

# 基于煤显微结构的炼焦用煤评价及应用

庞克亮,刘冬杰,王明国,赵恒波,王 超  
(鞍钢集团公司,辽宁鞍山 114009)

**摘要:**为提出适合鞍钢鲅鱼圈分公司的炼焦用煤结构,利用全自动智能型煤岩分析系统分析了鞍钢鲅鱼圈所用不同牌号各炼焦煤的煤岩特征,结合传统炼焦煤煤质指标,对各炼焦煤的煤质特征进行评价,并将煤岩学应用于炼焦配煤煤种调整、配比调整中。结果表明,根据煤岩分类标准,鞍钢鲅鱼圈所用焦煤中含焦煤成分60.2%,肥煤成分31.6%;鲅鱼圈所用炼焦煤中,进口煤煤质较为单一、煤质较好,其中60%以上为单一煤层煤,而国内煤的混煤现象较为严重,单一煤层煤不足20%。煤岩学理论应用于鞍钢鲅鱼圈炼焦生产后,在炼焦煤评价中增加了煤岩学指标,扩大了精煤来源,提高了焦炭质量,焦炭抗碎强度 $M_{40}$ 从2011年的88.11%提高到2013年的88.87%,焦炭耐磨强度 $M_{10}$ 从2011年的6.75%降低到2013年的6.38%。

**关键词:**煤岩;炼焦用煤;配煤;镜质组反射率

**中图分类号:**TQ522 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2016)04-0077-07

## Evaluation and application of coking coal based on coal microstructure

PANG Keliang, LIU Dongjie, WANG Mingguo, ZHAO Hengbo, WANG Chao

(Anshan Iron and Steel Group Corporation, Anshan 114009, China)

**Abstract:** To optimize coking coal structure of Bayuquan Branch, an automatic intelligent analysis system was adopted to analyze the petrology characteristics of different coking coals. Based on the property indexes of traditional coking coal, the property characteristics of coking coal were analyzed and the coal petrography was used to adjust coal varieties and ratios. The results showed that, according to coal petrography classification criteria, 60.2% of coal consumed by Bayuquan branch was coking coal, 31.6% was fat coal. More than 60% of imported coal was single coal and the quality of imported coal was homogeneous property, while the domestic coal was a mixture of several coals and the single coal was lower than 20%. The coal petrography was inserted into coking coal evaluation. The crushing strength ( $M_{40}$ ) increased from 88.11% in 2011 to 88.87% in 2013, the abrasive resistance ( $M_{10}$ ) reduced from 6.75% in 2011 to 6.38% in 2013.

**Key words:** coal petrography; coking coal; coal blending; vitrinite reflectance

## 0 引 言

煤岩学是把煤作为可燃岩石来研究的学科。应用煤岩学则是运用煤岩学的观点和方法来分析处理与煤及其加工有关的问题<sup>[1-2]</sup>。应用煤岩学起源于对成煤原始植物和成煤条件的研究,目前煤岩学已深入到煤炭液化、气化、燃烧及石油勘探等领域<sup>[3]</sup>,而煤岩学应用最广泛的领域当属煤炭加工与利用,如分选、炼焦及煤炭贸易等,煤岩分析指标可直接用

于评价煤的分选性能、炼焦性能、确定炼焦煤配比、预测焦炭强度以及改进工艺流程等。国外在煤岩配煤方面的研究较早,前苏联、美国和日本分别于20世纪50年代、20世纪70年代开始利用煤岩学方法来指导配煤<sup>[4-5]</sup>,我国于20世纪80年代初开始此方面的研究工作<sup>[6-8]</sup>,由于各企业的炼焦用煤结构并不相同,研究方法不可简单借鉴,必须根据本企业的生产特点,开展相应的研究工作<sup>[9-12]</sup>。目前市场上出售的炼焦用煤绝大多数为混煤,而利用传统的

收稿日期:2015-11-18;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.04.017

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAC01B01)

作者简介:庞克亮(1978—),男,辽宁鞍山人,高级工程师,博士,从事煤焦化、洁净煤技术领域的研发工作。E-mail:pangkeliang@163.com

引用格式:庞克亮,刘冬杰,王明国,等.基于煤显微结构的炼焦用煤评价及应用[J].洁净煤技术,2016,22(4):77-83.

PANG Keliang, LIU Dongjie, WANG Mingguo, et al. Evaluation and application of coking coal based on coal microstructure [J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(4): 77-83.

