混装焦丁对高块矿配比含铁炉料软熔行为的影响

王 广[1]，易青山[1]，韦润培[1]，左海滨[1]，丁 望[2]
（1. 北京科技大学 绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室，北京 100083；
2. 湖南华菱湘潭钢铁有限公司 炼铁厂，湖南 湘潭 411101）

摘要：钢铁工业的低碳化对支撑我国“双碳”目标具有重要意义。提高块矿的入炉比例是降低高炉炼铁碳排放的一个重要措施，而如何减轻高块矿配比对高炉冶炼过程的不利影响是该工艺应用的关键限制性环节。本文通过软熔试验考察块矿配比、焦丁混装量、焦丁加入方式等对综合炉料软熔行为的影响。结果表明：随着块矿配比由12%提升至24%（块矿完全替代球团矿），软化开始温度和熔化开始温度分别降低60 ℃和39 ℃，软化区间较大幅度增加，滴落温度降低，软熔带位置上升。软熔区间变宽导致 S 值进一步增大至 195.29 kPa·℃，提高了 30% 以上，即炉料的软熔性能逐渐变差。混装4 g 焦丁（28.6 kg/t 铁水）条件下熔化开始温度由1 397 ℃提高至1 440 ℃，S 值从 185.16 kPa·℃降低至46.61 kPa·℃，降低了约 75%，料层的透气性明显提高，即显著改善了炉料的软熔性能。但进一步提高混装量则效果不大，此外混装的效果要好于层装。当温度超过熔化开始温度（T_s）时，焦丁的消耗变得明显，其在整个软熔过程中的消耗率为 40% 左右。本文研究结果可为高块矿配比炉料结构下高炉的高效冶炼提供参考。

关键词：块矿；高炉；炉料结构；焦丁；软熔性能；碳排放
中图分类号：TF532 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)05－0024－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.071

Effect of mixed nut coke on soft melt performance of iron-bearing charges with high lump ore ratio

WANG Guang[1], YI Qingshan[1], WEI Runpei[1], ZUO Haibin[1], DING Wang[2]
(1. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Ironmaking Plant, Hunan Valin Xiangtan Iron & Steel Co., Ltd., Xiangtan 411101, Hunan, China)

Abstract: Decarbonization of the steel industry is of great significance to support China's "dual carbon" goal. Increasing the proportion of lump ore into the furnace is an important measure to reduce the carbon emissions of blast furnace ironmaking, and how to reduce the adverse impact of high lump ore ratio on the blast furnace smelting process is the key limiting link in the application of this process. The effects of lump ore ratio, nut coke mixing amount, and nut coke addition method on the soft melt performance of the comprehensive charge are investigated by a soft melt test. The results show that with the increase of lump ore ratio from 12% to 24% (lump ore completely replaces pellets), the softening onset temperature and melting onset temperature decrease by 60 ℃ and 39 ℃, respectively, the softening interval increases significantly, the dripping temperature decreases, and the position of the soft melt zone increases. The widening of the soft melting interval leads to a further increase in the S value to 195.29 kPa·℃, which is an increase of more than 30%, that is, the soft melt performance of the charge gradually deteriorates. Under the condition of mixed 4 g of nut coke (28.6 kg/t molten iron), the melting start temperature is increased from 1 397 ℃ to 1 440 ℃, and the S value is decreased from

收稿日期：2023－09－16；**修回日期**：2023－11－22
基金项目：国家自然科学基金资助项目（U1960205）
作者简介：王 广（1985—），男，博士，副教授，从事低碳炼铁和资源综合利用方面的研究。

185.16 kPa·℃ to 46.61 kPa·℃, which is reduced by about 75%, and the air permeability of the material layer is significantly improved, that is, the soft melt performance of the charge is significantly improved. However, further increasing the amount of mixing is not very effective, and the effect of outside mixing is better than that of layering. When the temperature exceeds the melting start temperature(T_s), the consumption of nut coke becomes obvious, and its consumption rate is about 40% during the whole soft melting process. The results can provide a reference for the efficient smelting of blast furnace under the structure of high lump ore ratio charge.

