

燃煤电厂粉煤灰综合利用现状及发展建议

姜 龙

(华北电力科学研究院有限责任公司,北京 100045)

摘要:我国电力能源以煤炭为主,每年燃煤电厂因燃煤产生的粉煤灰为 6 亿 t,约占世界粉煤灰总产量的一半,而目前我国粉煤灰综合利用率仅为 70%。为全面了解我国粉煤灰综合利用现状并改善我国粉煤灰综合利用情况,介绍了国内外粉煤灰综合利用的基本情况、相关标准、相关政策及主要利用途径,通过对比国内外利用现状,分别从利用途径、标准制定、政策制定 3 方面提出我国今后粉煤灰综合利用的合理化建议。我国粉煤灰综合利用率同世界平均水平持平,但由于产量大、分布不均匀、已有能源政策等造成我国在粉煤灰综合利用中主要存在传统建材需求萎缩、季节性影响、政策缺少引导并无强制利用、标准体系不完善、高附加值利用占比低等问题;我国粉煤灰主要应用在建材行业,与其他发达国家相比,在道路方面、矿坑回填方面的应用率偏低,其中西部地区由于燃煤电厂分布广泛、建材行业需求降低造成粉煤灰综合利用远低于全国水平;我国在粉煤灰方面制定的标准所涉及的指标范围和指标限值同国外发达国家相比偏松,涉及领域多为传统的建材和基建,并不能很好地指导粉煤灰在其他领域的应用;现有相关政策大多是鼓励利用粉煤灰,缺乏强制性,同时政策上无法有效提高产灰企业的主观能动性。为了更好地推进我国粉煤灰的综合利用,结合自身国情且与发达国家现状对比,今后应主要从以下方面入手:加大我国粉煤灰在基建、填充、农业、环保、高附加值等方面的应用,推进西部地区粉煤灰在填埋和农业的应用;完善各利用途径的标准,在标准制定中应体现我国自身的特殊性并优先制定适用本地区粉煤灰利用的标准;我国粉煤灰利用对政策的依存度过高,因此政策内容应对产灰企业进行详细的政策引导从而提高产灰企业的治灰主观能动性,提高粉煤灰的综合利用率,提高固废利用信息的透明度,加强粉煤灰综合利用的社会监督。

关键词:燃煤电厂;粉煤灰;综合利用;标准体系

中图分类号:X705;TQ536.4

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2020)04-0031-09

Comprehensive utilization situation of fly ash in coal-fired power plants and its development suggestions

JIANG Long

(North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: Coal is the main energy source of electric power in China. 600 million tons of fly ash is produced in the coal-fired power plant of China produces every year, accounting for half of the world's total output of fly ash. The comprehensive utilization rate of fly ash in China is only 70%. In order to fully understand the comprehensive utilization of fly ash in China and improve the comprehensive utilization of fly ash in China, the main utilization situation, relevant standards, relevant laws and policies, and main utilization ways of fly ash at home and abroad were introduced. By comparing the utilization status at home and abroad, the rationalization suggestions of comprehensive utilization of fly ash in China in the future were put forward from three aspects: utilization ways, standard formulation, laws and regulations. The comprehensive utilization rate of fly ash in China is the same as the world average level, but there are some problems in the comprehensive utilization of fly ash in China due to the large output, uneven distribution and existing national energy policies, such as shrinking demand for traditional building materials, seasonal effects, lack of guidance and no compulsory use of policies, imperfect standard system, low proportion

收稿日期:2019-06-25;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.F19062501

基金项目:国家电网华北电科院自有基金资助项目(KJJ2019040)

作者简介:姜 龙(1988—),男,河北邯郸人,工程师,博士,主要从事燃煤电厂大气及固废环保方面等方面研究。E-mail:kaveykiky@163.com

引用格式:姜龙.燃煤电厂粉煤灰综合利用现状及发展建议[J].洁净煤技术,2020,26(4):31-39.

JIANG Long. Comprehensive utilization situation of fly ash in coal-fired power plants and its development suggestions[J].

Clean Coal Technology, 2020, 26(4): 31-39.



移动阅读

of high value-added utilization, etc. Fly ash is mainly used in building materials industry in China. Compared with other developed countries, its application rate in road and mine backfilling is relatively low. Due to the wide distribution of coal-fired power plants and the demand reduction of building materials industry in the western region of China, the comprehensive utilization of fly ash is far lower than the national water level. The index range and limit value of China's standard on fly ash are relatively loose than those of foreign countries, and most of the fields involved are traditional building materials and infrastructure construction, which cannot guide the application of fly ash in other fields well. Most of the existing relevant policies are to encourage the use of fly ash, which is lack of mandatory, and the content of policies cannot effectively improve the subjective initiative of the ash production enterprises. In order to better promote the comprehensive utilization of fly ash in China, we should start from the following aspects in the future combined with own national conditions and compared with the current situation of developed countries; increase the application of fly ash in construction, filling, agriculture, environmental protection and high value-added utilization; promote the application of fly ash in landfill and agriculture in the western region of China; improve the standards of various utilization ways, which should reflect our own particularity of our country in the standard formulation and give priority to the formulation of local standards; the current utilization of fly ash in China depends too much on the policy, so the policy content should guide the ash production enterprises in detail, so as to improve the subjective initiative of ash treatment of ash producing enterprises; increase the policy of compulsory utilization of fly ash; improve the transparency of solid waste utilization information, and strengthen the social supervision of comprehensive utilization of fly ash.

