

粉煤灰建材化增值利用:最新技术与未来展望

时雅倩¹, 关渝珊¹, 葛伟哲¹, 夏岩¹, 王磊¹, 胡艳军², 王树荣¹

(1. 浙江大学 能源高效清洁利用全国重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江工业大学 能源与动力工程研究所, 浙江 杭州 310023)

摘要:粉煤灰是燃煤电厂产生的大宗固体残余物,其产量巨大且逐年增加。大量的粉煤灰不加以处理,则会对生态环境造成危害,也是一种资源的浪费。粉煤灰建材化利用技术可提高资源利用效率、减低环境风险,符合大宗固废高效低碳资源化利用的需求,助力实现国家“双碳”战略目标。利用粉煤灰生产绿色建筑材料,通过优化生产工艺与开发高新技术,可提高其建材化利用效率,进而实现粉煤灰的规模化与高值化利用。总结了粉煤灰的生产概况与物理化学特性,在此基础上,系统地介绍了近年来我国主要粉煤灰建材化利用技术类型,包括用作水泥生产原料、混凝土掺合料、粉煤灰砖、人造骨料、玻璃陶瓷材料、耐火保温材料 and 新型智能建筑材料等。进一步重点阐述粉煤灰在建材领域资源化利用的研究现状,分析了现阶段不同技术的适用性,总结粉煤灰基绿色建材制备最新技术及未来研究面临的挑战,详细介绍了粉煤灰应用在建筑材料中的作用机理,针对粉煤灰在建材化利用中存在的问题提出思考。最后,对粉煤灰基绿色建材的研发和应用前景进行展望,提出粉煤灰“传统建材化工艺的大规模消纳”与“新型建材化技术的高值化利用”并行研究,理论研究与工程实践互为支撑,为粉煤灰建材化利用研究提供参考。

关键词:粉煤灰;增值利用;火山灰活性;碱激发;功能性混凝土;绿色建筑材料

中图分类号: X773; TU50 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)06-2860-16

Value-added utilization of pulverized fuel ash as construction materials: State-of-the-art technologies and future prospects

SHI Yaqian¹, GUAN Yushan¹, GE Weizhe¹, XIA Yan¹, WANG Lei¹, HU Yanjun², WANG Shurong¹

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Institute of Energy and Power Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Pulverized fuel ash (PFA) is a by-product from coal-fired power plants. The generation of PFA is huge and increases yearly. A large amount of untreated PFA is harmful to the environment, and it is also a waste of resources. Recycling PFA as construction materials would improve resource utilization efficiency, reduce environmental risks, conform to the demand for high-efficient and low-carbon utilization of solid waste and help to achieve the national strategy goals of carbon peak and carbon neutrality. The utilization efficiency of PFA as construction materials could be improved by optimizing production processes and developing new technologies, which would promote its large-scale and high-value utilization. In this paper, the general situation and physical and chemical properties of PFA are summarized. Various value-added utilization technologies of PFA as construction materials, including raw materials for cement production, supplementary cementitious materials, bricks and blocks, artificial aggregates, glass-ceramic materials, fire-resistant insulation

收稿日期: 2023-09-30 修回日期: 2023-12-11 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ZZ23.1224

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52206174)

作者简介: 时雅倩 (2000—), 女, 山西晋城人, 硕士研究生。E-mail: shiyaqian@zju.edu.cn

通讯作者: 王磊 (1989—), 男, 浙江宁波人, 研究员, 博士生导师。E-mail: wanglei.leo@zju.edu.cn

引用格式: 时雅倩, 关渝珊, 葛伟哲, 等. 粉煤灰建材化增值利用: 最新技术与未来展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2860-2875.

SHI Yaqian, GUAN Yushan, GE Weizhe, et al. Value-added utilization of pulverized fuel ash as construction materials: State-of-the-art technologies and future prospects[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2860-2875.



移动阅读

materials, and new intelligent construction materials are comprehensively reviewed. This paper also introduces the research status of the utilization of PFA in construction materials, analyzes the applicability of different technologies, summarizes the latest technologies for preparing the PFA-based green construction materials and challenges faced in future research, provides detailed introductions to the mechanism of PFA application, and proposes thoughts on the problems existing in the utilization of PFA as construction materials. Finally, the further perspectives of the development of the PFA-derived low-carbon construction materials are highlighted. The study suggests that the “traditional large-scale consumption of PFA” and “high-value utilization of PFA” should be researched in parallel, and theoretical research and engineering practice should support each other, which would provide some scientific references for the sustainable management of PFA.

Key words: pulverized fuel ash (PFA); value-added utilization; pozzolanic activity; alkali excitation; functional concrete; green construction materials

“富煤、贫油、少气”是我国能源结构的基本特征,决定了我国长期以煤炭为主的能源消费结构。2021年我国原煤产量达41.3亿t,煤炭消费量占我国能源消费总量56%,占全球煤炭消费量53.8%^[1]。预计到2025年我国煤炭消费仍占50%左右,煤炭依然是支撑我国国民经济发展的主体能源^[2]。目前国内用于发电的煤炭总量保持稳定,略有下降趋势,但随着大气污染治理工作的标准化与制度化,以及火力发电厂除尘、脱硫、脱硝技术日益成熟,粉煤灰作为燃煤电厂的主要副产物,其产量逐年增加。据计算,每燃烧1t标准煤会产生138kg的粉煤灰,每发电1kW·h需要消耗300g原煤、产生41g左右的粉煤灰^[3]。2021年,我国粉煤灰产量高达7.9亿t,累计堆积量已超过30亿t^[4],成为我国最大的单一工业固体废物污染源。大量的粉煤灰堆存导致土地被大面积占用,同时造成土壤、水体和大气的污染,严重破坏生态环境,还会刺激人体器官,引发呼吸道感染,对人体造成伤害,因此,粉煤灰的处理处置和综合利用问题亟待解决。

目前,我国粉煤灰的综合利用率为68%~70%,粉煤灰特殊的理化性质和活性组分赋予其建材化利用的可能性。由于粉煤灰具有与水泥相似的化学组成与反应活性,可应用于水泥生产原料、混凝土掺合料、粉煤灰砖及人造骨料等,开发出低成本的固废衍生低碳绿色建材,有效缓解建筑行业碳排放量大的紧迫问题,从而实现大宗固废的资源化利用与建材行业的节能减排。目前传统建材领域粉煤灰消纳量较为可观,但生产工艺缺陷多,经济效益不佳,多属于低层次、低值化利用。对于新型粉煤灰基建材的研究主要有微晶陶瓷玻璃、轻质保温耐火材料和新型智能建筑材料等,这对于实现粉煤灰高值化利用有重要意义,具有广阔的应用前景。笔者详细介绍了粉煤灰的物理化学特性,整理归纳了近几年来国内外粉煤灰建材化利用技术的研究进展,分析了现有技术存在的问题,并

对我国粉煤灰资源化利用提出合理化建议,为实现粉煤灰高效绿色利用提供参考,推动我国粉煤灰高附加值利用技术的发展。

1 粉煤灰生产利用概况

粉煤灰是燃煤火力发电厂煤炭在锅炉中燃烧产生的固体废弃物。煤炭经1100~1700℃高温燃烧后,绝大部分的可燃物在锅炉内烧尽,而以灰分为主的不燃物与高温烟气掺杂,由于这类不燃物处在高温环境中,部分发生熔融,又在表面张力的作用下形成很多微小的球形颗粒,随锅炉尾部引风机抽出,熔融的细粒因受到极冷而形成玻璃体状态,最后通过除尘器的分离与收集,得到大小和形状不规则、呈分散状态的粉煤灰(PFA)^[5],又称飞灰或烟道灰。

2016年以来我国粉煤灰年产量不断增加,2021年达到7.9亿t,预计2024年将达到9.3亿t。我国粉煤灰的生产主要分布在北方和东北地区,其中山西、内蒙古等火电行业比较集中的地区生产规模较大。目前我国粉煤灰的利用率为68%~70%,还有一定的提升空间。在利用方式上(图1),2011年与2013年相比,利用方式差异不大,主要是生产水泥、制备混凝土、制造墙体材料(粉煤灰砖等)和筑路等。而到2019年,粉煤灰建材化途径增多,用作生产建材深加工产品的占比较大,仅次于水泥。粉煤灰的建材化利用方式正向多元化和高值化转变,但水泥和混凝土的生产,以及建材产品的加工制造仍是粉煤灰利用的主要途径。

2 粉煤灰的分类及理化性质

由于煤质、燃烧工艺、收集措施不同,粉煤灰在矿物组成、化学成分和微观形貌上具有一定差异,粉煤灰多种建材化利用方式对粉煤灰性质提出了不同的要求,明确粉煤灰的理化特性是实现其建材化增值利用的先决条件。

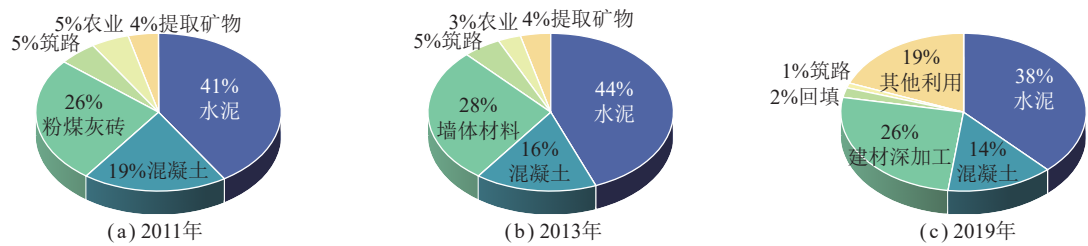


图 1 我国粉煤灰利用途径

Fig.1 Utilization pathways of PFA in China

2.1 按炉型分类

粉煤灰根据锅炉类型可分为煤粉炉粉煤灰(PC灰)和循环流化床粉煤灰(CFB灰)。PC灰是以优质煤粉为燃料产生的粉煤灰,炉内温度达1 200~1 600 ℃;CFB灰是循环流化床锅炉燃烧劣质煤(灰分≥30%)和煤矸石等产生的粉煤灰,炉内温度为800~900 ℃。与PC灰相比,CFB灰具有疏松多孔^[6]、细度低、比表面积大等特点,其主要矿物包括石英、硬石膏、赤铁矿、石灰和碳酸钙^[7];PC灰的主要矿物为石英和莫来石^[8],2者的主要化学组成见表1^[9]。CFB灰中含有较多的氧化钙和活性硅铝组分使其具有火山灰的

活性、需水性^[10]、膨胀性^[11]和自硬性等特殊性质,从而使重金属等污染物浸出和迁移方式也受到影响^[12],如遇水后生成的钙矾石(Aft)对部分重金属有置换固化作用^[13]。目前,我国PC灰用于建筑材料生产已实现规模化应用,而CFB灰受高硫、高钙、高烧失量等特性限制,工艺路线不够成熟,尚未得到规模化利用,多数仍以填埋堆存等方式处置。而随着CFB燃烧技术的推广应用,我国CFB灰的产量已高达0.8亿~1.5亿t/a,主要分布于山西、陕西、内蒙古等煤电大省^[14],随之带来的粉煤灰问题成为制约行业发展的瓶颈之一,亟需探索出高利用率的粉煤灰消纳路径。

