

粉煤灰综合利用现状

吴元锋¹, 仪桂云¹, 刘全润¹, 李风海², 赵丽伟³, 马名杰¹

(1. 河南理工大学 材料科学与工程学院, 河南 焦作 454003;
2. 菏泽学院 化学化工系, 山东 菏泽 274000;
3. 大港油田石油工程研究院, 天津 300280)

摘要: 随着煤炭资源利用量的增加, 粉煤灰排放量呈现逐年增加趋势, 根据灰色预测模型估计到 2020 年中国粉煤灰排放量将达到 9 亿 t。如何利用好粉煤灰, 减少环境污染, 减少占地面积, 增加工业产值等是普遍关注的问题。在对粉煤灰物理化学特性概述的基础上, 对粉煤灰的综合利用进行了归类, 并从农业(土壤改良、肥料)、建材(混凝土、砖块、水泥、砂浆、陶粒、泡沫玻璃、拒水粉等)、化学工业(提取铝元素、合成分子筛、橡塑复合材料、造纸)、环保(污水处理、烟气净化) 等方面进行分类阐述, 对粉煤灰的利用方向提出了建议。

关键词: 粉煤灰; 环境污染; 基本性质; 综合利用

中图分类号: TQ174.44; X773

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2013)06-0100-05

Current situation of comprehensive utilization of fly ash

WU Yuanfeng¹, YI Guiyun¹, LIU Quanrun¹, LI Fenghai², ZHAO Liwei³, MA Mingjie¹

(1. School of Materials Science and Engineering Henan Polytechnic University Jiaozuo 454003, China;
2. Department of Chemistry and Chemical Engineering Heze University Heze 274000, China;
3. Dagang Oilfield Petroleum Engineering Research Institute Dagang 300280, China)

Abstract: Fly ash emissions increase year by year with the increase of coal utilization. According to the Grey Forecast Model, its domestic emissions will reach 9×10^8 tons by 2020. The rational utilization of fly ash is of great significance. Based on the analysis of physical and chemical properties of fly ash, classify the utilization methods of fly ash, detail each method from the aspects of agriculture (soil improvement, fertilizer), building materials (concrete, brick, cement, mortar, ceramsite, foam glass, gouache), chemical industry (extracting aluminum, synthesis of molecular sieves, rubber and plastic composite materials, paper production), environmental protection (wastewater treatment, flue gas purification). At last, put forward some suggestions on the development of fly ash utilization.

Key words: fly ash; environmental pollution; basic properties; comprehensive utilization

0 引 言

粉煤灰俗称飞灰, 是火电厂排放的工业废弃物。近年来, 随着资源需求量的增加, 粉煤灰产量呈逐年上升趋势。中国 1995 年粉煤灰排放量约 1.25 亿 t, 2000 年粉煤灰排放量约 1.5 亿 t, 2009 年

粉煤灰排放量约 3.75 亿 t, 根据灰色预测模型估计到 2020 年中国粉煤灰排放量将达到 9 亿 t。如果不对粉煤灰加以处理, 一旦排放到环境中, 将会对水、空气、土壤造成不同程度的污染和破坏, 同时对生物体也产生极大危害。因此如何合理利用粉煤灰, 实现废弃资源的再度利用已迫在眉睫。

收稿日期: 2013-10-30 责任编辑: 孙淑君

作者简介: 吴元锋(1990—), 男, 河南平舆人, 本科, 从事煤化工与数学建模方面的研究。E-mail: wuyuanfeng2015@163.com。通讯作者: 仪桂云(1977—), 女, 山东高密人, 讲师, 在读博士, 从事化工专业的教学与科研工作。E-mail: ygyun@hpu.edu.cn。

引用格式: 吴元锋, 仪桂云, 刘全润, 等. 粉煤灰综合利用现状[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(6): 100-104.

