

环境·健康·安全

赤泥中碱的分布特征与淋滤效果研究*

顾汉念¹, 崔姗姗^{1,2}, 王 宁¹, 赵成东^{1,2}

(1.中国科学院地球化学研究所地球内部物质高温高压重点实验室, 贵州贵阳 550081; 2.中国科学院大学)

摘 要:赤泥中含有钠、钾等杂质,在堆存过程中不仅会造成环境污染,还会制约赤泥在水泥等建筑材料领域中的综合利用。利用电子探针、原位剥蚀等离子体质谱等微观分析手段分析研究了赤泥中钠、钾的分布特征。同时考察了不同 pH 的淋滤液对赤泥中钠、钾的淋滤效果。结果表明, pH 为 2、4、8 这 3 种体系中,前 10 次取样共滤出拜耳法赤泥的钠分别大于 17.6%、16.8%、19.6%; 烧结法赤泥钠的滤出量分别为 36.7%、53.1%、54.1%。pH 为 2、4、8 的 3 种体系中,前 10 次取样共滤出拜耳法赤泥的钾分别为 10.5%、10.1%、11.4%; 烧结法赤泥钾的滤出量分别为 40.0%、56.8%、57.5%。

关键词:赤泥; 碱; 淋滤; 综合利用

中图分类号: TQ133.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-4990(2016)02-0045-04

Distribution features and leaching effect of alkali in red mud

Gu Hannian¹, Cui Shanshan^{1,2}, Wang Ning¹, Zhao Chengdong^{1,2}

(1. Key Laboratory of High-temperature and High-pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences)

Abstract: Alkali in red mud is harmful to water, land and air of the surrounding areas because of the rainfall when red mud is stored on land. Meanwhile, alkali restricts red mud's comprehensive utilization in building materials such as cement. The distribution of alkali, including Na and K, in red mud was studied by electron probe microanalysis and in situ ICP-MS. The effects of leaching liquids with different pH on Na and K in red mud were also investigated. According to the leaching experiment, more than 17.6%, 16.8%, and 19.6% of Na and 10.5%, 10.1%, and 11.4% of K can be leached from the Bayer red mud, while 36.7%, 53.1%, and 54.1% of Na and 40.0%, 56.8%, and 57.5% of K can be leached from the red mud from the sintering process, using the leaching solutions with pH of 2, 4, and 8, respectively

Key words: red mud; alkali; leaching; comprehensive utilization

赤泥是生产氧化铝过程中排放的一种工业固体废弃物,具有物相组成复杂、粒径细小、排放量大、碱性和放射性高等特征^[1-4]。赤泥的综合利用与资源化问题是世界性难题。采用露天筑坝堆存赤泥,不仅需要占用大量土地,而且会带来严重的环境污染与生态破坏问题^[5-6]。赤泥的高碱性(如钠、钾等杂质)^[7-9]和放射性^[10-13]既关系到环境问题,又是制约赤泥综合利用的重要因素。随着铝工业的发展和矿石品位的下降,赤泥量将愈来愈大,因此赤泥中碱带来的问题不容忽视^[14]。

淋滤实验是环境地球化学模拟大气降水条件,研究土壤、地表岩石中元素形态与迁移规律的一种方法。笔者对中国铝业贵州分公司排放的拜耳法赤泥和烧结法赤泥做了淋滤实验研究,用不同 pH 的

淋滤液模拟雨水进行淋滤实验,进而探讨赤泥中 Na、K 的释放迁移规律,为赤泥环境效应以及脱碱研究提供必要的基础数据和科学依据。

1 实验

1.1 实验原料

实验以中国铝业贵州分公司拜耳法赤泥(BRM)和烧结法赤泥(RMS)为研究对象,拜耳法赤泥未经压滤脱碱,其钠、钾含量稍高于排放在赤泥堆场的拜耳法赤泥,烧结法赤泥采自赤泥堆场。前期曾采用 X 荧光光谱技术对其化学成分做了分析^[13],其主要成分如表 1 所示。拜耳法赤泥中 Na₂O、K₂O 平均质量分数分别为 15.68% 和 2.87%; 烧结法赤泥中 Na₂O、K₂O 平均质量分数分别为 5.07% 和 1.16%。

