

Research Status of Comprehensive Utilization of Stainless Steel Slag

Shuwei Lan, Zhiwei Zhang*, Aoyue Hong, Xin Wang, Hao Xu

School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang Liaoning
Email: 827739012@qq.com, *1429108462@qq.com, 1589565416@qq.com, 2816543719@qq.com, 1344180457@qq.com

Received: Feb. 8th, 2019; accepted: Feb. 21st, 2019; published: Feb. 28th, 2019

Abstract

A large amount of chromium-containing slag is produced in the production process of stainless steel, which has caused serious pollution problems and attracted wide attention. Under the dual pressure of the "Paris Agreement" and the environment-friendly transformation of the steel industry, research and development of a low-cost, large-scale, high-efficiency process for metallurgical waste are of vital important. Research status on the comprehensive utilization of stainless steel slag is reviewed, and the carbon capture and storage (CCS) using steel slag is discussed. The prospects of the dual purpose of chromium immobilization and recovery of calcium and magnesium are proposed.

Keywords

Stainless Steel Slag, Chromium Pollution, Carbon Capture and Storage, Comprehensive Utilization of Resource

不锈钢渣资源综合利用研究现状

兰树伟, 张志伟*, 洪奥越, 王鑫, 徐昊

东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳
Email: 827739012@qq.com, *1429108462@qq.com, 1589565416@qq.com, 2816543719@qq.com, 1344180457@qq.com

收稿日期: 2019年2月8日; 录用日期: 2019年2月21日; 发布日期: 2019年2月28日

摘要

不锈钢生产过程中产生了大量含铬废渣, 造成了严重的污染问题, 引起了社会各界的高度重视。在《巴

*通讯作者。

黎协定》与钢铁工业清洁化转型的双重压力下,低成本、大规模、资源化处理冶金废弃物新工艺的研究开发显得尤为重要。本文综述了钢铁企业对不锈钢渣资源化利用的研究现状,重点讨论了钢渣矿化封存二氧化碳的研究成果,并对兼顾不锈钢渣铬稳定化与钙镁碳捕集的综合利用方向提出了展望。

关键词

不锈钢渣, 铬污染, 碳捕集, 资源综合利用

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

不锈钢渣是不锈钢冶炼过程中产生的重要副产物。2018 年我国不锈钢粗钢产量约 2671 万吨,产生不锈钢渣 600 余万吨。不锈钢渣主要分为 EAF 钢渣和 AOD 钢渣,两者在成分和矿相方面均有不同,影响了各自资源综合利用领域[1]。EAF 渣呈黑色,颗粒较大,性能与一般钢渣较为接近,其中质量分数大于 1%的元素有 Ca、Si、Mg、Al、Fe、O、Cr 等。AOD 渣由于金属含量较少而呈白色,冷却过程中易粉化,其中质量分数大于 1%的元素有 Ca、Si、Mg、O 等[2]。EAF 渣和 AOD 渣在矿相组成上也有区别[3]。其中 EAF 渣主要由硅酸二钙(Ca_2SiO_4)和蔷薇辉石($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$)组成;而 AOD 钢渣的主要矿相为硅酸二钙(Ca_2SiO_4),同时还含有少量的方解石(CaCO_3)、氢氧化钙石($\text{Ca}(\text{OH})_2$)和二氧化硅(SiO_2) [4] [5] [6]。

不锈钢渣中含有一定量的铬元素,使其不能像普通钢渣一样直接利用。长久以来,国内外学者在不锈钢渣无害化处理方面开展了广泛的研究,并取得了一定成果[7] [8] [9]。其中,针对铬稳定化处理与解毒的方法主要包括固化法、干法处理、湿法处理和熔融改质法等[10] [11]。以上研究虽然在不同程度上减轻了铬污染问题,但不锈钢渣中蕴含的丰富有价资源仍然难以经济、高效回收,不锈钢渣资源综合利用整体水平仍较低。

