

气化飞灰精准分离及资源化利用

赵旭¹, 张一昕², 苗泽凯¹, 郭振坤¹, 周璐¹, 刘坤基¹, 武建军¹

(1. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 国家煤加工与洁净化工程技术研究中心, 江苏 徐州 221116)

摘要:煤炭气化技术在中国经济发展中发挥着极其重要的作用,但气化过程中,部分未反应的炭及细渣会由合成气带出,产生大量的气化飞灰,引发固体废弃物的处理及资源化利用问题。由喷淋收集得到的飞灰,经初步絮凝脱水后,水分含量在55%~60%,其余为残炭和玻璃体的混合固体颗粒。为实现气化飞灰的资源化利用,必须对气化飞灰的结构特征、持水特性以及水与固体颗粒之间的相互作用进行深入研究,寻求气化飞灰科学高效的分离及资源化利用技术。笔者论述了气化飞灰脱水脱炭的意义,分析了飞灰持水特性及水分脱除技术,重点阐述了飞灰综合利用方案,并对气化飞灰精准分离及资源化利用方向进行展望。课题组前期试验表明,飞灰基沸石具有较高的表面积、独特的孔隙特征和优异的离子交换能力,可用于土壤、废水等中重金属的去除,以及作为吸附剂用于土壤中污染物的固定。飞灰的化学组成成分与黏土相似。传统陶瓷原料资源储量日益减少,国内外研究表明,飞灰制备陶瓷地砖可行。利用飞灰代替传统陶瓷中石英,在一定烧结温度下,通过抗折强度、吸水率、收缩率、失重率等变化研究对试样陶瓷性能的影响,说明添加飞灰的陶瓷性能优于传统陶瓷。通过泡沫浮选法分离气化飞灰固体颗粒,分别得到纯度较高的气化飞灰残炭和玻璃体,以分离后的残炭作为催化石墨化的碳源,在高温热处理过程中加入催化剂,对其进行催化石墨化处理,以探索气化飞灰制备石墨化材料的可行性,残余炭在较高温度和适量的催化剂条件下,得到了与商用石墨的性能相似的有序石墨化材料。气化飞灰和电厂粉煤灰都具有较高的硅铝含量,这使得气化飞灰成为沸石分子筛等多孔材料的潜在重要来源,而制备沸石也是飞灰回收利用中效益最高的途径,这项工艺不仅减轻了灰渣废料带来的环境负担,更应用于催化、分离、吸附等方面。未来应深入研究飞灰中水的赋存形态及其与飞灰颗粒的相互作用机制,同时构建灰-水作用界面模型,在此基础上寻求飞灰脱水新技术,进一步降低飞灰含水量。研究能耗低、效率高、污染少的残炭-玻璃体分选技术,降低分选产品的杂质含量。研究分选后残炭和玻璃体资源化利用新领域,最大限度发挥气化飞灰的价值。

关键词: 气化飞灰; 精准分离; 资源化利用

中图分类号: TQ54

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2019)01-0041-06

Precise separation and resource utilization of coal gasification fly ash

ZHAO Xu¹, ZHANG Yixin², MIAO Zekai¹, GUO Zhenkun¹, ZHOU Lu¹, LIU Kunji¹, WU Jianjun¹

(1. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Chinese

National Engineering Research Center of Coal Preparation and Purification, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Coal gasification technology plays an extremely important role in China's economic development. But it will generate a large amount of fly ash which is consisted of unreacted pulverized coal and slag brought by synthesis gas. After preliminary flocculation, the moisture content of fly ash collected by spraying is 55%~60%, and the rest of the ash is mixture of residual carbon and glass particles. It is necessary to have a better understanding of the structural characteristics, water holding properties and the interaction between water and solid particles of fly ash so that the ash can be fully utilized. In this paper, the significance of dehydration and decarburization, the characteristics of water holding capacity, the technology of water removal and the scheme of comprehensive utilization of fly ash were discussed in

收稿日期: 2018-12-31; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.18123101

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2012CB214902)

作者简介: 赵旭(1989—),男,山东菏泽人,博士研究生,从事气化飞灰分离技术研究工作。E-mail: zhaoxufir@126.com。

通讯作者: 武建军,教授,博士生导师。E-mail: jjuw@163.com

引用格式: 赵旭,张一昕,苗泽凯,等. 气化飞灰精准分离及资源化利用[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(1): 41-46.

