

粉煤灰综合利用与提质技术研究进展*

黄根^{1,2}, 王宾¹, 徐宏祥^{1,2}, 邓久帅^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)矿山与城市固废资源化工程技术研究中心,北京 100083)

摘要:粉煤灰是我国堆存量最大的固体废弃物之一,粉煤灰的堆积和外排不仅占用了大量土地资源,而且容易造成环境污染。粉煤灰中含有一定量的残碳、磁珠和微珠等有用组分和有价元素,根据粉煤灰的特性对其进行提质或综合利用对减少环境污染、提高粉煤灰经济效益具有重要意义。论文阐述了粉煤灰在建材制备、陶瓷生产、土壤改良和多孔材料制造等领域的综合利用现状及研究进展,介绍了分选脱碳、有价元素提取、有用组分分离等粉煤灰提质方法的研究现状,探讨了粉煤灰综合利用与提质方法存在的问题及发展趋势。建议根据不同粉煤灰的特性,进一步开展粉煤灰材料制备的研究,同时强化对粉煤灰中微量元素、稀有元素和其它高附加值组分的回收。

关键词:粉煤灰;固体废弃物;提质;综合利用

中图分类号:X752 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2019)04-0032-06

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.04.006

Research Progress on Comprehensive Utilization and Upgrading Technologies of Fly Ash

HUANG Gen^{1,2}, WANG Bin¹, XU Hongxiang^{1,2}, DENG Jiushuai^{1,2}

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Engineering Research Center for Mine and Municipal Solid Waste Recycling, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: As one of the largest solid waste in China, the stockpiling and discharge of fly ash occupied a large amount of land sources and caused environmental problems. There are a certain amount of valuable components such as residual carbon, magnetic beads, microbeads and valuable elements. It is of great significance to improve the economic benefits by comprehensive utilization according to the characteristics of fly ash after upgrading. The comprehensive utilization and research progress in building materials, ceramic products, soil improvement and porous materials was stated. And the research progress of fly ash upgrading methods such as decarbonization by separation, valuable elements extraction and valuable components separation were also introduced; and the problems and development trends of fly ash comprehensive utilization and upgrading were discussed. Further research on materials and valuable element and components extraction should conducted based on the characteristics of the fly ash.

Key words: fly ash; solid waste; upgrading; comprehensive utilization

* 收稿日期:2019-05-08

基金项目:国家自然科学基金(51504262)

作者简介:黄根(1986-),男,湖南湘潭人,博士,副教授,主要从事矿物加工理论和工艺研究,E-mail:huanggencumb@163.com。

引言

粉煤灰是从电厂燃煤烟气中收捕的细灰,又称飞灰,主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 和残碳,具多孔结构和火山灰活性。目前,燃煤发电仍然是我国最主要的发电方式,因此我国粉煤灰排放量较大,年均在 4 亿 t 以上。根据中国生态环境部 2018 年 12 月发布的《2018 年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报》,2017 年我国粉煤灰年产量约为 4.9 亿 t。虽然我国粉煤灰的综合利用率达到了 80% 左右,但常年累月的积累使得粉煤灰存量较高,目前总堆积量已有 20 亿 t 以上^[1]。根据推测,到 2020 年,我国粉煤灰总堆积量将达到 30 亿 t 左右^[2]。粉煤灰的堆积会污染周围环境,占用大量土地资源,若其提质和综合利用,可以将粉煤灰固体废物作为一种二次资源,提高其经济价值,减少环境污染,促进其可持续发展,具有重要的现实意义。

1 粉煤灰综合利用

粉煤灰常被用于建材原料和土壤改良等,但是近年来,随着建材市场逐渐饱和,农用土壤标准的提高^[3],粉煤灰在建材、土壤等行业的利用受到了一定程度的影响。为了提高粉煤灰综合利用附加值,以粉煤灰作为原料开发新型材料受到越来越多的关注。