1 粉煤灰的物化性质

1.1 物理性质

粉煤灰的颜色一般分为灰色和灰黑色,颜色较深是由于粉煤灰中的炭粒未完全燃烧。粉煤灰形状各不相同,粒度大小不等,粒径一般在 $0.5 \sim 300.0 \mu\text{m}$ ^[1],视密度为 $1.0 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ ^[2],密度大多为 $2.1 \sim 2.6 \text{ g/cm}^3$ ^[3],粉煤灰经高温形成的过程中,由于煤粉表面张力的作用,大部分颗粒呈现微球状,表面极不平均,微孔较少,凸凹不平。一些分子在熔融状态下相互碰撞形成表面粗糙,棱角很多

的蜂窝状粒子聚合态,故粉煤灰具有很大的比表面积和较高的吸附活性。

1.2 化学性质

粉煤灰是一种火山灰质的混合材料,来源于煤中无机成分,而煤中无机成分以黏土矿为主,还含有少量的黄铁矿、方解石、石英等矿物。故粉煤灰化学成分以 SiO_2 、 Al_2O_3 为主(约占80%),其它成分为 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 P_2O_5 、 MnO_2 、 SO_3 。不同年代的煤通过不同燃烧工艺,所产生的氧化物含量也不尽相同^[4-5]。粉煤灰的化学成分见表1。

表1 粉煤灰的化学成分^[5]

成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	其它
含量	33.9~59.7	16.5~35.4	15.5~15.4	0.8~9.4	0.7~1.9	0.7~2.9	0.2~1.1	0~1.1	1.2~23.5
均值	50.6	27.2	7.0	2.8	1.2	1.3	0.5	0.3	8.2

2 粉煤灰的综合利用

现阶段,对粉煤灰研究的重点主要集中在农业、建材和建筑、化学工业、环境保护等方面。

2.1 在农业方面的应用

1) 土壤改良

粉煤灰是一个巨大比表面积的孔体,能对水、肥、气、热进行保存和传导^[1]。向土壤中加入适量粉煤灰时,土壤视密度、比重和饱和导水率显著增加,通气性提高,且粉煤灰中含有植物生长的多种矿物质,如Mg、N、B、Fe、Ca等元素,施加到土壤中能提高土壤的营养含量,改善土壤物化性质,提高土壤肥力。Mahale NK等^[6]通过盆栽实验研究,表明粉煤灰含量10%~60%能提高种子的发芽率。粉煤灰也能改善土壤的pH,提高孔隙率,降低土壤的体积密度^[7]。

2) 作为化肥添加剂

粉煤灰是矿物质燃烧的直接产物,富含矿质元素,可替代部分肥料的添加剂^[8]或通过对其电磁场处理,能得到一种很好的复合肥。到目前为止已研制粉煤灰硅肥、粉煤灰氮磷肥、粉煤灰磁化肥、粉煤灰复混肥^[9]、粉煤灰磁化复混肥,使用后,作物能明显增产^[6],且肥效作用较长。

2.2 在建材工程方面的应用

1) 粉煤灰混凝土

粉煤灰混凝土由水泥、砂石以及掺入一定量的粉煤灰配制而成。谭学生^[10]研究表明,在配制混凝土

复合材料时,加入适量的粉煤灰能提高混凝土的抗渗性、抗冲磨性和抗腐蚀性,同时能减少水泥用水量,增强浆体的体积功能、调节凝胶量和凝胶过程的功能、填充浆体孔隙和堵截毛细功能等,故在土木工程、水利工程、建筑工程、预制混凝土制品、预拌混凝土方面有较广泛的应用^[11]。

2) 粉煤灰砖块

粉煤灰砖是以粉煤灰为主要原料,再掺入其它工业废渣,经过配料、混料、干燥成型以及焙烧工序而制得的多孔砖或空心砖^[12]。张泽等^[13]研究表明,高掺量粉煤灰烧结砖具有外观整齐、强度高、重量轻等特点。薛峰^[14]利用冻融循环方法对蒸压粉煤灰进行研究,表明经过15次冻融循环后,质量损失率不超过2%,强度损失率不超过20%,达到国家JC 239—2001《粉煤灰砖》的标准。

3) 粉煤灰水泥

粉煤灰的化学成分是具有活性的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO 等硅酸盐材料,可以代替部分黏土作为生产水泥的原料。李荣佳^[15]研究表明,80%的普通硅酸盐水泥,20%的粉煤灰,外加0.3%聚羧酸盐减水剂制成的水泥浆强度与普通水泥相当,成石率略高。苏立辉^[16]对粉煤灰水泥的水化研究表明,适当添加粉煤灰能改善砂浆密度,增加试件强度。杨志宾等^[17]采用活化处理和外加改性剂的方法,制成了掺量为40%~50%的粉煤灰水泥,测试表明能提高粉煤灰水泥体系的流动性,降低用水量,增强润滑、耐腐蚀性^[18]。