ZHAO Xu, ZHANG Yixin, MIAO Zekai, et al. Precise separation and resource utilization of coal gasification fly ash[J].

Clean Coal Technology, 2019, 25(1): 41-46.



移动阅读

order to seek the scientific separation and resource utilization technology of fly ash. At last,prospects for precise separation and resource utilization of coal gasification fly ash was forecasted. Previous experiments show that fly ash-based zeolite has high surface area,unique pore characteristics and excellent ion exchange ability,which can be used to remove heavy metals in soil and wastewater,and as adsorbent to fix pollutants in soil. The chemical composition of fly ash is similar to clay. The reserves of traditional ceramic raw materials are decreasing day by day. Some studies at home and abroad have confirmed that it is feasible to prepare ceramic floor tiles with fly ash. Foreign scholars used fly ash to replace quartz in traditional ceramics. At a certain sintering temperature,the effects of fly ash on the properties of sample ceramics were studied through the changes of flexural strength,water absorption,shrinkage,weight loss rate and so on. It was concluded that the properties of ceramics with fly ash were better than those of traditional ceramics. The gasification fly ash particles were separated by foam flotation method,and the carbon and vitreous of gasification fly ash were obtained respectively. The separated carbon residue was used as the carbon source for catalytic graphitization. The catalyst was then treated by adding graphitization in the process of high temperature heat treatment,so as to explore the feasibility of preparing the graphitized material by gasification fly ash. Ordered graphitization materials with similar properties to commercial graphite were obtained under catalytic conditions. Gasification fly ash and power plant fly ash both have high content of silicon and aluminium,which makes gasified fly ash a potential important source of porous materials such as zeolite molecular sieves. The preparation of zeolite is also the most efficient way to recycle fly ash. This process not only reduces the environmental burden of ash waste,but also applies to catalysis,separation and adsorption. In the future,the occurrence of water in fly ash and its interaction mechanism with fly ash particles should be studied in depth. At the same time,the interface model of ash-water interaction should be constructed. On this basis,new technology of fly ash dewatering should be sought to further reduce the water content of fly ash. The carbon-vitreous separation technology with low energy consumption,high efficiency and less pollution should be studied to reduce the impurity content of the separation products,and new fields of resource utilization of sorted charcoal and vitreous body should be studied to maximize the value of gasified fly ash.

Key words: coal gasification fly ash; precise separation; resource utilization

0 引 言

煤炭在中国国民经济和社会发展中具有重要的战略地位,煤气化技术是煤炭清洁转化的核心技术之一,是发展煤基化学品、煤基液体燃料、IGCC 发电等过程工业的基础^[1]。目前大规模的气化多采用水煤浆和粉煤气化技术,在气化过程中部分未反应的炭及大约 60% 的灰渣由合成气带出,产生大量气化飞灰,引发固体废弃物处理及资源化利用问题。

为去除煤气中的粉尘多采用洗涤方式对煤气进行处理,经初步絮凝和真空过滤处理后,飞灰中仍含有 55% 左右的溶有大量重金属和有机污染物的水分,其余为残炭和玻璃体的混合固体颗粒。气化飞灰的高水分含量影响了其资源化利用和无害化处理,导致侵占土地、污染土壤和水体等一系列严重的环境问题^[2]。飞灰中含有部分未反应的残炭,若不加以回收利用,既会造成资源浪费,又会形成固体垃圾堆放,影响气化飞灰的资源化利用。

气化飞灰主要以玻璃体形式存在,因此飞灰的化学性质稳定,活性较低,为飞灰再利用带来困难。而飞灰改性可大大提高其活性,目前飞灰再利用均需对其进行改性。通常的改性方法有酸溶法、碱溶法和表面改性法。其中表面改性使粉煤灰充当高分子材料的填料成为可能。表面改性包括物理改性和化学改性。常用的表面处理剂有表面活性剂、偶联

