

Status and Prospects for Resource Utilization of Coal Ash

Lei Liu, Yandong Mao, Kezhong Li*

State Key Lab of Coal-Based Low Carbon Energy, ENN Technology & Development Co. Ltd, Langfang Hebei
Email: nyyjy@enn.cn

Received: Dec. 6th, 2018; accepted: Dec. 21st, 2018; published: Dec. 28th, 2018

Abstract

Coal gasification residues occupy an important proportion in solid waste. Reasonable utilization of coal ash can not only eliminate the hazards of ash, but also save a lot of material resources and turn waste into treasure. The properties and utilization of coal ash are reviewed in this paper. The main components of ash residue are silica, alumina, calcium oxide and carbon residue. The chemical properties of ash are relatively stable and its application is safe. The utilization of ash residue can be divided into low-value, medium-value and high-value applications. At present, there are more low-value and medium-value applications. Combined with the characteristics of the ash in the coal gasification process, the utilization of waste ash is proposed. It can provide guidance for resource utilization of waste ash.

Keywords

Coal Gasification, Coal Ash, Utilization, Status, Prospects

煤气化灰渣资源化利用分析

刘 雷, 毛燕东, 李克忠*

新奥科技发展有限公司煤基低碳能源国家重点实验室, 河北 廊坊
Email: nyyjy@enn.cn

收稿日期: 2018年12月6日; 录用日期: 2018年12月21日; 发布日期: 2018年12月28日

摘 要

煤气化灰渣在固体废物中占据重要比例, 对灰渣进行合理利用, 不仅可以消除灰渣的危害, 还可节约大

*通讯作者。

量物质资源, 变废为宝, 因此, 研究煤气化灰渣的综合利用途径、开发灰渣综合利用新技术, 具有重要的现实意义。本文对煤气化灰渣的性质及利用现状进行了综述, 灰渣的主要成分为氧化硅、氧化铝、氧化钙及残炭, 化学性能相对稳定, 应用安全, 其利用分为低值化、中值化和高值化应用, 目前低值化及中值化利用较多; 最后本文结合煤气化工艺灰渣的特点, 提出工艺排放废灰渣综合利用途径, 可为废弃物灰渣的资源化利用提供指导。

关键词

煤气化, 灰渣, 综合利用, 现状, 展望

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤气化灰渣占据固体废物的重要比例, 对其进行综合利用是整个煤化工项目实现循环经济的重要因素。对灰渣进行合理利用, 不仅可以消除灰渣的危害, 还可节约大量物质资源, 变废为宝, 因此, 研究煤气化灰渣的综合利用途径、开发灰渣综合利用新技术, 具有重要的现实意义。

2. 煤气化灰渣的性质

煤气化灰渣包括粗渣(气化炉底渣)和细渣(飞灰及黑水滤饼等)两部分, 灰渣成分与气化原料煤灰分含量、组成及气化工艺等相关, 主要为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和残余碳等。

流化床气化灰渣分为两种, 一种是由除尘器收集的飞灰, 另一种是由排渣口排出的炉底渣。

2.1. 灰渣的物理特性

1) 外观形态

气化炉运行条件不同, 飞灰和底渣的外观形态也会有差别, 飞灰一般呈深灰、灰黑色等细颗粒状物质, 底渣则呈棕色、灰色、灰白、黄褐色等的粒状物质, 具体亦受煤种灰成分影响。

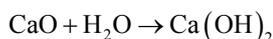
2) 粒度分布

粒度分布对建筑回填工程应用影响较大, 研究表明粒度分布均匀时, 易形成松散结构, 当受到动载荷时, 容易造成工程破坏, 表面沦陷。而像流化床气化炉这样宽筛分的灰渣, 颗粒大小混杂, 易形成紧密结构, 是建筑工程上的理想结构。

2.2. 灰渣的化学特性

灰渣的化学特性包括化学组成和矿物组成等。灰渣的化学成分主要为煤中未燃烧的矿物, 通常 Si 、 Al 、 Fe 、 Ca 和 Mg 的氧化物约占了 90% 左右, 其它主要成分还有 K_2O 、 Na_2O 、 SO_3 、未燃烧的碳及多种微量元素。其化学组成受煤的种类、产地、气化工艺、气化炉形式及灰的回收方式的影响。

如: 对于循环流化床锅炉, 灰渣中存在大量的 CaO 、 CaSO_4 、 SiO_2 及钙的硅酸盐、硅铝酸盐, 决定灰渣的化学性质具有一定的自硬性能, 且向灰渣中加水时容易发生如下化学反应:



