

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190317

## 不同变质程度煤焦炭光学组织与冷热性能

郭德英<sup>1,2</sup>, 李东涛<sup>1,2</sup>, 张小明<sup>1</sup>, 马超<sup>1,2</sup>, 代鑫<sup>1,2</sup>, 刘洋<sup>1,2</sup>

(1. 首钢集团有限公司技术研究院, 北京 100043; 2. 绿色可循环钢铁流程北京市重点实验室, 北京 100043)

**摘要:**为研究煤的变质程度对焦炭光学组织的影响以及焦炭光学组织和冷热性能的关系,对 30 余种炼焦煤的镜质体最大反射率以及成焦后焦炭的光学组织和冷热性能进行测试。结果表明,焦炭的光学组织随炼焦煤的变质程度呈现规律性变化,镶嵌结构体积分数随镜质体最大反射率变化可分为快速增加、平稳和缓慢下降 3 个阶段; $\Sigma$ ISO 体积分数随镜质体最大反射率的变化趋势与之相反。焦炭的冷热性能和光学组织体积分数之间可以建立回归方程,焦炭的反应性随着 $\Sigma$ ISO 体积分数的增加而升高,而反应后强度随镶嵌结构体积分数的增加而升高。回归方程用于指导炼焦生产后,经济效益显著。

**关键词:** 炼焦煤; 镜质体最大反射率; 焦炭的光学组织; 焦炭质量

**文献标志码:** A **文章编号:** 0449-749X(2020)04-0020-07

## Optical structure and thermal and cold properties of different rank coal coke

GUO De-ying<sup>1,2</sup>, LI Dong-tao<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-ming<sup>1</sup>,  
MA Chao<sup>1,2</sup>, DAI Xin<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>1,2</sup>

(1. Shougang Research Institute of Technology, Shougang Group Co., Ltd., Beijing 100043, China;

2. Beijing Key Laboratory of Green Recyclable Process for Iron and Steel  
Production Technology, Beijing 100043, China)

**Abstract:** In order to study the influence of coal metamorphism on coke optical structure and the relationship between coke optical structure and cold-hot properties, the maximum reflectance of vitrinite of more than 30 coking coals and the optical structure and cold and hot properties of coke after coking were tested. The results demonstrated that coke optical textures displayed regular changes with the degrees of coal metamorphism. The results show that the optical structure of coke changes regularly with the degree of metamorphism of coking coal, and the volume percent of mosaic structure can be divided into three stages: rapid increase, steady and slow decrease with the maximum reflectance of vitrinite; the change trend of  $\Sigma$ ISO volume percent with the maximum reflectance of vitrinite is opposite. A regression equation can be established between the thermal and cold properties of coke and the volume percent of optical structure. The reactivity of coke increases with the increase of  $\Sigma$ ISO volume percent, while the strength after reaction increases with the increase of the volume percent of mosaic structure. After the regression equation is used to guide coking production, the economic benefit is remarkable.

**Key words:** coal; maximum reflectance of vitrinite; coke optical texture; coke quality

焦炭在高炉炼铁中起着供热、还原、支撑和供碳 4 个作用,随着高炉大型化和富氧喷吹技术的发展,骨架作用越来越重要<sup>[1-8]</sup>,通常意义的冷态强度指标( $M_{40}$ 、 $M_{10}$ )已不足以全面评价焦炭在高炉内的性能。因此,反映焦炭热性能的指标(CSR、CRI)越来越被广大炼焦炼铁工作者所关注<sup>[9-11]</sup>。影响焦炭冷热性能的主要因素之一是焦炭的光学组织。焦炭在高炉内进行的炭化、气化反应以及焦炭热强度指标均与焦炭的显微结构有关<sup>[12]</sup>。而焦炭的光学组织

主要与炼焦煤的变质程度有关<sup>[10,13]</sup>。近年来,多个研究机构分别对焦炭的光学组织和冷热性能的定性关系进行了描述,陈鹏<sup>[14]</sup>、周师庸<sup>[15]</sup>以及张代林等<sup>[16]</sup>均提出过利用回归方程描述焦炭的光学组织和冷热性能的定性关系。

本研究在首钢京唐钢铁联合有限责任公司(简称首钢京唐公司)半工业化 300 kg 级焦炉进行试验,分别对不同变质程度的单种煤和配合煤成焦后焦炭的光学组织和冷热性能的定性关系进行了研

究,并建立了回归方程。该回归方程用于指导首钢京唐公司的炼焦配煤工作,效果良好。

## 1 试验方法

### 1.1 试验用煤

试验用煤取自首钢京唐公司和迁安中化煤化工有限责任公司的生产用煤,产地包括中国、澳大利亚和新西兰等多个国家,煤种涵盖了气煤、1/3焦煤、肥煤、焦煤和高变质程度的贫煤以及瘦煤,总计30余个品种。

