

改性高炉渣对 Ce^{3+} 的吸附性能研究

周夏芝^{1,2} 居殿春^{1,2*} 田 爽³ 张李睿¹ 杨志彬^{1,2} 周 磊^{1,2}

(1.江苏科技大学张家港校区冶金与材料工程学院,张家港 215600;

2.张家港江苏科技大学产业技术研究院精细冶金研究所,张家港 215600;

3.苏州理工学院冶金与材料工程学院,张家港 215600)

摘 要 以高炉渣为吸附剂,用盐酸对其进行改性,研究了改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的吸附性能。采用扫描电子显微镜和比表面积及孔隙度分析仪对改性高炉渣的理化性质进行了表征。从动力学和热力学角度探讨了改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的吸附作用机理。结果表明,在 Ce^{3+} 离子初始质量浓度 100mg/L、环境温度 25℃、改性高炉渣投加量 0.3g、吸附时间 2h、pH=7 的条件下,改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的饱和吸附量达到 11.95mg/g。吸附行为符合准二级动力学吸附模型和 Langmuir 等温吸附模型,改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的吸附为单分子层化学吸附。

关键词 高炉渣,盐酸, Ce^{3+} 离子,等温吸附模型,动力学吸附模型

Study on adsorption performance of modified blast furnace slag onto Ce^{3+}

Zhou Xiaozhi^{1,2} Ju Dianchun^{1,2} Tian Shuang³ Zhang Lirui¹ Yang Zhibin^{1,2} Zhou Lei^{1,2}

(1.School of Metallurgical and Materials Engineering,Zhangjiagang Campus of Jiangsu University of Science and Technology,Zhangjiagang 215600;2.Fine Metallurgy Institute,Zhangjiagang Industrial Technology Research Institute,Jiangsu University of Science and Technology,Zhangjiagang 215600;3.Suzhou Institute of Science and Technology,School of Metallurgical and Materials Engineering,Zhangjiagang 215600)

Abstract The adsorption performance of modified blast furnace slag onto Ce^{3+} was studied by using blast furnace slag modified by hydrochloric acid as adsorbent.The physicochemical properties of modified blast furnace slag were characterized by scanning electron microscopy and specific surface area and porosity analyzer.The adsorption mechanism of modified blast furnace slag on Ce^{3+} was discussed from the perspective of kinetics and thermodynamics.The results shown that: the saturated adsorption capacity of Ce^{3+} was 11.95mg/g in the case of Ce^{3+} concentration of 100mg/L,ambient temperature of 25℃,modified blast furnace slag dosage of 0.3g,adsorption time of 2 h,and pH value of 7.The adsorption behavior was consistent with the pseudo-second-order kinetic adsorption model and the Langmuir isotherm adsorption model.It was indicated that the adsorption of Ce^{3+} by modified blast furnace slag was monolayer chemical adsorption.

Key words blast furnace slag,hydrochloric acid, Ce^{3+} ,isothermal adsorption model,kinetic adsorption model

稀土的传统应用领域主要是冶金行业,稀土可以明显改善钢、铸铁和有色金属的力学性能、工艺性能和使用性能。稀土金属具有无法取代的磁、光、电性能,是新材料必不可少的基础原料。随着稀土新材料的飞速发展,稀土金属的应用领域也从冶金等传统领域向新材料领域发展。铈在地壳中的质量分数约为 0.0046%,是稀土元素中丰度最高的品种,也是继钪之后被发现的第 2 个稀土元素^[1]。铈

可用作还原剂、催化剂、合金添加剂,用于医药、制革、玻璃、纺织等行业,制备电弧电极、特种玻璃、喷气推进器零件等。

目前从废水中提取铈离子的方法主要有沉淀浮选法^[2]、溶剂萃取法^[3]、膜分离法^[4]、微生物提取法^[5]、吸附法^[6]等。其中,吸附法由于操作简单、去除效率高以及不产生二次污染受到广泛关注。邓金梅等^[7]研究了羧甲基壳聚糖对铈离子的吸附行为。

基金项目:国家重点实验室开放基金(SKLASPP201601);江苏科技大学博士创新基金(120140008)

