱硫约占 85% (其中石灰石-石膏法约占 36.7%, 其他湿法约占 48.3%), 喷雾干燥脱硫占 8.4%, 吸收剂再生法脱硫占 3.4%, 炉内喷射吸收剂及尾部增湿活化脱硫占 1.9%^[54]。

用粉煤灰作吸附剂的干法管道喷射烟气脱硫脱氮工艺, Ca/S 值较低, 脱硫效率可达 84% 左右, 同时可脱除部分 NO_x (脱氮率可达 40% 左右)^[55]。

(3) 合成环境功能材料: 从 20 世纪 80 年代中期开始, 国外开始利用粉煤灰合成沸石^[56]。煤粉在燃烧过程中, 煤中的高岭石等矿物会发生晶型转变, 形成偏高岭石、莫来石和石英, 与氢氧化钠溶液反应, 可合成沸石。粉煤灰的主要化学组成类似于偏高岭石, 因而, 可用富含偏高岭石的粉煤灰 (SiO_2 和 Al_2O_3 为主要成分) 合成沸石。日本和美国的研究成果尤为突出。20 世纪 80 年代中期即在日本着手开发, 并有了工业化规模的生产厂家^[3]。粉煤灰的沸石化通常在碱性介质中进行, 不同碱度和不同温

度生成的沸石矿物不同^[57~59]。

2.3 粉煤灰与微生物的交互作用

有人将粉煤灰与磷细菌用于大豆生产, 取得良好效果^[60]。也有人利用粉煤灰成功培养泾阳链霉菌^[61]。笔者^[7]也曾利用粉煤灰作为固氮菌载体制备微生态复混肥。还有人用生活污水与粉煤灰制取肥料^[62]。

3 结 语

本文提出了粉煤灰的矿物学资源属性和环境属性, 探讨了粉煤灰作为矿物资源在建材、化工和农业等领域的应用。今后的重点应是开发和推行大用灰量、低成本、高附加值的新技术; 从环境矿物学的角度进一步查明粉煤灰污染环境、破坏生态和影响人类健康的本质和防治方法, 研究开发粉煤灰治理环境污染的基本性能和开发环境功能材料的应用将是研究热点。

参考文献 (References):

- [1] Iwashita A, Sakaguchi Y, Nakajima T, Takanashi H, Ohki A, Kambara S. Leaching characteristics of boron and selenium for various coal fly ashes [J]. *Fuel*, 2005, 84 (5): 479-485.
- [2] Vassilev S V, Menendez R. Phase-mineral and chemical composition of coal fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. 4. Characterization of heavy concentrates and improved fly ash residues [J]. *Fuel*, 2005, 84 (7-8): 973-991.
- [3] 王华, 陈德平, 宋存义, 张强. 粉煤灰利用研究现状及其在环境保护中的应用[J]. *环境与开发*, 2001, 16(1): 4-6.
Wang Hua, Chen Deping, Song Cunyi, Zhang Qiang. Current situation of fly ash and its application in environmental protection[J]. *Environment and Exploitation*, 2001, 16(1): 4-6. (in Chinese with English abstract)
- [4] 耿春香, 路帅. 粉煤灰的环境污染与综合利用[J]. *上海环境科学*, 2004, 23(4): 182-184.
Geng Chunxiang, Lu Shuai. Environmental pollution and comprehensive utilization of fly ash [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2004, 23(4): 182-184. (in Chinese with English abstract)
- [5] 高占国, 华珞, 郑海金, 张志刚. 粉煤灰的理化性质及其资源化的现状与展望[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(1): 70-77.
Gao Zhanguo, Hua Luo, Zheng Haijin, Zhang Zhigang. Physicochemical characteristics of fly ashes and situation & prospect of its utilization as resources [J]. *J. Capital Normal Univ.*, 2003, 24(1): 70-77. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王鹏飞. 粉煤灰综合利用研究进展[J]. *电力环境保护*, 2006, 22(2): 42-44.
Wang Pengfei. Review on research and development of fly ash

