

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.02.011

气淬法粒化高炉渣实验研究

康月¹, 刘超², 张玉柱^{1,2}, 姜茂发¹

(1. 东北大学冶金学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北唐山 063009)

摘要: 为了有效利用高炉渣余热, 提高炉渣附加值, 采用干式处理方法——气淬法, 对高炉渣进行粒化, 研究碱度和喷吹气体压力对成珠率、渣珠平均直径和粒径分布的影响规律。结果表明: 成珠率随碱度的增加呈先增加后降低的趋势, 碱度 1.2 时获得最高成珠率; 渣珠的平均直径随碱度的增加先减小后增大, 碱度超过 1.2 后, 平均粒径显著增大; 随喷吹压力的增加, 成珠率呈先增加后减小之后又增加的趋势, 压力为 0.2 MPa 时成珠率最高; 渣珠平均直径基本呈逐渐减小趋势并且减小趋势变缓; 渣珠粒径集中分布在 1~2.5 mm 之间, 基本呈正态分布, 分布较均匀。

关键词: 气淬; 高炉渣; 碱度; 喷吹压力; 成珠率; 平均直径

中图分类号: TF 526 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2020)02-0212-05

Experimental Study on Granulation of Blast Furnace Slag by Gas Quenching

KANG Yue¹, LIU Chao², ZHANG Yu-zhu^{1,2}, JIANG Mao-fa¹

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China. Corresponding author: LIU Chao, E-mail: dbdxc@126.com)

Abstract: To effectively utilize waste heat from blast furnace slag (BFS) and increase the additional value of slag, the BFS is granulated using the dry treatment (gas quenching) method. The effects of basicity and nozzle pressure on bead formation rate, mean diameter and particle size distribution of slag beads are studied. The results show that with the increases of basicity, the bead formation rate firstly increases up to the highest rate at the basicity of 1.2 and then decreases. The mean diameter firstly decreases and then increases with the basicity, especially, when the basicity is over 1.2. With the nozzle pressure increasing, the bead formation rate firstly increases, followed by a drop and then raise again. The bead formation rate reaches the highest value at the pressure of 0.2 MPa. The mean diameter of the slag beads decreases gradually and the decreasing tendency slows down when the pressure is larger than 0.3 MPa. The particle size distribution of slag beads mainly ranges in 1~2.5 mm, satisfying the Gaussian distribution basically.

Key words: gas quenching; blast furnace slag; basicity; nozzle pressure; bead formation rate; mean diameter

高炉渣 (blast furnace slag, BFS) 是炼铁过程中产生的一种废渣。水淬法处理后的高炉水渣可以供给水泥厂作水泥替代料。但是该方法使用后的热水属于低品质热源^[1-3], 不能有效回收利用, 而且经过处理后的水渣用作水泥原料必须经过烘干, 又会耗费大量能量, 同时还会产生 H₂S 和 SO₂

等有害气体。干式粒化法能高效回收高炉渣余热, 不耗费新水, 也没有有害气体污染环境, 同时充分粒化后的高炉渣能够得到高附加值利用, 因而受到国内外钢铁企业的广泛关注^[4-6]。气淬高炉渣属于干法处理高炉渣, 该方法利用超音速空气射流将液态熔融渣破碎粒化, 通过渣粒与空气的热

收稿日期: 2019-07-25

基金项目: 河北省重点研发计划项目(19273806D)。

作者简介: 康月(1989-), 女, 河北衡水人, 东北大学博士研究生; 张玉柱(1956-), 男, 河北南皮人, 华北理工大学教授, 博士生导师; 姜茂发(1955-), 男, 山东栖霞人, 东北大学教授, 博士生导师。

交换回收高炉渣显热,具有处理量大、粒化效果好的特点,是一种具有前景的干式处理方法.用这种方法处理高炉渣,提高成珠率,使渣粒粒化更均匀,粒径更小,与空气接触的比表面积更大,余热回收量也就更多,而其中粒化工艺是关键.