作者简介:周夏芝(1994-),女,硕士研究生,研究方向为改性高炉渣制备及其应用。

联系人:居殿春(1981-),男,博士,讲师,从事催化剂制备及应用、全氧冶金及冶金固废资源利用研究工作。

实验结果表明,羧甲基壳聚糖对铈离子的最大吸附量为 96.21mg/g,吸附行为符合 Langmuir 等温吸附模型。张理元等^[8]探究了低脂果胶对铈离子的吸附性能,通过红外光谱仪对样品进行了分析。结果表明,吸附前后低脂果胶的红外光谱发生了明显的变化,说明吸附过程中可能发生了化学反应。苏伟等^[9]采用间歇法研究了沸石对溶液中铈离子的吸附性能,并对吸附机理进行了探讨。研究表明,沸石对铈离子的吸附能力较差,吸附平衡时间较长。

高炉渣是在炼铁过程中由矿石中的脉石、燃料中的灰分和溶剂中的非挥发组分形成的固体废物。由于冷却方式不同,高炉渣可分为水淬高炉渣和高炉缓冷炉渣。其中,水淬高炉渣是一种具有高潜在活性、原子排列无序的玻璃体结构^[10],同时也是一种多孔硅酸盐材料。近年来,有关高炉渣作为吸附剂处理废水中氨氮^[11]、染料^[12]、重金属离子^[13]、磷^[14]以及废润滑油^[15]等的研究较多。本研究利用盐酸对高炉渣进行改性,探究改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的吸附动力学和吸附等温线,考察改性高炉渣投加量及 pH 对 Ce^{3+} 离子吸附率的影响,为实现高炉渣的工业化应用提供参考。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

硝酸铈,天津市福晨化学试剂厂;氢氧化钠,无锡展望化工试剂有限公司;盐酸,无锡展望化工试剂有限公司,所用试剂均为分析纯;去离子水,实验室自制;高炉渣取自江苏省沙钢集团。

电子天平(FA2004N 型),上海民桥精密科学仪器有限公司;数显恒温磁力搅拌器(HJ-6A 型),金坛市医疗仪器厂;电热鼓风干燥箱(SD101-1 型),南通金石实验仪器有限公司;密封式制样粉碎机(YHGX-1A 型),鹤壁市银河分析仪器化工有限公司;去离子水机(Eswh-10 型),上海茸研仪器有限公司;扫描电子显微镜(SEM, JSM-6480 型),日本电子光学公司;电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-MS 型),德国斯派克;比表面积及孔隙度分析仪(ASAP 2020M 型),美国麦克默瑞提克。

1.2 改性高炉渣吸附剂的制备

高炉渣的预处理:将高炉渣用去离子水洗净后放入烘箱中,于 105℃ 干燥 24h。干燥后的高炉渣经粉碎机粉碎,过 100 目筛备用。

称取 5g 洗净干燥后的高炉渣置于烧杯中,加入 50mL 浓度为 1mol/L 的盐酸,搅拌 30min 使高炉

渣与盐酸充分接触。抽滤、洗涤至中性后,放入干燥箱于 105℃ 干燥 24h,得到改性高炉渣吸附剂。

1.3 吸附实验

1.3.1 含 Ce^{3+} 离子溶液的配制

用硝酸铈和去离子水配制质量浓度为 100mg/L 的模拟含 Ce^{3+} 离子废水,实验时再稀释成所需浓度。

1.3.2 实验方法

在 250mL 锥形瓶中,加入 50mL 一定浓度待处理的含 Ce^{3+} 离子溶液,称取一定量改性高炉渣放入锥形瓶,用 0.1mol/L 的 NaOH 和 0.1mol/L 的盐酸调节 pH,将混合液置于恒温磁力搅拌器搅拌,间隔一定时间取样。上清液经微孔膜过滤,用电感耦合等离子体发射光谱仪测定剩余 Ce^{3+} 离子浓度,计算出改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的去除率。

为反映改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的去除能力,用去除率和吸附量表征改性高炉渣的吸附性能,去除率和吸附量计算方法见式(1)一式(2)。

$$\eta = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$q = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{m} \quad (2)$$

式中, η 为 Ce^{3+} 离子去除率,%; q 为单位质量改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的吸附量,mg/g; C_0 为 Ce^{3+} 离子的初始质量浓度,mg/L; C_t 为 t 时刻 Ce^{3+} 离子的质量浓度,mg/L; V 为溶液体积,L; m 为改性高炉渣质量,g。

