Advances in CO_2 Sequestration by Waste Slags from Ironmaking and Steelmaking Process

Guojun Ma, Hui Tang, Yi Fang

Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, P. R. China

E-mail address:gma@wust.edu.cn

Abstract: Iron and steel industry is a major CO_2 emissions source in China. It discharges large amounts of waste slags. It is advantage to use iron and steel smelting slag carbonated with CO_2, such as high output of waste slags, low price of raw materials, close to the CO_2 emission sources, and no secondary pollution can be generated. It is of great significance to the CO_2 emissions reduction and solid waste disposal. In this paper, it describes the chemical compositions and phase compositions of iron and steel smelting waste slags. In addition, the basic processes of direct and indirect CO_2 carbonation process were also introduced. The advantages and disadvantages of these processes were respectively evaluated.

Keywords: waste slag; carbonation; CO_2; ironmaking and steelmaking

钢铁冶炼废渣碳酸化固定二氧化碳研究进展

马国军，唐　辉，方　翼

武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室，武汉，中国，430081

Email address: gma@wust.edu.cn

摘　要：钢铁工业是我国 CO_2 排放的主要源头之一，生产中同时排放大量废渣。采用钢铁冶炼废渣碳酸化隔离 CO_2 具有废渣产生量大、价格便宜、距离 CO_2 排放源较近，以及产物不会造成二次污染等许多优势，对 CO_2 减排和钢铁冶炼厂固体废弃物处理都具有重要意义。本文介绍了钢铁冶炼废渣的化学成分及其物相组成，以及目前国内外采用直接和间接碳酸化工艺固定 CO_2 的基本工艺过程，并对工艺的优缺点进行了评价。

关键词：废渣；碳酸化；CO_2；钢铁冶炼

1 引言

CO_2排放对生态环境以及人类生活的危害性主要是由于CO_2在大气中聚集吸收地球辐射的部分光谱而导致的温室效应，导致全球变暖[1]。大气中CO_2的浓度已经从产业革命时期的280ppm上升到1995年的361ppm[1]。研究表明，温室气体中CO_2导致地球温度上升的作用是最大，2001年日本排放的六种主要的温室气体中，CO_2所占的比例为93.2%[2]。为了遏制全球变暖趋势，2005年正式生效的《京都议定书》规定2008-2012年期间，38个主要工业国的CO_2等6种主要温室气体排放量须在1990年的基础上平均削减5.2 %[1]。

钢铁工业是我国 CO_2 排放的主要源头之一，CO_2 排放量约占全国的 9.2%。目前钢铁生产工艺主要包括“长流程”（高炉-转炉流程）和“短流程”（电炉流程）。在长流程中，每生产 1t 粗钢大约排放 2.1-2.3tCO_2，而短流程中，每生产 1t 粗钢大约排放 0.51-0.70tCO_2[2]。钢铁工业减少 CO_2 排放的主要途径包括通过开发清洁能源及充分利用废钢资源等措施实现 CO_2 的源头减排，但采用这些技术只能减少 CO_2 的排放，因此，采用各种技术来永久储存或固定 CO_2 就成为了 CO_2 控制的另一种可供选择的有效技术。

CO_2储存与固定技术主要包括地质储存、生物储存、海洋储存和矿物碳酸化储存等。其中“矿物碳酸化”的概念最早由Seifritz在1990年提出，在1995年以后国外对矿物碳酸化储存CO_2进行了大量研究[3-4]。2005年联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）给

资助项目：湖北省教育厅优秀中青年人才项目（Q20101108）

978-1-935068-37-2 © 2010 SciRes.

