

热压铁焦对高炉综合炉料熔滴性能的影响

王宏涛,储满生,赵伟,柳政根
(东北大学 冶金学院,辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 利用荷重还原软化熔融滴落实验研究了热压铁焦添加量对高炉综合炉料滴落性能的影响. 研究表明,随着热压铁焦配比的增加,综合炉料软化区间逐渐加宽,从 206.3 ℃ 增加到 218.9 ℃,熔化区间逐渐收窄,从 171.1 ℃ 降低到 124.8 ℃,软熔带逐渐变窄且位置下移,综合炉料滴落压差下降,滴落率先升高后降低,在热压铁焦配比为 30% 时达到较高值 40.58%,综合炉料熔滴总特征值逐渐降低,料层透气性改善. 一定量的热压铁焦有助于改善综合炉料熔滴性能,其适宜添加量在 30% 左右.

关 键 词: 热压铁焦; 熔滴性能; 综合炉料; CO₂ 减排; 高炉炼铁

中图分类号: TF 526.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)08-1108-05

Effect of Iron Coke Hot Briquette on Softening-Melting and Dripping Properties of Blast Furnace Mixed Burden

WANG Hong-tao , CHU Man-sheng , ZHAO Wei , LIU Zheng-gen
(School of Metallurgy , Northeastern University , Shenyang 110819 , China. Corresponding author : CHU Man-sheng , E-mail : chums@smm.neu.edu.cn)

Abstract : Through the experiment of softening-melting and dripping of iron ore with load reduction , the effect of iron coke hot briquette (ICHB) on softening-melting and dripping properties of blast furnace mixed burden was investigated. The results show that , with the increase of ICHB adding ratio , the softening temperature range is increased from 206.3 ℃ to 218.9 ℃ , while the melting temperature range is decreased from 171.1 ℃ to 124.8 ℃ . The cohesive zone becomes narrower and tends to move downwards. Besides , the dripping pressure drop is decreased. The dripping ratio is increased first and then decreases , the superior value of which is 40.58% when the ICHB ratio is 30% . In addition , S-value is decreased , which indicates that the permeability of mixed burden is improved. Therefore , a certain amount of ICHB is beneficial for improving softening-melting and dripping properties of mixed burden and the appropriate adding ratio of ICHB is about 30% .

Key words : iron coke hot briquette (ICHB); softening-melting and dripping property ; mixed burden ; CO₂ emission reduction ; blast furnace ironmaking

中国钢铁工业作为国民经济和社会发展的支柱产业之一,其 CO₂ 排放量占全球 CO₂ 排放总量的 5% ~ 7%^[1], 占有所有工业 CO₂ 排放的 15% 左右^[2]. 在今后相当长一段时期内,钢铁生产主要以高炉-转炉流程为主,其中约有 70% 的能耗和 CO₂ 排放来自高炉炼铁工序^[3]. 因此,高炉炼铁是钢铁工业节能降耗和减少 CO₂ 排放的主要环节.

目前,高炉炼铁 CO₂ 减排技术研究主要集中在

于炉顶煤气循环^[4]、富氢气体喷吹^[5-6]和含碳复合炉料使用^[7-9]等. 铁焦是一种新型含碳复合炉料. Naito 等^[10]研究表明,高炉使用铁焦可降低热空区温度,提高反应效率,降低燃料比,减少 CO₂ 排放. Nomura 等^[11]研究了铁焦的气化溶损反应以及在高炉中的反应行为. 结果表明,与焦炭相比,铁焦气化反应的开始温度低. 然而,目前关于热压铁焦(ICHB)对高炉综合炉料熔滴性能的影响

响及其适宜的添加比例的研究未见报道. 本文研究了热压铁焦对高炉综合炉料熔滴性能的影响, 考察了热压铁焦对综合炉料熔滴性能的作用规律并进行了机理探讨, 得到了合适的热压铁焦添加量, 以期铁焦的实际应用提供理论依据.