对于干式粒化,国内外研究较多的主要是转杯法. Yoshinaga 等^[7]提出了一种干法造粒和凝固高炉熔渣的方法;实验表明,熔渣颗粒在空气流中以大约 100 °C/s 的速度冷却并在约 850 °C 时发生凝固. Wu 等^[8]研究了不同喷嘴结构对粒化的影响,并建立了预测液滴尺寸的关系式;但是,气淬法目前只停留在对钢渣的研究上. Long^[9]对气淬钢渣用作水泥原料进行了基础研究;与钢渣相比,

高炉渣酸度、黏度较高,易成纤,不易成珠.本文以提高高炉渣气淬成珠率及降低补热能耗为目标,解析高炉渣碱度和喷吹压力对气淬高炉渣成珠的影响机理,确定高炉渣最佳调质剂添加比例及气淬工艺参数,最终得到二者耦合作用下的最佳高炉渣气淬成珠效果.

1 实验原料和方法

1.1 实验原料

实验原料为唐山某钢铁厂的高炉渣(干渣),调质剂选用铁尾矿和钢渣,三者均为大宗固体废物.高炉渣和调质剂的主要化学成分见表 1.

表 1 高炉渣原料主要化学成分(质量分数)

Table 1 Compositions of blast furnace slag (mass fraction)

成分	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	FeO
高炉渣	33.53	36.25	8.64	15.82	1.57	1.38	0.54	0.32	0.17	
铁尾矿	67.32	1.82	2.66	12.48	0.36	4.59	2.54			
钢渣	15.38	40.30	9.05	2.54					1.88	14.06

注:高炉渣碱度 $R_{\text{BFS}} = w_{\text{CaO}}/w_{\text{SiO}_2} = 1.1$.

1.2 实验方案

实验炉渣倾倒温度 1 600 °C,喷嘴孔径 3 mm,流槽的流孔孔径 10 mm,采用表 2 实验方案探究不同碱度 R_{BFS} 对粒化效果的影响.选用碱度为 1.2 的炉渣,喷吹压力分别为 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 和 0.35 MPa,对高炉渣进行喷吹,探究不同气淬压力对粒化效果的影响.

表 2 不同碱度高炉渣和调质剂配比(质量分数)

Table 2 Proportion of tempering agent and blast furnace slag with different basicities (mass fraction)

R_{BFS}	高炉渣	铁尾矿	钢渣
0.8	84.66	15.34	
0.9	90.63	9.37	
1.0	99.96	0.04	
1.1	100.0		
1.2	84.57		15.43
1.3	73.45		26.55

1.3 实验设备与方法

高炉渣气淬系统主要分为加热、喷吹和余热回收三部分,实验系统如图 1 所示.

实验时,调质后的高炉渣由直流电弧炉出料口缓慢流出,拉瓦尔喷嘴喷吹的空气流与渣流方向垂直,通过气液两相流的相互作用对熔渣进行破碎粒化;破碎后的渣滴在空气流和自身表面张

力的作用下收缩成球,并随空气流一同进入冷渣器进行热量交换,同时在飞行过程中冷却至完全凝固;凝固后的渣粒通过气流的喷吹从冷渣机尾部排渣口排出;最后收集和测量渣珠.熔渣温度用快速测温热电偶测量,并在显示器上显示.在研究某一因素对粒化的影响时,保持其他因素不变.气淬高炉渣实验现场如图 2 所示.

2 实验结果与分析

2.1 熔渣碱度对粒化效果的影响

2.1.1 熔渣碱度对成珠率的影响

实验设定:原料 30 kg,出渣温度 1 600 °C,喷嘴压力 0.2 MPa,拉瓦尔喷嘴出口马赫数 1.6,冷渣器转速 5.5 r/min.对高炉渣进行粒化,并对渣珠粒度进行筛选,实验结果如图 3 所示.

按照表 2 中实验方案进行高炉熔渣气淬实验,通过图 3 可以看出,当高炉渣碱度由 0.8 升高到 1.2 时,成珠率随碱度的增加呈逐渐增加的趋势,由 42.11% 增加到 86.33%;当高炉渣碱度继续升高到 1.3,成珠率呈现降低趋势,由 86.33% 降低至 84.47%.综合高炉渣碱度对成珠率的影响,当高炉渣碱度为 1.2 时,成珠率最高,为 86.33%,显著提高了气淬高炉渣的成珠率.