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(41402039)、中国科学院地球化学研究所领域前沿项目(Y3CJ007000)。

表 1 赤泥的主要化学组成^[13]

项目		$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{TiO}_2)$	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$w(\text{K}_2\text{O})$	$w(\text{MgO})$	烧失量	总量
BRM	样 1	27.25	15.69	7.74	21.49	4.83	15.41	2.84	1.72	3.83	100.80
	样 2	27.45	15.86	7.23	21.58	4.93	15.94	2.89	1.44	3.53	100.85
	平均值	27.35	15.78	7.49	21.54	4.88	15.68	2.87	1.58	3.68	—
RMS	样 3	10.84	20.41	9.06	34.29	4.10	5.29	1.22	1.18	14.05	100.44
	样 4	7.37	20.61	9.22	37.52	4.02	4.84	1.10	1.39	14.60	100.67
	平均值	9.11	20.51	9.14	35.91	4.06	5.07	1.16	1.29	14.33	—

1.2 实验方法

为分析微观尺度下赤泥 Na、K 的分布情况,运用 EPMA-1600 型电子探针对赤泥做了面扫描实验分析,实验所选样品为拜耳法赤泥。为研究赤泥中主要组成元素与 Na、K 的微观分布情况,将赤泥样品黏在玻璃薄片上,采用原位剥蚀-等离子体质谱(LA-ICP-MS)进行研究,实验激光光斑为 44 μm ,微区分析实验在矿床地球化学国家重点实验室完成。

淋滤实验装置的柱体材料为有机玻璃,高度为 210 mm,内径为 65 mm,内部物质自上而下分为 4 层:滤纸、反应介质层(赤泥样品)、石英砂、纱布层。管柱下方先垫上一层纱布,装入高度为 15 mm 的石英砂颗粒;再垫上一层滤纸,将 400 g 过筛至粒径 < 375 μm 的样品装入,压实后样品高度约为 120 mm;最后在样品上方垫上一层滤纸,保持淋滤液流入均匀,每个样品的装柱规格一致。实验采用的淋滤液为不同 pH 的盐酸溶液,淋滤液模拟弱酸性雨水进行淋滤实验,进而探讨赤泥堆场中 Na、K 元素的释放迁移规律。本次实验共 6 组,拜耳法赤泥和烧结法赤泥各 3 组,前两组采用盐酸配置成 pH 分别为 2.0 和 4.0 的酸性淋滤液,第 3 组即使用 pH 为 8.0 的富氧纯净水(见表 2)。

表 2 淋滤实验条件与参数

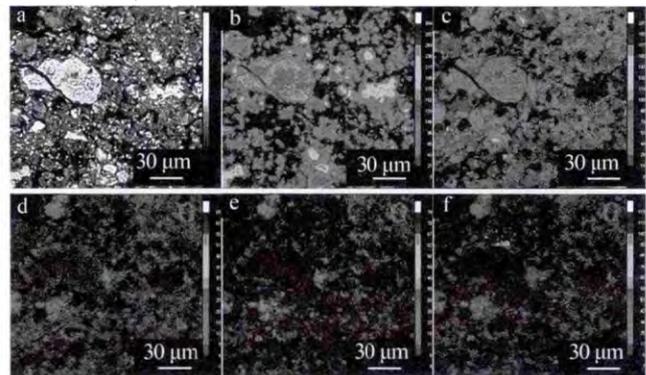
实验序号	淋滤前样品质量/g	淋滤溶液类型	淋滤后样品质量/g
BRM	1	pH=2.0, HCl 溶液	364 \pm 5
	2	pH=4.0, HCl 溶液	375 \pm 5
	3	pH=8.0, 富氧水	365 \pm 5
RMS	4	pH=2.0, HCl 溶液	347 \pm 5
	5	pH=4.0, HCl 溶液	350 \pm 5
	6	pH=8.0, 富氧水	349 \pm 5