1 实 验

1.1 实验原料

实验原料包括热压铁焦、烧结矿和球团矿. 烧结矿化学组成(质量分数%)为: TFe 56.21, FeO 11.41, SiO₂ 5.5, CaO 12, MgO 2.52, Al₂O₃ 0.95. 球团矿化学组成(质量分数%)为: TFe 65.48, FeO 0.48, SiO₂ 5.81, CaO 0.3, MgO 0.05, Al₂O₃ 0.36. 热压铁焦由铁矿粉、烟煤和无烟煤制成, 其中铁矿粉化学组成(质量分数%)为: TFe 66.69, FeO 26.40, SiO₂ 5.31, CaO 0.18, MgO 1.8, Al₂O₃ 0.31, S 0.05, P 0.02; 烟煤固定碳为 61.52%, 灰分为 8.75%, 挥发分为 28.25%; 无烟煤固定碳为 80.63%, 灰分为 9.25%, 挥发分为 8.81%. 热压铁焦的制备流程为: 将 65% 烟煤、20% 无烟煤以及 15% 铁矿粉干燥、破碎后混合, 然后将混合物加入到热压模具中, 并将模具置于加热炉中, 当料温达到 300℃ 时, 立即取出模具置于热压系统中, 将混合物压制成型, 最后将成型物置于高温炉中在 1 000℃ 下炭化 4 h, 炭化后冷却得到椭球形热压铁焦. 热压铁焦尺寸为 16 mm × 14 mm × 12 mm, 其化学组成(质量分数%)为: 固定碳 74.87, 灰分 9.52, 全磷 0.02, 全硫 0.24, 金属铁 11.1, 全铁 14.66. 热压铁焦抗压强度达 5 048.50 N.

1.2 实验方案

根据高炉冶炼实际原则, 在保持终渣碱度基本不变的条件下, 按热压铁焦和焦炭中的固定碳含量计算热压铁焦添加量(质量分数, 下同), 焦比取 380 kg/t. 热压铁焦添加量有 0, 10%, 20%, 30% 和 40%, 对应编号分别为 1[#], 2[#], 3[#], 4[#] 和 5[#]. 实验过程中, 烧结矿 350 g, 球团矿 150 g. 装料时, 热压铁焦、烧结矿和球团矿混合均匀.

实验时, 含铁炉料装入内径为 75 mm 的石墨坩埚, 其粒度范围为 10 ~ 12.5 mm. 炉料上下铺设焦炭, 上、下层焦炭粒度分别为 5 ~ 8 mm, 8 ~ 10 mm. 石墨坩埚下部有直径约为 8 mm 的滴落孔. 装料完成后, 将坩埚置于电炉恒温段进行实验. 熔滴实验条件模拟实际高炉温度和气氛^[12]. 由于直接观察实验过程较为困难, 因此引入一些

参数来表征实验结果^[12]. t_4 和 t_{40} 分别表示炉料收缩率达到 4% 和 40% 时对应的温度; t_s 和 t_D 分别表示料柱压差陡增温度(熔化开始温度)和滴落温度; $t_{40} - t_4$, $t_D - t_s$ 分别表示软化区间和熔化区间(软熔带); 滴落率为滴落渣和滴落铁总质量占含铁炉料理论可滴落总质量的百分数; 滴落压差是滴落温度 t_D 对应的压差. 这些参数均可由熔滴实验计算机控制系统自动读取.

2 实验结果与讨论

2.1 综合炉料软化性能

图 1 是热压铁焦对比综合炉料软化性能的影响. 随着热压铁焦配比增加, 软化开始温度 t_4 从 1 103.9℃ 降低至 1 053.0℃, 软化终了温度 t_{40} 从 1 310.2℃ 降低到 1 271.9℃, 软化区间 $t_{40} - t_4$ 从 206.3℃ 增加到 218.9℃.

