城市碳氢固废粒化预处理产物的高炉喷吹特性

刘思贤，王 广，乔宇峰，聂志睿，王静松，薛庆国
（北京科技大学 绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室，北京 100083）

摘要：为缓解城市生活垃圾带来的环境污染问题，本文以废弃的食品袋、手提袋、垃圾袋、快递袋、纸屑、秸秆和土壤为原料，按照相应比例进行混合配制，将所得的城市碳氢固废进行粒化预处理并用于高炉喷吹，研究粒化产物的成分、着火点、爆炸性、燃烧性、气化性等高炉喷吹特性。结果表明：城市碳氢固废粒化产物的挥发分、固定碳、灰分质量分数分别为 61.56%、19.02%、19.42%，且其热值较高，为 25 497.3 kJ/kg；粒化产物的着火点为 241 ℃，与无烟煤混合后着火点升高；粒化产物有强爆炸性，与无烟煤混合后爆炸性减弱。该粒化产物和无烟煤混合后，其燃烧性能和反应性能显著改善。该粒化产物的添加比为 40% 时，既能保证高炉的安全喷吹，又能对无烟煤的燃烧起促进作用，且生产 1 t 生铁最多可降低 190.4 kg 碳排放。研究结果表明，城市碳氢固废可以作为高炉喷吹的优质燃料，同时可在一定程度上降低高炉工序的碳排放。

关键词：城市碳氢固废；粒化预处理；高炉喷吹；热值；燃烧性能
中图分类号：TF631；X705 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－8764(2024)05－0103－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.081

Blast furnace injection characteristics of granulation pretreatment products for urban hydrocarbon solid waste

LIU Sixian, WANG Guang, QIAO Yufeng, NIE Zhirui, WANG Jingsong, XUE Qingguo
(State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to alleviate the environmental pollution caused by urban solid waste, waste food bags, handbags, garbage bags, express bags, paper scraps, straw and soil are taken as raw materials and then are mixed together according to the corresponding proportions; and the obtained urban hydrocarbon solid waste is pretreated by granulation and used for blast furnace injection, and the composition of granulation products, ignition point, explosiveness, combustibility, gasification and other blast furnace injection characteristics are studied. The results show that the volatile matter, fixed carbon and ash mass fractions of urban hydrocarbon solid waste granulation products are 61.56%, 19.02% and 19.42%, respectively, with higher calorific value of 25 497.3 kJ/kg. The ignition point of the granulated product is 241 ℃, and the ignition point is increased when mixed with anthracite. The granulation product is highly explosive, and the explosiveness is weakened when mixed with anthracite. After the granulation product is mixed with anthracite, its combustion performance and reaction performance are significantly improved. The addition ratio of the granulated product is 40%, which can not only ensure the safe injection of the blast furnace, but also promote the combustion of anthracite, and the production of 1 t of pig iron can reduce the carbon emission by up to 190.4 kg. The results show that urban hydrocarbon solid waste can be used as a high-quality fuel for blast furnace injection, and at the same time, it can reduce the carbon emissions of blast furnace process to

收稿日期： 2023－09－25；**修回日期：** 2023－10－16
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51804024)；绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室自主研发课题资助项目(41623007&41622015)
作者简介： 刘思贤(1998—)，女，硕士研究生，从事低碳炼铁与资源利用方面的研究。
通信作者： 王 广(1985—)，男，博士，副教授，从事低碳炼铁与资源利用方面的研究。

a certain extent.

Key words: urban hydrocarbon solid waste; granulation pretreatment; blast furnace injection; caloric value; combustion performance