因此,循环流化床灰渣一般呈碱性,其 PH 值在 11.5~12.5 之间。至于其他流化床气化炉灰渣的酸碱性受气化工艺及煤种特性影响,通常呈碱性。

另外,灰渣中还含有一些微量元素[1]。煤的产地不同灰渣中的微量元素含量也会有所区别。例如美国西部煤灰渣中 Ba 和 Sr 的含量较高,中部煤灰渣中 Cd、Mn、Mo、Ni、Pb 和 Zn 的含量较高。灰渣中常见微量元素的含量见表 1。

Table 1. Contents of common trace elements in ash and slag (mg/kg)

表 1. 灰和渣中常见微量元素的含量(mg/kg)

元素名称	渣			灰		
	试样个数	含量范围	平均含量	试样个数	含量范围	平均含量
银	7	0.1~0.51	0.2	32	0.04~8	0.501
砷	28	0.5~168	4.45	48	2.3~279	56.7
硼	14	41~513	161	58	10~1300	371
钡	27	300~5789	1600	96	110~5400	991
镉	23	0.1~4.7	0.86	77	0.1~18	1.6
钴	17	7.1~80.4	24	87	4.9~79	35.9
铬	27	3.4~350	120	112	3.6~437	136
铜	22	3.7~250	68.1	80	33~349	116
氟	9	2.5~104	50	41	0.4~320	29
汞	22	0.005~4.2	0.023	70	0.005~2.5	0.1
锰	25	56.7~769	297	96	24.5~750	250
钼	12	0.84~21	3.9	69	1.15~100	18
镍	17	14~258	38	71	1.8~253	54
铅	26	0.4~90.6	7.1	87	3.1~252	66.5
硒	25	0.08~14	0.691	86	0.6~19	9.97
锶	5	170~1800	800	73	30~3855	775
钛	1	2.0	2.0	41	0.1~42	16
钒	16	12~377	141	88	11.9~570	248
锌	8	4~798	99.6	87	14~2300	210

由表可以看出,飞灰和底渣的化学组成有明显差别,除 F、Sr、Ba 和 Mn 等几种元素之外,大部分元素在灰中含量较高,如 Se、As 和 Pb 等。粉煤灰的元素含量与颗粒尺寸有关 Al、B、Ca、Cs、Fe、K、Mg、Mn、Na、Rb、Sc、Ta、Th、Ti 等元素较均匀地分布于粉煤灰粒径不同的颗粒中;而 As、Se、Hg、Mo、Cd 等元素在细粒灰中含量较高,这是因为该些元素为挥发性元素,在反应过程中凝于颗粒表面;Ba、Co、Cr、Cu、Sr、U、V 等元素介于以上两组元素之间。此外,游离 CaO 的含量与粉煤灰颗粒的大小也有关系,颗粒愈细 CaO 含量愈高。煤有弱放射性,由于 U 和 Th 元素在燃烧过程中形成不溶解、不挥发的化合物,几乎全部进入灰中,因此灰渣也有一定的放射性,且飞灰中的放射性元素浓度高于底渣。有资料证明,粉煤灰中放射性元素(U 系列、Th 系列)的含量比炉底灰高 46%。

表 2 列出了灰渣和几种常见建筑材料的放射性测试结果[1]。

由此可以看出灰渣的放射性比水泥和粘土砖等常用建筑材料略高。李英等[2]也对灰渣作为建材使用产生的辐射影响进行了评价,发现:从我国的燃煤灰渣放射性水平来看,即使建材中掺入比高达 60%~80%,从辐射环境影响的角度来说也是安全的。鉴于诸多研究结论,灰渣可安全地作为建筑材料使用。

Table 2. Radioactivity of ash and several common building materials**表 2.** 灰渣和几种常见建筑材料的放射性

材料种类	放射性(Pc/g)	
	U (铀)	Tb (钍)
灰渣	3~5	3~5
花岗岩块	2.5	2.2
粘土砖	0.6~3.0	1.2~3.5
水泥	0.7~3.0	2.0~3.5

3. 煤气化灰渣的利用现状

灰渣的利用研究可分为低值化、中值化和高值化。低值化利用包括结构回填、路基填筑、充填矿井等，经济效益较低；中值化利用经济效益一般，包括作水泥原料、墙体材料等；高值化利用经济效益较好，包括高级填充剂、土壤改良剂、吸附剂、金属或其化合物分选、重金属的分离、耐高温材料等。