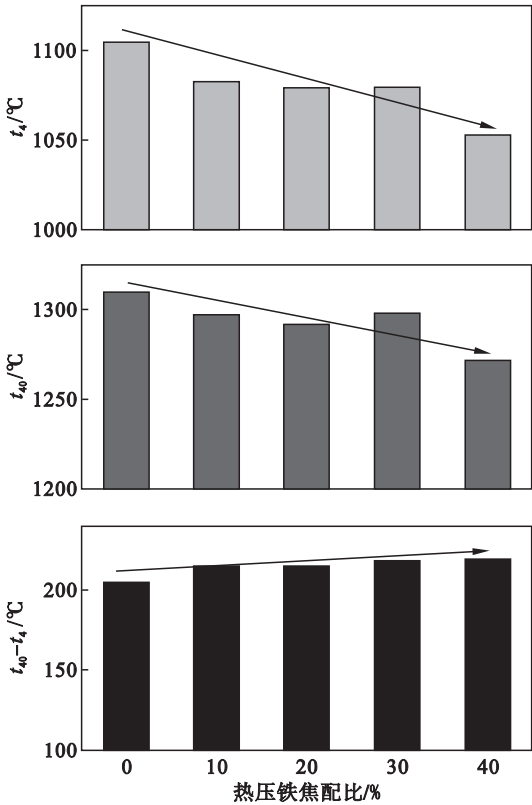


图 1 热压铁焦对比综合炉料软化性能的影响
Fig. 1 Effect of ICHB addition ratio on softening property of mixed burden

综合炉料软化性能主要取决于进入软熔带前炉料中 FeO 含量. 在综合炉料配比不变的情况下, 进入软熔带前炉料中 FeO 含量与炉料的还原程度有关. 对于综合炉料的软化开始温度 t_4 和软化终了温度 t_{40} , 随着热压铁焦配比增加, 气相中 CO 浓度增加, 有利于含铁炉料的还原, 且还原加

快,软化开始温度和软化终了温度均降低,而当炉料的收缩率达到 40% 时,炉料中的 FeO 部分被还原为金属铁,金属铁质量增加,渣中低熔点物质减少,导致软化终了温度下降幅度变缓.与之相比,软化开始温度 t_4 下降得更多,因此炉料软化区间 $t_{40} - t_4$ 逐渐变宽.

2.2 综合炉料熔化性能

热压铁焦对比对综合炉料熔化性能的影响如图 2 所示.随着热压铁焦配比的增加,熔化开始温度 t_s 从 1 281.0 ℃ 增加至 1 299.0 ℃,滴落温度 t_D 由 1 452.1 ℃ 降低到 1 427.4 ℃,熔化区间 $t_D - t_s$ 从 171.1 ℃ 降低到 124.8 ℃.图 3 是热压铁焦对比对软熔带位置的影响.随着热压铁焦配比增加,软熔带收窄,位置下移,有利于高炉冶炼.