4) 粉煤灰砂浆

粉煤灰作为砂浆中的材料,可以减少水泥、石灰或砂的用量,一般砂浆按其作用分为砌墙砂浆和抹面砂浆,且砌墙砂浆的用处较广。刘美燕等^[19]通过向砂浆中掺入活化的粉煤灰对其耐久性能进行研究,表明,随苯板 EPS 掺量的增加, EPS 粉煤灰砂浆的吸水率减小,软化系数增加,干燥收缩值明显降低,抗化学腐蚀性能增强,试样表面分化程度减弱。

5) 粉煤灰陶粒

粉煤灰陶粒是以粉煤灰为主要成分,加入其它原料经高温烧结而形成的颗粒。高德梅^[20]采用蒸压法利用粉煤灰粉合成的陶粒进行研究,表明蒸压煤灰陶粒可用于轻骨料混凝土,楼层隔音,水处理滤料以及含磷废水、含氯废水、含油废水的处理,另外还具有保温、阻燃特性,可以用来生产陶粒墙体,具有良好的经济效益和社会效益^[21]。

6) 粉煤灰泡沫玻璃

粉煤灰泡沫玻璃是以粉煤灰为主要原料经烧制而成的新型建筑材料。张勋芳等^[22]运用粉末烧结法合成泡沫玻璃,具有隔音、保温、质轻、耐腐蚀、耐磨、抗折强度高优点。Chen Bo 等^[23-24]研究了以 CaCO_3 作为发泡剂,制作粉煤灰含量不等的泡沫玻璃,结果表明在 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,粉煤灰含量越高,视密度越低,孔隙率越高,玻璃的强度越高。且泡沫玻璃可作大型浮雕材料,通过制成大块材料,在需要时可随意切割^[25]。

7) 粉煤灰拒水粉

FGJ-高性能拒水粉是由首都师范大学研制的一种新型的分散性防水材料。它以粉煤灰为主要原料,辅以少量的化学添加剂、助剂,经过物化作用处理形成的具有特定表面结构的分类杂化型材料^[26]。龚正^[27]把抗拒粉用于屋面防水,实践表明建筑拒水粉防水屋面的防水效果非常好,具有保温、隔热、抗震、抗裂、耐低温、耐老化等特性,可用于地面防潮、地下工程防潮抗渗等^[28]。

8) 在工程回填中的应用

粉煤灰具有干密度低、透气性大、黏结性小、活性高等特点,是工程回填中的优质填料。赵联芳^[29]总结了轻质粉煤灰在大桥台背回填中的应用,表明轻质粉煤灰通过固化剂施工成型后,能够抵御外界水的作用,提高台背回填的刚度,加强结构物与刚度过渡。王雷^[30]研究液态粉煤灰在台背施工回填

中的性能表明,液态粉煤灰能解决台背不易压实和不均匀沉降的问题。程改艳^[31]总结了粉煤灰在公路工程中的应用,表明粉煤灰密度小、透气性、稳定性好,是路基填方的好材料。

2.3 在化学工业方面的应用

1) 提取铝元素

粉煤灰中 SiO_2 和 Al_2O_3 总的质量分数可达到 80%,其中 Al_2O_3 质量分数达到 15%~50%,是制备铝制品的较好的资源。主要通过以硫酸浸取法和石灰石烧结法和碱石灰烧结法进行提取^[32]。苏双青等^[33]通过采用两步碱熔法,从高铝粉煤灰中制备氢氧化铝制品,化学分析表明,该氢氧化铝制品符合 GB/T 4294—1997 规定的一级标准,且该方法避免了粉煤灰的高温烧结过程,生产耗能低。