Key words: coal-fired power plant; fly ash; comprehensive utilization; standard system

0 引言

我国是产煤大国,以煤炭为电力生产基本燃料的国策在长时间内不会改变。燃烧 1 t 原煤,生产粉煤灰 250~300 kg^[1]。在目前环保压力日趋加大,固废处置问题突出,电力行业传统煤电企业经营形式日趋严峻的局面下,固废处置尤其是燃煤后产生的粉煤灰在煤电企业生产经营活动中越发重要和紧迫。我国施行的“西电东送”、“特高压输电”等能源政策,以及西北地区传统基建行业对粉煤灰需求量的下降,势必会加剧“电从空中来、灰留在当地”的恶性循环。在国家不断重视环保问题和习近平主席提出“绿水青山就是金山银山”发展理念的形势和背景下,西北地区海量堆积的粉煤灰迫切需要新的出路。

粉煤灰的理化性质决定了其具有变废为宝的特性,经过几十年的研究应用,粉煤灰已应用于基建、建材、农业、环保、化工等多领域;粉煤灰主要成分为硅酸盐和铝酸盐,可用作水泥、砂浆、混凝土的掺合料^[2-3];通过一定的烧结工艺可制作各种新型建筑材料,如陶砂陶粒、空心砌砖等^[4-5];粉煤灰可改善土壤的保水性、容重等理化性质,提供水溶性硅钙镁磷等营养素,故可提高农作物产量,治理土壤沙化、盐碱化^[6-7];粉煤灰中可提取铝、硅、锂、镓等有用金属,还可通过分选技术,分选出漂珠、炭粒、磁珠等具有不同性质的材料^[8-9]。

为了更全面了解我国粉煤灰综合利用现状,改善我国粉煤灰综合利用情况,本文总结了国内外粉煤灰综合利用的基本情况、相关标准、相关政策及主要利用途径,通过对比国内外利用现状,分别从利用

途径、标准制定、政策制定 3 方面提出我国今后粉煤灰综合利用的合理化建议。

1 各国燃煤电厂粉煤灰综合利用现状对比

1.1 产量及利用率

2016 年全球粉煤灰约 11.43 亿 t,平均利用率为 60%;其中中国约 6 亿 t,利用率为 68%~70% (综合利用量为 4.08 亿 t);美国约 4 400 万 t,利用率 54% (综合利用 2 376 万 t);日本 1 200 万 t,利用率接近 100%;欧盟 4 000 万 t (欧盟 15 国所有燃煤固废),利用率 90% (综合利用量 3 600 万 t);印度 1.69 亿 t,利用率 63% (综合利用量 1.06 亿 t)^[10-12]。

我国及美国近十几年粉煤灰产量及利用率变化如图 1、2 所示。燃煤电厂固废产出量的增长趋势得到缓解,但固废的综合利用量没有显著提高,基本维持在原有水平,这主要是因为:一方面随着新能源发电量占比提高,造成传统的燃煤发电量受到制约;另一方面现阶段国内外很多粉煤灰的“高附加值”综合利用并未得到产业化普及。

1.2 利用途径

各国家粉煤灰的综合利用途径选择取决于各国家粉煤灰产量、工艺技术的发展情况、环保要求、原材料的稀缺程度、产业结构等因素影响。各主要国家及地区粉煤灰主要综合利用途径对比见表 1^[13-15]。

由表 1 可知,各国家基本上以建材应用为主,而在其余途径的应用选择则受各国政策及产业的影响;高附加值利用方面,只有日本相对利用率占比较大^[16],这是由于日本本国原材料的限制,粉煤灰被开发成各种材料用于替代原材料。



图1 我国2007—2016年粉煤灰产量及利用率

Fig.1 Yield and utilization rate of fly ash during 2007—2016 in China



图2 美国2000—2016年粉煤灰排放量及利用率

Fig.2 Yield and utilization rate of fly ash during 2000—2016 in USA

表1 各主要国家及地区粉煤灰综合利用途径

Table 1 Comprehensive utilization of fly ash in major countries and regions

项目	粉煤灰利用比例/%				
	中国	美国	日本	欧盟	印度
水泥	44	9.14	67.12	33.6	44.76
砖及墙体	26	—	3.25	5.50	6.86
混凝土	16	33.05	—	40.8	6.89
农业	5	—	0.83	—	1.03
复垦	—	—	—	—	16.71
道路	5	12.83	10.31	16.4	6.51
回填	—	28.92	3.27	—	9.1
矿物提取	4	—	0.06	—	—
环保	—	5.83	0.01	—	—
其他及其他	—	—	15.13	3.70	—
高附加值	—	—	—	—	—

与其他发达国家或地区相比,我国粉煤灰在道路基建、回填、农业方面应用比例较低。我国在高附加值利用领域内的应用主要集中在提取氧化硅、氧化铝及稀有金属,合成陶瓷材料和沸石分子筛,处理污水、废气等方面^[17-18]。由于传统建材方面的需求量衰减,我国粉煤灰产出量巨大,我国粉煤灰利用率偏低的地区主要集中在西部地区,造成我国粉煤灰综合利用情况短时期内得不到显著缓解。

日本最主要的利用途径是水泥,占日本粉煤灰

综合利用量的67.12%,虽然日本的固废综合利用手段丰富且先进,但由于日本国内对各种原材料的缺口大,同时由于居民反对粉煤灰在填埋场堆积,因此各种固废的综合利用率较高,且基本用来补充建材原料,剩余用作公路路基材料、肥料、地基改良剂等^[19]。在高附加值利用领域内,日本将粉煤灰应用在制造抗腐蚀性添加剂^[16]、污泥固化剂^[20]、炼铁工业用材料^[21]、高分子材料充填剂等^[22]。

