

镜质组反射率指导优化配煤炼焦方案的研究

田英奇^{1,2} 张卫华³ 沈寓韬^{1,2} 鲁锡兰^{1,2} 张德祥^{1,2}

(1. 华东理工大学 资源与环境工程学院, 上海 200237;

(2. 华东理工大学 能源化工及煤气化教育部重点实验室, 上海 200237; 3. 临涣焦化股份有限公司, 安徽 淮北 235141)

摘要: 为了提高焦炭质量, 特别是焦炭反应性 *CRI* 和反应后强度 *CSR*, 从镜质组反射率角度研究了优化配煤炼焦的影响因素。通过对 8 种炼焦煤种的煤质分析、单独炼焦和配煤炼焦的焦炭质量分析与评价, 阐述了不同煤种在配煤炼焦中所起的作用。通过分析某企业原配煤方案存在的问题, 基于煤岩配煤原理, 选择镜质组最大反射率 (R_{\max}) 及镜质组反射率分布图 2 个因素作为指导优化配煤的指标参数, 制定了 6 组优化配煤方案进行炼焦试验。结果表明, 配合煤的 R_{\max} 与镜质组反射率分布是优化配煤方案的有效调控指标, 优化配煤方案获得的粒焦 *CRI*^{*} 降低 1.95%, *CSR*^{*} 增加 3.45%, 焦炭热态强度明显提高。

关键词: 炼焦; 配煤; 焦炭热态强度; 镜质组反射率

中图分类号: TQ520 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)04-0162-07

Research on optimization of coal blending coking guided by vitrinite reflectance

Tian Yingqi^{1,2} Zhang Weihua³ Shen Yutao^{1,2} Lu Xilan^{1,2} Zhang Dexiang^{1,2}

(1. Department of Chemical Engineering for Energy Resources East China University of Science & Technology Shanghai 200237, China;

2. Key Laboratory of Coal Gasification and Energy Chemical Engineering of Ministry of Education East China University of Science & Technology, Shanghai 200237, China; 3. Linhuan Coking & Chemical Co. Ltd. Huabei 235141, China)

Abstract: In order to improve the quality of coke, especially the coke reactivity index (*CRI*) and coke strength after reaction (*CSR*), the influence factors of optimizing coal blending coking from the perspective of vitrinite reflectance were researched. The properties of eight kinds of coking coal was analysed, and coke quality were researched prepared by single coal and coal blending. The results showed that the effect of different coal on the coal blending coking was different. According to the principle of coal petrography blending, based on the analysis of the issues of previous coal blending scheme in a certain enterprise, the maximum vitrinite reflectance (R_{\max}) and vitrinite reflectance distribution figures were selected to the guide of optimization of coal blending, and the six optimum schemes were put forward. The result showed that the blended coal's R_{\max} and the reflectance distribution figures were two effective adjustment parameters of optimizing the coal blending. Through the optimization of coal blending scheme, particulate coke's *CRI*^{*} was decreased by 1.95% and *CSR*^{*} was increased by 3.45%, the coke's thermal strength was greatly improved.

Key words: coke; coal blending; coke's thermal strength; vitrinite reflectance

0 引言

焦炭是高炉炼铁中不可缺少的重要原料, 在高炉冶炼过程中起到了还原剂、热源和支撑骨架

三大作用^[1]。我国是当今世界上焦炭第一生产大国、消费大国和出口大国, 焦炭产量占全球产量的 50% 以上, 据国家统计局数据显示^[2], 2014 年我国焦炭产量高达 4.769 亿 t。随着高炉的大型化, 焦

收稿日期: 2015-11-20; 责任编辑: 代艳玲 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.04.032

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011CB201304)

作者简介: 田英奇(1991—), 男, 桑族, 贵州贵阳人, 硕士研究生。通讯作者: 张德祥 教授, 博士生导师。E-mail: zd@ecust.edu.cn

引用格式: 田英奇, 张卫华, 沈寓韬等. 镜质组反射率指导优化配煤炼焦方案的研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4): 162-168.

Tian Yingqi, Zhang Weihua, Shen Yutao, et al. Research on optimization of coal blending coking guided by vitrinite reflectance [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 162-168.