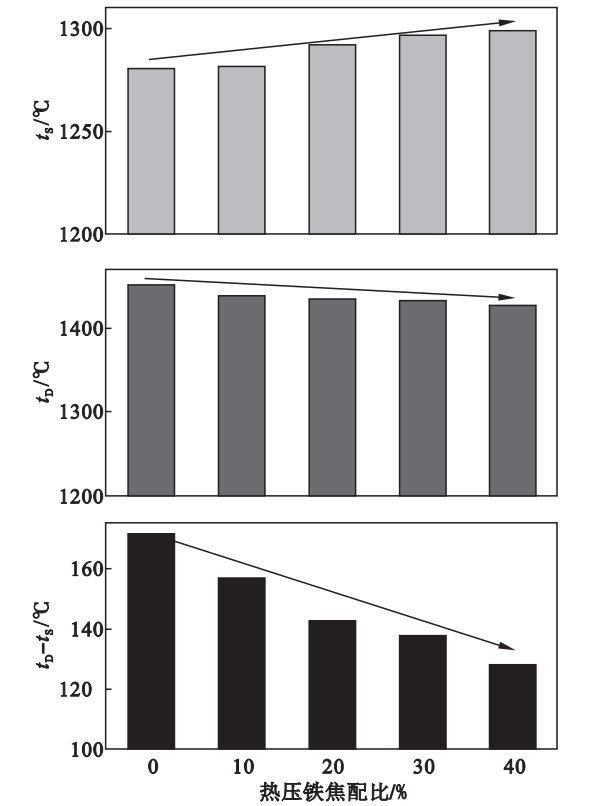


图 2 热压铁焦对比对综合炉料熔化性能的影响
Fig. 2 Effect of ICHB addition ratio on melting property of mixed burden

炉料的熔化开始温度 t_s 主要取决于综合炉料的炉渣熔点,当炉料配比一定的情况下,炉渣中 FeO 含量对炉渣的熔点具有重要影响.随着热压铁焦配比增加,炉料还原速度加快.当炉料温度达到 t_s 附近时,炉渣中的 FeO 逐渐被还原为金属铁,渣中 FeO 的含量降低.图 4 是 CaO - SiO₂ - FeO 三元相图,由相图可看出,当炉渣碱度不变时,随着渣中 FeO 含量降低时,炉渣熔点升高,进而熔化开始温度 t_s 逐渐升高.滴落温度 t_D 主要取

决于软熔滴落过程中较易滴落的相(初铁和初渣).图 5 是滴落物外部形貌,由图可以看出,滴落物中铁相在下方,渣相分布于铁相上方,且初铁量远多于初渣量,因此滴落温度 t_D 应取决于初铁相.随着热压铁焦配比增加,初铁的渗碳量逐渐增加.根据铁碳相图可知,综合炉料的滴落温度 t_D 逐渐降低. t_s 增加、 t_D 降低导致熔化区间 $t_D - t_s$ 逐渐变窄.

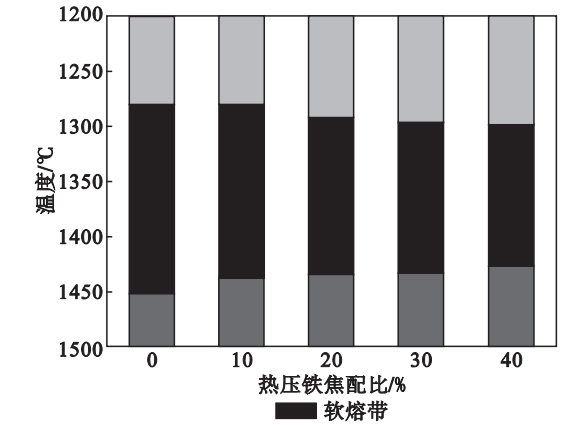


图 3 热压铁焦对比对综合炉料软熔带的影响
Fig. 3 Effect of ICHB addition ratio on the cohesive zone of mixed burden

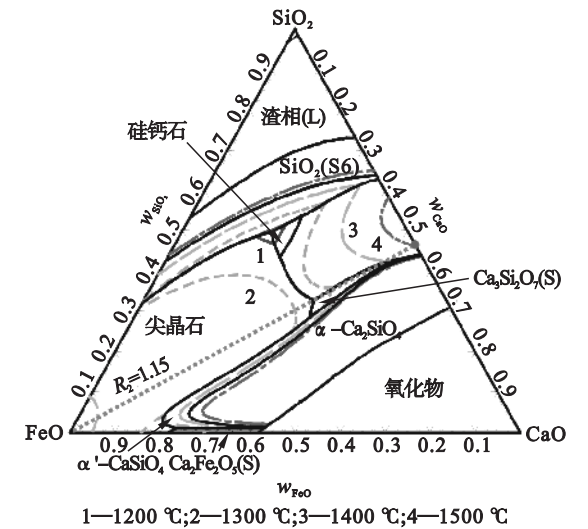


图 4 CaO - SiO₂ - FeO 三元相图
Fig. 4 Phase diagram of CaO-SiO₂-FeO

2.3 综合炉料滴落性能

热压铁焦对比对综合炉料滴落性能的影响如图 6 所示.随着热压铁焦配比增加,滴落压差逐渐下降,从 1.826 kPa 下降到 1.655 kPa.热压铁焦的加入改善了料层在滴落时的透气性;综合炉料的滴落率先升高后降低,在热压铁焦配比为 30% 时,滴落率达到较高值,为 40.58%.因此,热压铁焦对综合炉料的滴落性能有促进作用,但超过一定范围后促进作用减弱.