Key words: lump ore; blast furnace; charge structure; nut coke; soft melt performance; carbon emissions

钢铁工业是国民经济的支柱产业，对保障社会民生具有不可替代的作用。2023 年我国粗钢产量达 10.19 亿吨，其冶炼过程消耗了大量的煤、焦等化石燃料。我国 90% 的粗钢由高炉—转炉流程生产，而为高炉炼铁供应炉料的烧结、球团等铁前工序，是能源消耗、污染物排放、碳排放等的主要工序，也是国家兑现“碳达峰·碳中和”承诺的主战场之一。我国钢铁工业 CO_2 排放量占全国总排放量的 16%，远超世界平均水平的 5%～6%[1]。在国家“双碳战略”背景下，低碳化已成为钢铁行业高质量可持续发展的必由之路。低碳冶金技术的研发得到了钢铁企业和科研院所的关注。面向碳中和的大幅降碳技术，研发难度大，应用的时间节点也靠后。2030 年，我国钢铁工业应加大对难度和成本相对较低的通用低碳技术的研发和应用。对于高炉炼铁，除了煤、焦炭等的燃烧会造成碳排放外，含铁炉料中烧结矿和球团矿的生产也会造成碳排放。块矿属天然资源，无需高温造块，相比烧结矿和球团矿而言更加低碳清洁。因此，提高高炉块矿入炉比例对钢铁工业低成本节能减排具有重要意义[2]。但是，在高炉内部升温过程中，块矿易发生爆裂产生大量粉末，且其软化、熔化温度低，从而破坏高炉的透气性，影响高炉的顺行和技术经济指标[3-4]。

为了实现高炉高块矿配比含铁炉料冶炼和高炉的稳定顺行，找到积极的应对策略显得十分必要。矿焦混装是当前炼铁生产普遍采用的工艺。邹忠平[5]对小块焦炭的回收和利用展开了研究，分析了国内外部分高炉小块焦的回收利用效果。MOUSA 等[6]在模拟高炉条件下研究烧结层中不同含量(10～140 kg/t 铁水)和粒度(10～40 mm)焦丁对高炉透气性和烧结矿还原性的影响，结果表明：焦丁的加入，改善了烧结矿的还原性和高炉软熔区的透气性。YANG 等[7]的研究表明，采用矿焦混装可大大提高软熔温度和改善高炉透气性，增加其内部 Fe 的还原，同时较小尺寸的焦炭和矿石采用混装的效果会更好。WATAKABE 等[8]对原料粒度为 10～15 mm，混装焦炭粒度为 10～15 mm 的小焦丁或 30～40 mm 的焦块进行还原试验，试验结果和生产应用数据表明：配焦能改善矿石的还原性和料层的透气性；在混合装料中使用较大粒度的焦炭对这些特性的改善影响轻微；采用高配比焦炭(120 kg/t 铁水)混装技术，可实现低烧结比(56%)、高产操作。李家新等[9]的研究表明，矿石和焦丁混装可代替部分块焦，焦丁可以改善矿石软熔层的透气性；此外，小块焦与大块焦的置换比可达 1.0 以上。为此，本文基于熔滴试验方法，考察混装焦丁对高块矿配比综合炉料软熔行为的影响，以期为高炉高块矿配比高效冶炼提供参考。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验所用含铁炉料为烧结矿、球团矿和块矿，均取自炼铁生产现场，其化学成分和还原性能分析如表 1 所示。由表 1 可知：原料的铁品位都比较高，球团矿和块矿的全铁质量分数都超过了 64%；烧结矿的还原度指数接近优质烧结矿的水平，球团矿的还原度指数较低，块矿的还原度指数高于球团，低于烧结矿；块矿的烧损率为 6.71%，烧失量为结晶水，结晶水的存在导致块矿具有一定的热爆裂性。试验所用焦丁为高炉炼铁所用焦炭筛下的碎焦，其化学成分分析如表 2 所示。试验前将焦丁切割成边长为 10 mm 左右的立方体，质量约为 1.0 g，于 105 ℃烘干 5 h 后用于还原熔滴试验。