1.1 建筑材料

20 世纪 30 年代,美国学者 R. E. Payis 等以粉煤灰作为水泥掺合料来改善水泥性能,节约水泥用量,在实际工程应用中取得了预期的效果^[4],此后,国外将粉煤灰水泥广泛应用于建筑、大坝和公路等工程中。目前,国外粉煤灰有 20% 以上被用于建材生产^[5],在国内这个比例超过 60%^[6]。根据粉煤灰中游离氧化钙含量的高低可将其分类,高于 10% 为 C 类粉煤灰,低于 10% 为 F 类粉煤灰。C 类粉煤灰兼具水硬性火山灰性能,可以作为水泥等胶凝材料的混合材料;而 F 类粉煤灰仅具火山灰性能,通常用于混凝土掺料,可替代部分水泥。近年来,很多研究者着眼于用粉煤灰制备粉煤灰基地聚物——一种可以取代普通混凝土的高强建材,为粉煤灰在建材行业的利用拓展了新的方向。

研究表明,在混凝土中掺加粉煤灰对其多方面性能有所改进,如降低水化热,提高混凝土长期稳定

性,减少泛浆和早期开裂等现象^[3]。一般来说,普通类别的混凝土,粉煤灰的掺量在 15% ~ 35% 之间,在强度要求较低的工程中,如铺设人行道,粉煤灰掺加量甚至可以达到 70%^[7]。除此之外,在一些具有特殊性质的混凝土中,粉煤灰掺量也有所不同。李阳^[8]等人研究发现,在 5.0% 硫酸钠溶液侵蚀下,掺加 25% 粉煤灰的混凝土具有最优抗硫酸盐侵蚀性能;张鹤年等人^[9]研究发现,在粉煤灰 30% 掺量时,氧化镁碳化混凝土具有最佳抗弯强度和延展性。但也有研究表明,当粉煤灰掺量较高时,对混凝土性能会产生一定负作用。A. M. Rashad^[10]的研究表明,粉煤灰掺量超过 45% 会导致混凝土凝结时间延长,早期强度和耐磨性变低,干燥收缩率和 pH 值下降。混凝土中残碳含量随着粉煤灰掺量增加而增加,而残碳对引气剂有吸附作用,会导致混凝土的抗冻性降低^[11]。因此,在粉煤灰利用过程中,需根据不同的产品需求,合理调控粉煤灰的掺量。

地聚物是一种碱激发胶凝材料,主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ,与水泥相似,但强度远超普通水泥,还有耐高温和高耐久等优点。近年来,有许多研究者尝试制备粉煤灰基地聚物。G. Habert 等人^[12]将粉煤灰基地聚物与标准地聚物进行对比,认为粉煤灰基地聚物是很好的粘结剂,可以制备出具有优良特性的地聚物混凝土;F. J. R. Martinez^[13]完全使用粉煤灰替代水泥,制备出粉煤灰基地聚物混凝土,并模拟海洋环境测试其强度和耐久性,认为粉煤灰基地聚物混凝土在海水环境下具有优异的强度及抗腐蚀性。目前为止,粉煤灰基地聚物在我国尚未大规模商业化利用,主要存在以下问题:(1)对其动力学、热力学等反应机理、鉴别中间体以及 Si-O-Al 结构的聚合等认识不足^[14];(2)来自不同燃煤电厂的粉煤灰粒度和化学成分波动较大,在地聚物反应机理尚未明确的情况下,粉煤灰多变的性质对反应过程的影响十分复杂^[15, 16]。

目前,各类尾矿、粉煤灰和煤矸石等大宗固体废物被用于制备建材已经较为常见,这使得普通建材市场逐渐饱和。未来粉煤灰的利用必然会由普通水泥混凝土向地聚物等高强建材转化,在保证粉煤灰的高消纳量的同时,进一步提高粉煤灰建材性能。