2. 钢铁企业不锈钢渣利用现状

目前钢铁企业普遍采取的不锈钢渣利用方法可分为两大类:应用于钢铁生产流程之内的厂内循环和应用于钢铁生产流程之外的厂外综合应用。

2.1. 厂内循环

厂内循环是主要针对不锈钢渣中的有价氧化物开展的资源综合利用,应用在钢铁生产流程内的烧结、高炉和精炼等方面。

在烧结工序方面,以不锈钢渣来代替部分熔剂不仅可以利用了渣中的 Fe、FeO、CaO、MgO、MnO 等有价成分[12],而且高温熔炼后不锈钢渣软化温度低、物相均匀且具有一定的黏性,可在烧结过程中替代部分的白云石和生石灰,能够提高烧结矿质量和降低烧结燃料消耗,是烧结生产中的绝佳原料。但返回值烧结工序仅能消耗约 4%的不锈钢渣,难以实现不锈钢渣的规模化利用。此外,钢渣中含有的有害元素带入烧结矿中,会对后续工艺中的铁水质量造成危害。

在高炉炼铁方面,参考普通钢渣的处理工艺可以将不锈钢渣经破碎、筛分后作为造渣剂,渣中的 CaO、MgO 充当助熔剂, MgO、MnO 等改善高炉渣的流动性,金属元素返回生产流程[13]。但高炉本身脱磷能

力差,有害元素富集问题仍然存在,同时也会造成渣量的增加。

在钢水精炼方面,李俊国,曾亚南[14] [15]等人将堆存的 EAF 和 AOD 渣同 LF 精炼渣混合,在 LF 炉中进行反应,最终制备了精炼渣。此方法充分利用 LF 精炼的高温 and 还原性气氛,使堆存不锈钢渣中的六价铬还原为三价铬,同时 LF 渣中的高 Al_2O_3 含量有利于促进尖晶石的形成,固化和封存不锈钢渣中的铬元素,同时实现了不锈钢渣的无害化处理和资源化利用。

厂内循环有效的提高了钢铁生产流程内原料的利用效率,提高了各元素收得率。然而,以上方法在杂质累积、操作成本、工艺顺行等诸多方面仍存在一些问题,整体实践效果并不十分理想。

2.2. 厂外综合利用

针对不锈钢渣的物理化学特性,冶金工作者开发了许多钢铁生产流程以外的综合利用方法,包括制备建材、烧制陶瓷和处理其他废弃物等方面。

太钢提出了不锈钢渣络合沉淀分步提取有价元素的方法[16],通过交替提供酸碱环境可选择性提取渣中有价金属元素。但是这种处理方法过程较为繁琐,且酸碱消耗量大,处理成本高,难以在全行业实现推广。

Zhang [17]等人开展了不锈钢除尘灰熔融处理回收其中有价金属的研究。在熔融状态下将铁、铬、镍还原为金属单质,通过磁选将其回收利用。作者计算了铬在 Fe-Cr-Ni-C 熔盐中的活度和氧化铬在不锈钢除尘灰中的活度,并在实验室条件下研究了使用 Fe-Cr-Ni-C 熔盐还原铬的反应机理。

不锈钢渣在建材制备过程中的应用已得到广泛研究[18] [19]。不锈钢渣可用于制备波特兰水泥,实现现代城市的工业共生体系的构建。但为降低渣中铬的潜在释放风险,需对不锈钢渣进行铬稳定化预处理[20]。Rosales [21]等人通过实验证明了不锈钢渣可代替水泥在混凝土中进行应用,且能够增强混凝土的机械性能。

不锈钢渣的理化性质可以满足制备陶瓷材料的要求。按照陶瓷坯料的成分,一般在不锈钢渣中添加 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 等物质可使其达到陶瓷坯料的成分范围[22]。郭华[23]等人用不锈钢渣为原料制备了陶瓷材料,但对渣中 Cr_2O_3 含量有含铬要求。不锈钢渣生产陶瓷耗渣量大,不仅可通过向混合料中添加一定的还原剂消除六价铬的毒性,还在烧制过程中经矿化作用抑制三价铬的再氧化[24]。

不锈钢渣还可用于治理污染性气体。厉亚军[25]等人发现不锈钢渣对 SF_6 具有较好的降解效果,作者认为不锈钢渣的粒径越小、反应温度越高, SF_6 去除率越高,单位降解量越大。目前,在钢铁企业绿色转型发展的要求下,基于不锈钢渣矿物属性与其他废弃物协同处理、“以废治废”的思路得到了越来越多的关注。