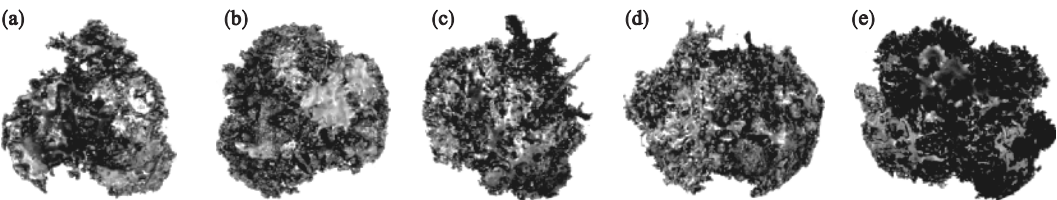


图 5 不同热压铁焦配比条件下综合炉料的滴落物形貌
Fig. 5 Morphology of dripping substance of mixed burden with different ICHB addition ratio
(a)—未添加铁焦 ; (b)—10% ICHB ; (c)—20% ICHB ; (d)—30% ICHB ; (e)—40% ICHB.

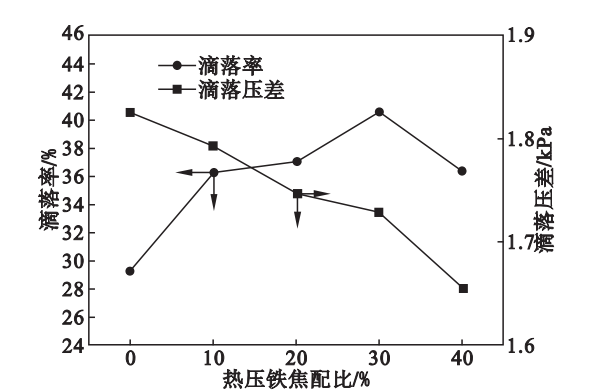


图 6 热压铁焦比对综合炉料滴落性能的影响
Fig. 6 Effect of ICHB addition ratio on dripping property of mixed burden

2.4 综合炉料透气性能

综合炉料熔滴性能总特征值 S 值越小,表示

料层透气性越好^[12]. 不同热压铁焦配比下,料层 S 值变化情况如图 7 所示. 随着热压铁焦配比的增加, S 值逐渐降低,综合炉料透气性能改善. 这主要是由于 ① 随着热压铁焦配比增加,气相 CO 浓度增加,有利于铁氧化物还原,在较低温度下铁氧化物能被还原成金属铁,而综合炉料在软化熔融滴落时的压差主要集中于软熔带,因此料层的透气性得到改善;② 随着热压铁焦配比增加,综合炉料软熔带逐渐收窄,料层压差明显降低(如图 7 所示),有利于改善综合炉料的透气性;③ 炉料在熔融状态时未反应完的铁焦能改善料层的透气性. 未滴落物的剖面如图 8 所示. 由图可以看出,当综合炉料达到软化熔融状态时,未反应完全的铁焦存在于未滴落物中,从而改善了料层的透气性,表现为综合炉料特征值 S 逐渐降低.