美国环保局(EPA)将粉煤灰利用主要分为2个方面:Encapsulated beneficial use(主要是建材)和Unencapsulated beneficial use(结构填充和堤防)。EPA分别发布了燃煤电厂固废在以上2种应用领域内利用的可行性评估方法,《Methodology for evaluating encapsulated beneficial uses of coal combustion Residuals》和《Coal combustion residual beneficial use evaluation: Fly ash concrete and FGD gypsum wall-board》,用于更好指导粉煤灰在这2个领域的应用^[23-24]。

欧洲在固废政策和利用方面主要关注2方面因素:环保和资源化。由于欧盟自身固废产量不多,且缺少建材原材料,因此95%以上的粉煤灰都被用于建材和基建领域中^[12,25]。

1.3 建议

我国燃煤电厂的粉煤灰产量远大于发达国家产量,且表现出明显的地域分布不均匀性,同时由于我国粉煤灰大部分应用在建材,单一的利用途径显著制约着粉煤灰的利用。

1)提高基建领域的利用率。我国在道路建设等基建行业中的粉煤灰综合利用应用比例明显低于其他国家,尤其是国外发达国家,而我国在基建层面中仍具有较大的发展空间(如西部地区的高铁建设)。在提高基建行业中比例的同时,还应减少黏土的应用比例(山西地区由于成本问题选用黏土而不是粉煤灰)。

2)推进西部地区在填埋的应用。我国粉煤灰在回填领域中所占比例也较国外发达国家低,这一方面是缺少相关的政策性和标准的引导,另一方面在回填领域上由于环保压力也比较谨慎。因此,可借鉴国外在回填方面的规定并结合一定的环保试验基础,增加我国的粉煤灰回填。

3)关注环保领域的研究应用。我国和印度同为发展中国家,环保和其他领域中的粉煤灰利用量较发达国家偏低,而我国也不断加大环保方面治理,中西部地区往往又是环保的薄弱地区,可采取粉煤灰分选—炭黑—制备活性炭—工业废水净化的产业链。

4)加大在农业领域中的应用。我国粉煤灰在农业领域中的应用主要集中在化肥生产、覆土造田和土壤改良中,但区域分布主要集中在中东部地区,西部地区由于自身耕地面积少、地质、水资源等制约在农业中应用较低。因此可在西部地区增加粉煤灰在覆土造田、土壤改良中的应用。

2 各国燃煤电厂粉煤灰综合利用标准对比

2.1 中国标准

我国有关粉煤灰标准共计 56 个,其中国标 11 个,行标 23 个,地标 22 个,标准范围涉及电厂、建材、道路、检测等方面,其中建材领域占据一半,但现有标准缺少高附加值领域、分类、规范、环保等方面。我国现有关于粉煤灰标准见表 2。

表 2 我国现有关于粉煤灰标准汇总

标准	电厂	检测	建材	道路	农业	港口	回填	其他	总数
国标	3	1	6	—	1	—	—	—	11
行标	1	4	8	3	—	4	—	3	23
地标	1	1	16	2	—	—	1	1	22
总数	5	6	30	5	1	4	1	4	56

2.2 各国标准对比

以混凝土中粉煤灰的质量为例,罗列了各主要国家混凝土用粉煤灰标准,具体见表 3。各国因为粉煤灰特性及国内情况所选因素的侧重点不同,如欧洲对环保指标监控更严,因此增加了更多粉煤灰成分的指标;日本由于处于地震带,因此比较侧重强度参数。综合比较,我国在粉煤灰方面制定的标准

表 3 各国家混凝土用粉煤灰标准

Table 3 Standards of fly ash for concrete in various countries

项目	中国 ^[26]	美国 ^[27]	日本 ^[28]	欧洲 ^[29]	
细度(0.045 mm 方孔筛筛余量)/%	≤12		≤10	≤45(N)	
	≤30	≤34	≤40	≤13(S)	
	≤45		≤70		
烧失量/%	≤5	≤10	≤3	≤7(A)	
	≤8	≤6	≤5	≤9(B)	
	≤10		≤8	≤11(S)	
需水量比/%	≤95	≤115		≤97(S)	
	≤105	≤95	—		
	≤115				
含水量/%	≤1.0	≤3	≤1.0	—	
SO ₃	≤3.0	≤4.0	—	≤3.5	
		≤5.0			
游离 CaO	≤1.0	—	—	≤1.6	
	≤4.0				
质量分数/%	SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 和 Fe ₂ O ₃	≥50	≥50	—	≥65
		≥70	≥70	—	
	SiO ₂	—	—	≥45	≥25
	氯化物	—	—	—	≤0.10
	活性 CaO	—	—	—	≤11
	碱金属盐	—	—	—	≤5.50
	磷酸盐	—	—	—	≤5.50
				≥5 000	
比表面积/(cm ² ·g ⁻¹)	—	—	≥2 500	—	
			≥1 500		
密度/(g·cm ⁻³)	≤2.6	5%(最大密度偏差)	≥1.95	≤±0.225(密度偏差)	
安定性(雷氏法)/mm	≤5.0	≤0.8(膨胀收缩)	—	≤11	
强度活性指数/%			≥60		
	28 d	≥70	≥75	≥80	≥70
				≥90	
	7 d	—	≥75	—	—
				≥70	
91 d	—	—	≥90	≥80	
			≥100		