国内外对气化灰渣的具体利用形式如下：

3.1. 灰渣的物理热利用

通常煤气化灰渣的排出温度大约在 800℃左右的高温排出，其中蕴含大量的物理热量。为了提高总体热效率，有必要进行灰渣物理热的回收工作。灰渣物理热的应用，在目前一般用于加热给水，通过冷渣机进行热交换。

3.2. 用作建筑回填

建筑工程上作为回填使用的散体建筑材料的颗粒大小及组成，对其工程特性具有决定性影响。研究表明，粒度分布均匀时，易形成松散结构，当受到动载荷时，孔隙度降低，受到压密，造成表面沉陷，致使建筑工程破坏；反之，颗粒大小混杂，粗粒形成的孔隙被细颗粒充填，易形成紧密结构，在动、静载荷作用下，建筑工程都不会有较大的损失，这是建筑工程上最理想的结构。煤气化灰渣具有非均粒性，孔隙较少，用作回填材料效果较好[3]。

3.3. 用于农业

灰渣在农业中的应用，实际上是通过改良土壤、覆土造田等手段，促进其发展的，以便达到提高农作物产量、优化生态环境等目的[4]。

① 改良土壤的碱性：如对含脱硫产物和脱硫剂较高的循环流化床灰渣，因自由 CaO 和 H₂O 反应生成 Ca(OH)₂，使灰渣呈碱性，因此，此种灰渣可用于农田、恢复酸性矿地、中和工业废料等方面；石煤渣也是强碱性物质，pH 值在 10~12 以上，所以直接施用石煤渣后可以不同程度地提高土壤的碱度，石煤渣很适合在南方酸性土壤中施用，特别是在南方缺钾需硅的酸性水稻田里施用，更有良好的作用。

② 促进土壤中有机质的分解：灰渣中含有钙、镁等盐基离子，由于碱性强，盐基离子多，能促进土壤有机质的分解，对改善土壤的供肥和保肥能力有一定的作用。

③ 提高土壤温度：一些气化灰渣如石煤渣、循环流化床灰渣等是热性材料，遇水后有一个放热过程，因此可以提高土壤温度。

另外，灰渣中因含有植物生长所需的营养元素，还可以不同程度地供给作物的各种营养需要。

3.4. 用于生产建筑墙体保温材料及装饰材料

如采用粉煤灰加气混凝土制备新型、轻质保温节能的墙体材料；制作煤灰混凝土空心砌块，其中粉

煤灰既是掺合料又是细集料，掺量较高；制作水泥粉煤灰膨胀珍珠岩混凝土保温砌块及轻质隔墙板；制作粉煤灰陶粒及混凝土制品等[5]。

3.5. 生产水泥

水泥是一种水硬性胶凝材料，按成分可分为硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥等。水泥品质指标包括氧化镁(<5.0%)、三氧化硫(<3.5%)、烧失量(≤5.0%)、细度、凝结时间、安定性和强度等。

煤气化灰渣的主要化学成分是 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO 等，从化学组成看，它可以作为生产水泥熟料的原料，灰渣目前已广泛用于水泥生产[3]。

3.6. 生产多种形式砖

如以煤灰(灰渣)和粘土为主要原料，再掺加其他工业废渣，经配料、混合、成型、干燥及焙烧等工序而成的烧结煤灰砖，其作为一种新型材料，对灰渣含硫量没有要求；以 80%左右的煤灰为原料，加入 20%左右的石灰作胶结料，少量的石膏为外加剂，经过混合、搅拌、沉化、成型、晾干后再经化学浸液、加温浸渍而成的煤灰水浸砖；以水泥和粉煤灰为混合胶结料制备粉煤灰混凝土路面砖；以粉煤灰为主，以水泥、石灰等为胶结料制备粉煤灰砖等。

3.7. 用于掺烧

根据《用于水泥和混凝土中的粉煤灰(GB/T1596-2005)》国家标准[6]，可用于水泥和混凝土中的粉煤灰的烧失量不得高于 15%。而细渣由于含碳量较高，烧失量往往超过 20%，不能直接用于上述领域。流化床锅炉由于其独特的燃烧方式，可用于富碳煤灰的燃烧。可选择将细渣掺混到流化床锅炉中进行燃烧，这样既有利于减少细渣的烧失量，也有利于节约燃料煤。细渣燃烧后的低碳灰可以用于水泥、混凝土等建材、建工原料。

