

煤炭洁净燃烧

中低温热解半焦作为高炉喷吹燃料的现状分析及建议

邹冲¹,马成¹,赵俊学¹,温良英²,白晨光²

(1. 西安建筑科技大学 冶金工程学院,陕西 西安 710055;2. 重庆大学 材料科学与工程学院,重庆 400030)

摘要:为优化高炉燃料结构和降低生产成本,从半焦的基础性能、工艺性质、喷吹效果等方面论述了中低温热解半焦作为高炉喷吹燃料的研究现状,分析了半焦替代喷吹煤粉后存在的主要问题,提出了改善半焦性能的途径和建议。现有中低温热解半焦的煤质特征和多数工艺性质满足高炉喷吹要求,但其可磨性与燃烧性能波动较大,需区别对待。随着半焦添加比例的增加,混煤的燃烧和可磨性能总体呈下降趋势。提出应通过热解过程控制、与其他燃料共热解、催化燃料等方式改善低温干馏半焦性能,增加廉价燃料在喷吹燃料中所占比例,降低高炉炼铁成本。

关键词:高炉喷吹;半焦;工业分析;燃烧性能

中图分类号:TF526 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)01-0057-08

Research status and suggestion of mid-low temperature pyrolysis semi-coke as the PCI fuel in blast furnace

ZOU Chong¹, MA Cheng¹, ZHAO Junxue¹, WEN Liangying², BAI Chenguang²

(1. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: In order to optimize the structure of blast furnace fuel and reduce the production cost, the research status of low temperature pyrolysis semi-coke as the fuel of blast furnace was discussed from the aspects of the basic properties, technological properties and injection effects. The main problems existed in the semi-coke instead of the coal powder were analyzed. The quality of status middle-low temperature pyrolysis semi-coke and most of the technical process met the requirements of the blast furnace, while the grindability and combustion performance of semi-coke fluctuated greatly. With the increase of semi-coke proportion, the combustion and grinding performance of mixed coal presented a declining trend. The quality could be improved by controlling the pyrolysis process of fuel and other co-pyrolysis and catalytic fuel, the ironmaking cost could be reduced by increasing the proportion of cheap fuel in the injection fuel.

Key words: blast furnace injection; semi-coke; proximate analysis; combustion performance

0 引言

中低温热解半焦(又称兰炭)是低变质煤中低温干馏梯级转化的固体产物,尽管部分已被用于铁合金冶炼、电石生产等领域,但大量半焦资源(尤其是粉末状半焦)仍面临无处消化的难题。在钢铁冶金领域,随着我国高炉喷吹量的不断增长,钢铁企业对无烟煤的需求量日益增长,加之无烟煤储量仅占

我国煤炭储量的10.9%,稀缺性不断凸显^[1-3]。因此,寻求新的低成本高质量喷吹燃料一直是冶金工作者研究的重点。将半焦作为高炉喷吹燃料是优化高炉燃料结构和降低生产成本的重要研究方向,引起了广大冶金工作者的关注。

低阶煤干馏半焦在国外已有用作高炉喷吹燃料的先例,如德国、前苏联^[4]开展了将小颗粒褐煤半焦用于高炉喷吹燃料的实践。20世纪末期,国

收稿日期:2016-09-04;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.01.011

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374166);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2016JQ5041)

作者简介:邹冲(1988—),男,陕西西安人,讲师,博士,从事冶金煤洁净利用方面的研究。E-mail: zouchong985@163.com

引用格式:邹冲,马成,赵俊学,等.中低温热解半焦作为高炉喷吹燃料的现状分析及建议[J].洁净煤技术,2017,23(1):57-64.

ZOU Chong, MA Cheng, ZHAO Junxue, et al. Research status and suggestion of mid-low temperature pyrolysis semi-coke as the PCI fuel in blast furnace[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(1): 57-64.

内的一些学者根据半焦固定碳含量高、硫含量低、灰分低等特点,提出将其作为高炉喷吹燃料,替代部分价格高昂的喷吹煤粉的思路^[5-6]。包钢、首钢、鞍钢、酒钢等企业已经开展了前期工业喷吹试验,结果表明,半焦具有输送性能良好、无爆炸性和发热量高的优势,是潜在的优良高炉喷吹燃料之一,具有良好的应用前景^[8]。本文从中低温热解半焦的基础性能、喷吹工艺性质及喷吹效果等