### 1.2 试验设备

#### 1.2.1 半工业化300 kg级焦炉

在半工业化300 kg级焦炉进行炼焦试验,采用纸箱侧方装煤方式进行装煤,炭化室宽度为450 mm,结焦时间为19.5 h,加热温度最高为1 060 °C,出焦时保证焦饼中心温度为950 °C以上,入炉煤水分为10%,细度为75%。

分别按照 GB/T212—2008《煤的工业分析方法》、GB/T 2006—2008《焦炭机械强度的测定方法》和 GB/T 4000—2008《焦炭反应性及反应后强度试

验方法》对焦炭的工业分析、冷态强度和热态强度进行测定。

#### 1.2.2 煤的镜质体反射率和焦炭的光学组织测定

采用德国 Leica DMRXE 型光学显微镜和鞍山科翔仪器仪表公司 MCA Smartscope 全自动煤岩分析系统测定炼焦煤的镜质体最大反射率和焦炭的光学组织。

按照 GB/T 16773—2008《煤岩分析样品制备方法》制备光片。将块煤破碎到规定粒度(一般为0.1~1.0 mm),与黏结剂按一定比例混合,搅拌均匀后凝固成型,然后将样品的一面经过粗磨、细磨、精磨和抛光等工序最终制成煤光片。按照 GB/T 6948—2008《煤的镜质体反射率显微镜测定方法》测定炼焦煤的镜质体最大反射率。

以同样方法制备焦炭光片。按照 YB/T 077—1995《焦炭光学组织的测定方法》测定焦炭的光学组织。将焦炭光片置于偏光显微镜下,白光入射,正交偏光下插入石膏板,使视域呈现一级红的干涉色,通过油浸物镜观察,采用数点法统计各光学组织的体积分,各光学组织的划分标准见表1。

表1 焦炭光学组织划分标准

Table 1 Standard for classification of optical microstructure of coke

| 序号 | 类别       | 光学显微镜下特征                     |
|----|----------|------------------------------|
| 1  | 各向同性结构   | 气孔边缘光滑且表面平坦                  |
| 2  | 细粒镶嵌结构   | 各向异性单元尺寸小于1.0 μm             |
| 3  | 中粒镶嵌结构   | 各向异性单元尺寸为1.0~5.0 μm          |
| 4  | 粗粒镶嵌结构   | 各向异性单元尺寸为5.0~10.0 μm         |
| 5  | 不完全纤维状结构 | 各向异性单元宽度小于10 μm,长度为10~30 μm  |
| 6  | 纤维状结构    | 各向异性单元尺寸宽度小于10 μm,长度不小于30 μm |
| 7  | 片状结构     | 各向异性单元尺寸长度和宽度均不小于10 μm       |
| 8  | 丝质+破片结构  | 保持原煤中的丝质结构及其他一些小片状惰性结构       |

## 2 结果与讨论

### 2.1 煤的变质程度对焦炭光学组织的影响

不同变质程度煤成焦后所表现出的光学组织有明显差异,不同变质程度煤成焦后焦炭的光学组织体积分见表2。

由表2可见,煤的变质程度不同,成焦后焦炭的光学组织不同,低变质程度煤挥发分高,加热熔融后生成的胶质体含量少,有时虽全部熔融,但侧链及官能团多,化学活性大,易分解,大分子不易聚集,导致焦炭中有较多的各向同性结构。焦炭的镶嵌结构单

元是由变形的球体形成的,单元的大小直接与煤的变质程度有关,低变质程度煤结焦过程中出现的中间相小球体较小,因此形成的镶嵌结构单元也较小;随着变质程度的升高,大结构镶嵌单元依次增多,形成的中粒镶嵌结构和粗粒镶嵌结构逐渐增多;到高变质程度的瘦煤阶段,成焦后有较大尺寸的纤维状结构和片状结构,纤维状结构和片状结构增多,但由于瘦煤在成焦过程中不能完全软化,丝质+破片结构要明显多于其他变质程度的煤<sup>[17]</sup>。

煤的镜质体反射率 $R$ 是标志煤化程度良好的指标,焦炭的光学组织中各向异性结构(细粒镶嵌结

构+中粒镶嵌结构+粗粒镶嵌结构+纤维状结构+片状结构)和 $\Sigma$ ISO(惰性组织,为各向同性结构和

丝质+破片结构总和)与 $R_{\max}$ (煤的镜质体最大反射率,表征煤的变质程度)的关系如图 1 所示。

表 2 不同变质程度煤成焦后焦炭的光学组织(体积分数)

