烧结

固体燃料料面分加低碳烧结技术

乐文毅[1]，范晓慧[2]，王兆才[1]，赵改革[3]，季志云[2]，刘 臣[1]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410007；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，
湖南 长沙 410083；3. 湘潭钢铁集团有限公司，湖南 湘潭 411102）

摘要：烧结矿是高炉炼铁的主要含铁炉料，但其加工过程能耗高，是钢铁行业碳减排的重要工序。本文采用烧结杯试验，系统解析了固体燃料料面分加影响烧结的规律以及作用机理，并确定了适宜料面分加工艺制度。研究结果表明：燃料料面分加具备提升烧结指标的潜力，但实现其在表层的均匀分布是有效发挥其提质降碳功能的关键；增加燃料料面分加配比、提高其在表层的分加深度，烧结指标均呈现出先升高后降低的趋势；且随着用于分加燃料粒度的增大，烧结各项指标呈上升趋势。适宜的燃料分加制度参数：分加配比宜为 5%、分加燃料粒度 > 3 mm、分加深度宜为 50 mm，该制度可将烧结固体燃耗从 52.56 kg/t 降低至 50.51 kg/t。固体燃料料面分加低碳烧结技术可优化料层高度方向的热量分布，使表层及上层烧结矿中黏结相矿物增多，且多为高强度针状。研究结果可为该技术的工业应用提供理论指导和技术支持。

关键词：低碳烧结；燃料料面分加；影响规律；作用机理
中图分类号：TF046.4 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)01－0101－10
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.007

Low-carbon sintering technology by layered charging of solid fuel on the sinter mix bed surface

YUE Wenyi[1], FAN Xiaohui[2], WANG Zhaocai[1], ZHAO Gaige[3], JI Zhiyun[2], LIU Chen[1]
(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410007, Hunan, China;
2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;
3. Xiangtan Iron and Steel Group Co., Ltd., Xiangtan 411102, Hunan, China)

Abstract: Sinter is the main iron-bearing furnace burden material for blast furnace ironmaking, but its processing is energy-intensive, so the process is a key process for carbon emission reduction in the iron and steel industry. In this paper a sintering pot test system was adopted to analyze the influence patterns and mechanisms of layered charging of solid fuel on the sinter mix bed surface and determine the appropriate process system for the layered charging on the sinter mix bed surface. The study results indicate that layered charging of fuel on the sinter mix bed surface has the potential to improve sintering performance; however, uniformly distributing the fuel on the surface layer is crucial for effectively serving its functions of enhancing quality and reducing carbon. By increasing the proportion of layered charging fuel on the bed surface, and enhancing the depth of layered charging fuel on the bed surface, the sintering indices initially increased and then decreased. Furthermore, as the particle size of the fuel used for layered charging increased, all sintering indices showed an upward trend. Therefore, the suitable layered charging parameters are as follows: the layered charging ratio should be 5%, a fuel particle size should be > 3 mm (coarse particles), and the layered charging depth should be 50 mm. Under

收稿日期：2025－10－13；**修回日期**：2025－11－11
基金项目：中国五矿科技专项计划“揭榜挂帅”资助项目(2025ZXA05)
作者简介：乐文毅(1981—)，男，正高级工程师，从事企业管理及冶金铁前领域技术研究。
通信作者：王兆才(1984—)，男，正高级工程师，从事烧结球团及直接还原工艺优化方面的研究。

these conditions the solid fuel consumption for sintering can be reduced from 52.56 kg/t to 50.51 kg/t. The low-carbon sintering technology of layered charging solid fuel on the sinter mix bed surface can optimize the rationality of the thermal distribution along the bed height and make the amount of bonding phase minerals of the surface and upper layers of the sinter increase and make the form of them predominantly be high-strength acicular. The study findings can provide theoretical guidance and technical support for the industrial application of this technology.

Key words: low-carbon sintering; layered charging of fuel on bed surface; influence pattern; mechanism

钢铁行业是国计民生的支柱产业，对推动国家经济发展发挥着重要作用。中国是世界上粗钢产量最多的国家，年产量占世界总产量50%以上[1]。据统计，每生产1 t粗钢，会向大气中排放CO_2约1.92 t[2]，钢铁行业每年CO_2排放量占全国CO_2总排放量的15%~18%[3]。作为钢铁生产流程中典型的“高能耗、高污染”环节，烧结工序排放的CO_2占生产流程总CO_2排放量10%以上[4]，为了达到“双碳”目标，实现烧结工序绿色低碳转型具有十分现实的意义。

以焦粉、无烟煤为代表的固体燃料是烧结过程主要的能量来源，其燃烧后的气体产物是烧结烟气污染物的主要组成部分。为了降低烧结能耗，减少固体燃料的使用量、提高燃料燃烧效率是最直接有效的途径。采用生物质燃料部分替代传统固体燃料烧结可以在保证烧结指标的前提下降低吨矿燃耗，并减少气体污染物的排放[5-7]，但生物质燃料的高反应性不利于传热速率与燃烧速率匹配，在替代比超过40%后会降低烧结矿的产、质量指标[8]。日本JFE钢铁公司提出在烧结过程中向料层内喷吹氢基气体燃料以实现上层补热的同时降低烟气碳氧化物排放[9]，我国研究者基于该思路完善了富氢气体燃料喷吹烧结的工艺制度、成矿机理研究[10-13]，进一步提升该技术的降耗减碳效果，但由于富氢燃料价格较高、相关配套设备建设、运行维护成本较大且存在一定安全隐患，富氢气体燃料喷吹工艺始终未能实现良好的工业应用。相较于富氢气体喷吹烧结，烟气循环烧结作为一种成熟的节能减排烧结工艺，在首钢、唐钢、德龙钢铁、兴澄特钢、安阳钢铁等钢铁企业烧结厂中实现工业化应用。在对循环模式和循环烟气工艺参数进行系统的研究后[14-16]，发现无论内循环还是外循环工艺，受限于循环烟气较低的氧含量和复杂的气体组分，无法实现高比例循环，节能减排效果受到限制，且需要投入额外的设备运行维护成本，导致该技术没有实现大范围普及[17]。