表 1 PC灰与CFB灰的主要化学组成

Table 1 Main chemical composition of PC ash and CFB ash %

粉煤灰	质量分数						烧失量
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	
PC灰	37~58	24~37	1~7	0.4~3.0	1.1~6.6	0.4~1.5	4.8~8.0
CFB灰	27~50	14~30	3~13	1~13	4~18	0.2~2.0	2.3~15.0

2.2 按燃煤品种分类

根据煤的品种粉煤灰可分为无烟煤粉煤灰、烟煤粉煤灰、次烟煤粉煤灰和褐煤粉煤灰,其化学成分见表2。另外,美国材料与试验协会(ASTM)按照氧化钙含量的差异将粉煤灰分为C类和F类,其中C类粉煤灰是由次烟煤或褐煤燃烧产生的高钙粉煤灰(CaO质量分数在10%以上),F类粉煤灰是由烟煤或无烟煤燃烧产生的低钙粉煤灰(CaO质量分数在10%以下)。C类粉煤灰中CaO质量分数明显高于F类。因此,C类粉煤灰兼具水硬性与火山灰活性,而F型粉

煤灰则仅具备火山灰活性。

2.3 按化学成分分类

根据CaO质量分数不同,粉煤灰分为高钙粉煤灰和低钙粉煤灰;根据SiO₂质量分数不同,可分为高硅(SiO₂质量分数65%以上)、中硅(SiO₂质量分数50%~65%)和低硅(SiO₂质量分数50%以下)3类;根据SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃质量分数总和,粉煤灰又可分为I、II、III三个级别,I级粉煤灰SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃质量分数总和不低于50%,II级粉煤灰不低于40%,III级粉煤灰不低于20%,I级和II级粉煤灰活性更高。

表 2 不同种类原煤所产生粉煤灰的化学成分

Table 2 Chemical compositions of PFA derived from different types of coal %

煤种	质量分数									烧失量
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	
烟煤	20.0~60.0	5.0~35.0	10.0~40.0	1.0~12.0	0~5.0	0~4.0	0~3.0	0~4.0	0.5	0~15.0
无烟煤	43.5~47.3	25.1~29.2	3.8~4.7	0.5~0.9	0.7~0.9	0.2~0.3	3.3~3.9	—	1.5~1.6	8.2
次烟煤	40.0~60.0	20.0~30.0	4.0~10.0	5.0~30.0	1.0~6.0	0~2.0	0~4.0	0~2.0	1.1~1.2	1.8~2.7
褐煤	5.0~15.0	10.0~25.0	4.0~15.0	15.0~40.0	3.0~10.0	0~6.0	0~4.0	0~10.0	0.23~1.68	0~5.0

2.4 按物理性质分类

根据粒径不同可将粉煤灰分为 I、II、III、IV 四个级别,其最大直径分别为 0.08、0.15、0.30、0.60 mm;根据 pH 和钙/硫比不同^[15],粉煤灰可分为酸性灰 (pH=1.2~7)、弱碱性灰 (pH=8~9) 和强碱性灰 (pH=11~13);《粉煤灰混凝土应用技术规范》(GB/T 50146—2014) 依据粉煤灰的细度、需水量、烧失量、三氧化硫含量的不同,又将应用于水泥混凝土领域的粉煤灰分为 I 级、II 级和 III 级^[16]。

2.5 粉煤灰理化性质

煤灰外观和水泥相似,颜色随含铁量和残余碳量的不同而变化,大部分呈灰色。粉煤灰颗粒可为菱状、球状或多孔的不规则形状,多为圆球状,比表面积为 0.2~0.4 m²/g,孔隙率达 50%~80%^[17]。由于粉煤灰的多孔结构和球形粒径,松散状态下具有很好的渗透性,其渗透系数是黏性土的数百倍,其较大的比表面积和较高的孔隙率使得粉煤灰具有较高的吸附活性。粉煤灰密度在 1.9~2.9 g/cm³,是由二氧化硅玻璃球组成的微细颗粒集合体。粉煤灰细粒根据形状可分为球形颗粒与不规则颗粒,球形颗粒根据在水中沉降性能差异,又分为飘珠、轻珠和沉珠;不规则颗粒包括多孔状玻璃体、多孔碳粒以及其他碎屑和复合颗粒。粉煤灰中含有 0.2%~1.1% 的空心微珠 (密度仅为 1.4 g/cm³),堆积密度为 0.55~0.80 g/cm³。另外,粉煤灰最大吸水量为 417~1 038 g/kg,需水量比约为 106%。

粉煤灰的矿物组成随着燃烧温度和原煤中含铁矿物相的不同而变化。由于粉煤灰的生成经历了骤冷过程,使得其中存在较多致密的非晶相玻璃体结构,但同时存在 11%~48% 的晶体相物质^[17-18]。晶体相物质主要为莫来石和石英,以及含量较低的赤铁矿、刚玉、钙长石、磁铁矿等。矿物相组成如图 2 所示。

粉煤灰的活性主要来源于其理化性质产生的 3 类效应:① 火山灰效应。在常温 and 遇水条件下,粉煤灰中的硅铝质玻璃体与 Ca(OH)₂ 发生活性反应,生成具有胶凝作用的水化产物覆盖在颗粒表面,同时 Ca²⁺ 不断穿过产物形成的覆盖层,向内部迁移,与内部的活性硅铝发生反应^[18]。火山灰效应是粉煤灰的一种结构属性,主要取决于玻璃相颗粒的含量及特性,体现其发生水化反应生成胶凝产物的能力^[19];② 形态效应。由于大部分粉煤灰为玻璃微珠,且粒形完整、表面光滑、质地致密,这种形态效应可起到减水、致密、匀质及润滑作用,明显提升水泥制品性能;③ 微集料效应。粉煤灰中存在粒径较小的颗粒,可充当纳米材料,提高制品的匀质性及致密性,同时还可改善界面过渡区的微结构,消除或减少界面区的原生微裂缝及

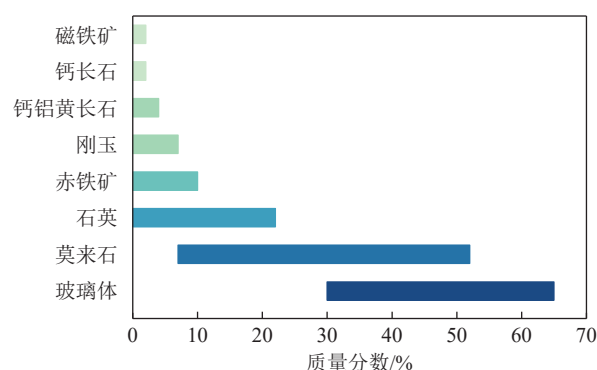


图2 粉煤灰的主要矿物相及其质量分数

Fig.2 Main mineral phases and contents of coal fly ash

应力集中,从而改善材料的结构强度。火山灰效应是化学效应,形态效应是物理效应,微集料效应结合了物理效应与化学效应,3 类效应彼此联系,相辅相成。

基于粉煤灰的物理化学特性和活性效应,可制造低成本的固废衍生低碳胶凝材料,从而有效缓解水泥建材行业高碳排放的紧迫问题。此外,粉煤灰中含有微量 Cd、Co、Cu、Ni、Pb 和 Hg 等重金属元素,在雨水冲刷作用下会淋出,污染土壤、水体和大气。因此,在实现粉煤灰建材化利用的同时,控制重金属的淋出也尤为重要。目前粉煤灰的建材化利用途径主要有:用作水泥生产原料、替代混凝土或水泥 (混凝土或水泥掺合料)、功能性混凝土、粉煤灰砖、人造骨料等 (图 3)。我国粉煤灰的利用率还有待进一步提高,粉煤灰高掺量和高附加值建材化利用 (如耐火保温材料和新型智能建筑材料等) 仍有很大的开发空间。

3 粉煤灰建材化增值利用

3.1 水泥熟料

利用粉煤灰生产水泥熟料是早期国内外粉煤灰综合利用途径之一,粉煤灰的化学组成与黏土 (主要为 SiO₂ 和 Al₂O₃) 相似,因而可替代黏土进行水泥生料组分配伍,用于水泥熟料生产。粉煤灰中的残余碳可在熟料烧制过程中作为燃料,从而减少燃料的消耗。粉煤灰制备水泥熟料工艺如图 4 所示,首先对粉煤灰进行分级预处理,去除杂质和过大的颗粒后,将粉煤灰与其他原料混合,送入窑炉中煅烧。煅烧过程中,原料先被分解成氧化物和化合物,然后进行还原反应,生成水泥熟料,再通过冷却、破碎等工艺,获得符合要求的水泥熟料,最后在熟料中添加石膏并混合研磨,得到最终的水泥产品。与传统烧制水泥工艺相比,粉煤灰配料烧制水泥熟料工艺的烧成温度可降低 80~100 ℃^[20],且相比黏土制成的硅酸盐水泥,粉煤灰水泥具有质地细腻、不易开裂、干燥收缩率低、水化热低、抗硫酸盐性能好等优势^[21]。粉煤灰生产水泥熟