3.8. 分选利用

CFB 灰渣中常常含有多种重金属元素，其中还有大量氧化物和有用成分。在经过回收后，灰渣可以更好地用于其他方面[7]。

① 对灰渣中硅的有效利用：如用氢氧化钠溶液提取硅制备白炭黑或改性白炭黑，用于精细化工补强剂等高附加值产品。

② 对灰渣中铝的有效利用：如用盐酸-氢氧化钠法提取铝，制备氧化铝，或以粉煤灰为原料采用硫酸铵烧结/硫酸铝铵结晶法，制备纯度为 99.9%的氧化铝，解决我国铝土矿资源短缺的问题。目前内蒙古高铝粉煤灰提取氧化铝国家重点项目已进入工业化示范建设。

另外，还可以提取钒、碳粒、氧化铁等。

3.9. 用于化学工业

灰渣中的组分与常用的填料基本相同，只是在含量上有差别。例如灰渣中的 SiO_2 起到增强、补强作用，代替常用的粘土、白炭黑； Al_2O_3 起增量作用，可代替特种碳酸钙； CaO 可起增量补强作用，作用相当于轻质碳酸钙、重质碳酸钙、特种碳酸钙； SO_3 可代替通常加入的硫起硫化剂的作用；未燃尽的可燃物起到炭黑的作用。研究和应用发现，灰渣补强性能与半补强炭黑的性能相当，并具有永久变形小、相对密度小、弹性好的优点。并且混炼、压出工艺性能良好，同时它还具有煤制填料的性质。可做为高分子材料填充剂、作 PVC 的填充料、作橡胶填料。

3.10. 用于处理气化废水

某类气化灰渣,如固定床干排灰气化炉的炉渣,具有和活性炭相类似的性能,用于处理气化废水时,对煤气废水中的 COD 和酚有明显的去除效果,可以减轻废水生化处理的负担。吸附有机物后炉渣可作为流化床锅炉的原料,避免了二次污染问题。

随着循环经济、可持续发展、环境友好等理念成为社会发展的必然,灰渣高值化利用研究成为国内外的热点。

4. 煤气化灰渣利用途径分析及展望

1) 气化炉排出灰渣的显热利用

气化炉排出的高温灰渣可通过冷渣机或其他设备回收热量,联产蒸汽、加热水,实现热量的高效利用。

2) 中高价值化学品的分选利用

可考虑与排渣系统耦合起来,排渣的同时,提取、回收灰渣中高附加值产品[8]。煤在形成过程中有有机物吸附了一些稀有元素,如 Ga、Ge、U 等,虽然稀有元素的含量并不高,但在煤经燃烧使有机物消失后,稀有元素会在粉煤灰中得到富集,并且其含量可能达到综合利用水平,可将这些高附加值成分提取出来并加以有效利用,还可是具有良好经济效益的再生资源。

专利 CN 201410231357.0 [9]提出了一种将灰渣中的碱金属催化剂和稀有金属 Ga 同时回收的方法,可提高综合利用效率。具体包括对灰渣进行水洗、酸溶、络合沉淀以及 K、Ga 和 Al_2O_3 的进一步提取等步骤。

废灰渣中提取铝、硅、铁、钙:专利 CN 201310207509.9 [10]提出了一种活化煤气化灰渣实现铝铁钙分离的方法,包括如下步骤:第一步,将煤气化灰渣干燥;第二步,将干燥后的煤气化灰渣在 $700^{\circ}C$ 至 $1100^{\circ}C$ 下煅烧 15 至 75 分钟后急冷得到活化料,第三步:将所述活化料与盐酸溶液或硫酸溶液反应,反应温度为 $60^{\circ}C$ 至 $100^{\circ}C$,反应时间为 30~120 分钟。过程中不需添加任何助剂,在较低温度即可改变煤气化灰渣中的矿物组成,有效提高反应活性,缩短浸取反应时间,实现铝、铁、钙有效分离,而且可以利用煤气化灰渣中残炭的热值。