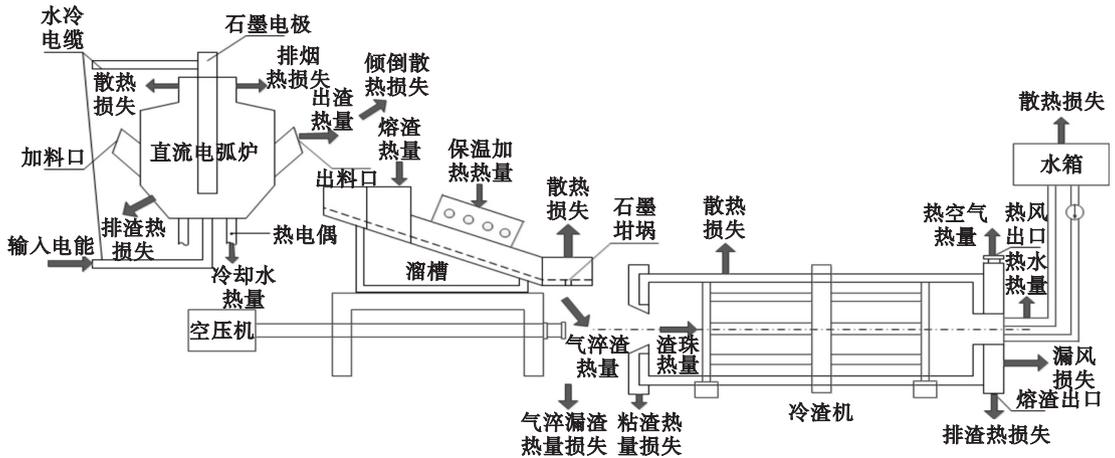


图 1 气淬实验流程图

Fig. 1 Schematic of gas quenching experiment

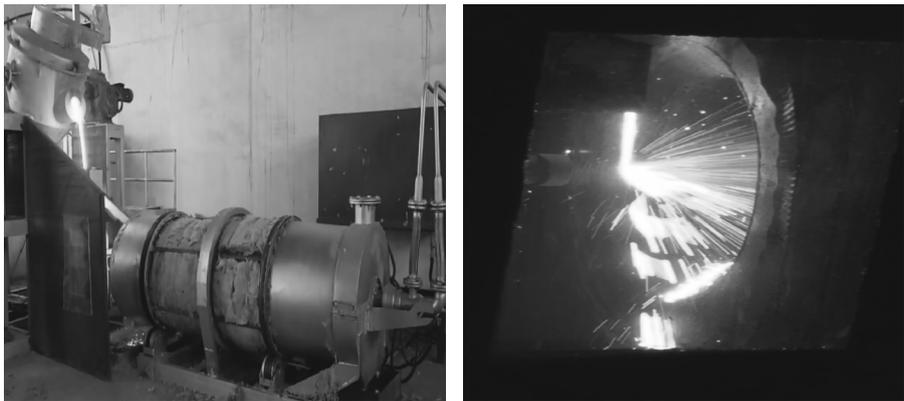


图 2 气淬高炉渣实验现场

Fig. 2 Experiment site of gas quenching for blast furnace slag

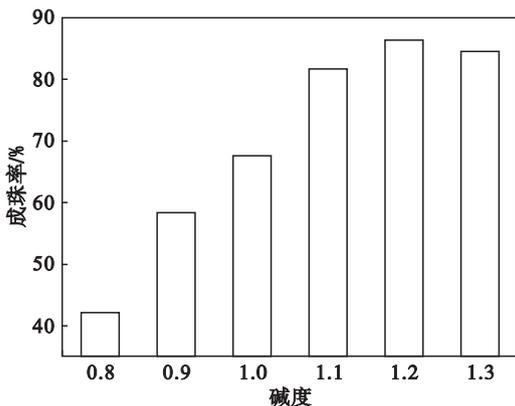


图 3 不同碱度下高炉渣成珠率

Fig. 3 Bead formation rate of blast furnace slag with different basicities

2.1.2 熔渣碱度对粒径分布和平均直径的影响

用方孔筛 (GB/T6003.1—1997) 筛分渣珠, 确定其粒径分布. 由图 4 可以看出, 粒化的渣珠粒径主要分布在 1 ~ 2.5 mm 之间, 基本呈正态分布, 分布较均匀. 碱度的增加有利于气淬出直径较小的渣珠, 纤维数量逐渐减少. 渣珠平均直径随碱

