

Dissolution of neutralized slag acid leaching substances of coal gangue

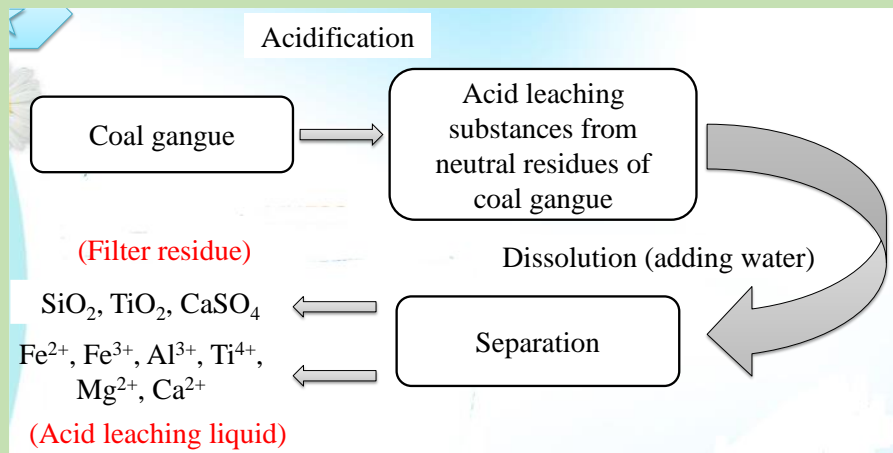
Guangya ZHENG¹, Zhengjie CHEN^{2*}, Jupei XIA¹, Weijie WANG¹, Fang GU¹, Yibo SHI¹,
Haolin LI¹, Wanlin LI¹, Chenglong LIU³

1. Faculty of Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China

2. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China

3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ningxia Normal University, Guyuan, Ningxia 756000, China

Abstract: Coal gangue is a kind of coal-bearing kaolinite associated with coal and a kind of solid waste discharged during coal mining and coal washing. The output of coal resources in our country is huge, so there is a large amount of solid waste emission of coal gangue. The high value-added comprehensive utilization is of great significance to the economy, the environment



and the society. The neutralized slag acid leaching substances of coal gangue was used to extract the valuable elements from the acid solution. The effects of dissolution temperature, dissolution time and mass ratio of liquid to solid on the dissolution process of acid solution were researched in this work. Based on the single factor experiment, the dissolution conditions were optimized by these orthogonal experiments. The phase and micro morphology of the neutralized slag acid leaching substances of coal gangue, the acidified product and the acid slag were analyzed by XRD and SEM. The results indicated that the dissolution rates of valuable element oxides were TiO₂ 82.63%, Fe₂O₃ 96.48%, Al₂O₃ 98.33%, CaO 87.72%, MgO 95.31%, respectively, when dissolution temperature was 80 °C, dissolution time was 40 min, mass ratio of liquid to solid was 3:1. Only SiO₂ and a small amount of TiO₂ were found in acid slag after neutralization residue dissolved. The existence of CaSO₄ indicated that the valuable elements in coal gangue and residue acid were fully dissolved through this process. This method had the advantages of short dissolution time, less water consumption and higher dissolution rate of valuable elements in acid leaching system. With this research, it is expected to provide a new approach for the efficient utilization of coal gangue resources.

Key words: coal gangue; neutral residues; acid leaching substances; dissolution

收稿: 2019-04-10, 修回: 2019-06-26, 网络发表: 2019-07-17, Received: 2019-04-10, Revised: 2019-06-26, Published online: 2019-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 21566018); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(编号: 2018BEE03021)

作者简介: 郑光亚(1994-), 男, 湖北省黄冈市人, 硕士研究生, 化学工程专业, E-mail: 810193075@qq.com; 陈正杰, 通讯联系人, E-mail: czjkmust@126.com.

引用格式: 郑光亚, 陈正杰, 夏举佩, 等. 煤矸石中和渣酸浸物的溶出. 过程工程学报, 2020, 20(2): 174-181.

Zheng G Y, Chen Z J, Xia J P, et al. Dissolution of neutralized slag acid leaching substances of coal gangue (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(2): 174-181, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219178.