Table 2 Optical texture content of coke after coking of different degrees of coal metamorphism

| $R_{\max}$ | 各向同性结构 | 细粒镶嵌结构 | 中粒镶嵌结构 | 粗粒镶嵌结构 | 纤维状结构 | 片状结构 | 丝质+破片结构 |
|------------|--------|--------|--------|--------|-------|------|---------|
| 0.55       | 23.92  | 3.82   | 9.92   | 5.34   | 0     | 0    | 57.00   |
| 0.76       | 3.07   | 71.17  | 9.41   | 0.82   | 0.41  | 0    | 15.13   |
| 0.86       | 0      | 85.07  | 3.54   | 0.76   | 0     | 0    | 10.63   |
| 0.87       | 0.71   | 73.99  | 5.91   | 7.57   | 0     | 0    | 11.82   |
| 0.98       | 0      | 36.81  | 47.55  | 4.29   | 0     | 0    | 11.35   |
| 1.03       | 0.38   | 13.19  | 38.82  | 26.96  | 0     | 0.76 | 19.89   |
| 1.21       | 0      | 1.47   | 48.68  | 35.69  | 0     | 0    | 14.16   |
| 1.36       | 0      | 0.37   | 29.17  | 54.50  | 0     | 0    | 15.96   |
| 1.43       | 1.92   | 6.95   | 31.89  | 28.78  | 0.72  | 2.64 | 27.10   |
| 1.81       | 0.65   | 12.58  | 18.06  | 8.36   | 2.58  | 8.71 | 49.06   |

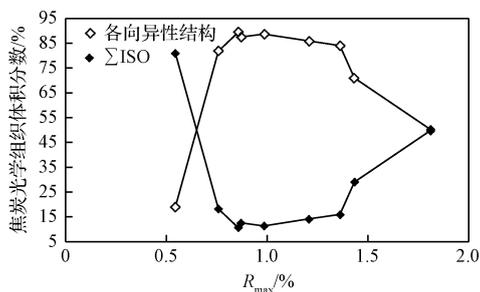


图 1  $R_{\max}$  与焦炭光学组织体积分数的关系  
Fig. 1 Relationship between  $R_{\max}$  and optical texture volume percent of coke

由图 1 可见:(1)随着  $R_{\max}$  增加,焦炭光学组织中各向异性结构体积分数的变化趋势分为 3 个阶段,即快速增加阶段, $R_{\max}$  为 0.55~0.86;平稳阶段, $R_{\max}$  为 0.86~1.36;缓慢下降阶段, $R_{\max}$  为 1.36~1.81。(2) $\Sigma$ ISO 体积分数(惰性组织)的变化趋势与焦炭光学组织中各向异性结构体积分数的变化趋势相反,分为 3 个阶段,即快速降低阶段, $R_{\max}$  为 0.55~0.86;平稳阶段, $R_{\max}$  为 0.86~1.36;缓慢增加阶段, $R_{\max}$  为 1.36~1.81。

当  $R_{\max}$  为 0.55~0.86 时,焦炭的光学组织中各向异性结构体积分数由 20%增加到 85%,此阶段细粒镶嵌结构占主导;当  $R_{\max}$  为 0.86~1.36 时,焦炭的光学组织中以中粒和粗粒镶嵌结构为主,各向异性结构体积分数稳定为 85%~90%;随着变质程度的进一步增加,当  $R_{\max}$  为 1.36~1.81 时,焦炭的光学组织中 $\Sigma$ ISO 体积分数缓慢增加,各向异性结构

体积分数的变化趋势与各向异性结构的变化趋势正好相反。 $\Sigma$ ISO 体积分数随  $R_{\max}$  的变化趋势与各向异性结构的变化趋势正好相反。各镶嵌结构体积分数的变化趋势如图 2 所示。

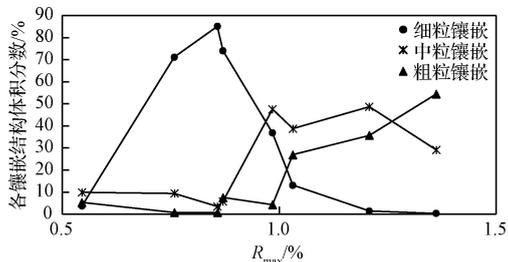


图 2 各镶嵌结构体积分数随  $R_{\max}$  的变化趋势  
Fig. 2 Change trend of mosaic microstructure volume percent and  $R_{\max}$

由图 2 可见,当  $R_{\max}$  为 0.55~0.86 时,细粒镶嵌结构体积分数快速增加,最高达到 85%,之后随着煤变质程度的增加,细粒镶嵌结构体积分数开始减少;当  $R_{\max}$  为 0.98 时,中粒镶嵌结构体积分数开始显著增加;当  $R_{\max}$  为 1.03~1.36 时,中粒镶嵌结构体积分数达到最高,中间有小幅波动;当  $R_{\max}$  为 1.43 时,粗粒镶嵌结构体积分数开始出现显著增加;当  $R_{\max}$  为 1.81 时达到最高值。