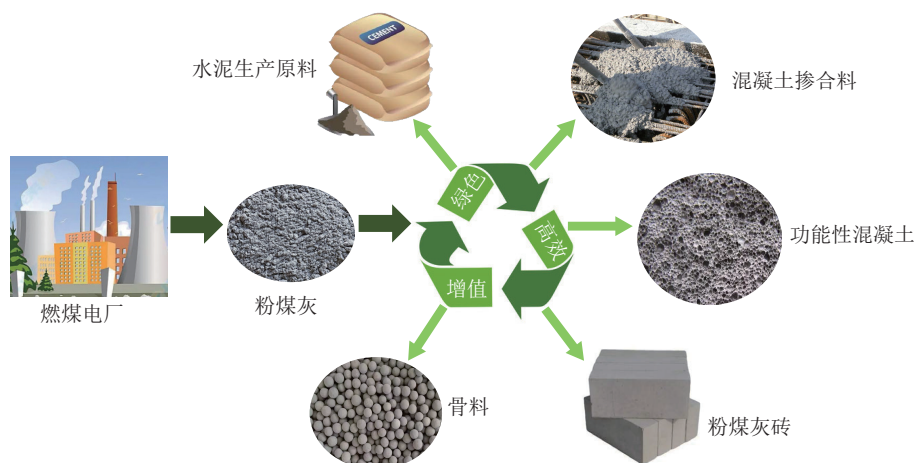


图3 粉煤灰的主要建材化利用途径

Fig.3 Main ways of building material utilization of PFA

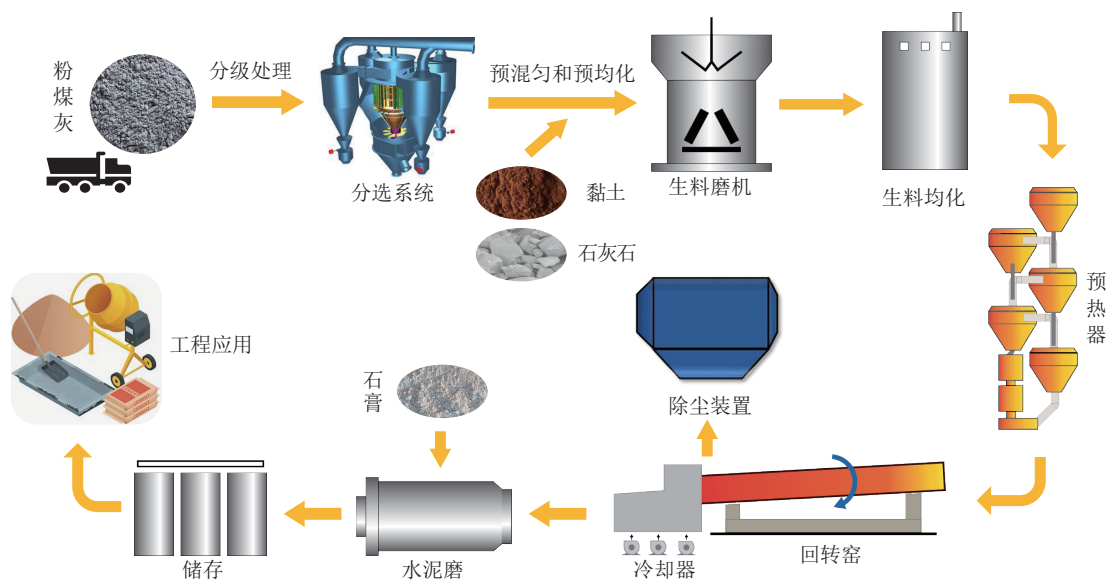


图4 粉煤灰烧制水泥工艺流程

Fig.4 Process flow of PFA fired cement

料可在不影响水泥产品质量和性能的同时实现增产节能。此外,烧前对粉煤灰进行细磨加工处理,可显著改善混合熟料的易烧性,降低熟料烧制停留时间。表3为粉煤灰用于水泥熟料生产的研究现状,该研究与应用多在20世纪70—90年代^[22-23],近些年粉煤灰更多地用于水泥或混凝土的掺合料,这与煤炭燃烧技术的发展有关,煤的燃烧效率提高,粉煤灰含碳量降低,用于水泥熟料烧制的节能效益也会随之下降。同时,碳含量下降使得粉煤灰的火山灰活性相对增强,可提高其用作水泥或混凝土掺合料时的容许掺量,相比水泥熟料烧制,粉煤灰用作掺合料的生产工艺更加简单,更好实现粉煤灰的大量消纳和方便处置。

3.2 水泥或混凝土掺合料

粉煤灰还可取代水泥熟料,用作水泥或混凝土掺合料,从而降低水泥熟料的消耗,同时提高混凝土的

流动性、力学性能与耐久性能。表4为粉煤灰用做水泥或混凝土掺合料的研究现状。

将粉煤灰掺入水泥,除了其自身形态带来的匀质作用和润滑作用,粉煤灰还可与水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成C-S-H凝胶和钙矾石^[29],如图5所示,这些水化产物可填充基体空间,从而促进水泥基材料的强度发展,提高其抗渗性能^[9]。粉煤灰水泥与普通硅酸盐水泥相比有一定的优势:①因为粉煤灰水泥中含有较高的活性硅酸盐,其中的细小颗粒可填充水泥基体间的孔隙,提高抗压强度;②因为粉煤灰水泥中的矿物质能够愈合混凝土中的裂缝,制成的混凝土抗水渗透性、抗冻融性、耐化学侵蚀性等性能显著优越于普通水泥混凝土,具有极高的耐久性;③粉煤灰水泥的生产成本和碳排放量更低^[30]。粉煤灰水泥主要作用在大体积工程和水利工程中,可降低工程

表3 粉煤灰用于水泥熟料生产研究现状

Table 3 Research status of PFA used in cement clinker production

生料组成	粉煤灰性质(质量分数/%)	处理方法	年份及参考文献
粉煤灰、石灰石、黏土、铁粉	SiO ₂ (45%~57%)	煅烧温度900~1 350 ℃	1994, [24]
	Al ₂ O ₃ (18%~27%)		
	Fe ₂ O ₃ (6.5%~11.5%)		
	CaO (1.5%~8.9%)		
粉煤灰、石灰石、黏土、铁粉、硅质校正原料(黄河沙)	SiO ₂ (48%~55%)	粉煤灰掺量5.4%~6.4%	1996, [25]
	Al ₂ O ₃ (26%~29%)		
	Fe ₂ O ₃ (5.1%~6.1%)		
	CaO (2.2%~4.5%)		
粉煤灰、石灰石、砂岩、铁粉	SiO ₂ (50.78%)	—	1998, [26]
	Al ₂ O ₃ (22.64%)		
	Fe ₂ O ₃ (4.68%)		
	CaO (5.24%)		
粉煤灰、石灰石、铁粉	SiO ₂ (57%~60%)	生料控制指标: CaO质量分数43.8%, 细度6%~8%	2001, [27]
	Al ₂ O ₃ (20%)		
	Fe ₂ O ₃ (3.7%~4.2%)		
	CaO (2%~4%)		
粉煤灰、石灰石、二水石膏	SiO ₂ (51.06%)	粉煤灰掺量28%, 最佳烧制温度1 300 ℃, 制备出高硅硫铝酸盐水泥熟料	2006, [28]
	Al ₂ O ₃ (30.54%)		
	Fe ₂ O ₃ (3.49%)		
	CaO (2.98%)		
粉煤灰、石灰石、硅石、矿渣、铜渣	SiO ₂ (60~66%)	粉煤灰掺量8%~20%, 煅烧温度1 350 ℃	2015, [22]
	Al ₂ O ₃ (9.6%~26.0%)		
	CaO (1.9%~2.4%)		

表4 粉煤灰用做水泥或混凝土掺合料研究现状

Table 4 Research status of PFA as cement or concrete admixture

研究方向	原料	处理方法	效果	年份及参考文献
粉煤灰用作水泥掺合料	粉煤灰、市场水泥厂基准熟料	粉煤灰掺量8%~40%	在30%掺量范围内, 可提高粉煤灰水泥1~2个标号	2000, [50]
粉煤灰用作水泥掺合料; 粉煤灰活化	粉煤灰、普通硅酸盐水泥、 自配矿物激发剂	矿物激发剂掺量8% 石膏掺量3%	矿物激发剂起到早强作用, 石膏可 弥补后期强度不足的问题	2010, [51]
粉煤灰用作水泥掺合料	粉煤灰、氯氧镁水泥	粉煤灰掺量20%~40%	掺入粉煤灰会延长氯氧镁水泥的初、 终凝时间, 粉煤灰掺量20%可提高氯 氧镁水泥28 d的强度	2015, [36]
粉煤灰用作水泥掺合料; 粉煤灰活化	超细研磨后的CFB灰与 PC灰、水泥	粉煤灰与水泥混合比1:1	超细粉煤灰水泥块强度提升, CFB 灰提升更显著	2018, [43]
粉煤灰用作混凝土掺合料; 粉煤灰活化	C类粉煤灰、氧化钙、 钠基活化剂、纳米SiO ₂	粉煤灰80%	制成的混凝土抗压强度16.18 MPa	2018, [52]
粉煤灰用作混凝土掺合料	粉煤灰、轻烧氧化镁、 粗细集料	粉煤灰掺量40%	掺入粉煤灰的氯氧镁水泥混凝土 300 d抗压强度39.99 MPa, 高于普通 硅酸盐水泥混凝土	2021, [34]
粉煤灰活化	粉煤灰	粉磨活化粉煤灰	制备出粒径分布在7 μm以下, 比表 面积为651 m ² /kg的超细粉煤灰	2015, [42]
粉煤灰活化	粉煤灰、石灰粉、磷石膏、 水泥	活化处理: 化学激发、 水热激发、机械磨细	活化处理后, 粉煤灰早期和后期活 性提高, 可提高掺量	2017, [53]
大掺量粉煤灰混凝土	Ⅱ级粉煤灰、42.5级普通硅 酸盐水泥、粗细骨料	粉煤灰掺量50%~60%	大掺量粉煤灰混凝土强度与基准混 凝土强度相当, 抗碳化能力提高, 收缩性能改善	2013, [40]
大掺量粉煤灰混凝土	F级粉煤灰、水泥、硅粉	粉煤灰掺量20%~100%	80%粉煤灰取代水泥, 28 d抗压强度 可达到70 MPa	2018, [49]
大掺量粉煤灰混凝土	F级粉煤灰、普通硅酸盐 水泥、粗细骨料	粉煤灰掺量0~60%	40%掺量下, 使用性能不受影响	2020, [39]

造价,提高水利工程质量^[31]。但粉煤灰水泥大多有早期强度低的缺点,因为粉煤灰中的玻璃体极其稳定,受 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 侵蚀和破坏的速度慢,所以反应速率慢。有研究表明^[32],粉煤灰在水泥水化初期未参与水化反应,仅起到充填作用,养护 7~28 d 后粉煤灰颗粒才发生水化反应生成凝胶产物。此外,粉煤灰替代部分水泥会使得水泥含量减少,水泥浆体的相对浓度降低,即水灰比增大,不利于水泥的水化作用,从而降低水泥的水化热,延长水泥的初、终凝时间,因此粉煤灰水泥的强度发展主要是在后期。利用粉煤灰制备氯氧

镁水泥 (MOC) 复合材料也是近些年的新技术^[33]。氯氧镁水泥是具有一定浓度的氯化镁溶液和活性氧化镁粉末调配后得到的气硬性胶凝材料,具有强度高、耐磨、耐高低温等优势^[34],但耐水性较差,硬化体在水中会逐渐失去强度,潮湿环境下会出现返卤泛霜等现象^[35]。粉煤灰的加入,可提高氯氧镁水泥的耐水性,即使加入 40% 的粉煤灰,硫酸盐浸渍后的氯氧镁水泥强度也很高,是普通硅酸盐水泥的 1.5 倍^[36]。粉煤灰可优化氯氧镁水泥原有的孔隙结构,增大孔隙率,改善体积稳定性,从而提高氯氧镁水泥的耐水性^[33]。