出了矿物碳酸化的定义，即指用含金属氧化物的材料与CO_2反应形成无机碳酸盐的工艺（如式1）[5]。

$$MO(s)+CO_2=MCO_3(s)+Q(M包括Ca、Mg和Fe等) \quad (1)$$

矿物碳酸化储存CO_2主要是利用天然矿石与CO_2进行碳酸化反应得到稳定碳酸盐的方法来储存CO_2。在自然界中，矿石碳酸化过程也可以自然发生，但在常温常压下，其反应速率很慢。和其它CO_2储存技术相比，矿物碳酸化具有反应产物热力学稳定，且可以长期和安全的储存。目前，日本、荷兰、美国、加拿大和芬兰等国进行了大量基础研究[4,6-11]。所采用的矿物包括天然矿石（如橄榄石$(Mg,Fe)_2[SiO_4]$、蛇纹石$Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$、硅灰石$CaSiO_3$等）和碱性固体废弃物（如垃圾焚烧飞灰、炼钢渣和建筑废弃物等）。其中采用碱性固体废弃物来固定CO_2已成为近几年来的研究热点。国内关于矿物储存CO_2的研究报道不多，直到 2006 年徐俊等人才对天然矿物碳酸化固定CO_2进行了初探[12]。本文将对钢铁冶炼废渣的基本特性及其碳酸化固定CO_2的研究进展进行评述。

2 钢铁冶炼废渣及其组成

根据冶炼工序来分，钢铁冶炼废渣包括高炉炼铁渣、转炉炼钢渣、电炉炼钢渣（包括电炉普碳钢渣和电炉特殊钢渣）和炉外处理渣（LF精炼废渣、AOD炉废渣和KR脱硫废渣等）。以长流程为例，每生产1t粗钢约排放冶炼废渣500-550kg，其中高炉渣产生量约为346kg/t铁，转炉钢渣产生量约为100-150kg/t钢，铁水预处理过程产生废渣约40kg/t钢，LF精炼废渣约15kg/t钢[1]。钢铁企业废渣产生量大，利用率低，堆存这些废渣往往需要占用大量的土地。因此，许多钢铁企业已将废渣资源化作为可持续发展的有效途径之一。

目前，钢铁冶炼废渣的综合利用主要集中在：（a）建材领域：用于水泥的掺合料、新型墙体材料、免烧砖等；（b）路用材料领域：用于钢渣道路掺合料和钢渣沥青路面修补涂层；（c）化学化工环保领域：用于生产减水剂和净水剂等；（d）农业方面：用于生产硅肥、磷肥或酸性土壤改良剂等。随着全球铁矿资源的日益紧张，钢渣返回应用于冶金过程中用作冶金辅料如烧结矿熔剂、钢水净化剂等被认为是高效利用钢渣的有效途径。但由于炼钢过程脱磷的需要，钢渣中磷普遍较高，如简单地将钢渣返回烧结利用，则必然会造成磷在铁液中的循环富集，并最终限制钢渣的再利用。

钢铁冶炼废渣的典型化学成分及物相组成如表 1 和表 2 所示[1,13-16]。由表 1 可见，钢铁冶炼废渣中含有大量 CaO 和 MgO，二者之和达到了约 42-68%。尤其是在炉外处理废渣中 CaO 和 MgO 含量在 60%以上。对钢铁冶炼废渣的物相鉴定表明除水淬高炉炼铁渣外，其他废渣中主要含有硅酸二钙、硅酸三钙、镁黄长石、钙长石等富含钙镁元素的物相，是一种良好的储存 CO_2 的材料。

从理论上来说，由于钢铁冶炼废渣中含大量碱性物质，可以固定一定量的 CO_2，且废渣本身作为钢铁厂的固体废弃物需要处理，采用钢铁冶炼废渣来固定 CO_2 可以达到以废治废的目的。此外，采用废渣碳酸化固定 CO_2 具有废渣产生量大、价格便宜、距离 CO_2 排放源较近，以及产物不会造成二次污染等许多优势，还可能生产出具有高附加值的无机化工产品，如轻质 $CaCO_3$[9]，这对 CO_2 减排和固体废弃物处理都具有重要意义，可以产生很好的社会效益和可观的经济效益。