挥发分、胶质层最大厚度  $Y$ 、黏结指数  $G$  等煤化指标无法区分混煤。因此,将镜质组最大平均反射率  $\bar{R}_{0,\max}$  与传统煤化指标相结合,可较准确地确定来煤的煤质特点,为生产配煤提供基础数据,实现科学配煤。

针对国内、国际优质炼焦煤资源日益紧张的情况及鲅鱼圈所处我国东北部港口的独特地理位置特点,鞍钢集团于2012年开展了煤岩配煤技术研究,通过基础理论研究和现场实际应用突破以气、肥、焦、瘦分类方法的传统配煤理念,建立以理论煤岩配煤方案为基础、兼顾传统煤质指标、结合小焦炉试验验证的煤岩配煤技术。经过近两年的研究,鞍钢鲅鱼圈所用煤种发生了巨大变化,扩展了选煤资源。笔者利用全自动煤岩分析仪研究目前鞍钢鲅鱼圈所用不同牌号炼焦煤的煤岩特征,并结合传统炼焦煤煤质指标,分析各炼焦煤的煤质特征,提出鞍钢鲅鱼圈炼焦用配煤的结构特征,研究煤岩学在炼焦配煤煤种调整、配比调整中的应用,建立适合鞍钢的煤岩配煤方法,为今后配比的调整提供理论依据。

## 1 应用煤岩检测技术的发展

应用煤岩学在煤焦化领域的发展中起到了重要的作用。但是,目前仍未见到在同一文献或同一专著中同时明确给出为何用镜质组反射率  $R_e$  代替煤反射率来评价煤的变质程度,镜质组随机反射率  $R_{\text{ran}}$  与镜质组最大反射率  $R_{0,\max}$  的测定原理,镜质组随机反射率与镜质组最大反射率的换算,为什么用镜质组平均最大反射率来代表煤的变质程度以及镜质组反射率、镜质组最大反射率、镜质组平均最大反射率等煤岩分析指标之间的逻辑关系。因此,有必要对上述问题进行梳理,以便使更多煤岩工作者能够更好地发挥应用煤岩学在炼焦生产中的作用。

随着煤变质程度的增高,煤分子的缩聚程度增大,平面碳网格的排列也趋于规律化,在光学特征上则表现为反射率增高。因此,用反射率来代表煤的变质程度较为真实、准确。在显微镜下能够识别的组分,称为显微组分。而煤是由镜质组、丝质组和惰质组3种显微组分组成,在这3种显微组分中,只有镜质组反射率在整个变质过程中变化幅度较大,且规律性较明显。同时,镜质组又是煤中最主要的成分,在煤层中普遍存在,一般占煤显微组分的60%~80%,显微镜下,镜相均匀、便于测定。因此,

选用镜质组反射率作为判定煤变质程度的指标。此外,采用油浸物镜可以提高视野中各显微组分影像的反差和清晰度。

镜质组随机反射率的测定就是在显微镜油浸物镜下,镜质体抛光面上的限定面积内垂直入射光的反射光用光电转换器测定其强度,与已知反射率的标准物质在相同条件下的反射光强度进行对比,得出该测定点的镜质组随机反射率。根据所测各反射率出现的次数,按0.1%的反射率间隔,分别统计各间隔的测点数及其占总数的百分数,或按单个测值计算出镜质组随机反射率的平均值,绘制出镜质组随机反射率的分布图。由于不同角度的反射率值不同,所以在实际测定时,均选其最大反射率来代表镜质组的反射率。

镜质组本身又包含多种显微组分,这些显微组分的反射率也有差异,因此,煤中镜质组最大反射率不是单一数值,实际确定镜质组最大反射率均采用平均值,即镜质组平均最大反射率。

得到镜质组平均最大反射率值的方法有2种,一是依据上述所得的镜质组随机反射率的平均值根据经验公式进行换算;另一种是在测定镜质组反射率时,将光线投到光电转换器上,同时缓慢转动载物台360°,记录旋转过程中出现的最大反射率读数,再根据单个测值或按阶(或半阶)计算镜质组平均最大反射率值。

目前出现的自动煤岩测定系统就是先测定镜质组随机反射率值,求平均值后,再根据经验公式换算成镜质组平均最大反射率值,并对随机反射率值按阶进行数学计算,从而绘制出镜质组随机反射率的分布图。

常用的煤岩学指标主要有煤的镜质组反射率和显微组分。随着显微镜技术的发展、计算机技术的进步,煤岩分析自动化技术被广泛应用于煤岩分析领域。目前,显微组分还暂时无法实现自动测量,但镜质组反射率可以实现自动测量。镜质组反射率的测量被成功引入到自动煤岩分析系统中,代表着煤岩分析自动化技术时代的来临。

