

高炉喷吹煤粉的粉体流动性与煤质相关性

张卫东^{1 2)} 祁成林¹⁾ 张建良¹⁾✉ 马超¹⁾

1) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083 2) 首钢京唐钢铁有限责任公司, 唐山 063200

✉ 通信作者, E-mail: jl.zhang@metall.ustb.edu.cn

摘要 利用 Carr 粉体流动指数法评价高炉喷吹煤粉的流动特性及喷流特性, 研究了煤岩显微组分、变质程度等煤质特性对高炉喷吹煤粉流动性的影响。研究发现, 流动特性与喷流特性几乎呈负相关。煤变质程度对煤粉流动特性及喷流特性都有显著影响。变质程度低的烟煤, 流动特性差, 喷流特性好; 变质程度高的无烟煤, 流动特性好, 喷流特性差。镜质组体积分数为 60% ~ 70% 时, 流动特性指数较差; 体积分数在 83% ~ 95% 时, 由于影响因素较多, 流动特性与镜质组没有相关性。丝质组与喷流特性正相关, 与流动特性负相关。矿物质与煤粉流动性无相关性。

关键词 高炉; 喷煤; 流动性; 显微组分

分类号 TF053

Correlation between the powder flow ability and coal quality of pulverized coal for a blast furnace

ZHANG Wei-dong^{1 2)}, QI Cheng-lin¹⁾, ZHANG Jian-liang¹⁾✉, MA Chao¹⁾

1) School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Shougang Jingtang United Iron & Steel Co. Ltd, Tangshan 063200, China

✉ Corresponding author E-mail: jl.zhang@metall.ustb.edu.cn

ABSTRACT Carr's flowability index was used to evaluate the flow ability and the jet flow characteristic of pulverized coal for a blast furnace. The effects of coal characteristics including maceral and coal rank on the flow ability during pulverized coal injection in a blast furnace were investigated. The results show that the correlation between the flow ability and the jet flow characteristic is almost negative. Coal rank has remarkable effect on the flow ability and the jet flow characteristic. Bituminous coal with a low metamorphic grade has a poor flow ability and an excellent jet flow characteristic, but anthracite coal with a high metamorphic grade has an excellent flow ability and a poor jet flow characteristic. When the volume fraction of vitrinite is between 60% and 70%, the flowability index is poor. There is no correlation between the flow ability and vitrinite when the volume fraction of vitrinite is between 83% and 90% because of too many influencing factors. Inertinite shows a positive correlation with the jet flow but a negative correlation with the flow ability. It is not correlative between mineral and the flow ability.

KEY WORDS blast furnaces; pulverized coal injection; fluidity; maceral

高炉喷吹工艺从煤粉的制备、输送、分配、计量到设备的防磨等方面, 均涉及气固两相流动的问题^[1]。煤粉流动性对高炉喷吹用煤的整个喷吹过程都有着非常重要的意义。煤粉的流动性包含流动特性与喷流特性两部分: 流动特性主要是管道运输、堆放等高炉外部煤粉的输送性能; 煤粉的喷流特性则是指煤粉喷入高炉后, 在风口回旋区的弥散性。通

常可以认为, 在同样的外部条件下, 煤粉在风口回旋区弥散度越大, 相应的煤粉燃烧率越高, 煤粉放出的有效热量随之增高, 用低价的煤粉代替高价焦炭的效果更加明显。

目前, 关于如何在实验室测量与现场较为接近的高炉喷吹煤粉的流动性研究较少。有学者使用安息角来判断煤粉的输送性能, 通常认为煤粉的安息

角越小,煤粉的流动性越好,因为新磨碎的煤粉表面吸附气体,在煤粉表面形成气膜,煤粉表面的气膜可使煤粉颗粒之间的摩擦阻力减小。此外,新磨煤粒均带同性电荷,具有相互之间的斥力,这也是造成煤粉流动性减小的一个重要原因^[2]。但是,笔者认为以安息角作为高炉喷吹煤粉的流动性的判定依据,论据略显不足,且安息角也不易测量。Carr 粉体流动指数法是实验室判定高炉喷吹煤粉流动性较好的方法,方便且更加接近高炉喷吹实际情况。王玉会等对煤粉粒度、煤粉含水率对煤粉的 Carr 流动性指数的影响做了详细的研究^[3]。本文的研究首先是针对煤粉的灰分、挥发分和固定碳对煤粉在管道中的流动特性及喷流特性的影响,重点介绍不同喷吹用煤的煤岩组分与流动特性及喷流特性的关系,期望可以对指导高炉大喷吹合理配煤及作为高煤比操作的一个理论指导依据。