煤矸石中和渣酸浸物的溶出

郑光亚¹, 陈正杰^{2*}, 夏举佩¹, 王伟杰¹, 辜芳¹, 师一博¹, 李浩林¹,
李宛霖¹, 刘成龙³

1. 昆明理工大学化学工程学院, 云南 昆明 650500

2. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093

3. 宁夏师范学院化学化工学院, 宁夏 固原 756000

摘要: 采用浸提法提取煤矸石中和渣酸浸物中的有价元素, 考察了溶出温度、溶出时间和溶出液固质量比对酸浸物溶出过程的影响; 以单因素实验为基础, 进行正交实验, 优化溶出工艺条件, 用 X 射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM)表征煤矸石中和渣酸浸物、酸化产物及滤渣的物相和微观形貌。结果表明, 酸浸物溶出最优工艺条件为液固质量比 3:1、溶出时间 40 min、溶出温度 80℃, 此时有价元素氧化物的溶出率分别为 TiO₂ 82.63%, Fe₂O₃ 96.48%, Al₂O₃ 98.33%, CaO 87.72%, MgO 95.31%。提取后滤渣中只有 SiO₂ 和少量 TiO₂ 及 CaSO₄ 存在, 表明煤矸石中和渣酸浸物中的有价元素通过该溶出工艺可充分溶出。

关键词: 煤矸石; 中和渣; 酸浸物; 溶出

中图分类号: X752

文献标识号: A

文章编号: 1009-606X(2020)02-0174-08

1 前言

煤矸石是煤炭开采、掘进、洗选、加工等生产过程中排出的固体废弃物^[1-4], 与煤系地表共生^[5], 是一种与煤共同沉积的有机化合物和无机化合物混合的含碳岩石^[6,7]。煤炭开采通常涉及建井、矿井改建、原煤洗选等过程^[8], 过程中采煤层的顶底板、煤层的岩石夹缝、井筒、主副井、运输大巷等都会产生煤矸石^[9], 其中, 采煤过程、巷道及原煤洗选过程产生的煤矸石分别约为煤矸石总量的 30%、65%和 5%^[10]。随着社会快速发展, 能源需求量逐渐增加, 煤矸石的累积量也不断增多, 但目前国内外对煤矸石的综合利用率较低。我国现存矸石山约 1600 余座, 累积了 50 多亿吨煤矸石, 严重危害大气、土壤、水质和地质等^[11,12]。

当前, 国内外从煤矸石中提取有价值元素的工艺主要有碱熔法和酸浸法, 其中采用碱熔法的较多, 但存在能耗高、碱耗高、成本高等问题, 且生产工艺繁琐, 产生大量比煤矸石危害性更大的碱残渣等^[13,14]。因此, 探索一种高效提取煤矸石中有价值元素的绿色环保工艺, 实现煤矸石资源有效转化与利用, 具有十分重要的意义。

煤矸石原料经破碎、干燥、活化处理后, 通过初步中和, 使其中易反应的铁及部分铝溶出, 获得富硅低铁煤矸石中和渣, 更有利于其中铝、钛有价元素酸化溶出, 实现酸渣的纯化和硅的富集, 为酸渣中硅的资源化利用

创造条件。采用硫酸法从煤矸石提取有价元素有不少研究。夏举佩等^[15-17]采用加浓硫酸酸化、浸提方法提取煤矸石中和渣中的有价元素铝和钛, 结果表明, 最优提取条件为酸渣质量比 1.5:1、反应温度 170℃、溶解时间 60 min、溶解温度 80℃, 此时铝和钛溶出率分别达 98.32%和 92.28%, 但未对酸化后的酸浸物溶出过程进行系统研究; 用煤矸石酸浸液脱除高铁钛型煤矸石中的大部分铁, 实现钛富集, 最佳工艺条件为酸浓度 10%、水浴温度 70℃、反应时间 5 h、液固质量比 7:1, 脱铁率达 89.02%, 钛富集率为 42.94%, 但溶出耗时较长、用水量多, 增加了生产成本^[18]。综上所述, 在缩短煤矸石中和渣酸浸物溶出时间、实现在较少用水量下达到高溶出率的研究还未见报道。

本工作以煤矸石中和渣酸浸物为研究对象, 探究溶出温度、溶出时间和液固质量比对溶出过程的影响, 通过正交实验确定酸浸物中钛、铝、铁等有价元素溶出的最优工艺, 借助 XRD 与 SEM 探明煤矸石中和渣酸浸物溶出机理, 以期提高溶出过程中水的利用率并缩短溶出时间, 从而为煤矸石高效资源化综合利用探索有价值的思路。

