

doi :10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 06. 011

工艺参数对热压铁焦抗压强度的影响

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: 热压铁焦是一种新型含碳复合炉料,高炉使用铁焦有助于降低热空区温度、减少 CO₂ 排放. 研究了工艺参数对热压铁焦抗压强度的影响,并分析其作用机理. 研究表明,在一定范围内,铁焦抗压强度随着铁矿粉配比增加先增加后降低,在铁矿粉配比 15% 时取得较大值 3 490. 89 N,随着烟煤配比的增加而提高;随着热压温度的提高而提高,在热压温度 350 ℃ 时取得较大值 4 305. 50 N,随着炭化温度的提高先降低后提高,随着炭化时间的增加先提高后降低,在炭化时间 4 h 时取得较大值 3 518. 80 N. 从抗压强度角度考虑,热压铁焦合适的制备工艺参数为 10%~15% 铁矿粉,60%~70% 烟煤,热压温度 300~350 ℃,炭化温度 1 000~1 100 ℃,炭化时间 2~4 h.

关 键 词: 热压铁焦;抗压强度;工艺参数;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)06-0810-05

Effect of Process Parameters on the Compressive Strength of Iron Coke Hot Briquette

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 : Iron coke hot briquette (ICHB) is a new type carbon iron composite , which is beneficial for blast furnace to decrease the temperature of thermal reserve zone and reduce CO₂ emission. In this paper , the effect of process parameters on the compressive strength of ICHB was investigated , associated with their functional mechanisms. The results showed that with the increase of iron ore addition ratio , the compressive strength of ICHB increased first and then decreased , which reached a higher value of 3 490. 89 N with 15% iron ore addition. With increasing coal addition ratio , the compressive strength of ICHB increased , similar to the effect of hot briquetting temperature. When the hot briquetting temperature was 350 ℃ , the compressive strength was up to 4 305. 50 N. With the increase of carbonization temperature , the compressive strength of ICHB decreased first and then increased. However , the compressive strength increased first and then decreased with increasing carbonization time. Especially , when the carbonization time was 4 h , the strength reached 3 518. 80 N. Therefore , as the compressive strength is concerned , the reasonable preparation process parameters of ICHB are 10% ~ 15% iron ore , 60% ~ 70% bituminous coal , 300 ℃ ~ 350 ℃ hot briquetting temperature , 1 000 ℃ ~ 1 100 ℃ carbonization temperature and 2 ~ 4 h carbonization time.

Key words : iron coke hot briquette (ICHB) ; compressive strength ; process parameter ; CO₂ emission reduction ; blast furnace ironmaking

近年来,全球经济迅速发展,同时全球变暖等环境问题愈来愈严重. 钢铁工业是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]. 在未来相当长一段时期内,钢铁生产主要以高炉-转炉流程为主^[2-3],其中高炉 CO₂ 排放量占整个钢铁工业的 70% 左右^[2]. 因

此 ,高炉炼铁是钢铁工业降低能耗和减少 CO₂ 排放的关键所在。

目前 ,冶金工作者提出一些高炉炼铁 CO₂ 减排技术 ,如使用含碳复合炉料等^[4-7]。铁焦是一种将铁矿粉混合于配合煤中 ,利用炼焦工艺或热压工艺制得^[8-9]的新型含碳复合炉料。高炉使用铁焦可降低热储备区温度 ,减少 CO₂ 排放 ,提高冶炼效率^[10]。含碳复合炉料应有一定的强度以防止炉料在处理、运输和转运过程中出现破裂现象^[11]。日本 JFE 钢铁公司将铁矿粉和煤粉混合后利用热压工艺制得铁焦产品 ,其抗压强度大于 2 000 N^[9]。而国内关于铁焦抗压强度的研究较少。本文提出热压铁焦(iron coke hot briquette , ICHB)制备工艺 ,该工艺将铁矿粉添加至弱黏结性煤和非黏结性煤中 ,利用热压工艺制得铁焦。研究了工艺参数对热压铁焦抗压强度的影响机制 ,得到了适宜的热压铁焦制备工艺参数 ,补充了铁焦理论 ,为铁焦实际应用提供理论技术支撑。