剂、有机高分子和无机物。表面改性剂的改性增强了飞灰与高分子材料界面结合力,从而提高高分子材料的力学性能。为实现气化飞灰的资源化利用,必须对气化飞灰的结构特征、持水特性以及水与固体颗粒之间的相互作用进行深入研究,寻求气化飞灰科学高效的分离及资源化利用技术。因此,对气化飞灰进行精准分离具有重要意义。

1 气化飞灰脱水脱炭的意义

1.1 气化飞灰脱水的意义

气化飞灰的粒度比燃烧飞灰更小,多在 50 μm 以下,脱水难度大。采用真空抽滤脱水时,飞灰水分降至 50% ~ 60% 时滤饼即产生裂纹,无法通过真空抽滤进一步脱水,因此,研发能效比低,开发高效、低能耗的气化飞灰脱水技术具有重要意义。

1) 降低水耗

气化飞灰粒径很小,45 μm 以下颗粒占总颗粒的 99% 以上。颗粒粒径越小,比表面积越大,颗粒与水结合的接触面积越大,脱除水分所需活化能越大,即脱水越困难。飞灰粒径细小,灰-水接触界面有较高结合能,将水从颗粒表面分离所需能量较大,采用常规干燥脱水方法得到的飞灰持水量较高。由于缺乏对飞灰滤饼有效的脱水方法,经过絮凝和真空过滤处理后的滤饼中仍含有 55% 以上的水分,浪费了大量宝贵的水资源。

2)减轻运输压力

飞灰滤饼需运往厂区外固定填埋场填埋,滤饼中过高的水分含量必将增加不必要的运输成本,同时增加总体工作量,产生的滤饼不能及时运出,导致固体废弃物大面积长时间的露天堆放。降低滤饼含水量可在降低装卸总工作量、缩短装卸周期的同时,降低滤料运输成本。

3)降低环境污染

飞灰中含有多种微量有毒重金属元素(如铅、汞、砷、铬等)、部分易挥发的酚类以及少量氰化物。若不能及时进行脱水处理,水分蒸发会将部分易挥发性污染物质带入大气中,对大气质量和人体健康造成负面影响;大面积堆放的飞灰滤饼经过风化及大气降水的淋溶作用,部分有害元素会渗入地下,污染土壤、地表水体及浅层地下水,影响土壤环境和水环境,使原有水体丧失使用功能,极难治理、恢复。

飞灰中污染物进入水体,无论是直接饮用还是植物吸收间接进入人体,都会威胁人体健康。另外,取用污染的水体灌溉土壤,会使土壤的物理化学性质恶化,微生物活动受到影响,致使土壤出现板结、龟裂、盐碱化等现象。

1.2 气化飞灰脱炭的意义

1)拓宽飞灰利用领域

研究发现,影响飞灰使用价值的主要因素是飞灰的含炭量。炭粒内部多孔、结构疏松、易碾碎、孔隙吸水性高、高温烧结烧失量大,这些特点都会对飞灰的综合利用产生负面影响。将飞灰中残炭分离出来,并将脱炭后的飞灰按照粒度进行分级利用,不仅能有效减少由飞灰堆放所引起的空气扬尘污染、水污染及次生地质灾害;还能增加飞灰颗粒的强度,拓宽飞灰利用领域,提高飞灰自身的利用价值。

2)实现残炭的回收

飞灰滤饼中较多的残炭导致其烧失量在20%以上,其平均发热量为7.82 MJ/kg,而通过浮选法可从飞灰滤料中回收6%左右的精炭,发热量在20 MJ/kg左右,与锅炉燃料煤发热量相差不大,因此可将脱除的残炭回炉作为燃料使用。此外回收的炭粒具有内部多孔、结构疏松、表面润滑的结构特点,可作为炭黑、橡胶补强剂和制备活性炭的原料。