炭的质量、性能对高炉的冶炼效果及其各项经济技术指标都有着重要影响,根据《高炉炼铁工艺设计规范》^[3],高炉容量每增加1 000 m³,就要求焦炭抗碎强度 M_{40} 和反应后强度 CSR 提高1%~2%,耐磨强度 M_{10} 和反应性 CRI 降低0.5%~2.0%。因此如何提高焦炭的质量及其稳定性,特别是焦炭的热态强度,以弥补焦炭在高炉中停留时间延长所造成的碳溶反应加剧的问题^[4~5],同时降低成本,节约炼焦煤资源,是当下焦化行业所需解决的最为重要的问题之一。焦炭的质量主要受到配合煤的黏结性、变质程度、灰成分及煤岩显微结构等多方面因素的影响^[6]。随着对煤岩学的不断深入研究,利用煤岩显微结构指导配煤也得到了广泛的认可和运用。煤岩配煤能更有效地优化配煤方案,更精确地预测焦炭质量,更合理地利用炼焦煤资源和降低炼焦成本。目前,世界上公认镜质组最大反射率 R_{max} 比挥发分更能精确地反映煤的变质程度, R_{max} 越大,煤的变质程度越高。研究表明,随着变质程度的增加,焦炭反应性先降低,而后有所升高,反应后强度与此相反。中、低变质程度的煤种焦炭中所含各向同性、细粒镶嵌结构较多,因而反应性较高,焦炭质量较差。随着变质程度的提高,焦炭各向异性结构增加,反应后强度得以提高^[7~10]。镜质组反射率分布图是全面、准确地反映炼焦煤结焦性能的有效方法,配煤中单种煤的镜质组反射率分布范围重叠程度越大,分布图越平滑越趋近于正态分布,适配性就越好,配煤效果越佳^[11~13]。基于此,笔者以镜质组最大反射率和镜质组反射率分布图为指导,对某企业生产中采用的配煤方案进行优化,以得出合理可行的配煤炼焦方案,提高焦炭质量。

1 试验方法

1.1 炼焦试验设备和方法

根据刘文秋^[14]在实验室坩埚焦与工业小焦炉焦炭强度方面的研究,实验室坩埚焦抗碎强度 M_{13} 与工业小焦炉焦炭 M_{40} 存在良好的一致性;杨俊和等^[15]在研究中对比发现,粒焦反应性与块焦反应性之间存在很好的线性关系;孙西巍等^[16]也通过对比40 kg小焦炉焦炭和实验室坩埚焦的质量,发现两者在焦炭的冷、热强度上都有相同变化趋势,说明实验室炼焦结果的可行性和实用性,可以代替小焦炉试验。因此,通过测定实验室坩埚焦炭机械强度,并对

所得焦炭测定其粒焦的反应性及反应后强度,同样能对工业配煤炼焦起到较好的指导作用。

采用高温电阻炉进行坩埚焦试验,原料煤样150 g,试验终温1 050 ℃。将试验所得全部焦炭参照GB/T 2006—1994《冶金焦炭机械强度的测定方法》测定焦炭抗碎强度和耐磨强度(本文定义为 M_{13} 和 M_3)。

$$M_{13} = \frac{m_1}{m} \times 100\% \quad (1)$$

$$M_3 = \frac{m_2}{m} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m 为坩埚焦所得焦炭总质量,g; m_1 为转鼓后粒度大于13 mm的焦炭质量,g; m_2 为转鼓后粒度小于3 mm的焦炭质量,g。

由于GB/T 4000—2008《焦炭反应性及反应后强度试验方法》要求试样量多,实验室模拟炼焦方法获得的坩埚焦质量少,因此在GB/T 220—2001《煤对二氧化碳化学反应性的测定方法》的基础上进行改进,将实验室炼焦所得焦炭进行破碎筛分,称取14 g粒度在36 mm的粒焦,试验终温1 200 ℃,采用固定床管式反应器测定粒焦的反应性(CRI^*),反应后剩余的粒焦再通过罗加转鼓模拟冶金焦炭转鼓试验来测定粒焦的反应后强度(CSR^*)。

$$CRI^* = \frac{m_0 - m'}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$CSR^* = \frac{m_3}{m'} \times 100\% \quad (4)$$

式中: m_0 为粒焦试样质量,g; m' 为反应后残余粒焦质量,g; m_3 为转鼓后粒度大于3 mm粒焦质量,g。

1.2 煤岩显微组分测定设备和方法

参照GB/T 6948—2008《煤的镜质体反射率显微镜测定方法》及GB/T 8899—1998《煤的显微组分和矿物测定方法》,采用Axio Imager. A2m全自动偏光显微镜测定炼焦煤镜质组反射率及其显微成分,利用HD型全自动显微镜光度计软件采集相关数据,并拟合得出配煤镜质组反射率分布图。

2 试验结果与讨论

2.1 炼焦煤种煤质分析

炼焦所用煤种主要包括焦煤、肥煤、瘦煤、气煤等,不同煤种结焦性能不同,各炼焦煤之间存在一定的适配性^[17~19]。试验所用到的8种煤样分别是LJ

焦煤、WJ 焦煤、SLJ 焦煤、LF 肥煤、LH 1/3 焦煤、LS 瘦煤、SS 瘦煤、DQ 气煤, 在进行配煤炼焦之前首先对单种煤进行煤质指标和单种煤炼焦焦炭质量的测