1 实 验

1.1 实验原料

实验原料包括铁精矿粉、烟煤和无烟煤。铁精矿粉的化学成分见表 1。烟煤和无烟煤的工业分析见表 2 ,其中烟煤为弱黏结性煤 ,无烟煤为非黏结性煤。热压铁焦制备工艺如图 1 所示。将三种原料干燥后破碎筛分至合适粒度 ,然后按比例混合 ,再将混合物加热到一定温度 ,利用热压系统得到热压块 ,最后将热压块进行炭化处理 ,炭化产物冷却后得到热压铁焦。

表 1 铁矿粉化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of iron ore fines (mass fraction)							%
TFe	FeO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	其他	
66.69	26.40	5.31	0.18	0.31	1.80	0.06	

表 2 煤粉工业分析(质量分数)

Table 2 Proximate analysis of coal fines (mass fraction)					%
煤种	FC _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	M _{ad}	
烟煤	61.52	8.75	28.25	1.48	
无烟煤	80.63	9.25	8.81	1.31	

1.2 实验方案

实验考虑铁矿粉配比、烟煤配比、热压温度、炭化温度和炭化时间等对铁焦抗压强度的影响 ,且其他影响因素保持不变。各因素水平如表 3 所示。由表 3 可知 ,每个因素均考虑 5 个水平 ,其中

基准实验条件为铁矿粉配比 20% ,烟煤配比 60% ,热压温度 200 ℃ ,炭化温度 1 000 ℃ ,炭化时间 5 h。检测不同参数下制备的热压铁焦抗压强度 ,同时对实验结果进行分析。为减小实验误差 ,每组实验测定 12 个热压铁焦 ,去除最大值和最小值后求得平均值作为实验结果。

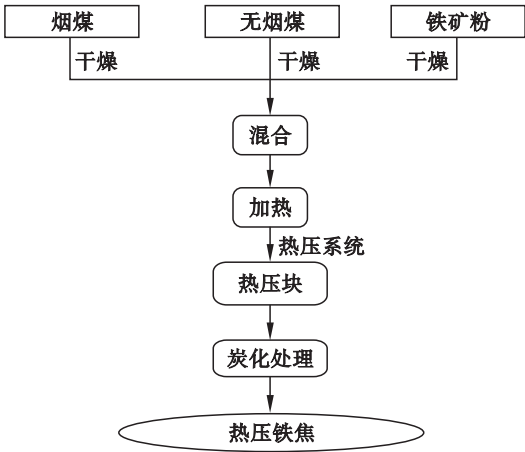


图 1 热压铁焦制备工艺

Fig. 1 Preparation process of iron coke hot briquette

表 3 实验因素水平
Table 3 Levels and factors in experiments

水平	矿粉 配比 /%	烟煤 配比 /%	热压温度 /℃	炭化温度 /℃	炭化时间 /h
1	0	50	150	700	1
2	5	55	200	800	3
3	10	60	250	900	5
4	15	65	300	1 000	7
5	20	70	350	1 100	9

2 实验结果与分析

2.1 铁矿粉配对抗压强度的影响

铁矿粉配比对热压铁焦抗压强度影响见图 2。随着铁矿粉配比的增加 ,热压铁焦抗压强度先提高后降低。当矿粉配比 15% 时 ,热压铁焦获得较大抗压强度 3 490.89 N。合适的铁矿粉配比为 10%~15%。

在炭化过程中 ,大部分铁矿粉还原为金属铁。根据塑性成焦理论 ,金属铁能够被胶质体包覆参与焦炭气孔壁的形成 ,共同构成铁焦的骨架。因此 ,在铁矿粉配比 0~15% 时 ,随着铁矿粉配比的增加 ,热压铁焦的抗压强度不断提高。另一方面 ,铁矿粉为无机矿物质 ,铁矿粉的增加使煤粉的膨胀性降低^[11]。因此当铁矿粉过多时 ,胶质体不足以包覆更多的铁矿粉 ,铁焦结构将变得松散 ,强度下降。图 3 是铁矿粉配比 0 和 15% 条件下热压铁

焦的微观结构. 未添加铁矿粉时, 热压铁焦内部结构较为松散, 气孔较多. 当铁矿粉配比 15% 时, 热压铁焦内部结构致密, 铁和焦结合较好.