早在上世纪七八十年代，研究者便发现烧结料层存在热量逐层叠加现象，并有意加厚料层以利用其热量叠加效应减少固体燃料消耗[18-19]，由于其无需增加额外的设备、操作简单、节能降耗效果显著，在我国钢铁企业烧结设备上得到广泛应用。2015年左右，我国平均料层高度达700 mm，目前，平均烧结料层高度达800 mm[20]，部分烧结厂料层高度已超过1 000 mm[21]，但在生产过程中，也发现烧结料层上下温度差异加剧，烧结热量未得到有效利用等问题，节能减排效果未达到理想状态[22]。研究者们考虑通过人为调控固体燃料在料层中的分布来实现厚料层烧结热量分布均匀化[23-25]，但由于布料导致的偏析，无法精准调节燃料的分布，限制了其节能降耗的潜力。

固体燃料料面分加技术基于上述思路提出，更进一步的根据厚料层热量分布规律，将部分燃料取出后精准地添加到需要热量的上部料层中，从而改善料层整体热量分布，取得了良好的效果[26-28]。本文在已有研究基础上，更系统地解析了固体燃料在料层表面的分加方式、分加工艺制度以及分加燃料种类影响烧结的规律，揭示了其作用机制，以期为该技术的工业应用提供理论指导和技术支持。

1 原料性能与研究方法

1.1 原料性能

研究中用到的烧结原料均来自于国内某大型钢铁企业，包括混匀铁矿(由磁铁精矿、赤铁粉矿以及褐铁矿按配比混合而成)、生石灰、白云石、焦粉以及返矿，其主要化学成分和烧损如表1所示，焦粉的粒度组成如表2所示。由表1可知，混匀铁矿w(TFe)、w(FeO)、烧损分别为59.16%、

表 1　原料主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1　Main chemical compositions and losses of ignition of raw materials　　%

原料名称	TFe	FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	P	S	烧损
混匀铁矿	59.16	4.85	0.57	4.930	0.25	2.18	0.084	0.079	6.42
生石灰	0.13	0.05	88.42	0.860	3.30	0.32	0.008	0.053	4.26
白云石	0.07	0.04	30.87	0.016	20.49	0.10	0.008	0.002	46.70
焦粉	0.64	0.39	0.87	6.320	0.14	4.47	0.040	0.850	86.49
返矿	56.38	9.32	10.52	5.290	1.98	1.84	0.100	0.027	—

表 2　焦粉粒度组成及平均粒度

Table 2　Particle size composition and average particle size of coke breeze

粒度组成/%						平均粒度/mm
>8 mm	[8,5) mm	[5,3) mm	[3,1) mm	[1,0.5] mm	<0.5 mm	
3.48	10.63	11.84	20.59	21.59	31.88	2.18

4.85%、6.42%；生石灰和白云石用于调节烧结矿的碱度和 $w(MgO)$，其中生石灰的品质较好，其 $w(CaO)$高达 88.42%；焦粉灰分以 SiO_2、Al_2O_3 为主要组分。由表 2 可知，焦粉中 >3 mm 的较粗粒级质量分数 >25%，<0.5 mm 的细粒级质量分数 >30%。

1.2　研究方法

采用尺寸规格为∅180 mm×1 000 mm 的烧结杯模拟实际烧结生产过程。烧结原料按设计配比进行质量配料后，经由混合、制粒得到混合料，并将其装入预先加装了 1 kg 铺底料的烧结杯内。为解析燃料料面分加参数对烧结指标的影响，研究过程预先将用于料面分加的焦粉分出，在其余焦粉与混匀铁矿、熔剂、返矿完成混匀、制粒、布料后，再将预先分出的焦粉均匀分布到料面一定深度的混合料中(见图 1)。通过调控预先分出的焦粉的配比、焦粉的粒度以及焦粉在料面的分布深度、分布方式，系统解析燃料料面分加影响烧结的规律。

混合料完成布料后，采用天然气对料面进行点火，点火时间、点火温度、点火负压分别为 1 min、(1 050 ± 50) ℃、−5 kPa，并在 950 ℃保温 1 min。完成点火保温后，将抽风负压调整至 −10 kPa，料层中形成的燃烧带在抽风作用下从表层迁移至底层，从而完成整个烧结过程。从点火开始至烧结废气温度达到最高后开始降温时所需时间即为烧结时间。到达烧结终点时，抽风负压调低至 −5 kPa，冷却 3 min 后卸料，经单齿辊破碎机破碎，然后进行落下、分级及转鼓强度检测等。为解析燃料料面分加影响烧结的作用机理，选取代表性的成品矿样品用于显微结构和主要矿物组成分析，并沿料层高度方向 100、300、500、700 mm 处放置 4 根热电偶用于监测燃料料面分加前后料层温度场的变化。

