

非金属矿综合利用专题

粉煤灰中铝硅资源化利用研究进展

王丽萍, 李超

(神华准能资源综合开发有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300)

摘要: 这是一篇矿业工程领域的论文。粉煤灰不仅是燃煤电厂排放的大宗固体废弃物, 同时又是一种潜在的二次资源。目前, 粉煤灰的资源化利用虽然涉及领域比较广泛, 但高值化利用率偏低。粉煤灰的主要化学成分为二氧化硅和氧化铝, 充分利用其中的铝硅资源是提高其资源化利用率的重要途径之一。本文针对粉煤灰在提取冶金级氧化铝、制备非冶金级氧化铝、白炭黑、二氧化硅气凝胶以及硅铝复合材料等高附加值产品的应用情况进行了综述, 对高值化利用目前存在的问题进行了分析, 并指出了未来发展趋势。

关键词: 矿业工程; 粉煤灰; 氧化铝; 二氧化硅; 高值化利用

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.03.001

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 03-0001-05

引用格式: 王丽萍, 李超. 粉煤灰中铝硅资源化利用研究进展[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(3): 1-5.

WANG Liping, LI Chao. Research progress on resource utilization of aluminum and silicon in fly ash[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(3): 1-5.

粉煤灰是燃料煤中的矿物质经过高温燃烧后的产物, 它是伴随着煤电的发展而产生的。我国是一个以燃煤发电为主的国家, 电力工业发展的同时, 导致粉煤灰排放量逐年增加。2017年我国的粉煤灰排放量约为 6.86 亿 t, 2019 年达到 7.48 亿 t, 预计 2024 年将会达到 9.25 亿 t^[1-4]。

与其他的工业副产品不同, 粉煤灰是一种组成复杂的固体废弃物^[5]。大量粉煤灰的露天堆积, 不仅会侵占土地资源, 而且还会造成粉尘、土壤以及水质的污染, 破坏生态环境。近年来, 中央和地方纷纷出台了一系列法律法规和产业政策, 推进粉煤灰等大宗工业固体废弃物的综合利用^[6]。因此, 加快粉煤灰的资源化利用, 提高粉煤灰综合利用的附加值, 使其变废为宝, 对环境保护以及实施可持续发展战略具有重大战略意义。

我国在上世纪 50 年代就已开展粉煤灰利用的相关工作^[7], 主要应用在建材、填埋、筑路以及土壤改良等领域, 这些基本上都是低附加值且粗放式的利用, 灰中有价元素利用率低、产品市场竞争力也不强, 远远没有发挥出粉煤灰作为二次资源的利用价值。因此, 拓展粉煤灰的高值化利用

领域必将是提高粉煤灰综合利用的有效途径^[8]。粉煤灰的主要化学成分为二氧化硅和氧化铝, 此外还含有少量的氧化铁、氧化钙等。因此, 充分利用其中的氧化铝和二氧化硅是提高粉煤灰资源化利用率的重要途径之一。本文对当前粉煤灰中硅铝资源利用领域的研究进展进行了综合论述, 以期为实现粉煤灰更大限度的开发和利用提供良好的导向作用。

1 粉煤灰的性质

粉煤灰的成分主要是未燃烧完的碳颗粒、玻璃微珠、磁性微粒和细硅铝灰等, 其含有 316 种矿物和 188 个矿物群, 是世界上最复杂的材料之一。其矿物组成主要由石英、莫来石、铝酸三钙、霞石、黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿、方解石等^[9-10]。煤质差异、燃煤电厂锅炉类型、燃烧温度、燃烧状况以及气体净化设备等不同, 导致不同地区的粉煤灰成分也各不相同, 表 1 列出了我国部分电厂粉煤灰样品的主要化学成分。

目前, 关于粉煤灰的分类, 国际上也没有统

收稿日期: 2022-08-28

作者简介: 王丽萍 (1984-), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为煤基固废利用。

通信作者: 李超 (1983-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为粉煤灰资源化综合利用。

表 1 我国部分电厂粉煤灰样品的主要化学成分/%
Table 1 Main chemical composition of fly ash samples from some power plants in China