1 实验原料与方法

采用 Carr 流动指数法来评价高炉喷吹煤粉的流动性^[4-5]。Carr 指数的测定方法主要是以大量的实验数据为基础,然后将实验数据与 Carr 表对照以及指数加和,最终得出判别不同煤粉流动特性及喷流特性好坏的数据。本文仅从煤粉的煤质对流动特

性及喷流特性的影响出发,研究不同的煤质对管道堆积、存储、管道流动特性和煤粉在风口区弥散度的影响。

实验设备采用 BT-1000 型粉体综合特性测试仪。煤粉采用最为常见的七种高炉喷吹用煤,分别选取无烟煤、贫瘦煤和烟煤,几乎包含了中国常用高炉喷吹用煤的所有煤质。

实验用煤粉 70% 以上粒度小于 0.074 mm。在工业分析中,煤粉均采用空气干燥基,七种煤的工业分析结果如表 1 所示;煤岩分析采用 OPTON-蔡司-II 反射显微镜数点法观测,其煤岩成分分析结果如表 2 所示。

表 1 煤粉的工业分析结果(质量分数)

Table 1 Proximate analysis results of the coal samples %

编号	煤种	挥发分	灰分	固定碳
1	阳泉煤	5.75	10.45	83.80
2	潞安煤 A	7.28	10.36	82.36
3	潞安煤 B	11.48	10.39	78.13
4	官地喷煤	12.99	8.62	78.39
5	清徐煤	14.29	10.16	75.55
6	神华煤	30.24	7.77	61.99
7	府谷煤	34.28	6.66	59.06

表 2 煤粉的显微组分分析结果(体积分数)

Table 2 Composition analysis results of coal maceral %

编号	煤种	镜质组	半镜质组	丝质组	半丝质组	壳质组	黏土类	碳酸盐
1	阳泉煤	89.30	—	2.34	—	—	9.36	—
2	潞安煤 A	88.29	—	2.44	—	—	9.27	—
3	潞安煤 B	92.61	—	0.50	—	—	6.90	—
4	官地喷煤	92.61	1.14	0.56	—	0.57	5.11	—
5	清徐煤	86.00	—	0.40	—	—	6.64	—
6	神华煤	59.21	6.93	10.05	17.82	0.40	4.95	0.20
7	府谷煤	52.14	7.98	23.93	9.97	1.14	3.74	1.14

煤岩组分分为七个小种类,镜质组、半镜质组、丝质组、半丝质组、壳质组、黏土类和碳酸盐。由于有些数值在某一煤种上没有体现,所以把以上七小类归纳为三大类:镜质组* = 镜质组 + 半镜质组;丝质组* = 丝质组 + 半丝质组;矿物质* = 壳质组 + 黏土类 + 碳酸盐。

2 结果与讨论

2.1 煤粉的流动性结果

煤粉流动性包括煤粉的流动特性及喷流特性,流动特性主要包括自然坡度角、压缩率、板勺角和均

匀度,以上数据皆由实验测得。煤粉的喷流特性包括崩溃角、差角、分散度和流动特性。崩溃角、差角和分散度由实验测得。将测定值对照 Carr 流动性指数表求出各指数,然后对各指数求和得到煤粉的流动性评价。

压缩率是通过松装密度和振实松装密度得到的,压缩率越低则煤粉越不容易在煤粉仓、罐中压实。自然坡度角即煤粉自然堆积的角度。均匀度由日本株式会社清新企业 LMS-30 激光衍射、散射式粒度分布测定仪测量,其分散剂为水,其值表示煤粉颗粒的均匀程度,该值对煤粉燃烧程度影响较大,一

般认为均匀度大将使燃烧率较低. 由于水分对煤粉流动性的影响较大,所以在实验前先把磨好的煤粉

在烘箱于 110℃ 下烘干,然后进行各个指数的测定测得结果如表 3 所示.