## 2.2 焦炭的光学组织与冷热性能关系

焦炭的光学组织与冷热性能的关系分别如图 3~图 6 所示。

由图 3~图 6 可见,随着各向异性结构体积分数的增加,CSR(焦炭的反应后强度)和  $M_{40}$ (焦炭的

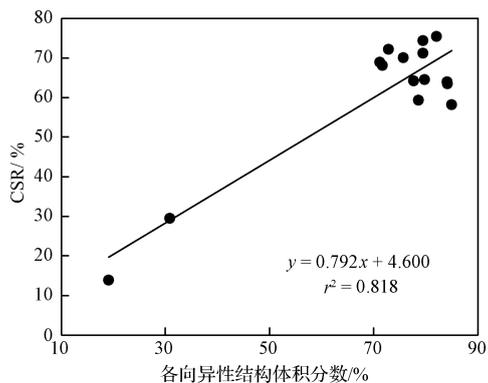


图 3 各向异性结构体积分数与 CSR 的关系

Fig. 3 Relationship between anisotropic volume percent and CSR

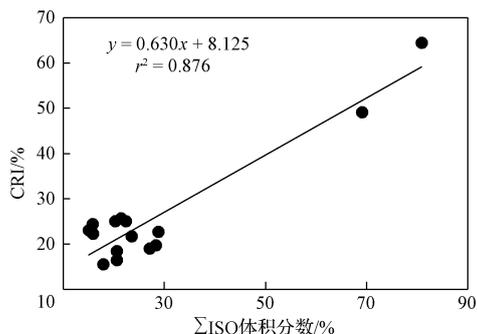


图 4 ΣISO 体积分数与 CRI 的关系

Fig. 4 Relationship between ΣISO volume percent and CRI

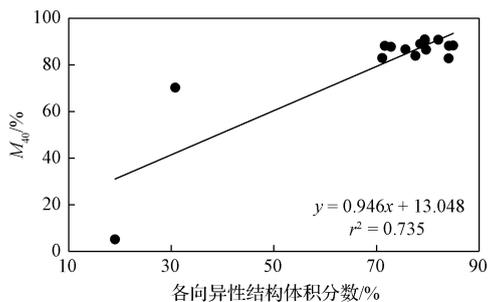


图 5 各向异性结构体积分数与 M<sub>40</sub> 的关系

Fig. 5 Relationship between anisotropic volume percent and M<sub>40</sub>

抗碎强度)呈升高趋势;而 M<sub>10</sub>(焦炭的耐磨强度)和 CRI(焦炭的反应性)随着 ΣISO 体积分数增加而呈升高趋势。原因在于,镶嵌结构能够抑制焦炭裂纹的发展,其体积分数升高,则焦炭强度随之提高;焦炭各光学组织与 CO<sub>2</sub> 反应能力的次序由大到小为惰性组织(丝质+破片结构)、各向同性结构、细粒镶嵌结构、中粒镶嵌结构、粗粒镶嵌结构、纤维状结构和片状结构<sup>[15]</sup>。惰性组织和各向同性与 CO<sub>2</sub> 的反应能力最强,因此,反应性随着 ΣISO 体积分数的增

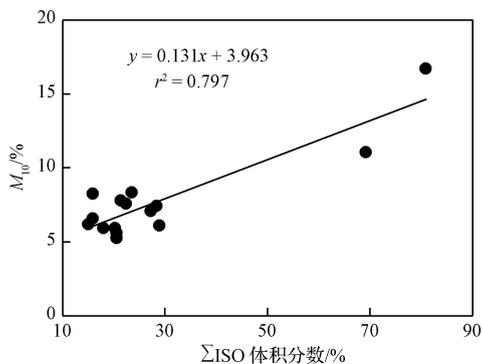


图 6 ΣISO 体积分数与 M<sub>10</sub> 的关系

Fig. 6 Relationship between ΣISO volume percent and M<sub>10</sub>

加而升高。焦炭的 CSR、CRI、M<sub>40</sub> 和 M<sub>10</sub> 与焦炭的光学组织之间线性相关系数平方分别为 0.818、0.876、0.735、0.797,因此,焦炭的 CSR 和 CRI 与焦炭的光学组织的相关性更好。