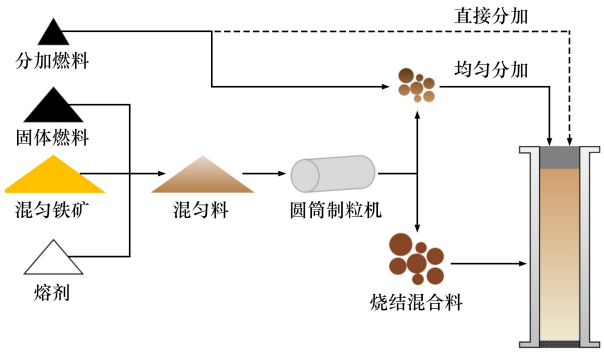


图 1　固体燃料料面分加烧结杯试验示意

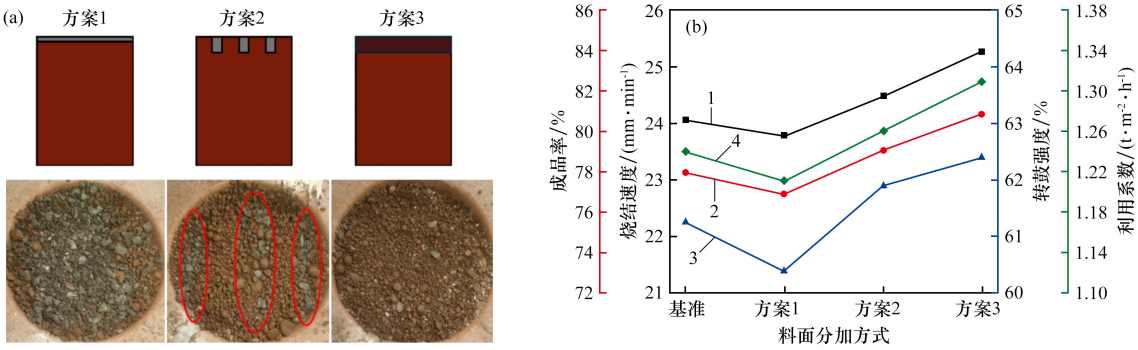
Fig. 1　Schematic diagram of sintering pot test of the solid fuel separated addition on sinter material surface

2　结果与讨论

2.1　固体燃料料面分加方式对烧结的影响

在未分加的基准试验中，适宜混合料水分为 8.50%，固体燃料采用全焦粉，占混匀料的适宜质量分数为 4.03%，焦粉全部参与制粒而不分加。本节研究了固体燃料料面分加方式对烧结指标的影响，该研究将全部焦粉的 5%用于料面分加，分别采用了焦粉直接布料到料面(方案 1)、焦粉布

料到料面料槽(方案 2)以及均匀分布于表层 50 mm 深度的混合料中(方案 3)的 3 种分加形式，结果如图 2、3 所示。由图 2 可知，与未分加的基准方案相比，采用方案 1 时，烧结速度、成品率、转鼓强度以及利用系数均呈现出小幅降低的趋势，分别从 23.67 mm/min、77.97%、61.25%、1.24 t/(m^2·h)降低至 23.33 mm/min、76.88%、60.38%、1.21 t/(m^2·h)；而当采用方案 2、方案 3 时，烧结各项指标均呈现升高的趋势，相对而言，方案 3 对烧结指标的改善作用更为明显，烧结速度、成品率、转鼓强度以及利用系数分别提高至 25.13 mm/min、80.89%、62.40%、1.31 t/(m^2·h)。主要原因在于，直接将焦粉布料于料面时，致使料面局部区域热量过于集中，造成过熔现象(见图 3)，反而不利于成矿；而将焦粉均匀分布于表层一定深度的混合料中时，其在料层中的持续燃烧优化了料层热量分布，改善了表层的成矿过程，从而实现烧结指标提升。据此可知，将部分焦粉预先分出用于料面分加具备改善烧结指标的潜力，但实际工业应用过程需要重点考虑如何将焦粉相对均匀的分布于表层混合料中。