方面论述了中低温热解半焦作为高炉喷吹燃料的现状,分析了半焦添加比例对燃烧性能、可磨性能以及高炉主要指标的影响,并提出了改善半焦性能的建议。

1 半焦作为喷吹燃料的基础性能分析

本文选择文献报道^[1,2,5-8,9-18]的68种中低温热解半焦作为研究对象,工业分析见表1。

表1 文献中68种中低温热解半焦的工业分析

Table 1 Proximate analysis of 68 types of semi-coke samples in literature

编号	煤种	M	A	V	FC	编号	煤种	M	A	V	FC
1	AJ-0 ^[9]	0.70(ad)	12.05(d)	2.54(d)	96.46(daf)	35	神木2 ^[5]	3.40(ad)	4.53(d)	10.09(daf)	89.91(daf)
2	BJ-0 ^[9]	0.55(ad)	28.04(d)	3.09(d)	96.91(daf)	36	神木3 ^[5]	4.49(ad)	4.76(d)	7.10(daf)	92.90(daf)
3	CJ-0 ^[9]	1.10(ad)	17.05(d)	3.91(d)	96.09(daf)	37	神木4 ^[5]	5.48(ad)	5.06(d)	4.33(daf)	95.67(daf)
4	DJ-0 ^[9]	1.36(ad)	40.61(d)	7.32(d)	92.68(daf)	38	天祝 ^[5]	2.35(ad)	5.96(d)	8.29(daf)	91.71(daf)
5	EJ-0 ^[9]	0.50(ad)	13.06(d)	2.71(d)	97.29(daf)	39	西山矿1 ^[7]	1.91(ad)	8.29(d)	12.3(d)	79.41(d)
6	FJ-0 ^[9]	1.92(ad)	35.86(d)	4.48(d)	95.52(daf)	40	西山矿2 ^[7]	1.75(ad)	8.80(d)	10.00(d)	81.20(d)
7	兰炭块煤 ^[10]	7.75(ad)	8.12(d)	5.86(d)	86.02(d)	41	西山矿3 ^[7]	1.26(ad)	9.50(d)	7.84(d)	82.66(d)
8	兰炭粉煤 ^[10]	6.63(ad)	13.40(d)	11.67(d)	74.93(d)	42	西山矿4 ^[7]	1.77(ad)	10.30(d)	5.94(d)	83.76(d)
9	兰炭末A ^[2]	—	10.27(d)	10.44(d)	79.29(d)	43	灵北矿1 ^[7]	2.21(ad)	12.93(d)	10.22(d)	76.85(d)
10	半焦 ^[11]	16.95(t)	9.21(d)	18.65(daf)	73.82(d)	44	灵北矿2 ^[7]	1.91(ad)	12.96(d)	7.91(d)	79.13(d)
11	半焦 ^[1]	6.83(ad)	8.04(ad)	4.43(ad)	80.80(ad)	45	灵北矿3 ^[7]	1.80(ad)	13.32(d)	7.00(d)	79.68(d)
12	低温半焦1 ^[7]	9.00(t)	5.61(d)	20.37(d)	75.16(d)	46	灵北矿4 ^[7]	1.82(ad)	14.44(d)	5.04(d)	80.52(d)
13	低温半焦2 ^[7]	5.90(t)	7.58(d)	21.75(d)	72.32(d)	47	灵泉矿1 ^[7]	1.75(ad)	13.92(d)	8.61(d)	77.47(d)
14	低温半焦3 ^[7]	4.60(t)	6.38(d)	20.21(d)	74.71(d)	48	灵泉矿2 ^[7]	1.14(ad)	14.39(d)	7.17(d)	78.44(d)
15	神木1 ^[12]	13.49(ar)	9.78(ar)	8.62(ar)	68.11(ar)	49	灵泉矿3 ^[7]	0.95(ad)	15.77(d)	6.75(d)	77.48(d)
16	神木2 ^[12]	12.34(ar)	9.56(ar)	7.95(ar)	70.15(ar)	50	兰炭 ^[13]	6.48(ad)	15.45(ad)	14.00(ad)	63.98(ad)
17	神木3 ^[12]	10.64(ar)	10.24(ar)	7.52(ar)	71.6(ar)	51	兰炭1 ^[14]	—	5.09(d)	10.61(d)	84.30(d)
18	府谷1 ^[12]	12.83(ar)	12.41(ar)	6.92(ar)	67.84(ar)	52	兰炭2 ^[14]	—	4.88(d)	5.62(d)	89.50(d)
19	府谷2 ^[12]	6.83(ar)	9.64(ar)	10.3(ar)	73.23(ar)	53	兰炭3 ^[14]	—	5.79(d)	4.39(d)	89.82(d)
20	府谷3 ^[12]	12.65(ar)	9.56(ar)	8.54(ar)	69.25(ar)	54	兰炭4 ^[14]	—	5.94(d)	5.60(d)	88.46(d)
21	府谷4 ^[12]	10.10(ar)	9.08(ar)	6.51(ar)	74.31(ar)	55	兰炭5 ^[14]	—	5.30(d)	5.30(d)	90.28(d)
22	新疆1 ^[12]	16.88(ar)	7.26(ar)	8.40(ar)	67.46(ar)	56	兰炭6 ^[14]	—	5.27(d)	5.27(d)	90.79(d)
23	新疆2 ^[12]	13.75(ar)	9.70(ar)	7.70(ar)	68.85(ar)	57	兰炭7 ^[14]	—	5.06(d)	5.06(d)	84.05(d)
24	宁夏1 ^[12]	13.43(ar)	10.24(ar)	8.54(ar)	67.79(ar)	58	兰炭8 ^[14]	—	5.37(d)	5.37(d)	87.43(d)
25	宁夏2 ^[12]	12.51(ar)	10.62(ar)	7.68(ar)	69.19(ar)	59	兰炭9 ^[14]	—	4.80(d)	4.66(d)	90.54(d)
26	大雁1 ^[5]	5.36(ad)	6.28(d)	16.38(daf)	83.62(daf)	60	兰炭10 ^[14]	—	4.92(d)	4.92(d)	89.68(d)
27	大雁2 ^[5]	5.02(ad)	6.53(d)	12.66(daf)	87.34(daf)	61	神木 ^[15]	0.70(ad)	12.05(d)	2.54(daf)	97.46(daf)
28	大雁3 ^[5]	5.66(ad)	6.71(d)	8.97(daf)	91.03(daf)	62	五龙 ^[15]	0.55(ad)	28.04(d)	3.09(daf)	96.91(daf)
29	大雁4 ^[5]	7.00(ad)	7.17(d)	6.86(daf)	93.14(daf)	63	王营子 ^[15]	1.10(ad)	17.05(d)	3.91(daf)	96.09(daf)
30	先锋1 ^[5]	5.87(ad)	3.10(d)	15.39(daf)	84.61(daf)	64	兰炭末 ^[16]	15.73(ar)	15.12(ar)	12.00(ar)	57.15(ar)
31	先锋2 ^[5]	6.54(ad)	3.41(d)	11.38(daf)	88.62(daf)	65	泰和兰炭 ^[17]	3.88(ad)	11.84(ad)	10.06(ad)	74.22(ad)
32	先锋3 ^[5]	6.69(ad)	3.54(d)	10.69(daf)	89.31(daf)	66	天源兰炭 ^[18]	1.41(ad)	11.54(ad)	9.47(ad)	77.58(ad)
33	先锋4 ^[5]	6.89(ad)	3.67(d)	7.93(daf)	92.07(daf)	67	富油兰炭 ^[18]	0.51(ad)	10.31(ad)	5.98(ad)	83.20(ad)
34	神木1 ^[5]	3.84(ad)	4.24(d)	12.42(daf)	87.58(daf)	68	科林斯达兰炭 ^[18]	3.01(ad)	13.33(ad)	13.32(ad)	70.34(ad)