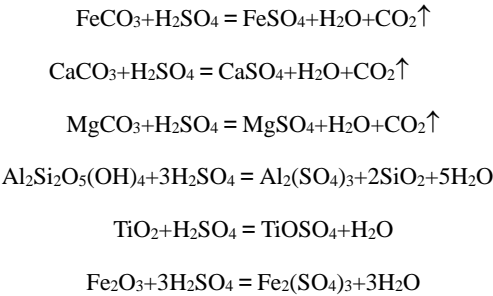
2 实验

2.1 实验原料

煤矸石中和渣酸浸物是煤矸石(贵州盘州某集团)与 98%浓硫酸在酸渣质量比1.2:1、反应时间4 h、反应温度

170 ℃条件下进行酸化反应，反应完成后冷却10 min后的固体物。加水溶解，使酸浸物中各物质在水浴加热下分散，最终固液分离得滤液和滤渣。

煤矸石主要由石英、高岭石、赤铁矿、菱铁矿、锐钛矿及碳酸盐组成。石英的主要成分为 SiO₂，为酸性氧化物，是一种物化性质较稳定的矿产资源，不与除氟化氢外的所有常见无机酸反应。煤矸石硫酸浸出过程可能发生如下反应：



煤矸石中和渣酸浸物的XRD谱如图1所示。可以看出，煤矸石中和渣酸浸物主要由石英、硫酸钛、硫酸钙、硫酸亚铁及水合硫酸氢铝等组成。

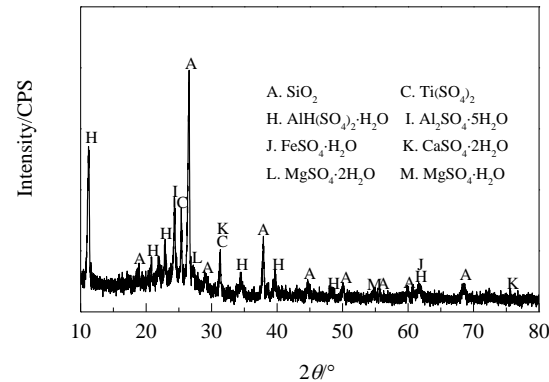


图 1 煤矸石中和渣酸浸物的 XRD 谱
Fig.1 XRD pattern of neutralized slag acid leaching substances of coal gangue

表 1 煤矸石中和渣酸浸物的化学成分

Table 1 Chemical composition of neutralized slag acid leaching substances of coal gangue									
Composition	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	Mn	Loss on ignition, LOI/%
Content/wt%	37.17	4.68	13.32	15.99	3.09	0.83	0.12	0.17	22.28

2.2 实验设备及分析仪器

实验设备：DG/20-002 型台式烘箱(重庆实验设备厂)，SX2-4-10 型马弗炉(上海实研电炉有限公司)，ZNCL-G-C 型恒温水浴锅(江苏江分电分析仪器有限公司)，XMQ-67/70L 型筒式球磨机(南昌恒盛化验制样机厂)，721B 型紫外分光光度计(上海第三分析仪器厂)。

分析仪器：用 TTRIII型 X 射线衍射仪(XRD，日本理学电气公司)分析物相组成，用 Quanta 200 型扫描电子显微镜(SEM，美国 FEI 公司)分析微观形貌。

2.3 实验方法

取 25 g 煤矸石中和渣酸浸物，按一定液固质量比加水溶解，在水浴锅中反应，分别考察溶出温度、溶出时间和液固质量比对溶出过程的影响。溶解完全后过滤，滤渣用酸浸体系循环工艺水(首次启动时用去离子水)洗涤至 pH=3.0，在 105 ℃下烘干 2 h。取干燥后的滤渣进行成分分析，并计算各成分的溶出率。

2.4 分析方法

采用《煤灰成分分析方法》(GB/T 1574-2007)中的硅钼蓝分光光度法、二安替比林甲烷分光光度法、邻菲罗啉分光光度法、氟盐取代 EDTA 络合滴定法、EDTA 络合滴定法定量分析煤矸石中和渣酸浸物的成分，结果

见表 1。实验条件下，氧化硅以固相形式存在于体系中，最终转入渣相。实验中过滤所得滤渣可能有损失，由于氧化硅不与硫酸反应，因此以氧化硅作平衡，通过下式计算滤渣质量和煤矸石中有价组分的溶出率：

$$m_{\text{滤渣}} = \frac{m_{\text{中和渣酸浸物}} \times w_{\text{中和渣酸浸物 SiO}_2}}{w_{\text{滤渣 SiO}_2}}$$

(1)

$$\eta_x = \left(1 - \frac{m_{\text{滤渣}} w_{x \text{ 滤渣}}}{m_{\text{中和渣酸浸物}} w_{x \text{ 中和渣酸浸物}}}\right) \times 100$$

(2)

