从粉煤灰活化熟料中脱钙及提取氧化铝工艺研究

王　凯

(中国神华能源股份有限公司哈尔乌素露天煤矿,内蒙古 鄂尔多斯　010300)

摘要:针对煤粉炉粉煤灰中铝元素因莫来石结构导致提取效率低的问题,提出采用高温强化脱钙—介质循环再生工艺从粉煤灰活化熟料中脱钙及提取氧化铝,通过单因素试验确定了脱钙及提铝的最佳工艺参数。结果表明:最优脱钙工艺条件为反应温度 160 ℃,盐酸浓度 12%,反应时间 4 h,在该条件下,CaO 脱除率达 98%以上,而 Al_2O_3 溶出率被有效抑制在 5%以下;最优提铝工艺条件为温度 60 ℃,盐酸浓度 26%,反应时间 0.5 h,在该条件下,Al_2O_3 溶出率超过 93%,溶出液中 Ca^{2+} 质量浓度可控制在 0.39 g/L 以下;创新性构建氯化钙闭路循环系统,可使滤液回用试验的活化剂回收率达 90%以上。该工艺实现了钙铝高效分离及助剂循环利用,可为粉煤灰提铝提供一种低碳化解决方案。

关键词:粉煤灰;活化;氯化钙;脱钙;氧化铝

中图分类号:TF803.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009-2617(2025)05-0653-07

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2025.05.010

燃煤电厂产生的粉煤灰是典型的工业固废,其规模化资源化利用对实现“双碳”目标意义重大[1]。煤粉炉粉煤灰因燃烧温度高,导致铝元素多以惰性莫来石形式赋存,造成氧化铝提取难度大且效率低下[2-3]。目前针对粉煤灰的活化方法主要包括粉磨活化法、硫酸活化法、铵盐活化法、氟化盐活化法及氯化钙活化焙烧法。其中,粉磨活化法工艺简单,但活化效果不佳,Al_2O_3 溶出率低;硫酸活化、铵盐活化法及氟化盐活化法均可获得较好的活化效果,但工业化应用中存在明显缺陷,硫酸活化法因强腐蚀性导致操作危险性高,铵盐活化法因试剂消耗量大而使经济性受限,氟化盐活化法因氟化物毒性大,易对生态环境与人体健康构成严重威胁[4-6];氯化钙活化焙烧法可有效破坏莫来石晶格结构,显著提升粉煤灰活性,但活化后熟料中氧化钙含量较高,易增加后续酸浸试剂消耗,同时引入钙杂质,干扰铝盐结晶纯化过程[7-13]。

现有研究多聚焦于活化剂选择和活化工艺优化方面,而有关高钙熟料脱钙机制及活化剂循环利用的系统性探索研究未见报道。因此,提出了“高温选择性脱钙—浓酸高效提铝—介质循环再生”耦合策略,通过系统性协调盐酸浓度、温度及反应时间的多参数关联,以实现氧化钙的高效脱除与氯化钙的原位再生协同目标。试验以准格尔矿区某电厂高铝粉煤灰为原料,通过二水氯化钙焙烧活化预处理,结合稀酸预脱钙与浓酸溶出工艺参数的协同优化,系统研究了钙铝分离的工艺效能,为工程化应用提供理论依据。

1　试验部分

1.1　试验原料、试剂及设备

试验原料:将准格尔地区某电厂高铝粉煤灰与二水氯化钙按质量比 1∶1 混合后,置于马弗炉中加热至 1 100 ℃,恒温焙烧 2.5 h,自然冷却后,得粉煤灰活化熟料[14],主要成分见表 1。粉煤灰主要由铝硅氧化物构成,其中 Al_2O_3 质量分数高达48.10%,还含有微量铁、钙及钛的氧化物,Al_2O_3 占比接近原料总质量的一半,这一特性为粉煤灰提铝工艺的实施提供了重要的物质基础;二水氯化钙活化使熟料中 CaO 质量分数从初始的 1.6%升至 30.46%,因此使得脱钙成为工艺中不可或缺的环节。

试剂:二水氯化钙、盐酸,均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

收稿日期:2025-04-10

基金项目:国家科学技术部“十二五”科技计划项目(2011BAA04B05)。

作者简介:王凯(1986—),男,本科,工程师,主要研究方向为固体废物资源化利用。

设备与仪器：TE-0912 型陶瓷纤维马弗炉，KLJX-12A 型均相反应器，GFX-10-100 型聚四氟反应釜，RE-52AA 型旋转蒸发器，GHB-K2Z 型高频熔样机，AXIOS-MAX 型 X 荧光光谱仪，ULTIMAIV 型 X 射线衍射仪，SUPRA55 型扫描电镜，Optima 8000 型电感耦合等离子体发射光谱仪。