注:表中“煤种”为原文献的名称,若有多项则分别命名为1,2,……。

1.1 中低温热解半焦的组成分析

由表1可知,中低温热解半焦的煤质特征波动较大,但总体满足高炉喷吹技术条件。其中:

1)多数半焦水分达到I级喷吹用煤的技术条件,适用于高炉喷吹(参见GB/T 18512—2008《高炉喷吹用煤技术条件》),部分半焦水分较高(>12%),这与半焦的熄焦方式(一般采用水泡法熄焦)、堆放、运输环境及存储时间有关,过高的水分会造成磨煤前烘干的燃料使用量增加。

2)多数半焦的灰分达到II级喷吹用煤的技术条件,这是由于半焦中灰分主要由原煤中灰分决定,陕北等地原煤多属于中低灰煤。高炉要求喷吹煤的灰分尽可能低,因为灰分高使得煤粉热值降低,助溶剂的消耗量增加,进而增加了焦比,因此灰分过高的半焦应避免进入高炉(如2、4、6、62号半焦)。

3)大多数半焦的挥发分低于10%,可视为无烟煤的替代燃料,且可实现安全喷吹。但某些品种的半焦挥发分过高(如12~14号),在制粉和喷吹过程中容易引起爆炸,具有安全隐患。

4)多数半焦的固定碳含量大于75%,即多数半焦符合高炉喷吹用煤的固定碳含量要求。

此外,半焦中的硫、磷等有害元素含量均较低^[8,10,13,18],满足高炉喷吹要求。

1.2 半焦的喷吹工艺性质分析

高炉喷吹用煤的工艺性质包括发热量、着火温度、爆炸性、煤灰熔融性等。喷吹燃料在高炉中的主要作用是代替焦炭充当热源,固定碳是半焦发热量的主要来源,通过固定碳含量可初步判断其发热量。半焦发热量、爆炸性与煤质特征的关系如图1所示。由图1a)可见,随着半焦固定碳含量的增加,发热量整体呈现增长的趋势,相关性 $R^2=0.44$,采用一次线性拟合后发现,两者满足弱相关性,关系式为

$$Q = 0.2118FC + 11.0310 \quad (1)$$

高炉喷吹煤粉必须确保制粉和喷吹的安全,最大的不安全因素是煤粉的爆炸。半焦的火焰返回长度越大,半焦燃料的爆炸性越强,由图1b)可知,半焦的火焰返回长度均低于250mm,表明爆炸可能性较小。随着半焦挥发分的升高,半焦火焰返回长度呈现升高趋势, $R^2=0.79$ 。半焦的火焰返回长度和半焦的挥发分构成一次线性关系,关系式为

$$L = 12.3415V - 13.1618 \quad (2)$$

高炉喷吹煤灰熔融性温度应尽可能高,若太低会使煤灰过早流动,导致风口、喷枪前结渣,影响喷

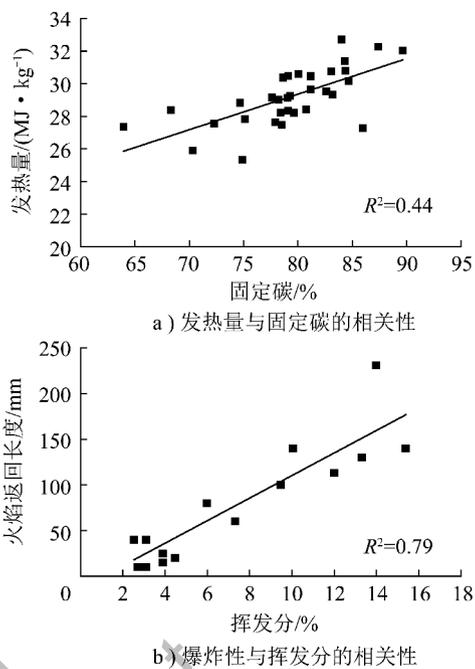


图1 半焦发热量、爆炸性与煤质特征的关系
Fig. 1 Relationship between calorific value, explosibility and coal characterization

吹效果;另一方面,低灰熔融性温度的灰分融化时,未燃尽的原料可能会被黏稠的液体包住,使得氧气无法进入未燃尽原料内部,导致煤料燃烧不完全^[18-19]。不同半焦的熔融特征温度分布如图2所示。由图2可知,多数半焦的灰熔融性温度在1200℃以上,不会带来风口结焦、结渣等不利于高炉生产的现象;个别半焦灰熔融性温度略低,可以将其与灰熔融性温度较高的半焦混合使用从而提高整体燃料的灰熔融性温度,进而达到喷吹要求。