## 2 试验样品及设备

试验用煤为2013年鞍钢鲅鱼圈炼焦使用的主要煤种,均取自铁路煤车,共计24个煤样。由于鲅鱼圈的区位优势,在炼焦煤中大量使用国外进口煤。按GB/T 16773—2008《煤岩分析样品制备方法》将

上述煤样制成粉煤光片。

利用德国蔡司 HD 型全自动煤岩分析仪对粉煤光片的镜质组平均最大反射率进行测定。炼焦用煤的其他煤化指标均按相应的国标进行测定。根据 GB/T 15591—2013《商品煤混煤类型的判别方法》对煤样进行单一煤层或混煤类型的判别,分布图分 6 种组合类型:单一煤层煤(编码为 0,无凹口,方差  $S \leq 0.1$ )、简单无凹口混煤(编码为 1,无凹口,  $0.10 < S < 0.20$ )、复杂无凹口混煤(编码为 2,无凹口,  $S \geq 0.20$ )、具 1 个凹口的混煤(编码为 3)、具 2

个凹口的混煤(编码为 4)及具有 2 个以上凹口的混煤(编码为 5)。

### 3 各单种煤的煤岩特征

试验分析了鞍钢鲅鱼圈最近使用的煤种,包括 5 种 1/3 焦煤、6 种肥煤和 13 种焦煤。

#### 3.1 1/3 焦煤煤质分析

5 种 1/3 焦煤中,1 号为国内煤,2 号~5 号为进口煤。各煤种的镜质组反射率分布如图 1 所示,煤质指标见表 1。

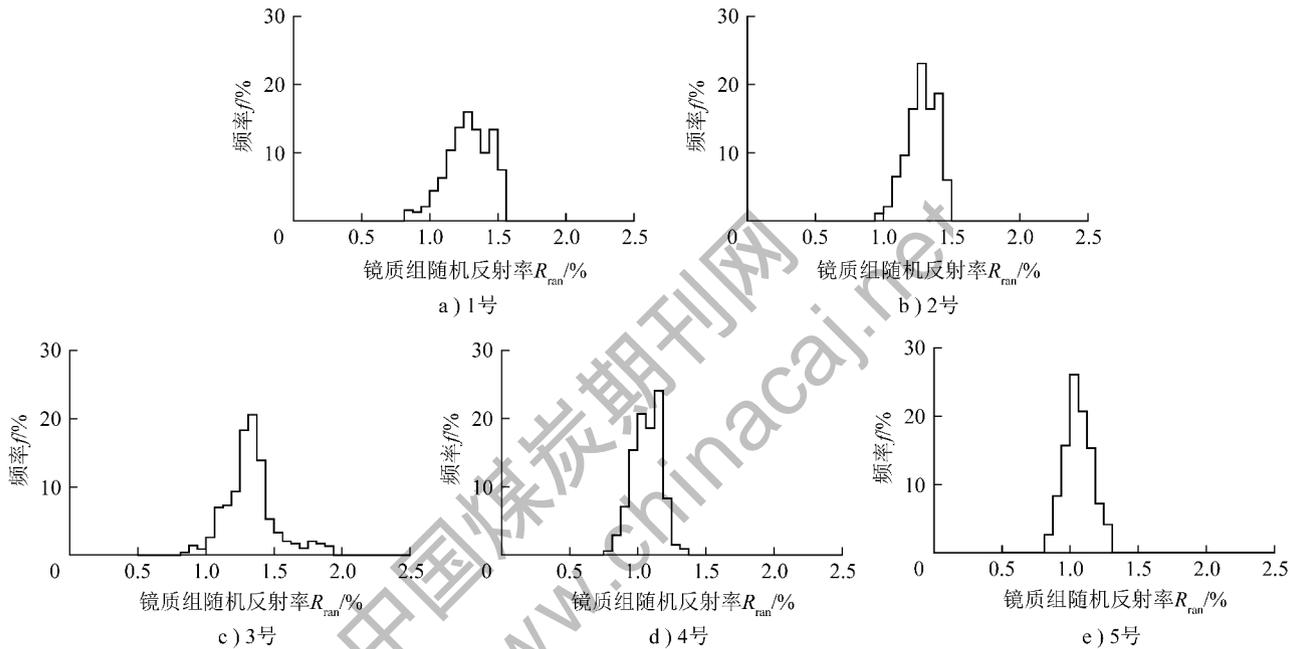


图 1 1/3 焦煤的镜质组随机反射率分布

Fig. 1 Vitrinite random reflectance distribution for 1/3 coking coal of different coal mines