化石能源活动是造成大气中 CO_2 温室气体含量上升的主要原因[1-2]。2018 年公开数据显示，我国 CO_2 排放量约占世界的 28.6%[3]。2023 年，我国粗钢产量约为 10.19 亿吨，其中约 90% 由依赖煤粉、焦炭等化石能源的高炉—转炉流程生产[4]，这使得钢铁工业成为 CO_2 和其他污染物的排放大户[5]。同时，钢铁材料是国民经济和制造业的基础，在可遇见的未来，我国仍将保有较大的钢铁产能规模。因此，为了兼顾钢铁产量和“双碳”目标，降低生产过程中的能源消耗和碳排放是实现钢铁工业可持续发展的主要途径。2019 年，我国 196 个大、中城市的生活垃圾产生量为 2.36 亿吨[6-7]。《2020 年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报》数据显示，2 亿吨生活垃圾所蕴含的能量约为 5 000 万吨标准煤。城市生活垃圾中“其他垃圾”(如塑料、纸、橡胶等，本文称为“城市碳氢固废”)的主要组分是碳氢物质，其热值较高，这部分热量可供工业使用。城市碳氢固废的回收利用既可以解决城市生活垃圾污染引发的环境问题，又可以为工业生产提供能源。1994 年，德国不莱梅钢铁公司开展了向高炉喷吹废塑料试验并投入使用[8-9]。日本 NKK 公司也在 1996 年进行了向高炉喷吹废塑料的操作实践，喷吹量达到 60~80 kg/t 铁水[10-13]。2000 年后我国也就向高炉喷吹废塑料进行了相关研究，宝钢于 2007 年实现了向高炉喷吹 100 kg/t 废塑料的工业试验，但未见后续工业化应用的报道[14]。相对而言，我国废塑料分类收集困难，且价格较高，难以规模化应用于炼铁过程[15]。与单一的废塑料相比，城市碳氢固废的资源量更大，无需细致分类且热值较高，更符合我国国情。

目前国内向高炉喷吹城市碳氢固废(或废塑料)的技术仍处于试验研究阶段，其在国内没有实质进展的原因主要有以下几点：① 尽管国家层面鼓励废塑料以及城市碳氢固废的回收利用，但是没有明确的支持政策，并缺少示范工程的建设以推动该工艺在技术以及制度层面不断成熟；② 我国地域广阔，地区差异大，生活垃圾的热值差异较大，垃圾分类实施不够全面，处理不够精细，难以保证城市碳氢固废的稳定供给；③ 向高炉喷吹城市碳氢固废需要钢铁企业与垃圾回收企业建立起良好的合作关系，明确收购价格，这是钢铁厂获利的关键；④ 根据国外向高炉喷吹废塑料的经验，城市碳氢固废预处理生产线的建设投资较大；⑤ 粒化预处理、高效脱氯等城市碳氢固废的预处理技术不够成熟，且缺少向高炉喷吹碳氢固废后运行状态或效果评价等相关数据。

向高炉喷吹城市碳氢固废可同时实现城市生活垃圾减量和钢铁生产过程降碳，具有较好的经济效益，且相比于垃圾焚烧，向高炉喷吹具有能量利用效率高、产生的二次污染物少、投资少等优点。随着我国“双碳”工作的逐步深入以及“减污、降碳、协同、增效”理念逐渐被认可，该技术相关的应用基础研究、工业示范等将有望得到有关部门及钢铁企业的重视。为此，本文对城市碳氢固废进行热处理粒化并用于高炉喷吹，研究粒化产物的成分、着火点、爆炸性、燃烧性、气化性等喷吹特性，以期为新工艺的开发提供参考。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

参考北京市生活垃圾中“其他垃圾”的组成，塑料、纸类、织物、木竹、灰土、玻璃、其他的质量分数分别为 44%、42%、1%、7%、2%、3%、1%[16]。根据塑料、纸类、木竹和无机物等代表性生活垃圾的实际占比，试验所用样品以废弃的食品袋、手提袋、垃圾袋、快递袋、纸屑、秸秆和土壤为原料，按照表 1 所示比例混配而成。

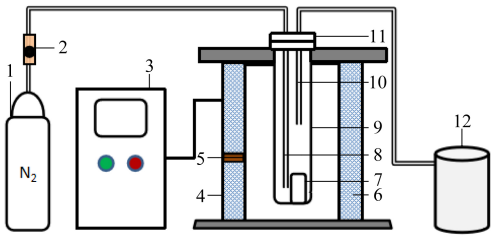
表 1 城市碳氢固废各组分的占比(质量分数)