1.4 测试与表征

采用比表面积及孔隙度分析仪分析高炉渣的比表面积、孔容及孔径;采用扫描电子显微镜分析高炉渣的表面微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 SEM 分析

改性前后高炉渣的 SEM 图见图 1。由图可以看出,改性前的高炉渣具有微裂纹结构,改性后的高炉渣变得疏松,疏松结构有利于改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的吸附。

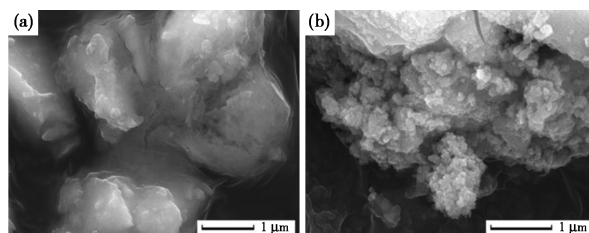


图1 改性前(a)与改性后(b)高炉渣的 SEM 图

2.2 氮气吸附-脱附曲线测定

改性高炉渣的氮气吸附-脱附等温线见图 2。根据 Brunauer^[16] 分类, 吸附等温线可以分为 5 类。从图可以看出, 改性高炉渣属于典型的第 IV 类等温线, 表明改性高炉渣具有介孔结构。改性高炉渣的孔结构参数见表 1。从表可以看出, 改性高炉渣比表面积较大, 达 $259.807 \text{ m}^2/\text{g}$ 。较大的比表面积有利于加快反应速度, 说明改性高炉渣具有作为吸附材料使用的潜能。

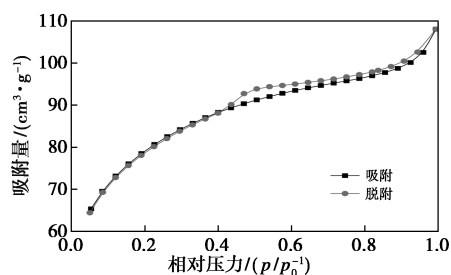


图 2 改性高炉渣的氮气吸附-脱附等温线图

表 1 改性高炉渣的孔结构参数

比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	孔容/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	BJH 脱附平均孔径/nm
259.807	0.167	2.573

2.3 吸附动力学研究

通过吸附动力学可以研究材料的吸附速率、吸附机理和吸附过程。称取改性高炉渣 0.3g, 置于 50mL 初始质量浓度为 100 mg/L 的 Ce^{3+} 离子溶液中, 将混合液置于磁力搅拌器, 以转速 150 r/min 分别搅拌 10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180min。搅拌一定时间后, 上层清液经微孔膜过滤收集, 用电感耦合等离子体发射光谱仪测定残留的 Ce^{3+} 离子浓度, 利用准一级动力学^[17]、准二级动力学^[18] 吸附模型对实验数据进行分析。准一级动力学方程和准二级动力学方程的非线性表达式分别见式(3)和式(4)。

$$Q_t = Q_e - Q_e e^{-k_1 t} \quad (3)$$

$$Q_t = \frac{k_2 Q_e^2 t}{1 + k_2 Q_e t} \times 100\% \quad (4)$$

式中, Q_e 为改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的平衡吸附量, mg/g ; Q_t 为 t 时刻的吸附量, mg/g ; k_1 为准一级动力学方程吸附速率常数, min^{-1} ; k_2 为准二级动力学方程吸附速率常数, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$; t 为吸附时间, min 。

利用准一级动力学、准二级动力学吸附模型对改性高炉渣吸附 Ce^{3+} 离子的实验数据进行拟合, 改性高炉渣吸附 Ce^{3+} 离子的吸附动力学拟合曲线图见图 3, 拟合的相关参数见表 2。从图 3 可知: 在最

初的 40min 内, 吸附过程为快速吸附; 最初 1h 内改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的吸附率达到最大吸附率的 92.58%, 随后 1~3h 内慢慢达到吸附平衡; 吸附时间为 2h 时, 改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的饱和吸附量为 11.95 mg/g 。