表 1 试验用 1/3 焦煤煤质指标

Table 1 Coal quality index for 1/3 coking coal of different coal mines

煤种	$V_{daf}/\%$	$G$	$Y/mm$	$\bar{R}_{o,max}/\%$	$S$	类型
1 号	33.85	88.7	13.3	1.170	0.106	1
2 号	30.55	84.5	13.0	1.169	0.071	0
3 号	29.30	78.5	16.0	1.224	0.120	3
4 号	34.67	71.0	10.5	0.996	0.066	0
5 号	33.52	90.5	15.0	0.989	0.063	0

由图 1、表 1 可知,1 号和 3 号为简单混煤,2 号、4 号、5 号为单一煤层煤。1 号、2 号、3 号变质程度较高,4 号和 5 号变质程度较低。1 号、2 号、5 号的黏结性较好,3 号次之,4 号最差。从煤岩配煤变质程度叠加理论和煤的黏结成焦机理来讲,1 号和 2

号更适合作为鲅鱼圈的炼焦用 1/3 焦煤,其次是 3 号。结合煤岩配煤岩相,如果各煤种之间搭界较好,出现惰性组分较多的情况下,可适当考虑配用 5 号煤样。另外,如果不受炼焦所产生的煤气利用的影响,在单种煤搭界较好的情况下,为了降低炼焦成本,可适当配用 4 号煤样。

#### 3.2 肥煤煤质分析

鞍钢鲅鱼圈近期使用的 6 种肥煤全部为国内煤,记作 6 号~11 号。各煤种的镜质组随机反射率分布如图 2 所示,煤质指标见表 2。由图 2、表 2 可知,除 9 号为单一煤层煤,其余均为不同程度的混煤,8 号、11 号混煤现象最为严重;7 号和 6 号的变质程度较高,8 号变质程度最低,已属于 1/3 焦煤;除 8 号外,其他几种肥煤的黏结性均较好。综合考虑,肥煤 8 号煤质较差,不建议以肥煤使用,可降价

降档使用;在保证配煤硫分的情况下,含硫量较高的7号和6号具有明显的价格优势,可实现企业低成本配煤;9号、10号、11号的黏结性均较好,可根据市场价格及来煤稳定性等方面进行配置。

本配煤;9号、10号、11号的黏结性均较好,可根据市场价格及来煤稳定性等方面进行配置。

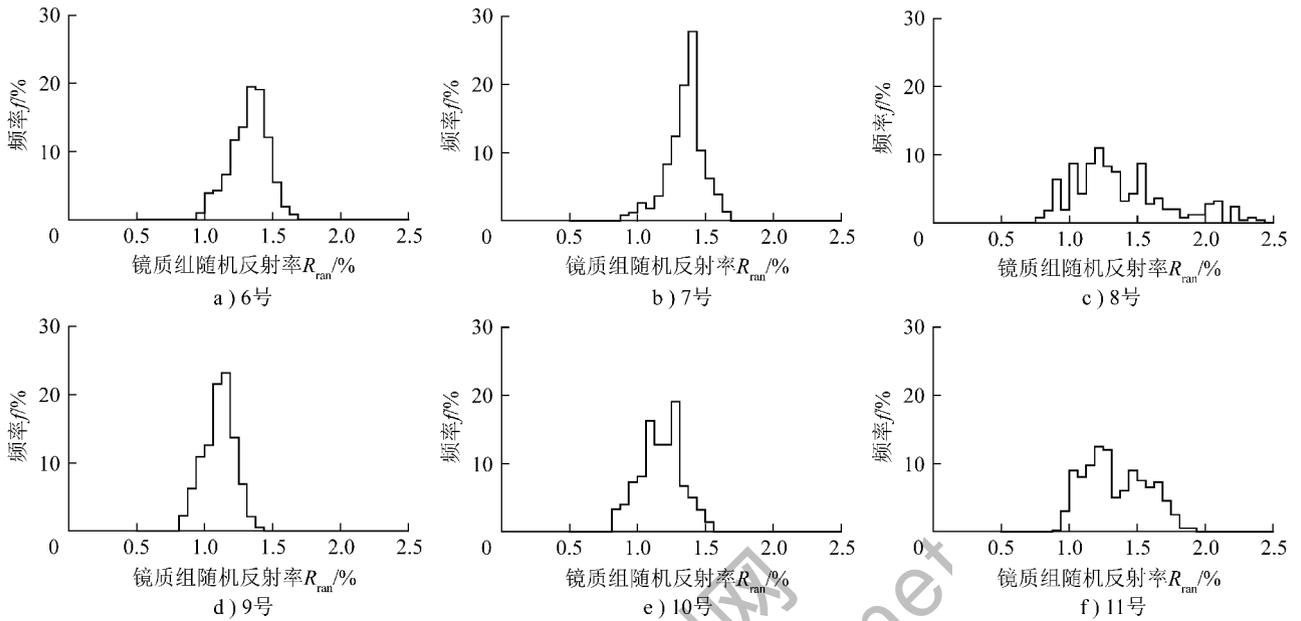


图2 肥煤的镜质组随机反射率分布

Fig. 2 Vitrinite random reflectance distribution for fat coal of different coal mines