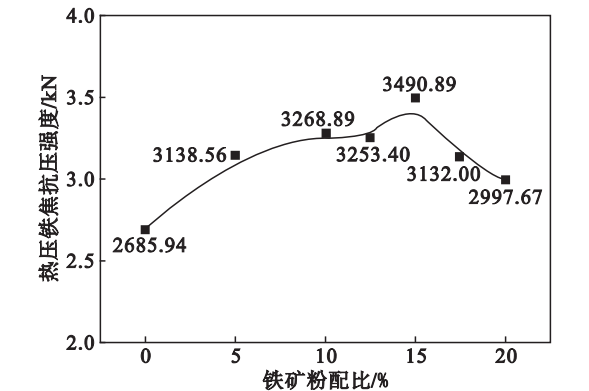


图 2 铁矿粉比对热压铁焦抗压强度的影响
Fig. 2 Effect of iron ore addition ratio on compressive strength of ICHB

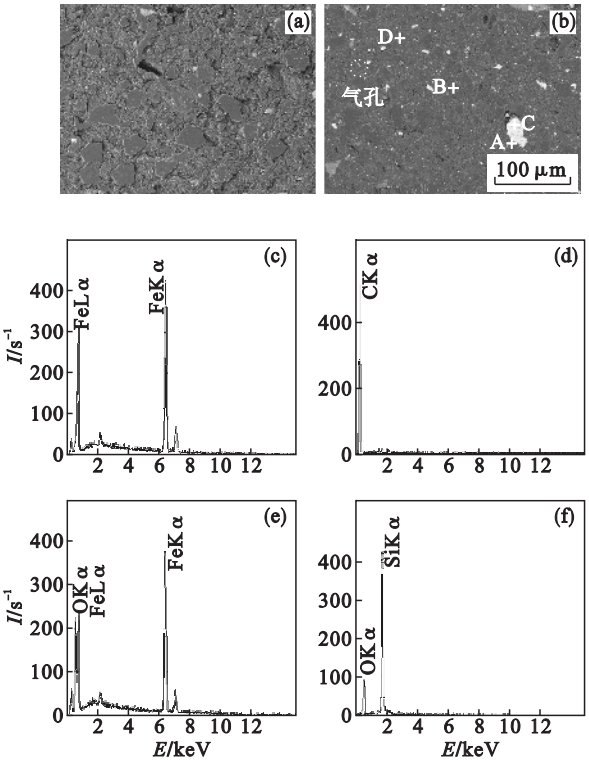


图 3 不同铁矿粉配比条件下热压铁焦 SEM 及 EDS 图
Fig. 3 SEM and EDS of ICHB with different addition ratios of iron ore
(a)—矿粉 0 ;(b)—矿粉 15% ;(c)—A 点 EDS ;
(d)—B 点 EDS ;(e)—C 点 EDS ;(f)—D 点 EDS.

2.2 烟煤比对抗压强度的影响

烟煤比对热压铁焦抗压强度的影响见图 4. 在一定范围内, 热压铁焦抗压强度随着烟煤配比的增加而提高. 当烟煤配比 70% 时, 热压铁焦抗压强度达到 3 985. 17 N. 合适的烟煤配比为 60%~70% .
在炭化过程中, 随着烟煤配比的增加, 无烟煤

的加入量随之减少. 铁焦内部能够生成更多胶质体, 很好地填充于固体颗粒间隙, 抗压强度逐渐提高. 另外, 炭化过程中, 析出的挥发分增多, 形成更多的气孔(见图 5), 有利于铁焦内部气相向外扩散, 为铁氧化物还原创造了良好的动力学条件. 因此, 随着烟煤配比的增加, 炭化过程中生成较多金属铁, 强化了铁焦内部骨架结构, 抗压强度逐渐提高.