表 1 含铁炉料的主要化学成分及还原度指数(质量分数)

Table 1 Main chemical composition and reduction index of iron bearing furnace burdens %

炉料名称	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	烧损	还原度指数
烧结矿	59.05	11.83	4.71	10.28	1.84	1.81	—	76.7
球团矿	65.47	0.23	5.49	0.45	0.52	0.64	—	56.0
块矿	64.32	1.37	1.62	0.16	0.78	0.76	6.71	64.4

表 2 焦丁的工业分析及其灰分的主要化学成分分析(质量分数)

Table 2 Industrial analysis of coke nut and main chemical composition of the ash %

焦丁工业分析				灰分的主要化学成分				
固定碳	挥发分	灰分	S	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
86.20	1.64	12.16	0.69	49.70	31.63	6.44	4.49	0.80

使用 X 射线衍射分析仪测定含铁炉料的物相组成，结果如图 1 所示。由图 1 可知：烧结矿中存在赤铁矿(Fe_2O_3)、磁铁矿(Fe_3O_4)、浮氏体(FeO)和铁酸钙固溶体[$CaSi_2(FeAl)_{18}O_{36}$]，其中，赤铁矿的特征峰最强；球团矿中存在赤铁矿和石英(SiO_2)，其中，赤铁矿的峰最强，这表明赤铁矿为该矿主要含铁矿相；块矿中存在针铁矿[FeO(OH)]和赤铁矿，针铁矿衍射峰数量多、强度大，为主要物相。

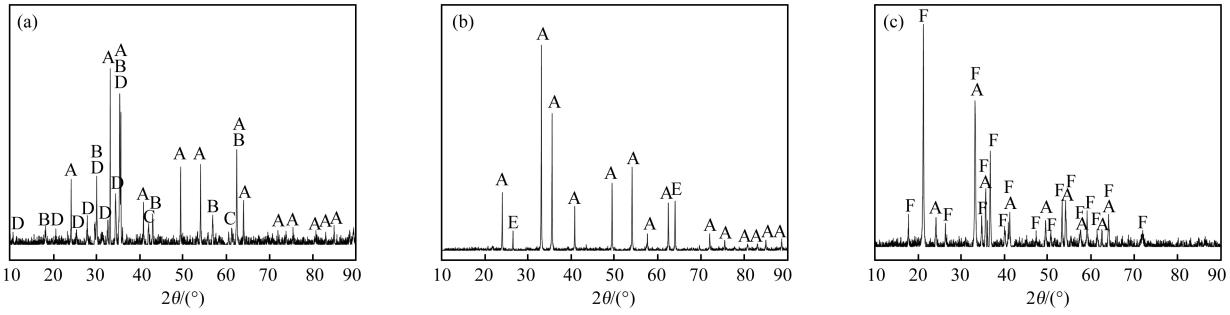
1.2 试验方法

试验采用荷重软化熔滴试验炉来模拟矿石在高炉内的还原软化熔滴行为，主要考察块矿配比、焦丁混装量、焦丁装入方式对综合炉料软化、熔化、渣铁滴落以及透气性的影响，以获得最优的焦丁－矿石混装条件。试验装置主要有高温熔滴炉及测定架、取样箱、智能控温装置、气源及流量控制柜，以及试样位移测定系统、试验过程压差(ΔP)测定系统和计算机数据采集、处理和打印系统等。试验主要步骤如下。

(1) 装料：按配料方案称量试样(粒度为10～12.5 mm)，其总质量达 220 g。首先将 5～8 mm 的 20 g 焦炭装入石墨反应管内，然后将试样混匀装入反应管内，最后在顶部再放入 20 g 焦炭。