定, 测定结果见表 1 和表 2, 煤样镜质组反射率分布如图 1 所示。

表 1 炼焦煤样的煤质指标

Table 1 Main properties of different coking coal

煤种	工业分析/%			$G_{R.I.}$	$w(S)_{t.d}$	胶质层指数		奥亚膨胀度		$R_{max} /%$
	M_{ad}	A_d	V_{daf}			X/mm	Y/mm	$a/%$	$b/%$	
LJ 焦煤	0.72	10.50	25.82	89.65	0.49	10.9	24.5	22.9	143.4	1.190
WJ 焦煤	0.68	10.45	24.24	87.35	0.41	8.2	17.0	23.1	33.2	1.403
SLJ 焦煤	0.70	9.28	22.78	83.00	1.67	11.0	21.5	19.3	50.5	1.520
LF 肥煤	0.94	9.65	30.47	89.80	0.37	26.1	19.5	17.5	179.9	1.090
LH 1/3 焦煤	1.09	8.78	31.52	88.60	0.36	13.6	19.5	19.9	163.9	0.990
LS 瘦煤	0.70	9.51	17.25	52.25	0.35	15.2	7.5	13.6	25.7	1.694
SS 瘦煤	0.70	8.49	17.61	50.95	2.26	10.5	5.5	28.4	-16.6	1.644
DQ 气煤	1.86	7.73	35.63	70.70	0.67	31.4	11.0	24.7	-12.5	0.882

注: $G_{R.I.}$ 为黏结指数; X 为最终收缩度; Y 为胶质层最大厚度; a 为最大收缩度; b 为最大膨胀度。

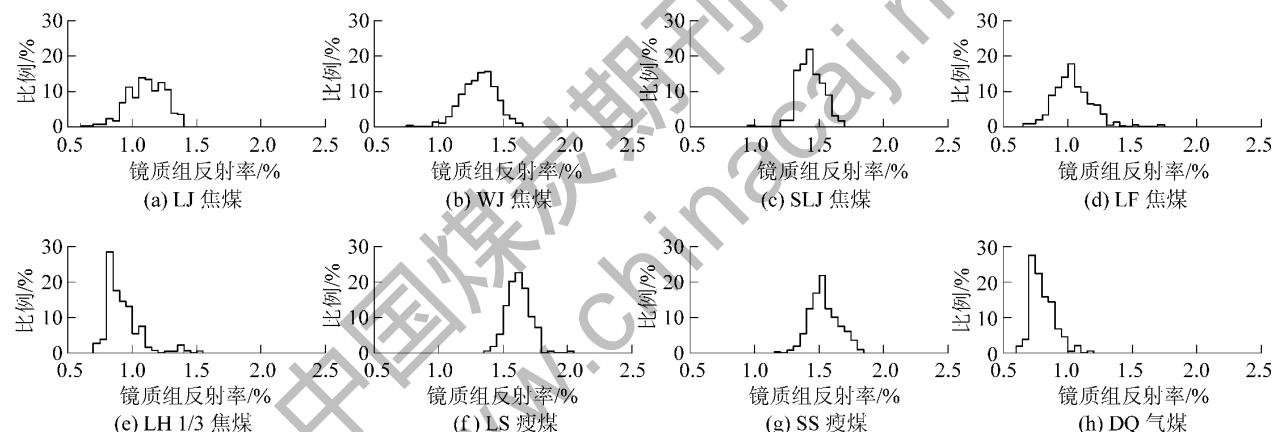


图 1 炼焦煤样的镜质组反射率分布

Fig. 1 Vitrinite reflectance distribution of different coals

表 2 单煤炼焦的焦炭质量指标

Table 2 Coke quality index of single coking coal %

煤种	A_d	$w(S)_{t.d}$	成焦率	M_{13}	M_3	CRI^*	CSR^*
LJ 焦煤	13.49	0.44	77.81	89.81	5.43	38.51	67.53
WJ 焦煤	13.01	0.36	80.32	96.49	3.39	28.45	78.18
SLJ 焦煤	11.66	1.49	79.66	96.49	3.43	23.03	77.06
LF 肥煤	13.09	0.35	73.74	74.24	8.10	42.01	59.22
LH 1/3 焦煤	12.05	0.35	72.81	76.96	7.58	45.56	63.95
LS 瘦煤	11.36	0.30	83.66	92.09	7.81	44.37	40.94
SS 瘦煤	10.22	1.91	83.07	80.79	18.92	39.69	13.38
DQ 气煤	11.37	0.69	68.01	97.21	2.85	49.71	61.78