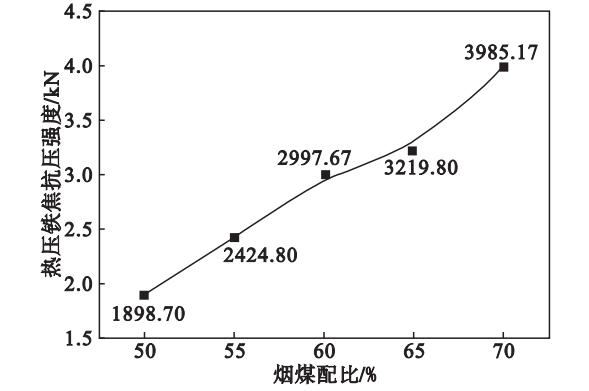


图 4 烟煤比对热压铁焦抗压强度的影响
Fig. 4 Effect of bituminous coal addition ratio on compressive strength of ICHB

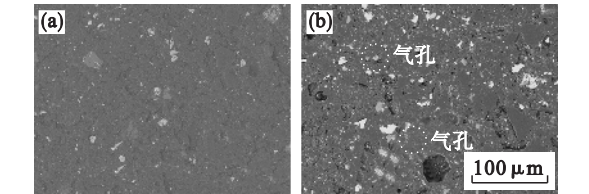


图 5 不同烟煤配比条件下热压铁焦 SEM 图
Fig. 5 SEM of ICHB with different addition ratios of bituminous coal
(a)—烟煤 50% ;(b)—烟煤 70% .

2.3 热压温度对抗压强度的影响

热压温度对热压铁焦抗压强度的影响见图 6. 随着热压温度的提高, 热压铁焦强度逐渐提高. 当热压温度为 350 ℃ 时, 热压铁焦强度达到较大值 4 305. 40 N. 合适的热压温度为 300 ~350 ℃ .

实验所用烟煤的最大流动度温度在 450 ℃ 左右. 当热压温度为 350 ℃ 时, 烟煤生成较多的胶质体, 热压铁焦获得较高的强度. 当热压温度较低时, 胶质体尚未充分形成, 而且形成的胶质体黏度大、流动性差, 颗粒间的结合相对较差. 图 7 是 200 ℃ 和 350 ℃ 条件下热压铁焦的微观结构. 低温(200 ℃)热压时, 焦颗粒和铁颗粒的结合相对较差, 尤其是在大颗粒金属铁周围, 焦、铁颗粒间存在较多裂纹. 高温(350 ℃)热压时, 颗粒间结合相对较好.

2.4 炭化温度对抗压强度的影响

炭化温度对热压铁焦抗压强度的影响见图 8. 随着炭化温度的提高, 热压铁焦的抗压强度先

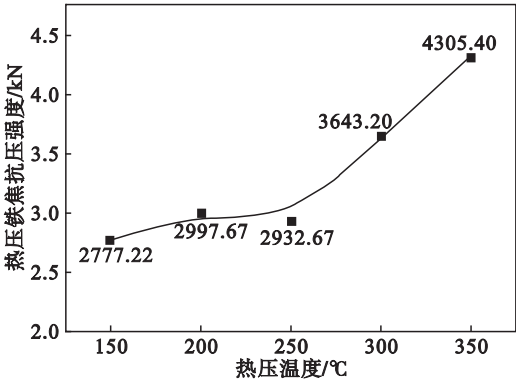


图 6 热压温度对热压铁焦抗压强度的影响
Fig. 6 Effect of hot briquetting temperature on compressive strength of ICHB

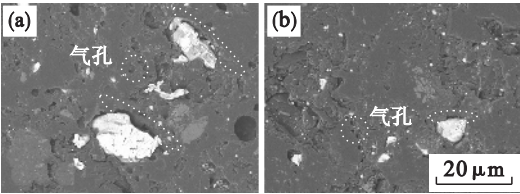


图 7 不同热压温度条件下热压铁焦的 SEM 图
Fig. 7 SEM of ICHB with different hot briquetting temperatures
(a)—热压温度 200℃ ;(b)—热压温度 350℃.