表 1 物料的主要化学成分

Table 1 Chemical composition of materials %

样品	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	TiO_2
粉煤灰	40.09	48.10	1.98	1.62	0.18	0.39	0.23	0.22	2.06
活化熟料	32.62	34.70	1.04	30.46	0.09	0.03	0.04	0.16	1.36

1.2 试验原理

粉煤灰经二水氯化钙高温焙烧活化后，其内部矿物结构发生明显转变：低活性的莫来石和刚玉与 $CaCl_2$ 反应生成高活性的钙长石、钙铝黄长石和氯化氢气体[13]。这一物相重构过程有效破坏了铝硅酸盐的稳定晶体结构，有利于后续酸溶提铝。

在稀酸预脱钙阶段，钙长石、钙铝黄长石（以氧化钙形式表示）因碱性较强且反应活化能较低，优先与低浓度盐酸发生如下反应：

$$CaO+2HCl=\!=\!=CaCl_2+H_2O。$$

该反应可选择性溶解钙元素，同时避免高浓度酸对 Al—O 键的过度破坏，从而实现“脱钙保铝”的核心目标。

脱钙渣中残留的氧化铝主要以非晶态形式存在，其化学活性显著增强。在浓酸溶出阶段，H^+ 通过质子化作用高效断裂 Al—O 键，释放 Al^{3+} 进入溶液，反应如下：

$$Al_2O_3+6HCl=\!=\!=2AlCl_3+3H_2O。$$

1.3 试验方案与步骤

1.3.1 试验方案

熟料脱钙和脱钙渣提铝的工艺流程如图 1 所示。工艺条件的优化通过单因素试验确定，主要考察反应温度、盐酸浓度、反应时间 3 个因素对熟料脱钙、脱钙渣提铝的影响。

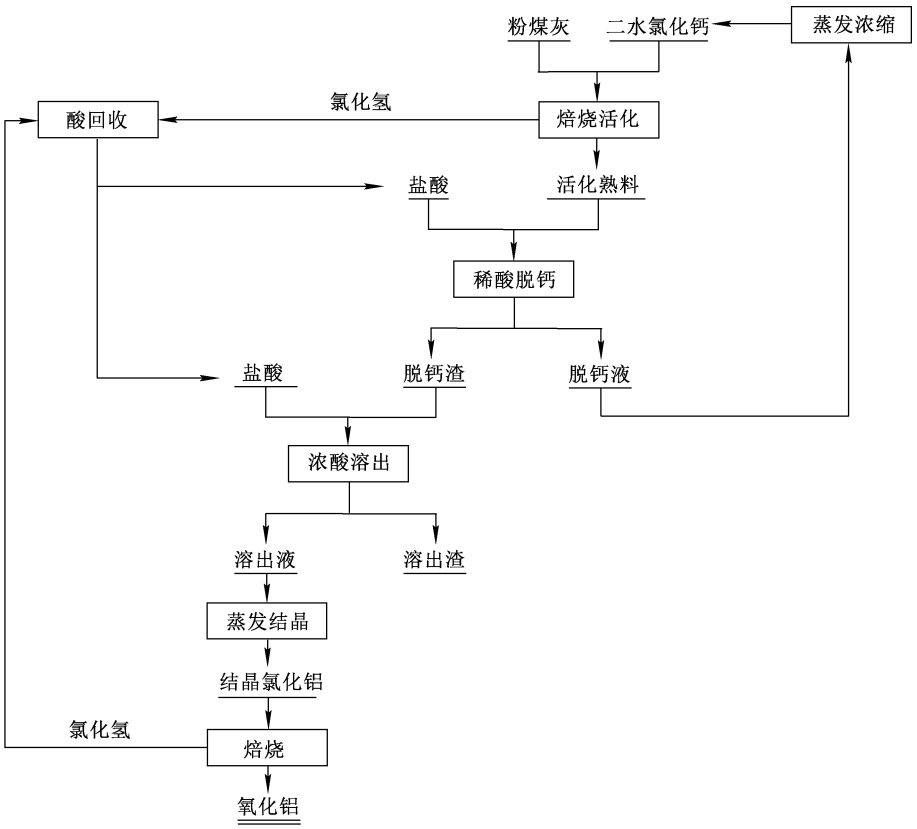


图 1 工艺流程

Fig. 1 Flowchart of process

1.3.2　试验步骤

1）活化熟料稀酸脱钙

配料与反应：称取 10 g 粉煤灰活化熟料，置于聚四氟乙烯内衬高压反应釜中，将 CaO 与 HCl 按物质的量比 1∶1 加入稀盐酸，密封后置于均相反应器中，在设定的温度和时间下进行反应。