式中， $m_{\text{滤渣}}$ 、 $m_{\text{中和渣酸浸物}}$ 分别为滤渣和中和渣酸浸物的质量(g)， $w_{\text{中和渣酸浸物 SiO}_2}$ 、 $w_{\text{滤渣 SiO}_2}$ 分别为中和渣酸浸物和滤渣中 SiO₂ 含量(wt%)， η_x 为中和渣酸浸物中氧化物 x 的溶出率(%)， $w_{x \text{ 中和渣酸浸物}}$ 、 $w_{x \text{ 滤渣}}$ 分别为中和渣酸浸物和滤渣中氧化物 x 的含量(wt%)。

3 结果与讨论

3.1 单因素实验

3.1.1 溶出温度对溶出过程的影响

在液固质量比 4:1、溶出时间 1 h 条件下，考察溶出温度对 TiO₂、Fe₂O₃、Al₂O₃、CaO 和 MgO 溶出率的影响，结果如图 2 所示。可以看出，温度低于 80 ℃时，TiO₂、

Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 MgO 的溶出率随温度升高急剧增加; 温度高于 80°C 时, Fe_2O_3 、 TiO_2 和 MgO 的溶出率仍略增加, Al_2O_3 的溶出率略下降。整个溶出过程中, CaO 的溶出率随温度升高先增加后降低, 这可能是因为温度升高, CaO 在溶液中的溶解度降低。 80°C 时 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 MgO 的溶出率已达 95% 以上。综合考虑, 溶出温度选 80°C 较合适。

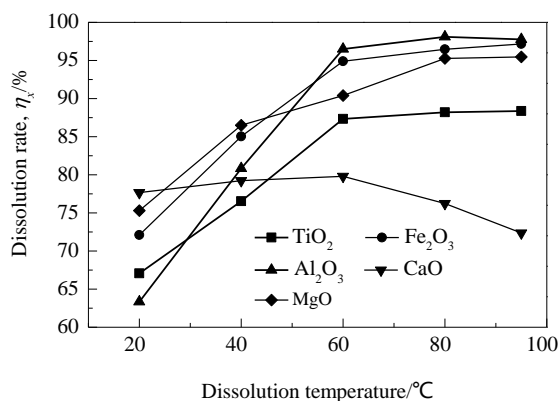


图2 不同溶出温度下中和渣酸浸物中各物质的溶出率
Fig.2 Dissolution rate of various substances in the neutralized slag acid leaching substances with different dissolution temperatures

3.1.2 液固质量比对溶出过程的影响

在溶出温度 80°C 、溶出时间 1 h 条件下, 考察液固质量比对 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 CaO 和 MgO 溶出率的影响, 结果如图 3 所示。可以看出, 液固比小于 4:1 时, 随液固比增加, TiO_2 、 CaO 和 MgO 的溶出率逐渐增加; 液固比大于 4:1 时, TiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 MgO 的溶出率趋于稳定, 而 CaO 的溶出率逐渐降低。不同液固比下,

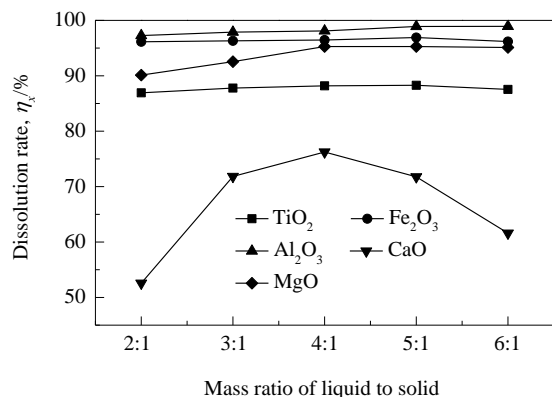


图3 不同液固质量比下中和渣酸浸物中各物质的溶出率
Fig.3 Dissolution rate of various substances in the neutralized slag acid leaching substances with different mass ratios of liquid to solid

Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的溶出率无明显变化。溶出液固比较小时, 滤渣中各物质溶解不充分, 特别是液固比为 2:1 时, 溶出 1 h 后体系中还存在大量固体, 溶出较少。液固比越大, 固体颗粒在液相中的分散性越强, 与液相的接触面积越大, 溶解越充分。溶液接近饱和后溶解速率下降。因此, 液固质量比选 4:1 较合适。

