高炉布袋灰湿法浸出脱氯迁移规律及动力学研究

苏 航，毛 瑞，王 飞，邵久刚
（江苏省沙钢钢铁研究院有限公司，江苏 张家港 215625）

摘要：脱除高炉布袋灰中较高质量分数的氯盐是其资源化利用的一个重要环节。本文以某钢铁企业的高炉布袋灰为研究对象，分析其化学成分，并对湿法浸出前、后布袋灰的微观形貌和晶体组成进行表征，探索湿法脱除机理，进一步研究液固比、浸出时间、搅拌速率、浸出温度等工艺参数对氯离子脱除率的影响。结果表明：高炉布袋灰中的氯主要以氯化锌、氯化钠和氯化钾形式存在；湿法浸出脱氯迁移过程主要是将可溶性氯盐溶解而被脱除的过程，其中液固比对氯盐脱除率的影响最大；在液固比为2，浸出温度为50 ℃，浸出时间为10 min，搅拌速率为200 r/min的最佳工艺参数条件下，布袋灰中的氯离子可达90%以上的脱除率；氯盐脱除主要受扩散条件的影响，其初始反应的表观活化能为3.24 kJ/mol。

关键词：高炉布袋灰；湿法浸出；氯脱除；动力学
中图分类号：TF09；TF803.21 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)06－0099－07
doi：10.13403/j.sjqt.2022.06.090

Research on migration law and dynamics of dechlorination in wet leaching of blast furnace bag dust

SU Hang，MAO Rui，WANG Fei，SHAO Jiugang
（*Jiangsu Shagang Iron and Steel Research Institute Co.，Ltd.，Zhangjiagang* 215625，*Jiangsu*，*China*）

Abstract：It is an important link of resource utilization to remove high mass fraction chlorine salt from blast furnace bag dust. The blast furnace bag dust of an iron and steel enterprise is taken as the research object，its chemical composition is analyzed，and the micro-morphology and crystal composition of the bag dust before and after wet leaching are characterized. The wet removal mechanism is explored，and the effects of process parameters such as liquid-solid ratio，leaching time，stirring rate and leaching temperature on dechlorination rate are further studied. The results show that the chlorine in blast furnace bag dust mainly exists in the form of zinc chloride，sodium chloride and potassium chloride. The migration process of wet leaching dechlorination is mainly the process of dissolving soluble chloride slats and removing it，in which the ratio of liquid to solid has the greatest influence on the dechlorination. Under the optimum conditions of liquid-solid ratio of 2，leaching temperature is 50 ℃，leaching time is 10 min and stirring rate is 200 r/min，the rate of dechlorination in bag dust can reach over 90%. Dechlorination is mainly affected by diffusion conditions，and the apparent activation energy of the initial reaction is 3.24 kJ/mol.

Key words：blast furnace bag dust；wet leaching；dechlorination；dynamics

据统计，2019年我国钢产量约为7.9亿吨，钢铁冶金尘泥产生量约为9 000万吨。冶金尘泥在钢铁生产过程中不可避免，其因粒度较细，特别容易导致扬尘，造成大气污染[1]。此外，冶金尘泥在堆放过程中不仅会造成大量的土地资源被占用，还因部分重金属元素渗透到土壤

收稿日期：2022－09－14；**修回日期**：2022－09－20
作者简介：苏 航(1994—)，男，工程师，从事冶金固废资源化利用技术方面的研究工作。
通信作者：毛 瑞(1988—)，男，高级工程师，从事冶金资源能源综合利用技术方面的研究工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

中，严重污染土壤[2]。钢铁冶金尘泥中富含Fe、C、Zn等有价元素[3]，若不对其进行回收利用，也会造成资源的浪费。高炉布袋灰主要是通过高炉煤气干式布袋处理收集而得到的冶金固废，是铁矿粉、石灰石、焦炭等炉料组成的高温混合物粉尘，产生量约为铁产量的1%[4-5]。高炉布袋灰中主要有Fe、C、Cl、Zn、Ca、K、Na等元素，其中：Fe和C的质量分数最高，均为30%左右，Cl质量分数为3.5%，Zn质量分数为5%，其综合回收利用的经济价值可观[6]。但直接将高炉布袋灰返回钢铁生产流程，氯元素在其中循环富集[7]，易导致烧结过程不稳定，影响烧结矿的强度及其他冶金性能，最后造成高炉无法正常顺行[8]。除此以外，氯元素的富集还会对严重腐蚀冶炼设备[9]。