提取高纯度的白炭黑和氧化铝产品:专利 CN201010133559.3 [11]提出了一种用有机羧酸转化分离法高值化利用灰渣类物质的方法。即将灰渣类物质用羧酸化学转化法进行分离提纯,在低能耗、低污染下得到高纯度的氧化铝、白炭黑以及醋酸铁、醋酸钙等羧酸盐。该方法是一种低能耗、低污染下实现灰渣类物质高值化的新方法,有利于我国能源资源的有效洁净利用,可解决能源转化中的废渣污染问题。采用羧酸化学转化法对灰渣类物质进行分离,用羧酸代替无机强酸盐等,不仅污染性降低,而且选择性增强,羧酸可以与氧化铁、氧化钙、氧化镁、氧化钠、氧化钾反应,而不与氧化铝和二氧化硅反应,将羧酸溶液与灰渣在一定浓度、一定温度和一定 pH 条件下进行化学反应,可以使铁、钙、镁、钠、钾以羧酸盐的形式进入溶液中,从而实现与铝硅的分离,再用氢氧化钠溶液提取硅铝,通入 CO_2 控制 pH 值,实现铝硅的分离,分别得到高纯度的白炭黑和氧化铝产品。这样不仅可以解决氧化铝和二氧化硅的纯度问题,而且减少了酸污染,避免了重结晶等工艺繁杂和能耗高的问题。

另外,还可用于生产结晶氯化铝:含铝高的灰渣经过粉磨、酸浸、沉淀、浓缩和脱水等生产工艺可以提取结晶氯化铝。以结晶氯化铝为原料,可以生产固体聚合氯化铝。聚合氯化铝是一种新型高效无机高分子净化剂,其净水性能特别优越,将取代传统的铝盐净水剂。

3) 生产水泥、砖、建材、装饰材料及环境材料等

煤气化废灰渣,尤其是流化床气化灰渣中富含碳酸钙及钙的硅铝酸盐,可增大废灰渣的添加比例用

于制备水泥混凝土等建筑材料。

将煤气化废灰渣应用于发泡水泥中,即以一定的比例取代水泥制备发泡水泥,用于制备复合硅酸盐硬质保温隔热材料发泡水泥保温材料,一则节约水泥,再者还会达到更优越的性能。水泥-煤灰发泡保温材料具有质轻、保温、防火、抗冻性好等特点,可满足墙体保温材料的性能要求[12][13]。

另外,提铝后的废灰渣可用于制备硅钙板[14]或雪硅钙石污水处理材料,如专利 CN 201310344213.1 [15]提供了一种燃煤灰渣固体废弃物的综合利用方法,该方法能够综合利用燃煤灰渣制备具有较高附加值环境材料。通过将燃煤灰渣煅烧后研磨过筛,并用质量浓度为 20%~30%的盐酸酸浸,分别得到氯化铝铁清液以及固体残渣;向氯化铝铁清液中加入 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 调整盐基度至 45%~55%,并用盐酸控制 pH 值为 3.5~5.0,再在 105℃~110℃下水热聚合后,经浓缩干燥制得聚氯化铝铁净水剂。固体残渣经洗涤干燥后按照 $\text{Ca}/\text{Si} = 5/6$ 的摩尔比引入 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作钙源,并按 $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{NaOH} = 1:(0.5\sim 1.5)$ 的摩尔比加入 NaOH ,然后在 180℃~220℃下水热反应 16~22 h 制得雪硅钙石污水处理材料。

4) 用作硅肥

有效硅是指土壤中能直接被农作物吸收的硅,包括土壤中的单硅酸及各种易于转化为单硅酸的盐类,硅肥主要指标就是其中有效硅的含量,我国农业部颁布的硅肥标准[16]中有效硅 SiO_2 含量大于等于 20%。

李等[17]开展了含碱灰渣添加助剂煅烧脱碱制取硅肥以实现含碱灰渣煅烧无害化与资源化的研究。煅烧脱碱制取硅肥的过程实际上是灰渣中碱性物质 Na_2CO_3 或 Na_2O 与被活化的 SiO_2 及 Al_2O_3 等氧化物发生反应生成复合硅酸盐的熔制反应过程。这些复合硅酸盐难溶于水,不显碱性,达到了脱碱无害化的目的,但其能溶于植物根系分泌的有机酸,即生成可溶性的硅酸盐,因此可作为硅肥而施用于土壤中,又实现了硅肥资源化的目的。