表2 试验用肥煤煤质指标

Table 2 Coal quality index for fat coal of different coal mines

煤种	$V_{daf}/\%$	$G$	$Y/mm$	$\bar{R}_{o,max}/\%$	$S$	类型
6号	27.75	90.0	19.5	1.205	0.089	1
7号	28.19	92.0	23.0	1.227	0.088	1
8号	30.72	84.0	20.0	1.116	0.196	4
9号	33.87	93.0	22.0	1.025	0.073	0
10号	31.92	93.0	24.5	1.081	0.102	1
11号	31.62	91.0	22.3	1.048	0.214	4

焦煤;镜质组随机反射率在 1.70% ~ 1.89% 的煤种为瘦煤;镜质组随机反射率在 1.90% ~ 2.50% 的煤种为贫煤。

由表3可知,15号、20号、21号煤的变质程度均较低,20号与21号的G、Y值比较接近,但两者略低于15号。因此,20号与21号的黏结性、结焦性相差不大,二者在配煤过程中可作为替代煤。20号、21号煤的结焦性弱于15号。

24号的变质程度高于15号、20号和21号。24号的G值、Y值也略高于20号、21号,但弱于15号。分析24号煤的活性组分与惰性组分的情况,活性组分占比约70%、惰性组分占比约30%,即活惰比为2.3,出现这一情况,可从24号煤的成煤地理条件进一步研究。

13号、14号、16号、23号的煤阶逐渐升高,23号的瘦煤成分达到17.4%。但4种煤的黏结性和结焦性的优劣顺序不同于煤阶的排序。由G值可以看出,13号煤的黏结成焦性最好,其次是16号和23号,14号较弱。国外3种煤要好于国内的14号,这与成煤因素有关,亦可通过煤岩组成进行分析。与上述4种煤相比,单一煤种煤的19号煤阶最低,肥煤组分占21%,此肥焦煤的黏结成焦性与16号瘦焦煤相当。

### 3.3 焦煤煤质分析

试验分析鞍钢鲅鱼圈最近使用的焦煤有13种,分别记作12号~24号,包括6种国内煤和7种进口煤。其中,12号、14号、17号、18号、19号、20号为国内煤,13号、15号、16号、21号、22号、23号、24号为进口煤。

将鲅鱼圈13种焦煤根据我国确定的各变质阶段煤的镜质组随机反射率范围进行细分并与常规煤质指标一同列于表3。其中,镜质组随机反射率在0.65%~0.89%的煤种为气肥煤或气煤;镜质组随机反射率在0.90%~1.19%的煤种为气肥煤或肥煤;镜质组随机反射率在1.20%~1.69%的煤种为

表3 试验用焦煤煤质指标

Table 3 Coal quality index for coking coal of different coal mines

煤种	$R_{ran}/\%$					类型	S	煤质指标			
	0.65% ~ 0.89%	0.90% ~ 1.19%	1.20% ~ 1.69%	1.70% ~ 1.89%	1.90% ~ 2.50%			$V_{daf}/\%$	G	Y/mm	$\bar{R}_{0,max}/\%$
12号	0	14.6	58.0	17.5	9.9	5	0.293	25.26	85.0	20.0	1.217
13号	0	14.3	81.8	3.9	0	0	0.084	25.21	91.0	19.0	1.409
14号	0	3.0	96.1	0.9	0	1	0.095	21.18	77.5	14.0	1.513
15号	0	70.2	29.8	0	0	0	0.071	26.42	87.0	20.0	1.247
16号	0	0	97.2	2.8	0	0	0.092	21.28	83.5	15.0	1.617
17号	0	38.1	57.7	4.2	0	2	0.171	23.12	79.0	18.0	1.385
18号	6.3	51.9	34.7	7.1	0	4	0.210	26.46	86.3	14.3	1.027
19号	0	21.0	79.0	0	0	0	0.074	26.85	80.0	14.0	1.366
20号	0	69.3	30.7	0	0	1	0.094	26.16	75.0	14.0	1.253
21号	7.0	72.2	20.8	0	0	1	0.106	27.83	77.0	14.5	1.199
22号	0	3.4	66.9	7.2	22.5	3	0.235	23.75	64.3	11.7	1.642
23号	0	0	82.6	17.4	0	0	0.120	18.35	80.0	13.0	1.696
24号	0	52.8	47.2	0	0	1	0.089	25.96	80.0	16.0	1.303
均值	1.0	31.6	60.2	4.7	2.5	—	—	24.45	80.4	15.7	1.406