目前处理高炉布袋灰的主要方式有冷压造球法[10]、炼铁喷灰法[11]、浸出法[12]等。冷压造球法是处理高炉布袋灰最简单有效的方法，无需增加其他机器设备，但此法存在有害元素循环累积的问题。将其直接与煤粉混配是处理高炉布袋灰最经济和最方便的方法，但该方法同样无法解决有害元素的循环累积问题。浸出法在钢铁企业中相对较少应用，对处理Na、K等易溶物质量分数较高的高炉布袋灰效果显著[13]。

为充分利用高炉布袋灰中的C、Fe等有价元素，本文采用湿法浸出对布袋灰进行水洗处理，去除其中的K、Na、Cl等有害元素；研究湿法浸出过程中氯元素的脱除机理和规律，重点探索不同液固比、浸出时间、浸出温度、搅拌速度条件对布袋灰中氯盐脱除的影响规律，从而确定最佳的浸出工艺参数；同时对水洗过程进行动力学计算，为后续高炉布袋灰资源化利用高效预处理打下坚实的理论基础。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验原料取自华东某钢铁厂的1 580 m^3高炉。在干法布袋除尘器排灰口取样得到试验样品。为使样品具有代表性，所采集的布袋灰在高炉连续稳定正常运行1个月内采集。在进行分析测试之前，将样品在110 ℃的烘干箱内干燥8 h，达到恒重后，用研钵手工碾压20 min，使样品全部能通过-0.075 mm筛网。

经XRF荧光分析后，得到样品的化学成分如表1所示。由表1可看出：高炉布袋灰主要包括C、Fe、Zn、Al等元素，其中4#高炉布袋灰中ZnO和K_2O质量分数较高，Cl质量分数也最高，达到5.75%。初步判断该氯化物主要是KCl、$ZnCl_2$，而这些氯化物会对高炉布袋灰的循环利用带来不利的影响。

表1 某钢厂1 580 m^3高炉布袋灰的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of bag dust from a 1 580 m^3 blast furnace in a steel plant %

项目	C	Fe_2O_3	ZnO	Al_2O_3	SiO_2	Cl	K_2O	CaO	Na_2O	SO_3
3#高炉	34.1	37.34	8.84	1.94	2.76	2.88	0.95	2.28	0.73	2.15
4#高炉	32.1	35.67	10.24	1.30	2.24	5.75	1.96	2.18	1.51	2.99
5#高炉	30.4	43.72	6.03	2.72	4.01	4.12	1.30	3.11	1.03	1.82

1.2 试验方法

(1) 化学成分检测。先将样品放入CS-3000碳硫分析仪中测含碳量，再将样品在20 MPa的压力下压制成药片状，放入EA8000A型X射线荧光光谱仪进行检测，代入含碳量对数据进行修正后，得到样品的化学成分值。

(2) 高炉布袋灰湿法脱氯浸出试验。称取25 g高炉布袋灰，按照不同的液固比加入去离子水将其配制成浆液，在室温下以一定的速度搅拌相同时间后，将混合浆液倒入铺有0.5 μm滤纸的漏斗内，并将其放入FY-1H-N型真空抽滤机(极限真空压强为2 Pa)中进行抽滤，利用手工方法滴定来测量水洗液的氯离子质量浓度；将滤饼烘干后通过CS-3000碳硫分析仪和EA8000A型X射线荧光光谱仪进行氯离子质量分数测定。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（3）微观形貌分析。对浸出前、后的高炉布袋灰样品进行喷金处理，在 S-4800 场发射扫描电子显微镜下观察其微观形貌。

（4）物相组成和化学成分测定。采用 EDX-7000 型 X 射线衍射仪分别对水洗前、后的高炉布袋灰样品进行物相组成分析，辐射源为 Cu 靶，管电流为 25 mA。扫描电压为 5 kV，采用连续方式进行扫描，2θ 角的范围为 10°～80°。

2　结果与讨论

2.1　高炉布袋灰湿法浸出脱氯机理

高炉布袋灰中的氯离子一般以可溶性氯盐和难溶性氯盐两种形态存在。湿法浸出脱氯是将高炉布袋灰中的可溶性氯盐通过湿法浸出脱除进入溶液，该过程主要分为溶解和脱附两个物理变化。