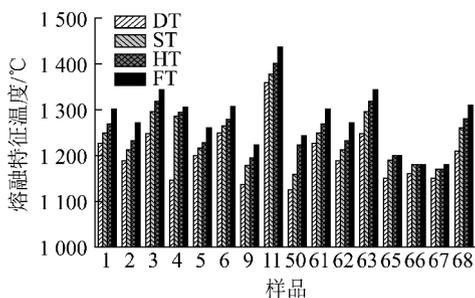


图2 不同半焦的熔融特征温度分布
Fig. 2 Melting characteristic temperatures of different semi-cokes

可磨性指标反映了物料被磨碎的难易程度,决定了物料磨碎的能耗和研磨成本。不同半焦的哈氏可磨性指数分布如图3所示。由图3可知,多数半焦的哈氏可磨性指数分布在30~60,1/3半焦的可磨性低

于高炉喷吹用煤最低要求,这不利于提高磨煤机的出力且增加了磨煤电力消耗^[20]。已有研究表明,煤的哈氏可磨性指数的主要影响因素包括煤变质程度、工

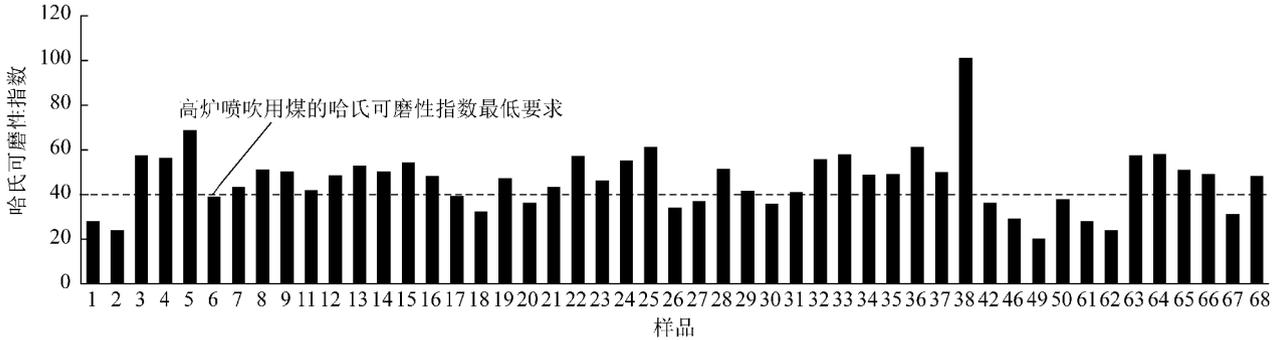


图3 不同半焦的哈氏可磨性指数分布

Fig. 3 Hardgrove grind ability index of different semi-cokes

燃烧性能对喷吹燃料在高炉中的利用率及料层稳定性至关重要。不同半焦的着火温度分布如图4所示。由图4可知,文献报道的半焦着火温度均高于350℃,多数处于370~420℃,与无烟煤的着火温度相似(无烟煤的燃点370~420℃),然而部分半焦的着火温度较高,说明其着火相对困难,燃烧性能可能较差。

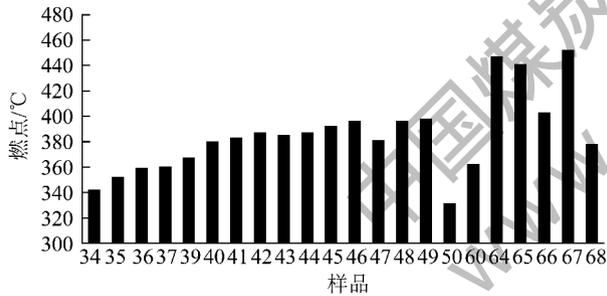


图4 不同半焦的着火温度分布

Fig. 4 Ignition temperature of different semi-cokes

另一方面,目前有关喷吹燃料的燃烧率优劣没有统一的标准,不同学者采用的燃烧测试装置和条件不尽相同,很难对不同半焦的燃烧性能进行比较。因此,本文采用Du等^[22]、何选明等^[23]提出的燃料比率(固定碳/挥发分)方法预测半焦的燃烧率,这些研究表明煤粉及半焦的燃烧率与燃料比率成线性负相关,即随着燃料比率增加,燃烧率降低,如图5所示。将2条拟合线分别延伸,并与文献报道的半焦对比后发现,半焦燃烧率的预测值波动很大,且大部分低于文献报道的无烟煤甚至烟煤的燃烧率。这是由于传统的低温干馏工艺是以提取煤中焦油为主要目的,热解终温较高,煤的热解程度较高,煤中有机质裂解较为彻底,导致反应活性大幅丧失^[24-25]。