1) LJ、WJ、SLJ 三种焦煤炼焦特性比较。焦煤是

主要炼焦煤种, 储量有限, 在配煤炼焦中起到提高焦炭机械强度和“骨架煤”的作用。试验所用到 3 种焦煤, 其中 LJ 焦煤灰分、挥发分均最高, 镜质组反射率分布较宽, R_{max} 为 1.190%, 黏结性较好, 能产生较多的胶质体, 最大膨胀度(143.4%)远大于其他 2 种焦煤, 单独炼焦所得焦炭会产生一定量的海绵体和裂纹, 因此焦炭强度最差, M_{13} 仅为 89.81%; WJ 焦煤挥发分、黏结指数适中, 产生的胶质体量较少, 其膨胀度只有 33.2%, 有利于降低配煤的膨胀性, 相对于 LJ 焦煤焦炭, WJ 焦煤的焦炭强度有了明显提高, 其中 CSR^* (78.18%) 在 3 种焦煤中最好; SLJ 焦煤灰分、挥发分、黏结指数偏低, 胶质层指数和奥亚膨胀度适中, 其镜质组反射率分布集中, R_{max} 为 1.520%, 单独炼焦可得到形状完整、冷热态强度良

好的优质焦炭,且粒焦反应性最低, CRI^* 仅为 23.03%, CSR^* 高达 77.06%。但是由于 SLJ 焦煤含硫量偏高,为控制焦炭中硫含量,也不宜多配。

2) LF 肥煤炼焦特性分析。肥煤单独炼焦所得焦炭裂缝较多,气孔率高,不同变质程度肥煤所得焦炭质量差异较大,通常需要配入适量气、瘦煤等弱黏结性或不黏结煤以提高焦炭质量。试验用到的 LF 肥煤虽然黏结指数较高,但最大膨胀度最高,达 179.9%,所得焦炭产生大量海绵体,焦炭根部裂纹较多,易碎,焦炭形状不完整,因此 M_{13} (74.24%)、 M_3 (8.10%) 小, CSR^* (59.22%) 偏低。

3) LS、SS 两种瘦煤炼焦特性比较。瘦煤在配煤炼焦中起到降低挥发分、减少焦炭裂纹和瘦化剂的作用,适量配入有利于改善焦炭质量。LS 瘦煤所得焦炭形状完整,焦炭冷态强度较好,但 CRI^* (44.37%) 较高, CSR^* (40.94%) 偏低;而 SS 瘦煤只体现收缩,不膨胀,胶质体含量在所有煤种中最少,黏结指数最小,因此结焦性和黏结性差,且含硫量(2.26%)较高,焦炭焦粉含量较高,焦块体积较小,因而其机械强度差(M_{13} 为 80.79%, M_3 高达 18.92%), CSR^* 仅为 13.38%,但 CRI^* (39.69%) 小于 LS 瘦煤,在配煤炼焦中不宜配入太多。

4) LH 1/3 焦煤、DQ 气煤炼焦特性分析。1/3 焦煤是介于气煤、肥煤、焦煤之间的一种过渡性煤种,其储量较为丰富,通常可以替代肥煤进行配煤^[20]。LH 1/3 焦煤在各项性质上均与 LF 肥煤相似,焦炭同样含有大量海绵体和裂纹,焦炭冷态强度偏低, CRI^* 较高, CSR^* (63.95%) 略优于肥煤,在配煤中可适当替代 LF 肥煤配入。气煤变质程度较低、膨胀压力小、收缩大、灰分低,在配煤中起到减小膨胀压力、增加焦炭收缩度、降灰的作用^[21]。DQ 气煤灰分在 8 种煤样中含量最低,但镜质组反射率在气煤中偏高, R_{max} 为 0.882%,黏结性适中,所得焦炭冷态强度较好, M_{13} (97.21%) 在 8 种煤中最好,但热态强度差, CRI^* (49.71%) 也最高,配煤中需控制其比例。

2.2 原配煤方案存在的问题

根据单种煤的配比及其反射率分布,通过加和的方式由计算机拟合出原配煤方案(方案 1)的镜质组反射率分布直方图(图 2)^[22],从图 2 可看出,配合煤的镜质组反射率在 1.0% 和 1.6% 处有 2 个峰值,在 1.4% 处有 1 个凹口,分布图整体偏左,图形连续性较差,重叠度不好, R_{max} (1.162%) 偏