(2) 升温与气氛：以 10 ℃/min 的升温速率自动升温，并通入 N_2 保护气，气体流量为 5 L/min；当温度升到 500 ℃时通入预定成分的还原气体(30% CO + 70% N_2)，气体流量为 12 L/min；当温度升到 900 ℃时恒温 60 min，然后以 5 ℃/min 的升温速率升温至试验结束。

(3) 试验过程参数。采用计算机自动记录试验过程参数。试样收缩 10% 和 40% 的温度值分别称为软化开始温度(T_{10}：此时仅试样间的接触点或接触面处发生了变形)和软化终了温度(T_{40}：此时试样本身的空隙已经基本压缩完毕，但是试样



(a) 烧结矿；(b) 球团矿；(c) 块矿

A—赤铁矿(Fe_2O_3)；B—磁铁矿(Fe_3O_4)；C—浮氏体(FeO)；D—铁酸钙固溶体[$CaSi_2(FeAl)_{18}O_36$]；E—石英(SiO_2)；F—针铁矿[FeO(OH)]。

图 1 含铁炉料 XRD 物相分析

Fig. 1 XRD analysis of iron bdaring furnace burdens

之间的空隙尚没有完全消失，所以气流通道尚存，压差并没有明显升高）；熔化开始温度，即压差达到 490 Pa 时的温度值（T_s：此时液相开始生产，气流通道被阻碍，压差开始明显升高）；最大压差值（ΔP_m）；熔滴特征值（S：表征高压差区间气体透过料层的难易程度，该数值越大，表示透气性越差）；滴落温度（T_d：炉料滴落时的温度值）。

（4）试验结束：试样滴落后切断还原气体，通入 5 L/min 的 N_2 保护气，待温度冷却后收集反应管中的残留物和坩埚滴落物，进行后续分析。

在进行综合炉料的软熔试验前，首先对单一炉料的软熔性能进行测试，结果如表 3 所示。由表 3 可知：与烧结矿、球团矿相比，块矿的软熔性能较差，主要表现在软化开始温度较低，滴落温度较高，软熔区间较宽，气体穿透料层的阻力较大。

2　试验结果与分析

2.1　块矿配比对炉料结构软熔的影响

以 76% 烧结矿 + 12% 球团矿 + 12% 块矿为基准炉料结构，逐步提升块矿配比直至块矿完全替代球团矿，软熔试验结果如图 2（a）所示。由图 2（a）可知：当块矿配比（质量分数）由 12% 提升至 18% 时，软化开始温度略有上升，软化区间没有发生变化；熔化开始温度降低，滴落温度略有升高，熔化区间增幅较大。与此同时，S 值有较大提升（从 149.21 kPa·℃ 增加到185.16 kPa·℃），这说明尽管软熔带的区间变化较小，但是随着块矿配比的提升，软熔带内部的熔化状态变得更加复杂，使得软熔性能较大幅度恶化。当块矿配比提升至 24% 时，与基准相比，软化开始温度和熔化开始温度大幅度降低（分别降低 60 ℃ 和 39 ℃），软化区间较大幅度增加，滴落温度降低，这表明软熔带的位置上升，软熔区间变宽，S 值进一步增大至 195.29 kPa·℃（提高了 30% 以上），软熔带的透气性进一步恶化。

提升块矿配比试验滴落物的重量变化如图 2（b）所示。由图 2（b）可知：随着块矿配比的提升，滴落物的重量也随之下降。值得注意的是，滴落物重量的变化趋势与 S 值的变化趋势类似，即先急剧变化，再缓慢改变。因此，块矿会对综合炉料的冶炼行为产生较为明显的不利影响，且配比越高，影响越显著。