2 飞灰滤饼持水特性分析和水分脱除

2.1 飞灰持水特性分析

目前,对飞灰滤饼的脱水研究主要集中在脱水设备改进及数值模拟上,对飞灰滤饼持水特性认识不足。王宏伟^[3]采用高效浓缩机串联快速高效隔

膜压滤机的方法对气化飞灰进行脱水,但仅将气化飞灰的水分降至46%。穆浩^[4]对卧螺离心机在粉煤灰脱水分离中的性能进行数值模拟,但缺少试验数据作为对比。利用热能通过蒸发干燥的方式能降低飞灰中的水分^[5],但会消耗大量能量。气化飞灰富含空心微珠结构,颗粒微细,孔隙发达,比表面积大,且有较多O—Si键,与水作用后,颗粒表面出现大量羟基,具有显著的亲水性,易与水结合^[6]。但目前对于气化飞灰空间结构和界面性质的研究尚不深入,难以对气化飞灰干燥脱水研究形成有效的理论支撑。

为开发高效率、低能耗的气化飞灰滤饼脱水技术,必须对滤饼的持水特性进行深入研究,而持水特性又与滤饼结构特点紧密相关。本文从滤饼颗粒的粒径分布、孔隙特征、表面官能团、矿物质等活性位点的界面分布特性对滤饼持水特性进行分析。

飞灰滤饼颗粒粒径很小,45 μm以下颗粒占99%以上。颗粒粒径越小,比表面积越大,颗粒与水结合的接触面积越大,脱除水分所需活化能越大,脱水越困难。飞灰粒径细小,灰-水接触界面有较高结合能,将水从颗粒表面分离所需能量较大,采用常规干燥脱水方法得到的飞灰持水量较高。

颗粒表面主要的官能团为极性的羟基(—OH)和氨基(表现为—C—N键),这主要与沉降过程中添加的絮凝剂聚丙烯酰胺有关。根据相似相溶原理,2种极性基团与极性水分子有很强的结合力,这使得飞灰颗粒表面与水的结合能大大提高,影响了脱水效能。水洗可脱除飞灰表面几乎全部的絮凝剂,使得碳氮键含量显著降低,因此可考虑适度控制絮凝剂添加量,以提高脱水效率。

颗粒主要由表观不规则的残炭颗粒和球状的玻璃体组成。炭颗粒表面相对粗糙,含有大量孔隙,玻璃体表面较光滑,但内部中空,空间发达,形成包裹小粒径玻璃体的空间。颗粒表面积为105.18 m²/g,微孔总孔容为0.12 cm³/g,且颗粒中孔、大孔孔容较大。由于颗粒的中孔和大孔是水分的主要吸附场所,说明飞灰中各类孔隙和内部空间的存在,使得气化飞灰总孔容较大,水分吸附空间充足,飞灰持水性能增强。

飞灰滤饼颗粒所含元素主要为Si、Al、Ca、Fe等,对应于矿物组成则为亲水性矿物石英,石英的大量存在使得飞灰颗粒易于被水浸润,固-液相之间界面张力较小,黏着功较大,促进了水分在颗粒表面的吸附,增强了飞灰颗粒的持水性能。

多孔性材料颗粒中的水分赋存状态对干燥过程

所需的最低能量影响很大^[7],因此气化飞灰中水的类型及其与飞灰颗粒的相互作用形式,成为研究气化飞灰干燥脱水技术的关键。研究水分赋存状态的方法主要包括氢谱核磁共振法(¹H-NMR)、差示扫描量热法(DSC)、动态蒸汽吸附法(DVS)等。Li 等^[8]采用¹H-NMR 和 DSC 研究了胜利褐煤中水分赋存状态,认为褐煤中水分分为自由水、大孔径毛细管水和结合水 3 种状态,且脱除水分所需最小能量依次增大。Tahmasebi 等^[9]利用 DSC 分析神木褐煤,提出褐煤中水分可分为自由水、可冻结合水和不可冻水,且在低温下,可冻结合水会部分转化为不可冻水,使得脱水难度进一步增加。Wan 等^[10]利用 DVS 研究了胜利褐煤在不同相对湿度下的水分吸附情况,指出按照相对湿度的不同,褐煤的蒸汽吸附曲线可划分为 3 个区域($P/P_0 < 0.2$, $0.2 < P/P_0 < 0.7$, $P/P_0 > 0.7$),对应于煤中 3 种不同类型的水分,即单分子层水、多分子层水和毛细水,而干燥脱水所需最低能量依次降低。