- application [J]. Electric Power Environmental Protection, 2006, 22(2): 42– 44. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王武名. 粉煤灰处理造纸废水及微生态复混肥的制备[D]. 沈阳: 东北大学, 2004.
- Wang Wuming. Treating papermaking wastewater and producing micro-ecological compound fertilizer with fly ash[D]. Shenyang: Northeastern University, 2004. (in Chinese)
- [8] 赵鹏大, 陈建平. 非传统矿产资源体系及其关键科学问题[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 251– 255.
- Zhao Pengda, Chen Jianping. System of nontraditional mineral resources and its key problem [J]. Adv. in Earth Sci., 2000, 15(3): 251– 255. (in Chinese with English abstract)
- [9] 鲁安怀. 矿物学研究从资源属性到环境属性的发展[J]. 高校地质学报, 2000, 6(2): 245– 251.
- Lu Anhuai. Development of properties of mineralogy from resource to environmental [J]. J. Geol China Univ., 2000, 6(2): 245– 251. (in Chinese with English abstract)
- [10] 煤炭科学研究总院. 煤质分析应用技术指南[M]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- China Coal Research Institute Compiled. Analyzed and applied technology guide for coal quality[M]. Beijing: China Standard Press, 1991. (in Chinese)
- [11] Iyer R S, Scott J A. Power station fly ash—A review of value-added utilization outside of the construction industry [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2001, 31(3): 217– 228.
- [12] 王福元, 吴正严. 粉煤灰利用手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- Wang Fuyuan, Wu Zhengyan. Utilization handbook for fly ash [M]. Beijing: China Electrical Power Press, 1997. (in Chinese)
- [13] 毕振明, 高忠爱, 等. 固体废物的处理与处置[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- Mi Zhenming, Gao Zhong' ai, *et al.* Disposition and treatment of solid waste [M]. Beijing: Higher Education Press, 1993. (in Chinese)
- [14] 韩怀强, 蒋挺大. 粉煤灰利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- Han Huaqiang, Jiang Tingda. Utilizing technology for fly ash [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [15] 李天杰. 土壤环境学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996: 244– 247.
- Li Tianjie. Soil environmental science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1996: 244– 247. (in Chinese)
- [16] 杨剑虹, 车福才, 王定勇, 谢德体, 魏朝富, 张林. 粉煤灰的理化性质与农业化学行为的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(4): 341– 348.
- Yang Jianhong, Che Fucui, Wang Dingyong, Xie Deti, Wei Chaofu, Zhang Lin. Study on physical and chemical properties of fly ashes and their agrochemical behaviours [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1997, 3(4): 341– 348. (in Chinese with English abstract)
- [17] Cengiz D A, Alaettin K, Umur K S. Strength and shrinkage properties of mortar containing a nonstandard high-calcium fly ash [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34: 99– 102.
- [18] Ramazan D, Rustem G. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2003, (33): 723– 727.
- [19] Bouzoubaa N, Zhang M H, Malhotra V M. Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash [J]. Cement and Concrete Research, 2001, (31): 1393– 1402.
- [20] Cengiz D A, Celik O N. Relation between abrasion resistance and flexural strength of high volume fly ash concrete [J]. Mater. Struct., 2002, 35(248): 257– 260.
- [21] 蒋蓉. 粉煤灰硅酸盐水泥的研制[J]. 国外建材科技, 2005, 26(4): 27– 29.
- Jiang Rong. Study on the making of Portland cement by fly ash [J]. Science and Technology of Overseas Building Materials, 2005, 26(4): 27– 29. (in Chinese with English abstract)
- [22] 汪冬冬, 周士琼, 田伟丽. 利用粉煤灰和磨细矿渣配制高性能混凝土[J]. 混凝土, 2006, (5): 40– 44.
- Wang Dongdong, Zhou Shiqiong, Tian Weili. The preparing of high-performance concrete with of fly ash and ground slag [J]. Concrete, 2006, (5): 40– 44.
- [23] 全北平, 徐宏, 古宏晨, 丁文江. 粉煤灰空心微珠的研究与应用进展[J]. 化工矿物与加工, 2003, (11): 31– 33.
- Quan Beiping, Xu Hong, Gu Hongchen, Ding Wenjiang. Progress in research and application of fly ash particles[J]. Industrial Minerals and Processing, 2003, (11): 31– 33. (in Chinese with English abstract)
- [24] 付喜, 张鸿波. 粉煤灰作橡胶填料影响因素的研究分析[J]. 粉煤灰, 2005, (1): 17– 18.
- Fu Xi, Zhang Hongbo. Analysis study of effect of factor fly ash as rubber filler[J]. Coal Ash China, 2005, (1): 17– 18. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王明珠, 沈志刚. 粉煤灰空心微珠的高附加值应用研究[J]. 中国粉体技术, 2005, (1): 15– 19.
- Wang Mingzhu, Shen Zhigang. Study of valuable use of the plerosphere from coal fly ash [J]. China Powder Science and Technology, 2005, (1): 15– 19. (in Chinese with English abstract)
- [26] Cheng T W, Weng TH, Chen Y S, Chiu J P. Production of glass-ceramic from incinerator fly ash [J]. Ceramics International, 2002, (28): 779– 783.
- [27] 焦有, 李贵宝, 吴德科, 汤义林. 粉煤灰作为土壤改良剂的效用及其环境评价[J]. 河南科学, 1997, 15(4): 470– 475.
- Jiao You, Li Guibao, Wu Deke, Tang Yilin. The effect of coal fly ash as a soil amendment and its environment evaluation [J]. Henan Science, 1997, 15(4): 470– 475. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陈大睿. 土壤磁性及磁化粉煤灰在农业上的利用[J]. 粉煤灰综合利用, 1997, (1): 41– 43.
- Chen Darui. Soil magnetism and application of magnetized fly