3.1.3 溶出时间对溶出过程的影响

在溶出温度 80°C 、液固质量比 4:1 条件下, 考察溶出时间对 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 CaO 和 MgO 溶出率的影响, 结果如图 4 所示。可以看出, 小于 60 min 时, 随时间延长, TiO_2 、 Fe_2O_3 和 MgO 的溶出率逐渐增加, 60 min 后 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 MgO 的溶出率趋于平稳, CaO 的溶出率逐渐增加, 而 TiO_2 的溶出率略下降, 这主要是钛的硫酸盐水解造成的。溶出时间为 60 min 时, Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 MgO 的溶出率已达 95% 以上。因此, 溶出时间选 60 min 较合适。

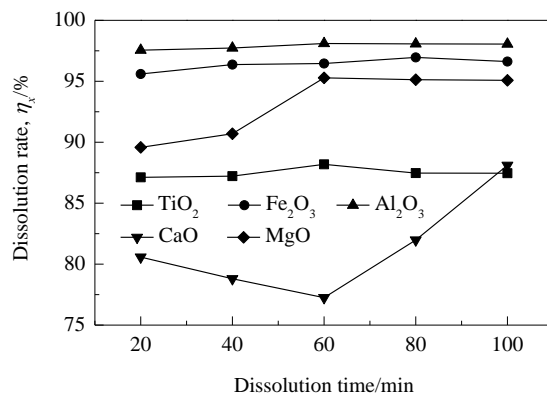


图4 不同溶出时间下中和渣酸浸物中各物质的溶出率
Fig.4 Dissolution rate of various substances in the neutralized slag acid leaching substances with different dissolution times

3.2 正交实验

3.2.1 正交实验设计方案与结果

从单因素实验结果可得出大致合适的液固质量比、溶出时间、溶出温度, 再通过正交实验探索滤渣溶出的最优工艺条件。以 TiO_2 、 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的溶出率为指标, 液固质量比、溶出时间、溶出温度为因素, 设计三因素三水平实验方案, 见表 2。在单因素优化点附近选取实验点, 通过 $L_9(3^4)$ 正交实验对各因素进一步优化, 结果见表 3。

3.2.2 正交实验结果分析

从表 4 可以看出, 影响钛、铁和铝溶出率的因素排序为 $C > A > B$, 最佳的溶出工艺条件为 $A_2B_2C_1$, 即液固

质量比 3:1、溶出时间 40 min、溶出温度 80℃。

3.2.3 最优条件验证

在正交实验得出的最优条件下进行了 5 组平行实验，溶出率平均值分别为 TiO₂ 82.58%，Fe₂O₃ 96.50%，Al₂O₃ 98.29%，CaO 87.76%，MgO 95.36%，煤矸石中和渣酸浸物中的有价值元素已基本溶出。

表 2 正交实验因素及水平			
Table 2 Factors and levels of orthogonal test			
Level	Factor		
	Mass ratio of liquid to solid, A	Dissolution time, B/min	Dissolution temperature, C/℃
1	4:1	60	80
2	3:1	40	60
3	5:1	80	40

表 3 正交方案实验结果							
Table 3 The results of orthogonal test							
Serial No.	A	B	C	Dissolution rate/%			
				TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	
1	1	1	1	88.19	96.46	98.10	
2	1	2	2	86.97	94.73	96.57	
3	1	3	3	76.13	83.76	80.53	
4	2	1	3	87.26	95.59	97.62	
5	2	2	3	87.09	92.93	97.15	
6	2	3	1	88.29	96.91	98.90	
7	3	1	1	76.70	84.96	78.74	
8	3	2	1	87.43	96.32	98.87	
9	3	3	2	87.69	95.21	98.70	

表 4 正交方案实验结果分析					
Table 4 The analysis of orthogonal test results					
Dissolution rate/%		A		B	C
TiO ₂	K_1	251.29	252.15	253.18	263.91
	K_2	262.64	261.49	261.49	261.92
	K_3	251.82	252.11	251.08	239.92
	\bar{K}_1	83.76	84.05	84.39	87.97
	\bar{K}_2	87.57	81.16	87.16	87.31
	\bar{K}_3	83.94	84.04	83.69	79.97
	Range, R	11.35	9.38	10.41	23.99
	Primary and secondary factor			C>A>B	
	Excellent process			A ₂ B ₂ C ₁	
	Fe ₂ O ₃	K_1	274.95	277.01	278.33
K_2		285.43	283.98	283.98	285.53
K_3		276.49	275.88	274.56	261.65
\bar{K}_1		91.65	92.34	92.78	96.56
\bar{K}_2		95.14	94.66	94.66	95.18
\bar{K}_3		92.16	91.96	91.52	87.22
Range, R		10.48	8.10	9.42	28.04
Primary and secondary factor			C>A>B		
Excellent process			A ₂ B ₂ C ₁		
Al ₂ O ₃		K_1	274.95	277.01	278.33
	K_2	285.43	283.98	283.98	285.53
	K_3	276.49	275.88	274.56	261.65
	\bar{K}_1	91.65	92.34	92.78	96.56
	\bar{K}_2	95.14	94.66	94.66	95.18
	\bar{K}_3	92.16	91.96	91.52	87.22
	Range, R	10.48	8.10	9.42	28.04
	Primary and secondary factor			C>A>B	
	Excellent process			A ₂ B ₂ C ₁	