表 3 煤粉的 Carr 流动性指数及喷流特性指数
Table 3 Carr's flowability index and jet flow index of coal samples

煤种	松散松装密度/ (g·cm ⁻³)	振实松装密度/ (g·cm ⁻³)	自然坡 度角/(°)	板勺 角/(°)	压缩 率/%	均匀 度	崩溃 角/(°)	差角/ (°)	分散 度/%	流动性 指数	流动性 描述	喷流性 指数	喷流性 描述
阳泉煤	74.20	98.0	35.0	58.60	24.28	5.14	28.5	6.5	9.05	64.5	中	59.5	中
潞安煤 A	54.71	83.2	49.0	72.60	34.24	5.28	40.0	9.0	15.60	53.0	差	57.5	中
潞安煤 B	78.50	90.0	37.0	68.30	12.78	5.35	39.0	7.5	17.84	73.5	好	61.0	中
官地喷煤	81.50	96.5	45.5	68.20	15.54	4.93	30.0	9.0	4.50	68.5	普通	55.0	中
清徐煤	84.50	93.5	40.5	54.67	9.63	5.50	34.5	6.0	11.22	78.0	好	59.0	中
神华煤	69.00	89.8	39.5	68.83	23.16	5.15	31.5	8.0	26.10	58.0	中	65.0	好
府谷煤	57.50	75.5	42.0	74.50	23.84	5.19	29.0	13.0	32.00	55.5	差	78.5	好

流动特性指数由压缩率、自然坡角、板勺角和均匀度决定. 如表 3 所示,各煤粉对应的均匀度,对照 Carr 指数表,对应值相差不大. 压缩率、自然坡角和板勺角都表示煤粉的堆积、输送性能. 压缩率即为振实松装密度与松散松装密度之差与振实松装密度的商值. 清徐煤流动特性好,主要是因为松散松装密度高,单位体积所装的煤粉较多,压缩率低,同时板勺角小,塑性较差,这种煤粉有利于在管道内随着气流的输送. 对于喷流性的判断,神化煤与府谷煤的分散度较大,也就是所谓的在风口前的弥散度较大,这是造成喷流性能较好的重要原因. 从表 3 还能得出,流动性好的煤粉,喷流特性必然较差;流动性差的煤粉对煤粉管道的摩擦较大,喷流特性较强,在风口回旋区内的覆盖面积较广. 因此,与无烟煤相比,烟煤除了本身含氢较多容易促进燃烧外,自身的喷流性亦较高,在风口回旋区易燃烬.

2.2 煤粉工业分析结果与流动性的关系

工业分析也称作高炉冶炼喷吹煤粉的技术分析或实用分析,其中包括水分、灰分、挥发分和固定碳. 煤工业分析是炼铁工作者初步了解煤质特性的主要指标,也是基本手段,是评价煤质的基本依据^[6]. 本文通过研究工业分析煤粉中的组分对高炉喷吹煤粉流动特性及喷流特性的影响,为炼铁操作人员提供简单的初步判定高炉喷吹煤粉的流动特性及喷流特性的方法. 实验过程中,煤粉在 110℃ 下烘干,所以认为煤粉中不含游离水,而结合水都算在挥发分中.

2.2.1 煤粉工业分析中不同组分与流动特性指数的关系

流动特性指数是评价煤粉在高炉喷吹过程中的输送性能,以及煤粉与管道之间的摩擦程度,煤粉中的固定碳及灰分是影响流动特性指数的重要因素.

(1) 固定碳与流动特性指数的关系. 固定碳是影响煤粉与管道之间的摩擦程度重要因素. 本研究得出的固定碳与流动特性指数的关系如图 1 所示.