- ash on agriculture [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 1997, (1): 41– 43. (in Chinese)
- [29] 金卓仁. 粉煤灰多元素复混肥及增产效果[J]. 化肥工业, 1997, 24(1): 27– 30.
- Jin Zhuoren. Multi-element compound fertilizer based on pulverized coal ash and its yield increase effect [J]. Journal of the Chemical Fertilizer Industry, 1997, 24 (1): 27– 30. (in Chinese with English abstract)
- [30] 焉越学, 聂鑫. 利用粉煤灰生产复合磁化肥[J]. 吉林电力技术, 2000, 3: 14– 15.
- Yan Yuexue, Nie Xin. The preparing of compound magnetized fertilizer with fly ash [J]. Jilin Electric Power, 2000, 3: 14– 15. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王平, 李辽沙. 粉煤灰制备白炭黑的探索性研究[J]. 中国资源综合利用, 2004, (7): 25– 27.
- Wang Ping, Li Liaosha. Research on preparation of silica white from fly ash [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2004, (7): 25– 27. (in Chinese with English abstract)
- [32] 罗道成, 陈安国, 刘俊峰. 粉煤灰催化 H_2O_2 氧化 CN^- 的研究[J]. 煤化工, 2003, (6): 26– 281.
- Luo Daocheng, Chen Anguo, Liu Junfeng. Oxidation of CN^- by H_2O_2 with fly ash as catalyst [J]. Coal Chemical Industry, 2003, (6): 26– 281. (in Chinese with English abstract)
- [33] 罗道成, 易平贵, 刘俊峰, 陈安国. 粉煤灰- NaClO 非均相催化氧化 CN^- 的研究[J]. 煤炭学报, 2003, (6): 646– 649.
- Luo Daocheng, Yi Pinggui, Liu Junfeng, Chen Anguo. Study on fly ash- NaClO heterogeneous catalytic oxidation of CN^- [J]. Journal of China Coal Society, 2003, (6): 646– 649. (in Chinese with English abstract)
- [34] 古绪鹏. 粉煤灰固体酸催化合成草酸二乙酯的研究[J]. 精细石油化工, 2003, (6): 19– 211.
- Gu Xupeng. Study on synthesis of diethyl oxalate by acidic catalyst on pulverized coal ash [J]. Speciality Petrochemicals, 2003, (6): 19– 211. (in Chinese with English abstract)
- [35] 王起超. 粉煤灰环境效应研究进展[J]. 环境科学进展, 1996, (4): 46– 52.
- Wang Qichao. Review of environmental effect of fly ash [J]. Advances in Environmental Science, 1996, (4): 46– 52. (in Chinese with English abstract)
- [36] Shimaoka T, Hanashima M. Behavior of stabilized fly ashes in sold waste landfills[J]. Waste Management, 1996, 16(5/6): 545– 554.
- [37] 史建君, 陈晖, 徐寅良. 农田使用粉煤灰的放射性安全性评价[J]. 上海农学院学报, 2000, 18(2): 95– 100.
- Shi Jianjun, Chen Hui, Xu Yinliang. Evaluation of radioactive security for applying coal ash in farmland [J]. Journal of Shanghai Agricultural College, 2000, 18(2): 95– 100. (in Chinese with English abstract)
- [38] 任启勤, 王超英, 梅敬斌, 宋丽梅. 电厂灰场覆土后土壤和小麦中氟污染的调查研究[J]. 安徽预防医学杂志, 2000, 6(4): 252– 253.