高炉布袋灰中可溶性氯离子的等温溶解－吸附关系如图 1 所示。由图 1 可知，随着浸出过程中液固比的增加，可溶性氯离子的脱除可分为 4 个阶段：① 当液固比小于 1 时，布袋灰中的可溶性氯盐主要以溶解的形式进入到浸出液中，但未完全脱除，浸出液中的氯盐一直处于饱和状态，其氯离子质量分数变化极小，但是布袋灰上的氯离子质量分数下降明显；② 当液固比为 1～2 时，随着液固比的增大，不同的可溶性氯盐的溶解度不同，其中氯化锌的溶解度明显大于氯化钠和氯化钾，因此氯化锌已经完全溶解时，氯化钠和氯化钾仍处于饱和状态，此时高炉布袋灰和浸出液的可溶性氯离子质量分数都有所降低；③ 当液固比为 2～4 时，布袋灰的可溶性氯盐质量分数随液固比的增大保持不变，说明此时布袋灰上的可溶性氯盐已完全溶解进入浸出液中，而浸出液中的氯离子质量分数则会相应下降；④ 当液固比大于 4 时，随着大量去离子水的加入，部分吸附在布袋灰表面的难溶性氯盐被冲洗脱附下来，进入到浸出液中，但这部分氯盐质量分数很低，脱除率远小于液固比增大的速度。此外，高炉布袋灰中还存在一些难以脱附的难溶性氯盐，因此图中高炉布袋灰中氯离子质量分数不会降为 0。

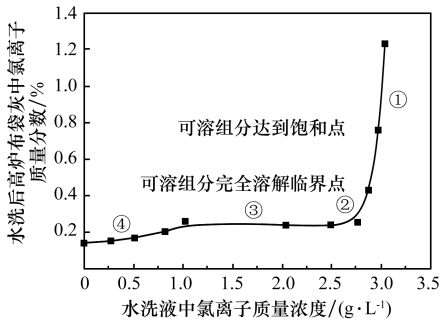


图 1　可溶性氯离子的等温溶解－吸附关系

Fig. 1　Isothermal dissolution-adsorption curve diagram of soluble chloride ion

（注：图中 11 个点的液固比从右到左依次为 0.6、0.8、1、1.5、2、3、4、6、8、10、20）

由图 1 还可看出：当液固比小于 2 时，浸出氯盐主要是以溶解为主；而当液固比大于 4 时，起主要作用的是脱附过程。而高炉布袋灰中大部分氯盐为可溶性氯盐，因此在研究布袋灰中氯盐的脱除特性时液固比一般不大于 2。下一步针对影响高炉布袋灰中可溶性氯盐溶解的关键因素，进行试验探索其迁移规律。

将液固比为 2 的高炉布袋灰水洗后的溶液进行检测，得到 K^+、Na^+、Zn^{2+} 的质量分数如表 2 所示。由表 2 可知：溶液中的阴离子 Cl^- 主要与 K^+、Na^+、Zn^{2+} 这 3 种阳离子结合，计算后得到溶液中的氯 50% 生成 $ZnCl_2$、30% 生成 KCl、20% 生成 NaCl。

表 2　浸出液中 K^+、Na^+、Zn^{2+} 的质量分数

Table 2　The mass fraction of K^+, Na^+, Zn^{2+} in the washing water　%

项目	质量分数	与 Cl^- 结合占比
K^+	0.160	30
Na^+	0.063	20
Zn^{2+}	0.230	50

2.2　浸出条件对高炉布袋灰中氯离子脱除率的影响

2.2.1　液固比

高炉布袋灰中氯盐大多为氯化钾、氯化锌等可溶性氯盐，这些氯盐在水中的溶解度较高，并能够快速溶解。在温度为 50 ℃、水洗时间为 10 min、搅拌速度为 200 r/min 的浸出工艺参数

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

条件下，将50 g高炉布袋灰与去离子水按照液固比为0.6、0.8、1、1.5、2进行水洗，研究不同液固比对高炉布袋灰中氯离子脱除率的影响，结果如图2所示。

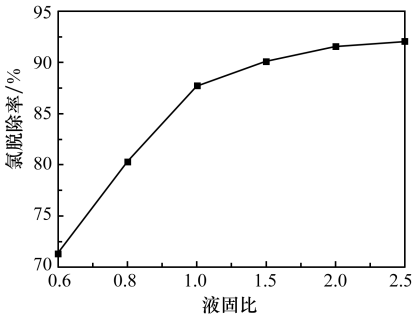


图2 液固比对高炉布袋灰中氯离子脱除率的影响

Fig. 2 The effect of solid-liquid ratio on chloride ion extraction of blast furnace bag dust