后处理与分析：反应结束后，利用布氏漏斗分离固液两相，滤渣洗涤烘干后得到脱钙渣，用 XRF 测定成分含量，计算 Al_2O_3 和 CaO 溶出率；采用 ICP-OES 测定滤液（脱钙液）中 $CaCl_2$ 及 $AlCl_3$ 浓度。

2）脱钙渣浓酸溶出提铝

溶出反应：称取 10 g 脱钙渣，将可溶 Al_2O_3 与 HCl 按物质的量比 1∶1 加入浓盐酸，之后转移至均相反应器中，在设定温度和时间下进行反应。

分离与分析：反应完成后，利用布氏漏斗分离固液两相，溶出渣经洗涤烘干后采用 XRF 测定成分含量，计算 Al_2O_3 和 CaO 溶出率；通过 ICP-OES 分析溶出液中 $AlCl_3$ 及 $CaCl_2$ 浓度。

3）氯化钙滤液循环利用

滤液浓缩：将最佳脱钙条件下所得脱钙液置于旋转蒸发仪中，在 70 ℃下减压浓缩至原体积的 1/3（真空度 −0.09 MPa），得浓缩液。

回用焙烧：按粉煤灰与浓缩液固液质量体积比 1∶1.2 混合，在 1.1 节的活化条件下焙烧，得回用熟料，用于测试活性。

1.4　计算方法

假定物料中 SiO_2 在脱钙、溶出过程中不参与反应，得到 Al_2O_3 或 CaO 溶出率 x_B 的计算公式如下：

$$x_B = \left(1 - \frac{w_1 \times w_{B2}'}{w_1' \times w_{B2}}\right) \times 100\% \text{。}$$

式中：w_1—反应前物料中 SiO_2 质量分数，%；w_1'—反应后物料中 SiO_2 质量分数，%；w_{B2}—反应前物料中 Al_2O_3 或 CaO 质量分数，%；w_{B2}'—反应后物料中 Al_2O_3 或 CaO 质量分数，%。

2　试验结果及讨论

2.1　各阶段物料性质分析

通过 XRD、XRF 及 SEM 系统表征试验各阶段物料的物相组成、化学成分及微观形貌特征，分析结果见表 2 和图 2、3。

表 2　脱钙渣和铝溶出渣的化学成分

Table 2　Chemical composition of decalcified slag and leached residue　　%

物料	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	P_2O_5	TiO_2
脱钙渣	47.88	47.89	1.57	0.89	0.04	0.30	2.04
溶出渣	89.74	6.64	0.26	1.13	0.04	0.10	2.76

由表 2 可知：通过优化后的脱钙工艺，脱钙渣中 CaO 质量分数降至 1%以下，此时物料的主要成分为 Al_2O_3 和 SiO_2，可为后续提取铝创造有利条件；在浓酸溶出阶段，氧化铝提取率可达 93%以上，最终溶出渣中二氧化硅质量分数高达 89.74%。

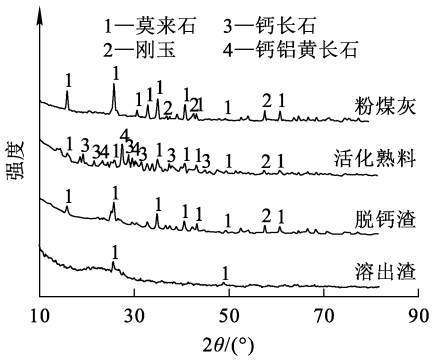


图 2　粉煤灰、活化熟料、脱钙渣及溶出渣的 XRD 图谱

Fig. 2　XRD patterns of fly ash, activated clinker, decalcified slag, and leached residue