降低后提高.当炭化温度 800℃ 时,铁焦强度为 2 515.56 N.当炭化温度 1 100℃ 时,铁焦强度达到 3 424.00 N.合适的炭化温度为 1 000 ~ 1 100℃.

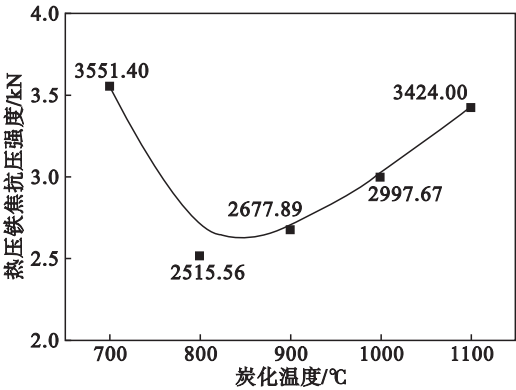


图 8 炭化温度对热压铁焦抗压强度的影响
Fig. 8 Effect of carbonization temperature on compressive strength of ICHB

烟煤在不同温度下具有不同的收缩系数^[12].在炭化过程中,热压铁焦在 400℃ 附近收缩很快,600~700℃ 收缩趋于缓慢,700~800℃ 又加剧,当温度超过 800℃ 时收缩逐渐变缓,900℃ 后则完全停止.因此,热压铁焦在 700~800℃ 炭化时,由于内部收缩加剧,出现微裂纹,抗压强度降低;当炭化温度超过 800℃ 时,铁焦内部无明显收缩,且半焦逐渐固化,使得铁焦内部微观结构得到强

化,抗压强度逐渐提高.图 9 是 800℃ 炭化和 1 100℃ 炭化下热压铁焦的微观结构.

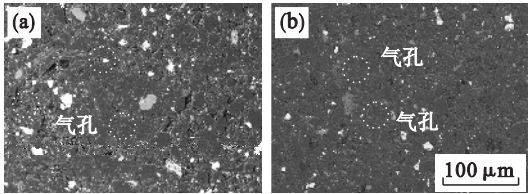


图 9 不同炭化温度条件下热压铁焦的 SEM 图
Fig. 9 SEM of ICHB with different carbonization temperatures
(a)—炭化温度 800℃ ;(b)—炭化温度 1 100℃.

2.5 炭化时间对抗压强度的影响

炭化时间对热压铁焦抗压强度的影响见图 10.随着炭化时间增加,铁焦强度先提高后降低.炭化 4 h 时,铁焦强度达到较大值 3 518.80 N.合适的炭化时间为 2~4 h.

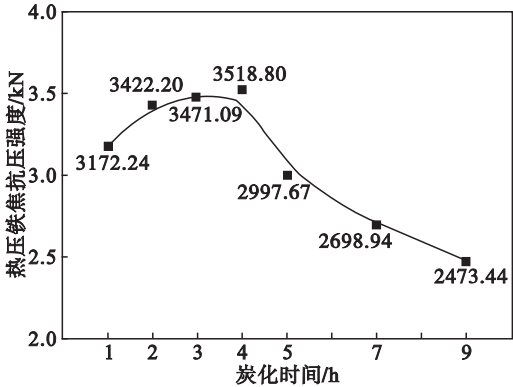


图 10 炭化时间对热压铁焦抗压强度的影响
Fig. 10 Effect of carbonization time on compressive strength of ICHB

随着炭化时间的增加,热压铁焦的焦化程度提高,内部结构更加致密,铁焦抗压强度提高.在炭化过程中,不仅存在煤到焦的转变过程,而且存在铁矿粉的还原过程.随着炭化时间的增加,还原出来的金属铁数量增加,增强了铁焦内部结构.当炭化时间较长时,随着铁氧化物的还原,铁焦中的碳逐渐消耗,形成较多的气孔和空洞,且尺寸更大(见图 11),铁焦抗压强度下降.