3.3 固相物质表征分析

3.3.1 固相物质 XRD 分析

滤渣的 XRD 谱如图 5 所示。可以看出, 溶出后的滤渣中主要晶相物质为石英, 还有少量锐态型氧化钛, 其次为 CaSO_4 结晶体与无定型氧化硅。将滤渣灰化后分析化学成分, 结果见表 5。经物料平衡计算可知主要物质溶出率分别为 TiO_2 82.63%, Fe_2O_3 96.48%, Al_2O_3 98.33%, CaO 87.72%, MgO 95.31%, 滤渣实现了富硅除杂, 为滤渣后续资源化利用提供了便利条件。

3.3.2 固相物质 SEM 分析

图 6 和图 7 分别为酸浸物及滤渣的 SEM 照片。酸化过程中会产生大量的硫酸盐以晶体形式包裹在颗粒

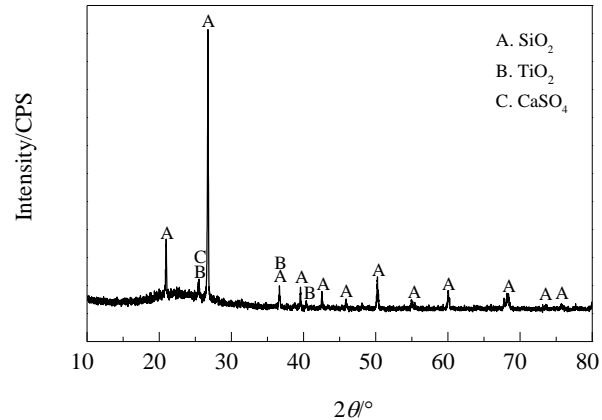


图 5 滤渣的 XRD 谱
Fig.5 XRD pattern of filter residue

表 5 滤渣的化学成分

Table 5 Chemical composition of filter residue						
Composition	SiO_2	TiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO
Content/wt%	96.38	1.07	0.24	0.55	0.78	0.08