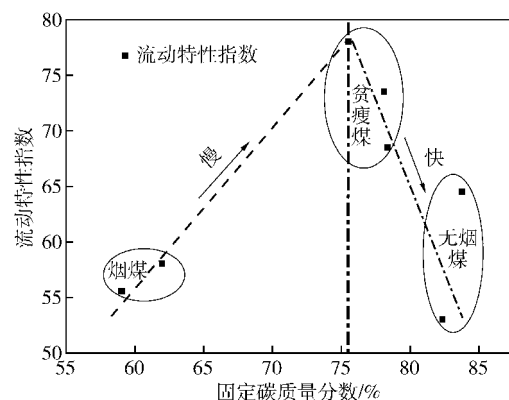


图 1 固定碳质量分数与 Carr 流动特性指数的关系

Fig.1 Relationship between the mass fraction of fixed carbon and Carr's flowability index

从图 1 可以看出,煤粉流动特性指数随固定碳质量分数的增加呈先缓慢递增后快速递减的趋势. 烟煤的固定碳质量分数为 57% ~ 63%,流动特性指数为 55 ~ 60,流动特性指数较低. 随着煤变质程度的升高,即由烟煤变化到贫瘦煤固定碳质量分数达到 75% ~ 80%,流动特性指数也达到较高的数值. 当煤质再升高,由贫瘦煤变化到无烟煤时,固定碳质量分数超过 80%,流动特性指数迅速下降. 由此可见,当单种煤粉固定碳质量分数在 75% 左右时,该煤粉流动特性指数最佳.

(2) 灰分与流动特性指数的关系. 在煤粉中,除了固定碳对管道有摩擦作用,煤粉中灰分对流动特性指数依然有影响,这种影响如图 2 所示.

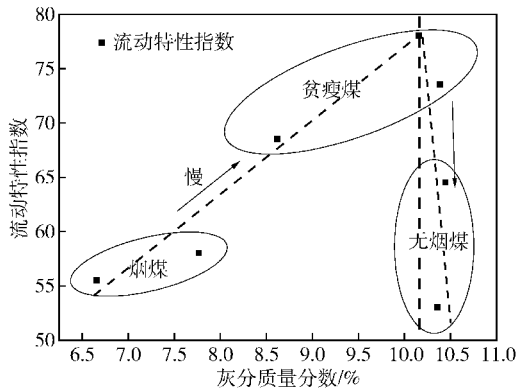


图 2 灰分质量分数与 Carr 流动特性指数的关系

Fig. 2 Relationship between the mass fraction of ash and Carr's flowability index

如图 2 所示: 灰分与流动特性指数的关系趋势与固定碳与流动特性指数趋势基本相同, 烟煤灰分较小, 流动特性指数较差; 贫瘦煤灰分质量分数为 8.5% ~ 10.0%, 流动特性指数较好; 无烟煤灰分超过 10%, 流动特性指数呈迅速递减的趋势且流动性指数相差较大, 这主要是在灰分递增的过程中, 流动特性指数降低得太快所致。根据煤岩分析, 图 1 和图 2 如此变化的原因可以认为是, 一般变质程度较低的烟煤, 固定碳低, 灰分低, 而变质程度相对较高的贫瘦煤及无烟煤, 固定碳高, 灰分也要比烟煤高一些。从显微类型来看, 煤的相对密度随着变质程度的增大而增大也是原因之一^[7]。

2.2.2 煤粉工业分析中不同组分与喷流特性指数关系

喷流特性指数是评价煤粉在高炉喷吹过程中在风口回旋区的弥散程度。煤粉在高炉风口前回旋区燃烧较为特殊, 距离短 1 ~ 3 m, 燃烧时间短只有 10 ~ 20 ms, 温度高 2 050 ~ 2 300 °C, 这种燃烧情况下, 煤粉在高炉风口前的弥散度即煤粉的喷流特性, 将会成为煤粉在风口前燃烧程度的限制性环节。通过流动特性指数、分散度、差角和崩溃角建立起煤粉喷流特性指数的评价体系。煤粉中的挥发分及灰分含量是影响喷流特性指数的重要因素。本实验研究中得出的挥发分与喷流特性指数之间的关系如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 煤粉挥发分质量分数在 15% 以下时, 即煤粉的变质程度在贫瘦煤以下时, 高炉内煤粉的喷吹特性较差, 也就是说, 无烟煤和贫瘦煤的喷流特性指数较差; 烟煤区域, 煤粉喷流特性指数较好, 且随着煤粉挥发分质量分数的增加, 喷流特性指数增加较快。从图 3 的规律中可以得出, 挥发分越高, 煤粉的喷流特性指数越大。