所涉及的指标范围和指标限值同国外发达国家相比偏松。日本同欧盟最严,我国同美国处于同一水平。

各国粉煤灰的分类标准不尽相同,中国及美国主要以 CaO 含量为依据,日本以性能进行分类,欧盟以细度及烧失量为分类标准。分类标准以及不同种类标准值的差异性决定了最终的应用途径,相比较,中国和日本在不同类别粉煤灰的指标差异性更为明显。

2.3 建议

1) 标准中应体现我国自身的特殊性。标准考察的指标应该更能体现且符合我国自身的特殊性。如我国 NO_x 控制浓度较发达国家高,且烟道内流场不均匀性也较国外严重,易造成氨量过喷,而烟气中氨主要富集在粉煤灰中,灰中氨会影响粉煤灰品质并释放氨味^[30]。我国脱硫废水往往会喷洒在灰库中,因而加大粉煤灰中 Cl^- 含量,含过高 Cl^- 粉煤灰制成的建材会腐蚀配筋制品,因此应对 Cl^- 加以考核。

2) 优先制定适用本地区粉煤灰利用的标准。由于我国粉煤灰的产量和综合利用率具有明显的地域区别,因此各地区的地方粉煤灰综合利用标准应该更加完善,制定更适用于本地区的地方标准。如各地区探索最适宜的粉煤灰综合利用途径的相关标准,指导本地区的粉煤灰综合利用。对于西部地区,传统建材应用正逐渐缩窄,因此应在回填、土壤改良等可大宗应用方面迅速制定相关的指导标准指导粉煤灰的综合利用。

3) 评估重金属对土壤及地下水影响风险。国内外在建材、基建等传统领域中标准均没有涉及各类有害金属含量。通过检测及评估粉煤灰中有害金属对当地土壤及地下水的影响,可指导和规范粉煤灰在土壤及回填中的应用,从而影响政府对粉煤灰应用的决策^[31]。

4) 制定其他利用途径的标准。各发电企业应积极探索和完善适宜的粉煤灰综合利用途径,待工艺或技术成熟后形成相应的应用标准,从而促进我国粉煤灰的综合利用。

3 各国燃煤电厂粉煤灰综合利用政策对比

3.1 中国政策

我国 2013 年发布了新修订的《粉煤灰综合利用管理办法》,规定了对利用粉煤灰产业给予的优惠政策且鼓励在一些高附加值/大掺量利用途径进行应用。2017 年 1 月环保部发布实施了《火电厂污染防治技术政策》,要求粉煤灰应遵循优先综合利用

的原则再堆存。此外,《资源综合利用产品和劳务增值税优惠目录》、《西部地区鼓励类产业目录》及各地方政府都有粉煤灰综合利用的优惠政策。

3.2 各国粉煤灰综合利用法律政策对比

1) 日本政府及银行对引进使用粉煤灰处理设备的一般产业,会给予高融资率(40%)和低利率(1.9%)的特别优惠,在经济上提高用灰产灰单位综合利用的积极性,而我国等国并无这方面的政策优惠^[32]。

2) 发达国家无论是政策调整还是标准制定都有显著的灵活性,可根据市场及技术情况及时调整,以便更好地促进粉煤灰和石膏的综合利用及使用。

3) 国外粉煤灰综合利用的推进中民间机构参与度较高,如美国的灰渣协和美国电力科研院。而我国则以政府为主导,各行业企业的研究单位、科研院所为技术研究单位,推进固废的综合利用^[33]。

4) 我国尤其是西部地区,政策引导性对于固废综合利用率影响巨大,可显著提高或降低固废的综合利用率,反映出我国固废综合利用的单一性及政策依存度过高等问题^[34]。

3.3 建议

1) 提高产灰企业治灰主观能动性。我国粉煤灰利用对政策依存度过高,利用率受制于政策引导,企业在探索粉煤灰综合利用途径上缺少技术开发和推广的主观能动性,更多的是被动追随政策。各企业应积极主动做好前期的工艺调研,提供有利数据及其他依据,同科研高校、政府共同推动本地粉煤灰的综合利用,实现环境与经济的双效益。

2) 增加强制性利用粉煤灰的政策。现行政策大多是鼓励利用粉煤灰,建议政府在合适的地区及应用领域增加强制性使用粉煤灰的政策,尤其在原材料较少或粉煤灰可替代的地区。如山西长治地区的制砖应减少当地黏土的使用,强制使用部分粉煤灰。

3) 提高固废利用信息的透明度。日本和印度通过不同途径对各产灰单位的粉煤灰产量及利用率进行公开或可被查询,接受社会公众的监督,从而提高各产灰企业利用粉煤灰的紧急性和积极性。

4) 政府提供更为实际的支持手段。建议政府建立高附加值综合利用项目的立项、环评、生态、用地、用水等绿色审批通道;支持高附加值利用,扩大销售半径,改变原有对传统建材的依赖性;争取地区的电价政策支持,降低企业用能成本,从而加大对粉煤灰综合利用积极性和经济性;实施运输费用优惠政策,扩大粉煤灰产品运输经济半径,增加拓宽粉煤