根据方差S分布情况可知,12号、17号和18号煤均是出现凹口的混煤,其中,12号煤的方差最大,即其混煤情况最严重,其焦煤成分不足60%。这3种煤可降档按肥焦煤使用。

由均值分析可知,工业生产所用传统分类方法的焦煤中含焦煤成分60.2%,不足2/3,而肥煤成分占31.6%,约为1/3,这对传统配煤方法提出了新的挑战。综上所述,进口炼焦煤的煤质较为单一,国产炼焦煤出现了不同程度的混煤现象,因此企业采用以优质进口炼焦煤为主,国产劣质煤为辅的炼焦用煤结构。

## 4 煤岩学在炼焦配煤中的应用

### 4.1 调整配煤配比

配煤方案及焦炭质量见表4。采用配煤方案1的配比进行炼焦生产,再将配煤方案1中1/3焦煤的比例降到11%,焦煤13号比例提高到25%。根据传统配煤方案,增加焦煤的同时减少1/3焦煤,焦炭质量应该有所提高。但表4显示增加焦煤配比后焦炭质量指标不升反降,从传统指标分析很难找到原因,考虑利用煤岩学理论中的镜质组反射率分布解释。

配煤方案1、2配煤的镜质组随机反射率分布如图3所示。由图3a可知,配煤方案1的配煤镜质组

随机反射率分布接近正态分布,分布连续、无明显凹口。图3b在镜质组随机反射率1.1%~1.2%处出现凹口。镜质组随机反射率是表征煤阶的分类指标,如果镜质组随机反射率不连续,出现凹口,说明配煤的煤阶不连续,结焦过程中胶质体的析出不连续,直接影响焦炭质量。因此,配煤方案2即使多配了5%的焦煤,其焦炭质量仍不如配煤方案1所得焦炭。

### 4.2 调整煤种

采用表4配煤方案3的配比进行炼焦生产,再将配煤方案3中的9号肥煤用11号肥煤代替得到配煤方案4。从应用结果看,配煤方案3所得焦炭质量要优于配煤方案4,配煤方案3、4所用配煤的镜质组随机反射率分布如图4所示。由图4a可知,配煤方案3的配煤镜质组随机反射率分布接近正态分布,分布连续、无明显凹口。图4b中方案4在镜质组随机反射率1.2%~1.3%及1.5%~1.6%处出现凹口。镜质组随机反射率不连续,出现凹口,说明配煤的煤阶不连续,造成结焦过程中胶质体的析出不连续,直接影响了焦炭质量。因此,配煤方案4进行肥煤变换后焦炭质量低于配煤方案3所得焦炭。

综上所述,企业在调整配比、煤种时可先利用配煤的煤岩特征进行判断,通过镜质组随机反射率分布可预测调整是否合理,快捷给出调整方案,与传统配煤技术相比,可节省多次小焦炉试验、工业试验浪费的人力、物力。

表4 配煤方案及焦炭质量

Table 4 Coal blending scheme and coke quality

配煤方案	1/3 焦煤		肥煤		焦煤		瘦煤		抗碎强度 $M_{40}/\%$	耐磨强度 $M_{10}/\%$	反应性 CRI/ $\%$	反应后强度 CSR/ $\%$
	煤样	比例/ $\%$	煤样	比例/ $\%$	煤样	比例/ $\%$	煤样	比例/ $\%$				
1	2号	16	6号 9号	15 10	13号 14号 20号	20 10 10	21号 25号	9 10	87.67	6.67	26.60	64.00
2	2号	11	6号 9号	15 10	13号 14号 20号	25 10 10	21号 25号	9 10	87.70	6.70	28.30	61.70
3	1号 4号	8 8	7号 9号	10 15	13号 14号 20号	20 10 19	25号	10	88.62	6.40	30.57	58.80
4	1号 4号	8 8	7号 11号	10 15	13号 14号 20号	20 10 19	25号	10	88.70	6.30	33.70	55.50