对所取的滤出液样品,采用等离子体光谱仪分析其中 Na、K 元素的含量,滤液样品测试均由澳实分析检测(广州)有限公司完成。淋滤前的赤泥样品与淋滤后的赤泥残渣样品,采用 X 射线荧光光谱技术分析了其中 Na、K 的含量,实验在矿床地球化学国家重点实验室完成。

2 结果与讨论

2.1 面扫描分析

赤泥的面扫描分析是将赤泥黏附于薄玻片上进行的,如图 1 所示。主要分析元素包括主量元素 Ca、Al、Si、Na 和 K,共 5 个元素,对比 Na、K 与主量元素 Ca、Al、Si 之间的关系。由图 1 分析表明,赤泥中 Ca、Al、Si、Na、K 的分布较为分散。其中大部分区域的物相中均含有 Ca、Al,且含量较高;Na、K 的分布与 Ca 的分布相异,一般不与 Ca 出现在同种物相中;Na、K 的分布与 Si 的分布有紧密关系,Na 与 K 之间分布区域相似,但少数含 K 物相中不含 Na。



a—背散射成像的赤泥;b—Ca;c—Al;d—Si;e—Na;f—K

图 1 拜耳法赤泥的元素面扫描照片

2.2 元素的原位微区分析

原位分析分别对拜耳法赤泥与烧结法赤泥各打 12 个点,分析数据见表 3。表 3 分析表明,拜耳法赤泥中的 Na 和 K 在各微区点的含量表现出正相关性。Na、K 与 Si 表现出明显的正相关性;与 Ca 表现出明显的负相关性;Al 的分布较为均匀,Fe、Ti 在个别点含量较高,因此,Na、K 与 Al、Fe、Ti 在各点均无明显相关性。烧结法赤泥中的 Na、K 含量低于拜耳法,各测试点 K 的含量总体变化不大,总体上仍与 Na 表现正相关性。与拜耳法类似,烧结法赤泥中 Na、K 与 Ca 表现出明显的负相关性;但与 Si 表现出的正相关性不及拜耳法赤泥中表现出来的严格;烧结法赤泥中 Fe 在微区的含量差异较大。烧结法赤泥中 Na、K 与 Ti、Mg、Mn、P 的分布无明显相关性。

表3 拜耳法赤泥与烧结法赤泥微区主要化学成分含量分析

项目	w(Na ₂ O)	w(K ₂ O)	w(Al ₂ O ₃)	w(SiO ₂)	w(CaO)	w(FeO)	w(TiO ₂)	w(MgO)	w(P ₂ O ₅)	w(MnO)
BRM-01	7.06	2.18	19.80	19.5	36.3	4.82	7.52	0.86	0.40	0.013
BRM-02	9.21	2.50	23.90	19.1	30.8	6.40	5.72	0.92	0.52	0.015
BRM-03	9.29	2.57	20.00	17.6	40.6	4.49	3.60	0.83	0.32	0.011
BRM-04	9.67	2.79	25.90	19.1	25.3	8.42	5.34	2.10	0.40	0.020
BRM-05	10.40	3.16	25.20	21.7	25.4	6.23	5.41	1.31	0.34	0.015
BRM-06	10.70	3.14	26.50	21.2	23.7	7.03	5.26	1.26	0.26	0.018
BRM-07	10.80	3.21	26.20	21.8	23.5	6.58	5.62	1.13	0.26	0.015
BRM-08	11.20	3.15	25.90	21.8	24.5	6.12	4.86	1.27	0.31	0.016
BRM-09	11.20	3.57	28.00	22.0	21.3	6.67	4.12	2.21	0.22	0.018
BRM-10	11.20	3.18	26.80	22.3	22.2	6.73	5.19	1.15	0.33	0.016
BRM-11	11.40	3.31	25.90	22.5	23.4	6.23	5.29	0.97	0.24	0.014
BRM-12	11.60	3.57	25.20	22.6	18.9	11.60	4.61	0.96	0.24	0.020
RMS-01	3.91	1.03	3.36	26.5	52.7	7.19	2.82	0.95	0.42	0.018
RMS-02	4.03	1.56	8.38	20.8	40.8	18.00	3.80	1.38	0.31	0.055
RMS-03	4.04	1.90	18.10	19.2	36.7	12.90	4.69	1.19	0.28	0.025
RMS-04	4.11	1.40	7.56	23.6	45.2	11.20	4.20	1.37	0.30	0.024
RMS-05	4.26	1.22	10.10	22.3	44.7	10.10	4.35	1.65	0.27	0.032
RMS-06	4.28	1.18	8.66	20.2	45.4	12.60	4.95	1.40	0.27	0.026
RMS-07	4.42	1.22	4.95	23.6	46.5	13.60	3.31	1.01	0.34	0.031
RMS-08	4.43	1.34	7.97	22.5	43.1	14.10	4.04	1.20	0.35	0.026
RMS-09	4.47	1.12	4.52	24.4	45.4	12.70	4.48	1.42	0.39	0.032
RMS-10	4.51	1.36	9.03	21.7	44.6	12.10	4.13	1.24	0.34	0.026
RMS-11	4.58	1.41	7.03	21.8	43.7	13.30	5.09	1.62	0.29	0.031
RMS-12	6.35	2.77	17.30	19.5	36.2	11.20	3.85	1.52	0.27	0.032