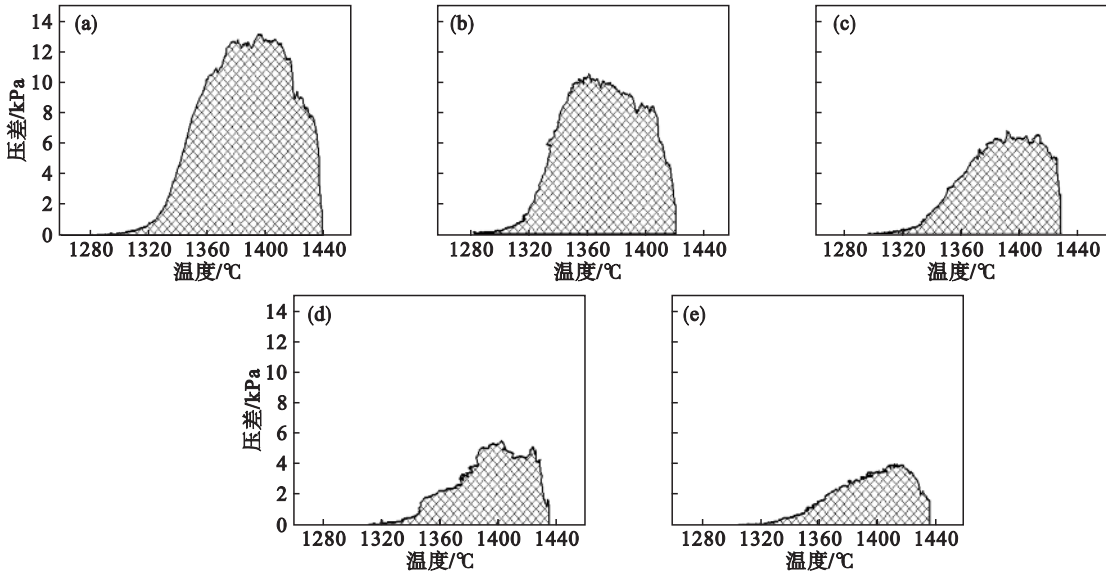


图 7 不同热压铁焦配比下综合炉料的 S 值
Fig. 7 S -value of mixed burden with different ICHB addition

(a)—未添加铁焦, $S = 1081.74 \text{ kPa} \cdot ^\circ\text{C}$; (b)—添加 10% ICHB, $S = 789.68 \text{ kPa} \cdot ^\circ\text{C}$; (c)—添加 20% ICHB, $S = 459.55 \text{ kPa} \cdot ^\circ\text{C}$; (d)—添加 30% ICHB, $S = 338.56 \text{ kPa} \cdot ^\circ\text{C}$; (e)—添加 40% ICHB, $S = 253.86 \text{ kPa} \cdot ^\circ\text{C}$.

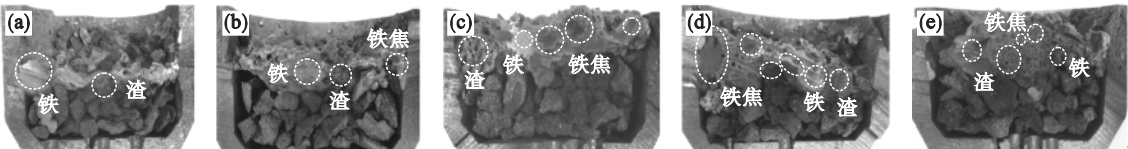


图 8 熔滴实验未滴落物剖面图
Fig. 8 Profile of residual substance of every softening-melting and dripping test
(a)—未添加铁焦 ; (b)—10% ICHB ; (c)—20% ICHB ; (d)—30% ICHB ; (e)—40% ICHB.

3 结 论

1) 随着热压铁焦配比增加 ,软化开始温度 t_4 逐渐降低 ,从 1 103.9 ℃降低至 1 053.0 ℃ ;软化终了温度 t_{40} 从 1 310.2 ℃降低到 1 271.9 ℃ ;软化区间 $t_{40} - t_4$ 逐渐变宽 ,从 206.3 ℃ 增加到 218.9 ℃.