2.2 飞灰水分脱除技术

目前尚缺少只针对气化飞灰的干燥脱水技术,可将针对其他物料的技术应用于气化飞灰的脱水干燥过程中。干燥脱水方法主要分为蒸发脱水和非蒸发脱水,蒸发脱水方法主要包括流化床脱水、热油脱水、微波脱水^[11-13]。司崇殿^[14]将微波场应用于流化床褐煤干燥技术,结合了流化床干燥和微波干燥的技术优势,强化了脱水干燥过程中热质传递。贺琼琼^[15]研究了褐煤干燥过程中煤-水分子的相互作用以及水分的迁移规律,并通过建立分子模型,分析了干燥过程动力学。这些研究为飞灰干燥脱水提供了技术和理论基础。由于气化飞灰所含水中有较多的酚类及氰化物,蒸发脱水会将这些有害物质带入大气中,因此,非蒸发脱水在飞灰脱水干燥过程中具有更重要的应用前景。非蒸发脱水方法主要包括溶剂萃取脱水、真空抽滤脱水、水热脱水、热压脱水、振动热压脱水^[16-19]。Favas 等^[20]研究了水热脱水工艺条件对干燥后产品特性的影响,结果表明,水热反应温度对干燥后样品的孔隙率影响最为明显,即温度对干燥效果影响最为显著。Zhang 等^[18]研究了增加振动场前后热压脱水工艺对褐煤颗粒结构的影响,结果表明,增加了振动场的热压脱水工艺,干燥后褐煤颗粒中大孔及颗粒间孔隙明显减少,有效降低了水分吸附的场所,提高了脱水性能。将非蒸发脱水技术应用于气化飞灰干燥过程,不仅可结合各种能量场的技术优势,强化脱水过程热质传递,而且有效控制水中有有害物质向大气扩散,减少二次污染。

3 飞灰滤饼残炭分离

飞灰中残炭含量较高,炭粒内部多孔、结构疏松、易碾碎、孔隙吸水性高、高温烧结烧失量大,这些特点都会对飞灰的综合利用产生负面影响。为实现残炭的回收,有效减少由飞灰堆放所引起的空气扬尘污染、水污染及次生地质灾害,同时增加飞灰颗粒的强度,拓宽飞灰利用领域,提高滤饼自身的利用价值,必须对滤饼中残炭进行分离处理。目前,浮选法是脱除电厂粉煤灰中所含残炭的较为有效的方法。张晓峰等^[21]对浮选柱和浮选机的粉煤灰脱炭效果进行了理论分析,认为浮选机的气泡颗粒太大不适合分选微小颗粒。而浮选柱的气泡为 20 ~ 100 μm,适合微细颗粒的浮选分离,尤其是旋流-微泡浮选柱,可产生更多的微泡,且颗粒与气泡的结合力更强,更适合用作气化粉煤灰中残炭微细颗粒的分离回收。徐明等^[22]对影响旋流-微泡浮选柱浮选效果的循环压力和泡沫层厚度进行研究,结果表明随着循环压力的增大,浮选柱的气含率增大,浮选效果变好。循环压力为 0.06 MPa 时,炭脱除率为 88.05%,尾矿烧失量为 2.12%,随着泡沫层厚度的降低,尾灰烧失量下降,炭脱除率上升,泡沫层厚度在 100 mm 时,炭脱除效果最好。