1.2 土壤改良

粉煤灰密度约为 2.12 g/cm^3 ,低于一般土壤密

度,平均粒径小于 $10\ \mu\text{m}$,容重低,比表面积大,因此粉煤灰有较好的透气性和吸附活性^[17, 18]。粉煤灰中的营养元素如 Mg、K 和 B,可以为植物生长提供养分,提高农作物产量。许多研究者使用粉煤灰来改良土壤,取得了一定成果。对于黏土性土壤,粉煤灰可以提高土壤透气性,降低容重^[19];对于砂土性土壤,粒径小的粉煤灰可以填充到沙土的孔隙中,增强其保水性,提高抗旱能力^[20]。

李九玉等人^[21]的研究表明,碱性粉煤灰能增加酸性红土壤 pH 值;杨海儒等人^[22]的研究表明,酸性粉煤灰可以降低盐碱地 pH 值,降低容重,提高 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 等离子含量,起到改善土壤环境的作用。王娟等人^[23]研究表明,适当的粉煤灰用量,可以提高土壤中微生物的活性,进而促进有机成分的腐殖化作用,但粉煤灰用量过高时,会减少土壤中微生物与酶的活性,从而起到一定的负面作用。目前粉煤灰大规模用于改善土壤较为少见,主要是因为粉煤灰中 Ba 和 Pb 等重金属元素在地下水和农作物中的富集效应难以去除^[24]。

以上相关研究表明,粉煤灰在改良土壤时,要根据土壤 pH 值控制其使用量,若是大规模用于土壤改良,则要考虑重金属等有毒物质的富集效应。

1.3 陶瓷材料

粉煤灰中富含 Si、Al、Fe 和 Ca 等元素,与黏土和长石等陶瓷原料的化学组成相似,且粉煤灰的粒径更细,可省去破碎和研磨等工序,是优良的陶瓷原料。大量相关研究均表明,粉煤灰可以改善陶瓷的性能,加之粉煤灰本身成本较低,使得粉煤灰陶瓷具有可观的环保和经济效益。宗燕兵等人^[25]直接将粉煤灰与黏土、长石混合后制备陶瓷,发现在粉煤灰掺量为 40% 时,烧结后所得陶瓷性能较好,抗折强度达到 52.97 MPa,吸水率为 0.18%,完全符合国标要求。C. T. Kniess 等人^[26]将粉煤灰与合成的锂氧化物直接反应,得到了昂贵的 $\text{Li}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}$ 陶瓷玻璃,这种陶瓷以极低的热膨胀系数而闻名,经测定,这种粉煤灰陶瓷玻璃的热膨胀系数甚至比原产品还低 18%。杨罗等人^[27]利用碱活化的粉煤灰与长石等传统材料制备陶瓷,其烧结温度较传统陶瓷低,烧结温度范围更宽,且抗折强度和吸水率等性能更优异。

1.4 多孔材料

多孔材料内部具有大量孔结构,不同的孔径具

有不同的性质,多用于选择性吸附、过滤或者催化。粉煤灰本身具有多孔结构,但孔容较小,多孔特性并不明显,故国内外直接利用粉煤灰作载体或吸附剂的研究较少,多是利用粉煤灰富含硅铝元素的特点,以粉煤灰为原料,合成硅铝酸盐多孔材料^[28],如微孔沸石、MCM-41 和 SBA-16 等硅铝酸盐分子筛,均具有较好的离子交换性、催化性和吸附性等。这类材料一般采用水热法制备,即将粉煤灰作为替代硅源,在碱性环境下高温加热后得到^[29]。但是水热法条件苛刻,对于设备要求较高,大规模工业化十分困难。近年来有研究者尝试新的工艺方法,如微波法制备沸石^[30]、酸蚀法制备 MS-C 分子筛^[3]等。微波法产物的比表面积比一般水热法产品要高,而酸蚀法产物则热稳定性较优秀,且方法简单,易于控制。这些新方法在保证产物基本性能的同时,在某些属性上具有一定优势,工艺又相对水热法简单,对于多孔材料的规模化生产有一定指导意义。