根据试验数据,利用回归分析确定了焦炭光学组织体积分数与焦炭的 CSR、CRI、M<sub>40</sub> 和 M<sub>10</sub> 的关系,见式(1)~式(4)。

$$\begin{aligned} \text{CSR} = & 45.39 - 1.6 \times \text{各向同性结构} + 0.17 \times \\ & \text{细粒镶嵌结构} + 0.33 \times \text{中粒镶嵌结构} + \\ & 0.2 \times \text{粗粒镶嵌结构} + 0.77 \times \\ & \text{纤维状结构} - 0.71 \times \text{片状结构} \\ R^2 = & 0.85, \text{观测值} = 37, \text{方差 SF} = 5.85 \times 10^{-11} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{CRI} = & 37.21 + 1.32 \times \text{各向同性结构} - 0.11 \times \\ & \text{细粒镶嵌结构} - 0.22 \times \text{中粒镶嵌结构} - \\ & 0.15 \times \text{粗粒镶嵌结构} - 0.59 \times \\ & \text{纤维状结构} - 0.51 \times \text{片状结构} \\ R^2 = & 0.88, \text{观测值} = 37, \text{方差 SF} = 1.85 \times 10^{-12} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} M_{40} = & 98.99 - 3.49 \times \text{各向同性结构} - 0.2 \times \\ & \text{细粒镶嵌结构} - 0.11 \times \text{中粒镶嵌结构} - \\ & 0.17 \times \text{粗粒镶嵌结构} + 0.67 \times \\ & \text{纤维状结构} + 2.34 \times \text{片状结构} \\ R^2 = & 0.92, \text{观测值} = 37, \text{方差 SF} = 2.22 \times 10^{-15} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} M_{10} = & 10.88 + 0.28 \times \text{各向同性结构} - 0.03 \times \\ & \text{细粒镶嵌结构} - 0.05 \times \text{中粒镶嵌结构} - \\ & 0.05 \times \text{粗粒镶嵌结构} - 0.25 \times \text{片状结构} \\ R^2 = & 0.85, \text{观测值} = 37, \text{方差 SF} = 2.83 \times 10^{-11} \end{aligned} \quad (4)$$

式(1)中细粒镶嵌结构、中粒镶嵌结构、粗粒镶嵌结构和纤维状结构的系数均为正数,说明这几种

结构对焦炭溶损反应起到抑制的作用,其系数越大,对焦炭 CSR 起的正作用就越大;各向同性和片状结构的系数为负数,说明各向同性结构和片状结构不利于提高焦炭的 CSR。式(2)中除了各向同性结构的系数为正数,各镶嵌结构前的系数均为负数,说明各向同性结构体积分数有利于提高焦炭的 CRI,而镶嵌结构对焦炭的 CRI 起到抑制作用,分析原因如下。

(1)焦炭裂纹的产生和发展是由机械力和热内应力引起的,而镶嵌结构的结合界面是曲折的,焦炭产生裂纹时要迂回发展,需要的能量大,因而镶嵌结构对裂纹的产生和损坏起到抵制作用。