Table 1 Proportion of components of urban hydrocarbon solid waste %

食品袋	手提袋	垃圾袋	快递袋	纸屑	秸秆	土壤
11.25	11.25	11.25	11.25	40	10	5

1.2　试验方法

使用管式炉制备城市碳氢固废样品，试验装置示意如图 1 所示。称量食品袋、手提袋、垃圾袋、快递袋 4 种塑料袋各 1.687 5 g，用剪刀将其破碎为 1 ~2 cm 大小，称量 6 g 纸屑、1.5 g 秸秆和 0.75 g 无机物，混匀后装入不锈钢坩埚内放入管式炉中进行热处理。试验加热温度设置为 300 ℃。为了保证惰性反应条件，试验开始前需要向炉内通入氮气，氮气流量为 3 L/min，当温度升高到设定温度后保温 20 min。热处理产生的气体通过气管排出。试验结束后将不锈钢坩埚冷却至室温，然后取出热处理产物进行破碎处理，取 <0.18 mm 的部分供后续试验使用。城市碳氢固废热处理前后的样品对照如图 2 所示。



1—气瓶；2—流量计；3—控制柜；4—炉体；5—热电偶；6—加热元件；7—坩埚；8—进气口；9—炉管；10—出气口；11—法兰；12—洗气罐。

图 1　试验装置示意

Fig. 1　Schematic diagram of the test device

参照《煤的工业分析方法》(GB/T 212—2008)、《煤的元素分析》(GB/T 31391—2015)对城市碳氢固废粒化预处理产物(以下称为“粒化产物”)和无烟煤的理化性质进行测定。粒化产物和无烟煤的成分和热值分析如表 2 所示。由表 2 可知，无烟煤的灰分和挥发分质量分数分别为 9.3% 和 7.4%，而粒化产物的灰分和挥发分较高，分别为 19.42% 和 61.56%。在向高炉喷吹时应严格控制粒化产物的爆炸性对作业安全造成的影响。粒化产物的 $m(H)/m(C)$(质量比)为 0.12，高于气煤，低于甲烷，近似于重油(重油对焦炭的置换比为 1.2 ~1.4 kg/kg，高于无烟煤的 0.8 kg/kg)[17]。粒化产物的热值为 25 497.3 kJ/kg，折标系数(标准煤)为 0.87 kg/kg，与无烟煤相当。

为了保证试验数据的可靠性，分 3 组对每个样品进行爆炸性、着火点等喷吹性能检测试验，取平均值作为最终试验结果[18]。燃烧和反应性能试验通过热重分析仪(SDT Q600)进行。燃烧性能试验采用∅4 mm ×5 mm 刚玉坩埚盛放样品，样品质量为(10 ±0.5) mg，反应气氛为空气，升温速率为 10 ℃/min，终点温度为 900 ℃。反应性能试验将装有样品的坩埚放入差热天平内，通入氩气保护，同时通入 CO_2(100 mL/min)，升温速率为 10 ℃/min，由室温升至 1 200 ℃，失重(TG)曲线和失重速率(DTG)曲线通过采集的失重数据绘制得到[19-20]。



(a) 原料；(b) 热处理后形貌；(c) 城市碳氢固废粒化预处理产物

图 2　城市碳氢固废热处理前后样品对照

Fig. 2　Comparison of samples before and after thermal treatment of urban hydrocarbon solid waste

表 2　城市碳氢固废粒化预处理产物和无烟煤的成分和热值

Table 2　Composition and calorific value of urban hydrocarbon solid waste granulation products and anthracite

样品名称	工业分析(干燥基)/%			元素分析/%					低位热值/($kJ \cdot kg^{-1}$)
	灰分	挥发分	固定碳	C	H	O	N	S	
粒化产物	19.42	61.56	19.02	59.415	7.404	15.481	0.13	0.391	25 497.3
无烟煤	9.30	7.40	83.30	77.710	1.210	8.190	0.55	1.120	25 558.0

2 试验结果与讨论

2.1 爆炸性和着火点

将无烟煤与粒化产物混合后进行测试，得到粒化产物、无烟煤及其混合样品的返回火焰长度和着火点如表 3 所示。由表 3 可以看出：受高挥发性的影响，粒化产物的返回火焰长度超过 800 mm，无烟煤的返回火焰长度为 0，无爆炸性；随着无烟煤配比的增加，混合物的返回火焰长度逐渐变小。当粒化产物配比≤40% 时，返回火焰长度 <100 mm，喷吹过程较安全；当粒化产物配比为 40% ~ 60% 时，返回火焰长度为 100 ~ 300 mm，喷吹过程有弱爆炸性[21-22]；当粒化产物配比 >70% 时，返回火焰长度 >800 mm，喷吹过程有强爆炸性。因此，可通过将粒化产物与无烟煤混合喷吹的方式来降低爆炸性，且控制粒化产物配比在 40% 以内。