- Ren Qiqing, Wang Chaoying, Mei Jingbin, Song Limei. Investigation on fluorine pollution in the soil and wheat at the coal ash sites covered with soil of Huaibei Power Station [J]. Anhui Journal of Preventive Medicine, 2000, 6(4): 252– 253. (in Chinese with English abstract)
- [39] 朱伟萍. 利用粉煤灰处理废水[J]. 煤炭工程, 2006, (4): 73– 75.
- Zhu Weiping. Treating wastewater by fly ash [J]. Coal Engineering, 2006, (4): 73– 75. (in Chinese)
- [40] 相会强, 杨宏, 默占江. 粉煤灰在印染、染料废水处理中的应用[J]. 现代化工, 2005, 25(增刊): 53– 56.
- Xiang Huiqiang, Yang Hong, Mo Zhanjiang. Application of fly ash in printing and dyeing wastewater treatment [J]. 2005, 25(s1): 53– 56. (in Chinese with English abstract)
- [41] 彭荣华, 陈丽娟, 李晓湘. 改性粉煤灰吸附处理含重金属离子废水的研究[J]. 材料保护, 2005, 38(1): 48– 50.
- Peng Ronghua, Chen Lijuan, Li Xiaoxiang. Adsorption of wastewater containing heavy metal ions by modified fly ash [J]. Materials Protection, 2005, 38(1): 48– 50. (in Chinese with English abstract)
- [42] 罗榕梅. 粉煤灰处理电镀废水[J]. 煤质技术, 2004, (3): 50– 53.
- Luo Rongmei. Treating electroplate wastewater by fly ash [J]. Coal Quality Technology, 2004, (3): 50– 53. (in Chinese)
- [43] 刘汉利. 改性粉煤灰处理含油废水的应用研究[J]. 电力环境保护, 2001, 17(1): 16– 17. (in Chinese with English abstract)
- [44] 王武名, 于晓彩, 单连斌, 王恩德. 粉煤灰在处理造纸废水中的应用[J]. 环境保护科学, 2003, 29(4): 24– 26.
- Wang Wuming, Yu Xiaocai, Shan Lianbin, Wang Ende. Using of coal ash in the treatment of paper making wastewater [J]. Environmental Protection Science, 2003, 29(4): 24– 26. (in Chinese with English abstract)
- [45] 于晓彩, 王恩德, 王武名. 改性粉煤灰处理造纸废水的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(8): 814– 816.
- Yu Xiaocai, Wang Ende, Wang Wuming. Environmental treatment of papermaking wastewater by modified fly ash [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2003, 24(8): 814– 816. (in Chinese with English abstract)
- [46] 于晓彩, 邵红, 王武名, 王恩德. 改性粉煤灰处理含阳离子表面活性剂废水的研究[J]. 环境工程, 2003, 21(5): 78– 80.
- Yu Xiaocai, Shao Hong, Wang Wuming, Wang Ende. Study on the treating wastewater containing cation surfactants CT-MAB by modified fly ash [J]. Environmental Engineering, 2003, 21(5): 78– 80. (in Chinese with English abstract)
- [47] 于晓彩, 王恩德, 徐微, 辛哲. 改性粉煤灰处理阴离子表面活性剂废水[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(4): 299– 302.
- Yu Xiaocai, Wang Ende, Xu Wei, Xin Ze. Environmental treatment of anionic surfactants LAS wastewater by modified