(2)镶嵌结构颗粒间的间隙均匀分布,焦炭在热膨胀时应力分散,对热冲击起到缓冲作用<sup>[14]</sup>。

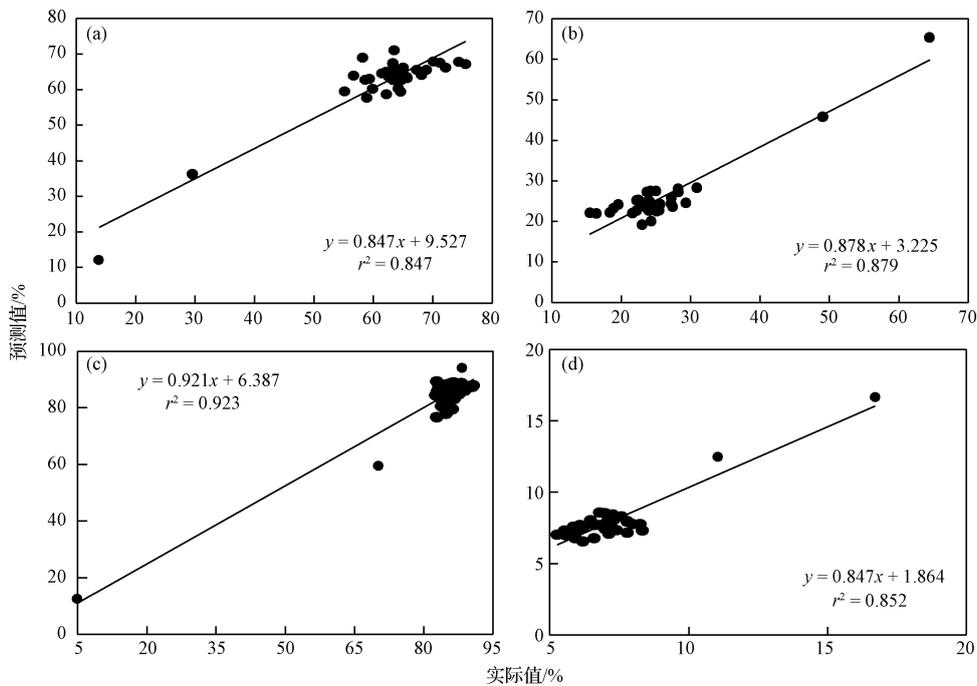
(3)各镶嵌结构单元之间以化学键相连,要使其

断裂需要较大的能量。

因此,这几种镶嵌结构体积分数越高,焦炭反应后强度越高。

镶嵌结构的碳层片尺寸较大,有序性强,层面间距小,微孔和活性碳原子少,只在少数方向可以吸附 CO<sub>2</sub> 进行反应,因此该结构与 CO<sub>2</sub> 反应的能力低<sup>[18-19]</sup>;各向同性的碳层片分布较杂乱,层间距较大,定向随机,受到外力作用时容易解体和破碎,不利于提高焦炭的 CSR,其微孔和活性碳原子很容易在各个方向吸附 CO<sub>2</sub> 分子并进行反应,故反应速度快;片状结构间主要以分子力结合,受到外力作用时各层片之间容易滑动,产生微观裂纹,因此,片状结构体积分数过多不利于提高焦炭 CSR。

依据式(1)~式(4)预测的焦炭冷热性能与实际值的关系如图 7 所示。



(a) CSR; (b) CRI; (c)  $M_{40}$ ; (d)  $M_{10}$ 。

图 7 焦炭冷热性能的预测值与实际值的关系

Fig. 7 Relationship between predicted and measured values of coke cold and heat properties

由图 7 可见,CSR、CRI、 $M_{40}$  和  $M_{10}$  的预测值与实际值的关系见式(5)~式(8)。

$$y = 0.847x + 9.527 \quad (5)$$

$$y = 0.878x + 3.225 \quad (6)$$

$$y = 0.921x + 6.387 \quad (7)$$

$$y = 0.847x + 1.864 \quad (8)$$

由式(5)~式(8)可知,CSR、CRI、 $M_{40}$  和  $M_{10}$  的  $r^2$  (线性相关系数平方) 分别为 0.847, 0.879,

0.923, 0.852, 均达到 0.85 以上,因此,该回归方程完全适用于焦炭冷热性能的预测。

## 3 生产应用

### 3.1 生产应用情况

首钢京唐公司自 2008 年投产以来,为保高炉顺行生产,炼焦配煤中强黏结性肥煤和焦煤一直占主导比例。2016 年以来,通过与先进企业进行焦炭的

光学组织对比,发现首钢京唐公司的焦炭光学组织中中粒和粗粒镶嵌结构的体积分数过高,其主要原因是首钢京唐公司高比例配入焦煤和肥煤所致。考虑到肥煤的强黏结性和焦煤资源的日益紧缺,长期高比例配入焦煤和肥煤不仅会增加炼焦成本,而且也不适应未来炼焦生产的发展。结合表 2 可知,1/3 焦煤结焦后以细粒镶嵌结构为主,因此,从 2017 年开始,首钢京唐公司着手调整配煤结构,考虑以一定

比例的 1/3 焦煤替代焦煤,以提高焦炭的光学组织中的细粒镶嵌结构,降低中粒和粗粒镶嵌结构的比例。另外,依据式(1)CSR 与各向异性结构的关系可知,细粒、中粒和粗粒镶嵌结构对焦炭的 CSR 都是正向作用,提高细粒镶嵌结构、降低中粒和粗粒镶嵌结构不会明显造成焦炭的 CSR 劣化。

配入不同比例 1/3 焦煤后首钢京唐公司生产焦炭的光学组织体积分数见表 3。

表 3 配入不同比例 1/3 焦煤后首钢京唐公司生产焦炭的光学组织体积分数

Table 3 Optical texture content of coke after using 1/3JM in Shougang Jingtang

| 1/3 焦配入比例 | 各向同性结构 | 细粒镶嵌结构 | 中粒+粗粒镶嵌结构 | 纤维状结构 | 片状结构 | 丝质+破片结构 | % |
|-----------|--------|--------|-----------|-------|------|---------|---|
| 0         | 0.40   | 4.56   | 74.60     | 1.59  | 0    | 18.65   |   |
| 3         | 1.25   | 8.50   | 50.25     | 4.50  | 0.25 | 34.25   |   |
| 4         | 0.48   | 14.22  | 59.54     | 0     | 0.24 | 25.52   |   |
| 5         | 1.58   | 17.41  | 56.21     | 2.37  | 0    | 22.43   |   |
| 6         | 1.59   | 12.73  | 56.24     | 1.86  | 2.65 | 24.40   |   |
| 7         | 1.24   | 19.80  | 55.94     | 0.99  | 0    | 22.03   |   |
| 8         | 2.64   | 16.35  | 55.05     | 0     | 2.40 | 23.56   |   |
| 9         | 3.99   | 22.19  | 46.39     | 0.25  | 0.25 | 26.68   |   |