Table 1. Chemical compositions of typical waste slags from iron-making and steelmaking process[1,13-16]
表 1. 典型的钢铁冶炼废渣化学成分[1,13-16]

冶金废渣类别	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	Cr_2O_3
高炉炼铁渣	38.1	33.8	11.7	10.6	2.2	-
转炉炼钢渣	40.1	19.2	1.5	9.8	20.2	-
电炉普碳钢渣	32.1	19.4	8.6	9.4	26.4	-
电炉不锈钢渣	46.9	33.5	2.3	6.2	1.55	2.92
LF精炼废渣	58.1	26.4	4.6	6.2	4.8	-
AOD精炼废渣	54.1	26.5	4.9	6.3	1.9	1.8
KR脱硫废渣	63.8	11.2	1.2	4.0	5.3	-

Table 2. Crystalline phases of typical waste slags from ironmaking and steelmaking process[1,13-16]
表 2. 典型的钢铁冶炼废渣物相组成[1,13-16]

冶金废渣类别	物相组成
高炉炼铁渣	玻璃体和微晶体(水淬渣) 硅酸二钙、钙铝黄长石、镁黄长石、钙长石和硫化钙(缓冷渣)
转炉炼钢渣	硅酸二钙(Ca_2SiO_4)、硅酸三钙(Ca_3SiO_5)、RO相、铁酸钙($Ca_3Fe_2O_5$)、方镁石(MgO)、CaO
电炉普碳钢渣	硅酸二钙(Ca_2SiO_4)、硅酸三钙(Ca_3SiO_5)、钙镁黄长石($Ca_2MgSi_2O_7$)、$C_{12}A_7$、硅酸镁($MgSiO_3$)、镁铁氧化物($MgFeO_2$)
电炉不锈钢渣	硅酸二钙(Ca_2SiO_4)、镁硅钙石($Ca_3Mg(SiO_4)_2$)和镁铁铬氧化物(Mg-Fe-Cr-O)
LF精炼废渣	$11CaO\cdot7Al_2O_3\cdot CaS$($C_{11}A_7\cdot CaS$)，$3CaO\cdot SiO_2$和$2CaO\ SiO_2$
AOD精炼废渣	硅酸二钙(Ca_2SiO_4)及少量方解石($CaCO_3$)、氢氧钙石($Ca(OH)_2$)和SiO_2
KR脱硫废渣	金属铁、铁酸镁、磁铁矿、硅酸一钙、硅酸二钙(Ca_2SiO_4)、硅酸三钙(Ca_3SiO_5)等

3 钢铁冶炼废渣碳酸化固定 CO_2 技术

钢铁冶炼废渣碳酸化固定CO_2的途径主要有直接碳酸化工艺和间接碳酸化工艺两种。直接碳酸化工艺利用CO_2与矿物颗粒直接发生反应生成碳酸盐固定CO_2，可以采用干法和湿法两种工艺。为了加快反应速度，直接碳酸化反应可以在水溶液体系中进行。间接碳酸化工艺采用溶剂从废渣中提取钙、镁等离子，然后再碳酸化。间接碳酸化反应常在系统中加入一定的溶剂（如醋酸、盐酸、氯化镁熔盐和氢氧化钠等），快速提取钙、镁等离子，然后在另一个反应器内进行碳酸化固定CO_2。

3.1 直接碳酸化工艺

日本JFE钢铁株式会社最先采用转炉钢渣直接干法工艺来固定CO_2并制成立方体状的钢渣块作为海洋砌块（Marine blocks）。其制造工艺为：先向钢渣中加入适量的水，后置于密封的模具内压紧，一定压力的CO_2气体由模具底部喷入，一定时间后可得到一大块碳酸化渣块。各种废气均可用作CO_2的气源，反应产物的微观结构如图1所示。研究发现，其反应机理是CO_2气体进入渣粒之间的孔隙与钢渣颗粒反应形成$CaCO_3$，并紧密结合在一起。但该工艺需要高压CO_2，且反应时间长，产物仅用于填海，附加值较低[8]。