多孔材料的应用范围广泛,以粉煤灰作为原料生产多孔材料,具备良好的应用前景,但仍需进一步探究,优化生产工艺,以促进其工业化生产和应用。

2 粉煤灰的提质

粉煤灰中含有一定比例的微珠、磁珠以及部分未燃尽的碳,这些组分对粉煤灰在建材和陶瓷等行业的应用时会产生一定的影响,采用合适的方法将这些组分从粉煤灰中分离出来,可作为原材料加以利用,同时提高粉煤灰的品质。

2.1 粉煤灰脱碳

粉煤灰中残碳的含量高低会严重影响粉煤灰产品的性能。在混凝土中,高残碳量会增加用水量和吸附引气剂^[11];在陶瓷中,烧结时残碳若是未能完全燃烧,则会导致胚体质量下降,同时引入杂色。残碳量的高低与燃煤电厂的工艺有关,改进电厂燃煤方式和工艺,降低烧失量可以在一定程度上解决这个问题,但对于堆存的旧粉煤灰,宜利用除碳工艺分选出残碳,提高粉煤灰质量后再进行综合利用。

常用的残碳分选方法分为两类:干法和湿法分选。其中干法分选包括电选、流态化分选和燃烧法等^[31]:(1)流态化分选法利用气流,通过残碳和粉煤灰的密度差异进行分选,工艺简单,但是细颗粒的粉煤灰易进入残碳,影响产品碳的纯度;(2)燃烧法即

将粉煤灰掺入煤中,进入锅炉再次燃烧,一般在流化床锅炉中应用;(3)电选法将粉煤灰经摩擦带电处理,使粉煤灰与残碳带有异种电荷,在电场中受不同电场力作用而分离^[31, 32]。湿法主要是浮选法,碳颗粒具有一定的疏水性,浮选过程中通过加入一定量的浮选药剂增强颗粒表面疏水性,达到与粉煤灰分离的目的。任琳珠等人^[33]对某高碳粉煤灰进行浮选脱碳实验,研究表明,浮选后粉煤灰含碳量降至2.41%,同时得到热值为27 300 kJ/kg的优质精碳,有效地提高了粉煤灰品质。范桂侠等人^[34]研究发现,在合适的矿浆和药剂浓度下,采用分段加药方式可以提高粉煤灰浮选精碳回收率。翟雪等人^[35]研究表明,采用旋流-静态微泡浮选柱工艺比普通浮选槽回收效果更好。目前浮选法脱碳率约在70%~80%^[32-36]。残碳与煤炭的性质并不完全相同,用于煤炭浮选的药剂和工艺虽然可以借鉴,但还应根据粉煤灰的理化性质,优化或开发合适的药剂和工艺,以提高分选效率。

经过分离后,以低碳粉煤灰作为原料,可以制备性能更加优异的建材和陶瓷等。分离的碳可以利用其热值用作燃料,或者制备炭黑和活性炭等材料。因此,粉煤灰脱碳有利于提高粉煤灰的产品性能和经济价值。

2.2 粉煤灰中有价元素提取

在建材和陶瓷行业,多是将粉煤灰整体掺加到建材原料里面,忽视了诸多有价元素的提取利用,如常量元素铝、微量元素镓、锗、锂、钒、镍以及稀土元素。这些元素广泛应用在能源、电子通讯、军工和航空等行业^[37]。随着对有价元素的需求越来越大,而矿产资源有限,因此越来越多的研究者考虑从粉煤灰中提取各种元素并加以利用,这使得粉煤灰的精细化利用逐渐成为研究热点。虽然稀土元素、镓、锗、锂和钒等元素在粉煤灰中含量较低,但由于粉煤灰储量基数较大,总量可观,是不可忽视的矿产资源。