样品来源	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
内蒙古某电厂 ^[11]	45.05	40.21	4.36	4.40	0.35
太原某电厂 ^[12]	31.00	45.60	6.15	3.13	0.44
辽宁某电厂 ^[13]	67.88	17.67	5.02	3.58	0.76
郑州某电厂 ^[14]	31.15	53.97	4.16	—	1.01
淮南某电厂 ^[15]	27.62	51.49	9.25	3.19	0.58

一的分类标准。根据 pH 值和钙/硫比的不同^[16], 粉煤灰可以被划分为酸性灰 (pH 值=1.2~7)、弱碱性灰 (pH 值=8~9) 和强碱性灰 (pH 值=11~13); 根据产生灰的煤的类型, 粉煤灰又可以被分为无烟煤粉煤灰、烟煤粉煤灰、次烟煤粉煤灰和褐煤粉煤灰。美国材料实验协会 (ASTMs) 根据粉煤灰化学组成的不同^[6], 将粉煤灰分为“C”型和“F”型。C 型粉煤灰, CaO 含量可以达到 30%~40%, 遇水自硬化, 具有胶凝性质, 它是褐煤和亚烟煤的燃烧产物, 其中 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 含量在 50%~70% 之间; 而 F 型粉煤灰, CaO 含量在 1%~12% 之间, 遇氢氧化钙和水硬化, 具有火山灰特性, 它是烟煤和无烟煤的燃烧产物, SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 含量超过 70%。我国依据粉煤灰的细度、需水量、烧失量、含水量、三氧化硫含量的不同, 将应用于水泥混凝土领域的粉煤灰分为 I 级、II 级和 III 级 (GB 1596-1991)^[6]。

2 粉煤灰中铝硅资源化利用研究现状

2.1 提取氧化铝

2.1.1 冶金级氧化铝

我国粉煤灰中 Al₂O₃ 的含量基本在 15%~40% 之间, 而山西平朔、内蒙古准格尔等地的粉煤灰中氧化铝含量可达 45% 甚至 50%, 被称之为“高铝粉煤灰”, 相当于我国中低品位铝土矿中 Al₂O₃ 的含量, 成为替代铝土矿制备氧化铝的潜在资源。利用高铝粉煤灰提取冶金级氧化铝, 不仅能够实现固体废弃物的绿色资源化利用, 而且能够缓解铝土矿资源短缺以及降低氧化铝企业生产成本。国家在《产业结构调整指导目录 (2011 本)》中明确将高铝粉煤灰提取氧化铝列为鼓励类项目。

目前粉煤灰提取氧化铝项目主要集中在内蒙古和山西地区, 最具代表性的有神华集团 (现为国家能源集团)、蒙西集团、大唐集团以及中煤集团等大型企业^[17]。其中, 神华集团联合吉林大学自主研发了“一步酸溶法”工艺技术, 建成了 4000 t/a 的氧化铝中试实验项目; 蒙西集团通过改进波兰石灰石烧结法, 确定了粉煤灰石灰石烧结-拜耳法提取氧化铝工艺技术, 建成了 20 万 t/a 的一级砂状氧化铝项目; 大唐集团和中煤集团采用预脱

硅-碱石灰烧结法, 分别建成了 20 万 t/a 和 10 万 t/a 氧化铝示范项目。以上项目均已打通全流程, 但因存在成本或技术问题, 没有得到满意的技术指标, 目前仍无一实现商业化。

2.1.2 非冶金级氧化铝

粉煤灰除了可以生产冶金级氧化铝外, 还可以制备非冶金级氧化铝 (亦称为精细氧化铝、多品种氧化铝)。李智伟等^[18]以循环流化床粉煤灰为原料, 酸浸得到的氯化铝作为制备高纯氧化铝的铝盐, 利用盐析与重结晶联合法除杂, 通过添加分散剂辅助均匀沉淀法制备出了纯度达 99.99%, 粒径为 200 nm, 分散性高、球形圆度好、粒径分布窄的 α -Al₂O₃, 可用做高档 LED 基底衬料。

李艳等^[19]对粉煤灰酸浸液制备氢氧化铝产品过程进行工艺优化, 制备了结晶度高、纯度也较高的 β -三水铝石型氢氧化铝球形颗粒, 性能指标达到了 GB/T 4294-2010 的要求。