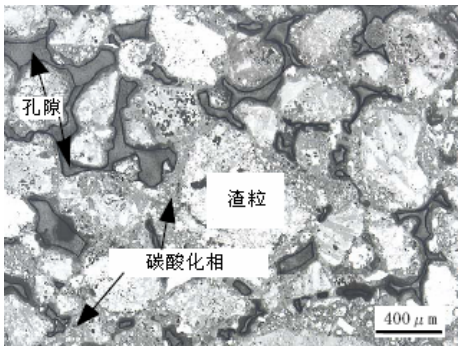

Figure 1. Microstructure of carbonated steelmaking slag[8]
图 1. 碳酸化钢渣块的微观结构[8]

国内董晓丹对转炉钢渣吸收CO_2的行为进行了探讨，以降低钢渣中游离氧化钙的含量，从而对钢渣改性，为其资源化利用提供更广阔的空间[17]。对转炉钢渣吸收二氧化碳生成碳酸钙的制约因素分析表明，反应由五个步骤组成[17]，即(1)Ca向固体颗粒表面的扩散；(2)Ca从固体表面向液体中释放；(3)CO_2溶解到水中；(4)溶解的CO_2与CO_3^{2-}离子的转化平衡；(5)Ca^{2+}与CO_3^{2-}沉淀成$CaCO_3$。且前3步是提高反应速率的关键步骤。研究发现在钢渣吸收CO_2的最佳反应条件下（反应温度700℃，反应时间30-60min，粒径为0.18mm，CO_2体积分数为80%，水蒸气体积分数为10-20%），游离氧化钙的转化率可达到90%。经处理后的钢渣有望用于污水处理、水生态修复等领域。

Bonenfant等人近期采用直接湿法工艺研究了常温常压下采用电弧炉（EAF）渣和钢包炉（LF）废渣固定CO_2的潜力[7]，发现强碱性和$Ca(OH)_2$含量是钢渣具有高的CO_2固定能力的主要原因。

Huijgen等人采用直接湿法工艺用转炉钢渣来碳酸化固定CO_2[11,18]。探讨了渣粒粒径、反应温度、CO_2压力、反应时间、搅拌速度和液固比对碳酸化反应速率的影响，得出了最优的碳酸化反应条件是渣粒粒径<38μm，反应温度为100℃，CO_2压力为19bar，液固比为10kg/kg，搅拌速度为500rpm，反应时间为30min时可达到最高的碳酸化程度为74%。反应机理包括两步，即钢渣中Ca^{2+}的浸出和颗粒表面$CaCO_3$的沉淀，但渣粒表面形成的$CaCO_3$和SiO_2产物层会降低反应速率。此外，他们还发现采用固体废弃物（如转炉炼钢渣、建筑废弃物等）作为原料固定等量的CO_2较采用天然矿物硅灰石为原料运行成本低（表3）[19]。

Table 3. Comparison of sequestration costs reported for mineral carbonation processes[19]
表3. 矿物碳酸化工艺的固定CO_2成本对比[19]

矿物碳酸化成本(€/ton CO_2)	原料	工艺流程	提取剂
93	硅灰石	直接	水
102	硅灰石	直接	水
77	钢渣	直接	水
65	橄榄石	直接	水
258	蛇纹石	直接	水
95	硅酸镁	直接	$MgCl_2$
25	废水泥	间接	水
57	硅灰石	间接	醋酸
＞150	硅酸镁	间接	HCl

Lekakh等人研究了在常压下水溶液中EAF渣和LF废渣固定CO_2的动力学，并对工艺的主要反应进行了分析（表4）[13,20]，发现渣粒中Ca的浸出和碳酸化均符合传统的缩核模型，且在浸出初期，过程的控制性环节是CaO的溶解，后期则由多孔表面层内Ca^{2+}的扩散

978-1-935068-37-2 © 2010 SciRes.