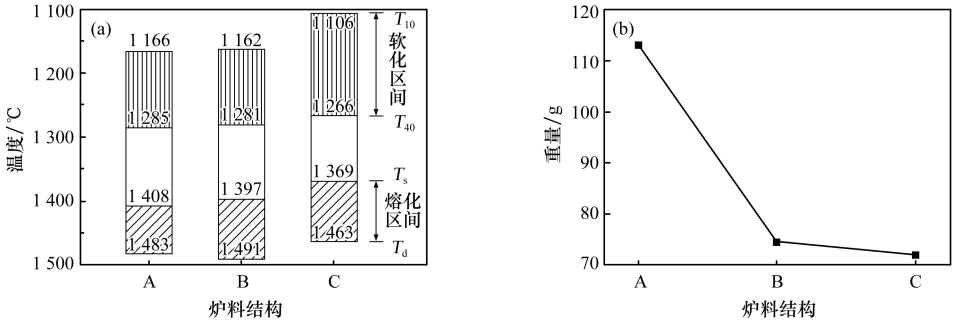
2.2　焦丁混装量对综合炉料软熔的影响

选取 76% 烧结矿 +6% 球团矿 + 18% 块矿的炉料结构为基准，混装4 g（28.6 kg/t铁水）和8 g

表 3　不同炉料软熔试验结果

Table 3　Results of softening and melting test of different burdens

炉料名称	T_{10}/℃	T_{40}/℃	($T_{40}-T_{10}$)/℃	T_s/℃	T_d/℃	(T_d-T_s)/℃	(T_d-T_{10})/℃	ΔP_m/kPa	S 值/(kPa·℃)
烧结矿	1 176	1 290	114	1 409	1 489	80	313	2.33	143.47
球团矿	1 114	1 180	66	1 289	1 459	170	345	2.39	314.87
块矿	930	1 181	251	1 358	1 515	157	585	2.77	349.26



（a）软熔试验结果；（b）滴落物质量变化

图 2　不同块矿配比下炉料软熔试验结果和滴落物质量变化

Fig. 2　Results of softening and melting test and changes of droplet weight of furnace burden under different lump ore ratio

（注：A 为 76% 烧结矿 + 12% 球团矿 + 12% 块矿；B 为 76% 烧结矿 +6% 球团矿 + 18% 块矿；C 为 76% 烧结矿 +24% 块矿。）

(57.2 kg/t 铁水)焦丁进行软熔试验，结果如图 3 所示。由图 3 可以看出，混装 4 g 焦丁后，软化终了温度有较大幅度上升，由 1 281 ℃提高至 1 326 ℃。焦丁的塑性较差，高温下不易变形。混装试样要达到同等的收缩量，与基准试样相比，含铁炉料要完成更大的收缩量。因此，混装试样含铁炉料的软化温度理论上要更高一些。由于焦丁促进了含铁炉料的还原(>900 ℃)，降低了高温阶段渣相中的 FeO 含量，提高了渣相的液相线温度，因此熔化开始温度显著提高(由 1 397 ℃提高至 1 440 ℃)，在液相生成后，焦丁促进了金属铁的快速渗碳和滴落，进而导致混装试样的滴落温度下降(降低了 10 ℃)，使得熔化区间明显变窄。随着焦丁配比的提高，最大压差从 2.51 kPa 分别降低到 1.66 kPa 和 1.55 kPa，S 值从 185.16 kPa·℃分别降低至46.61 kPa·℃和51.45 kPa·℃,料层的透气性明显提高。由于混装不同量的焦丁后，软化开始温度和滴落温度都有不同程度的变化，最终导致混装 8 g 焦丁的炉料的软熔区间略微变宽，而混装 4 g 焦丁炉料的软熔区间则有较大幅度收窄。

为了查明矿焦混装对含铁炉料还原的影响，将软熔试验在关键温度节点打断，对矿石进行还原度计算和分析。以混装 4 g 焦丁的炉料为研究对象，分别选取接近软化开始温度的 1 150 ℃和接近压差陡升温度的 1 480 ℃为温度节点，试验结果如表 4 所示。由表 4 可以发现，向综合炉料中加入焦丁可以在一定程度上提高综合炉料的还原度，这也与前述软熔试验的结果相对应。更高的还原度使得炉料在熔化以前被更多地还原为金属铁，从而导致熔化开始温度升高。可以进一步推断，