由表 3 可见,以 1/3 焦煤替代焦煤后,焦炭光学组织中的细粒镶嵌结构明显增多,中粒和粗粒镶嵌结构下降。

配入不同比例 1/3 焦煤后首钢京唐公司生产焦炭的冷热性能变化情况如图 8 所示。

步增加,最高达 9%,按配入比例平均为 6% 进行保守估算,配煤成本测算结果见表 4。

表 4 首钢京唐公司 2017—2018 年配煤成本测算结果

Table 4 Cost estimation of coal blending in Shougang Jingtang from 2017 to 2018

| 时间              | 1/3 焦煤配入比例/% | 配煤成本/(元·t <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|--------------|---------------------------|
| 2017-01—2017-05 | 0            | 1 451.51                  |
| 2017-06—2018-02 | 4            | 1 445.36                  |
| 2018-03—2018-12 | 6            | 1 433.19                  |

节约配煤成本  $M$  的计算式见式(9)和式(10)。

$$M = ab(c - P) / (365k) \quad (9)$$

$$P = \sum_{i=1}^n x_i p_i \quad (10)$$

式中: $a$  为配加 1/3 焦煤的实际天数; $b$  为全年焦炭产量,取 360 万 t/a; $k$  为成焦率,取 0.79; $c$  为配加 1/3 焦煤前的配煤成本; $P$  为配加不同比例 1/3 焦煤后的配煤成本; $x_i$  为第  $i$  种煤的配加比例; $p_i$  为第  $i$  种煤的价格。

将表 4 的试验数据代入式(9)和式(10)计算可得,配入 4% 的 1/3 焦煤后节约成本为 2 073 万元,配入 6% 的 1/3 焦煤后节约成本为 6 862 万元。配入 1/3 焦煤后,2017—2018 年首钢京唐公司配煤成本共节约 8 935 万元,经济效益显著。

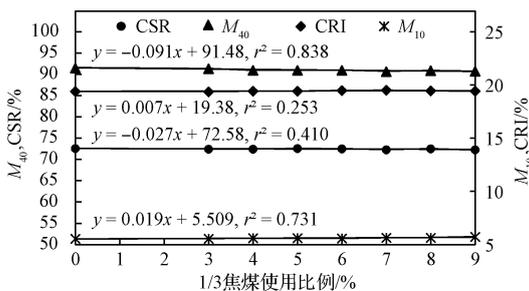


图 8 配入不同比例 1/3 焦煤后首钢京唐公司生产焦炭的冷热性能变化情况

Fig. 8 Variation of coke cold and heat properties after using 1/3JM in Shougang Jingtang

由图 8 可见,配入不同比例 1/3 焦煤后,首钢京唐公司生产焦炭在细粒镶嵌结构体积分数增多、中粒和粗粒镶嵌结构体积分数减少的情况下,焦炭  $M_{40}$  略有降低,其他指标保持稳定。

### 3.2 经济效益分析

首钢京唐公司 2017 年 5 月底开始配加 1/3 焦煤,配入比例为 4%,2018 年 3 月开始,配入比例逐

## 4 结论

(1)焦炭的光学组织主要是由炼焦煤的变质程度决定的,焦炭的光学组织随 $R_{\max}$ 呈规律性的变化,镶嵌结构体积分数随 $R_{\max}$ 变化可分为快速增加、平稳和缓慢下降等3个阶段; $\Sigma$ ISO体积分数随 $R_{\max}$ 的变化趋势与之相反。

(2)通过回归分析,确定了焦炭冷热性能与其光学组织的定量关系,焦炭的反应性随着 $\Sigma$ ISO体积分数的增加而升高,而反应后强度随镶嵌结构体积分数的增加而升高。尽管以往的研究工作者也提出过回归方程,但试验数据来自坩埚焦或20、40 kg试验焦炉,本研究采用300 kg试验焦炉进行,其试验数据更具有指导意义。

(3)将确定焦炭光学组织体积分数与焦炭CSR、CRI、 $M_{40}$ 和 $M_{10}$ 关系的回归方程应用于首钢京唐公司,以岩相配煤方法指导配煤方案的制定,生产应用后焦炭的冷热性能保持稳定,配煤成本明显下降。

### 参考文献:

[1] 杨俊和,冯安祖,杜鹤桂. 冶金焦在高炉内微观结构的变化[J]. 钢铁, 2000, 35(11): 4. (YANG Jun-he, FENG An-zu, DU He-gui. Change of metallurgical coke microstructure in blast furnace[J]. Iron and Steel, 2000, 35(11): 4.)

[2] 周师庸,赵国. 炼焦煤性质与高炉焦炭质量[M]. 北京:冶金工业出版社, 2008. (ZHOU Shi-yong, ZHAO Jun-guo. Properties of Coking Coal and Quality of Coke for the Blast Furnace[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.)