2) 随着热压铁焦配比增加 ,熔化开始温度 t_s 逐渐增加 ,从 1 281.0 ℃增加至 1 299.0 ℃ ;滴落温度 t_D 逐渐下降 ,即从 1 452.1 ℃ 下降至 1 427.4 ℃ ;软化区间 $t_D - t_s$ 逐渐收窄 ,从 171.1 ℃降低到 124.8 ℃ ,综合炉料软熔带逐渐变窄.

3) 随着热压铁焦配比增加 ,炉料滴落压差下降 ,滴落率先升高后降低 ,在热压铁焦配比为 30% 时达到较高值 40.58% ;S 值逐渐降低 ,料层透气性改善. 综合考虑炉料的熔滴性能 ,热压铁焦适宜的添加量在 30% 左右.

参考文献 :

[1] Wang C ,Ryman C ,Dahl J. Potential CO₂ emission reduction for BF-BOF steelmaking based on optimized use of ferrous burden materials[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2009 ,3(1) :29 – 38.

[2] 储满生 ,王宏涛 ,柳政根 ,等. 高炉炼铁过程数学模拟的研究进展[J]. 钢铁 2014 ,49(11) :1 – 8.

(Chu Man-sheng ,Wang Hong-tao ,Liu Zheng-gen ,et al. Research progress on mathematical modeling of blast furnace ironmaking process[J]. *Iron and Steel* ,2014 ,49(11) :1 – 8.)

[3] 徐匡迪. 低碳经济与钢铁工业[J]. 钢铁 ,2010 ,45(3) :1 – 12.

(Xu Kuang-di. Low carbon economy and iron and steel industry[J]. *Iron and Steel* 2010 ,45(3) :1 – 12.)

[4] Chu M ,Yagi J I. Numerical evaluation of blast furnace performance under top gas recycling and lower temperature operation[J]. *Steel Research International* ,2010 ,81(12) :1043 – 1050.

[5] Guo T ,Chu M ,Liu Z ,et al. Mathematical modeling and exergy analysis of blast furnace operation with natural gas injection[J]. *Steel Research International* ,2012 ,83(12) :1 – 11.

[6] Chu M S ,Nogami H ,Yagi J I. Numerical analysis on injection of hydrogen bearing materials into blast furnac[J]. *ISIJ International* 2004 ,44(5) :801 – 808.

[7] 储满生 ,王兆才 ,艾名星 ,等. 热压含碳球团冷态强度的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版) ,2009 ,30(5) :696 – 700.

(Chu Man-sheng ,Wang Zhao-cai ,Ai Ming-xing ,et al. Experimental study on cold strength of carbon composite iron ore hot briquette[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)* 2009 ,30(5) :696 – 700.)

[8] Chu M S ,Liu Z G ,Wang Z C ,et al. Fundamental study on carbon composite iron ore hot briquette used as blast furnace burden[J]. *Steel Research International* ,2011 ,82(5) :521 – 528.

[9] 储满生 ,赵伟 ,柳政根 ,等. 高炉使用含碳复合炉料的原理[J]. 钢铁 2015 ,50(3) :9 – 18.

(Chu Man-sheng ,Zhao Wei ,Liu Zheng-gen ,et al. Principle on using carbon iron composite as blast furnace burden[J]. *Iron and Steel* 2015 ,50(3) :9 – 18.)

[10] Naito M ,Okamoto A ,Yamaguchi K ,et al. Improvement of blast furnace reaction efficiency by temperature control of thermal reserve zone[R/OL]. [2015 – 06 – 13]. <http://www.nssmc.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9417.Pdf>.

[11] Nomura S ,Kitaguchi H ,Yamaguchi K ,et al. The characteristics of catalyst-coated highly reactive cok[J]. *ISIJ International* 2007 ,47(2) :245 – 253.

[12] Liu Z G ,Chu M S ,Wang H T ,et al. Effects of MgO content in sinter on softening-melting behavior of mixed burden made from chromium-bearing vanadium-titanium magnetite[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials* ,2016 ,23(1) :25 – 32.