由图2可以看出，液固比对氯离子的脱除率有明显影响，在逐步提高液固比的同时高炉布袋灰中的氯离子的脱除率也随之增加，当液固比达到2时氯的脱除率达到90.58%。结合图1可知，继续增大液固比，对提高高炉布袋灰中氯离子的脱除率影响不大。考虑到液固比越大，浸出过程中需要加入的水量也越多，在氯离子脱除效果没有明显改善的前提下，水洗成本会大幅上升。因此，结合试验结果与后期经济性考虑，将高炉布袋灰水洗过程的最佳液固比定为2。

2.2.2 浸出时间

在液固比为2、温度为50 ℃、搅拌速度为200 r/min条件下，探讨不同水洗时间(5、10、15、20、25、30 min)对高炉布袋灰中氯离子脱除率的影响，结果如图3所示。由图3可以

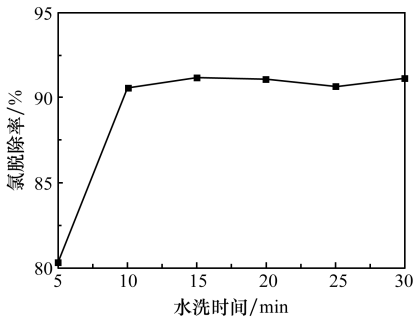


图3 水洗时间对高炉布袋灰中氯离子脱除率的影响

Fig. 3 The effect of washing time on chloride ion extraction rate of blast furnace bag dust

看出：大部分氯盐在很短的时间(5～10 min)内会迅速地溶解到浸出液中；10 min后，延长浸出时间对氯离子脱除率的作用不明显。而在实际工业运行过程中，浸出时间越短，液固比越小，用水量越少，运行费用就越低，后续废水的处理负担也会相应减轻，运行成本也将降低。

2.2.3 浸出温度

在液固比为2、浸出时间为10 min、搅拌速度为200 r/min的条件下，考察不同浸出温度(10、20、30、40、50、60 ℃)对高炉布袋灰中氯离子脱除率的影响，结果如图4所示。

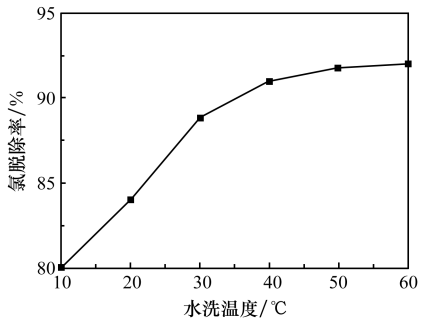


图4 水洗温度对高炉布袋灰中氯离子脱除率的影响

Fig. 4 The effect of washing temperature on chloride ion extraction of blast furnace bag dust

由图4可以看出，浸出温度对氯离子的脱除率影响明显。当浸出温度从10 ℃升高到50 ℃时，氯脱除率明显提高，达到90%以上。当浸出温度继续升高到50 ℃后，一方面高炉布袋灰中氯盐的溶解度变化不大，氯盐脱除效果变化不明显；另一方面，能源消耗加大，导致浸出过程成本大幅上升。温度的变化对高炉布袋灰中可溶性氯盐溶解的影响较大，尤其是KCl，但过高的温度也会导致成本的升高，因此最佳水洗温度为50 ℃。

2.2.4 搅拌速率

在液固比为2、浸出温度和时间分别为50 ℃和10 min的条件下，考察不同搅拌速率(50、100、150、200、250 r/min)对高炉布袋灰中氯离子脱除率的影响，结果如图5所示。由图5可以看出：搅拌速率对氯离子的脱除率有较为明显的影响。当搅拌速率小于200 r/min时，高炉布袋灰中氯离子的脱除率随搅拌速率的增大

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而不断提高；当搅拌速率大于 200 r/min 时，氯离子的脱除率基本保持稳定，继续升高搅拌速率对提高氯离子的脱除率影响不大，此时高炉布袋灰中氯离子的脱除率能达到 90% 以上。