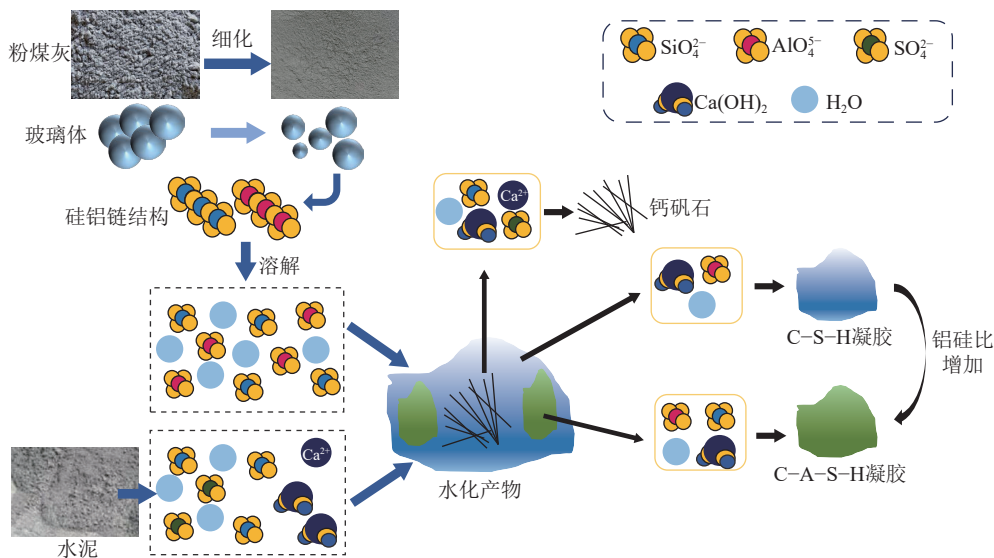


图 5 粉煤灰与水泥水化反应机理

Fig.5 Mechanism of hydration reaction between PFA and cement

在混凝土中掺入粉煤灰,同样可降低水化热,防止由于内部温升、表面过热而产生裂缝^[37],并强化混凝土的抗漏渗、耐侵蚀性能。粉煤灰的微小颗粒掺入混凝土,充填到微小孔隙中,起到微集料作用,同时表面发生水化反应生成凝胶产物,物理充填和水化反应产物充填共同作用。粉煤灰的微小颗粒还可替代孔隙中的水分,减小混凝土施工过程中的用水量,但当颗粒的粒径过小时,会使比表面积增大,对水的亲和性更好,用水量反而增大。粉煤灰的火山灰效应使其消耗混凝土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,产生额外的水化产物,填充混凝土的基体空间,使混凝土结构更加密实^[38]。粉煤灰混凝土也存在早期强度低问题,常温下粉煤灰的水化反应慢,标准养护 28 d 不足以使粉煤灰混凝土的性能达到最佳^[39]。但其后期强度发展较同龄期基准混凝土更好,当粉煤灰掺量为 0~30% 时,标准养护 60 d 后粉煤灰混凝土强度高于同龄期基准混凝土^[40]。混凝土中粉煤灰的掺量阈值通常为 30%,一般安全容许掺量在 15%~25%,粉煤灰掺量过高时,混凝土孔隙溶液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不足以激发粉煤灰的火山灰活性,严

重影响混凝土强度发展与耐久性能。

为克服粉煤灰对水泥及混凝土早期强度发展的负面作用,促进粉煤灰的回收利用,可通过减小粒径、提高细度来提高粉煤灰的火山灰活性^[41]。相同质量下,粉煤灰颗粒越细,比表面积越大,与水的接触面积越大,且其中的活性成分与晶体相也会在细化过程中打散、剥离,为水化产物的生成提供成核核心,极大提高了反应速率,促进水化反应的发生^[42]。超细化处理后的粉煤灰作为水泥掺合料,可提升粉煤灰水泥材料的早期力学性能。标准养护 3 d 的超细粉煤灰水泥抗压强度达 18~23 MPa,是普通粉煤灰水泥的 240% 以上^[43]。外加碱的方式也可提高粉煤灰活性,抑制 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的额外产生,促进早期钙矾石的生成,从而克服粉煤灰掺入后导致的凝结时间长和早期强度低问题。

提高粉煤灰在水泥及混凝土中的掺量也是众多学者的研究重点,这对于消纳巨量粉煤灰而言具有重要意义。高容量粉煤灰 (HVFA) 常用于铺路混凝土中,粉煤灰发生火山灰反应产生的 C-S-H 有助于微观裂

纹的密封,提高混凝土材料的力学性能和自愈能力^[44]。且当粉煤灰用量增加时,混凝土的自愈能力会增强,含有50%~60%粉煤灰的铺路混凝土表现出优异的强度、耐磨性^[45]和工作性^[46],干燥收缩率也会降低^[47]。HVFA混凝土路面在270 d后仍表现出增强的抗压强度、耐磨性、抗氯化物扩散性和防潮能力^[48]。目前已有学者用粉煤灰取代超过80%的水泥(大多数试验中黏结剂质量分数为50%,即40%粉煤灰和10%水泥)制备超高体积粉煤灰混凝土(UHVFA),28 d的抗压强度可达65 MPa,适合普通结构用途^[49]。

综上,目前国内外对于粉煤灰在水泥和混凝土中的应用,研究重点在于粉煤灰的超细粉磨技术和活化技术,随着技术的提高,粉煤灰的掺量也将不断提高,从而进一步提高粉煤灰水泥产品的市场价值。

此外,碱激发胶凝材料,包括地质聚合物,是使用具有火山灰活性或水硬性的原材料(粉煤灰、矿渣、偏高岭土等硅铝质材料)作为前体物质,与一定的碱性激发剂(水玻璃、NaOH、KOH等)进行中和反应制得的新型无机胶凝材料^[54],其性能与普通硅酸盐水泥相当。表5为粉煤灰用于碱激发胶凝材料的研究现状。FERNÁNDEZ等^[55]提出了粉煤灰碱激发反应的过程,在早期阶段,碱溶解粉煤灰球体的部分外壳,使

被困在较大颗粒中的小颗粒暴露在碱性环境中,随着反应的进行,碱液逐渐进入玻璃体内部,活性玻璃体相在内外双向碱液的侵蚀作用下发生溶解,形成离子态单体在碱液中扩散,粉煤灰中的活性硅铝在碱性条件下溶出形成含硅和铝的活性单体,进一步发生凝胶化反应,活性单体结合形成低聚态凝胶,低聚体之间相互结合形成具有三维网络结构的高聚态凝胶^[56],最后凝胶逐步硬化。碱激发胶凝材料具有与普通硅酸盐水泥相似的工程性能^[57],被认为是普通硅酸盐水泥的潜在替代品^[58],可用作砂浆、砖块、混凝土等建筑材料,具有早期强度高、耐高温、耐久性好、抗化学侵蚀、能固化重金属离子等优势,使用NaOH和Na₂SiO₃联合激发粉煤灰生碱激发反应,最终制品强度能够达到44 MPa^[59]。由于碱激发材料较低的碳足迹和极强的废弃物处置能力,可作为传统水泥基材料的可持续替代物而受到广泛关注^[60],碱激发胶凝材料研究已进行了数十年,主要集中在反应机理和性能发展规律,经大量实验室小试研究,已阐明其反应机理,并掌握性能调控规律,但只有少量工程上大规模应用,尤其对碱激发材料制备混凝土的构件性能和施工性能研究不足,且相关材料标准和设计、施工规范缺乏,这是目前碱激发胶凝材料研究需要克服的主要阻碍。

表5 粉煤灰用做碱激发胶凝材料研究现状

Table 5 Research status of PFA as alkali activated cementitious material

原材料	激发剂类型	处理方法	处理效果	年份及参考文献
粉煤灰	CaO和Ca(OH) ₂	添加3%的CaO或Ca(OH) ₂ , 环境温度固化	7 d抗压强度可达29 MPa	2009, [61]
PC灰	NaOH-Na ₂ SiO ₃ 混合溶液	养护温度65 ℃, NaOH浓度为15 mol/L, 且Na ₂ SiO ₃ /NaOH=1(摩尔比)	28 d抗压强度达70 MPa	2009, [62]
PC灰	NaOH-Na ₂ SiO ₃ 混合溶液	Na ₂ SiO ₃ /NaOH摩尔比为2.5, 养护温度100 ℃, 养护24 h	28 d抗压强度达56 MPa	2012, [63]
PC灰	NaOH	NaOH质量分数14%、养护温度115 ℃, 养护时间24 h	抗压强度达120 MPa 抗折强度达15 MPa	2015, [64]
F类粉煤灰	Ca(OH) ₂	通过添加不同含量的Ca(OH) ₂ 调控 (Na+K+Ca)/Al摩尔比	(Na+K+Ca)/Al < 0.95(摩尔比)时, 主要生成(C,N)-A-S-H凝胶, 有利于强度的提升	2019, [65]
高钙粉煤灰, 再生砖粉	NaOH-Na ₂ SiO ₃ 混合溶液	28 d环境温度养护	Na ₂ SiO ₃ /NaOH摩尔比为2.5时, 高钙粉煤灰基体聚合物抗压强度最佳	2020, [59]
粉煤灰, 煤矸石	NaOH	机械共磨预处理, 养护温度90 ℃, 养护24 h	制备高性能轻质地聚物砂浆	2022, [54]

3.3 功能化混凝土

为满足日益复杂的工程需求,需要通过调控添加剂种类和成分配比来实现混凝土的性能优化,实现混凝土的高强度、高性能和多功能化发展。掺入粉煤灰可以制备功能化混凝土,如超高性能混凝土、自密实混凝土、泡沫混凝土及加气混凝土等,如图6所示。

超高性能混凝土(UHPC)是一种具有高强度、

高韧性、低孔隙率、高耐久性的水泥基材料,力学性能和耐久性能明显优于普通混凝土和其他高性能混凝土。UHPC的制备原理是剔除粗骨料,优化细骨料级配,从而增大基体的密实度。掺入超细活性矿物掺合料(如粉煤灰、硅灰等)可降低孔隙率,优化内部结构^[66]。粉煤灰微珠良好的形态效应可极大减少蓄水量,提高流动度,加之微珠火山灰活性更高,微珠效应

与火山灰活性双重效应有效提高混凝土抗压强度。粉煤灰的加入还降低了 UHPC 的生命周期成本,减少了碳足迹和能源消耗。研究表明,采用不合格粉煤灰

与矿渣制备的 UHPC,抗压强度可达 121.4 MPa,抗折强度可达 27.1 MPa,还具备较低的自收缩率和重金属浸出^[67]。

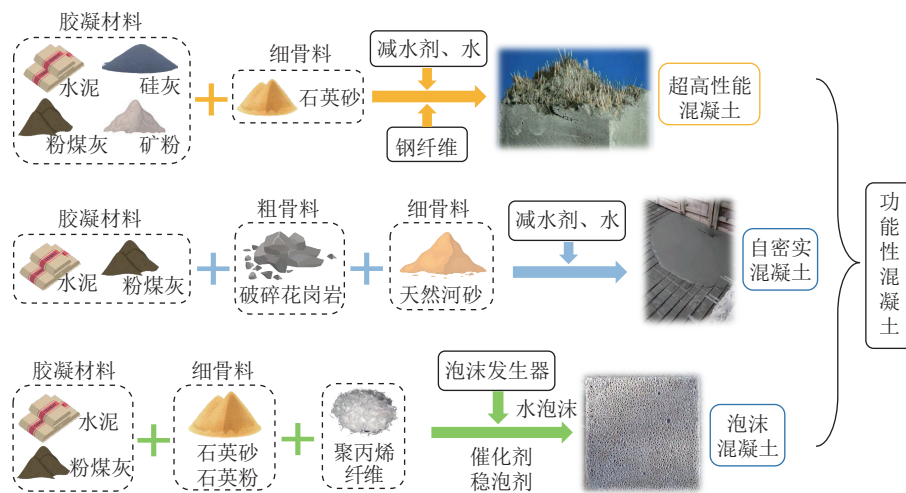


图 6 粉煤灰基功能性混凝土工艺流程

Fig. 6 Simplified process flow diagram of PFA based functional concrete

自密实混凝土是一种在自身重力作用下,能够流动、密实,自行填充模板和空隙,不需要附加振动的混凝土,具有快速浇筑、优质、养护要求低、结构性能好、耐久性好、黏结性好、表面修整和振动工作量少等优点。传统的自密实混凝土均采用优质材料制造,不承担任何风险,但生产成本过高,限制了其推广应用。利用粉煤灰制备自密实混凝土时,粉煤灰的火山灰活性会促进二次水化作用,改善混凝土的耐久性和稳定性^[68]。粉煤灰还可在混凝土中起到填充效应以降低孔隙率,提高抗渗透能力。