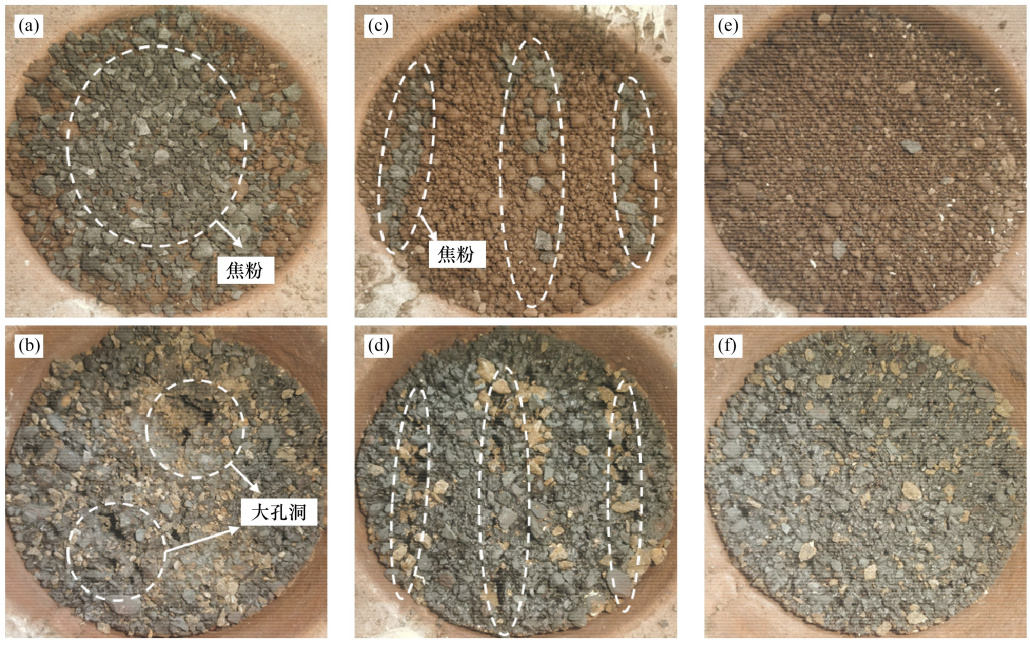


(a) 不同分加方式示意和料面实拍图；(b) 分加方式对烧结指标的影响

1—烧结速度；2—成品率；3—转鼓强度；4—利用系数。

图 2 燃料料面分加方式对烧结指标的影响

Fig. 2 Effect of solid fuel separated addition modes on sintering indexes



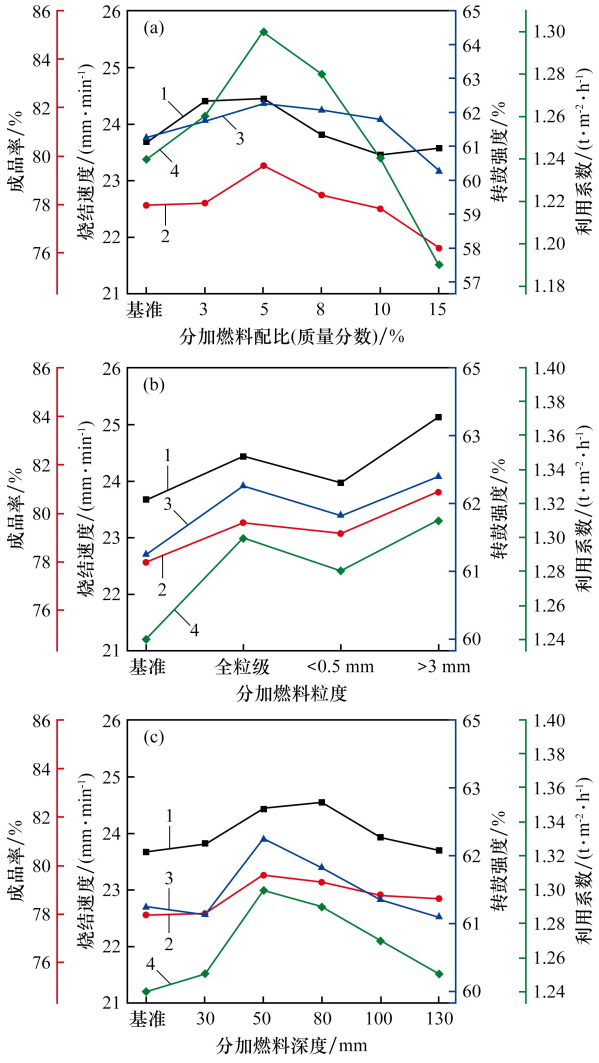
(a) 方案 1 点火前；(b) 方案 1 点火后；(c) 方案 2 点火前；(d) 方案 2 点火后；(e) 方案 3 点火前；(f) 方案 3 点火后

图 3 燃料料面分加方式对料面宏观结构的影响

Fig. 3 Effect of solid fuel separated addition modes on the structure of sinter material surface

2.2　固体燃料料面分加工艺参数对烧结的影响

基于上述方案 3 的均匀分加方式，解析了用于料面分加的全粒级焦粉占总焦粉的比例、用于料面分加焦粉的粒度组成以及焦粉在表层的分加深度对烧结指标的影响，结果如图 4 所示。



（a）分加燃料配比；（b）分加燃料粒度；（c）分加燃料深度

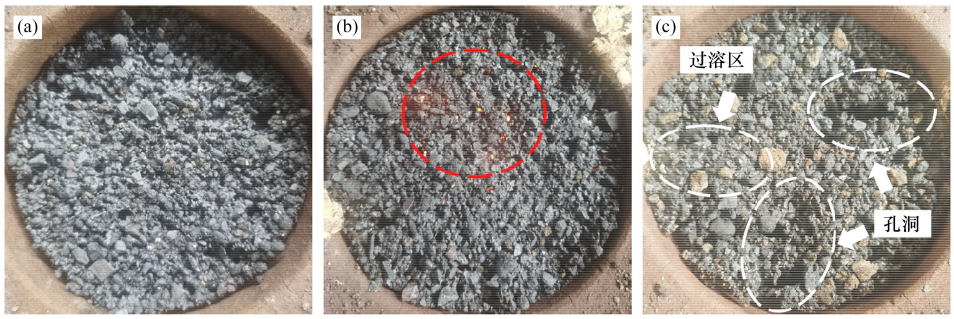
1—烧结速度；2—成品率；3—转鼓强度；4—利用系数。

图 4　分加工艺参数对烧结指标的影响

Fig. 4　Effect of process parameters on sintering indexes for the solid fuel separated addition technology

在混合料水分为 8.50%，焦粉配加质量分数为 4.03%、分加深度为 50 mm 的条件下，料面分加焦粉配比对烧结指标的影响如图 4(a)所示。由图 4(a)可知，随着料面分加焦粉配比的提高，烧结速度、成品率、转鼓强度和利用系数均呈现先上升后下降的趋势。与未分加的基准方案相比，当分加的焦粉配比提高至 3%时，烧结速度、成品率、转鼓强度、利用系数分别从 23.67 mm/min、77.97%、61.25%、1.24 t/(m²·h)提升至 24.40 mm/min、78.04%、61.76%、1.26 t/(m²·h)，继续提高分加的焦粉配比至 5%时，各项烧结指标进一步分别提升至 24.44 mm/min、79.61%、62.26%、1.30 t/(m²·h)。但当分加的焦粉配比提高至 8%时，各项指标均出现降低，分别为 23.80 mm/min、78.37%、62.06%、1.28 t/(m²·h)。分加焦粉配比对料面宏观结构的影响如图 5 所示。其中，图 5(a)为基准条件下料面宏观状态，烧结料层存在上部热量少、下部热量过多的固有特性；图 5(b)为表层分加焦粉配比 5%后的料面宏观状态，料层热量分布得以优化，表层热量充足，料面红层持续时间长，烧结成矿条件得到改善；图 5(c)为表层分加焦粉配比 15%后的料面宏观状态，上部料层补热的燃料配比过高，致使上部料层热量过剩、表面过熔等新问题，过量焦粉燃尽后的孔隙还会使表层形成较大的孔洞。因此，从更大程度改善烧结指标的角度来看，适配于本研究原料条件的燃料分加配比为 5%。