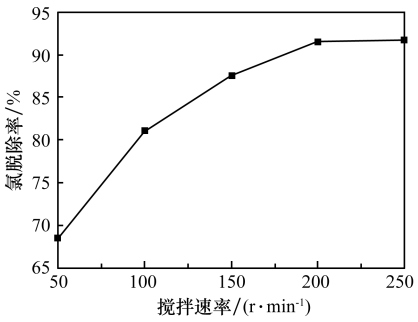


图 5　搅拌速率对高炉布袋灰中氯离子脱除率的影响

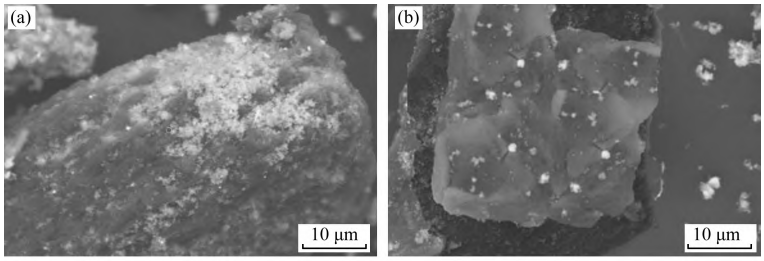
Fig. 5　The effect of stirring rate on chloride ion extraction rate of blast furnace bag dust

在影响氯离子脱除率的因素中，液固比对布袋灰中氯离子脱除率的影响最大，浸出时间、搅拌速率和浸出温度对氯离子脱除率有一定影响。综合考虑操作可行性和成本经济性等因素，得到高炉布袋灰湿法浸出脱氯的最佳工艺参数：液固比为 2、浸出温度为 50 ℃、浸出时间为 10 min、搅拌速率为 200 r/min。在此条件下，布袋灰中的氯离子脱除率可达 90% 以上。

2.3　浸出前、后高炉布袋灰的微观形貌、物相组成和化学成分变化

2.3.1　微观形貌

在最佳水洗工艺条件下，湿法浸出前、后高炉布袋灰的微观形貌如图 6 所示。由图 6 可看出：浸出前，高炉布袋灰表面较为粗糙，富集有大量大小不均的晶状颗粒，多以无定形态和多晶聚合体的形式附着；浸出后，大量晶状颗粒消失，表面较为光滑，只剩少量多晶聚合体留在布袋灰表面，这表明浸出后高炉布袋灰中大部分可溶性氯盐被脱除。



（a）浸出前；（b）浸出后

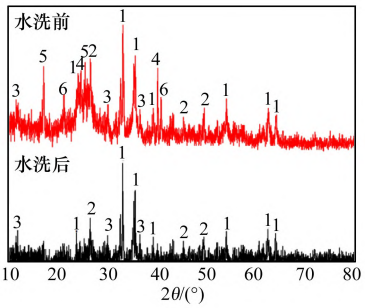
图 6　湿法浸出前、后高炉布袋灰的微观形貌(放大 1 000 倍)

Fig. 6　The micro morphology of blast furnace bag dust before and after wet leaching (1 000 times magnification)

2.3.2　物相组成及化学成分

物相组成对高炉布袋灰的渗沥特性以及各种处理方式的选择有着直接的影响。在最佳湿法浸出脱氯工艺参数下，浸出前、后高炉布袋灰的物相组成变化如图 7 所示。由图 7 可知：原高炉布袋灰的物相组成主要为 C、Fe_2O_3、ZnO、KCl、NaCl、$ZnCl_2$ 等，这与 XRF 的检测结果一致。对于高炉布袋灰中的难溶性氯盐，其通常以复杂化合物的形式存在，由于其质量分数较低或结晶度较差，XRD 往往无法有效鉴别出来。

不同高炉产生的布袋灰经湿法浸出脱氯预处理后，其氯脱除率分别达到90.3%、92.2%和 89.8%，这与前期试验结果相一致。残渣的化学成分如表3所示。由表3可知：C、Fe_2O_3



1—Fe_2O_3；2—C；3—ZnO；4—KCl；5—$ZnCl_2$；6—NaCl。

图 7　高炉布袋灰水洗前后的物相组成

Fig. 7　Phase composition of blast furnace bag dust before and after washing

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 某钢厂 1 580 m^3 高炉布袋灰水洗后的主要化学成分(质量分数)

Table 3 The main chemical composition of bag dust after washing from a 1 580 m^3 blast furnace in a steel plant %

项目	C	Fe_2O_3	ZnO	Al_2O_3	SiO_2	Cl	K_2O	CaO	Na_2O	SO_3
3#高炉	36.9	39.31	8.28	2.61	2.33	0.28	0.08	1.80	0.04	1.15
4#高炉	34.23	38.13	9.69	1.62	1.89	0.53	0.13	2.25	0.11	3.68
5#高炉	33.34	45.67	5.23	3.24	2.94	0.42	0.10	2.14	0.08	2.31