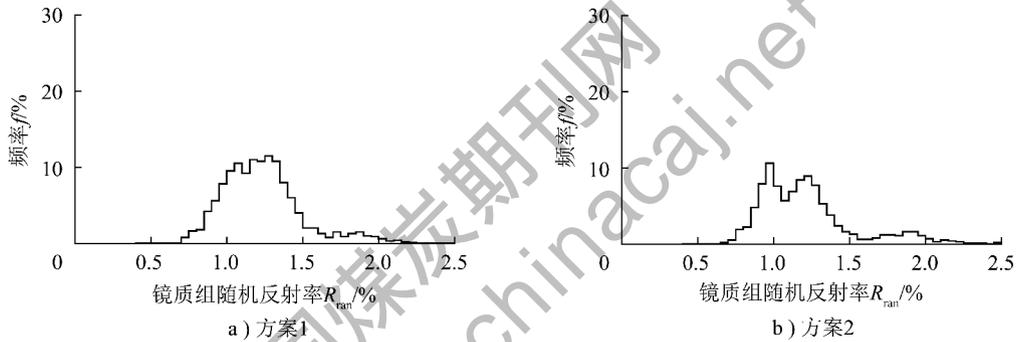


图3 配煤方案1、2配煤的镜质组随机反射率分布  
Fig. 3 Vitrinite random reflectance distribution for coking coal of number 1 and 2

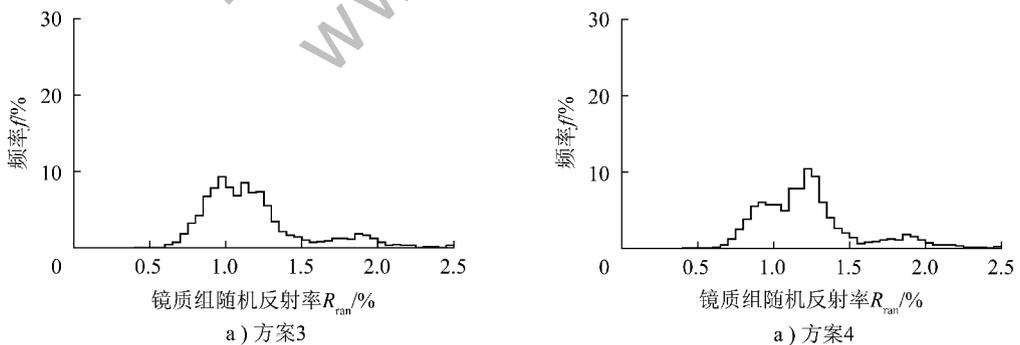


图4 配煤方案3、4配煤的镜质组随机反射率分布  
Fig. 4 Vitrinite random reflectance distribution for coking coal of number 3 and 4

## 5 结 论

1) 煤岩学理论应用于鞍钢鲅鱼圈炼焦生产后,在炼焦煤评价中增加了煤岩学指标,扩大了精煤来源,提高了焦炭质量,焦炭  $M_{40}$  从2011年的88.11%提高到2013年的88.87%,焦炭  $M_{10}$  从2011年的

6.75%降低到2013年的6.38%;

2) 按照煤岩分析结果,工业生产所用传统分类方法的焦煤中含焦煤成分60.2%,而肥煤成分占31.6%;