灰的销路和应用范围。

4 燃煤电厂粉煤灰综合利用技术发展现状

现有粉煤灰主要综合利用技术途径见表4,其中附加值越高的利用途径,消耗的粉煤灰量越小^[35-37]。

由表4可知,除建材、基建等传统利用途径实现了大规模产量化生产外,其余应用途径对粉煤灰的消纳量小,且问题较多。如高铝粉煤灰中提取 Al_2O_3 工艺:利用碱石灰、石灰石作为烧结剂进行粉煤灰中 Al_2O_3 提取过程中会产生大量硅渣副产物,如生产1 t Al_2O_3 可产生1.5~3.0 t 硅渣,碱法提铝工艺产生的硅渣量更大^[38];酸浸法更适用于莫来石含量较少的流化床粉煤灰,且设备需抗腐蚀导致成本高^[39]。目前针对粉煤灰基催化剂的研究还不够深入,基本上只是单纯将粉煤灰当作一种常规载体替代物,粉煤灰制备催化的关键理论研究还没有得到突破^[40]。现阶段从粉煤灰中提取镓、锗等金属元素的技术主要有沉淀法、吸附法、萃取法等,但存在回收率不高、

过程复杂、成本高、产品纯度不理想等问题^[41]。国内外报道了很多有关粉煤灰处理废水的试验研究,但多数仅限于考察粉煤灰对污染物的吸附量和脱除量,而未考虑该方法的实际应用,其中最主要的是灰水分离和分离后灰的处置问题;除氟后的粉煤灰也会引起二次污染,若随意弃置,经雨水淋溶可能造成土壤和水体的污染。与纯黄土相比,若用该粉煤灰(25%)与纯黄土烧制砖的氟溢出量增加11%^[42]。

除表4列举的利用途径外,研究者也正将目光投放在其他领域。

1) Dindi 等^[43]研究表明,利用粉煤灰矿化封存 CO_2 不仅可以减少 CO_2 排放量,还可以提高粉煤灰的稳定性,从而扩大其在建筑材料生产中的利用率。尽管封存能力低,但由于年粉煤灰产量巨大,使用粉煤灰作为矿化封存 CO_2 原料的研究仍受到广泛关注。

2) 利用粉煤灰制作具有特定建筑功能,如保温、防水、阻燃、耐火、防腐、抗辐射等功能材料也

表4 粉煤灰各主要综合利用途径对比

Table 4 Comparison of main comprehensive utilization ways of fly ash

项目	优点	缺点	前景
土壤改良	缓冲土壤 pH, 增加除有机碳和氮以外植物养分, 对土壤理化性质产生有益影响, 提高产量	导致土壤盐度增加, 有毒金属对土壤、植物和地下水造成污染风险, 每种灰应用都具有局限性, 潜在的植物毒性效应	存在以下问题限制广泛应用: 粉煤灰施用量及配比参数; 粉煤灰中重金属对土壤和地下水的污染控制问题; 更多集中在实验室和小试研究阶段
建筑行业	提高了混凝土的和易性, 降低了混凝土生产成本, 最大化增值和消耗大量粉煤灰, 对粉煤灰没有严格的质量要求	受季节性因素影响, 运输成本可能会限制其应用, 大量未燃烧碳抑制混凝土的引气性能和流动性	基建行业对粉煤灰消耗量大, 且粉煤灰制成的各种新建材料应用市场广泛, 长时间内仍是粉煤灰最主要的消纳途径
陶瓷工业	几乎不需要预处理, 部分替代高岭石、长石和石英, 有效节约有限的自然资源	氧化铁对产物的热膨胀系数有负面影响, 粉煤灰黏土体烧成后收缩率高, 会增加炉体的多孔性和烟气中 SO_2 含量	满足一定标准要求的粉煤灰可用于制造陶砂陶粒, 工艺实现量产化, 消耗粉煤灰量大
催化剂	降低环境影响, 增值用途之一	工业实践中尚未得到应用, 释放出汞等微量元素造成二次污染	用于光解催化有机物的粉煤灰基催化剂反应机理研究还相对欠缺, 且粉煤灰预处理及催化剂制备过程成本偏高
环境保护	低成本吸附剂, 直接用于气体和污水	吸附能力有限, 各灰之间的吸附能力差异很大; 灰水分离, 二次污染	未考虑灰水分离和分离后灰的处置问题; 除氟后的粉煤灰会引起二次污染
深度分离	增加潜在的产业协同机会, 回收微珠、未燃烧的碳灰、磁珠	需大量的土地、水和浮选药剂, 易造成二次污染, 效率和经济性低	工艺成熟, 是否可行取决于粉煤灰自身特性和当地市场需求
合成沸石	用于各种工程和农业的潜在吸附剂, 增值用途之一	产物通常与原始晶相(石英、莫来石)共结晶, 效率和经济是主要限制因素	现合成方法普遍存在时间长、成本高、转化率低、产品性能差等问题
有价值的金属提取	增加潜在的产业协同机会, 取得显著的经济和环境效益	提氧化铝存在缺陷, 如产生过多的二次固废; 效率和经济是主要限制因素	提取、净化工艺还存在工艺复杂、物料流量大、废弃物多、环保性差和经济成本高等问题, 导致应用研发受到限制

是粉煤灰综合利用的热点:粉煤灰具有对高温稳定性好及热膨胀系数小的特点,黄军同等^[44]、李键铎等^[45]分别用粉煤灰及含铝矿经烧制制备了镁铝尖晶石-刚玉-Sialon 复合耐高温材料和氧化铝/粉煤灰耐火材料,经检测常温耐火度可达 1 400 ℃;粉煤灰作为原料可著提高制备材料的阻燃性,曹新鑫等^[46]将粉煤灰加入聚丙烯基体中制备了抗静电材料;Singh 等^[47]研制出多种粉煤灰抗辐射混凝土产品,将粉煤灰引入抗辐射领域应用中;粉煤灰防腐材料的应用主要在粉煤灰耐酸胶泥和粉煤灰防腐涂料,可用于地下管线外壁、钢结构、烟囱内壁等的防腐^[48];以粉煤灰为原料进行粉煤灰轻质耐火砖的烧制,但要求所用粉煤灰品质满足低碳、低铁、高铝的要求,华中科技大学试制的粉煤灰轻质耐火砖常温耐压程度可达 5.7 MPa,热导率(350 ℃)为 0.2 W/(m·K)^[49]。但目前粉煤灰基功能材料大多处于理论研究阶段,工业化应用水平不高。