业分析、煤岩组分及煤内部孔隙结构^[21]。半焦可磨性的影响因素远比原煤复杂,不仅受其上述固有性质的影响,还受到干馏工艺条件的影响。

因此,半焦的燃烧性能与中低温干馏条件有重要联系,干馏条件的差异性可能导致半焦燃烧性能波动。

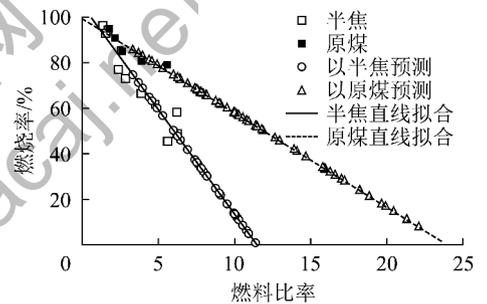


图5 煤/半焦燃烧率与燃料比率的相关性

Fig. 5 Relationship between fuel ration and burnout rate of coal/semi-coke

2 半焦用于高炉喷吹的效果分析

如上所述,半焦的组分特征和多数工艺满足高炉喷吹要求,但其可磨性和燃烧性能可能波动较大。为了使兰炭完全满足高炉喷吹的要求,传统的观点是将一定比例半焦配加到可磨性能良好、燃烧反应性高的烟煤中以改善混合燃料的综合性能^[1,9,26]。在燃烧性能方面,由于多数半焦的燃烧反应性较低,其只可替代较小比例喷吹用无烟煤(一般低于总喷吹量的20%),若大幅提高其比例会造成燃料的燃点升高,燃烧率降低(图6)^[14,17,26]。由于半焦经过低温干馏后,煤中挥发分大量排除,半焦结构致密,不利于氧气进入半焦颗粒内部进行燃烧,另外,半焦灰分相对较高,在混合燃料中,灰分覆盖在煤粉上减少其与氧气的接触面积使得着火困难,影响火焰传播速度以及燃料的燃尽,进而降低混合燃料的燃烧率。图6b)是在烟煤配比为30%的条件下,混合燃

料中半焦配比提高(马克煤配比相应降低)后^[26],混合燃料的燃烧率降低,燃烧性能变差。因此,半焦在混合燃料中的配加比例应根据半焦固有性质进行调整,实际配煤过程中,在满足高炉喷吹混煤燃烧率要求的前提下,可适当添加燃烧性能较好的半焦以降低喷煤成本。

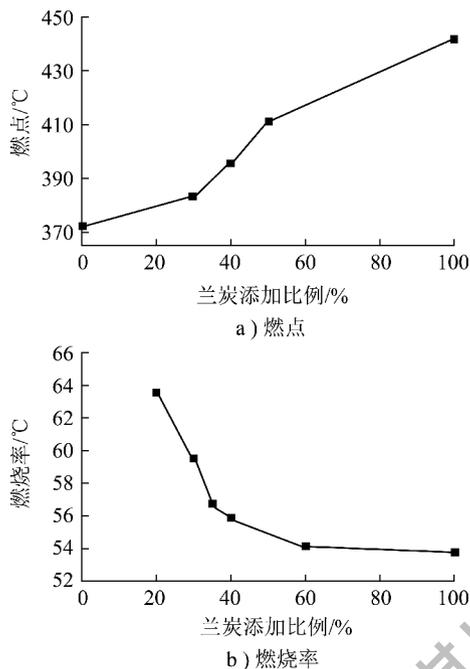


图6 不同兰炭添加比例对混合燃料燃烧性能的影响

Fig. 6 Influence of addition amount of semi-coke on combustion performance of mixed fuel

混配的可磨性指数随半焦添加比例的增加整体呈下降趋势,其中配加30%富油半焦时,混配的可磨性指数出现转折,可能是不同煤化程度的煤岩组分之间的相互作用使可磨性发生一定变化(图7),但在较高的添加比例情况下,混配燃料的可磨性变差^[18]。这是由于在混配燃料的组成煤种不变的情况下,可磨性差的煤种配比对混合煤的可磨性有决定性影响,若增加混合煤中可磨性差的单种煤配比,则混和煤整体的可磨性变差^[27]。因此,混煤中的半焦添加比例应根据半焦自身可磨性进行调整,以达到高炉喷吹要求。

大量实验室研究表明,少量配加半焦对混合燃料的性能影响不大,但工业实践中仍存在不少问题。如包钢喷吹半焦试验期存在磨煤生产不稳定、喷枪磨损严重、燃料比率上升等问题^[11]。半焦配入陕钢高炉喷吹燃料后,造成了高炉除尘灰中碳含量增多,即喷煤燃料的燃烧性能达不到预期^[26]。宝钢2号高炉的生产试验也表明,在试验期加入半焦后,煤比

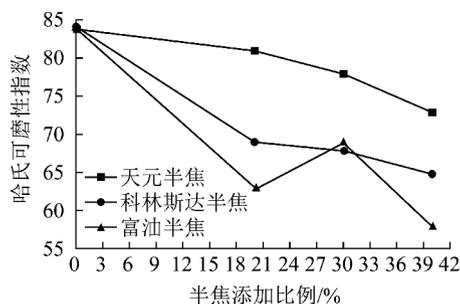


图7 不同半焦添加比例对混煤可磨性的影响

Fig. 7 Influence of addition amount of semi-coke on grinding performance of mixed coal

显著降低而校正焦比则有小幅升高,配加半焦的利用率及在高炉的煤/焦置换比不及预期;若将半焦配比提高到20%以上,可能会对高炉制粉的出力产生影响^[12]。

3 高炉喷吹用半焦性能的改善方法

3.1 热解过程控制方式

过程控制制备方式在煤焦化、气化及液化等煤转化领域受到广泛重视,起到了提高特定产品产率和质量、改善产品性能的作用^[28]。例如,在煤焦化过程中通过延长焦炭的停留时间(即“焖炉时间”),使焦饼后期的热分解和热缩聚程度提高,从而提高焦炭的耐磨强度和反应后强度^[29]。为了利于末端产品的利用,煤低温干馏工艺不应只关注焦油的产率和质量,也应兼顾半焦性能的需求,通过过程控制制备的方式调控煤的干馏进程,在保持较高焦油产出率和质量的同时,使煤中部分挥发分合理地保留在半焦中,优化半焦结构,改善半焦性能。