表 3 城市碳氢固废粒化预处理产物、无烟煤及其混合样品的返回火焰长度和着火点

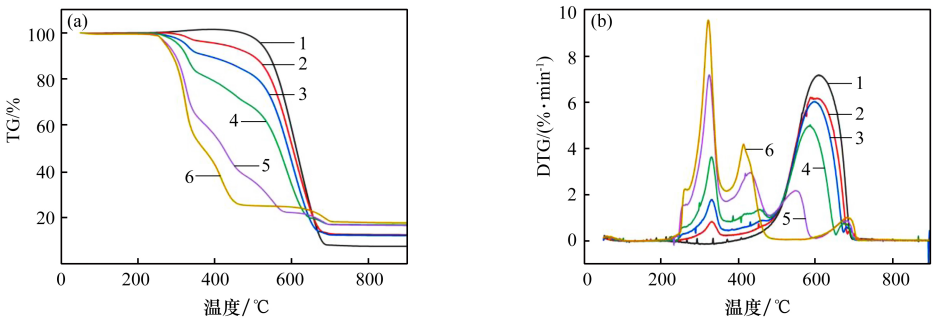
Table 3 Return flame lengths and ignition points of urban hydrocarbon solid waste granulation products, anthracite and their mixed samples

样品配比/%		返回火焰长度/mm	着火点/℃			
无烟煤	粒化产物		第 1 次试验	第 2 次试验	第 3 次试验	平均值
0	100	800	240	241	242	241
30	70	800	258	254	256	256
40	60	280	253	251	255	253
50	50	255	263	266	269	266
60	40	85	289	301	287	292
100	0	0	397	399	398	398

在着火点试验中，无烟煤的着火点为 398 ℃，粒化产物的着火点为 241 ℃；随粒化产物配比的增加，混合物的着火点整体呈减小趋势。当粒化产物配比为 40% 时，着火点为 292 ℃。

2.2 燃烧性能

粒化产物、无烟煤及其混合样品燃烧过程的失重和失重速率曲线如图 3 所示。由图 3(a)可以看出，随着温度的升高，样品发生了相应的失重，无烟煤的失重只有一个阶段，而粒化产物为多段失重。粒化产物的失重曲线分为三段，第一阶段失重是由大量挥发分的析出和燃烧所导致，失重率为 49%；第二阶段主要发生的是固定碳的燃烧反应，失重率为 26%；第三阶段的温度较高，有少部分的碳酸盐分解[23]，失重率为 7%。其中，无烟煤和粒化产物的终点失重率分别约为 93% 和 82%。与粒化产物相比，无烟煤的失重更多，这是粒化产物中灰分含量较大导致的。可以看出，随着粒化产物配比的增大，TG 曲线逐渐左移，说明粒化产物对无烟煤的燃烧有促进作用。为了进一步描述不同样品的失重过程，比较粒化产物和无烟煤的开始着火温度(T_i)和燃尽温度(T_f)。可知，粒化产物的 T_i 为 281 ℃，远低于无烟煤的 536 ℃；而粒化产物和无烟煤的 T_f 分别为 690 ℃和 680 ℃，两者相差不大。通过比较可以发现，粒化产物比无烟煤更易燃烧。



(a) 失重曲线；(b) 失重速率曲线

1—100% 无烟煤。粒化产物配比/%：2—10；3—20；4—40；5—80；6—100。

图 3 碳氢固废粒化预处理产物、无烟煤及其混合物的燃烧特性曲线

Fig. 3 Combustion characteristic curves of hydrocarbon solid waste granulation products, anthracite and their mixtures

图 3(b)是粒化产物、无烟煤及其混合物的失重速率。由图 3(b)可以看出，无烟煤只有一个峰，而不同配比粒化产物和无烟煤的混合物有多个峰，这与粒化产物中各组分的不同燃烧过程有关。此外，随着粒化产物配比的增加，低温区的失重峰逐渐形成且峰值逐渐增大，高温区的峰值则随粒化产物配比的增加而减小。这说明粒化产物对无烟煤在低温区的燃烧有促进作用。

粒化产物、无烟煤及其混合物的燃烧特征参数如表 4 所示。由表 4 可以看出，随着粒化产物配比的增加，开始着火温度逐渐降低，最大失重速率对应的温度（T_m）也逐渐降低。这说明粒化产物与无烟煤的混合物不仅可以在较低温度达到着火状态，而且粒化产物配比的增加也加速了无烟煤中低反应组分的反应速率。