3)英国兰卡斯特大学已研发出了一种由粉煤灰废料和碱性溶液构成的水泥混合物,这种水泥还具备导电性。这种混合物在白天借助太阳能电池板存储电量,夜晚释放出来,最终实现存储和释放功率 200~500 W/m²^[50]。

5 我国粉煤灰综合利用主要问题

我国在粉煤灰利用过程中主要面临市场、技术、区域不平衡、政策等问题。

1)粉煤灰产地和市场存在地理隔离。我国西北地区燃煤电厂分布最密集,由于西电东送、特高压输电等能源政策进一步加大了西北地区燃煤发电比重。而粉煤灰的主要消纳场地为中东部地区,由于运输经济半径(300 km),将粉煤灰运输到中东部不满足经济性,因此海量粉煤灰被滞留在西北地区无法利用。

2)已有综合利用途径单一,淡季现有的可大量综合利用粉煤灰途径只有建材与基建,但由于运输成本限制,粉煤灰只能在产生地周围消纳。呈现明显的季节性利用规律,即每年冬季及雨季为粉煤灰的利用淡季;冬季由于环境压力,制砖水泥等粉煤灰传统消纳单位停产减产,粉煤灰需求量骤减,造成电厂粉煤灰的滞留堆积;雨季受天气影响,粉煤灰综合利用率低。

3)高附加值利用技术存在瓶颈。粉煤灰高附加值利用面临技术成本高、产生二次污染、受限于粉煤灰特性、技术有待进一步优化等问题,因此在实际中难以实现产业化应用。

4)粉煤灰综合利用标准体系不完备。我国粉煤灰综合利用相关标准主要集中在传统建材利用方面,缺少在分类、高价值产品及非建材利用方面(环保、农业、填埋等方面)的标准,因此其余领域粉煤灰的综合利用缺少技术指导和规范,不利于粉煤灰的综合利用。

5)缺少操作性更强、强制性应用的政策。政府对于粉煤灰综合利用的决策缺少更为实际的支持手段,再加上各产灰单位对于开拓新工艺的积极性不高,造成当下粉煤灰综合利用技术发展缓慢。

6 结 论

我国是世界上粉煤灰产量和未利用量最多的国家,平均每年有 2 亿 t 新产生的粉煤灰堆存而无法利用^[51],影响环境。我国粉煤灰综合利用在应用途径、相关专利、相关政策的现状主要为:

1)我国粉煤灰平均综合利用率为 70%,主要应用在建材行业中,与其他发达国家相比,在道路方面、矿坑回填方面的应用率偏低。西部地区由于粉煤灰产量大、建材行业需求降低造成粉煤灰综合利用远低于全国水平。

2)我国粉煤灰标准涉及的指标范围和指标限值同国外发达国家相比偏松,涉及领域多为传统的建材和基建,并不能很好地指导粉煤灰在其他领域的应用。

3)在相关政策上我国目前存在以下问题:产灰企业缺少主观能动性;现政策大多是鼓励利用粉煤灰,缺乏强制性;固废利用信息不透明;政府缺少更为实际的支持手段。

4)粉煤灰作为可综合利用的固体废弃物,其综合利用途径广泛,且仍在探索中。各产灰用灰单位应结合粉煤灰自身特性、当地市场需求、工艺特性、经济成本、环保要求等积极主动分析选择最适宜的综合利用途径。同时各地方政府要因地制宜出台适用于当地的粉煤灰综合管理办法,尤其是西北地区更好地引导粉煤灰的综合利用,实现经济、社会、环保的共同效益。

参考文献(References):

- [1] 雷瑞,付东升,李国法.粉煤灰综合利用研究进展[J].洁净煤技术,2013,19(3):106-109.
LEI Rui, FU Dongsheng, LI Guofa. Research progress of fly ash comprehensive utilization [J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(3): 106-109.
- [2] 吴泓,郭明珠.高效粉煤灰水泥技术的推广潜力分析[J].环境保护与循环经济,2013(6):35-37.