以水泥和粉煤灰为主要原材料,掺入石英粉和石英砂,采用化学发泡的方法可制备出新型固废泡沫混凝土,其与普通混凝土相比,特别之处在于不使用粗集料,并引入大量均匀分布的气泡。粉煤灰中一定含量的空心微珠,还可进一步提高混凝土的保温性。粉煤灰泡沫混凝土兼具轻质、保温、耐火等优点,但也存在强度低、掺量受限等问题,有研究表明,随着粉煤灰掺量的增加,粉煤灰泡沫混凝土 7、14 和 28 d 抗压强度呈先提升后降低的趋势,在粉煤灰掺量 30%~40% 时抗压强度最大^[69]。此外,以粉煤灰为主要原料(占 70%),辅以石灰、水泥、石膏、发泡剂等材料,还可制成粉煤灰加气混凝土^[70],具有质量轻、保温性好、阻燃性好等优点,可用作保温、维护、隔断及承重墙体。

3.4 粉煤灰砖

我国房屋墙体材料 70% 以上用的是黏土砖,黏土砖的生产与利用具有较高的能耗。粉煤灰砖由粉煤灰、沙子和水泥或石灰作为黏结材料组成,具有轻质,

抗压强度高,耐久性好,制作简单等优点。在施工过程中,增加粉煤灰砖的使用,可降低工程预算、减轻劳动强度、提高工程效率、缩短工期。粉煤灰砖主要有烧结粉煤灰砖和免烧蒸压粉煤灰砖 2 种。烧结砖通过煅烧方式制备,粉煤灰和黏土等原材料经过配料、混合、煅烧等一系列处理过程,最终制成砖材。用粉煤灰与煤矸石在 1 150 °C 的烧制温度下制备的砖块,抗压强度能够达到 24.4 MPa^[71]。超细粉煤灰制备的砖块则具备更优越的抗压强度、导热系数及致密性,其抗压强度可达 30 MPa^[72]。免烧蒸压粉煤灰砖是将粉煤灰和生石灰配合一定碱性激发剂,或适当添加一些骨料及石膏等,经过混合、搅拌、轮碾等工艺流程,在常压或高压蒸汽养护条件下制备而成^[31],如图 7 所示。免烧蒸压粉煤灰砖隔热效果好,有利于实现建筑节能,且刚度高,渗透能力好,可广泛取代黏土砖^[38]。由于免烧蒸压粉煤灰砖相比烧结砖表现出的节能环保优势,是我国目前较普及的一种绿色低碳墙体材料。

在免烧蒸压粉煤灰砖制备体系中,粉煤灰生成的主要水化产物为 C-S-H 等凝胶,从而形成致密的结构,产生一定的强度^[73],凝胶产物含量的增加可提高制品抗压强度^[74]。目前国内外对于免烧蒸压粉煤灰砖的制备研究,抗压强度多在 10~20 MPa,很少超过 25 MPa^[75-77]。学者们常采用提高粉煤灰细度、优化蒸压养护温度和压力以及配合添加剂等方式提高免烧蒸压粉煤灰砖的抗压强度和粉煤灰掺量。利用较细的粉煤灰,在 130 °C 的养护温度下,可制得抗压强度

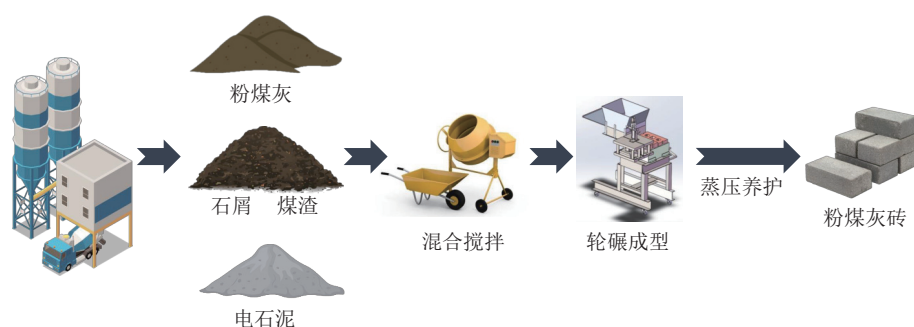
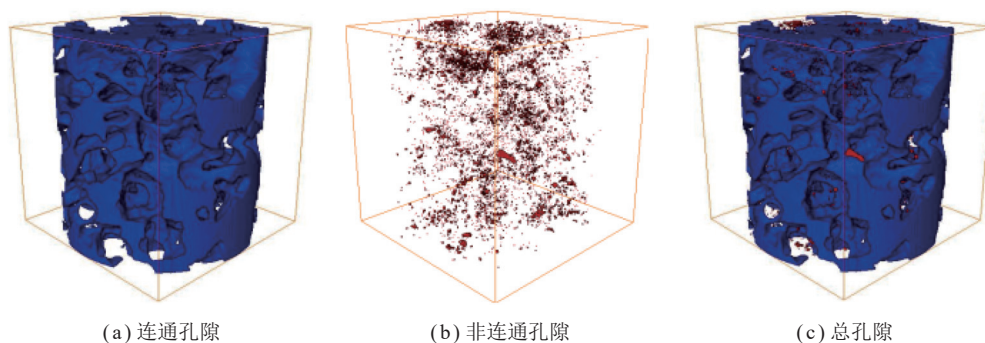


图7 免烧蒸压粉煤灰砖生产工艺流程

Fig.7 Production process flowchart of autoclaved PFA brick

达 47 MPa 的免烧蒸压粉煤灰砖^[78]; 在粉煤灰原料中掺入水泥、石灰和石膏, 使水泥促进粉煤灰的水化反应, 石膏提供硫酸根离子, 丰富水化产物, 制得抗压强度近 24 MPa 的免烧蒸压粉煤灰砖^[79]; 利用增压法可制备高掺量粉煤灰蒸压透水砖, 粉煤灰掺量高达 50%,

如图 8 所示, 制品中连通孔隙占比较高, 透水性能优异^[80]。在实际运用中, 部分免烧蒸压粉煤灰砖生产企业可以实现 90% 的粉煤灰使用量, 因此粉煤灰的高掺量利用可聚焦于免烧蒸压粉煤灰砖, 通过优化原料集配和生产工艺生产出高品质、高强度的粉煤灰砖。

图8 粉煤灰蒸压透水砖的孔隙 3D 分布^[80]Fig.8 3D distribution diagram of pores in PFA autoclaved permeable bricks^[80]

3.5 轻骨料、陶瓷玻璃材料

利用粉煤灰生产人造轻骨料和陶瓷玻璃等制品, 具有成本低廉、性能优异、轻质、导热系数小、热稳定性强等特性, 利用价值较高^[81]。

粉煤灰陶粒以粉煤灰为主要原料 (占 85% 左右), 掺入适量石灰 (或电石渣)、石膏、外加剂等, 通过混匀、成球、焙烧或养护 (免烧) 制备而成的一种人造轻骨料, 粉煤灰免烧陶粒制备流程如图 9 所示。粉煤灰陶粒具有轻质 (堆积密度 $< 1\,000\text{ kg/m}^3$)、高强 (抗压强度一般 1.5~15 MPa, 高强粉煤灰陶粒可达 25~40 MPa^[82])、多孔、保温隔热、抗酸抗碱、抗冻抗震等优良性能, 已广泛应用于建筑建材、环保、生态、化工等领域^[83]。利用粉煤灰制备的球形多孔活性骨料应用于混凝土, 具有与市场商业轻骨料制备的轻质混凝土相当的强度和水合度^[84], 在混凝土砌块和大型工程外墙板等新型墙体材料方面有极好的应用效果^[31]。

泡沫玻璃是由碎玻璃、发泡剂和改性剂等, 经粉碎混合、熔化发泡等工艺制成的多孔玻璃材料。使用

粉煤灰以及碎玻璃制成的泡沫玻璃, 具有质量轻、刚度高、抗变形、保温隔热等优点, 其形状可按照实际工程使用需求定制, 实用性广^[38]。泡沫陶瓷材料也是一种具有高温特性的多孔材料, 其孔径从纳米级到微米级, 气孔率在 20%~95%, 使用温度可高达 1 600 ℃。以粉煤灰为原料制备的新型泡沫陶瓷, 在烧结过程中会经历自发泡反应, 经 1 200 ℃ 烧结得到的泡沫陶瓷具有完全封闭孔结构, 表观密度为 0.41 g/cm^3 , 孔隙率为 83.60%, 抗压强度为 8.3 MPa, 导热系数为 $0.098\,3\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 同时粉煤灰中内源有害重金属被封装于玻璃相中, 重金属浸出远低于标准限值^[85]。

微晶玻璃又称玻璃陶瓷, 是特定组成的基础玻璃在热处理过程中控制晶化而制得的微晶玻璃, 含有大量微晶相及玻璃相。微晶玻璃是既有玻璃的基本性能, 又有陶瓷的多晶特性, 集合陶瓷与玻璃的特点, 具有优良的力学、电学、热学、物理和化学性能^[86]。粉煤灰微晶玻璃是将粉煤灰进行晶化热处理后, 玻璃重结晶, 从单一的玻璃变成微晶玻璃。与天然石材相比,

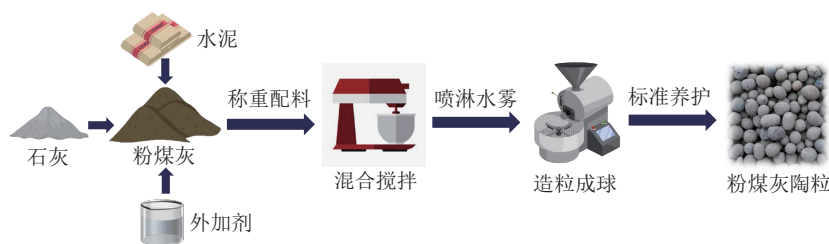


图9 粉煤灰陶粒制备流程

Fig.9 Preparation process of PFA ceramsite

粉煤灰微晶玻璃硬度更高,耐磨性更强,因此可用于建筑物的内墙以及地面等装饰施工^[87]。此外,以粉煤灰和废玻璃为主要原料,添加硼砂和碳酸钙作为助溶剂和发泡剂,利用直接发泡法可制备泡沫微晶玻璃,具有较低的堆积密度 (0.46 g/cm^3)、较好的抗压强度 ($> 5 \text{ MPa}$) 和较低的热导率 ($0.36 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)^[88]。