3. 钢渣碳捕集研究现状

目前,我国钢铁企业每年排放约 15 亿吨二氧化碳气体,约占我国碳排放总量的 15%,造成了严重的环境问题[26] [27] [28]。钢铁行业在碳市场中的机遇与挑战并存,如何低成本捕集二氧化碳,减少温室气体排放是钢铁企业急需解决的问题[29] [30]。钢渣作为含有大量钙镁硅酸盐的冶金废弃物,具有产量大、温度高、距离二氧化碳释放源近等独特优势。因此,利用钢渣矿化封存二氧化碳技术受到了冶金工作者的广泛关注。不锈钢渣是一种含铬钢渣,了解普通钢渣的碳捕集研究现状对不锈钢渣的综合利用具有重要的指导意义。

3.1. 直接碳酸化捕集

Yu [31]等人针对转炉渣和电炉渣开展了直接干式碳酸化封存二氧化碳实验研究,发现在反应温度对钙转化率影响较大。此外,作者研究了二氧化碳浓度条件对碳酸化效率的影响,认为在二氧化碳浓度低

于 10%和高于 75%时, 钙元素转化率较高。相同条件下, 电炉渣固定二氧化碳的性能高于转炉钢渣。经过作者分析认为, 该实验过程同时受到了碳酸化反应动力学和二氧化碳气体扩散的控制。

Takahashi [32]等人针对日本 JFE 钢铁株式会社的转炉渣开展了直接碳酸化固定二氧化碳的研究。该研究通过将转炉渣与适量的水混合并通过模具压制成型, 密封处理注入二氧化碳气体直至压力达到合适值, 使钢渣与二氧化碳充分反应, 然后得到碳酸化产品。该工艺特点有: 对气体来源要求低, 碳酸钙产物与钢渣颗粒紧密结合, 所得产物结构强度高。

Chang [33]等人借助超重力旋转填料床对转炉钢渣开展了加速碳酸化固定二氧化碳的研究, 该研究阐明了超重力旋转填料床内反应时间、反应温度、转速和料浆流速等条件对二氧化碳碳酸化效率的影响机理。并借助热重分析、原子吸收光谱仪、X 射线衍射仪、扫描电镜和透射电镜等手段进行研究, 表明在转速为 750 rpm、温度为 65℃、反应时间 30 min 后钢渣最大转化率可达 93.5%, 并借助收缩核模型对钢渣极限转化率进行了预测。

Huijgen [34]等人对某种碱性钙含量较高的钢渣开展了直接碳酸化固定二氧化碳的研究, 作者通过对反应过程中钢渣粒径、反应温度、通入二氧化碳压力和反应时间等过程变量进行研究, 提出了钢渣—水悬浮液体系下直接碳酸化反应的反应机理。实验得出在二氧化碳压强为 1.9 MPa、反应温度为 100℃、钢渣粒径小于 38 μm 条件下, 钙元素碳酸化可达 74%。并指出该碳酸化方法下钢渣粒径和反应温度为反应的主要限制性环节, 还指出钢渣颗粒表面形成的碳酸盐产物层阻碍了反应的进一步进行。

3.2. 间接碳酸化捕集

经过大量研究发现, 钢渣直接碳酸化固定二氧化碳主要分为两个阶段: 1) 钢渣中钙镁元素溶出; 2) 钙镁碳酸化形成碳酸盐。由于直接碳酸化反应两个阶段间隔时间极短, 往往存在碳酸盐产物层抑制反应持续进行的现象, 降低了反应速率和碳酸化效率。

Kodama [35]等人以氯化铵溶液为基础配置浸出液, 设计了一种以钢渣为原料的间接化碳酸化固定二氧化碳的工艺。此工艺钙浸出率可达 60%, 所得碳酸钙产品纯度较高, 生产过程耗能较低, 所用浸出液可回收循环利用。然而, 钢渣破碎、研磨过程耗能较高。

Sun [36]等人同样选择氯化铵为浸出液基础, 通过考察压强、搅拌速率、温度和反应时间的影响, 得出固碳反应的最优条件。在压强为 1 MPa、温度为 60℃、搅拌速率为 400 rpm、反应时间为 60 min 的条件下, 得到了纯度为 96%的轻质碳酸钙。同时发现在 20℃~80℃范围内调节碳酸化反应温度可以定向生成特定晶型的产品。