- WU Hong, GUO Mingzhu. Potential analysis of popularization of high efficiency fly ash cement technology [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2013(6):35-37.
- [3] 苏英,刘雨轩,贺行洋,等.超细化粉煤灰的活性提升[J].硅酸盐通报,2019,38(1):265-269.
- SU Ying, LIU Yuxuan, HE Xingyang, et al. Activity enhancement of ultra fine fly ash [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(1):265-269.
- [4] 王萧萧,申向东.不同掺量粉煤灰轻骨料混凝土的强度试验研究[J].硅酸盐通报,2011,30(1):69-73.
- WANG Xiaoxiao, SHEN Xiangdong. Experimental study on strength of lightweight aggregate concrete with different contents of fly ash [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2011, 30(1):69-73.
- [5] MI H H, YANG J L, SU Z G, et al. Preparation of ultra-light ceramic foams from waste glass and fly ash [J]. Advances in Applied Ceramics, 2017, 116(7):1-9.
- [6] SCHONEGGER D, GOMEZ-BRANDON M, MZZIERR T, et al. Phosphorus fertilising potential of fly ash and effects on soil microbiota and crop [J]. Resources Conservation & Recycling, 2018, 134:262-270.
- [7] 季慧慧,黄明丽,何键,等.粉煤灰对土壤性质改善及肥力提升的作用研究进展[J].土壤,2017,49(4):665-669.
- JI Huihui, HUANG Mingli, HE Jian, et al. Effects of fly ash on promoting soil properties and fertility: A review [J]. Soil, 2017, 49(4):665-669.
- [8] LUCIE B. Unburned carbon from coal combustion ash: An overview [J]. Fuel Processing Technology, 2015, 134:136-158.
- [9] 魏征,杨冰,赵鸣,等.盐酸沉淀法制备纳米 SiO₂/粉煤灰微珠复合颗粒[J].中国矿业大学学报,2014,43(3):472-477.
- WEI Zheng, YANG Bing, ZHAO Ming, et al. Preparation of nano SiO₂/cenosphere composites by chemical precipitation [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(3):472-477.
- [10] 苏武.粉煤灰在建筑材料领域中的应用分析[J].河南建材,2017(1):12-13.
- SU Wu. Application analysis of fly ash in building material field [J]. Henan Building Material, 2017(1):12-13.
- [11] 中华人民共和国国家统计局.中国能源统计年鉴 2017[M].北京:中国统计出版社,2012.
- [12] European Coal Combustion Products Association. EU statistics: estimate on production [EB/OL]. [2016-12-31]. <http://www.ecoba.com/ecobaccpprod.html>.
- [13] European Coal Combustion Products Association. Utilisation of fly ash in the construction industry and underground mining in Europe (EU 15) in 2016 [EB/OL]. [2016-12-31]. <http://www.ecoba.com/ecobaccputil.html>.
- [14] ISHIKAWA Y, WU C N, YAJIMA N. Current state and future prospect of CCPs utilization technology in Japan [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(9):1746-1752.
- [15] GOLLAKOTA A R K, VOLLI V, SHU C M. Progressive utilization prospects of coal fly ash: A review [J]. Science of the Total Environment, 2019, 672:951-989.
- [16] 石川嘉崇.日本粉煤灰综合利用现状[C]//亚洲粉煤灰及脱硫石膏综合利用技术国际交流大会.朔州:[s.n.],2013:145-147.
- [17] HE Yi, LUO Qingming, HU Hualong. Situation analysis and countermeasures of China's fly ash pollution prevention and control [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 16:690-696.
- [18] Ministry of environmental protection of the People Republic of China. 2010 Annual statistic report on environment in China [R]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
- [19] 黄定国,吴玉敏,王文华.日本的粉煤灰综合利用[J].洁净煤技术,2006,12(2):92-95.
- HUANG Dingguo, WU Yumin, WANG Wenhua. The comprehensive utilization of fly ash in Japan [J]. Clean Coal Technology, 2006, 12(2):92-95.
- [20] 黄定国,王文华,吴玉敏.实用粉煤灰利用技术在日本的研发现状[J].煤炭加工与综合利用,2006(3):48-49.
- HUANG Dingguo, WANG Wenhua, WU Yumin. Research and development status of practical fly ash utilization technology in Japan [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2006(3):48-49.
- [21] Japan Coal Energy Center. Coal ash generation process and application fields [DB/OL]. [2005-07-01]. http://www.jcoal.or.jp/cctin japan_en.html.
- [22] 唐宇香,陈文恩.中日粉煤灰综合利用比较研究[J].安徽农业科学,2010,38(36):20852-20854.
- TANG Yuxiang, CHEN Wenen. Comparative research on comprehensive utilization of fly ash between China and Japan [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(36):20852-20854.
- [23] United States Environmental Protection Agency. Methodology for evaluating encapsulated beneficial uses of coal combustion residuals [EB/OL]. [2013-09-30]. <https://www.epa.gov/coalash/methodology-evaluating-encapsulated-beneficial-uses-coal-combustion-residuals>.
- [24] United States Environmental Protection Agency. Coal combustion residual beneficial use evaluation; Fly ash concrete and FGD gypsum wallboard [EB/OL]. [2014-02-28]. <https://www.epa.gov/coalash/coal-combustion-residual-beneficial-use-evaluation-fly-ash-concrete-and-fgd-gypsum-wallboard>.
- [25] BHATT A, PRIYADARSHINI S, MOHANAKRISHNAN A A, et al. Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review [J]. Case Studies in Construction Materials, 2019, 11:1-11.
- [26] 中国国家标准化管理委员会.用于水泥和混凝土中的粉煤灰: GB/T 1596—2017 [S].北京:中国标准出版社,2017.
- Standardization Administration. Fly ash used for cement and concrete: GB/T 1596—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [27] American Society for Testing and Materials. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete: ASTM C618—2015 [S]. New York: ASTM International, 2015.
- [28] Japanese Industrial Standards Committee. Fly ash for use in concrete: JIS A6201—2015 [S]. Tokyo: Japanese Standards Association, 2015.