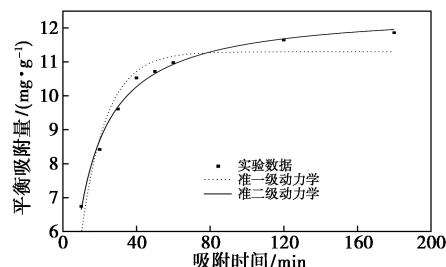


图 3 改性高炉渣吸附 Ce^{3+} 离子的吸附动力学拟合曲线图

表 2 利用准一级、准二级动力学吸附模型拟合的相关参数

Q_e 实验值/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	准一级动力学方程			准二级动力学方程		
	Q_e 计算值/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	k_1 (min^{-1})	R^2	Q_e 计算值/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	k_2 / $[\text{g} \cdot \text{min}^{-1}]$	R^2
11.86	11.30	7.44×10^{-2}	0.9117	12.54	8.99×10^{-3}	0.9904

从表 2 可以看出, 与准一级动力学方程相比, 准二级动力学方程的相关系数 R^2 (0.9904) 比准一级动力学的 R^2 (0.9117) 大, 且拟合的 Q_e 计算值 (12.54) 更接近 Q_e 实验值 (11.86), 因此准二级动力学方程能较准确地描述改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的吸附过程, 说明改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的吸附过程是速控步骤^[19]。

2.4 吸附等温线

Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型非线性方程表达式分别见式(5)和式(6)。

$$Q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (5)$$

$$Q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (6)$$

式中, C_e 为 Ce^{3+} 离子的平衡浓度, mg/L ; Q_m 为饱和吸附量, mg/g ; K_L 为 Langmuir 吸附平衡常数, L/mg ; K_F 为 Freundlich 吸附平衡常数, L/mg ; $1/n$ 为 Freundlich 方程的吸附指数, 表示材料的吸附-脱附能力, $1/n$ 值小于 1.0 表示吸附质容易脱附。

吸附等温线为研究材料吸附性能提供了重要的信息。称取改性高炉渣 0.3g, 投入 50mL 质量浓度分别为 20, 40, 60, 80, 100, 200 mg/L 的 Ce^{3+} 离子溶

液中,考察不同温度条件下(298K, 308K, 318K)改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的吸附效果。利用 Langmuir^[20] 和 Freundlich^[21] 等温吸附模型对实验数据进行拟合,拟合的吸附等温线见图 4,拟合的相关参数见表 3。

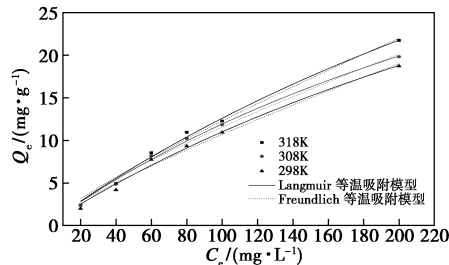


图4 不同温度条件下利用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型拟合的改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的吸附等温线图

表3 不同温度条件下利用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型拟合的相关参数

温度/ K	Langmuir 等温吸附方程			Freundlich 等温吸附方程		
	R^2	$Q_{m,L}/$ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	$K_L/$ ($\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$)	R^2	$K_F/$ ($\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$)	$1/n$
298	0.9933	76.1100	2.01×10^{-3}	0.9886	0.0269	0.8321
308	0.9907	63.9956	2.08×10^{-3}	0.9840	0.0630	0.8543
318	0.9948	59.8917	2.49×10^{-3}	0.9873	0.2910	0.7997

注: $Q_{m,L}$ 代表最大吸附量。

从图 4 可以看出,吸附量随着 Ce^{3+} 离子初始质量浓度的增加而上升,这可能是因为改性高炉渣内部存在孔道,当 Ce^{3+} 离子初始质量浓度提高时,大量 Ce^{3+} 离子会与孔道内的吸附位点相结合。此外,随着温度的上升,改性高炉渣的饱和吸附量有所降低,这可能是因为较高的温度使改性高炉渣内部结构发生变化,限制了 Ce^{3+} 离子的渗透^[22]。

从表 3 可以看出,与 Freundlich 等温吸附模型相比,Langmuir 等温吸附模型能更好地描述改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的平衡吸附,表明吸附过程为单分子层吸附^[23]。 $1/n$ 值分别为 0.8321、0.8543 和 0.7997,说明改性高炉渣易于脱附。