3.6 轻质耐火保温材料

粉煤灰高温性能稳定,粉煤灰中的 SiO_2 和 Al_2O_3 是其耐高温的主要来源^[89],其耐火度高达 $1\ 610 \sim 1\ 630 \text{ }^\circ\text{C}$,可用于制备轻质耐火材料^[90]。在建筑材料中掺入适量的粉煤灰可有效改善其耐高温性能^[91]。以粉煤灰为主要原材料,掺入适量的煤矸石和铝灰,通过高温烧结可以制备出粉煤灰基耐火建筑材料,抗压强度可达 33.6 MPa ,耐 $1\ 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温,制品的力学性能和使用性能较好。优选粉煤灰 60%、铝灰 40% 的配料比(质量分数),制备的轻质耐火保温材料,体积密度 0.95 g/cm^3 ,显气孔率 60.57%。进一步对导热系数进行线性拟合,证明该轻质耐火材料在 $700 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ 的隔热性能较好,导热系数约为 $0.24 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,最高可在 $1\ 250 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右使用,用于工业窑炉和其他热工设备的隔热层^[92]。此外,粉煤灰里有漂珠、沉珠和磁珠等,其中漂珠质轻,可用于制备体积密度更低的轻质保温材料。目前,我国多利用晋北或内蒙古的高铝粉煤灰生产高铝隔热保温制品,如将漂珠与黏土材料混合,制备的轻质黏土砖,其耐火度可达 $1\ 630 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[93]。以高铝粉煤灰为原料,采用高温发泡法可制备出粉煤灰隔热耐火砖,其体积密度小 (485.2 kg/m^3),抗压强度高 (6 MPa) 且具有优异的隔热保温性能^[94]。

3.7 新型智能建筑材料

智能建筑材料指对生命系统进行模仿,能够感知环境的变化,并据此对材料参数进行改变,从而与环境相适应的一种复合型建筑材料。利用粉煤灰和植物纤维能制备出可控制建筑温度和湿度的轻质废物基石膏复合材料^[95],如图 10 所示,其中质量分数在 $0 \sim 80\%$ 的粉煤灰作为部分石膏替代品。结果表明粉煤灰可有效用作湿热优化剂,而植物纤维可作为吸湿

剂和加固剂,抵消产生的孔隙造成的抗压强度损失,最终制成复合材料的导热率为 $0.26 \sim 0.57 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,湿缓冲值 $0.41 \sim 1.71 \text{ g/(m}^2 \cdot \% \text{RH)}$ 。复合多功能建材可在满足建材的主要功能前提下,兼具其他各种优良性能,融合轻质高强、防水防潮、耐火耐高温、抗腐蚀能力强等优点,配套其他高科技技术,在性能、用途、功能、安全和舒适度上做出重大突破,实现对现代化建筑的调控和完善,既顺应经济环保、绿色节能的发展趋势,又实现粉煤灰等固废的高值化利用,使其作为有明显竞争力的建筑材料,在工程应用和市场上占重要地位。

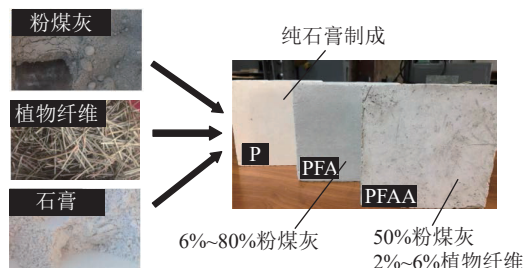


图 10 轻质废物基石膏复合材料

Fig.10 Lightweight waste-based gypsum composites

4 粉煤灰建材化回收面临的挑战

粉煤灰建材化回收利用有利于节能减排,缓解生态环境污染,但是目前仍存在空间供需不平衡、政策标准不完善、粉煤灰组分复杂、反应活性低、重金属溶出风险等问题有待解决。

(1) 供需不平衡与政策标准缺乏。我国中西部地区粉煤灰产量巨大,利用率却有限,大多通过堆积填埋处理;而东部地区粉煤灰利用率较高,却受储存运输成本的限制,造成供需不平衡问题。目前粉煤灰利用的政策法规和相应标准较为笼统,尚无法结合各地区的实际情况综合利用,且粉煤灰的处置防护措施有待完善,无害化处理技术欠缺,其资源化利用的发展受到一定阻碍^[96-97]。因此需要制定激励政策,完善标准规范,加大研究力度,拓宽应用范围,改善粉煤灰堆积占地和环境污染问题,实现资源可持续发展。

(2) 粉煤灰中的杂质对其建材化利用的负面影响。粉煤灰化学成分和矿物组成复杂,不同种类粉煤灰的理化特性差异较大,适用场景也各不同,需要针对不同类型粉煤灰研发相应的处理工艺和设备,现有的ASTM粉煤灰分类标准已无法满足需求。此外,粉煤灰组成因煤的来源和燃烧过程的不同而变化,其中杂质的存在对建材化利用提出挑战。粉煤灰中的常见杂质为硬石膏和未燃碳,会导致混凝土和易性降低,需水量增加,凝结时间延迟,影响强度发展,并在混凝土基体内产生空隙和薄弱区域,降低混凝土的承载能力,甚至引起膨胀和开裂,增加过早失效风险,同时粉煤灰具有高硫酸盐含量,导致硫酸盐侵蚀混凝土结构,影响混凝土的耐久性^[60]。虽然目前已有分离手段来减轻粉煤灰中杂质的影响,但这将显著增加实施成本。

(3) 高掺量与高附加值利用难度大。目前粉煤灰建材化领域大多为低值利用,高掺量和高附加值利用多处于试验探索阶段,亟需加深研究力度。粉煤灰的火山灰反应是相对缓慢的过程,其对混凝土强度的贡献主要发生在后期,如果掺入大量的粉煤灰,早期强度将显著降低,导致碱度降低,抗碳化能力降低,进而对混凝土耐久性产生不利影响,目前混凝土中粉煤灰最大掺入量仍局限于35%左右,因此粉煤灰的高掺量应用受到限制。然而粉煤灰的反应活性是由多种因素共同影响的,如果试图通过改变某种因素来达到特定性质,可能会对其他性质产生干扰^[98]。因此在粉煤灰建材化回收利用方面,需要综合考虑多种因素的协同作用,以获得粉煤灰的最大效益。

(4) 重金属溶出风险。粉煤灰属于一般固废,含有微量重金属物质,但常因含量不高而在研究过程中忽视对重金属浸出的研究。目前国内对于粉煤灰建材化的研究,着重于提升建材力学性能研究,并未对粉煤灰基建材的重金属浸出开展充分研究。为实现粉煤灰的长久安全处置,必须对粉煤灰中的重金属浸出特性进行深入了解,根据建筑材料的使用环境,选择不同的浸出方法模拟浸出环境,充分评估环境风险。

5 结语与展望

我国粉煤灰已在建材领域的资源化利用有一定的研究基础和应用基础,特别是在水泥及混凝土掺合料、粉煤灰砖以及建材深加工产品等方面得到了诸多的增值化利用,共计可减少CO₂排放约2.42亿t/a,碳减排效益可观。除了传统的粉煤灰基水泥材料和墙体材料,新型粉煤灰基绿色建材的制备技术也是学者们的研究重点,如用作轻质耐火保温材料、微晶陶瓷玻璃材料及智能建筑材料等。但目前我国对于粉煤

灰的建材化利用仍处于初级阶段,结合我国国情,现阶段粉煤灰的建材化利用仍应聚焦于高掺量利用和大规模工程应用推广,从而消纳大量堆存和持续产出的粉煤灰。与此同时,加大对高值化粉煤灰基建材制备技术的研究力度,继续开发新的利用方案,从而克服建材产品附加值低、制品利用方式单一的问题。实行粉煤灰“传统建材化工艺的大量消纳”与“新型建材化技术的高值利用”双线并行,融合机理研究与工程实践,进一步展开更系统的探索:①对不同类型粉煤灰在组成和性能上的差异进行总结,根据理化性质等方面的不同来确定最佳利用途径;②深入探究粉煤灰对水泥水化反应机理和长期性能的影响,为粉煤灰在建筑材料中的广泛应用提供理论依据,从而更好地投入到工程实践;③提供相关政策支持加强粉煤灰以及附加产品的高值化利用研究,将技术工艺研发与实际工业化应用相结合,提高整体经济效益;④粉煤灰未来研究方向可集中在将粉煤灰与其他工业固废综合利用,协同处置实现建材性能的提升,如提高粉煤灰建材的透水性能、抗冻融性能等,从而扩大粉煤灰衍生建材的应用范围;⑤粉煤灰的未来发展除了进一步加大科研力度、改善工艺、研发技术外,还需政府部门更好地发挥引导作用,建立更为高效的、先进的固体废弃物管理体系,使粉煤灰等固废的利用实现社会效益、环境效益和经济效益的统一,从而实现大宗固废减量化、无害化、资源化的目标。

参考文献(References):

- [1] 李洪言, 张景谦, 陈健斌, 等. 2021年全球能源转型面临挑战: 基于《BP世界能源统计年鉴(2022)》[J]. *天然气与石油*, 2022, 40(6): 129–138.
LI Hongyan, ZHANG Jingqian, CHEN Jianbin, et al. Global energy transition faces challenges in 2021—Based on the BP Statistical Review of World Energy(2022)[J]. *Natural Gas and Oil*, 2022, 40(6): 129–138.
- [2] 中国煤炭工业协会. 2021煤炭行业发展年度报告[R]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2021.
China Coal Industry Association. 2021 annual report on the development of the coal industry[R]. Beijing: China Coal Industry Association, 2021.
- [3] 徐硕, 杨金林, 马少健, 等. 粉煤灰综合利用研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2021, 41(3): 104–111.
XU Shuo, YANG Jinlin, MA Shaojian, et al. Research progress on comprehensive utilization of fly ash[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2021, 41(3): 104–111.
- [4] 张源, 万志军, 熊路长, 等. 煤—矿坑口电厂粉煤灰物化特性实验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(1): 224–230.
ZHANG Yuan, WAN Zhijun, XIONG Luchang, et al. Experimental