由图 2 看出：粉煤灰中 Al_2O_3 以低活性矿物相（莫来石、刚玉）为主要赋存形式，由于这些矿物结构稳定且反应活性低，导致氧化铝难以通过常规方法直接提取；经过二水氯化钙活化处理后，大部分低活性的莫来石和刚玉转化为高活性的钙长石和钙铝黄长石，但仍有少量莫来石和刚玉未被活化，该矿物相演变过程大大优化了物料的化学活性；值得注意的是，熟料经过脱钙处理后，钙长石和钙铝黄长石的晶型结构被破坏，剩余的氧化铝主要以无定形态存在，XRD 图谱中仅显现活化焙烧中未反应的莫来石与刚玉的特征峰；在浓酸溶出后，大部分氧化铝虽被提取，但仍有少量以莫来石形式存在的氧化铝未被溶出，而二氧化硅则以无定形态赋存于溶出渣中。

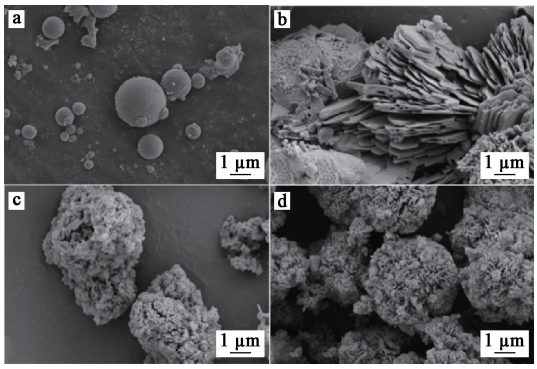


图 3 粉煤灰(a)、活化熟料(b)、脱钙渣(c)及溶出渣(d)的 SEM 照片

Fig. 3 SEM images of fly ash (a), activated clinker (b), decalcified slag (c), and leached residue (d)

由图 3 看出:未处理粉煤灰的颗粒呈均匀球形,表面光滑致密且比表面积小,这一微观结构特征导致其表面反应位点有限,明显抑制了化学活性;经过活化处理后,这些密实的球形颗粒转变为疏松的片状结构,比表面积显著增加,暴露出更多活性位点,活性明显提高,能为后续脱钙反应提供动力学优势;经稀酸脱钙后,脱钙渣形貌进一步演变为表面粗糙的絮状多孔团聚体,内部形成大量孔隙,这些结构变化使得物料的反应活性得到进一步提升;最终,溶出渣形成不规则碎片状形貌,残留物以非晶态二氧化硅为主。上述形貌-活性关联性证明,通过结构重构可实现反应界面优化,这是本工艺提升铝提取效率的关键机制。

2.2 活化熟料稀酸脱钙条件优化

2.2.1 反应温度对脱钙效果的影响

在反应时间 5 h、盐酸浓度 4%条件下,以反应温度为单因素变量,研究其对脱钙效果的影响,以活化熟料中氧化铝和氧化钙溶出率为指标综合判定脱钙效果。试验结果如图 4 所示。

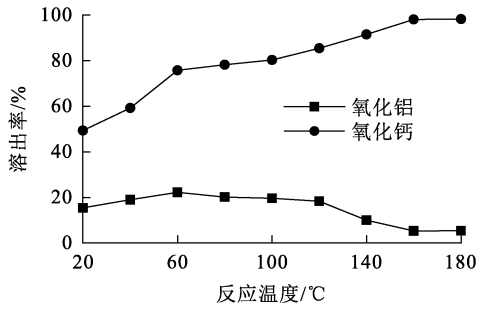


图 4 反应温度对脱钙效果的影响

Fig. 4 Influence of reaction temperature on decalcification effect

由图 4 看出:CaO 溶出率随反应温度升高而升高,而 Al_2O_3 溶出率随反应温度升高先小幅升高,而在反应温度超过 60 ℃后逐渐降低,这表明高温对钙、铝的溶出行为具有显著选择性调控作用。其作用机制为:试验开始时,盐酸添加量恒定,低温条件下反应驱动力不足,氧化铝与氧化钙的反应速率差异较小,因此二者溶出率均呈升高趋势;当温度升至特定阈值时,氧化钙反应速率远超氧化铝,H^+ 大量消耗,供给不足,导致氧化铝溶出率降低。当温度升至 160 ℃时,CaO 溶出率已接近 100%,而 Al_2O_3 溶出率仍处于较低水平,且后续温度提升对二者的溶出行为未产生明显影响,表明该条件下溶出反应已趋于动力学平衡。为实现钙铝高效分离与能耗优化,确定 160 ℃为脱钙工艺的核心温度条件。