2.5 改性高炉渣投加量对吸附效果的影响

在室温(25℃)条件下,分别称取 0.05g、0.10g、0.15g、0.20g、0.25g、0.30g、0.35g、0.40g 改性高炉渣,投入 50mL 质量浓度为 100mg/L 的 Ce^{3+} 离子溶液中,置于磁力搅拌器搅拌 2h,静置一段时间后,上层清液经微孔膜过滤,使用电感耦合等离子体发射光谱仪测定剩余 Ce^{3+} 离子浓度,计算出改性高炉

渣对 Ce^{3+} 离子的去除率。

改性高炉渣投加量对 Ce^{3+} 离子去除率的影响见图 5。从图可以看出:在其他条件不变的情况下,改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的去除率随其投加量的增加而提高;当改性高炉渣投加量为 0.3g 时,改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的去除率达到 77.10%,随后趋于平缓。原因为:在 Ce^{3+} 离子初始质量浓度不变的条件下,随着改性高炉渣投加量的增加,改性高炉渣所提供的活性位点增加,当改性高炉渣投加量达到一定程度后(0.3g),废水中的 Ce^{3+} 离子几乎都被吸附到改性高炉渣的有效活性位点上,即使增加改性高炉渣投加量也是增加无效的吸附位点,对去除率不会起到明显的作用,所以选择 0.3g 为最佳投加量。

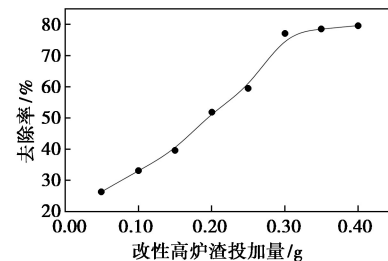


图5 改性高炉渣投加量对 Ce^{3+} 离子去除率的影响

2.6 pH 对吸附效果的影响

在所有的影响因素中,溶液 pH 对吸附效果影响较大。pH 会影响金属离子的溶解度,对吸附效果产生一定的影响。用 0.1mol/L 的 NaOH 和 0.1mol/L 的盐酸调节溶液 pH 至 3、4、5、6、7,然后置于磁力搅拌器搅拌 2h,静置一段时间,上层清液经微孔膜过滤,使用电感耦合等离子体发射光谱仪测定溶液中剩余 Ce^{3+} 离子浓度,计算出改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的去除率。

pH 对 Ce^{3+} 离子去除率的影响见图 6。由图可知:pH 较低时, H^+ 离子占据较多的活性位点, Ce^{3+} 离子与活性位点的接触受到阻碍;随着 pH 增大,溶液中 H^+ 离子减少,改性高炉渣暴露出更多的活性位点,去除率明显上升;pH=7 时,改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子去除率最大,达到 71.8%。当溶液 pH 超

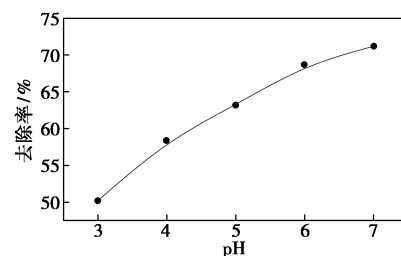


图6 pH 对 Ce^{3+} 离子去除率的影响

过金属离子微沉淀的上限时,溶液中的大量金属离子会以不溶解的氧化物、氢氧化物微粒的形式存在,从而使吸附过程无法进行。

3 结论

(1) 改性高炉渣的比表面积较大,达 $259.807\text{m}^2/\text{g}$,具有典型的第Ⅳ类吸附等温线,这表明改性高炉渣具有介孔结构。较大的比表面积有利于加快反应速度,说明改性高炉渣具有作为吸附质的潜能。

(2) 改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的吸附量随着吸附时间的延长而增加。与准一级动力学吸附模型相比,准二级动力学吸附模型能更好地描述改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的吸附过程,改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的吸附过程是速控步骤。

(3) 改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的吸附量随着 Ce^{3+} 离子初始质量浓度的增加而增大。Langmuir 等温吸附模型能更好地描述改性高炉渣对 Ce^{3+} 离子的平衡吸附,吸附过程为单分子层吸附。 $1/n$ 值分别为 0.8321、0.8543 和 0.7997,说明改性高炉渣易于脱附。