活性氧化铝作为一种多孔材料, 其比表面积可以高达数百平方米, 有着较高的活性和吸附能力, 常被用作催化剂和吸附剂材料, 具有广阔的市场应用前景。史学^[20]采用酸碱联合法, 将粉煤灰中的铝元素分离出来, 然后通过煅烧的方法制得活性氧化铝, 并分别添加十六烷基三甲基溴化铵、羧酸钠、聚乙烯亚胺对其进行改性, 研究了改性前后四种活性氧化铝对重金属废水中 Cu²⁺吸附效果。实验结果表明, 四种活性氧化铝对 Cu²⁺的吸附率随着溶液 pH 值的增大, 出现先增大后减小的趋势, 通过对比发现, 聚乙烯亚胺改性的活性氧化铝对 Cu²⁺的吸附率最大, 在较优条件下可以达到 77%。吴玉胜等^[11]以硫酸氢铵溶液浸出粉煤灰制备出比表面积为 571.32 m²/g、孔体积为 0.75 cm³/g、孔径尺寸为 6.15 nm 的介孔活性氧化铝, 可作为优质的催化剂材料; 将煅烧温度提高至 1200 °C 后即转变成粒径为 60 nm、纯度 $\geq$ 99.92% 的球形高纯氧化铝, 可用于复合材料、精细陶瓷等领域。

2.2 制备二氧化硅功能材料

粉煤灰中氧化硅的含量大都在 40% 以上, 是丰富廉价的硅源载体。作为粉煤灰中含量较多的成分之一, 加强硅基产品的开发, 能够有效扩大粉煤灰资源化利用途径, 从而提高粉煤灰的资源化利用价值。目前针对粉煤灰制备硅基材料的研究还较少, 主要集中在制备白炭黑、二氧化硅气凝胶等方面。

2.2.1 白炭黑

白炭黑又被称之为水合二氧化硅, 它是一种不溶于水的、无毒的白色粉末, 近年来被广泛应

用于橡胶、涂料和造纸等领域。粉煤灰经过酸浸提铝后得到的高硅残渣，其 SiO_2 含量在 80% 以上。田万军等^[21] 将粉煤灰酸浸渣和碳酸钠混合后，高温焙烧、水浸制得硅酸钠溶液，利用碳分方法制得了粒径为 20~40 nm、吸油值为 3.10 mL/g、比表面积达 250 m^2/g 的高品质纳米白炭黑，其 SiO_2 含量达 91.88%，符合行业标准要求。韩磊等^[22] 同样以碳分法制得了质量符合 GB10528-89 的白炭黑产品。通过添加质量分数 2% 的聚乙二醇 10000 表面活性剂和 1% 的氯化钠分散剂，制得的白炭黑粒径在 20 nm 左右，比表面积为 480.356 m^2/g ，吸油值为 2.45 mL/g。

2.2.2 二氧化硅气凝胶

二氧化硅气凝胶有着高的比表面积和孔隙率，在催化、储能、生物医药等方面有着广泛的应用。缪应菊等^[23] 以高硅粉煤灰为原料，采用溶胶-凝胶工艺和冷冻干燥技术制备出了兼有微孔、介孔复合孔结构的二氧化硅气凝胶，其中微孔区比表面积为 553.73 m^2/g 、介孔区比表面积 455.47 m^2/g 。该气凝胶材料不仅可以作为载体负载胺进行 CO_2 的化学捕集，也可以作为 CO_2 物理吸附的固体吸附材料。王明铭等^[24] 将高硅粉煤灰进行预脱硅-助剂活化、酸浸提硅两步联动工艺，在二氧化碳和稀硫酸催化剂的作用下，通过溶胶凝胶法和常压干燥法制备出了孔径分布均匀、比表面积超过 700 m^2/g 的介孔二氧化硅气凝胶。

2.3 制备铝硅复合材料

粉煤灰中 Al_2O_3 和 SiO_2 的总含量在 60% 以上，有的甚至可以达到 80% 以上，因此除了开发氧化铝、二氧化硅产品外，高附加值的铝硅复合材料的制备也是粉煤灰综合利用的关键。