张保平[37]等人根据同时平衡原理和电中性原理, 对 $\text{Ca(II)}-\text{NH}_3-\text{CO}_3^{2-}-\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ 溶液体系的热力学行为开展了研究, 认为钙的溶解度与碳酸根总浓度密切相关。在溶液中总碳酸根浓度大于 0.1 mol/L 时, 钙溶解度与硫酸根浓度正相关, 而与氨浓度、总铵浓度和 pH 值呈负相关关系。

3.3. 不锈钢渣碳捕集研究现状

由于不锈钢渣中含铬组元的存在, 其碳酸化行为与普通钢渣存在一定差异。Moon [38]等人评价了利用含 $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ 的 AOD 渣用于捕捉与封存二氧化碳的可能性, 分析了不同固液比的 AOD 渣泥浆在碳酸化过程中的物理化学变化。发现 $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ 在室温下与水不发生反应, 但是碳酸化后, $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ 转化为方解石与二氧化硅, 填充在泥浆颗粒的空隙中, 形成高密度结构。正是由于颗粒表面这两种新物相的生成, 提高了颗粒间的聚合能力, 这与硅酸盐水泥硬化转变为混凝土时发生的反应相似, 因此碳酸化后的样品表现出了较高的抗压强度, 具有良好的结构性能。

Johnson [39]等人针对不锈钢渣开展了碳捕集强化研究, 发现在二氧化碳压强为 0.3 MPa 的条件下,

向碾碎的渣中掺入 12.5%的水后, 不锈钢渣可吸收相当于其重量 18%的二氧化碳, 形成建筑结构材料。碳酸化前后的不锈钢渣抗压强度由之前的不足 1 MPa 提升到了 9 MPa。作者同时指出当不锈钢渣颗粒小于 125 μm 时, 反应后抗压强度明显高于尺寸为 4~8 mm 的反应产物。

Baciocchi [40]等人从反应动力学的角度对不锈钢渣碳捕集开展了研究, 重点考察了颗粒粒度对二氧化碳固定能力的影响。研究发现小尺寸不锈钢渣有利于提高二氧化碳吸收容量, 最大吸收比率为可达 130g/kg(二氧化碳/钢渣)。作者将此现象归因于细颗粒反应物拥有更大的比表面积和反应物利用效率。