2.3 淋滤液 pH 变化情况

淋滤实验开始时,前2次每12h取样一次,第3次开始每24h取样一次,实验共取样11次,每次取样同时测得24h内滤出液的pH,在10d以后各组滤出液的pH基本达到平衡,结果见图2。实验时,淋滤液的流速控制在500mL/d。

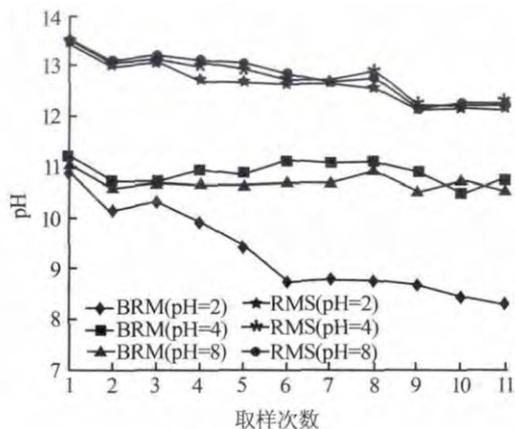


图2 滤出液的 pH 的变化情况

2.4 钠钾的滤出情况分析

各组滤出液在第10次取样时,其pH已趋于平衡,本实验仅分析了前10次所取的滤出液样品。为分析赤泥中Na、K元素的滤出特征,实验从淋滤液中Na、K的浓度与滤出量,以及淋滤前后固体赤泥中Na、K含量的变化2个方面做了分析。

各样品中的Na、K在滤出液中的含量见表4、表5。表4、表5分析表明,拜耳法赤泥与烧结法赤

泥中均有一定量的Na被淋滤出来。拜耳法赤泥的Na主要在第1次所取的滤出液中,也就是说淋滤作用在前12h的效率最好,接着滤出液中Na的浓度骤降,随后逐渐降低。赤泥为碱性废渣,理论上pH低的淋滤液更容易滤出Na。实际上,前10次取样表明,pH高的原始淋滤液更容易淋滤出Na,pH为8的原始淋滤液对Na的滤出效果最好。烧结法赤泥的Na的滤出分布较为平缓,随着时间变化,滤出液中Na的浓度呈逐渐降低趋势,直至趋于平衡。对于烧结法赤泥,首次取样时,pH=4的原始淋滤液对Na的滤出效果最好。