2) 合成分子筛

分子筛是结晶型的硅铝酸盐,具有均匀的孔隙结构,含有大量结晶水,又称沸石。目前人工合成的多达一二百种,主要包括方钠型沸石,八面体沸石、丝光体沸石、高硅型沸石等,王天翔等^[34]通过水热合成法,利用粉煤灰合成 P 型沸石分子筛,并得出最佳的合成条件为晶化时间 16 h,碱度 0.15 M,液固比 9:1。崔杏雨等^[35]通过碱熔融-水热合成法合成 4A 沸石分子筛,晶相单一且结构完整。分子筛能够提供很高的活性和特殊的选择性,在工业催化中,具有重要的地位^[36]。

3) 粉煤灰橡塑复合材料

粉煤灰橡塑复合材料是以粉煤灰作为无机填料与高分子材料融合形成的一种新型材料。刘俊红等^[37]总结了粉煤灰在分子填充方面的研究,表明对粉煤灰进行表面改性,可增强其与橡塑之间的相容性,提高填充量。Dasgupta M 等^[38]研究粉煤灰作为橡胶制品的填料表明,粒径为 0.074 mm, Al_2O_3 , Fe_2O_3 含量越高的粉煤灰对橡胶制品的填充效果较好,且粒径较小、比表面积较大、限制橡塑大分子运动,对橡塑制品的增补性提高明显。

4) 在造纸方面的应用

粉煤灰中含有未完全燃烧的煤粒,颗粒形状多为片状,粒径较小,与煅烧过的高岭石类似,可作为生产纸张的填料。付建生等^[39]通过实验研究表明,利用粉煤灰作填料生产的纸张能提高紧度、耐磨指数、不透明度。粉煤灰与传统填料相比,材质松软、密度较低、表面光滑、没有棱角,对造纸网几乎没有损害^[40]。

2.4 在环境保护方面的应用

1) 污水处理

粉煤灰去除废水中的有害物质主要通过物理吸附,但在一定条件下,也伴随一定的絮状沉淀和过滤作用。刘智峰等^[41]以粉煤灰的投入量、pH、温度为变量,对皂素废水的COD和色度去除率进行研究。结果表明粉煤灰处理皂素废水的最佳投料量为10.0 g/L,最佳pH为7,反应的最佳温度为20℃,粉煤灰的比表面积大,表面能高,有很强的物理吸附和化学吸附能力,能对污水中的有机和无机物进行吸附而将其去除^[42]。

2) 燃煤烟气净化

粉煤灰的主要成分是SiO₂、Al₂O₃、MgO、CaO等,在有水的情况下粉煤灰可以与碱金属或碱土金属发生硬性反应,生成多孔白色结晶物,有很大的比表面积,促进与Ca²⁺和SO₂反应^[43]。唐冰等^[44]运用粉煤灰制作脱氮吸附剂,表明引入氯离子能够提高吸附剂去除氮氧化物的效果。彭敏^[45]研究了粉煤灰对制备钙基脱硫剂的水热固相反应的自催化性能,表明其表面纳米级的SiO₂、Al₂O₃、CaO微粒为形成硅铝酸钙的核心提供了良好原料,且分布钙基表面的铁元素能促进脱硫反应。

3 结 语

粉煤灰具有广阔的利用前景。推广粉煤灰的利用不仅能够减轻环境压力,同样能起到变废为宝,增加社会效益的作用,对实现科学发展,循环经济也具有一定的促进作用。但目前粉煤灰的利用还处于基础阶段,如何对粉煤灰的利用开辟新的方向以及怎样利用粉煤灰合成新材料,将依赖于各领域的有机配合。

参考文献:

[1] 赵挺洁,白耀东. 粉煤灰在改良土壤中的应用研究[J]. 北方环境 2011 23(11): 139-140.
 [2] 徐金芳,杨洋,常智慧,等. 粉煤灰的农业利用的研究进展[J]. 湖北农业科学 2011 50(23): 4771-4774.
 [3] David F S Natusch, John R Wallace. Urban Aerosol Toxicity: The Influence of Particle Size [J]. Science, 1974, 186(4165): 695-699.
 [4] 高晓云,陈萍. 粉煤灰的基本性质与综合利用现状及发展方向[J]. 能源环境保护 2012 26(4): 5-7.
 [5] 茅沈栋,李镇,方莹. 粉煤灰资源化利用的研究现状[J]. 混凝土 2011(7): 82-84.