2.3.1 沸石分子筛

粉煤灰在组成上与分子筛十分接近，为其成为合成分子筛的原料提供了可能。以粉煤灰为原料合成沸石分子筛，不仅能够提高粉煤灰的利用价值，而且能够降低分子筛的生产成本，有利于加快其工业化进程。范厚刚等^[25] 以粉煤灰为原料采用水热合成法制备出了以方钠石和青金石两种类型为主要成分的沸石分子筛。通过实验研究发现，该材料对水体污染物罗丹明 B 和左氧氟沙星均有吸附性，可以作为负载半导体光催化剂的载体材料。张丽宏等^[26] 首次以循环流化床粉煤灰为原料，通过酸浸预处理、碱熔活化、水热晶化法制备出了比表面积为 357 m^2/g 的高纯 F 型八面沸石。经实验验证，其对亚甲基蓝染料的饱和吸附量可以达到 178 mg/g。马子然等^[27] 采用酸碱联合法制备出了粉煤灰基 H-SAPO-34 微孔分子筛，比表面积达到 579 m^2/g ，总孔体积约为 0.27 cm^3/g ，

孔径为 0.56 nm；利用离子交换法制得了从 0.81% 到 1.96% 的不同 Cu 负载量的 Cu-SAPO-34 分子筛催化剂。该催化剂比钒钛系催化剂有着更好的高温活性和抗烧结性，更适合高温工况。

2.3.2 地质聚合物

地质聚合物是由硅氧四面体和铝氧四面体所构成的网格状聚合体，具有环保、能耗低、耐久性好等特点，是水泥的良好替代品。利用粉煤灰制备地质聚合物也是近年来研究的一个热点^[28]。仇秀梅等^[29] 利用碱做激发剂得到了粉煤灰基地质聚合物，将 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 按原料的 0.5%~3.0%（以 Pb 计）添加到粉煤灰中，制得了地质聚合物 Pb 固化体，浸出实验表明，地质聚合物对 1% 含量 Pb^{2+} 固化率达 99% 以上，固化效果优于硅酸盐水泥基材（PC32.5）。冯泽平^[30] 用高钙粉煤灰制备的地质聚合物胶凝材料，其耐久性实验表明，所有龄期的抗压强度均优于水泥胶砂（42.5）的强度，可以作为建筑胶凝材料使用。

2.3.3 微晶玻璃

微晶玻璃是一种独特的新型材料，其集中了玻璃和陶瓷的特点，主要是由天然矿物制备而成，生产成本较高。 Al_2O_3 和 SiO_2 是硅铝酸盐类微晶玻璃的重要组成部分，而粉煤灰的矿物组成则主要就是铝硅玻璃体，因此，粉煤灰是制备微晶玻璃的理想替代原料，其制得的微晶玻璃主要有 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 和 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 两种类型。闫申等^[31] 以粉煤灰和废玻璃为主要原料，添加部分化学纯试剂，采用一步烧结晶化法制备了密度为 2.56 g/cm^3 的 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系粉煤灰微晶玻璃，并确定了粉煤灰的较佳添加量为 35%。金震楠等^[32] 以酸浸后的高铝粉煤灰为原料，添加氧化硅和氧化镁和一定量的粘结剂，在 1360 $^\circ\text{C}$ 条件下保温 4 h，制得了高纯度的堇青石玻璃陶瓷。

3 结 论

近年来，针对粉煤灰中硅铝资源综合利用的研究领域越来越广泛，开发出的产品也日益增多，但是这些成果均集中在实验室或中试实验阶段，没有进入规模化的工业生产，究其原因，主要有以下几个方面。

（1）虽然粉煤灰产量巨大，但由于存在地域分布不均衡性以及季节性差异，从而导致其利用率低。

（2）粉煤灰的矿物组成及含量存在不确定性，任何一种资源化利用技术都不具有普适性，无法得到推广，这也是导致其利用率低的原因之一。

（3）粉煤灰的资源化利用还存在一些技术因素的制约，如工艺复杂、能耗高以及环境污染等问题，这也是导致其工业化进程缓慢的重要原因。

随着粉煤灰排放量的逐年增加,粉煤灰的堆积问题仍然是固废领域亟待解决的难题。在未来的研究中应当优化现有的工艺流程、加强反应机理的研究、继续开发新的综合利用方案,探寻绿色、高效、经济的粉煤灰资源化利用技术,尽早实现工业化生产,只有这样才能推动粉煤灰的批量消耗。

参考文献:

- [1] 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(12):3833-3841.
WANG J X, LI J, ZHAO S B, et al. Research progress and prospect of resource utilization of fly ash in China[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018(12):3833-3841.
- [2] 高桂梅.粉煤灰中氧化铝硫酸直接浸取工艺优化[J].矿产综合利用,2019(6):110-116.
GAO G M. Optimization process of extraction of alumina by sulfuric acid direct leaching from the fly ash[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(6):110-116.
- [3] 于成龙,熊楠,宋杰,等.近20年来中国利用粉煤灰合成分子筛研究进展[J].矿产综合利用,2020(4):26-35.
YU C L, XIONG N, SONG J, et al. Development of molecular sieves composition from fly ash in China in the last two decades[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(4):26-35.
- [4] 史永利,周玮.粉煤灰制备氧化铝的过程研究进展[J].化工科技,2021,29(1):82-86.
SHI Y L, ZHOU W. Research progress in preparation of alumina from fly ash[J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2021, 29(1):82-86.
- [5] 侯慧耀,陈永强,马保中,等.粉煤灰回收氧化铝工艺研究现状及进展[J].矿冶,2021,30(3):30-39.
HOU H Y, CHEN Y Q, MA B Z, et al. Research status and progress of alumina recovery from fly ash[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(3):30-39.
- [6] 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(4):38-44.
WANG L P, LI C. Research progress on development and utilization of fly ash resource technology[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019(4):38-44.
- [7] 韩桂泉,李京伟,杜博,等.粉煤灰的综合利用现状与展望[J].中国资源综合利用,2006,24(7):12-14.
HAN G Q, LI J W, DU B, et al. Present status and future development of the comprehensive utilization of coal ash[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2006, 24(7):12-14.
- [8] 聂铁苗,刘攀攀,夏森,等.粉煤灰在碱性条件下的变化行为研究进展[J].矿产综合利用,2021(2):77-84.
NIE Y M, LIU P P, XIA M, et al. Research progress of fly ash reaction behavior in alkaline conditions [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(2):77-84.
- [9] 宋明铭.高碳粉煤灰综合利用技术研究[J].矿产综合利用,2021(3):93-98.
SONG M M. Study on comprehensive utilization technology of high carbon fly ash[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(3):93-98.
- [10] 冯培峰.电厂粉煤灰高值化利用现状与最新进展[J].中国资源综合利用,2020,38(11):100-104.
FENG P F. Progress and development of high value utilization for coal fly ash from Power Plant[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(11):100-104.
- [11] 吴玉胜,张丽丽,王宏涛,等.利用粉煤灰制备高纯氧化铝新技术[J].中国材料进展,2017,36(3):195-199.
WU Y S, ZHANG L L, WANG H T, et al. New technology of preparing high purity alumina with coal fly as raw[J]. Materials China, 2017, 36(3):195-199.
- [12] 崔莉,李莎莎,郭彦霞,等.粉煤灰多元复杂体系锂资源提取的研究及发展[J].化工学报,2020,71(12):5388-5399.
CUI L, LI S S, GUO Y X, et al. Research and development of lithium recovery from multi-component complex system of coal fly ash[J]. CIESC Journal, 2020, 71(12):5388-5399.
- [13] 张梦露,陈传帅,王雪雪,等.烧结活化-酸浸法浸出粉煤灰中铝元素[J].环境工程学报,2021,15(7):2389-2397.
ZHANG M L, CHEN C S, WANG X X, et al. Extraction of aluminum from coal fly ash by sintering-acid leaching process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(7):2389-2397.
- [14] LYU Q F, WANG Z S, GU L Y, et al. Effect of sodium sulfate on strength and microstructure of alkaliactivated fly ash based geopolymer[J]. Journal of Central South University, 2020(27):1691-1702.
- [15] 王庆平,陆向阳.粉末冶金法制备粉煤灰/铝基复合材料的研究[J].热加工工艺,2007,36(4):24-25.
WANG Q P, LU X Y. Study of fly ash particulate aluminium based composite prepared by powder metallurgy technique[J]. Material & Heat Treatment, 2007, 36(4):24-25.
- [16] A Bhatt, S Priyadarshini, A A Mohanakrishnan, et al. Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review[J]. Case Studies in Construction Materials, 2019(11):e00263.
- [17] 刘延红,郭昭华,池君洲,等.粉煤灰提取氧化铝工艺技术进展[J].轻金属,2014(12):4-9.
LIU Y H, GUO Z H, CHI J Z, et al. Technology process of extracting alumina from coal ash[J]. Light Metal, 2014(12):4-9.
- [18] 李智伟,田昂,王宗凡,等.以粉煤灰为原料制备高纯单分散球形纳米氧化铝[J].硅酸盐通报,2020,39(3):812-818.
LI Z W, TIAN A, WANG Z F, et al. Preparation of high purity monodisperse spherical nano-alumina by using fly ash as raw material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(3):812-818.
- [19] 李艳,刘成龙,夏举佩,等.粉煤灰酸浸物制备氢氧化铝产品工艺优化研究[J].应用化工,2018,47(7):1425-1428,1433.