[3] 朱利,折媛,湛文龙,等. 焦炭高温性能对高炉焦炭负荷影响的生产实践[J]. 钢铁, 2018, 53(4): 8. (ZHU Li, SHE Yuan, ZHAN Wen-long, et al. Practice for effect of coke high temperature properties on coke burden in blast furnace[J]. Iron and Steel, 2018, 53(4): 8.)

[4] 顾凯,吴胜利,寇明银. 焦炭热态性能对高炉产质量影响的统计解析[J]. 钢铁, 2019, 54(2): 20. (GU Kai, WU Sheng-li, KOU Ming-yin. Statistical analysis of influence of coke thermal properties on blast furnace[J]. Iron and Steel, 2019, 54(2): 20.)

[5] 张小明,马超,李东涛,等. 延长碳化时间对焦炭性能的影响[J]. 中国冶金, 2019, 29(6): 6. (ZHANG Xiao-ming, MA Chao, LI Dong-tao, et al. Influence of extending carbonization time on coke performance[J]. China Metallurgy, 2019, 29(6): 6.)

[6] 姚昭章. 炼焦学[M]. 北京:化学工业出版社, 2004. (YAO Zhao-zhang. Coking Science[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004)

[7] 谢全安,魏侦凯,郭瑞,等. 焦炭热性质评价方法的研究进展[J]. 钢铁, 2018, 53(9): 1. (XIE Quan-an, WEI Zhen-kai,

GUO Rui, et al. Present situation of evaluation method of coke thermal properties[J]. Iron and Steel, 2018, 53(9): 1.)

[8] 吕庆,王岩,谢海深,等. 灰成分及光学组织对焦炭热性能的影响[J]. 中国冶金, 2016, 26(8): 8. (LÜ Qing, WANG Yan, XIE Hai-shen, et al. Effect of ash composition and optical texture on coke thermal property[J]. China Metallurgy, 2016, 26(8): 8.)

[9] 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, 35(5): 104. (LIU Shang-chao, CHEN Peng, XIANG Ru, et al. Analysis on factors affected to thermal performances of coke[J]. Coal Science and Technology, 2008, 35(5): 104.)

[10] ZHANG Wei-ji, SHI Ting, ZHANG Qi-feng, et al. Coke texture, reactivity and tumbler strength after reaction under simulated blast furnace conditions[J]. Fuel, 2019, 251: 218.

[11] 李杰,宋灿阳,李小静,等. 高炉喷吹煤粉燃烧性与反应性的研究与应用[J]. 中国冶金, 2019, 29(1): 8. (LI Jie, SONG Can-yang, LI Xiao-jing, et al. Research and application of combustibility and reactivity of pulverized coal injected in blast furnace[J]. China Metallurgy, 2019, 29(1): 8.)

[12] Li Ke-jiang, Rita Khanna, Zhang Jian-liang. The evolution of structural order, microstructure and mineral matter of metallurgical coke in a blast furnace: A review[J]. Fuel, 2014, 133: 194

[13] 薛改凤,许传智,陈鹏. 煤岩配煤技术在武钢生产中的应用研究[J]. 武汉科技大学学报:自然科学版, 2006, 29(6): 571. (XUE Gai-feng, XU Chuan-zhi, CHEN Peng. Study on the application of coal petrology in blending coal for coking in WISCO[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology: Natural Science, 2006, 29(6): 571.)

[14] 陈鹏. 中国煤炭性质分类和利用[M]. 北京:化学工业出版社, 2001. (CHEN Peng. Classification and Utilization of Coal Properties in China[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001.)

[15] 周师庸,周淑仪. 焦炭光学性质的实用意义[J]. 炼焦化学, 1982(1): 33. (ZHOU Shi-yong, ZHOU Shu-yi. Practical significance of optical properties of coke[J]. Coking Chemistry, 1982(1): 33.)

[16] 张代林,曾涛,李伟锋,等. 煤焦显微结构特征与焦炭性质的关系[J]. 钢铁, 2011, 46(1): 14. (ZHANG Dai-lin, ZENG Tao, LI Wei-feng, et al. Relation between microstructure characteristics of coal and coke and quality of coke[J]. Iron and Steel, 2011, 46(1): 14.)

[17] 傅永宁. 高炉焦炭[M]. 北京:冶金工业出版社, 1995. (FU Yong-ning. Blast Furnace Coke[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995.)

[18] 周师庸. 大型高炉用焦炭质量指标的选择[J]. 钢铁, 1995, 30(8): 1. (ZHOU Shi-yong. Choice of quality index of coke for large blast furnace[J]. Iron and Steel, 1995, 30(8): 1.)

[19] 张代林,林慧新,王晓婷,等. 炼焦煤灰分对其结焦性的影响规律[J]. 钢铁, 2017, 52(8): 10. (ZHANG Dai-lin, LIN Hui-xin, WANG Xiao-ting, et al. Influence of ash of coking coals on its coking property[J]. Iron and Steel, 2017, 52(8): 10.)