- study on physical and chemical properties of fly ash in coal and gangue pithead power plant[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(1): 224–230.
- [5] YANG Q C, MA S H, ZHENG S L, et al. Recovery of alumina from circulating fluidized bed combustion Al-rich fly ash using mild hydrochemical process[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(4): 1187–1195.
- [6] 何宏舟, 过伟丽. 循环流化床锅炉炉内脱硫灰渣的水化特性研究[J]. *煤炭转化*, 2010, 33(3): 72–75.
HE Hongzhou, GUO Weili. Study on the hydrating capacity of the desulfurization slag of cfb boiler[J]. *Coal Conversion*, 2010, 33(3): 72–75.
- [7] 李端乐, 王栋民, 任才富. 磨细循环流化床粉煤灰-石灰的水化特性[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(28): 11735–11739.
LI Duanle, WANG Dongmin, REN Caifu. Hydration characteristics of grinding circulating fluidized bed fly ash-lime[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(28): 11735–11739.
- [8] 魏雅娟, 王群英, 李小江, 等. 粉煤灰和固硫灰填充天然橡胶的性能比较[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(8): 266–270.
WEI Yajuan, WANG Qunying, LI Xiaojiao, et al. Comparison on performance of natural rubber reinforced by normal fly ash/circulating fluid bed ash[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(8): 266–270.
- [9] 马志斌, 张学里, 郭彦霞, 等. 循环流化床粉煤灰理化特性及元素溶出行为研究进展[J]. *化工进展*, 2021, 40(6): 3058–3071.
MA Zhibin, ZHANG Xueli, GUO Yanxia, et al. Research progress on characteristics and element dissolution behaviors of circulating fluidized bed-derived fly ash[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(6): 3058–3071.
- [10] 武斌, 罗鑫, 赵劲松. 粉煤灰品质对其需水量及活性的影响[J]. *四川建材*, 2015, 41(4): 23–24.
WU Bin, LUO Xin, ZHAO Jinsong. Influence of fly ash quality on its water demand and activity[J]. *Sichuan Building Materials*, 2015, 41(4): 23–24.
- [11] CHEN X, GAO J, YAN Y, et al. Investigation of expansion properties of cement paste with circulating fluidized bed fly ash[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 157: 1154–1162.
- [12] ZHAO S, DUAN Y, LIU M, et al. Effects on enrichment characteristics of trace elements in fly ash by adding halide salts into the coal during CFB combustion[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2018, 91(2): 214–221.
- [13] 张子哈, 李晓姣, 王红涛, 等. 循环流化床粉煤灰特性对重金属赋存迁移的影响研究进展[J]. *应用化工*, 2023, 52(11): 3205–3209.
ZHANG Zihan, LI Xiaojiao, WANG Hongtao, et al. Research progress on influence of fly ash characteristics on occurrence and migration of heavy metals in circulating fluidized bed[J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(11): 3205–3209.
- [14] 魏绍青, 田秀青, 杨凤玲, 等. 燃烧工况对燃煤电厂灰渣理化特性的影响[J]. *洁净煤技术*, 2017, 23(6): 83–89.
WEI Shaoqing, TIAN Xiuqing, YANG Fengling, et al. Effects of combustion conditions on the characteristics of fly ash and slag in coal-fired power plants[J]. *Clean Coal Technology*, 2017, 23(6): 83–89.
- [15] BHATT A, PRIYADARSHINI S, ACHARATH MOHANAKRISHNAN A, et al. Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2019, 11: e00263.
- [16] 王丽萍, 李超. 粉煤灰资源化技术开发与利用研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(4): 38–45.
WANG Liping, LI Chao. Research progress on development and utilization of fly ash resource technology[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(4): 38–45.
- [17] 张力, 李星吾, 张元赏, 等. 粉煤灰综合利用进展及前景展望[J]. *建材发展导向*, 2021, 19(24): 1–6.
ZHANG Li, LI Xingwu, ZHANG Yuanshang, et al. Progress and prospect of comprehensive utilization of fly ash[J]. *Development Guide to Building Materials*, 2021, 19(24): 1–6.
- [18] 何林, 刘数华. 低品质粉煤灰在混凝土中的作用机理及激发机制[J]. *粉煤灰综合利用*, 2015, 28(1): 53–56.
HE Lin, LIU Shuhua. Effect mechanism of low quality fly ash in concrete and its excitation mechanism[J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 2015, 28(1): 53–56.
- [19] 孙福凯. 低品质粉煤灰制备蒸压砌块研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
SUN Fukai. Research on preparation of autoclaved bricks from low quality fly ash[D]. Jinan: Shandong University of Architecture, 2020.
- [20] 沈. 粉煤灰配料低温煅烧水泥通过市级鉴定[J]. *水泥技术*, 1986(2): 61.
SHEN. Low temperature calcined cement with fly ash ingredients passed the municipal appraisal[J]. *Cement Technology*, 1986(2): 61.
- [21] 叶鑫. 焙烧活化对粉煤灰酸浸性能的影响研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2023.
YE Xin. Study on the effect of roasting activation on the acid leaching performance of fly ash[D]. Taiyuan University of Science and Technology, 2023.
- [22] 陈冀渝. 用粉煤灰低温煅烧水泥熟料[J]. *粉煤灰*, 2015, 27(5): 14–15, 40.
CHEN Jiyu. Low temperature calcined cement clinker with fly ash[J]. *Coal Ash*, 2015, 27(5): 14–15, 40.
- [23] 张丕兴, 庄实传. 用粉煤灰全代煤烧水泥获得成功[J]. *建材工业信息*, 1992(16): 14.
ZHANG Pixing, ZHUANG Shichuan. It is successful to burn cement with fly ash instead of coal[J]. *Brick & Tile World*, 1992(16): 14.
- [24] 焦明常. 粉煤灰用作水泥生产原料[J]. *福建建材*, 1994(1): 47–48.
JIAO Mingchang. Fly ash is used as raw material for cement production[J]. *Fujian Building Materials*, 1994(1): 47–48.
- [25] 王琦, 岳云龙. 粉煤灰配料对生料易磨性的影响[J]. *山东建材学院学报*, 1996, 10(2): 1–6.
WANG Qi, YUE Yunlong. Influences of fly ash as raw material on the raw meal grindability[J]. *Journal of Shandong Institute of Building Materials*, 1996, 10(2): 1–6.
- [26] 禹小明, 朱启贵. 粉煤灰在水泥生料配料中的应用[J]. *水泥技术*, 1998(6): 2.

- YU Xiaoming, ZHU Qigui. Application of fly ash in cement raw material proportioning[J]. *Cement Technology*, 1998(6): 2.
- [27] 刘尚文, 王继祥, 王洪利, 等. 粉煤灰代替粘土配制水泥生料[J]. *中国建材*, 2001, 50(5): 41–42.
- LIU Shangwen, WANG Jixiang, WANG Hongli, et al. To replace clay with flyash in raw meal mix proportioning[J]. *China Building Materials*, 2001, 50(5): 41–42.
- [28] 龚学萍, 沈晓冬, 宣欢, 等. 用粉煤灰制备高硅硫铝酸盐水泥熟料研究[J]. *粉煤灰综合利用*, 2006, 19(1): 31–33.
- GONG Xueping, SHEN Xiaodong, HUAN Huan, et al. Study on Preparation of high silicon sulphoaluminate cement clinker using fly ash[J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 2006, 19(1): 31–33.
- [29] GLINICKI M A, JÓŹWIĄK-NIEDŹWIEDZKA D, DĄBROWSKI M. The influence of fluidized bed combustion fly ash on the phase composition and microstructure of cement paste[J]. *Materials*, 2019, 12(17): 2838.
- [30] 田伟. 燃煤厂固体废弃物资源化利用创新探索[J]. *科学技术创新*, 2020(4): 195–196.
- TIAN Wei. Innovative exploration of solid waste resource utilization in coal-fired plants[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2020(4): 195–196.
- [31] 孙晓, 景毅. 粉煤灰在新型建材中的利用与思考 [J]. 佳木斯职业学院学报, 2019(12): 218, 220.
- SUN Xiao, JING Yi. Utilization and reflection of fly ash in new building materials[J]. *Journal of Jiamusi Vocational Institute*, 2019(12): 218, 220.
- [32] ZHANG J, DONG B, HONG S, et al. Investigating the influence of fly ash on the hydration behavior of cement using an electrochemical method[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 222: 41–48.
- [33] 杨静雯, 马荣, 李娟, 等. 利用粉煤灰制备氯氧镁水泥复合材料的 研究进展[J]. *科技创新与应用*, 2022, 12(11): 53–55, 60.
- YANG Jingwen, MA Rong, LI Juan, et al. Research progress on the preparation of magnesium oxychloride cement composite materials using fly ash[J]. *Technology Innovation and Application*, 2022, 12(11): 53–55, 60.
- [34] 刘盼, 常成功, 刘秀泉, 等. 粉煤灰掺量对氯氧镁水泥混凝土物理力学性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(5): 1564–1572.
- LIU Pan, CHANG Chenggong, LIU Xiuquan, et al. Influence of fly ash content on physical and mechanical properties of magnesium oxychloride cement concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(5): 1564–1572.
- [35] 马慧, 关博文, 王永维, 等. 氯氧镁水泥胶凝材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2015, 29(15): 103–107.
- MA Hui, GUAN Bowen, WANG Yongwei, et al. Research progress of magnesium oxychloride cement gelled material[J]. *Materials Review*, 2015, 29(15): 103–107.
- [36] 赵华, 王永维, 关博文, 等. 粉煤灰对氯氧镁水泥早期性能的影响 [J]. *材料导报*, 2015, 29(18): 117–121, 135.
- ZHAO Hua, WANG Yongwei, GUAN Bowen, et al. Effect of fly ash on early properties of magnesium oxychloride cement[J]. *Materials Review*, 2015, 29(18): 117–121, 135.
- [37] 陈志诚, 王浙锋, 傅雄. 燃煤电厂粉煤灰资源化利用的思考[J]. *绿色环保建材*, 2021(8): 60–61.
- CHEN Zhicheng, WANG Zhefeng, FU Xiong. Reflections on the resource utilization of fly ash in coal-fired power plants[J]. *Green Environmental Protection Building Materials*, 2021(8): 60–61.
- [38] 邹驿, 杨秋, 姚琳. 粉煤灰在建筑材料领域中的应用分析[J]. *建材与装饰*, 2019(33): 61–62.
- ZOU Yi, YANG Qiu, YAO Lin. Application analysis of fly ash in the field of building materials[J]. *Construction Materials & Decoration*, 2019(33): 61–62.
- [39] FUZAIL HASHMI A, SHARIQ M, BAQI A. Flexural performance of high volume fly ash reinforced concrete beams and slabs[J]. *Structures*, 2020, 25: 868–880.
- [40] 汪潇, 王宇斌, 杨留栓, 等. 高性能大掺量粉煤灰混凝土研究[J]. *硅酸盐通报*, 2013, 32(3): 523–527, 532.
- WANG Xiao, WANG Yubin, YANG Liushuan, et al. High-performance high-volume fly ash concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 32(3): 523–527, 532.
- [41] 林秀. 粉煤灰的矿物组成和常温下粉煤灰活性的研究[J]. *硅酸盐学报*, 1982, 10(4): 486–490.
- LIN Xiu. Study on the mineral composition and activity of fly ash at room temperature[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1982, 10(4): 486–490.
- [42] 王晓庆. 超细粉煤灰对水泥基复合胶凝材料水化硬化性能的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- WANG Xiaoping. The influence of the ultra-fine fly ash during the hydration and hardening process of complex binders[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2015.
- [43] DUAN S, LIAO H, MA Z, et al. The relevance of ultrafine fly ash properties and mechanical properties in its fly ash-cement gelation blocks via static pressure forming[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 186: 1064–1071.
- [44] TERMKHAJORNKIT P, NAWA T, YAMASHIRO Y, et al. Self-healing ability of fly ash-cement systems[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(3): 195–203.
- [45] DURAN ATİŞ C. Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete, and influence of curing condition[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6): 1112–1121.
- [46] NAIK T R, SINGH S S, RAMME B W. Effect of source of fly ash on abrasion resistance of concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002, 14(5): 417–426.
- [47] KUMAR B, TIKE G K, NANDA P K. Evaluation of properties of high-volume fly-ash concrete for pavements[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19(10): 906–911.
- [48] NASSAR R U D, SOROUSHIAN P, GHEBRAB T. Field investigation of high-volume fly ash pavement concrete[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 73: 78–85.
- [49] YU J, LI G, LEUNG C K Y. Hydration and physical characteristics of ultrahigh-volume fly ash-cement systems with low water/binder ratio[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 161: 509–518.
- [50] FANG Ping. Research on active fly ash replacing slag as a cement mixture[J]. *Housing Materials & Applications*, 2000(1): 16–17.