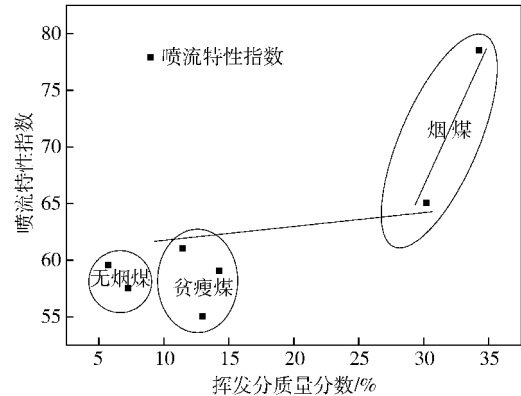


图 3 挥发分质量分数与喷流特性指数的关系

Fig. 3 Relationship between the mass fraction of volatile and jet flow index

灰分对煤粉喷流特性指数的影响示于图 4。高炉喷吹煤粉, 行业规定煤粉灰分质量分数必须小于 12%。当所研究的煤粉灰分质量分数从 6.5% 增加到 8.5%, 喷流特性指数呈减少趋势, 虽然灰分质量分数超过 8.5% 后, 煤粉的喷流指数有所增加, 但基本上仍属于较差的水平。此现象与低挥发分、高灰分在风口区不易燃烧刚好吻合, 也可以作为解释低挥发分、高灰分在风口不易燃烧的重要原因之一。

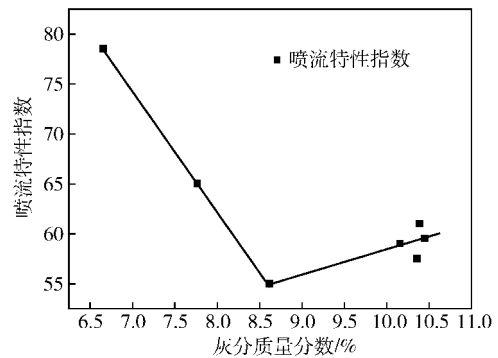


图 4 灰分质量分数与喷流特性指数的关系

Fig. 4 Relationship between the mass fraction of ash and jet flow index

2.3 煤粉煤岩组分与煤粉流动性之间的关系

长期以来高炉实际生产过程中是以混煤的挥发分来决定煤粉的燃烧性能, 这种经验判断的方式来预测煤粉的燃烧性能, 虽然极不科学, 但是仍然取得了一定的效果。这种方法有一定的理论基础, 煤粉的燃烧性能与煤的化学成分密切相关, 也会受到煤质的影响。煤是一种极其复杂的有机物质混合物, 挥发分相同、变质程度相似的情况下, 煤粉的显微组分是否相同, 决定着煤粉的流动性。若煤粉显微组分不同, 它们的流动特性指数及喷流特性指数就会有很大的不同。因此仅用煤粉的工业分析来判断煤粉

的组分与高炉喷吹煤粉的流动特性及喷流特性之间的关系存在一定的局限性,不能全面反映煤粉的特性.

煤岩组分是判断煤粉成因特性的重要条件之一.近年来,煤岩学已经广泛应用于冶金学科中,其中以炼焦配煤最为突出^[8].随着高炉喷吹煤比的不断攀升,很多学者已经开始利用煤岩学来研究煤粉的燃烧机理^[9-12],但是利用煤岩学来解析高炉喷吹煤粉的其他性质还不多见.本文力图利用煤岩学理论通过煤的成因不同来解析高炉喷吹煤粉的流动特性及喷流特性.

2.3.1 煤岩组分与流动特性之间的关系

煤岩组分中单一某个组分不足以说明煤粉的流动特性及喷流特性,但是某一组分会在某一区域对高炉喷吹煤粉的流动性起一定的作用,并且还可用来综合评估煤质组分对高炉喷吹煤粉流动特性及喷流特性的影响.

(1) 镜质组与流动特性指数的关系.烟煤中镜质组含量与流动特性指数的关系如图 5 所示.烟煤的镜质组体积分数为 60%~70%,其流动特性指数较差;无烟煤及贫瘦煤的镜质组体积分数为 83%~95%,其煤粉的流动特性与镜质组含量之间没有具体的相关性.但是,可以把镜质组体积分数达到 83%~95%的煤粉分为无烟煤及贫瘦煤两个区域.总体来说,贫瘦煤的流动性指数比无烟煤高.