度增加呈先减小后增加的趋势. 综合来看, 碱度为 1.2 时, 不但可以获得最高成珠率, 同时渣珠平均直径也较小, 因此最佳粒化高炉渣碱度为 1.2. 这主要是因为碱度在 0.8 ~ 1.1 区间, 碱度越小, 熔渣黏度越大, 离子之间越不容易发生扩散, 因此熔渣不易发生破碎; 而在碱度相对较大的熔渣中由于 Ca^{2+} 的增加, 其最外层的两个价电子很容易被硅原子夺走, 形成硅氧离子, 解聚能力增强, 从而使得熔渣中 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 复杂阴离子团发生解体, 破坏了其内部稳定的网状结构和链状结构, 使得熔渣易破碎, 增加了成珠率. 碱度继续增加到 1.3, 成珠率反而有一定程度下降, 主要是因为碱度过大, 使熔渣黏度剧增的临界温度也会显著升高, 在喷吹降温过程中熔渣温度一旦低于该温度, 液相渣中就会出现固相结晶颗粒, 破坏熔渣均一性, 使熔渣流动性减弱, 即黏度增加, 同时产生的大粒径渣块数量也随之上升, 增加了渣珠的平均直径.

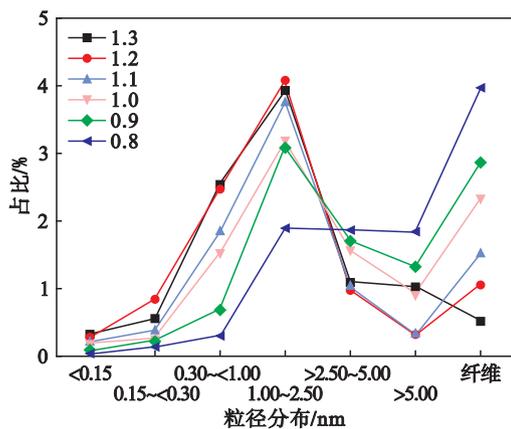
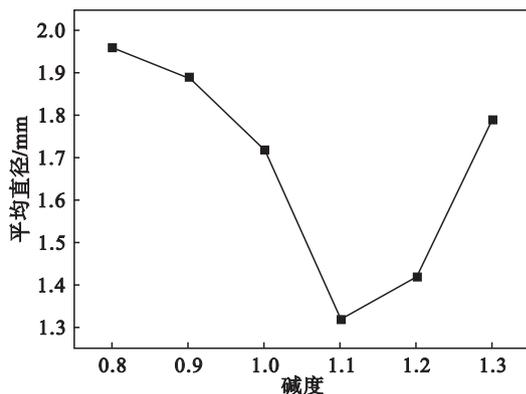


图 4 熔渣碱度对渣珠粒径分布和平均直径的影响

Fig. 4 Effect of basicity on particle diameter distribution and mean diameter



2.2 喷嘴气体压力对粒化效果的影响

2.2.1 喷嘴气体压力对成珠率的影响

采用拉瓦尔喷嘴气淬粒化高炉渣主要利用喷嘴出口处强大的气流将液态渣流吹散、破碎成渣珠,气流动能大小对渣珠的粒化起决定性作用.气流动能由喷嘴出口气体压力决定,因此通过实验对喷嘴出口气体压力进行研究.实验设定:原料 30 kg,碱度 1.2,出渣温度 1 600 °C,喷嘴出口马赫数 1.6,冷渣器转速为 5.5 r/min.对高炉渣进行粒化,并对渣珠粒度进行筛选,实验结果见图 5.