- [51] 卓瑞锋, 张召述, 夏举佩, 等. 预活化粉煤灰作混合材的研究[J]. *水泥技术*, 2010(1): 25–28, 38.
ZHUO Ruifeng, ZHANG Zhaoshu, XIA Jupei, et al. Pre-activation of fly ash prepared for new admixture production[J]. *Cement Technology*, 2010(1): 25–28, 38.
- [52] HWANG S H, SHAHSAVARI R. High calcium cementless fly ash binder with low environmental footprint: Optimum Taguchi design[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2019, 102(4): 2203–2217.
- [53] 杨南如, 钟白茜, 杨世铎, 等. 粉煤灰的超细粉磨及其对水泥性能的影响实验研究[J]. *水泥工程*, 2017(1): 1–4.
YANG Nanru, ZHONG Baiqian, YANG Shiduo, et al. Ultrafine grinding of fly ash and its influence on cement properties[J]. *Cement Engineering*, 2017(1): 1–4.
- [54] MOUSSADIK A, SAADI M, DIOURI A. Chemical, mineralogical and thermal characterization of a composite alkali-activated binder based on coal gangue and fly ash[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 58: 1452–1458.
- [55] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, PALOMO A, CRIADO M. Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6): 1204–1209.
- [56] ZHUANG X Y, CHEN L, KOMARNENI S, et al. Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 125: 253–267.
- [57] 阎培渝. 碱激发胶凝材料发展瓶颈在哪里[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(8): 2067–2069.
YAN Peiyu. What is the development bottleneck of alkali-activated binder[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(8): 2067–2069.
- [58] LI Z, FEI M E, HUYAN C, et al. Nano-engineered, fly ash-based geopolymer composites: An overview[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 168: 105334.
- [59] WONG C L, MO K H, ALENGARAM U J, et al. Mechanical strength and permeation properties of high calcium fly ash-based geopolymer containing recycled brick powder[J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 32: 101655.
- [60] MIRMOGHATADEI R, SHEN L, LI Y, et al. Enhancing alkali-activated materials with low quality fly ash: A novel mixing approach for robust construction materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 421: 138261.
- [61] TEMUJIN J, VAN RIESSEN A, WILLIAMS R. Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1/2/3): 82–88.
- [62] RATTANASAK U, CHINDAPRASIRT P. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer[J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(12): 1073–1078.
- [63] JOSEPH B, MATHEW G. Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete[J]. *Scientia Iranica*, 2012, 19(5): 1188–1194.
- [64] ATIŞ C D, GÖRÜR E B, KARAHAN O, et al. Very high strength (120MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 96: 673–678.
- [65] ZHAO X, LIU C, ZUO L, et al. Investigation into the effect of calcium on the existence form of geopolymerized gel product of fly ash based geopolymers[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 103: 279–292.
- [66] 陈友治, 熊文壕, 殷伟淞, 等. 粉煤灰沉珠超高性能混凝土研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2019, 41(4): 16–22.
CHEN Youzhi, XIONG Wenhao, YIN Weisong, et al. Study on fly ash sinking beads ultra high performance concrete[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2019, 41(4): 16–22.
- [67] DU J, LIU Z, CHRISTODOULATOS C, et al. Utilization of off-specification fly ash in preparing ultra-high-performance concrete (UHPC): Mixture design, characterization, and life-cycle assessment[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 180: 106136.
- [68] DE MATOS P R, FOIATO M, PRUDÊNCIO L R. Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compacting concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 203: 282–293.
- [69] 姚志荣, 张全胜, 薛鹏飞, 等. 一种固废粉煤灰泡沫混凝土绿色建材性能研究[J]. *山西建筑*, 2022, 48(10): 88–92.
YAO Zhirong, ZHANG Quansheng, XUE Pengfei, et al. Study on performance of a solid waste fly ash foam concrete green building material[J]. *Shanxi Architecture*, 2022, 48(10): 88–92.
- [70] 颜汉军, 张娟娟. 原材料对粉煤灰加气混凝土制品质量影响的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2009, 28(6): 1317–1321.
YAN Hanjun, ZHANG Chanjuan. Study on effect of raw materials on the quality of powder coal ash aerated concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2009, 28(6): 1317–1321.
- [71] 海龙, 梁冰, 卢钢, 等. 煤矸石-粉煤灰烧结砖的研制[J]. *硅酸盐通报*, 2013, 32(7): 1291–1296.
HAI Long, LIANG Bing, LU Gang, et al. Development of sintered brick made from coal gangue and fly ash[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 32(7): 1291–1296.
- [72] 徐子芳, 解一涵, 许明璐, 等. 超细粉煤灰烧结性能机理研究[J]. *非金属矿*, 2018, 41(2): 7–10.
XU Zifang, XIE Yihan, XU Minglu, et al. The mechanism study of ultra-fine fly ash sintered material performance[J]. *Non-Metallic Mines*, 2018, 41(2): 7–10.
- [73] LIU C, ZHANG M. Effect of curing temperature on hydration, microstructure and ionic diffusivity of fly ash blended cement paste: A modelling study[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 297: 123834.
- [74] 桂苗苗, 蔡振哲. 蒸压加气混凝土性能比较及微观分析[J]. *武汉理工大学学报*, 2011, 33(6): 31–35.
GUI Miaomiao, CAI Zhenzhe. Analysis of properties and microstructure of autoclaved aerated concrete(AAC)[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, 33(6): 31–35.
- [75] ABBAS S, SALEEM M A, KAZMI S M S, et al. Production of sustainable clay bricks using waste fly ash: Mechanical and durability

- properties[J]. *Journal of Building Engineering*, 2017, 14: 7–14.
- [76] POINOT T, LARACY M E, APONTE C, et al. Beneficial use of boiler ash in alkali-activated bricks[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 128: 1–10.
- [77] 马保国, 钟开红, 蹇守卫, 等. 利用工业废渣生产蒸养粉煤灰砖的研究[J]. *新型建筑材料*, 2004, 31(5): 6–8.
- MA Baoguo, ZHONG Kaihong, JIAN Shouwei, et al. Study on production of steam-cured fly ash brick using industrial waste residue[J]. *New Building Materials*, 2004, 31(5): 6–8.
- [78] CHINDAPRASIRT P, PIMRAKSA K. A study of fly ash–lime granule unfired brick[J]. *Powder Technology*, 2008, 182(1): 33–41.
- [79] 姚文夏. 蒸压粉煤灰砖的力学性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2016, 43(6): 72–74.
- YAO Wenxia. Study on mechanics of the autoclaved fly ash brick[J]. *New Building Materials*, 2016, 43(6): 72–74.
- [80] 李嘉豪. 蒸压法制备高掺量粉煤灰透水砖及其性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- LI Jiahao. Study on preparation and properties of water-permeable bricks derived from high-content fly ash by autoclaving[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [81] WANG S, ZHANG C, CHEN J. Utilization of coal fly ash for the production of glass-ceramics with unique performances: A brief review[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2014, 30(12): 1208–1212.
- [82] 赵飞燕, 张小东, 杜艳霞 等. 粉煤灰陶粒的制备技术及研究进展 [J]. *无机盐工业*, 2024, 56(4): 16–23.
- ZHAO Feiyan, ZHANG Xiaodong, DU Yanxia, et al. Preparation technology and research progress on the fly ash ceramics[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2024, 56(4): 16–23.
- [83] 胡广超, 张乐, 张添华, 等. 粉煤灰基功能陶粒研究进展[C]//中国环境科学学会 2022 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集 (三). 北京: 《工业建筑》杂志社有限公司, 2022: 473–482, 502.
- [84] BALAPOUR M, KHANEGHAHI M H, GARBOCZI E J, et al. Off-spec fly ash-based lightweight aggregate properties and their influence on the fresh, mechanical, and hydration properties of lightweight concrete: A comparative study[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 342: 128013.
- [85] LUO Y, ZHENG S, MA S, et al. Preparation of sintered foamed ceramics derived entirely from coal fly ash[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 163: 529–538.
- [86] 侯英键, 谢小妍, 陆金驰, 等. 粉煤灰微晶玻璃研究进展[J]. *广东化工*, 2015, 42(12): 79–80.
- HOU Yingjian, XIE Xiaoyan, LU Jinchi, et al. Research progress on fly ash glass-ceramics[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2015, 42(12): 79–80.
- [87] 姜世方. 绿色生态城市规划设计理念及策略探讨[J]. *低碳世界*, 2017(15): 175–176.
- JIANG Shifang. Discussion on the concept and strategy of green ecological city planning and design[J]. *Low Carbon World*, 2017(15): 175–176.
- [88] ZHU M, JI R, LI Z, et al. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 112: 398–405.
- [89] IYER R S, SCOTT J A. Power station fly ash—A review of value-added utilization outside of the construction industry[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2001, 31(3): 217–228.
- [90] 谷昱杰, 邵寒蕊, 涂慧镗, 等. 粉煤灰于耐火材料应用领域的常规性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(6): 1908–1911, 1928.
- GU Yujie, SHAO Hanrui, TU Huilan, et al. Conventional properties of fly ash for refractory applications[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(6): 1908–1911, 1928.
- [91] 陈新星, 韩明珍, 吴昊, 等. 掺钢渣-矿渣-粉煤灰复合微粉混凝土高温后抗压强度数学分析 [J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(8): 2254–2259.
- CHEN Xinxing, HAN Mingzhen, WU Hao, et al. Mathematical analysis on the compressive strength of high temperature micro powder concrete added with steel slag, slag and fly ash[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(8): 2254–2259.
- [92] 刘中凯, 康泽双, 田野, 等. 二次铝灰和粉煤灰制备轻质耐火保温材料[J]. *有色金属 (冶炼部分)*, 2022(9): 125–132.
- LIU Zhongkai, KANG Zeshuang, TIAN Ye, et al. Study on preparing of light refractory and insulation material from secondary aluminum dross and fly ash[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2022(9): 125–132.
- [93] 徐平坤. 利用粉煤灰生产耐火材料[J]. *再生资源与循环经济*, 2016, 9(9): 38–42.
- XU Pingkun. Production of refractory materials with fly ash[J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 2016, 9(9): 38–42.
- [94] 周明凯, 沙惠萍, 王怀德. 高温发泡法制备粉煤灰隔热耐火砖[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(8): 2701–2707.
- ZHOU Mingkai, SHA Huiping, WANG Huaide. Preparation of fly ash insulating firebrick by high-temperature foaming method[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(8): 2701–2707.
- [95] CHARAI M, MGHAZLI M O, CHANNOUF S, et al. Lightweight waste-based gypsum composites for building temperature and moisture control using coal fly ash and plant fibers[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 393: 132092.
- [96] LIU W, DU R, ZHANG R, et al. Optimal design and performance of eco-friendly materials stabilized with inorganic binder based on fluidized bed coal combustion fly ash and regenerated brick powder[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 65: 105800.
- [97] 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.
- YANG Xing, HU Wenkui, JIA Feiyun, et al. Research progress on comprehensive utilization technology of fly ash[J]. *Energy and Environment*, 2018(4): 55–57.
- [98] XU G, SHI X. Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 136: 95–109.