随着各行业对氧化铝的需求逐渐增加,高品位铝土矿资源逐渐减少,从粉煤灰中回收氧化铝越来越受到人们重视。我国粉煤灰中Al元素常分布在硅铝酸盐玻璃体与莫来石中^[38, 39],总含量普遍在20%以上(以 Al_2O_3 计),近几年在西北地区发现了一种高铝粉煤灰,年产量约5 000万t,其中 Al_2O_3 含量可达到40%~50%,接近中等品位的铝土矿,是极具潜在的铝土矿替代资源^[40]。从粉煤灰中提铝

常用的方法有烧结法、水化学法和酸浸取法。烧结法将粉煤灰与烧结助剂混合后进行高温处理,再使用碳酸钠溶液浸取得到含铝液相。其缺点是工艺复杂,还需要增加除硅工艺。水化学法一般被应用于低品位铝土矿提取铝资源,提取率较高,缺点是需要高浓度碱液,且浸取效率并不高, $NaAlO_2$ 母液回收氧化铝的能力大约为 30 kg/m^3 ^[3],酸浸取法在高温或高压条件下利用酸与铝反应浸出铝元素,在合适条件下浸取率高且工艺较为简单。D. Valeev等人^[41]以褐煤燃烧得到的粉煤灰为原料,在高压釜中控制温度 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 、盐酸浓度 345 g/L 、固液比 $1:5$ 的条件下,铝元素浸出率可达90%~95%。S. Sangita^[42]则选择使用工业级硫酸浸取,最终得到99%浸出率的硫酸铝。

粉煤灰中微量元素与稀土元素含量较低,且散布于晶相和非晶相中,没有明显的富集现象^[43, 44],目前常用提取工艺有溶剂萃取法、离子交换法和酸浸取法等。H. H. Kamran等人^[45]使用多种萃取剂从粉煤灰浸出液中萃取Ge,结果表明甲基三辛基氯化铵的萃取效果最优。F. K. Jack等人^[46]分别使用酸浸和碱浸提取粉煤灰中的稀土元素,均有一定效果,但技术难度较大,成本较高。S. Das等人^[47]用建立模型的方法,对粉煤灰中超临界萃取稀土元素进行了技术经济分析,认为当粉煤灰中钨元素含量足够高时,从粉煤灰中提取稀土元素具有一定经济效益,是可行的。从目前国内外相关文献分析,从粉煤灰中提取Ge、Ni和稀土元素等有价元素的技术还难以大规模地应用到工业中,主要有以下几个问题:(1)有价元素含量过低,富集程度不够;(2)相关技术不够成熟;(3)现有技术成本过高,经济效益偏低。

目前从粉煤灰中提取微量元素和稀土元素的相关技术不够成熟,成本较高,但常量元素铝的提取技术则相对成熟不少,已经有一些工程化项目实例。因此,从粉煤灰中提取有价元素仍然具有较好的研究和应用前景。

2.3 其它高附加值组分分离

煤碳燃烧时,其中硅铝组分在高温下形成玻璃相,熔融状态的颗粒在表面张力作用下,自然形成球状,冷却时便形成了微珠。而煤炭中含有的如黄铁矿和白铁矿等含铁伴生矿物,在燃烧时,会与玻璃体结合,形成含铁的磁珠。

磁珠有良好的磁性和多孔结构,在粉煤灰中含

量约为4%~18%^[48],通常采用成本低廉的磁选进行分离,分选效果良好。李辉等人^[49]经能谱分析发现,磁珠中铁含量在15%~50%范围内波动,且实心磁珠的含铁量高于空心磁珠。王龙贵^[50]利用磁珠的磁性和吸附性能,以磁珠为磁种材料,使用磁种分选法处理废水,效果优于传统药剂沉淀法。磁珠分选法处理废水是典型的以废治废,环境效益明显。

微珠密度通常在400~800 kg/m³,壁厚一般小于直径的10%。微珠密度小,因此常用于制备轻质复合材料。H. Asad^[51]将粉煤灰微珠作为轻质填料加入混凝土中,得到了轻质高强混凝土,28 d硬化密度在760~1 510 kg/m³范围内,抗压强度最高可达69.4 MPa。粉煤灰微珠混凝土还可以和纳米SiO₂共同作用,加快水化速度,增强早期强度^[52],比一般粉煤灰建材的成本、性能和水化时间方面有极大优势。