4 气化飞灰综合利用方案

4.1 残炭利用方案

由飞灰滤饼分离得到的残炭灰分在 35% 左右,再经化学方法脱灰可进一步降至 10% 以下,用做石墨化的碳源。制备石墨的方法很多,包括催化石墨化、高压石墨化和渗碳石墨化等,其中,又以催化石墨化最为常用^[23]。这是由于在催化石墨化过程中,只要催化剂合适,便可在较低温度下获得石墨化程度较高的石墨材料。因此提高催化石墨化程度的关键是寻求合适的催化剂。目前,催化石墨化常用的催化剂多为铁系催化剂,按照存在形态分为单质类、合金类和化合物类 3 种^[24-25]。铁系元素作为催化剂,主要是由于该类元素熔点较低,在较低温度下便能与碳源充分接触,与其中的无定形炭发生融合,成为类似络合物的混合体系,经过溶解析出过程得到石墨化炭材料。同时由于该类元素特定的电子层排布特征,使得催化剂原子在石墨化过程中不易发生能级的改变,石墨化过程前后,催化剂结构、性质均较稳定^[26]。

目前,对催化石墨化的机理有不同理解,较普遍的看法是碳的溶解再析出机理和碳化物转化分解机

理^[24,27]。这2种理论区别在于,石墨化过程中有无碳-催化剂中间体化合物的生成。溶解再析出机理认为,发生碳-碳键断裂的碳原子只是“物理性”地溶解在熔融的催化剂中,与催化剂分子无新化学键产生,当溶解达到饱和时,降低温度,部分溶解的碳趋向于低能级的石墨形态,从而析出石墨化炭。而碳化物的形成与分解机理则认为,发生碳-碳键断裂的碳原子与催化剂分子产生了新化学键,生成络合化的碳化物中间体,中间体再经过进一步催化分解,得到石墨化炭材料。

4.2 玻璃体资源化利用方案

飞灰经过浮选分离成为炭粒和玻璃体。炭粒内部多孔,结构疏松,且炭粒粒径小;玻璃体表面光滑,结构较致密,高温下不易烧结,强度明显增强,具有广阔的应用前景。借鉴电厂粉煤灰应用技术,结合气化飞灰自身特性,拟从以下方面探究浮选后飞灰资源化利用技术方案。

4.2.1 玻璃体在混凝土中的应用

将适量玻璃体加入混凝土中用作掺料,能有效改善混凝土和易性、抗硫酸盐侵蚀性能,减少早期和后期干燥收缩率。这主要与飞灰玻璃体以下3方面的作用效应有关^[28]。

1) 玻璃体的“形态效应”

玻璃体形状规则,结构光滑致密,表面无裂纹。将玻璃体应用于混凝土时,固体颗粒之间以球形切面相互接触,可有效减小颗粒之间相对运动的阻力,降低混凝土黏性,起到减水和解絮凝作用,同时改善混凝土流变性能,便于长途运输和管路泵送过程。

2) 玻璃体的“活性效应”

玻璃体以活性硅、铝等酸性氧化物为主,在潮湿的环境中能与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等碱性物质发生化学反应,生成溶胶类硅铝酸盐化合物,溶胶物质的存在将混合体系各类物质颗粒黏连为一个整体,不仅提高混凝土强度,还能填充大颗粒间的缝隙,提高混凝土的抗腐蚀能力。

3) 玻璃体的“微集料”效应

玻璃体属于亚微米颗粒,填充于混凝土大颗粒之间,使混凝土密度增加,能增强混凝土及制品的结构强度,提高匀质性和致密性。

4.2.2 改性土壤

玻璃体中硅酸盐矿物比表面积大、透气性好等特点是土壤本身的硅酸盐类矿物所不具备的。将玻璃体施入土壤,可明显改善土壤结构,增加空气和溶液在土壤内的扩散,调节土壤的温度和湿度,从而显著改善黏质土壤的物理性质,促进土壤中微生物活