质量分数较之前有所提高，K_2O、Na_2O 和 Cl 质量分数明显降低，

综上，高炉布袋灰经湿法浸出预处理后，可以避免氯盐重新返回钢铁流程所带来的种种危害，为下一步布袋灰的合理高效资源化利用奠定基础。

3 浸出过程动力学分析

高炉布袋灰含有碳、氧化铁以及钙镁硅石等颗粒物，其成分复杂，在高温冷凝后氯盐主要附着在颗粒物表面及空隙和裂缝中。在水洗浸出过程中，氯盐溶解到水中并分离出来，洗涤液的扩散速率是布袋灰水洗脱氯的控制因素。因此，本文尝试用核模型来探索高炉布袋灰水洗脱氯浸出的动力学行为。

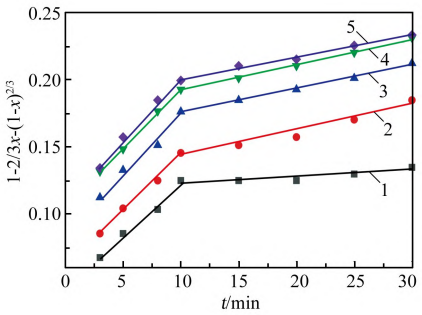
假设高炉布袋灰中颗粒近似球形几何体，且浸出过程受核状颗粒物膜层的扩散控制，高炉布袋灰浸出脱氯的动力学方程式[14]：

$$1-\frac{2}{3}x-(1-x)^{\frac{2}{3}}=k_d\times t \tag{1}$$

式中：k_d 为固 - 液相反应扩散速率常数，min^{-1}；x 为高炉布袋灰氯脱除率，%；t 为水洗时间，min。

进行不同反应温度和时间对高炉布袋灰氯脱除率的影响试验，并将数据结果带入式(1)中，作 $1-2/3x-(1-x)^{2/3}$ 对时间 t 的变化曲线，结果如图 8 所示。

由图 8 可以发现：氯的脱除过程呈两段变化，第一段浸出过程的反应速率明显高于第二段，这说明在同一温度下，10 min 内，水洗时间的变化对氯的浸出效果影响显著，且浸出温度高于 50 ℃后水洗时间对氯的浸出效果影响不大，这与图 3 的结论相吻合。



温度/℃：1—20；2—30；3—40；4—50；5—60。

图 8 不同温度下 $1-2/3x-(1-x)^{2/3}$ 与 t 的关系

Fig. 8 Relationship between $1-2/3x-(1-x)^{2/3}$ and t at different temperatures

此外，根据图 8 得到不同温度水洗后氯的脱除率接近平衡前(即第一段拟合方程)的反应速率常数 k，将其分别带入 Arrhemus 经验方程[19]：

$$k=A\times\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \tag{2}$$

式中：E_a 为反应活化能，kJ/mol；A 为频率因子常数；T 为温度，K；R 为气体常数，8.314×10^{-3} kJ/(mol·K)。

对式(2)两边取对数，得到 $\ln k$ 与 $1/T$ 的关系式：

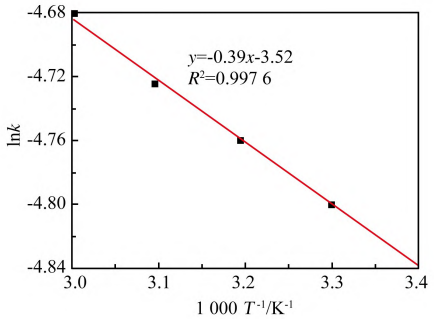
$$\ln k=\ln A-E_a/RT \tag{3}$$

以 $\ln k$ 对 $1/T$ 作图，结果如图 9 所示。由图 9 可知，采用扩散控制拟合得到的 $\ln k$ 对 $1/T$ 曲线的相关拟合度高达 99.76%，这进一步说明高炉布袋灰湿法浸出脱氯主要受扩散条件的影响。经计算在水洗浸出体系中，氯脱除的初始反应表观活化能为 3.24 kJ/mol。

4 结 论

(1) 高炉布袋灰的基本组成元素为 C、Fe、Zn、Al 等，其表面粗糙，附着有大量无定形态和不规则聚合体等晶粒，物相组成主要为 C、

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



温度/℃：1—20；2—30；3—40；4—50；5—60。

图 9　$1-2/3x-(1-x)^{2/3}$ 模型下 ln$k$ 与 1 000/T 的关系

Fig. 9　The relationship between ln$k$ and 1 000/T under the $1-2/3x-(1-x)^{2/3}$ model