磁珠和微珠是粉煤灰中含量较高的高附加值组分,通过提质利用,它们产生的经济价值超越其分选成本。因此,应加强对高附加值组分的分离及利用,提高粉煤灰综合利用经济效益。

3 结论与展望

(1)不同的粉煤灰由于其性质不同,应根据其物理化学性质差异,对其分类和综合利用。

(2)目前,我国粉煤灰在建材、陶瓷和农业等行业已有广泛应用,但以低附加值应用为主,在制备地聚物和多孔材料等高附加值领域的应用仍存在不同程度的问题,亟需进一步研究。

(3)对粉煤灰中的残碳进行分离可以提高粉煤灰的品质,提质后的粉煤灰综合利用性能可得到进一步提高,经济效益显著,但粉煤灰脱碳工艺和浮选药剂有待进一步优化。

(4)粉煤灰中微量元素和稀有元素是不可忽视的二次资源,对其进行分离和提取具有重要的意义,但相关技术目前还不够成熟,成本较高。

(5)应对粉煤灰中含量较高的磁珠和微珠等高附加值组分进行分离,根据其特性制备磁种材料或吸附材料,在环境保护和治理等领域具有一定的应用前景。

参考文献:

[1] 中华人民共和国生态环境部. 2018年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报[R]. 北京, 2018.
[2] 王建新, 李晶, 赵仕宝, 等. 中国粉煤灰的资源化利用研究进

展与前景[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(12): 3833-3841.
[3] 李辰晨. 燃煤固体废物制备介孔硅基材料[D]. 上海: 华东理工大学, 2016.
[4] 牛季收, 王保君. 粉煤灰在混凝土中的效应及应用[J]. 铁道建筑, 2004(2): 74-77.
[5] 杨星, 呼文奎, 贾飞云, 等. 粉煤灰的综合利用技术研究进展[J]. 能源与环境, 2018(4): 55-57.
[6] Yao ZT, Ji XS, Sarker PK, et al. A comprehensive review on the applications of coal fly ash[J]. Earth - science reviews, 2015, 141: 105-121.
[7] Dilmore Robert M, Neufeld Ronald D. Autoclaved aerated concrete produced with low NO_x burner selective catalytic reduction fly ash[J]. Journal of energy engineering, 2001, 127(2): 37-50.
[8] 李阳, 王瑞骏, 闫菲, 等. 粉煤灰对混凝土抗冻及抗硫酸盐性能的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 219-226.
[9] Zhang Henian, Shen Chen, Xi Peisheng, et al. Study on flexural properties of active magnesia carbonation concrete with fly ash content[J]. Construction and building materials, 2018, 187: 884-891.
[10] Rashad Alaa M. A brief on high - volume Class F fly ash as cement replacement - a guide for civil engineer[J]. International journal of sustainable built environment, 2015, 4(2): 278-306.
[11] 盛昌栋, 张军. 粉煤灰中残碳的特性和利用[J]. 粉煤灰综合利用, 2005(1): 3-5.
[12] Habert G, D Espinose De Lacaillerie JB, Roussel N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends[J]. Journal of cleaner production, 2011, 19(11): 1229-1238.
[13] Martinez Rivera Francisco Javier. Strength and durability of fly ash - based fiber - reinforced geopolymer concrete in a simulated marine environment[D]. Florida: Florida Atlantic University, 2013.
[14] Zhuang Xiao Yu, Chen Liang, Komarneni Sridhar, et al. Fly ash - based geopolymer: clean production, properties and applications[J]. Journal of cleaner production, 2016, 125: 253-267.
[15] 贾屹海. Na - 粉煤灰地质聚合物制备与性能研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009.
[16] 杨久俊, 王文娟, 吴宏江, 等. 不同燃煤电厂粉煤灰的特性及影响因素分析[J]. 粉煤灰综合利用, 2008(06): 6-9.
[17] 侯芹芹, 张创, 赵亚娟, 等. 粉煤灰综合利用研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(6): 1281-1284.
[18] 赵吉, 康振中, 韩勤勤, 等. 粉煤灰在土壤改良及修复中的应用与展望[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(2): 1-6.
[19] 严彩霞, 董健苗. 粉煤灰在农业方面的利用[J]. 粉煤灰综合利用, 2001(5): 41-44.
[20] 赵亮, 唐泽军, 刘芳. 粉煤灰改良沙质土壤水分物理性质的室内试验[J]. 环境科学学报, 2009, 29(9): 1951-1957.
[21] 李九玉, 王宁, 徐仁扣. 工业副产品对红壤酸度改良的研究[J]. 土壤, 2009, 41(6): 932-939.
[22] 杨海儒, 宫伟光. 不同土壤改良剂对松嫩平原盐碱土理化性质的影响[J]. 安徽农业科学, 2008(20): 8715-8716.
[23] 王娟, 熊又升, 张志毅, 等. 粉煤灰在土壤改良和污染治理中研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(30): 14811-14813.