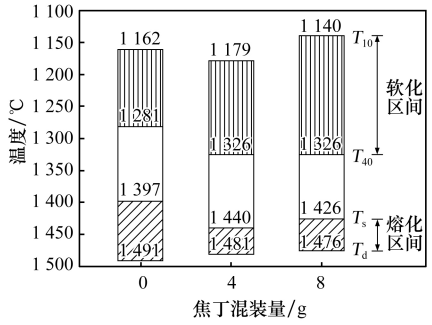


图 3 矿焦混装软熔试验结果

Fig. 3 Results of softening and melting test of mixed charging of iron ore and coke nut

表 4 矿焦混装还原打断试验结果

Table 4 Results of interrupted reduction test for mixed charged iron ore and coke nut

烧结矿配比/%	球团矿配比/%	块矿配比/%	焦丁混装量/g	中断温度点/℃	还原度指数/%
76	6	18	0	1150	66.34
76	6	18	4	1150	67.75
76	6	18	4	1480	69.82

随着温度的提高，焦丁起到的作用将更为明显。

综上，混装焦丁后，焦丁在料层中起到了骨架作用，同时促进了铁氧化物的还原，减少了渣量，促进了金属铁的渗碳，降低了液相生成温度及最大压差，缩短了高压差区间，降低了软熔带对煤气流的阻碍作用，有利于高炉冶炼的顺行，可在一定程度上加大对冶金性能较差的块矿资源利用的目的。

2.3 焦丁加入方式对综合炉料软熔的影响

在高炉布料过程中，焦丁既可以与含铁炉料混装后入炉，也可以采用与块焦类似的方式分层布料。为了查明焦丁加入方式对综合炉料软熔行为的影响，选取层装 4 g 焦丁作为对比进行软熔试验，试验结果如图 4 所示。由图 4 可知，与混装 4 g 焦丁的炉料软熔情况相比，基准炉料和采用层装方式炉料的软化区间有所变窄，但熔化区间大幅增加，最终导致软熔区间变宽，软熔带位置上移；最大压差和 S 值增加，最大压差从 1.66 kPa 增加至 2.13 kPa，S 值从 46.61 kPa·℃增加至 119.81 kPa·℃,但均明显低于基础炉料结构。上述结果表明，在装料方式上，层装的效果略低于混装,但与没有加焦丁的情况相比仍然表现出较明

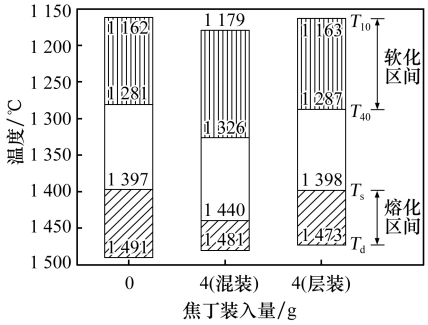


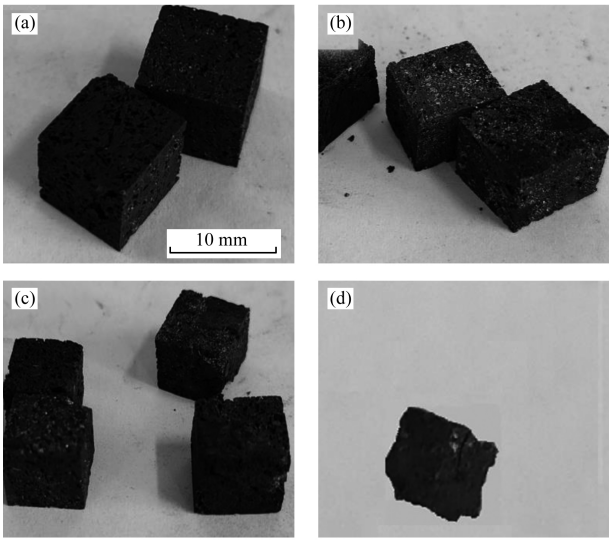
图 4 不同焦丁加入方式下的软熔试验结果

Fig. 4 Softening and melting test results under different coke nut addition methods