4. 总结与展望

不锈钢渣中含有易溶出的铬元素, 极大限制了其资源综合利用水平。学者通过研究发现, 将铬元素固定在稳定物相中可降低铬的释放风险, 但渣中大量的钙镁资源无法得到充分利用。钢铁企业目前面临着巨大的温室气体减排任务。因此, 基于不锈钢渣矿物属性与成分特点, 将其无害化处理与碳捕集利用协同考虑, 探索兼顾铬稳定化与钙镁赋存相在线调控的方法, 提升钙镁元素的回收水平, 有望实现钢铁企业废渣与废气的协同治理, 对企业的清洁化转型与绿色发展具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 张翔宇, 章骅, 何晶晶, 等. 不锈钢渣资源利用特性与重金属污染风险[J]. 环境科学研究, 2008, 21(4): 33-37.
- [2] 魏代修, 徐安军, 贺东风, 等. 电炉渣资源利用特性及铬的浸出特性[J]. 钢铁, 2012, 47(10): 92-96.
- [3] Mostafaei, S., Andersson, M. and Jönsson, P.G. (2011) Petrographical Study of Microstructural Evolution of EAF Duplex Stainless Steelmaking Slags. *Ironmaking & Steelmaking*, **38**, 90-100. <https://doi.org/10.1179/030192310X12731438631769>
- [4] 甄常亮, 那贤昭, 齐渊洪, 等. 不锈钢渣基础性能研究及资源化利用风险评价[J]. 炼钢, 2012, 28(4): 74-77.
- [5] 陈子宏, 马国军, 肖海明, 等. 不锈钢冶炼电炉渣结构性质及浸出行为研究[J]. 武汉科技大学学报, 2009, 32(5): 466-470.
- [6] 王亚军, 李俊国, 郑娜. AOD 不锈钢渣矿相组成及其显微形貌[J]. 钢铁钒钛, 2013, 34(4): 68-72.
- [7] 盛灿文, 柴立元, 王云燕, 等. 铬渣中六价铬水浸动力学研究[J]. 安全与环境工程, 2006, 13(3): 40-44.
- [8] 蔡木林, 景学森, 杨亚提. 铬渣酸溶性六价铬浸出动力学研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(10): 90-93.
- [9] Iacobescu, R.I., Malfliet, A., Machiels, L., Jones, P.T., Blanpain, B. and Pontikes, Y. (2014) Stabilisation and Microstructural Modification of Stainless Steel Converter Slag by Addition of an Alumina Rich By-Product. *Waste & Biomass Valorization*, **5**, 343-353. <https://doi.org/10.1007/s12649-013-9287-y>
- [10] Park, D., Lim, S.-R., Lee, H.W. and Park, J.M. (2008) Mechanism and Kinetics of Cr(VI) Reduction by Waste Slag Generated from Iron Making Industry. *Hydrometallurgy*, **93**, 72-75. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.03.003>
- [11] Qifeng, S., Qingyun, L., Lijun, W. and Kuo-Chih, C. (2014) Effects of MnO and CaO/SiO₂ Mass Ratio on Phase for Mations of CaO-Al₂O₃-MgO-SiO₂-CrO_x Slag at 1673 K and PO₂ = 10⁻¹⁰ atm. *Steel Research International*, **86**, 351-399.
- [12] 李小明, 李文锋, 王尚杰, 等. 不锈钢渣资源化研究现状[J]. 湿法冶金, 2012, 31(1): 5-8.
- [13] 沈中芳, 肖永力, 张友平. 不锈钢渣返高炉流程生产镍铬生铁的可行性[J]. 宝钢技术, 2016(2): 13-16.
- [14] 李俊国, 曾亚南. 堆存 AOD 不锈钢渣的处理方法[P]. 中国 CN105039615A, 2015.
- [15] 李俊国, 曾亚南. 堆存 EAF 不锈钢渣的处理方法[P]. 中国 CN105039617A, 2015.
- [16] 张智敏. 不锈钢生产中废渣治理的研究[J]. 环境保护, 1991(5): 20-21.
- [17] Zhang, Y., Guo, W. and Jia, X. (2015) Recovery of Cr during Smelting Treatment of Stainless Steel Dust. *6th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*, 15-19 March 2015, 305-312. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48217-0_39
- [18] Parron-Rubio, M.E., Perez-García, F., Gonzalez-Herrera, A. and Rubio-Cintas, M.D. (2018) Concrete Properties Comparison When Substituting a 25% Cement with Slag from Different Provenances. *Materials*, **11**, 1-13. <https://doi.org/10.3390/ma11061029>
- [19] Saly, F., Guo, L.P. and Rui, M. (2018) Comparison of Hydration Properties of Cement-Carbon Steel Slag and Cement-Stainless Steel Slag Blended Binder. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2018**, 1-9.