- tion, 2015.
- [29] European Committee for Standardisation. Fly ash for concrete - Part 1: Definitions, specifications and qualified standards: BSEN450-1; 2012[S]. Paris: BSI Standards Publication, 2012.
- [30] 张宇, 王智, 孙化强, 等. 脱硝后粉煤灰中氨氮物质的性质探讨[J]. 粉煤灰, 2015, 27(5): 5-6.
- ZHANG Yu, WANG Zhi, SUN Huaqiang, et al. Probe into properties of ammonia nitrogen substance in denitrated fly ash[J]. Fly ash, 2015, 27(5): 5-6.
- [31] KHAN I, UMAR R. Environmental risk assessment of coal fly ash on soil and groundwater quality, Aligarh, India[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2019, 8: 346-357.
- [32] 李文顺, 朱林. 日本粉煤灰综合利用对我国的启示[J]. 粉煤灰综合利用, 2010(3): 52-56.
- LI Wenxin, ZHU Lin. Enlightenment of comprehensive utilization of fly ash in Japan to China[J]. Comprehensive Utilization of Fly Ash, 2010(3): 52-56.
- [33] 黄谦. 国内外粉煤灰综合利用现状及发展前景分析[J]. 中国井矿盐, 2011, 42(4): 41-43.
- HUANG Qian. Analysis of development prospects and status quo of comprehensive utilization of fly ash at home and abroad[J]. China Well and Rock Salt, 2011, 42(4): 41-43.
- [34] 宿宇, 方华峰. 我国粉煤灰相关政策研究[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(4): 52-55.
- SU Yu, FANG Huafeng. Research on fly ash policy in China[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(4): 52-55.
- [35] 王福元, 吴正严. 粉煤灰利用手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- WANG Fuyuan, WU Zhengyan. Fly ash utilization manual[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [36] YAO Z T, JI X S, SARKER P K, et al. A comprehensive review on the applications of coal fly ash[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 141: 105-121.
- [37] AHMARUZZAMAN M. A review on the utilization of fly ash[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2010, 36: 327-363.
- [38] 郑峰伟, 孙成, 陈富金, 等. 粉煤灰中氧化铝提取的研究进展[J]. 现代化工, 2018, 38(3): 37-41.
- ZHENG Fengwei, SUN Cheng, CHEN Fujin, et al. A review of extracting alumina from fly ash[J]. Modern chemical industry, 2018, 38(3): 37-41.
- [39] LUO Q, CHEN G, SUN Y, et al. Dissolution kinetics of aluminum, calcium, and iron from circulation fluidized bed combustion fly ash with hydrochloric acid[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52: 18184-18191.
- [40] 鲁敏, 熊祖鸿, 房科靖, 等. 粉煤灰基催化材料的研究进展[J]. 环境化学, 2019, 38: 297-305.
- LU Min, XIONG Zuhong, FANG Kejing, et al. Coal fly ash based catalytic materials: A review[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38: 297-305.
- [41] 程芳琴, 王波, 成怀刚. 粉煤灰提取高附加值有价元素的技术现状及进展[J]. 无机盐工业, 2017, 49(2): 1-4.
- CHENG Fangqin, WANG Bo, CHENG Huaigang. Research progress of extracting high added value elements from fly ash[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2017, 49(2): 1-4.
- [42] 毕进红, 刘明华. 粉煤灰资源综合利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- BI Jinhong, LIU Minghua. Comprehensive utilization of fly ash resources[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [43] DINDI A, QUANG D V, VEGA L F, et al. Applications of fly ash for CO₂ capture, utilization and storage[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2019, 29: 82-102.
- [44] 黄军同, 黄朝晖, 吴小贤, 等. 利用铝灰和粉煤灰铝热还原氮化制备铝镁尖晶石-刚玉-Sialon 复相材料[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(S2): 1255-1258.
- HUANG Juntong, HUANG Chaohui, WU Xiaoxian, et al. Preparation of spinel-corundum-sialon composite materials from aluminum dross and fly ash by aluminothermic reduction-nitrada-tion[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(S2): 1255-1258.
- [45] 李建铎, 吕硕, 韩金鹏, 等. 球形粉煤灰基高温定性复合相变蓄热材料的制备与性能[J]. 煤炭转化, 2018, 41(2): 73-79.
- LI Jianduo, LYU Shuo, HAN Jinpeng, et al. Preparation and properties of spherical fly ash based form-stable composite phase change material for high temperature thermal storage[J]. Coal Conversion, 2018, 41(2): 73-79.
- [46] 曹新鑫, 霍国洋, 王优, 等. 不同配比粉煤灰/聚丙烯复合材料的性能[J]. 机械工程材料, 2014, 38(4): 35-38.
- CAO Xinxin, HUO Guoyang, WANG You, et al. Properties of FA/PP composite in different proportions[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014, 38(4): 35-38.
- [47] SINGH K, SINGH S, DHALIWAL A S, et al. Gamma radiation shielding analysis of lead-fly ash concretes[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2015, 95: 174-179.
- [48] 雷旭, 宋慧平, 薛芳斌, 等. 粉煤灰基混凝土防腐涂料的制备及其性能研究[J]. 涂料工业, 2019, 49(1): 22-26.
- LEI Xu, SONG Huiping, XUE Fangbin, et al. Study on preparation and performance of fly ash-based concrete anticorrosion coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2019, 49(1): 22-26.
- [49] 崔崇, 刘少明, 程水明. 粉煤灰轻质隔热耐火砖的研制[J]. 粉煤灰综合利用, 2000, 14(4): 61-63.
- CUI Chong, LIU Shaoming, CHENG Shuiming. Study and manufacture of light weight heat-insulated and refractory fly ash bricks[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2000, 14(4): 61-63.
- [50] MOHARMED S, LEUNG T P, JASON F, et al. Enhanced properties of graphene/fly ash geopolymeric composite cement[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 67: 292-299.
- [51] BHATTACHARYA S S, KIM K H. Utilization of coal ash: Is vermitechnology a sustainable avenue? [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 1376-1386.