邹冲等^[30]研究表明,可以通过调控干馏温度使半焦的可磨性达到最佳值(图8a))。这是因为热解过程中半焦组织发生变化,当干馏温度升到一定程度时,煤的大分子结构破坏,导致半焦质点间结合力减弱,可磨性增加。温度继续升高又使半焦进一步收缩,结构变得致密,导致可磨性越来越低^[31-32]。干馏条件对半焦的燃烧性能也有重要影响。研究表明^[23],随着热解温度的升高,半焦的反应活化能升高,燃烧率则呈逐渐降低的趋势(图8b))。何选明等^[23]研究表明,即使采用相同煤种作为干馏原料,制得兰炭的燃烧反应性也存在较大差异,较高的干馏程度不利于半焦的后续燃烧,当半焦中挥发分由小于4%提高到9%~15%,其燃烧性能得到明显改善。上述分析充分证明,在

煤低温干馏过程中可以对半焦的组成和结构进行控制与优化,以改善半焦的可磨性及燃烧性能。建议开展半焦的颗粒粒径、化学结构、岩相组成、矿物质、熄焦方式等因素对燃烧及可磨性能造成影响的更深层次的机理理论研究。

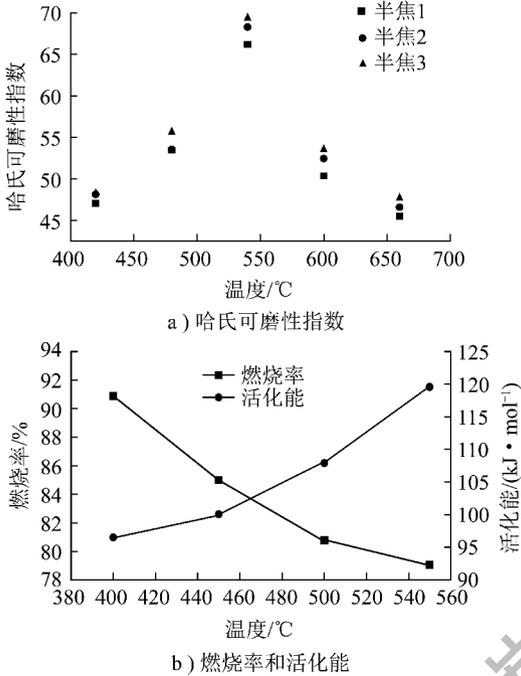


图8 不同热解温度对半焦可磨性及燃烧性能的影响

Fig. 8 Influence of different pyrolysis temperature on grinding and combustion performance of semi-coke

3.2 低阶煤与其他燃料共热解

为改善低阶煤半焦的燃烧性能,以何选明为代表的学者相继开展了低阶煤与冶金废渣以及低阶煤与生物质共热解的研究。研究表明,共热解技术可以明显提高半焦的燃烧性能^[33-34]。在添加一定比例冷轧氧化铁红的条件下,原煤和氧化铁红共热后改善了半焦的孔隙结构,增加了碳氧气固反应界面,且向半焦中带入的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CaO}$ 的催化作用共同促进了半焦燃烧性能的大幅提升^[34]。

倪献智等^[35]将生物质与褐煤共热解,结果表明,生物质与褐煤共热解时存在相互作用,使半焦产率增大,且半焦颗粒孔隙率和比表面积增加,或者颗粒表面发生电极性变化,使半焦的单位吸附量显著增加。然而,Chen等^[36]研究发现生物质与喷吹煤不存在协同热解效应,但生物质与煤粉混合后促进了煤粉在风口区的燃烧。以上研究表明,低阶煤与其他燃料共热解后会对半焦结构和组成造成一定影响,通过共热解方式可改善半焦性能。

3.3 催化燃烧技术改善半焦燃烧性能

在化石燃料燃烧涉及的相关领域,催化燃烧技术是改善燃料燃烧性能的重要手段。根据高炉喷吹半焦的燃烧特点和未燃煤粉生成原因,在喷吹煤中加入适量添加剂可提高燃料的燃烧效率^[37-39]。课题组近期开展了催化燃烧基础试验发现,通过加入 Fe_2O_3 、 CaO 、 MnO_2 三种添加剂,半焦燃烧的失重曲线发生了明显改变,其中 Fe_2O_3 和 CaO 在 3% 及 3 种添加剂在 5% 加入量情况下,半焦的燃尽温度提前(图9)。这表明,此类添加剂在一定的条件下可明显加快半焦的燃烧反应速率,达到良好的助燃催化效果,这为通过催化燃烧技术改善半焦燃烧性能提供了依据。

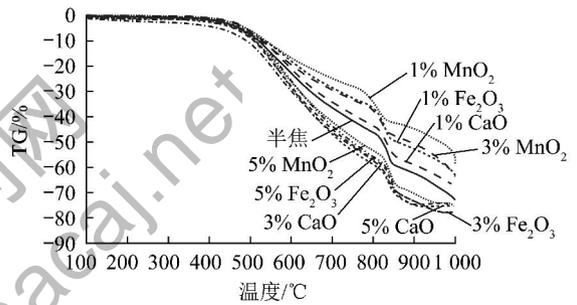


图9 添加不同催化剂后半焦的TG曲线

Fig. 9 TG curves of semi-coke by blending different catalysts

综上所述,以上3种方式可以改善低温干馏半焦可磨性及燃烧性能。对此深入研究,对于增加廉价燃料在喷吹燃料中所占比例,降低高炉炼铁成本,提高半焦的资源化利用率具有重要意义。

4 结论

1) 中低温热解半焦的煤质特征满足高炉喷吹要求,是潜在的优良高炉喷吹燃料之一。半焦具有无爆炸性和发热量高的优势,其发热量和爆炸性分别与其固定碳和挥发分呈线性关系。随着半焦固定碳含量的增加,半焦的发热量整体呈现增长的趋势。随着半焦挥发分的升高,半焦爆炸性升高,但总体满足高炉喷吹要求。