- [24] Jambhulkar Hemlata P, Shaikh Siratun Montaha S, Kumar M. Suresh. Fly ash toxicity, emerging issues and possible implications for its exploitation in agriculture; Indian scenario: A review[J]. *Chemosphere*, 2018, 213:333 – 344.
- [25] 宗燕兵,张学东,李飞. 粉煤灰陶瓷的制备及致密化过程讨论[J]. *环境工程*, 2018; 1 – 7. DOI: 10. 13205/j. hjgc. 201904028.
- [26] Kniess CT, De Lima JC, Prates PB, et al. Dilithium dialuminium trisilicate phase obtained using coal bottom ash[J]. *Journal of non – crystalline solids*, 2007, 353(52 – 54): 4819 – 4822.
- [27] Luo Yang, Zheng Shili, Ma Shuhua, et al. Ceramic tiles derived from coal fly ash: Preparation and mechanical characterization [J]. *Ceramics international*, 2017, 43(15): 11953 – 11966.
- [28] Lee Yuri, Soe June Thet, Zhang Siqian, et al. Synthesis of nanoporous materials via recycling coal fly ash and other solid wastes: A mini review [J]. *Chemical engineering journal*, 2017, 317: 821 – 843.
- [29] Zhou Chunyu, Gao Qiang, Luo Wenjun, et al. Preparation, characterization and adsorption evaluation of spherical mesoporous Al – MCM – 41 from coal fly ash [J]. *Journal of the Taiwan institute of chemical engineers*, 2015, 52: 147 – 157.
- [30] Bukhari Syed Salman, Behin Jamshid, Kazemian Hossein, et al. Conversion of coal fly ash to zeolite utilizing microwave and ultrasound energies: A review[J]. *Fuel*, 2015, 140: 250 – 266.
- [31] 邓庆德,姬海宏,胡鑫,等. 燃煤电厂飞灰脱碳技术研究进展[J]. *华电技术*, 2018, 40(10): 56 – 58.
- [32] Hower James C, Gropo John G, Graham Uschi M, et al. Coal – derived unburned carbons in fly ash: A review[J]. *International journal of coal geology*, 2017, 179: 11 – 27.
- [33] 任琳珠,王永田,李国胜. 某粉煤灰浮选脱炭试验研究[J]. *矿山机械*, 2013, 41(1): 80 – 83.
- [34] 范桂侠,曹亦俊,刘炯天,等. 钢厂粉煤灰浮选提碳试验研究[J]. *中国煤炭*, 2011, 37(8): 85 – 88.
- [35] 翟雪,曹亦俊,周强,等. 某电厂粉煤灰浮选脱炭试验研究[J]. *金属矿山*, 2011(3): 162 – 164.
- [36] Zhang Wencai, Honaker Rick. Studies on carbon flotation from fly ash[J]. *Fuel processing technology*, 2015, 139: 236 – 241.
- [37] 程芳琴,王波,成怀刚. 粉煤灰提取高附加值元素的技术现状及进展[J]. *无机盐工业*, 2017, 49(2): 1 – 4.
- [38] Dai Shifeng, Zhao Lei, Peng Suping, et al. Abundances and distribution of minerals and elements in high – alumina coal fly ash from the jungar power plant, inner mongolia, China[J]. *International journal of coal geology*, 2010, 81(4): 320 – 332.
- [39] 杨丹,郭庆丰,赵成龙,等. 鄂尔多斯某电厂粉煤灰中主要元素的赋存状态研究[C]//第六届尾矿与冶金渣综合利用技术研讨会暨衢州市项目招商对接会. 衢州, 2015.