性,有利于养分转化和保湿保墒,使水、肥、气、热趋向协调。

4.2.3 精细化深加工

1) 烟气脱硫剂

玻璃体中含有较多的 CaO 、 Na_2O 、 MgO 等碱性氧化物,可作为吸收填料用于烟气脱硫。若进一步将飞灰玻璃体加入 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浆液中,其中的 SiO_2 会与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成具有较大的比表面积和含水率的水合硅酸钙,脱硫活性比纯 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 增加5倍,提高了脱硫效率。

2) 制备沸石分子筛

利用玻璃体制备沸石分子筛,主要是利用了玻璃体中含有的硅铝酸盐。目前对于电厂粉煤灰制备沸石的研究较多,而气化飞灰合成沸石分子筛的工艺及利用研究较少。飞灰玻璃体制备的沸石用途广泛,较多应用于重金属离子的去除,不仅解决了飞灰的污染问题,还能去除工业中常见的废水污染物,达到了以废治废的效果。

3) 充当高分子聚合物填料

对飞灰玻璃体进行一定细化加工可对高分子聚合物进行改性,得到性能更加优良的高分子聚合物。如填充聚氯乙烯塑料制品可提高塑料弯曲挠度和耐热变温度,且玻璃体粒度越小,塑料制品的强度和耐磨度越大;填充橡胶制品可起到增强和补强、硫化和替代炭黑的作用。

5 展望

目前,环保部门对气化飞灰的处理问题日益重视,固废问题亟待解决,但针对气化飞灰的精准分离技术及资源化利用方案尚处于实验室研发阶段,缺少切实有效的规模化处理技术。结合以上对气化飞灰基本性质的分析,认为应加强以下研究:

1) 深入研究飞灰中水的赋存形态及其与飞灰颗粒的相互作用机制,同时构建灰-水作用界面模型,在此基础上寻求飞灰脱水新技术,进一步降低飞灰含水量。

2) 探索能耗低、效率高、污染少的残炭-玻璃体分选技术,降低分选产品的杂质含量,为进一步利用飞灰中残炭及玻璃体提供技术支持。

3) 探索分选后残炭和玻璃体资源化利用新领域,最大限度发挥气化飞灰的价值。随着新技术的不断推广,最终实现气化飞灰精准分离及资源化利用的规模化应用。

参考文献(References):