2) 部分工业试验表明半焦的可磨性及燃烧性能普遍较差且波动较大,对高炉运行造成了不利的影响。

3) 通过热解过程控制、与其他燃料共热解、催化燃料等方式可以达到改善低温干馏半焦性能的目的,对此深入研究,对于增加廉价燃料在喷吹燃料中

所占比例,降低高炉炼铁成本,提高半焦的资源化利用率具有重要意义,建议开展相关基础理论及应用研究。

参考文献 (References) :

- [1] 张立国,任伟,刘德军,等.半焦作为高炉喷吹用煤研究[J]. 鞍钢技术,2015(1):13-17.
Zhang Liguo, Ren Wei, Liu Dejun, et al. Study on semi-coke used as pulverized coal for injection in to blast furnace [J]. Angang Technology, 2015(1):13-17.
- [2] 王舜,张建良,祁成林,等.兰炭用于高炉喷吹的可行性初探:第九届中国钢铁年会论文集[C].北京:冶金工业出版社,2013:1-5.
- [3] 毕学工,杨福,梁尚国,等.高炉喷吹黄陵弱粘煤的原煤特性的研究[J].钢铁,2009,44(6):14-19.
Bi Xuegong, Yang Fu, Liang Shangguo, et al. Study of raw coal characteristics of Huangling slightly-coking coal for blast furnace injection [J]. Iron & Steel, 2009, 44(6):14-19.
- [4] 吴式瑜.苏联煤炭的加工与利用[J].煤炭加工与综合利用,1983(1):60-66.
Wu Shiyu. The soviet union and the use of coal [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 1983(1):60-66.
- [5] 马国君,戴和武.年轻煤热解半焦作高炉喷吹燃料的研究[J].煤炭分析与利用,1992,3(1):4-7.
Ma Guojun, Dai Hewu. Study on the fuel injection of the semi-coke blast furnace in the young coal pyrolysis [J]. Coal Analysis and Utilization, 1992, 3(1):4-7.
- [6] 张秋民,李文翠,郭树才,等.扎赉诺尔褐煤制取高炉喷吹料和中热值煤气研究(II):半焦作高炉喷吹料的性能分析[J].煤炭转化,1997,15(4):63-68.
Zhang Qiumin, Li Wencui, Guo Shucui, et al. Study on the material and the heat value of gas production from lignite in blast furnace Dalainur lignite(II): performance analysis of semi-coke blast furnace material [J]. Coal Conversion, 1997, 15(4):63-68.
- [7] 王雅军,张永,张静.喷吹低温半焦的实验室研究[J].包钢科技,2012,38(1):6-8.
Wang Yajun, Zhang Yong, Zhang Jing. Lab study of low-temperature semi-coke for injection [J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2012, 38(1):6-8.
- [8] 杜刚,杨双平.高炉喷吹用煤的配煤及使用兰炭的试验[J].钢铁钒钛,2013,34(1):64-68.
Du Gang, Yang Shuangping. An investigation into coal blending and the addition of semi-coke [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2013, 34(1):64-68.
- [9] 代芳草.低阶煤及其热解产物高效利用的研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2014.
- [10] 焦阳,胡宾生,贵永亮.兰炭作为酒钢高炉喷吹用煤的可行性分析[J].冶金能源,2011,30(6):20-22.
Jiao Yang, Hu Binsheng, Gui Yongliang, et al. Feasibility analysis of semi-coke as JISCO blast furnace with coal injection [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2011, 30(6):20-22.
- [11] 李爱军,贾西明.包钢新系统喷吹低温半焦试验分析[J].包钢科技,2011,37(6):32-33.
Li Aijun, Jia Ximing. Analysis on test for injection of new system with low-temperature semi-coke in Baosteel [J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2011, 37(6):32-33.
- [12] 张典波,徐辉,朱锦明.宝钢2号高炉喷吹兰炭生产试验[J].炼铁,2015(1):40-43.
Zhang Dianbo, Xu Hui, Zhu Jingming. Test for Baosteel No. 2 blast furnace semi-coke production [J]. Ironmaking, 2015(1):40-43.
- [13] 李鹏程,张建良,徐润生,等.改质煤、兰炭和木炭作为高炉喷吹用燃料的基础特征[J].冶金能源,2015(3):41-45.
Li Pengcheng, Zhang Jianliang, Xu Runsheng, et al. Representation of characteristics for modified coal semi-coke and coke used in blast furnace injection [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2015(3):41-45.
- [14] 竺维春.神府半焦用于首钢高炉喷吹的实验室研究[J].首钢科技,2000(6):12-14.
Zhu Weichun. Laboratory research on Shenfu semicoke for Shougang BF injection [J]. Shougang Science and Technology, 2000(6):12-14.
- [15] 代芳草,徐君,王月明,等.长焰煤热解产物高效利用的研究[J].燃料与化工,2014,45(5):9-10.
Dai Fangcao, Xu Jun, Wang Yueming, et al. Study on how to use pyrolysis product of flaming coal with high-efficiency [J]. Fuel & Chemical Processes, 2014, 45(5):9-10.
- [16] 赵巧玲,张海龙.高炉喷吹兰炭末工业试验研究[J].中小企业管理与科技,2014(11):314-315.
Zhao Qiaoling, Zhang Hailong. Experimental research on coking industry at the end of blast furnace [J]. Management and Technology of SME, 2014(11):314-315.
- [17] 杨双平,郭拴全,王苗.高炉喷吹兰炭的实验研究[J].冶金能源,2015,34(5):33-37.
Yang Shuangping, Guo Shuanquan, Wang Miao. Experimental research of semi-coke for blast furnace injection [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2015, 34(5):33-37.
- [18] 杨双平,蔡文森,郑化安,等.高炉喷吹半焦及其性能分析[J].过程工程学报,2014,14(5):896-900.
Yang Shuangping, Cai Wenmiao, Zheng Huan, et al. Performance analysis of semi-coke for blast furnace injection [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2014, 14(5):896-900.
- [19] 任山,张建良,朱广跃,等.高炉喷吹济阳气煤的可行性研究[J].钢铁研究学报,2013,25(3):8-13.
Ren Shan, Zhang Jianliang, Zhu Guangyue, et al. Feasibility for injecting gas coal from Jiyang into blast furnace [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 25(3):8-13.
- [20] 陈家全,白力强,初莱,等.褐煤热解制备高炉喷吹料试验研究[EB/OL]. [2012-07-02]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201207-5>.
- [21] 李永镇,李肇毅,闫拉劳,等.半焦的爆炸性、可磨性的实验室