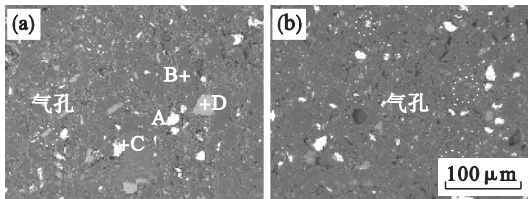


图 11 不同炭化时间条件下热压铁焦的 SEM 图
Fig. 11 SEM of ICHB with different carbonization time
(a)—炭化时间 4 h ;(b)—炭化时间 9 h.

3 结 论

1) 在一定范围内 ,热压铁焦的抗压强度随铁矿粉配比的增加先提高后降低 ,随烟煤配比的增加逐渐提高 ,随热压温度的提高而提高 ,随炭化温度的提高先降低后提高 ,随炭化时间的增加先提高后降低.

2) 适当增加铁矿粉配比有利于加强铁焦骨架 ,增加烟煤配比和提高热压温度有助于铁焦内部胶质体的生成 ,从而提高抗压强度 ,提高炭化温度 ,铁焦内部膨胀较小 ,有利于强化铁焦内部结构 ,适当延长炭化时间 ,铁焦的焦化程度增大 ,金属铁量增多 ,有利于提高铁焦强度.

3) 从抗压强度角度考虑 ,热压铁焦合适的制备工艺参数为 10% ~ 15% 铁矿粉 ,60% ~ 70% 烟煤 ,热压温度 300 ~ 350 ℃ ,炭化温度 1 000 ~ 1 100 ℃ ,炭化时间 2 ~ 4 h.

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] Ariyama T ,Sato M. Optimization of ironmaking process for reducing CO₂ emission in the integrated steel works[J]. *ISIJ International* 2006 ,46(12) : 1736 – 1744.

[4] 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 (National Science)* 2009 ,30(5) : 696 – 700.)

[5] 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.

[6] Watanabe K ,Ueda S ,Inoue R ,et al. Enhancement of reactivity of carbon iron ore composite using redox reaction of iron oxide powder[J]. *ISIJ International* ,2010 ,50(4) : 524 – 530.

[7] Hayashi S ,Hashimoto N. Influence of potassium addition on self reaction behavior of coal composite iron ore hot briquettes under a blast furnace simulated heat and load[J]. *Tetsu-to-Hagané* 2010 ,96(4) : 141 – 149.

[8] Naito M ,Okamoto A ,Yamaguchi K ,et al. Improvement of blast furnace reaction efficiency by temperature control of thermal reserve zone[J]. *Nippon Steel Technical Report* , 2006(94) : 103 – 108.

[9] Anyashiki T ,Fukada K ,Fujimoto H. Development of carbon iron composite process[J]. *JFE Technical Report* ,2009 (13) : 1 – 6.

[10] Nomura S ,Terashima H ,Sato E ,et al. Some fundamental aspects of highly reactive iron coke production[J]. *ISIJ International* 2007 ,47(6) : 823 – 830.

[11] Yokoyama H ,Higuchi K ,Ito T ,et al. Decrease in carbon consumption of a commercial blast furnace by using carbon composite iron ore[J]. *ISIJ International* ,2012 ,52(11) : 2000 – 2006.

[12] 炼焦化工卷编辑委员会. 中国冶金百科全书 :炼焦化工[M]. 北京 :冶金工业出版社 ,1992 :142 – 144.

(Editorial Committee. Chinese metallurgical encyclopedia : coking chemical engineering[M]. Beijing :Metallurgical Industry Press ,1992 :142 – 144.)