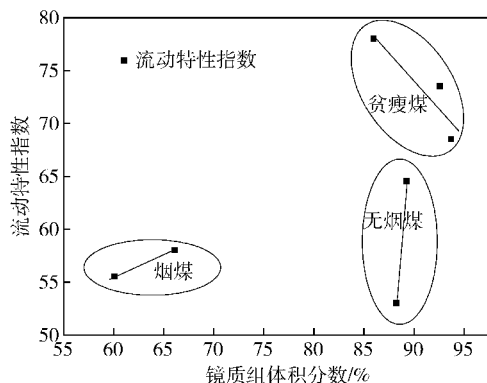


图 5 镜质组体积分数与流动特性指数的关系

Fig. 5 Relationship between the volume fraction of vitrinite and Carr's flowability index

(2) 镜质组与喷流特性的关系.烟煤中镜质组的含量与喷流特性指数的关系如图 6 所示.从图中可以看出镜质组含量与喷流特性关系显著,镜质组含量越低煤粉的喷流特性越好,越容易喷吹;相反镜质组含量越高,喷流特性越差.由于镜质组具有凝胶体特性,对喷流特性影响显著,所以补充说明了固定碳多,喷流特性差的原因.

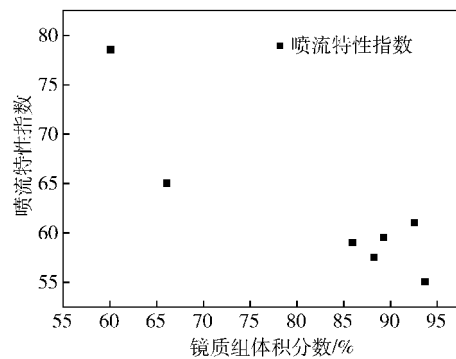


图 6 镜质组体积分数与喷流特性指数的关系

Fig. 6 Relationship between the volume fraction of vitrinite and jet flow index

2.3.2 丝质组与煤粉流动性之间的关系

(1) 丝质组与流动特性指数的关系.烟煤中丝质组的含量与流动特性指数的关系如图 7 所示.从图中可以看出,在丝质组体积分数达 27% 以上的烟煤中,流动特性较差.丝质组越少时,一般来说,煤粉的流动特性越好.

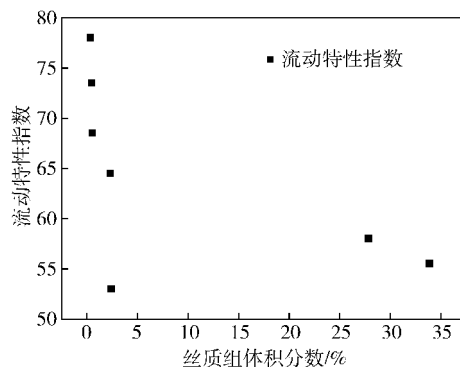


图 7 丝质组体积分数与流动特性指数的关系

Fig. 7 Relationship between the volume fraction of inertinite and Carr's flowability index

(2) 丝质组与喷流特性的关系.烟煤中丝质组的含量与喷流特性指数的关系如图 8 所示.从图中可以看出:丝质组含量越低,喷流特性越差;丝质组含量越高,煤粉的喷流特性越强.变质程度低的烟煤丝质组含量越高,变质程度越高,丝质组含量越低,此性质可补充说明烟煤的喷流特性较好的特点.

解释其原因:从结构特点来看,丝质组中非芳香碳较少,但碳含量很高,芳香层较大,甚至有学者认为丝质组的结构是在晶粒周围含有一些氢和氧的无定形碳.根据其他研究者^[7]用 X 射线衍射分析的结果,随着煤化度的加深,X 射线衍射谱线是变化的,有机质基本结构单元的稠环芳香层增大,碳原子平面网间距缩小,平行和定向排列不断地趋于规则化,到无烟煤阶段有机质才出现类似于石墨呈规则排列