控制，而碳酸化转化反应由产物层扩散控制。在大气压力下，浸出初期提高浸出反应温度（从20℃到60℃）有利于增加Ca^{2+}的浸出速率，但24h后的浸出率变化不大（约50%），且碳酸化转化与渣粒粒径相关。

Table 4. Reactions during aqueous slag-CO_2 sequestration[20]
表4. 溶液中渣和CO_2固定的反应[20]

过程描述	反应
二氧化碳溶解	$CO_2(g)+H_2O \rightarrow H_2CO_3(aq)$
	$H_2CO_3(aq) \rightarrow H^+ + HCO_3^-$
	$HCO_3^- \rightarrow H^+ + CO_3^{2-}$
钙离子浸出	$CaO(s)+H_2O(l) \rightarrow Ca^{2+}+2OH^-$
碳酸盐沉淀	$Ca^{2+}+CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3(s)$
氧化钙直接碳酸化	$CaO(s)+H_2CO_3(aq) \rightarrow CaCO_3(s)+H_2O$

国内刘英金等人也曾采用直接湿法工艺对钢渣固定CO_2进行了探索[22]。通过正交实验得出了在水溶液中，影响钢渣中Ca浸出的因素有粒度、时间、温度和液固比，其中液固比的影响效果最大，而反应时间的影响最小。在浸出反应的最佳条件下，即采用280目钢渣、浸出温度为60℃、液固比为1000：1和反应时间72 h，Ca的浸出率仅可达23.81％。

直接碳酸化工艺虽然简单，但碳酸化反应在室温下进行较慢，Ca的浸出率不高，且由于反应条件苛刻，工业化前景并不太好，目前正在开展的研究已经较少。

3.2 间接碳酸化

对于采用天然矿石和固体废弃物进行间接碳酸化固定 CO_2，已有报道表明可采用的溶剂有盐酸、乙酸、氢氧化钠和盐类。但采用钢铁冶金废渣间接碳酸化固定 CO_2，相关报道不多。

Teir 等人和 Eloneva 等人分别采用间接湿法工艺以醋酸为介质来浸出钢渣和高炉渣，并固定 CO_2，同时制备轻质碳酸钙[9,21]。其工艺的基本原理和流程如图 2 所示。他们证实采用该工艺可以生产出轻质 $CaCO_3$，且废酸可以再生，但需要对溶液进行碱化以提高轻质 $CaCO_3$ 的产率。此外，对轻质 $CaCO_3$ 中其它离子如 Mg^{2+}、Al^{3+}、Fe^{3+}等的去除问题没有解决。因此，如何快速有效的从废渣中浸取出 Ca^{2+}，同时沉淀出高纯度的轻质 $CaCO_3$ 尚需进一步研究。

国内朱蓓蓉对利用醋酸来浸出钢渣中 Ca^{2+}也进行了探索，以对大气中 CO_2 进行固定。研究发现采用醋酸浸出，钢渣中 Ca^{2+}浸出率较高，可达到 83-85%，且适当提高反应温度和提高钢渣比表面积有利于提高钙离子的浸出率[23]。

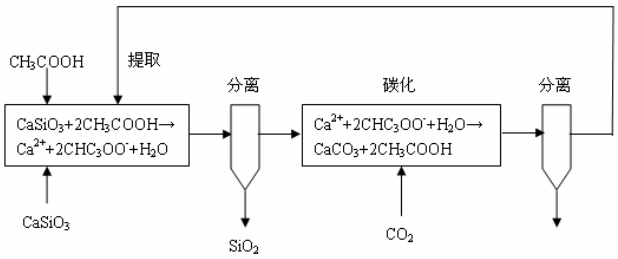

Figure 2. Indirect process for carbonating calcium silicates using acetic acid[21]
图 2. 采用醋酸碳酸化硅酸钙的间接法工艺[21]