显的优势。考虑到使用效果、操作方便性等因素，以焦丁－含铁炉料混装的入炉方式较优。

2.4　还原软熔过程焦丁演变规律

焦丁在还原及软熔过程形貌的演变如图 5 所示。由图 5 可以直观地发现：随着温度从 1 150 ℃升至熔化开始温度，与原始外形[图 5(a)]相比，焦丁的宏观形貌几乎没有发生变化；而温度到达滴落温度时，焦丁的外观发生了明显变化，此时焦丁的质量损失接近 40%。此时，含铁炉料呈液态包裹在焦丁表面，焦丁与含铁炉料之间的接触面积增大，促进了焦丁与含铁炉料之间的反应(还原和渗碳)，导致焦丁的溶解损失量显著增加。由图 6 也能发现，随着温度的升高，焦丁的质量损失逐渐增加，结合前述的还原和软熔试验结果，焦丁的存在确实对高炉冶炼过程起到了促进作用，使高炉具备了接受高块矿比进行冶炼的能力。有研究表明[10]，如果采用一种比焦炭反应性好的半焦与含铁炉料混装，进入软熔带后，消耗率可达到 90% 以上，还可以进一步提高炉料的预还原度，降低初生渣相中的 FeO 含量，提高初生渣相的熔点，使熔化区间变窄，从而进一步改善料层的透气性，促进高炉高块矿配比下的经济高效稳定顺行。



(a) 原始状态；(b) 1 150 ℃；(c) 软化温度；(d) 滴落温度

图 5　软熔过程焦丁形貌演变

Fig. 5　Evolution of coke nut morphology during softening and melting process

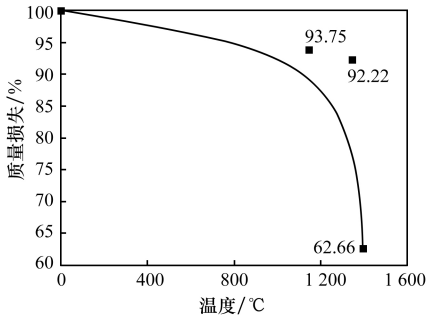


图 6　还原软熔过程焦丁的质量损失

Fig. 6　Mass loss of coke nut during reduction and softening-melting process

3　结　论

(1) 由于块矿的软熔性能比烧结矿、球团矿差，随着块矿配比提升直至完全替代球团矿，块矿的开始软化温度略有上升，压差陡升温度降低，软化区间和熔化区间变宽，最大压差和熔滴性能指数增加，炉料的透气性明显变差。

(2) 混装焦丁可使软化终了温度和压差陡升温度显著提高，熔化区间明显变窄，最大压差降低，料层的透气性明显提高。焦丁可在一定程度上提高综合炉料的还原度，温度越高，作用越明显。这是矿焦混装改综合炉料软熔性能的一个重要因素。

(3) 矿焦层装改善综合炉料软熔性能的效果略低于混装，但与没有加焦丁的情况相比仍然表现出较明显的优势。

(4) 当还原温度低于压差陡升温度时，混装的焦丁变化很小，而温度到达滴落温度时，焦丁的外观发生了明显变化，此时焦丁的质量损失接近 40%。焦丁参与了含铁炉料的还原和渗碳，促进了高块矿配比下高炉冶炼的顺行。

参考文献：

[1] 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.

[2] 赵强，肖华荣，魏进超，等. 典型 PB 块矿的物理化学

特性及热爆裂行为研究[J]. 烧结球团,2021,46(4):72 – 77.
ZHAO Qiang, XIAO Huarong, WEI Jinchao, et al. Research on physicochemical characteristics and thermal crack behavior of typical PB lump ore[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(4):72 – 77.

[3] 左海滨,于文涛,张建良. 温度对天然块矿爆裂的影响[J]. 钢铁,2015,50(5):7 – 12.
ZUO Haibin, YU Wentao, ZHANG Jianliang. Effects of temperature on the decrepitation performance of natural lump ores[J]. Iron & Steel,2015,50(5):7 – 12.