在混合料水分为 8.50%，焦粉配比为 4.03%以及分加配比为 5%、分加深度为 50 mm 的条件下，分别以 0～10 mm 全粒级、<0.5 mm 细粒级、>3 mm 粗粒级用于料面分加。料面分加焦粉粒度对烧结指标的影响如图 4(b)所示。由图 4(b)可知，与未分加的基准方案相比，不同粒度燃料用于料面分加均能改善烧结指标，且随着用于分加的燃料粒度增大，烧结指标的改善效果越明显。当采用<0.5 mm 细粒级焦粉用于料面分加时，烧结速度、成品率、转鼓强度以及利用系数分别从基准时的 23.67 mm/min、77.97%、61.25%、1.24 t/(m²·h)提高至 23.96 mm/min、79.16%、61.82%、1.28 t/(m²·h)；而当采用>3 mm 粗粒级燃料用于料面分加时，烧结指标的改善效果更为明显，烧结速度、成品率、转鼓强度以及利用系数分别提高至 25.13 mm/min、80.89%、62.40%、1.31 t/(m²·h)。主要原因在于：粒度较粗的燃料具有更长的持续燃料时间，可对表层物料进行更为持久的供热，而粒度较细的燃料比



（a）基准；（b）料面分加焦粉配比 5%；（c）料面分加焦粉配比 15%

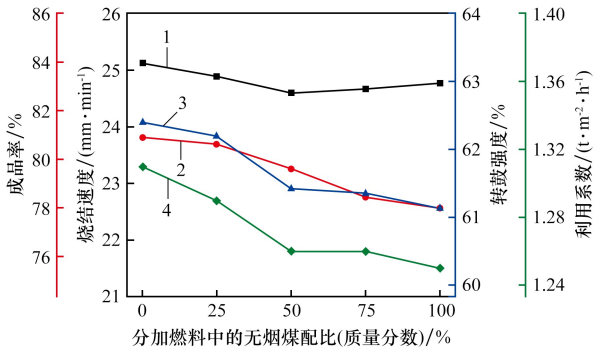
图 5 分加工艺参数对料面宏观结构的影响

Fig. 5 Effect of process parameters on the structure of sinter material surface

表面积大、燃烧活性更高，短时间内便会燃烬，从而其对表层物料的补热效果相对有限。因此，粗粒级的燃料用于料面分加相对较优。

在混合料水分为 8.50%，焦粉配比为 4.03% 以及分加配比为 5%、分加 0～10mm 全粒级焦粉的条件下，燃料分加深度对烧结指标的影响如图 4(c)所示。由图 4(c)可知，随着燃料分加深度的增加，烧结各项指标均出现先上升后降低的趋势。与未分加的基准方案相比，当分加深度为 30 mm 时，烧结各项指标略有提升，而当分加深度增加至 50 mm 时，烧结速度、成品率、转鼓强度以及利用系数分别从 23.67 mm/min、77.97%、61.25%、1.24 t/(m^2·h)提高至 24.44 mm/min、79.61%、62.26%、1.30 t/(m^2·h)；进一步提高分加深度至 80 mm 时，烧结指标出现小幅波动，但当分加深度提高至 100 mm 时，烧结指标出现较为明显的下降，分别为 23.92 mm/min、78.98%、61.35%、1.27 t/(m^2·h)，结果表明燃料在料层中分加深度过浅或过深对烧结指标提升作用均相对较小。主要原因在于：分加深度过浅，在点火后分加的燃料迅速燃烧，热量很快穿过料面逸散，对上部料层补热的作用相对有限；分加深度过深，单位体积混合料内的实际燃料含量降低，从而减弱了燃料料面分加对表层的集中补热效果。因此，适宜的燃料分加深度为 50～80 mm。

在燃料粒度 >3 mm、分加配比为 5%、分加深度为 50 mm 的适宜分加制度下，调整分加燃料中无烟煤的质量分数为 0、25%、50%、75%、100%，研究用于料面分加的燃料中无烟煤配比对烧结指标的影响，结果如图 6 所示。由图 6 可知，与分加燃料全部为焦粉相比，随着分加燃料中无烟煤配比的提高，烧结各项指标出现下降的趋势；当分加燃料由焦粉全部转变为无烟煤时，成品率、转鼓强度和利用系数分别由 80.89%、62.40%、1.31 t/(m^2·h) 下降至 78.00%、61.14%、1.25 t/(m^2·h)；无烟煤的配比对烧结速度的影响不明显，当无烟煤质量分数超过 50% 后，其对转鼓强度的影响减弱。综合来看，单独采用无烟煤进行分加，其效果不如焦粉，当采用两种燃料进行组合分加时，组合燃料中无烟煤的质量分数宜控制在 25% 以内。



1—烧结速度；2—成品率；3—转鼓强度；4—利用系数。

图 6 分加燃料中无烟煤配比对烧结指标的影响

Fig. 6 Effect of anthracite proportion in the added solid fuel on sintering indexes

在适宜燃料分加制度(燃料粒度 >3 mm、分加配比为 5%、分加深度为 50 mm)下，100% 焦粉、75% 焦粉和 25% 无烟煤联合分加对烧结固体燃耗的影响如图 7 所示。由图 7 可知，与未分加的基准方案相比，100% 焦粉料面分加制度下，烧结矿固体燃料消耗从 52.56 kg/t 降低至 50.51 kg/t，降低幅度为 3.90%；联合分加制度下，烧结矿固

体燃料消耗从 52.56 kg/t 降低至 50.82 kg/t，降低幅度为 3.31%。

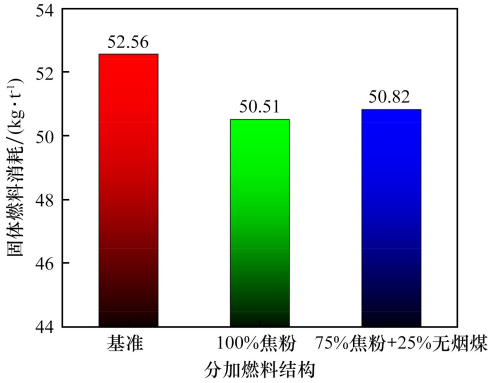


图 7　不同燃料料面分加对吨矿固体燃料消耗的影响

Fig. 7　Effect of the solid fuel separated addition technology on different solid fuel consumption