3) 鲅鱼圈所用炼焦煤中,进口煤的煤质较为单一、煤质较好,而国内煤的混煤现象较为严重,从而

提出了鞍钢鲑鱼圈应采用以国外进口低价煤为主、国内劣质煤为辅的炼焦用煤结构,进口煤从原来的一两种提高到目前的十多种。

#### 参考文献 (References):

- [1] 周师庸. 应用煤岩学[M]. 北京:冶金工业出版社,1985:1-5.
- [2] 张亚云. 应用煤岩学基础[M]. 北京:冶金工业出版社,1990:97-100.
- [3] 张代林,李伟锋,曾涛,等. 炼焦煤的热解过程研究[J]. 煤炭学报,2012,37(2):323-327.  
Zhang Dailin, Li Weifeng, Zeng Tao, *et al.* Study on pyrolyzing process of coking coals[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2):323-327.
- [4] 胡德生,吴信慈,冒建军,等. 宝钢炼焦配煤的技术进步[J]. 钢铁,2004,39(1):9-12.  
Hu Desheng, Wu Xinci, Mao Jianjun, *et al.* Technical progress in coal blending for coking at Baostee[J]. Iron & Steel, 2004, 39(1):9-12.
- [5] 胡德生,吴信慈,戴朝发. 宝钢煤岩配煤方法的研究[J]. 钢铁,2001,36(1):1-5,51.  
Hu Desheng, Wu Xinci, Dai Chaofa, *et al.* Study on Baosteel method of coal blend with petrography[J]. Iron & Steel, 2001, 36(1):1-5, 51.
- [6] 张代林,余亮,郑明东. 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.  
Zhang Dailin, Yu Liang, Zheng Mingdong. Effect of petrographic properties of coking coal on quality of metallurgical coke[J]. Iron & Steel, 2009, 44(1):15-18.
- [7] 张代林,曾涛,李伟锋,等. 炼焦显微结构特征与焦炭性质的关系[J]. 钢铁,2011,46(1):14-18.  
Zhang Dailin, Zeng Tao, Li Weifeng, *et al.* Relation between micro-structure characteristics of coal and coke and quality of coke[J]. Iron & Steel, 2011, 46(1):14-18.
- [8] 胡德生,王文韬,刘其真. 数字化自动煤岩分析技术的开发[J]. 钢铁,2005,40(7):17-21.  
Hu Desheng, Wang Wentao, Liu Qizhen. Development of digital automatically analysis technique for maceral speciation[J]. Iron & Steel, 2005, 40(7):17-21.
- [9] 孟庆波,刘洋,郭武卫,等. 用镜质组反射率分布控制水钢焦炭质量的研究[J]. 煤炭转化,2009,32(4):61-65,88.  
Meng Qingbo, Liu Yang, Guo Wuwei, *et al.* Controlling coke quality of shuicheng steel based on reflectance distribution of coal vitrinite[J]. Coal Conversion, 2009, 32(4):61-65, 88.
- [10] Pang Keliang, Xiang Wenguo, Zhao Changsui. Investigation on pyrolysis characteristic of natural coke using thermogravimetric and fourier-transform infrared method[J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2007, 80(1):77-84.
- [11] 庞克亮,赵长遂,林良生,等. 天然焦的 XRD 及气化特性[J]. 燃料化学学报,2007,35(3):268-272.  
Pang Keliang, Zhao Changsui, Lin Liangsheng, *et al.* XRD and gasification characteristic of natural coke[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2007, 35(3):268-272.
- [12] 庞克亮,刘冬杰,王明国,等. 煤岩学在炼焦生产中的应用[J]. 钢铁,2015,50(10):26-29.  
Pang Keliang, Liu Dongjie, Wang Mingguo, *et al.* Application of coal petrography analysis on coking production[J]. Iron & Steel, 2015, 50(10):26-29.
- [9] 杨彩云,曾爱武,刘振. 运用 CFD 模拟浮选柱内的流体流动[J]. 煤化工,2006,34(1):46-49.  
Yang Caiyun, Zeng Aiwu, Liu Zheng. Study on the hydrodynamics of flotation columns with CFD[J]. Coal Chemical Industry, 2006, 34(1):46-49.
- [10] 刘炯天,王永田,曹亦俊,等. 浮选柱技术的研究现状及发展趋势[J]. 选煤技术,2006(5):25-29.  
Liu Jiongtian, Wang Yongtian, Cao Yijun, *et al.* Current state of research and development trend of flotation column technology[J]. Coal Preparation Technology, 2006(5):25-29.
- [11] 张敏,刘炯天,张建强. 浮选柱气含率及其影响因素对煤泥分选的研究[J]. 煤炭学报,2009,34(6):823-826.  
Zhang Min, Liu Jiongtian, Zhang Jianqiang. Study of flotation column gas holdup and influence factors on slurry separation[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6):823-826.
- [12] 胡卫新,刘炯天,李振,等. 螺旋-静态微泡浮选柱含气率影响因素研究[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(4):151-155.  
Hu Weixin, Liu Jiongtian, Li Zhen, *et al.* Research on factors influencing gas hold-up of a cyclonic-static micro-bubble flotation column[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(4):151-155.
- [13] 程宏志. 机械搅拌式浮选机相似转换原理[J]. 煤炭学报,2000,25(S1):182-185.  
Cheng Hongzhi. The principle of flotation machine scale-up[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(S1):182-185.
- [14] 程宏志,路迈西. 高选择性浮选机设计原理及分选效果[J]. 煤炭学报,2005,30(4):516-520.  
Cheng Hongzhi, Lu Maixi. The principle and performance of the highly-selective flotation cell with oscillating separator[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(4):516-520.
- [15] 张鹏. XJM-S45 型浮选机关键技术参数影响因素的研究[J]. 选煤技术,2012(4):6-9.  
Zhang Peng. Research on effect of influence factors on key technical parameters of XJM-S45 flotation machine[J]. Coal Preparation Technology, 2012(4):6-9.
- [16] 周明远,王世杰,阎明印,等. 相似放大理论在 100 m<sup>3</sup> 浮选机结构设计中的应用[J]. 机械,2015(5):22-24.  
Zhou Mingyuan, Wang Shijie, Yan Mingyin, *et al.* The application of similar amplification theory in the structure design of 100 m<sup>3</sup> flotation machine[J]. Machinery, 2015(5):22-24.

(上接第 76 页)