表 4　碳氢固废粒化预处理产物、无烟煤及其混合物的燃烧特征参数

Table 4　Characteristic parameters of combustion of hydrocarbon solid waste granulation products, anthracite and their mixtures

样品配比/%		T_i/	T_m/	T_f/	最大燃烧	平均燃烧
无烟煤	粒化产物	℃	℃	℃	速率/s^{-1}	速率/s^{-1}
0	100	281	323	690	9.55	1.81
20	80	286	326	680	7.18	1.92
60	40	459	586	687	5.01	2.35
80	20	510	598	674	6.01	4.10
90	10	519	587	674	6.21	4.68
100	0	536	609	680	7.17	5.68

2.3　反应性能

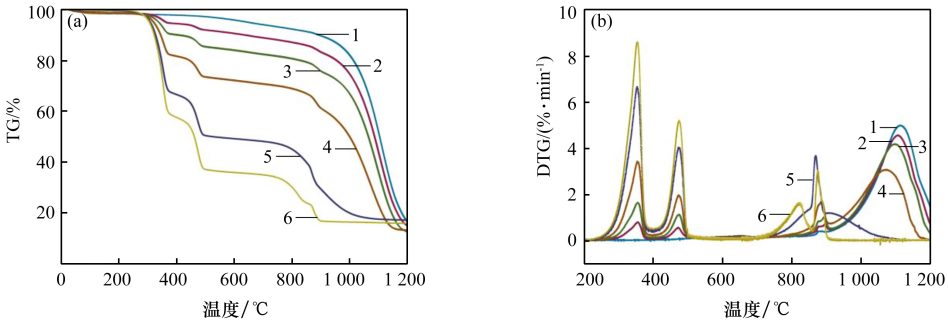
煤粉的反应性是反映煤气化和燃烧的一个重要特性指标。对高炉进行喷煤操作时应更加重视对未燃煤粉中碳与 CO_2 反应能力的研究[24-25]，因此通过差热天平分析粒化产物的反应性能，得到粒化产物、无烟煤及其混合物曲线的反应性曲线如图 4 所示。由图 4 可以发现：粒化产物的加入提高了无烟煤的气化效率，气化反应提前完成，且随着粒化产物配比的提高，气化完成温度逐渐降低。在 1 000 ℃ 下无烟煤的失重率只有 17.87%，100% 粒化产物的失重率为 83.49%；随着粒化产物配比的增加，无烟煤与粒化产物混合物的反应性逐渐增大。由图 4(b)可以看出，在粒化产物配比从 10% 增加到 40% 的过程中，不同温度下混合物的失重增加幅度基本一致，这说明当粒化产物配比小于 40% 时，其与无烟煤的协同反应性较好。

2.4　喷吹粒化产物对高炉碳排放的影响

在高炉—转炉流程中，70% 的碳排放来自于高炉工序。降低高炉工序碳排放的一个可行措施是进行富氢燃料替代，以减少煤粉、焦炭等化石燃料的消耗，而可行的富氢燃料有天然气、焦炉煤气、氢气、生物质、废塑料等。

前述粒化产物中灰分虽较高，但物料平衡计算表明，在研究的喷吹量范围内，粒化产物中灰分对炉渣组成的影响可忽略不计。根据上述对粒化产物爆炸性、燃烧性和反应性的分析，在保证高炉安全喷吹的基础上，选取 40% 粒化产物作为最佳配比。同时，依据相关文献[26]选取粒化产物与煤粉的置换比为 1 kg/kg。

以焦炭、煤粉用量分别为325、170 kg/t铁水



（a）失重曲线；（b）失重率曲线

1—100% 无烟煤。粒化产物配比/%：2—10；3—20；4—40；5—80；6—100。

图 4　碳氢固废粒化预处理产物、无烟煤及其混合物曲线的反应性曲线

Fig. 4　Reactivity curves of hydrocarbon solid waste granulation products, anthracite and their mixtures