2.2.2 盐酸浓度对脱钙效果的影响

在反应时间 5 h、反应温度 160 ℃条件下,以盐酸浓度为单因素变量,研究其对脱钙效果的影响,以活化熟料中氧化铝和氧化钙溶出率为指标综合判定脱钙效果。试验结果如图 5 所示。

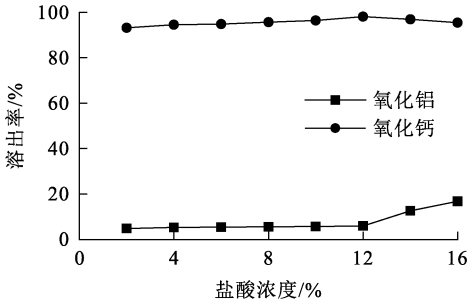


图 5 盐酸浓度对脱钙效果的影响

Fig. 5 Influence of hydrochloric acid concentration on decalcification effect

由图 5 看出:随盐酸浓度升高,氧化钙与氧化铝溶出率均呈升高趋势,但增幅较为平缓;当盐酸浓度突破 12%阈值时,体系中 H^+ 浓度显著提升,引发 Al—O 键断裂概率增加,促使氧化铝溶出率显著提升,而受限于盐酸总量恒定,氧化钙溶出率增速趋缓并呈相对下降趋势。从工艺经济性角度考量,选择 12%作为脱钙盐酸最优浓度,该条件既能确保氧化钙溶出率达到峰值,又可将氧化铝溶出量控制在较低水平,同时能与后续脱钙液浓缩回用工艺形成良好适配,显著降低蒸发负荷,从而减少能源消耗并缩短处理周期,实现工艺整体经济性的优化。

2.2.3　反应时间对脱钙效果的影响

在盐酸浓度 12%、反应温度 160 ℃条件下，以反应时间为单因素变量，研究其对脱钙效果的影响，以活化熟料中氧化铝和氧化钙溶出率为指标综合判定脱钙效果。试验结果如图 6 所示。

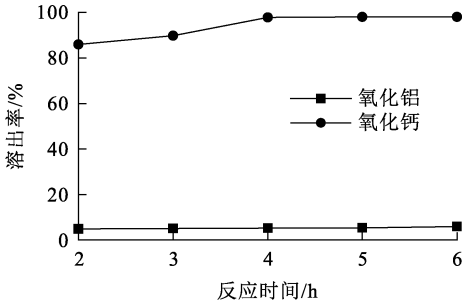


图 6　反应时间对脱钙效果的影响

Fig. 6　Influence of reaction time on decalcification effect

由图 6 看出，氧化钙与氧化铝溶出率均随反应时间延长而升高，但二者升高幅度存在显著差异：CaO 溶出率快速提升，而 Al_2O_3 溶出率仅小幅升高且始终处于低位；当反应时间超过 4 h 后，氧化钙溶出率趋于稳定，表明脱钙反应已达动力学平衡。综合考量脱钙效率与生产时效，最终确定 4 h 为最优反应时间，该时长既能确保活化熟料中氧化钙的充分脱除，又可避免因过度延长反应时间导致的能耗增加，能实现脱钙效果与工艺经济性的优化平衡。值得注意的是，在此过程中氧化铝溶出率始终在较低水平，进一步说明该工艺对钙铝选择性分离具有优异的调控能力。

2.3　脱钙渣提铝条件优化

2.3.1　反应温度对提铝效果的影响

在反应时间 5 h、盐酸浓度 28%条件下，以反应温度为单因素变量，研究其对提铝效果的影响，以脱钙渣中氧化铝溶出率和溶出液中 Ca^{2+} 质量浓度为指标综合判定提铝效果。试验结果如图 7 所示。可以看出，反应温度对 Al_2O_3 溶出率和溶出液中 Ca^{2+} 质量浓度的影响差异明显：升高温度对溶出液中 Ca^{2+} 质量浓度具有明显促进作用，而对 Al_2O_3 溶出率的提升效果则相对有限；当温度超过 60 ℃后，Al_2O_3 溶出率趋于稳定，几乎不变，而溶出液中 Ca^{2+} 质量浓度大幅升高。综合考虑，选定 60 ℃为最优提铝温度。该温度可在确保 Al_2O_3 高效溶出的同时，有效抑制溶出液中 Ca^{2+} 质量浓度升高，从而大幅降低溶出液的后续除杂难度，为获得高纯度 Al_2O_3 产品提供保障。