低。从煤种配比上来看,变质程度较高的瘦煤总配入量较高,中等变质程度的 1/3 焦煤和气煤所占比例也较大,镜质组反射率位于 1.4%~1.5% 的煤种偏少,导致结焦过程中混合煤塑性状态不够连续,不能保证煤粒之间良好的界面反应。因而所得焦炭裂纹较多,转鼓试验后焦炭结构出现破碎, M_{13} 为 92.60%, M_3 为 5.09%, CSR^* 较差,为 71.68%, CRI^* 相对较低,为 35.78%。为改善焦炭质量,需要调整配煤方案。

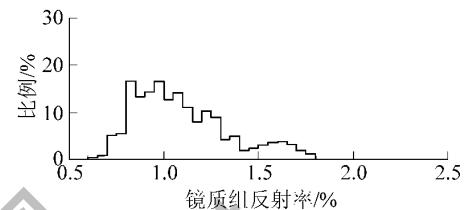


图 2 原配煤方案镜质组反射率分布
Fig. 2 Vitrinite reflectance distribution of previous coal blending scheme

2.3 配煤方案优化

煤的显微特征主要包括煤岩显微组分含量和镜质组最大反射率及其分布 2 个方面^[23~24]。笔者以配合煤的镜质组最大反射率和镜质组反射率分布图作为指导因素,对原配煤方案进行优化。根据方案 1 存在的问题,通过调整煤种配比,提出 6 组优化方案。图 3 为不同配煤方案镜质组反射率不同区间内所占比例,可见优化方案均通过提高镜质组反射率为 0.9%~1.5% 的比例、降低<0.9% 和>1.5% 的比例,来提高 R_{max} ,通过增加镜质组反射率位于 1.4%~1.5% 的煤种,对原配煤方案进行填补,使其分布图更趋近于正态分布曲线。6 组优化配煤方案镜质组反射率分布如图 4 所示,配煤炼焦焦炭质量见表 3。

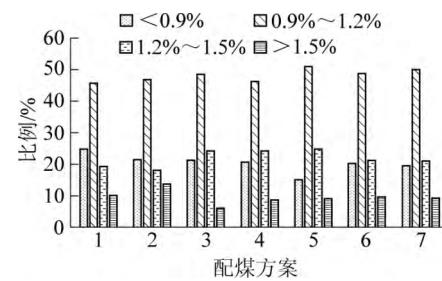


图 3 不同配煤方案镜质组反射率分布
Fig. 3 Vitrinite reflectance distribution of different coal blending schemes

方案 2 通过增加中、高变质程度的煤种来提高配合煤的镜质组反射率,使其 R_{max} 由方案 1 的

1. 163%提高至1.184%,但分布曲线依旧偏离正态分布,特别是提高瘦煤的配入量,使配煤的黏结性降低,焦炭质量反而有所下降,CRI^{*}提高4.00%,CSR^{*}降低3.05%;减少瘦煤的配入量,增加R_{max}在