表4 钠在滤出液中的含量

取样次数	拜耳法赤泥 w(Na)/%			烧结法赤泥 w(Na)/%		
	pH=2	pH=4	pH=8	pH=2	pH=4	pH=8
1	>1.324 1	>1.412 6	>1.633 7	0.391 2	1.021 2	0.983 7
2	0.067 3	0.043 1	0.056 3	0.249 4	0.211 1	0.248 8
3	0.057 8	0.028 9	0.036 4	0.166 8	0.151 6	0.160 8
4	0.043 9	0.020 2	0.028 3	0.111 8	0.098 3	0.110 9
5	0.034 2	0.015 1	0.017 8	0.064 4	0.054 2	0.051 4
6	0.028 2	0.012 8	0.013 4	0.037 8	0.020 9	0.032 9
7	0.028 7	0.010 2	0.010 7	0.032 5	0.014 5	0.017 8
8	0.024 0	0.009 0	0.010 2	0.023 8	0.010 8	0.010 1
9	0.017 1	0.008 0	0.008 0	0.016 9	0.008 3	0.006 0
10	0.014 2	0.006 6	0.006 3	0.010 3	0.005 6	0.004 4

总体上,3种不同pH的淋滤液对拜耳法赤泥中Na的绝对滤出量要大于烧结法赤泥,这主要是因为拜耳法赤泥中含有更高的Na。但是,Na在烧结法赤泥中的相对滤出量大于拜耳法赤泥。pH为2、4、8的3种体系中,前10次取样共滤出拜耳法赤泥的Na

分别大于 17.6%、16.8%、19.6%；而滤出烧结法赤泥 Na 分别为 36.7%、53.1%、54.1%。

表 5 钾在滤出液中的含量

取样次数	拜耳法赤泥 $w(K)/\%$			烧结法赤泥 $w(K)/\%$		
	pH=2	pH=4	pH=8	pH=2	pH=4	pH=8
1	0.162 0	0.169 6	0.191 1	0.111 2	0.278 4	0.276 2
2	0.007 7	0.005 9	0.006 8	0.062 0	0.056 0	0.060 8
3	0.006 8	0.004 0	0.004 6	0.036 5	0.031 5	0.033 3
4	0.005 5	0.003 1	0.003 8	0.024 2	0.019 2	0.020 1
5	0.004 4	0.002 6	0.002 6	0.019 5	0.014 7	0.012 9
6	0.003 6	0.002 2	0.002 1	0.015 1	0.009 7	0.010 9
7	0.003 6	0.001 8	0.001 7	0.012 6	0.008 3	0.009 5
8	0.003 0	0.001 6	0.001 8	0.010 4	0.006 9	0.007 7
9	0.002 2	0.001 3	0.001 3	0.008 7	0.006 3	0.005 7
10	0.001 8	0.001 1	0.001 0	0.007 0	0.005 0	0.004 7

拜耳法赤泥与烧结法赤泥中 K 被不同程度淋滤出。拜耳法赤泥中 K 的滤出趋势与 Na 相似,即集中在第 1 次所取的滤出液中,后面各次滤出液中 K 的浓度骤降,随后逐渐降低。不同 pH 的淋滤液对拜耳法赤泥 K 的滤出量相近。烧结法赤泥 K 的滤出较为平缓,随着时间变化,滤出液中 K 的浓度呈逐渐降低趋势。pH 不同的淋滤液对其滤出液中 Na 的浓度与 Na 的滤出总量的影响并不明显。烧结法在首次取样时,不同 pH 的淋滤液对 K 的淋滤效果表现出一定差异,但从前 10 次的总量来看,滤出总量相近。

总体上,3 种不同 pH 的淋滤液对烧结法赤泥中 K 的绝对滤出量和相对滤出量均大于拜耳法赤泥。pH 为 2、4、8 的 3 种体系中,前 10 次取样共滤出拜耳法赤泥的 K 分别为 10.5%、10.1%、11.4%;而滤出烧结法赤泥 K 分别为 40.0%、56.8%、57.5%。

2.5 滤后渣 Na、K 含量分析

对淋滤前后的赤泥进行钠、钾元素分析,结果见表 6。

表 6 淋滤前后赤泥中钠和钾含量变化情况

样品类型		$w(Na_2O)/\%$	$w(K_2O)/\%$
BRM	淋滤前赤泥	15.68	2.87
	淋滤后(pH=2)	4.88	1.89
	淋滤后(pH=4)	5.19	1.95
	淋滤后(pH=8)	5.29	1.94
RMS	淋滤前赤泥	5.07	1.16
	淋滤后(pH=2)	0.43	0.45
	淋滤后(pH=4)	0.27	0.51
	淋滤后(pH=8)	0.28	0.51