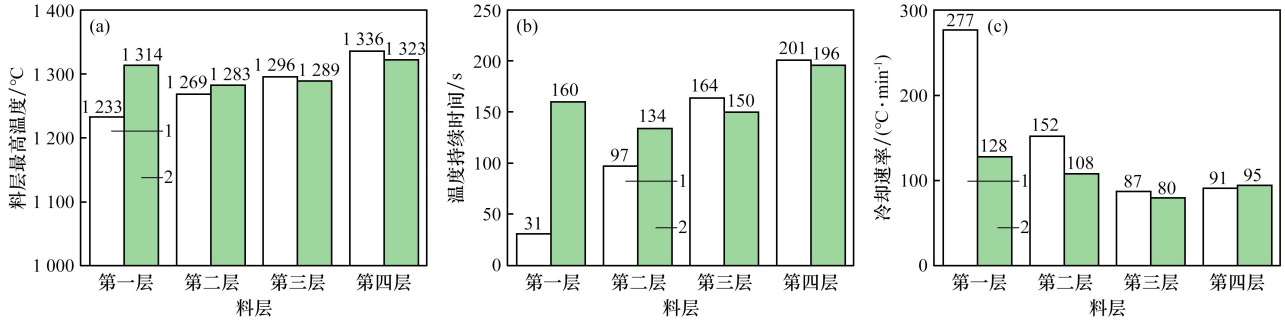
2.3　固体燃料料面分加影响烧结作用机理解析

固体燃料料面分加对不同料层高度处温度变化和特征热状态参数的影响如图 8 所示，烧结矿的微观结构和矿物组成如图 9 所示。由图 8 可知，与未分加的基准方案相比，采用固体燃料料面分加方案时，不同高度料层的最高温度差异性明显缩小[图 8(a)]，沿料层高度方向从上(第一层)至下(第四层)，料层最高温度分别从 1 233、1 269、1 296、1 336 ℃变化为 1 314、1 283、1 289、1 323 ℃，呈现出中上部料层最高温度明显提升、下部料层最高温度下降的特征。由不同高度料层≥1 200 ℃的高温保持时间变化可知，固体燃料料面分加也优化了整个料层的高温持续时间，尤其是大幅延长了中上部料层的持续时间，第一层、第二层的持续时间从基准时的31、97 s均大幅提升至 160、134 s，与第三层、第四层的差异明显减小[图 8(b)]。由不同高度料层烧结矿的冷却速率也可看出，采用固体燃料料面分加后，中上层烧结矿的冷却速率也明显变慢，第一层、第二层的烧结矿冷却速度分别从基准时的 277、152 ℃/min 均大幅降低至 128、108 ℃/min[图 8(c)]。因此，固体燃料料面分加明显改善了烧结料层高度方向的热量分布不均匀性，可为形成充足且结晶形态良好的铁酸钙类黏结相矿物提供有利的热力学和动力学条件。

由图 9 可知，基准烧结矿中有较多的骸晶分布于硅酸盐黏结相中，烧结矿中铁酸钙相对较少，铁矿晶粒间依靠硅酸钙黏结，这主要是因为基准方案表层烧结矿冷却速度过快，黏结相结晶条件差所致。而采用固体燃料料面分加技术后，表层烧结矿中铁酸钙矿物明显增多，且呈现为高强度的针柱状。因此，固体燃料料面分加优化了料层热量分布，改善了黏结相矿物的形成条件，从而提升了烧结矿产、质量指标。

3　固体燃料料面分加技术应用

结合研究结果与烧结生产实况，设计出固体燃料料面分加低碳烧结技术的工业化工艺流程，如图 10 所示。具体：首先分加燃料以气力输送的方式运送至烧结主平台的燃料仓，经电子皮带秤按流量输送至螺旋给料系统后由布料装置将燃料均匀布置在烧结料层表层；然后通过预混装置将分加燃料与表层深度 50 mm 的混合料充分混匀；最后随着烧结台车的移动完成后续的点火、烧结

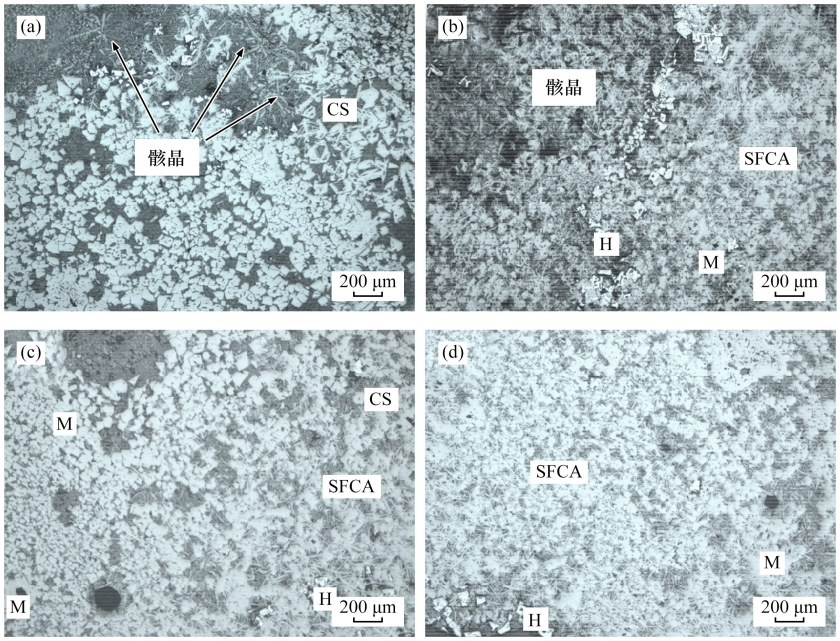


(a) 料层最高温度；(b) 1 200 ℃以上持续时间；(c) 冷却速率

1—基准；2—料面燃料分加。

图 8　烧结料层热状态参数的变化规律

Fig. 8　Variation pattern of thermal state parameters of the sinter bed



（a）表层(基准)；(b) 上层(基准)；(c) 表层(料面分加)；(d) 上层(料面分加)