[6] Mahale NK, Patil SD, Sarode DB, Attarde SB. Effect of Fly Ash as an Admixture in Agriculture and the Study of Heavy Metal Accumulation in Wheat (Triticum aestivum), Mung Bean (Vigna radiata), and Urad Beans (Vigna mungo) [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2012 21(6): 1713-1719.
 [7] Jala S, Goyal D. Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production—a review [J]. Bioresource Technology, 2006 97(9): 1136-1147.
 [8] Yunusa IAM, Loganathan P, Nissanka SP, et al. Application of coal fly ash in agriculture: A strategic perspective [J]. Critical Reviews In Environmental Science and Technology, 2012 42(6): 559-600.
 [9] 武艳菊,刘振学. 减轻环境压力利用粉煤灰生产肥料[J]. 磷肥与复肥 2005 20(2): 58-59.
 [10] 谭学生. 超掺量粉煤灰混凝土的耐久性研究[J]. 科技视野 2012(22): 229-230.
 [11] 刘爱新. 粉煤灰混凝土的性能及其应用[J]. 混凝土, 2001(12): 6-8.
 [12] 郝成伟,钱红梅. 浅谈粉煤灰在烧结砖中的应用[J]. 皖西学院学报 2008 24(2): 95-97.
 [13] 张泽,张泰志,孙艳. 高掺量粉煤灰烧结砖的研制[J]. 粉煤灰综合利用 2006(2): 50-51.
 [14] 薛峰. 蒸压粉煤灰砖冻融循环试验研究[J]. 应用技术 2013(8): 91-91.
 [15] 李荣佳. 粉煤灰水泥浆的制备与应用研究[J]. 陕西煤炭 2011(4): 63-64.
 [16] 苏立辉. 粉煤灰水泥水化微观分析[J]. 黑龙江交通科技 2012(9): 75-75.
 [17] 杨志宾,韩敏芳,王庆云. 高掺量粉煤灰水泥制备与性能研究[J]. 稀有金属材料与工程 2008 37(1): 637-640.
 [18] 潘钟,罗津晶,薛珊珊,等. 粉煤灰利用的回顾与展望[J]. 环境卫生工程 2008 16(1): 19-22.
 [19] 刘美艳,赵碧华. 掺渣化粉煤灰砂浆耐久性能的试验研究[J]. 混凝土 2013(7): 102-104.
 [20] 高德梅. 蒸压法生产粉煤灰陶粒的技术研究[J]. 墙体革新与建筑节能 2012(11): 27-28.
 [21] 郝熙旺. 利用粉煤灰生产陶粒滤料探讨[J]. 北方环境 2012 24(2): 77-78.
 [22] 张勋芳,马晶. 粉煤灰泡沫玻璃的研制[J]. 有色矿冶 2006(22): 91-92.
 [23] Chen B, Wang KQ, Chen XJ, et al. Study of foam glass with high content of fly ash using calcium carbonate as foaming agent [J]. Materials Letters, 2012, 79: 263-265.