Fe_2O_3、ZnO、KCl、NaCl、$ZnCl_2$ 等物质；布袋灰经湿法浸出预处理后，KCl、NaCl、$ZnCl_2$ 等大部分可溶性氯盐易被脱除，其颗粒表面晶粒减少，较为光滑。

（2）高炉布袋灰湿法浸出脱氯过程主要是将可溶性氯盐溶解而被脱除的过程。当液固比小于 2 时，布袋灰中氯离子质量分数不断减少，浸出过程以溶解为主；当液固比为 2 ~ 4 时，布袋灰中氯离子质量分数保持不变，可溶性氯盐几乎被完全脱除；而当液固比大于 4 时，布袋灰中氯离子质量分数有少量下降，这是因为部分难溶性氯盐从布袋灰上脱附。

（3）高炉布袋灰中氯经湿法浸出处理后，氯离子质量分数明显减少。综合考虑操作可行性和经济成本，以及各反应条件对氯离子脱除效果的影响，确定高炉布袋灰湿法浸出脱氯的最佳工艺参数条件：水洗温度为 50 ℃、液固比为 2、水洗时间为 10 min、搅拌速率为 200 r/min。在此条件下，布袋灰中的氯离子可达 90% 以上的脱除率。其中，液固比对布袋灰中氯离子脱除率的影响最大。

（4）高炉布袋灰湿法浸出脱氯主要受扩散条件的影响，经计算在水洗浸出体系中，氯脱除的初始反应表观活化能为 3.24 kJ/mol。

参考文献：

[1] 班燕，崔成. 浅谈冶金固废资源化利用现状及发展[J]. 世界有色金属，2021(7)：8 - 9.
BAN Yan，CUI Cheng. Status and development of resource utilization of metallurgical solid waste[J]. World Nonferrous Metals，2021(7)：8 - 9.

[2] 寇建兵，罗果萍，张芳. 包钢高炉除尘灰中有害元素分析研究[J]. 中国冶金，2011，21(3)：44 - 46；50.
KOU Jianbing，LUO Guoping，ZHANG Fang. Research on harmful elements in the dust eliminated from blast furnace gas of Baogang[J]. China Metallurgy，2011，21(3)：44 - 46；50.

[3] 谢泽强，郭宇峰，陈凤，等. 钢铁厂含锌粉尘综合利用现状及展望[J]. 烧结球团，2016，41(5)：53 - 56；61.
XIE Zeqiang，GUO Yufeng，CHEN Feng，et al. Research status and prospect of comprehensive utilization of zinc-bearing dust in iron and steel plants[J]. Sintering and Pelletizing，2016，41(5)：53 - 56；61.

[4] 佟志芳，陈涛，张鹏，等. 含锌高炉瓦斯泥造球工艺[J]. 有色金属科学与工程，2013，4(3)：40 - 44.
TONG Zhifang，CHEN Tao，ZHANG Peng，et al. The pellet making process using Zn-bearing BF gas slime[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering，2013，4(3)：40 - 44.

[5] 赵贵希，刘其敏. 高炉碱负荷和锌负荷的来源透析及对策[J]. 中国冶金，2014，24(12)：51 - 54.
ZHAO Guixi，LIU Qimin. Analysis and countermeasures of the source of alkali and zinc in blast furnace[J]. China Metallurgy，2014，24(12)：51 - 54.

[6] 张建良，王翠，左海滨，等. 高炉系统氯元素研究进展及未来展望[J]. 钢铁，2015，50(7)：1 - 7.
ZHANG Jianliang，WANG Cui，ZUO Haibin，et al. Future prospects and research progress of chlorine in blast furnace system[J]. Iron and Steel，2015，50(7)：1 - 7.

[7] HU Binsheng，GUI Yongliang，GUO Hualou，et al. Behaviors of chlorine in smelting process of blast furnace[J]. Advanced Materials Research，2012(396 - 398)：152.

[8] 徐萌，李增朴，马泽军，等. 迁钢 2 号高炉干法除尘系统氯腐蚀控制的研究[J]. 炼铁，2009，28(5)：36 - 41.
XU Meng，LI Zengpu，MA Zejun，et al. Study on chlorine corrosion control of dry dust removal system of No. 2 blast furnace in Qiangang[J]. Ironmaking，2009，28(5)：36 - 41.