- [40] Ding Jian, Ma Shuhua, Shen Shirley, et al. Research and industrialization progress of recovering alumina from fly ash: A concise review[J]. *Waste Management*, 2017, 60: 375 – 387.
- [41] Valeev D, Kunilova I, Alpatov A, et al. Complex utilisation of ekibastuz brown coal fly ash; Iron & carbon separation and aluminum extraction[J]. *Journal of cleaner production*, 2019, 218: 192 – 201.
- [42] Sangita Seoul, Nayak Niva, Panda Chitta Ranjan. Extraction of aluminium as aluminium sulphate from thermal power plant fly ashes[J]. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 2017, 27(9): 2082 – 2089.
- [43] Gong Bengen, Tian Chong, Xiong Zhuo, et al. Mineral changes and trace element releases during extraction of alumina from high aluminum fly ash in Inner Mongolia, China[J]. *International journal of coal geology*, 2016, 166: 96 – 107.
- [44] 刘丽霞,李文挺,彭军,等. 粉煤灰中锗的赋存状态研究[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2017, 45(5): 27 – 30.
- [45] Kamran Haghighi Hossein, Irannajad Mehdi, Fortuny Agustin, et al. Recovery of germanium from leach solutions of fly ash using solvent extraction with various extractants[J]. *Hydrometallurgy*, 2018, 175: 164 – 169.
- [46] King Jack F., Taggart Ross K., Smith Ryan C., et al. Aqueous acid and alkaline extraction of rare earth elements from coal combustion ash[J]. *International journal of coal geology*, 2018, 195: 75 – 83.
- [47] Das Saptarshi, Gaustad Gabrielle, Sekar Ashok, et al. Techno – economic analysis of supercritical extraction of rare earth elements from coal ash [J]. *Journal of cleaner production*, 2018, 189: 539 – 551.
- [48] 吴先锋,李建军,朱金波,等. 粉煤灰磁珠资源化利用研究进展[J]. *材料导报*, 2015, 29(23): 103 – 107.
- [49] 李辉,商博明,徐德龙,等. 粉煤灰中磁珠的微观结构及化学组成[J]. *矿业研究与开发*, 2006(6): 65 – 68.
- [50] 王龙贵. 回收粉煤灰磁珠在污水处理中的应用[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004(3): 88 – 89.
- [51] Hanif Asad, Lu Zeyu, Li Zongjin. Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement – based composites – A review[J]. *Construction and building materials*, 2017, 144: 373 – 384.
- [52] Singh LP, Karade SR, Bhattacharyya SK, et al. Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review[J]. *Construction and building materials*, 2013, 47: 1069 – 1077.

引用格式:黄根,王宾,徐宏祥,等. 粉煤灰综合利用与提质技术研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(4): 32 – 37.

HUANG Gen, WANG Bin, XU Hongxiang, et al. Research progress on comprehensive utilization and upgrading technologies of fly ash [J]. *Conservation and utilization of mineral resources*, 2019, 39(4): 32 – 37.