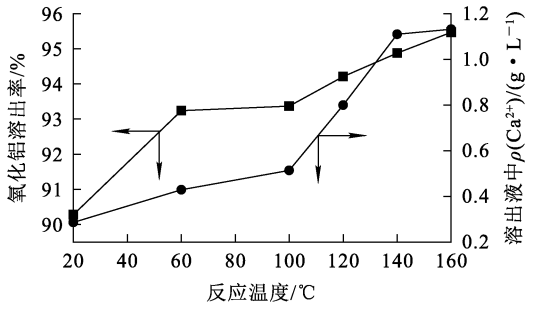


图 7　反应温度对提铝效果的影响

Fig. 7　Influence of reaction temperature on alumina extraction effect

2.3.2　反应时间对提铝效果的影响

在反应温度 60 ℃、盐酸浓度 28%条件下，以反应时间为单因素变量，研究其对提铝效果的影响，以脱钙渣中氧化铝溶出率和溶出液中 Ca^{2+} 质量浓度为指标综合判定提铝效果。试验结果如图 8 所示。

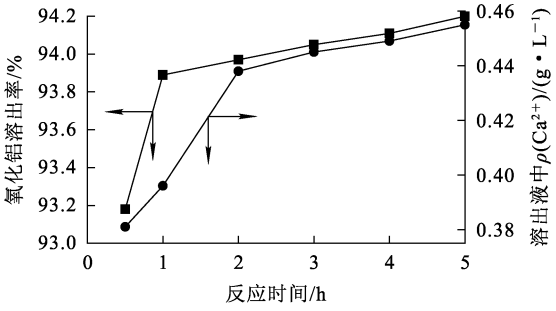


图 8　反应时间对提铝效果的影响

Fig. 8　Influence of reaction time on alumina extraction effect

由图 8 看出，反应时间对 Al_2O_3 的溶出和溶出液中 Ca^{2+} 质量浓度的影响有明显差异：Al_2O_3 溶出率在 0.5 h 后即趋于稳定，受反应时间延长的影响很小，而溶出液中 Ca^{2+} 质量浓度随反应进行持续增大。综合能耗控制、生产效率提升，以及“保障氧化铝充分溶出，同时有效抑制溶出液中 Ca^{2+} 质量浓度增加”的工艺需求，确定 0.5 h 为最优反应时间。该时长设定不仅能缩短反应时间，降低能耗成本，还能精准平衡 Al_2O_3 溶出效率与溶出液中 Ca^{2+} 质量浓度的控制，使之与工艺优化目标高度契合。

2.3.3　盐酸浓度对提铝效果的影响

在反应温度 60 ℃、反应时间 0.5 h 条件下，以盐酸浓度为单因素变量，研究其对提铝效果的影响，以脱钙渣中氧化铝溶出率和溶出液中 Ca^{2+}

质量浓度为指标综合判定提铝效果。试验结果如图 9 所示。

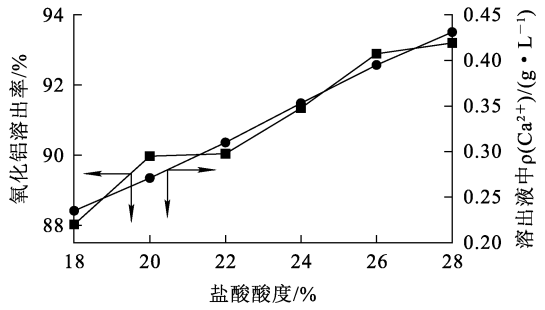


图 9 盐酸酸度对提铝效果的影响

Fig. 9 Influence of hydrochloric acid concentration on alumina extraction effect

由图 9 看出：Al_2O_3 溶出率和溶出液中 Ca^{2+} 质量浓度均随盐酸浓度升高而升高；当盐酸浓度超过 26%时，Al_2O_3 溶出率趋于稳定，此时溶出液中 Ca^{2+} 质量浓度为 0.39 g/L。结合工艺流程中酸液回收环节的特性(回收酸浓度约 26%)，从溶出效果与工艺协同性综合考虑，确定 26%为最优盐酸浓度。该浓度既能保证氧化铝的高效溶出，又能与酸液回收工艺形成适配，实现工艺整体效能的优化。