1.2%~1.5%煤种的配比,调整分布曲线,使其更趋于连续,得到方案3,但配合煤的R_{max}基本不变,为1.162%,所得焦炭裂缝增多,导致冷态强度有所下降

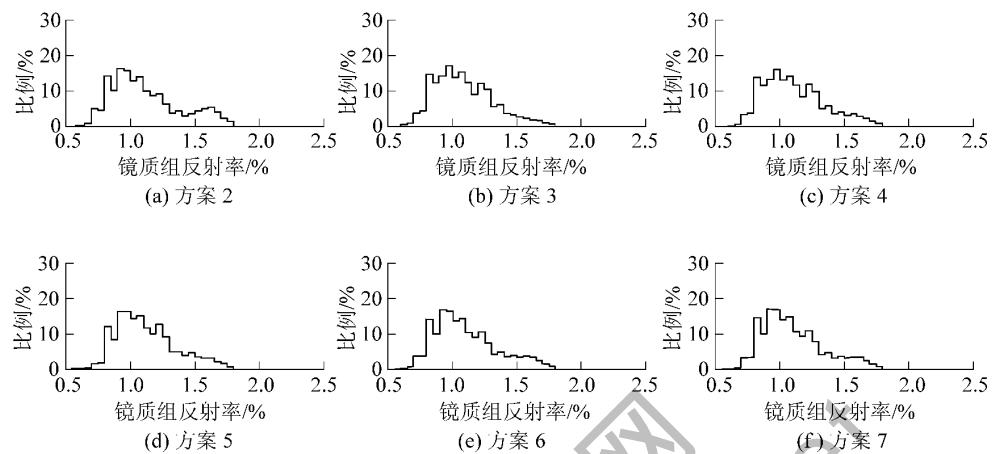


图4 优化配煤方案镜质组反射率分布

Fig. 4 Vitrinite reflectance distribution of optimum coal blending schemes

表3 各配煤方案的煤质参数及焦炭质量指标

Table 3 Blending coal and coke's properties of optimum coal blending schemes

方案 编号	配合煤煤质分析/%			成焦率/%	冷态强度/%			热态强度/%	
	A _d	V _{daf}	R _{max}		M ₁₃	M ₃	CRI [*]	CSR [*]	
1	9.56	27.60	1.162	76.01	92.60	5.09	35.78	71.68	
2	9.52	27.25	1.184	76.12	91.38	5.97	39.78	68.63	
3	9.69	27.58	1.162	76.15	89.43	6.13	35.80	71.54	
4	9.71	27.37	1.183	76.38	93.36	4.58	36.66	73.73	
5	9.74	26.93	1.193	77.69	92.97	4.55	35.87	75.14	
6	9.59	27.55	1.171	76.20	92.70	4.68	37.46	73.34	
7	9.65	27.57	1.170	76.02	90.88	5.81	33.83	75.13	

降,但热态强度变化不大。因此,仅改变配合煤的最大镜质组反射率或分布曲线是无法提高焦炭整体质量的,而是需要同时满足2个条件。

方案4在方案1的基础上增加WJ焦煤(R_{max}为1.403%)和SLJ焦煤(R_{max}为1.520%)2种R_{max}在1.4%~1.5%的煤种,减少LS瘦煤(R_{max}为1.694%)和DQ气煤(R_{max}为0.882%),使混煤R_{max}提高至1.183%,分布曲线无明显凹口,更接近正态分布曲线。焦炭质量得以提高,M₁₃增加0.76%,M₃减少0.71%,CSR^{*}增加2.05%,CRI^{*}增加0.88%;进一步调整配煤方案,去掉DQ气煤,增加SS瘦煤,得到方案5,混煤R_{max}提高至1.193%。焦炭裂纹明显较少,M₁₃、M₃、CRI^{*}变化不明显,但

CSR^{*}由方案1的71.68%增加至75.14%,焦炭质量得到明显改善。

考虑到焦煤等优质炼焦煤资源储量有限,在保证提高R_{max}和镜质组反射率分布图更平滑的情况下,根据实际情况调整配煤方案,降低焦煤总含量,得到方案6,所得焦炭冷态强度略微提高,CSR^{*}增加1.66%,但由于气煤配入量较大,导致CRI^{*}也增加1.68%。在方案6的基础上进一步调整单种煤配比,得到方案7,由于瘦煤、气煤的减少,增加了膨胀度较高的1/3焦煤,因此所得焦炭裂纹略有增加,冷态强度有所降低,由于去除了黏结性最差、胶质体含量最少的SS瘦煤,提升了此配煤方案的黏结性,使配合煤在结焦过程中塑性状态连续性更好,因而焦

炭热态强度反而有较大幅度提升, CRI^* 降低 1.95%, 仅为 33.83%, CSR^* 增加 3.45%, 高达 75.13%。因此可作为可行的配煤方案进行运用。

通过拟合方案 5、方案 7 等多组提高焦炭质量的优化方案的镜质组反射率分布图, 得到如图 5 所示的分布曲线, 为今后优化配煤方案提供指导依据。

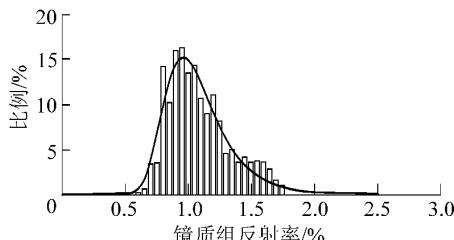


图 5 拟合优化配煤方案镜质组反射率分布

Fig. 5 Vitrinite reflectance distribution of fitting optimum coal blending scheme

3 结 论

1) 试验结果表明, 通过减少中等和高等变质程度煤种的配入, 适当增加中高等变质程度的煤种得到优化方案, 使配煤 R_{max} 由 1.163% 增加至 1.180%~1.190%, 填补配煤镜质组反射率分布图中的“缺口”, 使曲线更趋于正态分布。相对于方案 1, 方案 5 所得焦炭 M_{13} 增加 0.37%, M_3 减少 0.54%, CRI^* 基本不变, 但 CSR^* 增加 3.46%, 进一步优化配煤提出的方案 7, 所得焦炭 CRI^* 降低 1.95%, CSR^* 增加 3.45%。焦炭热态质量明显提高。

2) 煤岩配煤作为现代炼焦配煤的指导方法之一, 能有效地帮助改进配煤方案, 提高焦炭质量, 特别是焦炭热态强度。只提高配煤 R_{max} 而镜质组反射率分布图存在“缺口”, 或调整镜质组反射率分布图光滑连续但 R_{max} 过小, 都无法改善配煤炼焦焦炭质量。只有适当提高 R_{max} , 同时使镜质组反射率分布图趋于正态分布曲线, 才能达到优化配煤方案的效果。