由表 6 可知,淋滤后赤泥中 Na、K 元素的浓度均明显降低。需要说明的是,淋滤前赤泥与淋滤后赤泥固体样品的测试时间相差 2 a,受测试仪器的误差等客观因素影响,2 次测试数据仅作参考对比。另外,上述关于 Na、K 滤出量的分析是基于前 10 次取

样,同时考虑淋滤后固体样品的损耗,因此固液的 Na、K 量之和与淋滤前的总量有一定误差。总体上,淋滤后的拜耳法赤泥中 Na 的含量大大降低,淋滤后的烧结法赤泥中 Na 的质量分数低于 1%。

3 结论

微区分析表明,拜耳法赤泥和烧结法赤泥中的 Na 和 K 在各微区点的含量表现出正相关性。Na、K 与 Si 表现出明显的正相关性;与 Ca 表现出明显的负相关性;与 Al、Fe、Ti、Mn、Mg 在各点均无明显相关性。

包括雨水在内的淋滤作用可以滤出部分 Na 和 K,从而有可能对环境造成一定影响。通过 pH 分别为 2、4、8 的不同淋滤液对赤泥进行匀速的淋滤实验可看出,3 种体系中,前 10 次取样滤出的钠分别是拜耳法赤泥中 Na 的 17.6%、16.8%、19.6%以上;而烧结法滤出赤泥中的 Na 是 36.7%、53.1%、54.1%。3 种不同 pH 的淋滤液对烧结法赤泥中 K 的绝对滤出量和相对滤出量均大于拜耳法赤泥。pH 为 2、4、8 的 3 种体系中,前 10 次取样滤出的 K 分别是拜耳法赤泥中 K 的 10.5%、10.1%、11.4%;而烧结法滤出的 K 分别是赤泥中 K 的 40.0%、56.8%、57.5%。

致谢

感谢中国科学院地球化学研究所李亮工程师、杨淑勤博士等在本文数据分析测试时给予的帮助与指导。

参考文献:

- [1] Liu Wanchao, Yang Jiakuan, Xiao Bo. Review on treatment and utilization of bauxite residues in China[J]. International Journal of Mineral Processing, 2009, 93(3/4): 220-231.
- [2] Power G, Gräfe M, Klauber C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices [J]. Hydrometallurgy, 2011, 108(1/2): 33-45.
- [3] Paramguru R K, Rath P C, Misra V N. Trends in red mud utilization—a review [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2005, 26(1): 1-29.
- [4] 李小斌,孔莲莲,齐天贵,等. 高铁三水铝石矿拜耳法溶出过程中铝针铁矿的行为 [J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(2): 543-548.
- [5] Gelencsér A, Kovács N, Jancsek-Turóczy B, et al. The red mud accident in Ajka (Hungary): characterization and potential health effects of fugitive dust [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(4): 1608-1615.
- [6] Ruyters S, Mertens J, Vassilieva E, et al. The red mud accident in Ajka (Hungary): Plant toxicity and trace metal bioavailability in red

(下转第 78 页)