为基准进行计算，以40%粒化产物的混合物1∶1替代煤粉进行喷吹，计算喷吹碳氢固废对高炉碳排放的影响，计算边界为高炉本体。由于碳氢固废中氢含量高，高炉每生产1 t生铁可直接降低碳排放45.66 kg左右。根据《工业企业温室气体排放核算和报告通则》(GB/T 32150—2015)规定，生物质燃料燃烧产生的温室气体排放，不计入温室气体排放总量。而碳氢固废作为生物质能源，不计入碳排放，因此吨铁碳排放最多可降低190.4 kg左右。需要指出的是，考虑到目前高炉炼铁工艺未采用煤气循环或煤气值化学品，其热源基本来自燃料燃烧，炉顶煤气中的CO全部在钢铁流程内转变成CO_2，因此，本文将固体碳燃料氧化进入气相中的氧化物(即CO、CO_2)全部按CO_2计算。

3 结 论

(1) 碳氢固废粒化预处理产物的挥发分为61.56%，应用于高炉喷吹时有很强的爆炸性。当碳氢固废粒化预处理产物与无烟煤混合喷吹时，控制配比低于40%，可以保证高炉喷吹时不爆炸。

(2) 通过燃烧特征参数的比较，碳氢固废粒化预处理产物的燃烧性优于无烟煤，当添加比例为40%时，粒化产物对无烟煤的燃烧有促进作用。

(3) 在碳氢固废粒化预处理产物配比从10%增加到40%的过程中，不同温度下混合物的反应性增加幅度基本一致。

(4) 当碳氢固废粒化预处理产物替代40%的煤粉进行喷吹时，生产1 t生铁可降低碳排放190.4 kg。

参考文献：

[1] 李艳艳. 浅谈低碳经济背景下钢铁企业的发展思路[J]. 冶金经济与管理,2022(3):12－15.
LI Yanyan. On the development of iron and steel enterprises under the background of low-carbon economy [J]. Metallurgical Economy and Management,2022(3):12－15.

[2] 聂立功,姜大霖. 全球CCS技术商业化路径研究[M]. 北京:煤炭工业出版社,2016.
NIE Ligong,JIANG Dalin. A study on the path to global commercialization of CCS technology[M]. Beijing:China Coal Industry Publishing House,2016.

[3] IEA Statistics. CO_2 emissions from combustion highlights [M]. Paris:International Energy Agency,2018.

[4] 王广,王静松,左海滨,等. 高炉煤气循环耦合富氢对中国炼铁低碳发展的意义[J]. 中国冶金,2019,29(10):1－6.
WANG Guang, WANG Jingsong, ZUO Haibin, et al. Effect of blast furnace gas recycling with hydrogen injection on low carbon development of Chinese ironmaking[J]. China Metallurgy,2019,29(10):1－6.

[5] 王广,张宏强,苏步新,等. 我国钢铁工业碳排放现状与降碳展望[J]. 化工矿物与加工,2021,50(12):55－64.
WANG Guang,ZHANG Hongqiang,SU Buxin,et al. The current situation of carbon emission and carbon reduction in Chinese steel industry [J]. Industrial Minerals & Processing,2021,50(12):55－64.

[6] 王广,张宏强,聂志睿,等. 冶金过程协同处置城市固废的思考:废塑料的粒化与深度粒化试验探索[C]//中国金属学会. 第十三届中国钢铁年会论文集. 北京:冶金工业出版社,2022:241－246.
WANG Guang, ZHANG Hongqiang, NIE Zhirui, et al. Thoughts on metallurgical co-disposal of municipal solid waste-pulverization of waste plastics and deep pulverization experiment [C]//The Chinese Society for Metals. Proceedings of the 13th CSM Steel Congress. Beijing:Metallurgical Industry Press,2022:241－246.

[7] JANZ J, WEISS W. Injection of waste plastics into the blast furnace of Stahlwerke Bremen[J]. Revue de Métallurgie,1996,93(10):1219－1226.

[8] NIE Z R,WANG G,ZHANG H Q,et al. New technology of efficient pulverization of simulated municipal solid waste based on low temperature heat treatment and properties of pulverized product for blast furnace injection [J]. Fuel,2023,337:127245.

[9] KIM D, SHIN S, SOHN S, et al. Waste plastics as supplemental fuel in the blast furnace process:Improving combustion efficiencies[J]. Journal of Hazardous Materials,2002,94(3):213－222.

[10] ASANUMA M, ARIYAMA T, SATO M, et al. Development of waste plastics injection process in blast furnace[J]. ISIJ International,2000,40(3):244－251.