参考文献(References) :

- [1] 唐莉. 炼焦用单种煤的特性研究及其选择 [J]. 鞍钢技术, 2002(1): 13~16.
Tang Li. Behavior study and selection of coal for coking [J]. Angang Technology, 2002(1): 13~16.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 2014 年国民经济在新常态下平稳运行 [EB/OL]. [2015-01-20]. (2015-09-20). http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201502/t20150211_682459.html.
- [3] GB 50427—2008 高炉炼铁工艺设计规范 [S].
- [4] 孟庆波. 采用配煤炼焦新技术 稳定提高焦炭质量 [C]//第十届全国炼铁原料学术会议论文集. 北京: 中国金属学会, 2007: 357~362.
- [5] Micael H Best. Effect of coke strength after reaction (CSR) on blast furnace performance [J]. Ironmaking Conference Proceedings 2002, 213: 13~17.
- [6] 孟敏. 炼焦配煤及焦炭质量预测研究现状 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2011(1): 40~43.
Meng Min. Present research status of predicting coke quality in relation with supplement coking coal [J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2011(1): 40~43.
- [7] 刘俊. 煤的镜质组反射率分布在配煤炼焦中的指导作用 [C]//苏、鲁、皖、赣、冀五省金属学会第十五届焦化学术年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2010: 718~720.
- [8] 刘尚超, 陈鹏, 项茹等. 焦炭热性能影响因素分析 [J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(5): 104~108.
Liu Shangchao, Chen Peng, Xiang Ru, et al. Analysis on factors affected to thermal performances of coke [J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(5): 104~108.
- [9] Sławomira Pusz, Roman Buszko. Reflectance parameters of cokes in relation to their reactivity index (CRI) and the strength after reaction (CSR) from coals of the Upper Silesian Coal Basin, Poland [J]. International Journal of Coal Geology, 2012(90/91): 43~49.
- [10] 李运勇, 唐小平. 焦炭强度影响因素研究 [J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(4): 23~26.
Li Yunyong, Tang Xiaoping. Research factors affected to strength of coke [J]. Coal Science and Technology, 2001, 29(4): 23~26.
- [11] 项茹, 薛改凤, 陈鹏等. 炼焦煤镜质组性质和焦炭结构性能的相关性研究 [J]. 武汉科技大学学报: 自然科学版, 2008, 31(2): 151~154.
Xiang Ru, Xue Gaifeng, Chen Peng, et al. Relationship between vitrinite properties of coking coal and microstructure and thermal properties of coke [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 31(2): 151~154.
- [12] 燕瑞华, 高志军, 耿印权等. 镜质组反射率分布图在配煤炼焦中的应用 [J]. 燃料与化工, 2001, 32(5): 227~230.
Yan Ruihua, Gao Zhijun, Ding Yinquan, et al. Application of vitrinite reflectance distribution figure in coal blending and coke-making [J]. Fuel & Chemical Processes, 2001, 32(5): 227~230.
- [13] 朱晓明, 郭海龙. 利用煤的镜质组反射率指导配煤炼焦 [J]. 科技研究, 2014(23): 694.
Zhu Xiaoming, Guo Hailong. Coal blending guided by coal vitrinite reflectance [J]. Science and Technology Research, 2014(23): 694.
- [14] 刘文秋. 70kg 小焦炉的焦油渣配煤实验研究 [J]. 山西化工, 2015, 35(1): 53~54.
Liu Wenqiu. Experimental study of tar residue blending 70 kg coke oven [J]. Shanxi Chemical Industry, 2015, 35(1): 53~54.
- [15] 杨俊和, 杜鹤桂, 钱湛芬等. 焦炭的粒焦反应性 [J]. 东北大学, 2014(23): 694.