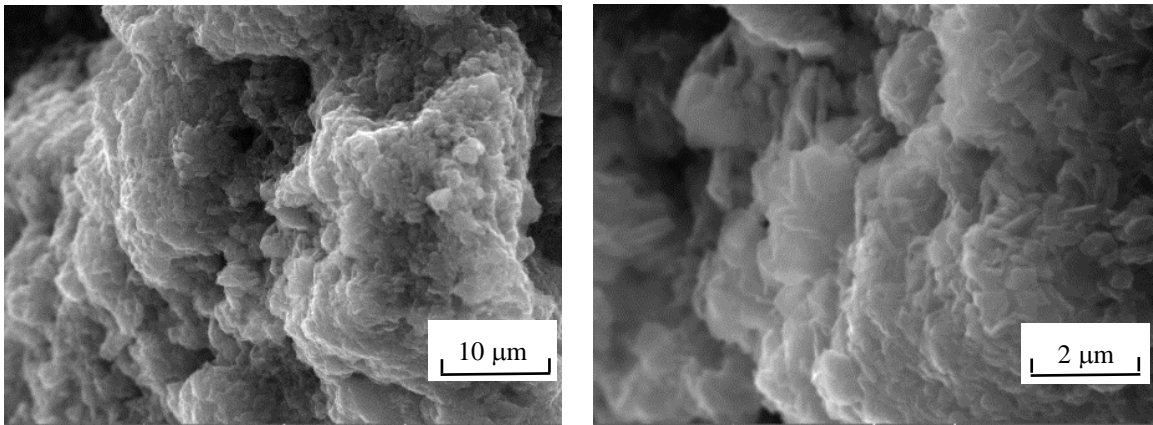


图 6 中和渣酸浸物的 SEM 照片
Fig.6 SEM images of neutralized slag acid leaching substance

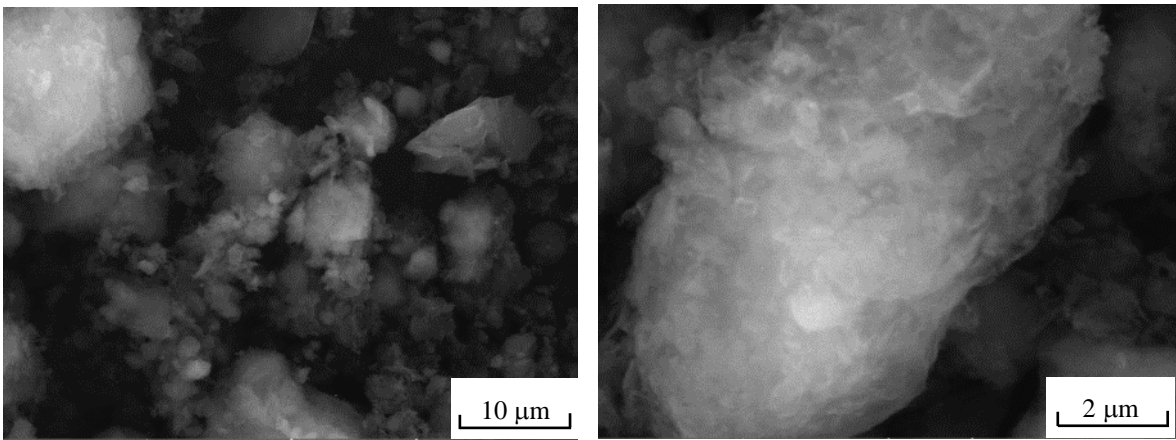


图 7 滤渣的 SEM 照片
Fig.7 SEM images of filter residue

外层。由图6可以看出,酸化后的中和渣酸浸物紧凑致密,颗粒紧密聚集在一起,呈层叠的片状结构^[19]。

溶出后,酸浸物溶解,硫酸盐溶于水,滤渣中只剩无定型的 SiO_2 和 CaSO_4 结晶体,原本紧密聚集的颗粒分散开且变小,表面附着的硫酸盐被溶解,片状晶体消失。

酸浸物溶出后,物质成分变化较大,酸化过程中产生的大量硫酸盐及其水合物溶出,而大量的晶相物质 SiO_2 及少量 CaSO_4 结晶体与无定型氧化硅残留在滤渣中。除硅元素残留在滤渣中,其他有价金属溶出到酸浸液中,为后期酸浸液中有价元素的提取提供了条件,与刘成龙等^[20]研究煤矸石中和渣酸化提取铝、钛的结论吻合。

4 结 论

以煤矸石中和渣酸浸物为研究对象,考察了溶出温度、溶出时间和液固质量比对酸浸物溶出过程的影响,通过正交实验确定酸浸物中钛、铝、铁等有价元素溶出的最优工艺,得到以下结论:

(1) 最佳溶出条件为溶出温度 80°C ,溶出液固质量比3:1,溶出时间40 min,溶出温度是主要影响因素,其次是液固质量比和溶出时间。

(2) 主要物质溶出率的平均值分别为 TiO_2 82.58%, Fe_2O_3 96.50%, Al_2O_3 98.29%, CaO 87.76%, MgO 95.36%,有价元素已基本溶出。