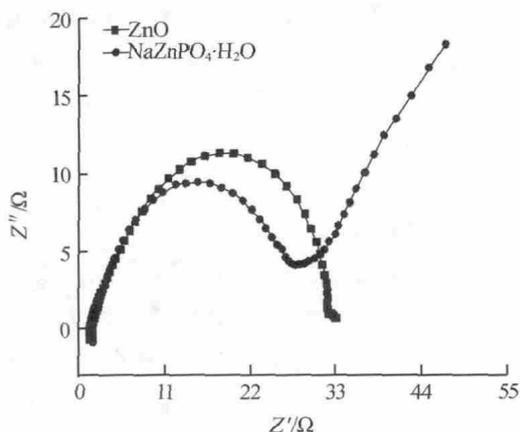


图 6 磷酸锌钠与氧化锌电极的交流阻抗曲线

3 结论

采用固相法制备磷酸锌钠,并对其物相特征及其电化学性能做了研究:1)实验制备的产物为多孔结构手性磷酸锌钠,属六方晶系 $P6_322$ 空间群,分子式为 $\text{NaZnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$,其结晶好,纯度较高。2)手性磷酸锌钠具有良好的电化学反应活性,在前 15 次充放电循环过程中比容量衰减率约为 12.07%,在之后至第 100 次充放电循环中比容量无明显下降,表现出良好的循环稳定性。3)手性磷酸锌钠的多孔结构提高了电极的有效反应表面,为反应离子提供了输入通道,并抑制了反应产物向电解液中的传输,提

高了电极的充放电循环性能。

参考文献:

- [1] Kazuyuki M. Metal phosphonate open-framework materials [J]. *Cheminform*, 2004, 73: 47-55.
- [2] 刘雷,董晋湘.金属磷酸盐骨架材料的离子热合成、结构调控与性能研究[D].太原:太原理工大学,2010.
- [3] 田媛,殷平,包冲荣,等.金属磷酸盐分子筛的催化性能研究[J]. *化工时刊*, 2009, 23(11): 56-62, 72.
- [4] 马少妹,王璟,宋宝玲,等.新型发光材料磷酸锌钾纳米片的制备[J]. *发光学报*, 2013, 34(1): 24-29.
- [5] 陈家达.磷酸盐的生产与应用[M].北京:科学技术出版社,2003.
- [6] Eiman A, Ebrahim G, Mohammad M. Sodium zinc phosphate as a corrosion inhibitive pigment [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2014, 77(7): 1155-1162.
- [7] 周龙昌,吴洪特,廖森等.手性磷酸锌钠的低热固相合成及调控[J]. *化工学报*, 2008, 59(9): 2401-2406.
- [8] 孙雅博,李璟,赵志才,等.微孔结构手性磷酸锌钠的制备及影响手性结构的研究[J]. *无机盐工业*, 2014, 46(12): 41-43, 60.
- [9] 孙德帅,王建明,皮欧阳,等.纳米多孔结构镍基复合膜电极的电化学法制备及其电容特性[J]. *物理化学学报*, 2011, 27(4): 764-768.

收稿日期:2015-08-17

作者简介:杨建文(1968—),男,教授,博士,主要研究方向为新型材料及电化学。

联系方式:yangjw@glut.edu.cn

(上接第 48 页)

- mud contaminated soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(4): 1616-1622.
- [7] 张乐观,王国贞,段璐淳.水洗处理赤泥初步脱碱[J]. *无机盐工业*, 2011, 43(2): 57-58.
 - [8] Zhang R, Zheng S, Ma S. et al. Recovery of alumina and alkali in Bayer red mud by the formation of andradite-grossular hydrogarnet in hydrothermal process [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 189(3): 827-835.
 - [9] 郭曦尧,马淑花,吕松青,等.以脱铝赤泥-脱铝粉煤灰为原料制备硬硅钙石[J]. *中国有色金属学报*[J]. 2015, 25(2): 534-540.
 - [10] 顾汉念,王宁,张乃从,等.赤泥天然放射性水平及在建材领域制约性研究[J]. *轻金属*, 2011(5): 19-21.
 - [11] Somlai J, Jobbágy V, Kovács J, et al. Radiological aspects of the usability of red mud as building material additive [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 150(3): 541-545.
 - [12] Akinci A, Artir R. Characterization of trace elements and radionuclides and their risk assessment in red mud [J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(4): 417-421.
 - [13] Gu Hannian, Wang Ning, Liu Shirong. Radiological restrictions of using red mud as building material additive [J]. *Waste Management & Research*, 30(9): 961-965.
 - [14] 王亮亮.中州铝厂拜耳法赤泥碱物质分析[J]. *中国资源综合利用*, 2012, 30(9): 39-42.

收稿日期:2015-08-12

作者简介:顾汉念(1985—),男,博士,助理研究员,主要研究方向为废弃物改性与利用。

通讯作者:王宁

联系方式:nwang@vip.gyig.ac.cn