- LI Y, LIU C L, XIA J P, et al. Study on optimization of preparation process of aluminum hydroxide from coal fly ash acid leaching products[J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(7):1425-1428,1433.
- [20] 史学. 利用粉煤灰制备(介孔)活性氧化铝及其对铜离子的吸附性能表征[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- SHI X. Preparation and characterization of active (mesoporous) alumina and its adsorption properties for copper ions [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [21] 田万军, 韩磊, 施正伦. 煤灰酸浸渣碳分法制备纳米白炭黑性能研究[J]. 化工进展, 2018, 37(3):984-991.
- TIAN W J, HAN L, SHI Z L. Performance study of precipitated nano-silica from acid leaching residue of coal ash by carbonation method[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2018, 37(3):984-991.
- [22] 韩磊, 祝培旺, 戴华, 等. 煤灰酸浸渣碳分法制备纳米白炭黑的实验研究[J]. 材料导报 B: 研究篇, 2015, 29(8):106-110,114.
- HAN L, ZHU P W, DAI H, et al. Preparation of precipitated nano-silica from acid leaching residue of coal ash by carbonation method[J]. *Materials Review: Research*, 2015, 29(8):106-110,114.
- [23] 缪应菊, 李琳, 缪应纯, 等. 高硅粉煤灰基二氧化硅气凝胶的物理表征及其 CO₂ 捕集应用[J]. *中国测试*, 2020, 46(5):51-56+64.
- MIU Y J, LI L, MIU Y C, et al. Characterization of silica aerogels synthesized from high-Si fly ash and its application in CO₂ capture[J]. *China Measurement & Test*, 2020, 46(5):51-56+64.
- [24] 王明铭, 张忠伦, 辛志军. 以高硅粉煤灰为源的 SiO₂ 气凝胶常压干燥制备和性能研究[J]. 中国建材科技, 2020, 29(6):87-91.
- WANG M M, ZHANG Z L, XIN Z J. Preparation and properties study of silica aerogel using high-silicon fly ash as silicon source by ambient pressure drying method[J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2020, 29(6):87-91.
- [25] 范厚刚, 孙畅, 赵梓童, 等. 粉煤灰制备的沸石分子筛吸附性能研究[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2021, 42(1):7-10.
- FAN H G, SUN C, ZHAO Z T, et al. Study on adsorption property of zeolite molecular sieve prepared from fly ash[J]. *Journal of Jilin Normal University(Natural Science Edition)*, 2021, 42(1):7-10.
- [26] 张丽宏, 马斯琪. 循环流化床粉煤灰可控制备高纯 F 型八面沸石研究[J]. *人工晶体学报*, 2020, 49(2):339-345.
- ZHANG L H, MA S Q. Preparation of highly purity zeolite F from circulating fluidized bed fly ash[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2020, 49(2):339-345.
- [27] 马子然, 王宝冬, 路光杰. 粉煤灰基 SAPO-34 分子筛脱硝催化剂的合成及其脱硝性能[J]. 化工进展, 2020, 39(10):4051-4060.
- MA Z R, WANG B D, LU G J. Preparation and performance of SAPO-34 based SCR catalyst derived from fly ash[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(10):4051-4060.
- [28] 聂铁苗, 夏淼, 刘攀攀, 等. 粉煤灰基矿物聚合材料研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2022(4):123-128.
- NIE Y M, XIA M, LIU P P, et al. Research progress on fly ash based geopolymer[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(4):123-128.
- [29] 仇秀梅, 刘亚东, 严春杰, 等. 粉煤灰地质聚合物固化 Pb²⁺ 及其高温稳定性研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7):2281-2287,2294.
- QIU X M, LIU Y D, YAN C J, et al. Research on immobilization of Pb²⁺ using fly ash-based geopolymer and its thermostability[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(7):2281-2287,2294.
- [30] 冯泽平. 高钙粉煤灰地质聚合物的制备及耐久性研究[J]. 矿产保护与利用, 2018(2):107-110.
- FENG Z P. Study on preparation and durability of high-calcium fly ash based geopolymer[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2018(2):107-110.
- [31] 闫申, 刘菲, 赵彦亮. 粉煤灰微晶玻璃的实验研究[J]. 山东化工, 2018, 47(24):44-46+51.
- YAN S, LIU F, ZHAO Y L. Experimental study of fly ash microcrystalline glass[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2018, 47(24):44-46+51.
- [32] 金震楠, 羊新伟, 娄炎群, 等. 浅谈粉煤灰制堇青石陶瓷工艺[J]. *科学技术创新*, 2021(3):173-175.
- JIN Z N, YANG X W, LOU Y Q, et al. Cordierite ceramic process from fly ash[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2021(3):173-175.