(3) 酸化溶出后的滤渣中主要晶相物质为石英,还有少量锐态型氧化钛,其次为 CaSO_4 结晶体与无定型氧化硅。

参考文献

- [1] 王淇,张丽娜,闵鑫,等.中国煤矸石综合利用技术研究进展[J].科技创新导报,2017,(36):46-48.
Wang Q, Zhang L N, Min X, et al. Research progress on comprehensive utilization technology of coal gangue in China [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2017, (36): 46-48.
- [2] 刘本甫,盖建功.我国工业固废现状及综合利用建议[J].中国资源综合利用,2018,36(6):92-93.
Liu B F, Gai J G. China's industrial solid waste status and comprehensive utilization recommendations [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(6): 92-93.
- [3] Zhai X W, Wu S B, Wang K. Environment influences and extinguish technology of spontaneous combustion of coal gangue heap of Baijigou coal mine in China [J]. Energy Procedia, 2017, 136: 66-72.
- [4] 武彦辉.我国煤矸石的处置利用现状及展望[J].中国环保产业,2019,(1):53-55.
- [5] 郭彦霞,张圆圆,程芳琴.煤矸石综合利用的产业化及其展望[J].化工学报,2014,65(7):2443-2453.
Guo Y X, Zhang Y Y, Cheng F Q. Industrial development and prospect about comprehensive utilization of coal gangue [J]. CIESC Journal, 2014, 65(7): 2443-2453.
- [6] 张世鑫,刘冬,邵飞,等.煤矸石综合利用工艺探索[J].洁净煤技术,2013,19(5):92-95.
Zhang S X, Liu D, Shao F, et al. Comprehensive utilization of coal gangue [J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(5): 92-95.
- [7] 李永生,郭金敏,王凯.煤矸石及其综合利用[M].徐州:中国矿业大学出版社,2006:1-9.
Li Y S, Guo J M, Wang K. Coal gangue and its comprehensive utilization [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2006: 1-9.
- [8] 钱鸣高.加强煤炭开采理论研究,实现科学开采[J].采矿与安全工程学报,2017,34(4):615.
Qian M G. Strengthen theoretical research on coal mining and realize scientific mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(4): 615.
- [9] 雷建红.煤矸石的污染危害与综合利用分析[J].能源与节能,2017,(4):90.
Lei J H. Analysis of pollution hazards and comprehensive utilization of coal gangue [J]. Energy and Energy Conservation, 2017, (4): 90.
- [10] 自桂琴.煤矸石酸溶物分离与纯化研究[D].昆明:昆明理工大学,2015:1-2.
Zi G Q. Study on separation and purification of coal gangue acid [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015: 1-2.
- [11] 代晓璐.煤矸石有益元素利用及有害元素污染分析[J].西部探矿工程,2019,(2):151-153.
Dai X L. Analysis of beneficial elements utilization and harmful element pollution of coal gangue [J]. West-China Exploration Engineering, 2019, (2): 151-153.
- [12] Sun Y Z, Fan J S, Qin P, et al. Pollution extents of organic substances from a coal gangue dump of Jiulong Coal Mine [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2009, 31(1): 81-89.
- [13] 刘成长.从煤矸石中提取氧化铝和二氧化硅的新工艺[J].煤炭加工与综合利用,2009,(1):49-52.
Liu C Z. A new process for extraction of aluminum oxide and silicon dioxide from coal refuse [J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2009, (1): 49-52.
- [14] 李超,赵亮,任启欣.煤矸石综合利用现状分析与前景探讨[J].环境与发展,2015,27(3):72-74.
Li C, Zhao L, Ren Q X. Status analysis and development discussion of coal gangue comprehensive utilization [J]. Environment and Development, 2015, 27(3): 72-74.
- [15] 夏举佩,刘成龙,杨荣,等.高铁低铝煤矸石酸法提取铝、铁研究[J].安全与环境学报,2015,15(3):248-251.
Xia J P, Liu C L, Yang R, et al. A new approach to acid leaching separation of aluminum and iron from the iron-abundant and aluminum-low coal gangue [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(3): 248-251.

- [16] 郑光亚, 陈正杰, 夏举佩, 等. 煤矸石酸浸液初步脱铁的试验研究 [J]. 化工矿物与加工, 2019, (2): 41–44.
Zheng G Y, Chen Z J, Xia J P, et al. Experimental study on preliminary iron removal in coal gangue acid leaching solution [J]. Industrial Minerals & Processing, 2019, (2): 41–44.
- [17] 刘成龙, 夏举佩, 自桂芹, 等. 基于微波辅助和响应曲面设计提取煤矸石中氧化铝 [J]. 环境工程学报, 2015, 9(10): 5071–5077.
Liu C L, Xia J P, Zi G Q, et al. Extraction of valuable element alumina from coal gangue based on microwave assisted and response surface methodology [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(10): 5071–5077.
- [18] 夏举佩, 任雪娇, 张召述, 等. 高铁低铝煤矸石中酸浸溶出实验研究 [J]. 化学工程, 2013, 15(3): 59–62.
Xia J P, Ren X J, Zhang Z S. Experimental study on acid leaching from high-iron and low-aluminum coal gangue [J]. Chemical Engineering, 2013, 15(3): 59–62.
- [19] 刘成龙, 夏举佩, 李宛霖, 等. 基于微波固相法与 ChemOffice 软件研究煤矸石中铁铝浸出机理 [J]. 过程工程学报, 2016, 16(1): 115–119.
Liu C L, Xia J P, Li W L, et al. Study on leaching reaction mechanism of coal gangue based on microwave-assisted solid phase method and ChemOffice software [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2016, 16(1): 115–119.
- [20] 刘成龙, 谢宇充, 夏举佩, 等. 煤矸石中和渣酸化提取铝、钛实验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(4): 966–972.
Liu C L, Xie Y C, Xia J P, et al. Study on extracting aluminum and titanium from neutral residues of coal gangue by acid leaching [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(4): 966–972.