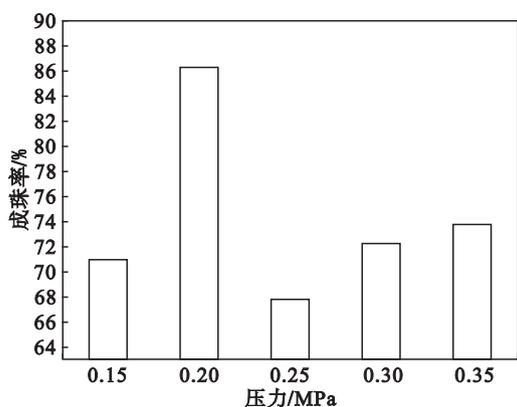


图 5 气体压力对成珠率的影响

Fig. 5 Effect of pressure on bead formation rate

由图 5 可知,随着气体压力的增加成珠率先增加后降低之后又呈逐渐增加趋势,但增加趋势减缓.压力为 0.2 MPa 时,成珠率最高为 86.33%,压力继续增加到 0.25 MPa 后,成珠率会显著降低.这主要是因为气体压力越大,气体流速越大,产生的动能就越大,作用于熔渣的剪切应力也越大,对熔渣的粒化能力也就越强.高炉熔渣按其结构特征在剪切应力的作用下被首先破碎成圆柱状液丝,液丝在自身黏性力和表面张力作用下

继续破碎成液滴;但当气体流速大到一定程度后,对熔渣的冷却能力提高,液渣拉伸形成液丝后与空气热交换加快,从而完全凝固形成了纤维,显著降低了成珠率.再继续增加压力,喷嘴流速增加,气流形成湍流,熔渣破碎力进一步增强,粒径进一步减小,从而使液滴迅速凝固,阻止液滴进一步破碎的阻力增大,则液滴的二次破碎能力减弱,成珠率的增加趋势也随之减缓.其次根据气体动力学原理,喷嘴出口气体流速 v 与喷吹压力之间关系式为

$$v = \sqrt{\frac{2gKRT_0 \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]}{K-1}} \quad (1)$$

式中: g 为重力加速度; R 为气体常数, $R = 29.27 \text{ m}^2/\text{K}$; K 为压容比, $K = c_p/c_v$, 对空气而言, $K = 1.4$; T_0 为压缩气体进入喷嘴前温度, K ; p_1 为大气压力,取 0.1 MPa; p_2 为喷嘴出口压力, MPa.

令 $k = gK$, 则式(1)可简化为

$$v = 773.5 \times (1 - 0.5p_2^{-0.29})^{1/2} \quad (2)$$

可以看出,喷嘴流速随压力的增加呈非线性增长,压力增大到一定程度后,速度的变化开始变缓,不会对粒化效果产生显著影响,反而会增加能耗,所以喷吹压力不宜过大.

2.2.2 喷嘴气体压力对渣珠粒径分布和平均直径的影响

图 6 为不同气体流速对渣珠粒径分布的影响.可以看出,不同气体流速所吹出的渣粒粒径均集中分布在 1 ~ 2.5 mm 之间,粒径分布比较均匀,并且基本符合正态分布,而且小粒径渣珠数量随压力的增加而增加,平均直径随压力的增加逐渐减小,但减小趋势逐渐减缓.

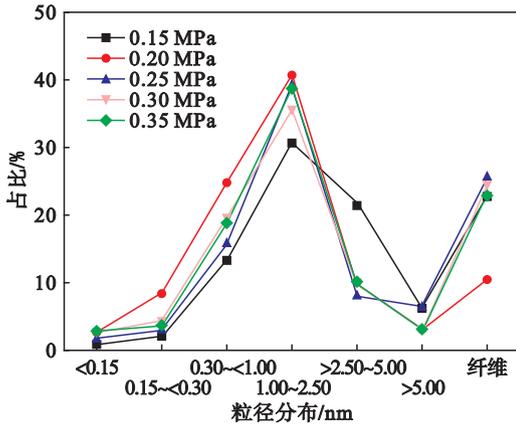


图 6 气体压力对渣珠粒径分布和平均直径的影响

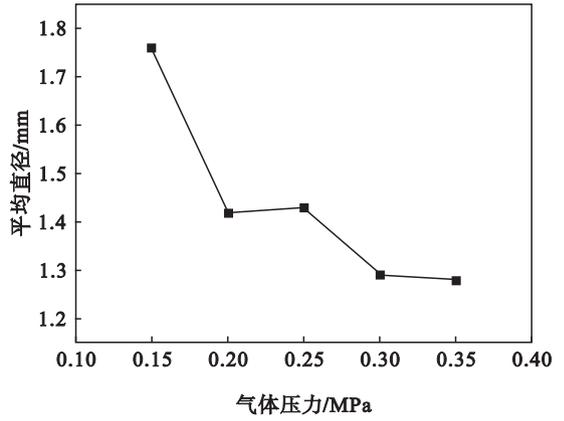


Fig. 6 Effect of pressure on the diameter distribution and mean diameter of slag beads