参考文献

- [1] 窦学宏.铈及其应用发展[J].稀土信息,2005(1):30-31.
- [2] 田君,尹敬群,湛开红,等.风化壳淋积型稀土矿浸出液沉淀浮选溶液化学分析[J].稀土,2011,32(4):1-7.
- [3] 常宏涛,季尚军,李梅,等.超声波作用下溶剂萃取法分离镧铈元素[J].化工进展,2014,33(1):169-186.
- [4] 潘玲,陈利芳,申利国,等.聚合物辅助超滤技术处理含铈废水[J].膜科学与技术,2014,34(6):67-71.
- [5] Piazza S D, Cecchi G, Cardinale A M, et al. Penicillium expansum Link strain for a biometallurgical method to recover REEs from WEEE[J]. Waste Management, 2017, 60: 596-600.
- [6] Li X J, Yan C J, Luo W J, et al. Exceptional cerium(Ⅲ) adsorption performance of poly(acrylic acid) brushes-decorated attapulgite with abundant and highly accessible binding sites[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 284: 333-342.
- [7] 邓金梅,罗序燕,祝婷,等.羧甲基壳聚糖对铈离子吸附性能研究[J].江西理工大学学报,2016,37(1):1-4.
- [8] 张理元,陈奇,刘义武,等.果胶对稀土金属 Ce^{4+} 的吸附研究(英文)[J].四川大学学报:自然科学版,2017,54(4):807-814.
- [9] 苏伟,窦天军,潘社奇,等.沸石对溶液中铈离子的吸附性能[J].材料科学与工程学报,2011,29(4):592-595.
- [10] Frolova L A, Pivovarov A A, Butyrina T E, et al. Purification of wastewaters, containing chromium, by a sorbent based on blast furnace slag[J]. Journal of Water Chemistry & Technology, 2015, 37(4): 185-190.
- [11] 季凌晨,刘荣,王国祥,等.含钛高炉渣对水中氨氮的吸附特性[J].化学通报,2017,80(6):579-584.
- [12] 沈俊菊,王丽娟,李海霞,等.改性高炉渣对染料的吸附动力学及热力学研究[J].环境工程学报,2014,8(7):2918-2924.
- [13] 刘金亮,陈莉荣,王哲.高炉渣对 $\text{Zn}(\text{II})$ 的吸附性能[J].环境工程学报,2015,9(10):5065-5070.
- [14] 许睿,刘荣,王国祥,等.含钛高炉渣对水中总磷的吸附性能与机理[J].钢铁钒钛,2018,39(3):69-74.
- [15] 陈凌,曾亚,张贤明,等.高炉渣与活性白土吸附废润滑油对比研究[J].应用化工,2017,46(5):916-918.
- [16] Rawat S P S, Khali D P, Hale M D, et al. Studies on the moisture adsorption behaviour of brown rot decayed and undecayed wood blocks of pinus sylvestris using the Brunauer-Emmett-Teller Theory[J]. Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood, 1998, 52(5): 463-466.
- [17] Ho Y S, McKay G. The sorption of lead(Ⅱ) ions on peat[J]. Water Research, 1999, 33(2): 578-584.
- [18] Ho Y S, McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes[J]. Process Biochemistry, 1999, 34(5): 451-465.
- [19] Peng L, Jiang L, Zhu L, et al. Novel covalently cross-linked attapulgite/poly(acrylic acid-co-acrylamide) hybrid hydrogels by inverse suspension polymerization: synthesis optimization and evaluation as adsorbents for toxic heavy metals[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(11): 4277-4285.
- [20] Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum[J]. Journal of Chemical Physics, 2015, 40(12): 1361-1403.
- [21] Levan M D, Vermeulen T. Binary langmuir and freundlich isotherms for ideal adsorbed solutions[J]. Journal of Physical Chemistry, 1981, 85(22): 3247-3250.
- [22] Pan J, Zou X, Wang X, et al. Selective recognition of 2,4-dichlorophenol from aqueous solution by uniformly sized molecularly imprinted microspheres with β -cyclodextrin/attapulgite composites as support[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 162(3): 910-918.
- [23] Soumitra G, Asish S, Mohammad R, et al. Enhanced removal of methylene blue and methyl violet dyes from aqueous solution using a nanocomposite of hydrolyzed polyacrylamide grafted xanthan gum and incorporated nanosilica[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(7): 4766.

收稿日期:2018-12-10

修稿日期:2020-01-05