CS—硅酸钙黏结相；H—赤铁矿；M—磁铁矿；SFCA—复合铁酸钙黏结相。

图 9 燃料料面分加对烧结矿微观结构的影响

Fig. 9 Effect of the solid fuel separated addition technology on the sinter microstructure

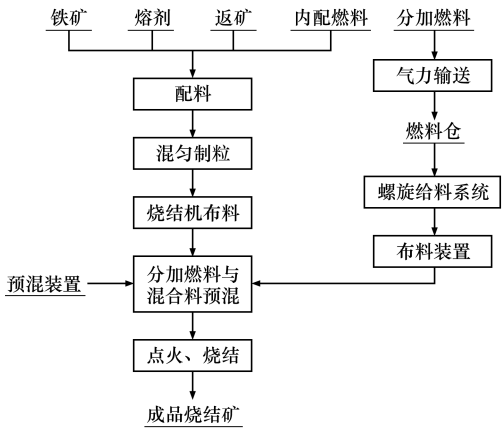
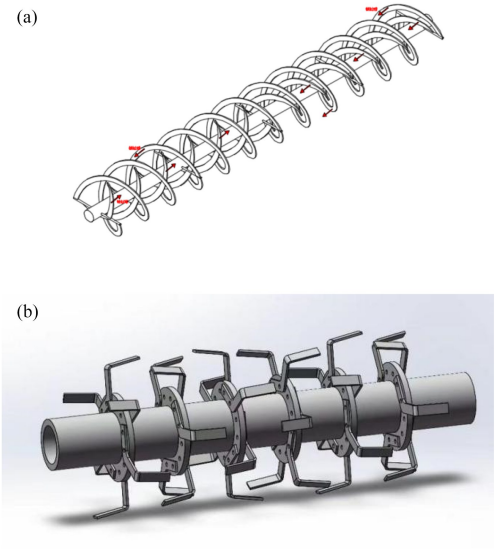


图 10 固体燃料料面分加工艺流程

Fig. 10 Process flow diagram of the solid fuel separated addition on sinter material surface technology

过程。在工艺技术研究的同时，自主研发设计了螺旋给料与分加燃料预混装置(图 11)。



（a）螺旋给料装置；(b) 预混装置

图 11 螺旋给料与分加燃料预混装置

Fig. 11 Device of spiral feeding and premixing for the solid fuel on sinter material surface

4 结 论

（1）固体燃料料面分加技术具备提升烧结指标的潜力，但表层分加燃料的分布均匀性对烧结指标具有显著影响，在实际工业应用过程需要重点考虑表层混合料内分加燃料的均匀布料与混合方式，以充分发挥其提质降碳功能。

（2）随着燃料分加配比提高，烧结速度出现下降趋势，成品率、转鼓强度、利用系数出现先上升后下降的趋势；随着料面分加的燃料粒度增大，烧结各项指标出现上升趋势；随着燃料在表层分加深度的提高，烧结各项指标出现先上升后

下降的趋势。适宜的燃料料面分加制度：分加配比为 5%，粒度为 > 3 mm 粗颗粒，分加深度为 50 mm；此时烧结固体燃料消耗由 52.56 kg/t 下降至 50.51 kg/t，下降 3.90%。

（3）固体燃料料层分加优化了料层高度方向的热量分布合理性，改善了上部料层的成矿条件；在适宜分加条件下，表层最高温度由 1 233 ℃提高到 1 314 ℃，料层 1 200 ℃以上的高温保持时间由 31 s 延长至 160 s，烧结矿冷却速率由 277 ℃/min 降低至 128 ℃/min，烧结料层热量分布均匀性提升，表层及上层烧结矿结晶条件改善，烧结矿中骸晶结构减少，铁酸钙系黏结相含量提升。

参考文献：

[1] 姜维,张永杰,李海峰. 中国钢铁极致能效降碳实践与基础研究[J]. 钢铁,2024,59(9):2 – 12.
JIANG Wei, ZHANG Yongjie, LI Haifeng. Practice and basic research on carbon reduction through ultimate energy efficiency project for iron and steel in China[J]. Iron & Steel,2024,59(9):2 – 12.

[2] World Steel Association. 2025. Word Steel in Figures 2025. https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2025/.

[3] YIN R Y,LIU Z D,SHANGGUAN F Q. Thoughts on the implementation path to a carbon peak and carbon neutrality in China's steel industry[J]. Engineering, 2021,7(12):1680 – 1683.

[4] ZHOU M, YU Z Y, WANG P L, et al. Thermodynamic analysis of iron ore sintering process based on biomass carbon[J]. Energies,2020,13(22):5988.

[5] 甘敏. 生物质能铁矿烧结的基础研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
GAN Min. Fundamental research on iron ore sintering with biomass energy[D]. Changsha: Central South University,2012.

[6] 范晓慧,季志云,甘敏,等. 生物质燃料应用于铁矿烧结的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(5):1747 – 1753.
FAN Xiaohui, JI Zhiyun, GAN Min, et al. Application of biomass fuel in iron ore sintering[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(5):1747 – 1753.

[7] 程志龙,杨剑,周浪,等. 铁矿烧结中木炭及燃气替代焦粉的研究[J]. 工程热物理学报,2017,38(1):188 – 192.
CHENG Zhilong, YANG Jian, ZHOU Lang, et al. Study on replacement of coke with charcoal and methane in iron-ore sintering[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2017,38(1):188 – 192.

[8] 甘敏,李浩锐,范晓慧,等. 果核生物质炭燃烧特性及其应用于烧结的减排行为[J]. 烧结球团,2022,47(1):65 – 69.
GAN Min, LI Haorui, FAN Xiaohui, et al. Combustion characteristics of kernel biomass char and its emission reduction behavior applied to sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(1):65 – 69.