[9] 雷仲存，朱伟明. 高炉煤气干法除尘腐蚀原因及对策探讨[J]. 冶金动力，2011(1)：22 - 23.
LEI Zhongcun，ZHU Weiming. Pipe corrosion cause of dry dusting of blast furnace gas and countermeasures[J]. Metallurgical Power，2011(1)：22 - 23.

[10] 毛瑞，王飞，杜屏，等. 基于转底炉工艺的冶金含铁尘泥造球试验研究[J]. 矿冶工程，2017，37(2)：107 - 111.
MAO Rui，WANG Fei，DU Ping，et al. Experimental study on pelletizing with iron-containing dust and sludge with rotary hearth furnace process[J]. Mining and Metallurgy Engineering，2017，37(2)：107 - 111.

（下转第 131 页）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

process of high concentration hydrogen chloride flue gas from incineration of medical waste[J]. Environmental Sanitation Engineering 2022,30(1):60 – 64.

[25] 周康. 活性炭纤维(ACF)吸附脱除废气中氯化氢(HCl)的实验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
ZHOU Kang. Experimental study on a dsorpt ion and removal of hydrogen chloride (HCl) from exhaust gases by activated carbon fiber (ACF)[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2013.

[26] 杨本涛,冯哲愚,叶恒棣,等. 钢铁工业高盐废水来源及零排放技术对比[J]. 烧结球团,2022,47(4):77 – 82.
YANG Bentao, FENG Zheyu, YE Hengdi, et al. High-salt wastewater sources in steel industry and comparison on zero-discharge technologies[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(4):77 – 82.

[27] 张乾,薛建明,吴春华,等. 碳基多孔材料脱除烟气中二噁英的研究进展[J]. 烧结球团,2021,46(5):65 – 72.
ZHANG Qian, XUE Jianming, WU Chunhua, et al. Research progress on desorption of dioxins in flue gas of carbon-based porous materials[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(5):65 – 72.

(上接第 83 页)

[11] 王少军,周朝刚,蒋朝敏,等. 基于干法除尘灰返回转炉的应用实践[J]. 中国冶金,2020,30(4):74 – 78.
WANG Shaojun, ZHOU Chaogang, JIANG Chaomin, et al. Application practice of dust returning to converter based on dry dedusting[J]. China Metallurgy,2020,30(4):74 – 78.

[12] 巨建涛,党要均. 钢铁厂含锌粉尘处理工艺的现状及发展[J]. 材料导报 A,2014,28(5):109 – 113.
JU Jiantao, DANG Yaojun. Present State and Development of Zinc-bearing Dust Treatment Process in Iron and Steel Plants[J]. Materials Reports A,2014,28(5):109 – 113.

[13] 刘超,张玉柱,王峰. 多源冶金粉尘资源化研究现状及展望[J]. 中国冶金,2022,32(10):38 – 44.
LIU Chao, ZHANG Yuzhu. Research status and prospect of multi-source metallurgical dust recycling[J]. China Metallurgy,2022,32(10):38 – 44.

[14] 高建军. 钒钛磁铁矿回转窑预热还原 – 全氧熔池熔炼基础研究[D]. 北京:钢铁研究总院,2018:32 – 33.
GAO Jianjun. Basic research for vanadium titano-magnetite extracted by rotary kiln pre-reduction and full oxygen bath smelting process[D]. Beijing:Central Iron & Steel Reasearch Institute,2018:32 – 33.

(上接第 105 页)

[11] 张强. 高炉冶炼炼铁技术工艺及应用探究[J]. 冶金管理,2021(7):9;30.
ZHANG Qiang. Study on the technology and application of Blast Furnace smelting Iron making[J]. China Steel Focus, 2021(7):9;30.

[12] 杨本涛,冯哲愚,叶恒棣,等. 钢铁工业高盐废水来源及零排放技术对比[J]. 烧结球团,2022,47(4):77 – 82.
YANG Bentao, FENG Zheyu, YE Hengdi, et al. High salt wastewater sources in steel industry and comparison on zero-discharge technologies[J]. Sintering and Pelletizing, 202, 47(4):77 – 82.

[13] CHIANG K Y,HU Y H. Water washing effects on metals emission reduction during municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash melting process[J]. Waste Management, 2010,30(5):831 – 838.

[14] 刘智勇. 氧化锌矿物在氨 – 铵盐 – 水体系中的浸出机理[D]. 长沙:中南大学,2012.
LIU Zhiyong. Leaching mechanism of zinc oxide ores in ammonia-ammonium aqueous solution[D]. Changsha:Central South University,2012.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net