[1] KRONBAUER M A, IZQUIERDO M, DAI S, et al. Geochemistry of

- ultra-fine and nano-compounds in coal gasification ashes: A synoptic view[J]. Science of The Total Environment, 2013, 456/457: 95-103.
- [2] 姚志通. 固体废弃物粉煤灰的资源化利用[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [3] 王宏伟. 高效浓缩机在恩德炉粉煤灰脱水工艺中的应用[J]. 氮肥技术, 2010, 31(2): 52-54.
- WANG Hongwei. Application of high efficiency concentrator in fly ash dehydration process of Ende furnace[J]. Nitrogenous Fertilizer Technology, 2010, 31(2): 52-54.
- [4] 穆浩. 卧螺离心机在粉煤灰脱水分离中的性能研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
- [5] 王雷, 章明川, 吕太, 等. 粉煤灰干燥特性的试验研究[J]. 化学工程, 2005, 33(4): 8-11.
- WANG Lei, ZHANG Mingchuan, LYU Tai, et al. Experimental study on drying characteristics of wet ash[J]. Chemical Engineering, 2005, 33(4): 8-11.
- [6] 王武名, 韩丽. 粉煤灰矿物学资源属性和环境属性[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(4): 382-388.
- WANG Wuming, HAN Li. Mineralogical resource attribute and environmental attribute of fly ash[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, 26(4): 382-388.
- [7] ZHANG Y, WU J, WANG Y, et al. Energy consumption during dewatering process affected by carboxyl on coal surface[J]. Drying Technology, 2015, 34(6): 645-650.
- [8] FENG L, YUAN C Z, MAO L Z, et al. Water occurrence in lignite and its interaction with coal structure[J]. Fuel, 2018, 219: 288-295.
- [9] TAHMASEBI A, YU J, SU H, et al. A differential scanning calorimetric (DSC) study on the characteristics and behavior of water in low-rank coals[J]. Fuel, 2014, 135(11): 243-52.
- [10] WAN K, HE Q, MIAO Z, et al. Water desorption isotherms and net isosteric heat of desorption on lignite[J]. Fuel, 2016, 171: 101-107.
- [11] RAO Z, ZHAO Y, HUANG C, et al. Recent developments in drying and dewatering for low rank coals[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2015, 46: 1-11.
- [12] SI C, WU J, WANG Y, et al. Effect of acoustic field on minimum fluidization velocity and drying characteristics of lignite in a fluidized bed[J]. Fuel Processing Technology, 2015, 135: 112-118.
- [13] SI C, WU J, WANG Y, et al. Drying of low-rank coals: A review of fluidized bed technologies[J]. Drying Technology, 2015, 33(3): 277-287.
- [14] 司崇殿. 流化床褐煤干燥的微波强化传热传质机制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [15] 贺琼琼. 褐煤干燥的孔隙水运移及其机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [16] FUJITSUKA H, ASHIDA R, MIURA K. Upgrading and dewatering of low rank coals through solvent treatment at around 350°C and low temperature oxygen reactivity of the treated coals[J]. Fuel, 2013, 114: 16-20.
- [17] VOGT C, WILD T, BERGINS C, et al. Mechanical/thermal dewatering of lignite. Part 4: Physico-chemical properties and pore structure during an acid treatment within the MTE process[J]. Fuel, 2012, 93(1): 433-442.
- [18] ZHANG Y, WU J, MA J, et al. Study on lignite dewatering by vibration mechanical thermal expression process[J]. Fuel Processing Technology, 2015, 130: 101-106.
- [19] ZHANG Y, WU J, WANG Y, et al. Effect of hydrothermal dewatering on the physico-chemical structure and surface properties of Shengli lignite[J]. Fuel, 2016, 164: 128-133.
- [20] FAVAS G, JACKSON W R, et al. Hydrothermal dewatering of lower rank coals. I: Effects of process conditions on the properties of dried product[J]. Fuel, 2003, 82(1): 53-57.
- [21] 张晓峰, 王玉飞, 范晓勇, 等. 煤气化细渣浮选脱碳分析[J]. 能源化工, 2016, 37(5): 54-57.
- ZHANG Xiaofeng, WANG Yufei, FAN Xiaoyong, et al. Analysis of decarbonization from coal gasification fine slag by flotation[J]. Energy Chemical Industry, 2016, 37(5): 54-57.
- [22] 徐明, 刘长青, 冉进财. 粉煤灰中未燃炭浮选脱除及其影响因素[J]. 煤炭技术, 2016, 35(4): 283-285.
- XU Ming, LIU Changqing, RAN Jincai. Removal of unburned carbon from fly ash through flotation and influencing factors on flotation[J]. Coal Technology, 2016, 35(4): 283-285.
- [23] LANTICSE-DIAZ L J, TANABE Y, ENAMI T, et al. The effect of nanotube alignment on stress graphitization of carbon/carbon nanotube composites[J]. Carbon, 2009, 47(4): 974-980.
- [24] BARANIECKI C, PINCHBECK P H, PICKERING F B. Some aspects of graphitization induced by iron and ferro-silicon additions[J]. Carbon, 1969, 7(2): 213-224.
- [25] ŌYA A, ŌTANI S. Influences of particle size of metal on catalytic graphitization of non-graphitizing carbons[J]. Carbon, 1981, 19(5): 391-400.
- [26] 曾福龙. 石墨化炭材料的制备及其电化学储能性能的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2013.
- [27] ŌYA A, ŌTANI S. Catalytic graphitization of carbons by various metals[J]. Carbon, 1979, 17(2): 131-137.
- [28] 孙伟, 杨溢. 粉煤灰三大效应在岩体注浆加固中的应用分析[J]. 云南冶金, 2008, 37(3): 3-6.
- SUN Wei, YANG Yi. Analysis on application of three effects for podery coal ash in rock body grouting reinforcement[J]. Yunnan Metallurgy, 2008, 37(3): 3-6.