2.4 工艺扩展性验证

2.4.1 脱钙滤液回用

对稀酸脱钙处理后的滤液成分进行分析，结果表明，氯化钙质量浓度为 210.35 g/L，氯化铝质量浓度为 5.88 g/L。通过物料衡算分析，二水氯化钙活化剂回收率达 91.38%，验证了活化剂的高效循环潜力。为进一步评估滤液回用可行性，将浓缩后的脱钙滤液($CaCl_2$ 质量浓度提升至 630.50 g/L)与原料粉煤灰按固液体积质量比 1∶1.2混合，并在 1 100 ℃下焙烧 2.5 h，所得熟料的氧化铝溶出率为 92.6%，与新鲜活化剂效果相当。可见脱钙滤液循环利用不仅能够显著降低活化剂原料消耗，还能保持熟料的高反应活性，说明该工艺兼具工业化可行性与经济性优势。

2.4.2 脱钙渣湿滤饼酸溶提铝

脱钙后物料经过抽滤得含水率为 66%的湿滤饼，将其与 26%盐酸反应。经计算可知，氧化铝溶出率为 92.53%，溶出液中氯化铝质量浓度为 160.23 g/L，氧化钙质量浓度为 0.30 g/L。这表明，湿滤饼直接溶出工艺不仅能避免烘干环节的能源消耗，还能满足工业化生产对铝纯度和杂质控制的双重要求，可为粉煤灰的高效资源化与低碳化处理提供一种创新性工艺路径。

3 结论

1)高温强化脱钙工艺能突破传统常温脱钙限制，在 160 ℃高温下反应能显著提升氧化钙脱除效率，同时有效抑制氧化铝溶出，通过钙铝选择性分离机制有效解决高钙熟料的后续处理难题。在温度 160 ℃、盐酸浓度 12%、反应时间 4 h 最优条件下，钙脱除率可达 98.86%，铝损失率仅为 4.87%。

2)针对脱钙渣，在温度 60 ℃、盐酸浓度 26%、反应时间 0.5 h 最优条件下溶出铝，Al_2O_3 溶出率可达 93.15%，溶出液中 Ca^{2+} 质量浓度仅为 0.39 g/L，能实现高效提铝与低钙杂质引入的双重目标。

3)构建氯化钙循环系统，滤液浓缩回用后活化剂回收率达 91.38%，再生熟料活性与新鲜二水氯化钙活化效果相当，湿滤饼直接酸溶避免了烘干环节的能源消耗，工艺具有可行性。

本工艺通过“高温选择性脱钙—浓酸高效提铝—介质循环再生”三阶段协同，形成粉煤灰提铝低碳化技术体系，为工业固废资源化提供了创新路径。粉煤灰中镓、锂等稀散元素的赋存状态与溶出规律尚未明确，今后可结合离子交换、溶剂萃取等技术实现多元素联产。

参考文献：

[1] 李文清，邹萍，池君洲，等. 用盐酸从循环流化床粉煤灰中浸出氧化铝[J]. 湿法冶金，2020，39(2)：110-113.
LI Wenqing，ZOU Ping，CHI Junzhou，et al. Leaching of alumina from circulating fluidized bed fly ash using hydrochloric acid[J]. Hydrometallurgy of China，2020，39(2)：110-113.

[2] OHENOJA K，PESONEN J，YLINIEMI J，et al. Utilization of fly ashes from fluidized bed combustion：a review[J]. Sustainability，2020，12(7)：2988-2988.

[3] ZHANG S J，YU L，LYU Y，et al. High efficiency selective recovery of Al from high-alumina fly ash by multistage activation and carbonation on-site application scale[J]. Chemical Engineering Journal，2025，506. DOI：10.1016/j.cej.2025.160003.

[4] 周秀艳，李潇鼎，李娜，等. 粉煤灰基托贝莫来石的合成及应用进展[J]. 洁净煤技术，2024，30(增刊 2)：93-102.
ZHOU Xiuyan，LI Xiaoding，LI Na，et al. Recent progress of synthesis and application of fly ash based tobermorite[J]. Clean Coal Technology，2024，30(Sup. 2)：93-102.

[5] 高志娟，王相人. 煤粉炉粉煤灰提取氧化铝活化技术研究进展[J]. 无机盐工业，2021，53(2)：24-27.
GAO Zhijuan，WANG Xiangren. Research progress in alumina activation technology from pulverized-coal fly ash[J]. Inorganic Chemicals Industry，2021，53(2)：24-27.