[11] BABICH A,SENK D,KNEPPER M,et al. Conversion of injected waste plastics in blast furnace[J]. Ironmaking &

Steelmaking,2016,43(1):11 – 21.

[12] GOTO A, MOROZUMI Y, HAGIYA H, et al. Numerical investigation of waste plastic injection in a blast furnace [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2008, 41(3):182 – 193.

[13] BUCHWALDER J, SCHEIDIG K, SCHINGNITZ M, et al. Results and trends on the injection of plastics and ASR into the blast furnace[J]. ISIJ International, 2006, 46(12):1767 – 1770.

[14] 王晓霞,慕进文,朱青德. 废塑料在钢铁行业的应用[J]. 工业加热,2021,50(9):59 – 64.
WANG Xiaoxia, MU Jinwen, ZHU Qingde. Application of waste plastics in iron and steel industry[J]. Industrial Heating, 2021, 50(9):59 – 64.

[15] LI X M, ZHANG C M, LI Y Z, et al. The status of municipal solid waste incineration(MSWI) in China and its clean development[J]. Energy Procedia, 2016, 104: 498 – 503.

[16] 程伟. 北京城区和农村地区生活垃圾组成特性的对比分析[J]. 再生资源与循环经济,2020,13(1):17 – 22.
CHENG Wei. Comparative analysis of physical composition and characteristics of domestic waste in urban and rural areas of Beijing [J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2020, 13(1):17 – 22.

[17] 金龙哲,金岩辉,张俊燕,等. 高炉喷吹用潞安贫瘦煤爆炸下限与返回火焰长度的试验研究[J]. 中国安全科学学报,2005,15(11):61 – 64;115.
JIN Longzhe, JIN Yanhui, ZHANG Junyan, et al. Experimental study on lower explosion limit and length of return fire when blasting Luan barren coal into blast furnace[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(11):61 – 64;115.

[18] 宁晓钧,滕海鹏,王广伟,等. 废塑料水热炭高炉喷吹基础性能分析[J]. 钢铁,2020,55(8):123 – 129.
NING Xiaojun, TENG Haipeng, WANG Guangwei, et al. Basic analysis of waste plastic hydrochars injection for blast furnace[J]. Iron & Steel, 2020, 55(8):123 – 129.

[19] MUTHURAMAN M, NAMIOKA T, YOSHIKAWA K. A comparative study on co-combustion performance of municipal solid waste and Indonesian coal with high ash Indian coal: A thermogravimetric analysis [J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(5):550 – 558.

[20] XU Y G, ZHANG C, XIA J, et al. Experimental study on the comprehensive behavior of combustion for blended coals[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2010, 5(3):435 – 440.

[21] 王筱留. 钢铁冶金学:炼铁部分[M]. 3 版. 北京:冶金工业出版社,2013.
WANG Xiaoliu. Iron and steel metallurgy: Ironmaking part[M]. 3rd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.

[22] 杜钢,应自伟. 预热对混合煤粉爆炸性的影响[J]. 中国冶金,2007,17(6):9 – 12.
DU Gang, YING Ziwei. Effect of preheating on explosiveness of mixed pulverized coal[J]. China Metallurgy, 2007, 17(6):9 – 12.

[23] WANG G, LIU S X, ZHANG H Q, et al. Pulverization of waste polyvinyl chloride(PVC) film by low temperature heat treatment and properties of pulverized product for blast furnace injection as alternative fuel[J]. Polymers, 2022, 14(9):1689.

[24] 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 – 13.
LI Jie, SONG Canyang, LI Xiaojing, et al. Research and application of combustibility and reactivity of pulverized coal injected in blast furnace [J]. China Metallurgy, 2019, 29(1):8 – 13.

[25] 张华,张建良,柏凌,等. 太钢高炉喷吹煤粉燃烧性和反应性的研究[J]. 炼铁,2008,27(1):53 – 56.
ZHANG Hua, ZHANG Jianliang, BAI Ling, et al. Study on combustion and reaction of injected pulverized coal in blast furnace of Taiyuan Iron and Steel Co[J]. Ironmaking, 2008, 27(1):53 – 56.

[26] 刘文权. 低碳炼铁技术研究[J]. 中国环保产业,2011(1):20 – 25.
LIU Wenquan. Study on low carbon ironmaking technology[J]. China Environmental Protection Industry, 2011(1):20 – 25.