- 研究[J]. 炼铁, 1985(2):21-26.
- Li Yongzhen, Li Zhaoyi, Yan Lalao, et al. A laboratory study on the explosive and abrasive properties of semi-coke[J]. Ironmaking, 1985(2):21-26.
- [22] Du Shanwen, Chen Weihsin, Lucas John A. Pulverized coal burn-out in blast furnace simulated by a drop tube furnace[J]. Energy, 2010, 35(2):576-581.
- [23] 何选明, 付鹏睿, 王春霞, 等. 用于高炉喷吹的低阶煤梯级转化半焦的燃烧性能[J]. 钢铁, 2014, 49(9):92-96.
- He Xuanming, Fu Pengrui, Wang Chunxia, et al. Combustion behavior of low rank coal char application in blast furnace injection[J]. Iron & Steel, 2014, 49(9):92-96.
- [24] Gong X, Guo Z, Wang Z. Variation on anthracite combustion efficiency with CeO_2 and Fe_2O_3 addition by differential thermal analysis (DTA)[J]. Energy, 2010, 35(2):506-511.
- [25] Yu J, Lucas J A, Wall T F. Formation of the structure of chars during devolatilization of pulverized coal and its thermoproperties: a review[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2007, 33(2):135-170.
- [26] 焦阳. 兰炭煤对酒钢高炉喷煤过程的影响研究[D]. 唐山: 河北联合大学, 2011.
- [27] 赵虹, 郑敏, 周永刚. 不同煤化程度煤的可磨性指数变化和破碎特性[J]. 能源工程, 2006(6):29-31.
- Zhao Hong, Zheng Min, Zhou Yonggang, et al. Experimental investigation in the grinding behavior and the comminuting character of coals of different rank[J]. Energy Engineering, 2006(6):29-31.
- [28] Díez M A, Alvarez R, Barriocanal C. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking[J]. International Journal of Coal Geology, 2002, 50(1):389-412.
- [29] 高晋生. 煤的热解、炼焦和煤焦油加工[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [30] 邹冲, 李宝, 赵俊学, 等. 干馏温度对高炉喷吹用半焦可磨性能的影响研究[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(1):71-76.
- Zou Chong, Li Bao, Zhao Junxue, et al. Effects of pyrolysis temperature on grindability of char using pulverized coal injection in blast furnace[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(1):71-76.
- [31] Rao B V, Gopalakrishna S J. Hardgrove grindability index prediction using support vector regression[J]. International Journal of Mineral Processing, 2009, 91(1/2):55-59.
- [32] Sengupta A N. An assessment of grindability index of coal[J]. Fuel Processing Technology, 2002, 76(1):1-10.
- [33] 何选明, 王小娟, 方嘉淇, 等. 风眼莲与低阶煤低温共热解特征研究[J]. 煤炭转化, 2014, 37(2):10-15.
- He Xuanming, Wang Xiaojuan, Fang Jiaqi, et al. Low-temperature co-pyrolysis of eichhornia crassipes and low-rank coal[J]. Coal Conversion, 2014, 37(2):10-15.
- [34] 何选明, 方嘉淇, 王小娟, 等. 炼铁瓦斯泥对低阶煤催化干馏影响的研究[J]. 煤炭转化, 2014, 37(1):19-22.
- He Xuanming, Fang Jiaqi, Wang Xiaojuan, et al. Study on low temperature co-pyrolysis ironmaking sludge and low rank coal[J]. Coal Conversion, 2014, 37(1):19-22.
- [35] 倪献智, 丛兴顺, 马小隆, 等. 生物质热解及生物质与褐煤共热解的研究[J]. 煤炭转化, 2005, (28)2:39-41.
- Ni Xianzhi, Cong Xingshun, Ma Xiaolong, et al. Study on thermal decomposition of biomass and the mixture of biomass and brown coal[J]. Coal Conversion, 2005, (28)2:39-41.
- [36] Chen W H, Wu J S. An evaluation on rice husks and pulverized coal blends using a drop tube furnace and a thermogravimetric analyzer for application to a blast furnace[J]. Energy, 2009, 34(10):1458-1466.
- [37] Zhang L M, Tan Z C, Wang S D, et al. Combustion calorimetric and thermogravimetric studies of graphite and coals doped with a coal-burning additive[J]. Thermochimica Acta, 1997, 299(1/2):13-17.
- [38] Gong X, Guo Z, Wang Z. Reactivity of pulverized coals during combustion catalyzed by CeO_2 and Fe_2O_3 [J]. Combustion and Fuel, 2010, 157(2):351-356.
- [39] Zou C, Wen L, Zhang S, et al. Evaluation of catalytic combustion of pulverized coal for use in pulverized coal injection (PCI) and its influence on properties of unburnt chars[J]. Fuel Processing Technology, 2014, 119(1):136-145.