[4] 朱勇军,徐辉,王士彬. 宝钢4号高炉提高块矿比例实践[J]. 炼铁,2019,38(1):32 – 35.
ZHU Yongjun, XU Hui, WANG Shibin. Production practice under higher lump ore ratio in Baosteel No. 4 BF [J]. Ironmaking,2019,38(1):32 – 35.

[5] 邹忠平. 小块焦回收利用的研究与实践[J]. 钢铁技术,1994(4):20 – 33.
ZOU Zhongping. Research and practice on small coke recycling and utilization[J]. Iron & Steel Technology, 1994(4):20 – 33.

[6] MOUSA E A, BABICH A, SENK D. Effect of nut coke-sinter mixture on the blast furnace performance[J]. ISIJ International,2011,51(3):350 – 358.

[7] YANG Z X, YANG J L. Effect of coke-ore mixed charging on reduction and gas flow characteristics in softening-melting zone [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1995, 22(2):161 – 165.

[8] WATAKABE S, TAKEDA K, NISHIMURA H, et al. Development of high ratio coke mixed charging technique to the blast furnace[J]. ISIJ International,2006,46(4):513 – 522.

[9] 李家新,糜克勤. 混装焦丁时的焦炭热强度及适宜加入量[J]. 炼铁,1994,13(6):53 – 54.
LI Jiaxin, MI Keqin. Thermal strength and suitable addition amount of coke when mixed with coke butyl[J]. Iron Making,1994,13(6):53 – 54.

[10] WANG G, XUE Q G, WANG J S. Effect of mixing charge of highly reactive semicoke nut on the reaction of high Al_2O_3 ferrous burden in blast furnace[J]. Ironmaking & Steelmaking,2019,46(5):477 – 484.

(上接第16页)

[8] 刘鹏飞,郑丽丽,郭卓团,等. 蒙古铁矿块矿直接入炉基础冶金性能[J]. 钢铁研究学报,2019,31(10):882 – 888.
LIU Pengfei, ZHENG Lili, GUO Zhuotuan, et al. Research on metallurgical properties of Mongolian lump ore[J]. Journal of Iron and Steel Research,2019,31(10):882 – 888.

[9] 袁兵. 重钢铁矿石冶金性能及合理经济配矿的研究[D]. 重庆:重庆大学,2006:28.
YUAN Bing. Research on reasonable structure burden of blast furnace and iron ore metallurgical properties at CSIC[D]. Chongqing: Chongqing University,2006:28.

[10] 吴艺鹏,潘积国,刘玉猛,等. 青岛特钢高炉使用PB块和纽曼块对比分析[J]. 山东冶金,2021,43(1):29 – 30.
WU Yipeng, PAN Jiguo, LIU Yumeng, et al. Contrastive analysis of PB block and Newman block used in Qingdao special steel blast furnace[J]. Shandong Metallurgy, 2021,43(1):29 – 30.

[11] 易凌云,肖华荣,张楠,等. 典型纽曼块矿的热爆裂机制[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(11):4226 – 4233.
YI Lingyun, XIAO Huarong, ZHANG Nan, et al. Decrepitation mechanism of Newman lump ore[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2022,53(11):4226 – 4233.

[12] 肖华荣. 天然块矿热爆裂行为、机理与防爆基础研究[D]. 长沙:中南大学,2022:30 – 48.
XIAO Huarong. Study on the decrepitation behavior, mechanism and abatement of natural lump ore[D]. Changsha: Central South University,2022:30 – 48.

[13] 祁成林,冯根生,许满兴,等. 高炉冶炼条件下天然块矿热裂指数评价新方法[J]. 烧结球团,2022,47(2):67 – 73;109.
QI Chenglin, FENG Gensheng, XU Manxing, et al. A new method for evaluating decrepitation index(DI) of natural lump ore under BF ironmaking[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(2):67 – 73;109.