5) 生产微晶玻璃

微晶玻璃是将特定组分的基础玻璃,在加热过程中通过控制晶化而得到一类含有大量微晶相及玻璃相的多晶固体材料,它兼具陶瓷和玻璃的双重特点,具有良好的耐腐蚀性和机械性能,在机械、化工和建筑装饰等领域具有广泛的应用[18]。流化床气化废灰渣主要成分为 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 ,同时可能含有少量的 MnO 、 TiO_2 ,是具有很高潜在活性的玻璃体结构材料。废灰渣中 CaO 含量较高, CaO 含量的增加有利于微晶玻璃的晶化,而 Al_2O_3 含量也较高, Al_2O_3 的引入能提高微晶玻璃的强度和化学稳定性,因此这两种固体废弃物化学成分上具有互补性,可用于制成性能良好 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ CAS 系统微晶玻璃,可用作新型建筑材料及红外加热或干燥材料。

6) 其他用途

流化床气化废灰渣可用作提高石油焦浆稳定性的原料,贾嘉等[19]采用添加 15% (wt) 的细渣制备水焦浆,最终可制备浓度为 71% (wt) 的水焦浆,而且具备良好的流动性、流变特性和长达超过 200 h 的稳定性,其研究发现细渣中的矿物质属于强亲水物质,能够降低石油焦表面的接触角,提高石油焦表面的亲水性,使得石油焦颗粒与水分离受到阻力,能够有效缓解固液分离;另外,石油焦由于孔隙结构不发达,石墨化严重,碱金属含量低,气化活性低,气化灰渣对石油焦气化起到催化作用。

另外,由于流化床气化废灰渣 80% 以上的颗粒在砂的细度范围,在我国很多地方的交通工程中缺少砂资源,因此可以利用该废灰渣代替天然砂。

基金项目

国家科技支撑计划(2009BAA25B00); 973 计划(2011CB201305); 国际科技合作专项(2011DFA60610)。

参考文献

- [1] 温彦锋, 蔡红, 边京红. 灰渣的化学性质及贮放对环境的影响[J]. 水利学报, 2004(4): 19-23.

- [2] 李英, 王三平. 燃煤灰渣建材利用产生的辐射影响评价[J]. 环境与可持续发展, 2012(5): 64-66.
- [3] 高廷源. 循环流化床锅炉脱硫灰渣特性及综合利用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川大学, 2004.
- [4] 岳焕玲, 原永涛, 朱洪峰. 循环流化床锅炉灰渣综合利用[J]. 锅炉技术, 2006(37): 36-44.
- [5] 胡胜利. 循环流化床锅炉的灰渣综合利用与分析[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2006, 11(1): 77-79.
- [6] GB/T 1596-2005. 用于水泥和混凝土中的粉煤灰[S].
- [7] 路春美. 循环流化床锅炉设备与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 第九章.
- [8] 陈兆辉, 毕继诚, 李克忠, 等. 一种从煤灰中提取和制备氧化铝的方法[P]. CN 201310273115.3, 2013-06-28.
- [9] 王会芳, 湛月平, 郑岩, 等. 一种煤催化气化灰渣的利用方法[P]. CN 201410231357.0, 2014-05-28.
- [10] 乔秀臣, 于建国, 王金磊. 活化煤气化灰渣实现铝铁钙分离的方法[P]. CN 201310207509.9, 2013-05-30.
- [11] 许英梅, 张秋民, 何德民, 等. 有机羧酸转化分离法高值化利用灰渣类物质的方法[P]. CN201010133559.3, 2010-03-22.
- [12] 连学超, 李秋义. 硫铝酸盐水泥-石油焦灰渣发泡保温材料的试验研究[J]. 混凝土技术, 2013(1): 45-48.
- [13] 王裕银, 满丽莹, 王忠平, 等. 水泥-粉煤灰发泡保温材料的制备与性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2013(11): 52-54.
- [14] 张金山, 叶俊沛, 孙俊民, 等. 利用硅钙渣、脱硫石膏、粉煤灰等固体废弃物生产硅酸钙板的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(1): 54-57.
- [15] 张超武, 缪金良, 徐彬, 等. 一种燃煤灰渣固体废弃物的综合利用方法[P]. CN 201310344213.1, 2013-08-08.
- [16] NY/T 797-2004. 硅肥[S].
- [17] 李宝霞, 张济宇. 无烟粉煤催化气化碱渣煅烧脱碱制取硅肥[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(11): 128-132.
- [18] Wang, S.M., Zhang, C.X. and Chen, J.D. (2014) Utilization of Coal Fly Ash for the Production of Glass-Ceramics with Unique Performances: A Brief Review. *Journal of Materials Science & Technology*, **30**, 1208-1212. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.10.005>
- [19] 贾嘉. 煤气化灰渣与黑水对石油焦成浆性及气化活性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2011.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0514, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: aepe@hanspub.org