由图 7 可以看出,在不同气体压力下可以获得粒径分布均匀的渣珠. 气体压力较小时,渣珠粒径较大,渣粒成黑色椭球状;当气体压力增加时,渣粒粒径显著减小,粒径更均匀,形状也更趋于规则. 这说明随着气体压力的增加,高炉渣粒化更充

分,能够产生更多粒径较小的渣珠,增加了渣珠凝固速度,加快了渣珠与周围环境的换热速率;同时,形状规则的渣珠增大了与空气的接触面积,更有利于高炉渣余热的回收.

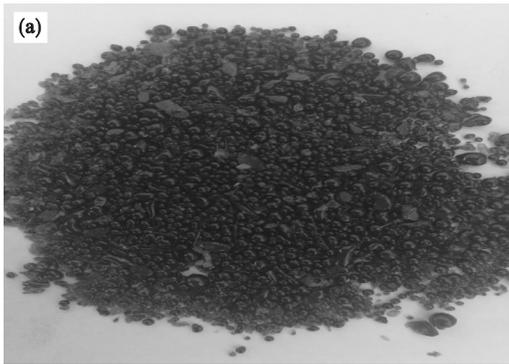


图 7 不同气体压力下气淬高炉渣珠图片

Fig. 7 Images of slag beads obtained from gas quenching with different gas pressure

(a)—0.15 MPa; (b)—0.20 MPa.

3 结 论

1) 随着高炉渣碱度的增加,成珠率先增加后降低,同时可有效减小渣珠平均直径. 碱度为 1.2 时,成珠率提高至 86.33%;但当碱度超过 1.2 时,粒径有增大趋势,且成珠率也开始下降.

2) 渣珠的平均直径随喷吹压力的增加逐渐减小,成珠率呈先增加后降低又增加的趋势,但增幅减缓,压力为 0.2 MPa 时获得最高成珠率.

3) 渣珠粒径集中分布在 1 ~ 2.5 mm 之间,基本呈正态分布,分布较均匀.

参考文献:

[1] Chang Q, Li X, Ni H, et al. Modeling on dry centrifugal granulation process of molten blast furnace slag [J]. *Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan*, 2015, 55

(7):1361-1366.
 [2] Zhou Y M, Li C, Xu L L, et al. The experimental study of molten blast slag dry granulation [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 356/357/358/359/360:1882-1885.
 [3] Shen H T, Forssberg E. An overview of recovery of metals from slag [J]. *Waste Management*, 2003, 23(4):933-949.
 [4] Bisio G. Energy recovery from molten slag and exploitation of the recovered energy [J]. *Energy*, 1997, 22(5):501-509.
 [5] Maruoka N, Mizuuchi T, Purwanto H, et al. Feasibility study for recovering waste heat in the steelmaking industry using a chemical recuperator [J]. *ISIJ International*, 2004, 44(2):257-262.
 [6] Shimada T, Kochura V, Akiyama T, et al. Effects of slag compositions on the rate of methane steam reaction [J]. *ISIJ International*, 2001, 41(2):111-115.
 [7] Yoshinaga M, Fujii K, Shigematsu T, et al. Method of dry granulation and solidification of molten blast furnace slag [J]. *Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan*, 1982, 22(11):823-829.
 [8] Wu J J, Wang H, Zhu X, et al. Cold experiment of slag centrifugal granulation by rotary atomizer: effect of atomizer configuration [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 111:1557-1564.
 [9] Long Y. The basic study on the preparation of steel slag cement with gas quenching steel slag [J]. *Open Materials Science Journal*, 2011, 5(1):72-77.