[6] 赵梓，赵爱春，刘宸嘉，等. 硫酸铵焙烧活化—硫酸浸出粉煤灰提铝熟料的动力学研究[J]. 湿法冶金，2024，43(2)：129-133.
ZHAO Zi，ZHAO Aichun，LIU Chenjia，et al. Kinetics of aluminum extraction clinker from fly ash by ammonium sulfate roasting activation—sulfuric acid leaching[J]. Hydrometallurgy of China，2024，43(2)：129-133.

[7] 王沙，秦伟，韩雪，等. 粉煤灰中锂元素的浸出及动力学研究[J]. 湿法冶金，2024，43(6)：646-651.
WANG Sha，QIN Wei，HAN Xue，et al. Leaching and kinetic of lithium element from waste coal fly ash[J]. Hydrometallurgy of China，2024，43(6)：646-651.

[8] WANG M，CHEN D，WANG H，et al. A review on fly ash high-value synthesis utilization and its prospect[J]. Green Energy and Resources，2024，2(1)：DOI：10. 1016/j. gerr. 2024. 100062.

[9] 张晗阳，胡宪伟，康红光，等. 粉煤灰酸浸液中 $AlCl_3$-$FeCl_3$-$FeCl_2$-HCl-H_2O 体系的离子结构研究[J]. 湿法冶金，2025，44(4)：440-447.
ZHANG Hanyang，HU Xianwei，KANG Hongguang，et al. Ionic structure of $AlCl_3$-$FeCl_3$-$FeCl_2$-HCl-H_2O system in acid leaching solution of fly ash[J]. Hydrometallurgy of China，2025，44(4)：440-447.

[10] SONG Y M，GUO C C，QIAN J S，et al. Effect of the Ca-to-Si ratio on the properties of autoclaved aerated concrete containing coal fly ash from circulating fluidized bed combustion boiler[J]. Construction and Building Materials，2015，83：136-142.

[11] 王爱爱，王宏宾，吴永峰. 粉煤灰酸法提取氧化铝脱钙工艺分析比较[J]. 轻金属，2021(6)：16-19.
WANG Aiai，WANG Hongbin，WU Yongfeng. Analysis and comparison of decalcification process of alumina extracted with fly ash acid method[J]. Light Metals，2021(6)：16-19.

[12] WEN J，YUAN R R，JIANG T，et al. Solvothermal synthesis and adsorption performance of layered boehmite using aluminum chloride and high-alumina fly ash[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering，2024，70(6)：280-290.

[13] 刘大锐，李文清，刘清亮. 用氢氧化钠从粉煤灰提铝废渣中浸出镓[J]. 湿法冶金，2022，41(6)：509-512.
LIU Darui，LI Wenqing，LIU Qingliang. Leaching of gallium from aluminum-extraction waste slag of fly ash using sodium hydroxide solution[J]. Hydrometallurgy of China，2022，41(6)：509-512.

[14] 王凯. 二水氯化钙活化煤粉炉粉煤灰提铝工艺研究[J]. 能源科技，2025，23(1)：37-41.
WANG Kai. Research on the process of using calcium chloride dihydrate to activate coal powder furnace fly ash for extracting alumina[J]. Energy Science and Technology，2025，23(1)：37-41.

Decalcification and Extraction of Alumina from Activated Fly Ash Clinker

WANG Kai

(*Harusu Opencast Coal Mine of China Shenhua Energy Co.，Ltd.，Ordos*　010300，*China*)

Abstract：To address the issue of low extraction efficiency of aluminum from fly ash in pulverized coal furnaces due to its mullite structure，a process combining high—temperature enhanced decalcification with medium recycling to remove calcium and extract alumina from activated fly ash clinker was proposed. The optimal process parameters for decalcification and alumina extraction were determined through single-factor experiments. The results indicate that the optimal decalcification conditions are reaction temperature of 160 ℃，hydrochloric acid concentration of 12%，and reaction time of 4 h. Under the conditions，the CaO removal rate exceeds 98%，while the Al_2O_3 dissolution rate is effectively suppressed below 5%. The optimal alumina extraction conditions are temperature of 60 ℃，hydrochloric acid concentration of 26%，and reaction time of 0. 5 hours，achieving an Al_2O_3 dissolution rate of over 93% and controlling the Ca^{2+} concentration in the leachate below 0. 39 g/L. Innovatively，a closed-loop calcium chloride recycling system is constructed，enabling recovery rate of over 90% for the activator in filtrate reuse tests. The process can achieve efficient calcium-aluminum separation and recycling of additives，offering a low-carbon solution for alumina extraction from fly ash.

Key words：fly ash；activation；calcium chloride；decalcification；alumina