- [24] Chen B ,Luo ZW ,Lu AX. Preparation of sintered foam glass with high fly ash content [J]. Materials Letters , 2011 65(23/24) 3555-3558.
- [25] 杨梅,丘克辉,龙剑平,等.利用煤炭固体废物制备微晶玻璃[J].实验室研究与探索 2011 30(5):42-45.
- [26] 苏联金,何富安.粉煤灰利用信息与动态[J].能源研究与利用,1994(5):38-40.
- [27] 龚正.浅谈建筑拒水粉防水屋面[J].山西建筑,2011 37(21):89-90.
- [28] 耿朋飞,高帅,楚风各.粉煤灰的综合利用[J].洁净煤技术 2012 18(2):102-104.
- [29] 赵联芳.轻质固化粉煤灰分析及在大桥台背回填中的应用[J].黑龙江交通科技 2013(8):50-52.
- [30] 王雷.液态粉煤灰在台背回填施工中的应用[J].现代公路 2011(17):92-93.
- [31] 程改艳.谈粉煤灰在公路工程中的应用[J].山西建筑 2012 38(2):101-102.
- [32] 高岗强,李守成.我国高铝粉煤灰提取氧化铝的产业化进展[J].内蒙古科技与经济 2012(1):19-20.
- [33] 苏双青,马鸿文,邹丹,等.高铝粉煤灰碱溶法制备氢氧化铝的研究[J].岩土矿物学杂志 2011 30(6):981-986.
- [34] 王天翔,王增长.粉煤灰制备P型分子筛的研究[J].矿产综合利用 2009(1):40-42.
- [35] 崔杏雨,张徐宁,陈书伟,等.利用粉煤灰合成4A沸石分子筛的研究[J].太原理工大学学报,2012 43(5):539-543.
- [36] 黄仲涛,耿建铭.工业催化[M].2版.北京:化学工业出版社 2006:75-75.
- [37] 刘俊红,黄勇,陈善勇.粉煤灰在橡塑复合材料中的应用[J].化工技术与开发 2012 41(4):36-38.
- [38] Dasgupta M ,Kar S ,Gupta SD ,et al. Effect of fly ash as filler in rubber-a comprehensive study of the vulcanisate properties of styrene-butadiene rubber compounds [J]. Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology , 2013 29(3):151-167.
- [39] 付建生,张军礼,李杨,等.粉煤灰在瓦楞原纸中的应用[J].湖北工业大学学报 2007 22(6):5-6.
- [40] 范玉民,钱学仁.粉煤灰用作造纸填料的研究[J].中国造纸 2012 4(4):22-26.
- [41] 刘智峰,宋凤敏,刘瑾.粉煤灰在皂素废水处理中的应用[J].陕西理工学院学报 2010 26(3):79-80.
- [42] 姚婕.粉煤灰在污水处理中的应用[J].北方环境,2012 28(6):75-77.
- [43] 付颖,钱枫,周芸芸.粉煤灰在燃煤烟气净化工艺中的应用[J].北京工商大学学报 2006 24(2):17-19.
- [44] 唐冰,李坚,王艳磊,等.应用粉煤灰制作脱氮吸附剂的探讨[J].环境工程 2006 24(3):45-56.
- [45] 彭敏.粉煤灰对制备钙基脱硫机水热固相反应的自催化研究[J].广东化工 2011 38(4):101-102.

(上接第92页)

参考文献:

- [1] 傅丛.水煤浆中全硫的测定方法研究[J].洁净煤技术 2002 8(2):13-18.
- [2] GB/T 214—2007 煤中全硫的测定方法[S].
- [3] GB/T 25214—2010 煤中全硫测定 红外光谱法[S].
- [4] 郭丹丹,杜鹏,张航,等.浅析艾士卡法测定煤中全硫的影响因素[J].化学推进剂与高分子材料 2011(6):96-98.
- [5] 皮中原,尹杨林.红外吸收法测定煤中全硫[J].煤炭学报 2008 33(10):1173-1177.
- [6] 曾艳.库仑法分析试样粒度对硫分测值的影响[J].洁净煤技术 2011 17(5):90-92.
- [7] GB 475—2008 商品煤样人工采取方法[S].
- [8] GB/T 19494.1—2004 煤炭机械化采样 第1部分:采样方法[S].
- [9] GB 474—2008 煤样的制备方法[S].
- [10] 张国盛,徐勇.全自动红外测硫仪分析煤中全硫的应用探讨[J].煤质技术 2011(3):13-14,16.
- [11] 覃涛,胡浩杰,林星,等.红外测硫仪在煤质分析中的应用[J].煤质技术 2009(3):37-39.
- [12] 崔村丽.煤中全硫测定的主要影响因素分析及解决措施[J].山西化工 2010(6):12-13,17.
- [13] 胡文堂.用5E-IRS3000红外测硫仪测定煤中全硫的实效探讨[J].煤质技术 2012(S1):33-36.
- [14] 赵立江.红外光谱法测定煤中全硫的研究[J].煤质技术 2008(4):23-24.
- [15] 吴霞红.高温燃烧红外吸收法测定煤中全硫[J].浙江冶金 2012(2):34-36.
- [16] 姚文松,王群英,秦岭,等.红外法测定煤中全硫的不确定度评定[J].煤质技术 2012(6):16-19.
- [17] 张芳,孟祥升,张东生.管式炉—红外光谱法测定煤中全硫含量的测量不确定度的评定[J].首钢科技,2012(2):49-51.