[9] OYAMA N, IWAMI Y, YAMAMOTO T, et al. Development of secondary-fuel injection technology for energy reduction in the iron ore sintering process[J]. ISIJ International,2011,51(6):913 – 921.

[10] CHENG Z L,WANG J Y,WEI S S,et al. Optimization of gaseous fuel injection for saving energy consumption and improving imbalance of heat distribution in iron ore sintering[J]. Applied Energy,2017,207:230 – 242.

[11] JI Z Y, ZHOU H Y, FAN X H, et al. Insight into the application of hydrogen-rich energy in iron ore sintering: Parameters optimization and function mechanism[J]. Process Safety and Environmental Protection,2020,135: 91 – 100.

[12] HUANG X X,FAN X H,JI Z Y,et al. Investigation into the characteristics of H_2-rich gas injection over iron ore sintering process:Experiment and modelling[J]. Applied Thermal Engineering,2019,157:113709.

[13] WU Y F, FAN X H, JI Z Y, et al. Comprehensive evaluation of hydrogen-rich energy application in iron ore sintering process:Deep function mechanism analysis and process optimization[J]. Journal of Cleaner Production, 2023,420:138451.

[14] 王淦. 废气循环烧结质热传输过程数值模拟及其应用[D]. 北京:北京科技大学,2017.
WANG Gan. Mathematical modeling of the heat and mass transfer in flue gas recirculation sintering and its application[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2017.

[15] FAN X H, WONG G, GAN M, et al. Establishment of refined sintering flue gas recirculation patterns for gas pollutant reduction and waste heat recycling[J]. Journal

of Cleaner Production,2019,235:1549 – 1558.

[16] 范晓慧,甘敏,季志云,等. 复合气体介质烧结的节能减排技术开发与应用[J]. 钢铁,2020,55(8):62 – 69.
FAN Xiaohui, GAN Min, JI Zhiyun, et al. Development and application of techniques for energy conservation and emission reduction during sintering process based on multiple-component gases medium[J]. Iron & Steel, 2020,55(8):62 – 69.

[17] 陈富松,袁亚强,康宏毅,等. 当前形势下烟气循环烧结工艺发展现状及展望[J]. 中国冶金,2024,34(2):21 – 34.
CHEN Fusong, YUAN Yaqiang, KANG Hongyi, et al. Development status and prospect of flue gas recirculation sintering process under current situation[J]. China Metallurgy,2024,34(2):21 – 34.

[18] 曹穆民. “低碳厚料”烧结制度的实践[J]. 烧结球团,1980,5(2):7 – 13.
CAO Mumin. Practice of “low carbon thick material” sintering system[J]. Sintering and Pelletizing, 1980, 5(2):7 – 13.

[19] 李寿宝,任志国. 厚料层烧结技术的完善与小球团烧结工艺的发展[J]. 烧结球团,1996,21(2):1 – 4.
LI Shoubao, REN Zhiguo. Sophistication of deep-bed sintering process and development of mps process[J]. Sintering and Pelletizing,1996,21(2):1 – 4.

[20] 徐良平,阳习端,赵玉潮,等. 基于工业生产料层解析的超高料层低碳烧结技术[J]. 钢铁研究学报,2025,37(3):317 – 325.
XU Liangping,YANG Xiduan,ZHAO Yuchao,et al. Low-carbon super-high bed sintering for iron ores based on industrial sintering bed analysis[J]. Journal of Iron and Steel Research,2025,37(3):317 – 325.

[21] LIU Z J, NIU L L, ZHANG S J, et al. Comprehensive technologies for iron ore sintering with a bed height of 1 000 mm to improve sinter quality,enhance productivity and reduce fuel consumption[J]. ISIJ International, 2020,60(11):2400 – 2407.

[22] XU L P, LIU H B, ZHAO Y C, et al. Super-high bed sintering for iron ores: Problems ascertainment[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2024, 31(5):1063 – 1070.

[23] 张思平,刘臣,钟强,等. 固体燃料分加强化细粒铁精矿烧结技术研究[J]. 烧结球团,2023,48(3):76 – 82.
ZHAGN Siping, LIU Chen, ZHONG Qiang, et al. Research on sintering technology of fine-grained iron ore concentrate reinforced by solid fuel addition[J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(3):76 – 82.

[24] 叶恒棣,周浩宇,朱蓉甲,等. 分层供热均热低碳烧结方法及基础试验研究[J]. 烧结球团,2023,48(5):43 – 50.
YE Hengdi,ZHOU Haoyu,ZHU Rongjia,et al. Method of low-carbon sintering with uniform heat and basic experimental research based on layered heating[J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(5):43 – 50.

[25] 何二喜,赵改革,季志云,等. 超厚料层烧结过程固体燃料的分布规律[J]. 烧结球团,2024,49(1):42 – 47.
HE Erxi,ZHAO Gaige,JI Zhiyun,et al. Distribution law of solid fuel in sintering process of ultra-thick bed of material[J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(1): 42 – 47.

[26] WU Y F,GAN M,JI Z Y,et al. New approach to improve heat energy utilization efficiency in iron ore sintering: Exploration of surface fuel addition[J]. Process Safety and Environmental Protection,2024,190:125 – 137.

[27] WU Y F, GAN M, JI Z Y, et al. Application of surface fuel addition coupled with pulsed-step natural gas injection in iron ore sintering: Heat distribution and process optimization[J]. Journal of Cleaner Production, 2025,505:145458.

[28] 赵改革,喻维纲,郑浩翔,等. 烧结料面燃料分加耦合低温点火碳减排新技术[J]. 中国冶金,2024,34(10):91 – 98.
ZHAO Gaige, YU Weigang, ZHENG Haoxiang, et al. A new carbon reduction technology of fuel separated addition in sintered material surface coupled with low temperature ignition[J]. China Metallurgy, 2024, 34(10):91 – 98.