- fly ash [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2005, 26(4): 299– 302. (in Chinese with English abstract)
- [48] Bayat Belgin. Comparative study of adsorption properties of Turkish fly ashes: II. The case of chromium (VI) and cadmium (II) [J]. J Hazardous Materials, 2002, 95(3): 275– 290.
- [49] Erol M, K c kbayrak S, Ersoy-Mericoyu A, Ulubas T. Removal of Cu^{2+} and Pb^{2+} in aqueous solutions by fly ash [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(7– 8): 1319 – 1331.
- [50] 韩丽, 段致辉. 利用粉煤灰治理工业废水的研究[J]. 环境科学动态, 2000, (4): 25– 26.
Han Li, Duan Zhihui. Study on treating industrial wastewater by fly ash[J]. Environmental Science Trends, 2000, (4): 25 – 26. (in Chinese)
- [51] 梁天民. 用粉煤灰制备混凝剂的试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 1996, (4): 45– 46.
Liang Tianmin. Experimental study on the preparing of coagulant with fly ash [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 1996, (4): 45– 46. (in Chinese)
- [52] Murat M, Yuksel Y. Potential use of fly ash and bentonite mixture as liner or cover at waste disposal areas [J]. Environmental Geology, 2001, (40): 1316– 1324.
- [53] 宋晓红. 用粉煤灰进行烟气干式脱硫[J]. 粉煤灰综合利用, 1996, (1): 67.
Song Xiaohong. Dry flue gas desulfurization by fly ash [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 1996, (1): 67. (in Chinese)
- [54] 钱玲, 侯浩波. 简述粉煤灰在烟气脱硫方面的应用[J]. 粉煤灰综合利用, 2005, (2): 46– 47.
Qian Ling, Hou Haobo. Summarization on application of fly ash in flue gas desulfurization [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2005, (2): 46– 47. (in Chinese)
- [55] 赵毅, 马双忱, 李燕中, 赵建海, 付延春. 利用粉煤灰吸收剂对烟气脱硫脱氮的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 108– 112.
Zhao Yi, Ma Shuangchen, Li Yanzhong, Zhao Jianhai, Fu Yanchun. The experimental investigation of desulfurization and denitrification from flue gas by absorbents based on fly ash [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 108– 112. (in Chinese with English abstract)
- [56] Querol X, Moreno N, Umana J C, Alastuey A, Hernandez E, Lopez-Soler A, Plana F. Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview [J]. International Journal of Coal Geology, 2002, 50: 413– 423.
- [57] 王华, 宋存义, 张强. 国外利用粉煤灰合成沸石的研究现状[J]. 化工矿物与加工, 2000, (7): 1– 8.
Wang Hua, Song Cunyi, Zhang Qiang. Overseas study status of using fly ash to synthesize zeolite [J]. Industrial Minerals & Processing, 2000, (7): 1– 8. (in Chinese with English abstract)
- [58] 王德举, 王政国, 唐颐. 利用粉煤灰合成沸石的研究进展[J]. 粉煤灰综合利用, 2002, (6): 32– 34.
Wang Deji, Wang Zhengguo, Tangyi. Study of using fly ash to synthesize zeolite [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2002, (6): 32– 34. (in Chinese)
- [59] 童军杰, 房靖华, 刘永梅, 晓钟, 窦涛. 粉煤灰制取沸石分子筛的新进展[J]. 太原科技, 2003, (2): 6– 9.
Tong Junjie, Fang Jinghua, Liu Yongmei, Wang Xiaozhong, Dou Tao. Advance on study of using fly ash to synthesize zeolite [J]. Taiyuan Science and Technology, 2003, (2): 6– 9. (in Chinese)
- [60] Sunita G, Gaur A C. Impact of fly ash and phosphate solubilising bacteria on soybean productivity [J]. Bioresource Technology, 2002, (85): 313– 315.
- [61] 王志成, 吴山功. 利用粉煤灰培养泾阳链霉菌的研究[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版), 2002, 17(2): 86– 88.
Wang Zhicheng, Wu Shangong. Study on culture of streptomyces Jingyingensis with coke breeze [J]. Journal of Changsha University of Electric Power (Natural Science Edition), 2002, 17(2): 86– 88. (in Chinese with English abstract)
- [62] Wong J W C, Su D C. The growth of agropyron elongatum: An artificial soil mix coal fly ash and sewage sludge [J]. Bioresource Technology, 1997, (59): 57– 62.