Kodama 等人近来开发了一种 pH 值摆动矿物碳酸化工艺[24]，该工艺分为两个步骤，即（1）Ca 提取过程；（2）CO_2 吸附和 $CaCO_3$ 沉淀过程。其中第一步以氯化铵溶液为浸出剂浸出 Ca^{2+}，第二步通入 CO_2 进行碳酸化，同时可实现浸出剂氯化铵的再生。其化学反应式为：

$$4NH_4Cl(a)+2CaO\cdot SiO_2(s) \rightarrow 2CaCl_2(a)+SiO_2(s)\downarrow +4NH_3(a)+2H_2O(l) \quad (2)$$

$$4NH_3(a)+2CO_2(a)+2CaCl_2(a)+4H_2O(l) \rightarrow 2CaCO_3(s)\downarrow +4NH_4Cl(a) \quad (3)$$

由于含 CO_2 的废气中含有氮气等其它气体，溶液中的氨气和水蒸气将会随之溢出，可设置回收塔对氨气进行回收处理。采用该工艺，Ca 的提取率可达到 60%，且可得到纯度较高的 $CaCO_3$ 产品，工艺能耗约为 300kWh/t-CO_2。但其缺点在于钢渣破碎成本高，以及氨气的回收等问题。

采用钢铁冶炼废渣间接碳酸化的优势在于对钢铁冶炼废渣中Ca的提取率高，且反应速度快，浸出介质一般都可以循环再生，不会对环境产生二次污染等许多优势，还能生产出具有高附加值的轻质$CaCO_3$。采用钢渣固定CO_2工艺生产轻质$CaCO_3$不需要煅烧，和传统的轻质$CaCO_3$工艺相比，更具有优势。此外，间接碳酸化工艺的副产物钢渣浸出残渣，其中不再含有游离CaO，对于钢渣的后续利用也不会有不良影响。

4 结语

钢铁工业是我国 CO_2 排放的主要源头之一，同时冶炼工艺中排放大量废渣，采用钢铁冶炼废渣碳酸化固定 CO_2 具有废渣产生量大、价格便宜、距离 CO_2 排放源较近，以及产物不会造成二次污染等许多优势，尤其是采用间接碳酸化工艺固定 CO_2，还可以生产出

具有高附加值的轻质 $CaCO_3$，具有较好的发展前景。

References (参考文献)

[1] Li Guangqiang, Zhu Chengyi. Environmental protection and energy saving from ironmaking and steelmaking industry [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.146-150(Ch).
李光强, 朱诚意. 钢铁冶金的环保与节能[M]. 北京：冶金工业出版社，2010. 146-150.

[2] Sha Gaoyuan, Liu Yinghao, Yin Ruiyu, et al. The current status and the countermeasures of energy saving and CO_2 reduction in steel industry [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2008, 27 (1), P3-5, 18(Ch).
沙高原,刘颖昊,殷瑞钰等.钢铁工业节能与 CO_2 排放的现状及对策分析[J].冶金能源,2008,27 (1), P3-5,18.

[3] Seifritz W. CO_2 disposal by means of silicates [J]. Nature, 1990, 345, P486.

[4] Lackner K S, Wendt C H, Butt D P, et al. Carbon dioxide disposal in carbonate minerals [J]. Energy, 1995, 20(11), P1153-1170.

[5] Mazzotti M, Abanades J C, Allam R, *et al*. Mineral carbonation and industrial uses of carbon dioxide[M].// Metz B, Davidson O, De Coninck H, et al. Eds. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 319-338.

[6] Kakizawa M, Yamasaki A, Yanagisawa Y. A new CO_2 disposal process via artificial weathering of calcium silicate accelerated by acetic acid [J]. Energy, 2001, 26, P341-354.

[7] Bonenfant D, Kharoune L, Sauve S, *et al*. CO_2 sequestration potential of steel slags at ambient pressure and temperature[J]. Ind. Eng. Chem. Res. , 2008, 47, P7610-7616.

[8] Takahashi T, Yabuta K. New applications for iron and steelmaking slag [J]. NKK Technical review, 2002, 87, P38-44.