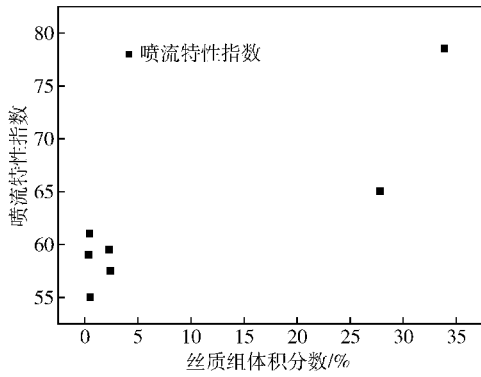


图 8 丝质组体积分数与喷流特性指数的关系

Fig. 8 Relationship between the volume fraction of inertinite and jet flow index

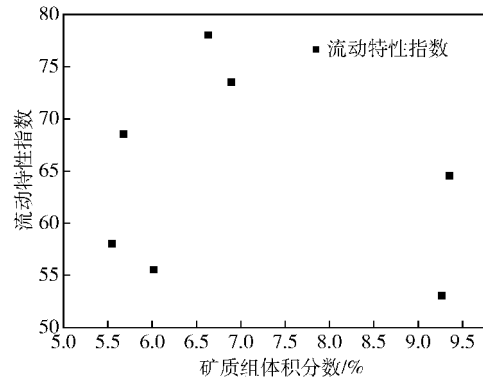


图 9 矿物质体积分数与流动特性指数的关系

Fig. 9 Relationship between the volume fraction of mineral and Carr's flowability index

的三度空间晶态结构. 低变质煤排列无序, 而高变质程度的无烟煤排列相对来说有序, 因此高变质程度的无烟煤, 煤与煤之间的摩擦阻力减小, 气载煤的过程中, 阻力较小, 因此变质程度高的无烟煤流动特性指数较好, 反之低变质程度的烟煤, 微观排列无序, 流动特性指数较差, 而变质程度过高又因为相对密度的增加, 流动特性指数迅速降低. 从分子键的角度, 低变质煤中, 各基本结构单元大都以—O—键结合, 但也还有以—CH₂—键, 以及低分子化合物等的连结, 形成较大的空间缩聚物. 到高变质阶段时, —O—键越来越少, 基本结构单元中六碳环的数量不断增加, 最后形成更复杂的高分子缩聚物, C—O键能为 321 kJ·mol⁻¹, C—CH₂键能为 326 kJ·mol⁻¹, 而高变质程度的无烟煤的碳环 C=C键能为 611 kJ·mol⁻¹, 在模拟风口回旋区高炉喷吹煤粉弥散的过程中, 低变质程度烟煤的 C—O键和 C—CH₂键, 键能较小, 容易断裂成为更小的分子结构, 而高变质程度的无烟煤 C—O键逐渐减少, 无烟煤甚至以碳环 C=C形式存在, 不易断裂, 聚合物与聚合物之间作用力较大, 因此低变质程度的烟煤的喷流特性指数较好, 而高变质程度的无烟煤的喷流特性指数较差.

烟煤中矿物质组的含量与流动及喷流特性指数的关系如图 9 和图 10 所示. 从图 9 和图 10 可以看出, 矿物质对高炉喷吹煤粉流动及喷流特性指数的影响无规律性可循. 其原因是矿物质在煤种含量较少, 并且结构不像镜质组和丝质组复杂, 因此对这种物理现象没有影响.

本研究就煤组分与喷吹煤粉的流动性, 即煤粉的流动特性及喷流特性做了初步的探索, 虽然这方面的机理还有待进一步深入研究, 但仍可以得出一些规律性的认识.

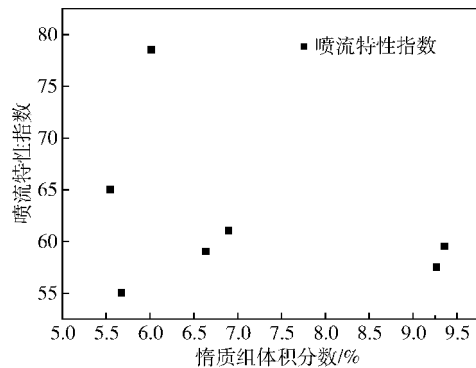


图 10 矿物质与喷流特性指数的关系

Fig. 10 Relationship between the volume fraction of mineral and jet flow index

3 结论

(1) 流动特性与煤粉工业组分的关系: 固定碳质量分数 75% 左右时, 流动特性指数最佳. 灰分与流动特性的关系为, 灰分质量分数为 8.5% ~ 10.0% 的煤粉, 流动特性指数最佳.