- [20] Iacobescu, R.I., Angelopoulos, G.N., Jones, P.T., Blanpain, B. and Pontikes, Y. (2016) Ladle Metallurgy Stainless Steel Slag as a Raw Material in Ordinary Portland Cement Production: A Possibility for Industrial Symbiosis. *Journal of Cleaner Production*, **112**, 872-881. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.006>
- [21] Rosales, J., Cabrera, M. and Agrela, F. (2017) Effect of Stainless Steel Slag Waste as a Replacement for Cement in Mortars. Mechanical and Statistical Study. *Construction and Building Materials*, **142**, 444-458. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.082>
- [22] 张志波, 细野秀雄, 阿部良弘. Na₂O-CaO-TiO₂-P₂O₅ 系统多孔微晶玻璃的制备[J]. 玻璃与搪瓷, 1993, 1: 11-13.
- [23] 郭华, 苍大强, 白皓, 等. 不锈钢渣制备陶瓷的实验研究[J]. 物理测试, 2008, 26(4): 17-20.
- [24] Galán-Arboledas, R.J., Diego, J.Á., Dondi, M. and Bueno, S. (2017) Energy, Environmental and Technical Assessment for the Incorporation of EAF Stainless Steel Slag in Ceramic Building Materials. *Journal of Cleaner Production*, **142**, 1778-1788. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.110>
- [25] 厉亚军. 不锈钢渣降解强温室气体六氟化硫(SF₆)的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海大学, 2012.
- [26] Chen, L., Yang, B., Shen, X., Xie, Z.H. and Sun, F.R. (2015) Thermodynamic Optimization Opportunities for the Recovery and Utilization of Residual Energy and Heat in China's Iron and Steel Industry: A Case Study. *Applied Thermal Engineering*, **86**, 151-160. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.026>
- [27] Yu, B., Li, X., Qiao, Y.B. and Shi, L. (2015) Low-Carbon Transition of Iron and Steel Industry in China: Carbon Intensity, Economic Growth and Policy Intervention. *Journal of Environmental Sciences*, **28**, 137-147. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.04.020>
- [28] Xuan, Y.N. and Yue, Q. (2016) Forecast of Steel Demand and the Availability of Depreciated Steel Scrap in China. *Resources, Conservation and Recycling*, **109**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.003>
- [29] Kheshgi, H., Coninck, H.D. and Kessels, J. (2012) Carbon Capture and Storage: Seven Years after the IPCC Special report. *Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change*, **17**, 563-567. <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9391-5>
- [30] Quirion, P., Rozenberg, J., Sassi, O. and Vogt-Schilb, A. (2011) How CO₂ Capture and Storage Can Mitigate Carbon Leakage. *Working Papers*, **2**, 1-18. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1763165>
- [31] Yu, J. and Wang, K. (2011) Study on Characteristics of Steel Slag for CO₂ Capture. *Energy & Fuels*, **25**, 5483-5492. <https://doi.org/10.1021/ef2004255>
- [32] Takahashi, T. and Yabuta, K. (2002) New Applications for Iron and Steelmaking Slag. *NKK Technical Review*, **87**, 38-44.
- [33] Chang, E.E., Pan, S.Y., Chen, Y.H., Chen, Y.H., Tan, C.S. and Chiang, P.C. (2012) Accelerated Carbonation of Steel-making Slags in a High-Gravity Rotating Packed Bed. *Journal of Hazardous Materials*, **227-228**, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.05.021>
- [34] Huijgen, W.J., Witkamp, G.J. and Comans, R.N. (2005) Mineral CO₂ Sequestration by Steel Slag Carbonation. *Environmental Science & Technology*, **39**, 9676-9682. <https://doi.org/10.1021/es050795f>
- [35] Kodama, S., Nishimoto, T., Yamamoto, N., Yogo, K. and Yamada, K. (2008) Development of a New pH-Swing CO₂ Mineralization Process with a Recyclable Reaction Solution. *Energy*, **33**, 776-784. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.01.005>
- [36] Sun, Y., Yao, M.S. and Zhang, J.P. (2011) Indirect CO₂ Mineral Sequestration by Steelmaking Slag with NH₄Cl as Leaching Solution. *Chemical Engineering Journal*, **173**, 437-445. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.08.002>
- [37] 张保平, 唐朝波, 唐谟堂, 等. Mg(II)-Ca(II)-NH₃-CO₃²⁻-SO₄²⁻-H₂O 体系钙镁溶解热力学分析[J]. 湿法冶金, 2005, 24(1): 26-32.
- [38] Moon, E.J. and Choi, Y.C. (2018) Development of Carbon-Capture Binder Using Stainless Steel Argon Oxygen Decarburization Slag Activated by Carbonation. *Journal of Cleaner Production*, **180**, 642-654. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.189>
- [39] Johnson, D.C., Macleod, C.L. and Carey, P.J. (2003) Solidification of Stainless Steel Slag by Accelerated Carbonation. *Environmental Technology Letters*, **24**, 8-15. <https://doi.org/10.1080/09593330309385602>
- [40] Baciocchi, R., Costa, G., Polettini, A. and Pomi, R. (2009) Influence of Particle Size on the Carbonation of Stainless Steel Slag for CO₂ Storage. *Energy Procedia*, **1**, 4859-4866. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.314>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2373-1478，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：meng@hanspub.org