- 学报:自然科学版,1999,20(3):286-289.
Yang Junhe, Du Hegui, Qian Zhanfen, et al. Reactivity of particulate coke [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 1999, 20(3): 286-289.
- [16] 孙西巍.少肥煤配比的配煤炼焦实验室研究与优化[D].上海:华东理工大学,2011: 26-27,36-37.
- [17] 亢树新.煤种适应性及配煤炼焦探讨[J].煤化工,2012,40(2):39-41.
Kang Shuxin. Research on the coal blend additive for coking [J]. Coal Chemical Industry, 2012, 40(2): 39-41.
- [18] 鲍俊芳,薛改凤,詹立志,等.炼焦煤焦化特性评价指标探讨[J].燃料与化工,2014,45(2):5-7,10.
Bao Junfang, Xue Gaifeng, Zhan Lizhi, et al. Evaluation index of coking characteristics of coking coal [J]. Fuel & Chemical Processes, 2014, 45(2): 5-7,10.
- [19] 薛改凤,项茹,陈鹏,等.单种炼焦煤质量对配煤质量的影响[J].煤炭科学技术,2007,35(8):75-79.
Xue Gaifeng, Xiang Ru, Chen Peng, et al. Single coking coal quality affected to blended coal quality [J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(8): 75-79.
- [20] 项茹,张雪红,鲍俊芳,等.高挥发分1/3焦煤参与配煤炼焦试验研究[J].煤炭科学技术,2010,38(2):122-125.
Xiang Ru, Zhang Xuehong, Bao Junfang, et al. Blending test of high volatile 1/3 coking coal for coking purpose [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(2): 122-125.
- [21] 季斌,位革老,张凤桐,等.气煤配煤炼焦对焦炭热性质及孔结构的影响[J].煤炭科学技术,2015,43(5):139-143.
Ji Bin, Wei Gelao, Zhang Fengtong, et al. Coking with gas coal blended affected to thermal property and pore structure of coke [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5): 139-143.
- [22] 张磊,刘文礼,门东坡,等.炼焦煤镜质组反射率直方图及其加和性[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2013,32(7):905-910.
Zhang Lei, Liu Wenli, Men Dongpo, et al. Vitrinite reflectance distribution of coking coal and its additivity [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2013, 32(7): 905-910.
- [23] 张代林,余亮,郑明东,等.炼焦煤的煤岩特征对其结焦性质的影响[J].钢铁,2009,44(1):15-18,30.
Zhang Dailin, Yu Liang, Zhen Mingdong, et al. Effect of petrographic properties of coking coal on quality of metallurgical coke [J]. Iron & Steel, 2009, 44(1): 15-18,30.
- [24] Pusz S, Kwiecińska B, Kośzorek A, et al. Relationships between the optical reflectance of coal blends and the microscopic characteristics of their cokes [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77: 356-362.

(上接第134页)

- Liu Feilin. Geophysical response characteristics of coalbed methane [J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(2): 113-115.
- [14] 彭苏萍,高云峰.含煤地层振幅随偏移距变化正演模拟研究[J].科学通报,2005,50(S1):131-137.
Peng Suping, Gao Yunfeng. Forward model study on amplitude variation with offset of coal bearing strata [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(S1): 131-137.
- [15] 陈信平,霍全明,林建东,等.煤层气储层含气量与其弹性参数之间的关系:思考与初探[J].地球物理学报,2013,56(8):2837-2848.
Chen Xinping, Huo Quanming, Lin Jiadong, et al. The relation between CBM content and the elastic parameters of CBM reservoirs: reasoning and initial probing [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(8): 2837-2848.
- [16] 彭苏萍,杜文凤,殷裁云,等.基于AVO反演技术的煤层气含量预测[J].煤炭学报,2014,39(9):1792-1796.
Peng Suping, Du Wenfeng, Yin Caiyun, et al. Coalbed gas content prediction based on AVO Inversion [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1792-1796.
- [17] 林建东,陈信平,胡超元,等.煤层气勘探开发从“以工程为主导”到“预测指导下的工程”之转变[J].中国煤炭地质,2012,24(3):48-52.
Lin Jiadong, Chen Xinping, Hu Chaoyuan, et al. Transformation of CBM exploration and exploitation from project dominant to prediction guiding project [J]. Coal Geology of China, 2012, 24(3): 48-52.
- [18] 黄捍东,王彦超,郭飞,等.基于佐普利兹方程的高精度叠前反演方法[J].石油地球物理勘探,2013,48(5):740-749.
Huang Handong, Wang Yanchao, Guo Fei, et al. High precision pre stack inversion method based on the Zoeppritz Equation [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(5): 740-749.
- [19] 周彦,董守华,赵伟,等.Zoeppritz方程近似解拟合精确解影响因素[J].物探与化探,2010,34(4):523-525.
Cheng Yan, Dong Shouhua, Zhao Wei, et al. The influence factors of approximate solution of Zoeppritz Equation [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, 34(4): 523-525.
- [20] Shuey R T. A simplification of the Zoeppritz Equations [J]. Geophysics, 1985, 50(4): 609-614.
- [21] 王玉梅,刘福平,杨长春.典型油藏反射界面的Aki-Richard和Shuey近似误差分析[J].地球物理学进展,2011,26(2):616-624.
Wang Yumei, Liu Fuping, Yang Changchun. The error analysis of Aki-Richards and Shuey approximations of reflectional coefficients at the reflectional interfaces of several type reservoirs [J]. Progress in Geophys, 2011, 26(2): 616-624.