Research Progress on Resource Utilization of Aluminum and Silicon in Fly Ash

WANG Liping, LI Chao

(Shenhua Zhunneng Resources Comprehensive Development Co., Ltd.,
ErDOS 010300, Inner Mongolia, China)

Abstract: This is an article in the field of mining engineering. Fly ash is not only a large amount of solid
(下转第 13 页)

- [7] 田铁磊, 蔡爽, 刘连继. PMC 配加庙沟粉球团氧化焙烧行为研究[J]. [矿产综合利用](#), 2021(6):123-126.
- TIAN T L, CAI S, LIU L J. Oxidation roasting behavior of pellets made from PMC and Miaogou powder[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2021(6):123-126.
- [8] 曹明明, 张建良. 钒钛磁铁矿冷压含碳球团的粘结剂选择[J]. [矿冶工程](#), 2012, 35(5):67-68.
- CAO M M, ZHANG J L. Selection of binder for vanadium titanomagnetite cold-pressed carbon pellets[J]. [Mining Metallurgical Engineering](#), 2012, 35(5):67-68.
- [9] 李宏煦. 铁矿球团有机粘结剂的分子初步设计及开发研究[J]. [烧结球团](#), 1998, 23(1): 30-35.

- LI H X. Molecular preliminary design and development of organic binder for iron ore pellets[J]. [Sintered pellets](#), 1998, 23(1): 30-35.
- [10] L 鲍林. 化学键的本质[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.
- Linus Pauling. The nature of bonds[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1981.
- [11] 王淀佐. 矿物浮选和浮选剂-理论与实践[M]. 湖南: 中南工业大学出版社, 1986.
- WANG D Z. Mineral flotation and flotation agents-theory and practice[M]. Hunan: Central South University of Technology Press, 1986.

Development and Application of Low Cost Binder for Iron Enriched Sludge

QI Jianling¹, PENG Bijun¹, QIN Jie¹, LUO Linggen², WANG Hua², SHI Xuefeng³

(1.State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2.Resource Application and Alloy Materials Division, China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China; 3.School of Metallurgy and Energy, North China University of Technology, Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract: This is an article in the field of mining engineering. Aiming at problems of high cost and high comminution rate in the iron enriched sludge pelletizing process, a new kind of low cost binder was developed. In this paper, the effects of water content, pressure and drying temperature on the falling strength and comminution rate of the pellets were studied. The results show that when the binder ratio is 1.5%, the falling strength of the raw pellets is more than 5 times/m, the falling strength of dried ball is more than 28 times/2 m, the comminution rate is less than 2%, which meets the requirements of production. At the same time, the binder cost of per ton pellet is reduced by 35% compared with the previous binder.

Keywords: Mining engineering; Iron enriched sludge; Binder; Falling strength; Comminution rate

////////////////////////////////////
(上接第 5 页)

waste discharged from coal-fired power plants, but also a potential secondary resource. At present, although the resource utilization of fly ash covers a wide range of fields, the high value utilization rate is low. The main chemical components of fly ash are silicon and alumina. Making full use of aluminum and silicon resources is one of the important ways to improve its resource utilization. In this article, the application of fly ash in the extraction of metallurgical grade alumina, preparation of non-metallurgical grade alumina, silica, silica aerogels, silicon-aluminum composites and other high value-added products are reviewed. The existing problems of high value utilization are analyzed and the future development trend is pointed out.

Keywords: Mining engineering; Fly ash; Aluminum; Silicon; High-value utilization