(2) 低灰分和高挥发的煤粉喷流特性好.

(3) 丝质组与高炉喷吹煤粉流动特性及喷流特性有显著关系, 可作为评价高炉喷吹煤粉流动性的重要指标. 镜质组对高炉喷吹煤粉的喷流特性影响显著, 但是对于流动特性, 只能说明煤粉镜质组体积分数为 60% ~ 70% 时流动特性较差, 而当镜质组体积分数为 83% ~ 95% 时, 由于影响因素较多, 流动特性与镜质组没有相关性.

(4) 矿物质对高炉喷吹煤粉流动特性及喷流特性影响无规律性.

参 考 文 献

[1] Yang T J, Cang D Q, Ding Y L. Injection of Coal with Rich Oxy-

- gen at BF. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996
(杨天钧, 苍大强, 丁玉龙. 高炉富氧煤粉喷吹. 北京: 冶金工业出版社, 1996)
- [2] Tang Q H, Ma S H. *Quiz of Pulverized Coal Injection at BF*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997
(汤清华, 马树涵. 高炉喷吹煤粉知识问答. 北京: 冶金工业出版社, 1997)
- [3] Wang Y H, Gao B, Song Z P, et al. Study on influence of particle size on coal power Carr index // *The 4th Chinese Society for Metals Youth Annual Conference Proceedings*. Beijing, 2008: 40
(王玉会, 高斌, 宋忠平, 等. 粒度对煤粉 Carr 指数影响研究 // 第4 届中国金属学会青年学术年会论文集. 北京, 2008: 40)
- [4] Carr R L. Evaluating flow properties of solids. *Chem Eng*, 1965, 72(2): 163
- [5] Carr R L. Classifying flow properties of solids. *Chem Eng*, 1965, 72: 69
- [6] Zelkowsky J. *Combustion Theory and Technology of Coal*. Yuan J L, Zhang P F, Translated. Shanghai: East China Institute of Chemical Technology Press, 1990
(Zelkowsky J. 煤的燃烧理论与技术. 袁钧卢, 张佩芳, 译. 上海: 华东化工学院出版社, 1990)
- [7] Zhou S Y. *Applied Antracology*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985
(周师庸. 应用煤岩学. 北京: 冶金工业出版社, 1985)
- [8] Hu D S, Wu X C, Dai C F. Study on Baosteel method of coal blend with petrography. *Iron Steel*, 2001, 36(1): 1
(胡德生, 吴信慈, 戴朝发. 宝钢煤岩配煤方法的研究. 钢铁, 2001, 36(1): 1)
- [9] Xu W R, Du H G. Influence of macerals on the combustion characteristics of pulverized coal injection into BF. *Baosteel Technol*, 1998(5): 30
(徐万仁, 杜鹤桂. 煤岩显微组份对高炉喷煤燃烧特性的影响. 宝钢技术, 1998(5): 30)
- [10] Hu J, Kong F S. Prediction model of coals combustion characteristics based on petrographic factor. *J China Coal Soc*, 2004, 29(2): 213
(胡军, 孔凡朔. 基于岩相因子的煤粉燃烧预测模型. 煤炭学报, 2004, 29(2): 213)
- [11] Wang Z M, Liu R, Lü Q, et al. Effect of coal petro-graphic constituent on combustion ratio of coal in BF coal injection. *J Iron Steel Res*, 2010, 22(5): 23
(王竹民, 刘然, 吕庆, 等. 煤岩组份对高炉喷吹煤粉燃烧率的影响. 钢铁研究学报, 2010, 22(5): 23)
- [12] Zhou S Y, Xu J, Zhao Z F, et al. Study on the char in the race-way of blast furnace with PCI. *Iron Steel*, 2000, 35(12): 9
(周师庸, 徐君, 赵忠夫, 等. 高炉高喷煤水平下对回旋区内残炭的研究. 钢铁, 2000, 35(12): 9)