[9] Eloneva S, Teir S, Salminen J, et al. Fixation of CO_2 by carbonating calcium derived from blast furnace slag [J]. Energy, 2008, 33, P1461-1467.

[10] Rendek E, Ducom G, Germain P. Carbon dioxide sequestration in municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, B128, P73-79.

[11] Huijgen W J J, Witkamp G J, Comans R N J. Mineral CO_2 sequestration by steel slag carbonation [J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39, P9676-9682.

[12] Xu Jun，Zhang Junying，Pan Xia，et al. Carbon dioxide sequestration as mineral carbonates [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2006, 57(10), P2455-2458(Ch).
徐俊,张军营,潘霞等.矿物碳酸化隔离实验初探.化工学报,2006,57(10), P2455-2458.

[13] Lekakh S N, Rawlins C H, Robertson D G C, et al. Kinetics of aqueous leaching and carbonization of steelmaking slag [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2008, 39B(2), P125-134.

[14] He Huanyu, Ni Hongwei, Gan Wangui, et al. Sulfur's existence form and sulf-phase forming mechanism in solidified refining slag[J]. Iron and Steel, 2009, 44(3), P32-35(Ch).
何环宇,倪红卫,甘万贵,等.精炼钢渣硫赋存形式及含硫相形成机理[J].钢铁, 2009,44(3), P32-35.

[15] Shen H, Forssberg E, Nordstrom U. Physicochemical and mineralogical properties of stainless steel slags oriented to metal recovery [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2004, 40, P245-271.

[16] Li Fengxi, Li Juzhong, Xiao Zhongmin, et al. Production application of KR desulphurization at No.2 SMP of WISCO[J]. Steelmaking, 2005, 21(5), P1-4, 53(Ch).
李凤喜, 李具中, 萧忠敏, 等.武钢二炼钢KR铁水脱硫生产实践[J]. 炼钢, 2005, 21(5), P1-4,53.

[17] Dong Xiaodan. Preliminary experiments on fast absorption of CO_2 by steel slag of converter [J]. Steelmaking, 2008, 24(5), P29-32 (Ch).
董晓丹.转炉钢渣快速吸收二氧化碳试验初探[J]. 炼钢, 2008, 24(5), P29-32.

[18] Huijgen W J J, Comans R N J. Carbonation of steel slag for CO_2 sequestration: Leaching of products and reaction mechanisms [J]. Environ. Sci. Technol. 2006, 40, P2790-2796.

[19] Huijgen W J J, Comans R N J, Witkamp G J. Cost evaluation of CO_2 sequestration by aqueous mineral carbonation[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48, P1923-1935.

[20] Lekakh S N, Robertson D G C, Rawlins C H, et al. Investigation of a two-stage aqueous reactor design for carbon dioxide sequestration using steelmaking slag [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2008, 39B (6), P484-492.

[21] Teir S, Eloneva S, Fogelholm C J. Dissolution of steelmaking slags in acetic acid for precipitated calcium carbonate production [J]. Energy, 2007, 32(4), P528-539.

[22] Liu Yingjin, Song Bo, Mao Jinghong, et al. Experimental research on Ca leaching from steelmaking slag [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2008, 26(s), P95-97(Ch).
刘英金, 宋波, 毛璟红，等.钢渣中钙浸出的实验研究[J].中国稀土学报, 2008, 26(s), P95-97.

[23] Zhu Beirong , Yang Quanbing , Yao Dongwan, et al. Study on Extraction of Calcium from Steel Slag with Acetic Acid[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(10), P1375-1378(Ch).
朱蓓蓉, 杨全兵, 姚冬晚, 等.利用醋酸提取钢渣中的钙离子[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(10), P1375-1378.

[24] Kodama S, Nishimoto T, Yamamoto N, et al. Development of a new pH-swing CO_2 mineralization process with a recyclable reaction solution [J]. Energy, 2008, 33, P776-784.

978-1-935068-37-2 © 2010 SciRes.