节能环保与综合利用

基于 LCA 及减排策略的烧结工序碳排放分析

李海英，李 艳，焦鹏飞，何 腾，张贵杰
（华北理工大学 冶金与能源学院，河北 唐山 063000）

摘要：中国钢铁行业每年排放 15% 左右的 CO_2，其中烧结工序的排放量占总排放量的 11.5%。为探究烧结工序 CO_2 排放关键来源，本研究运用 LCA 方法系统核算了烧结工艺从原材料开采至烧结矿生产全流程的碳排放量。在此基础上，结合长期能源替代规划系统（LEAP）模型，构建了 1 个基准情景、3 个强化减排情景和 1 个综合情景，对不同减排策略下的 2025—2050 年碳排放趋势进行模拟与预测。结果表明，相较于基准情景，其他 4 个情景的碳减排潜力分别为 0.293、0.222、0.060 和 0.529，且产能优化情景的碳排放量显著低于技术强化情景。在各项烧结节能减排技术中，返矿冷固结球团技术碳排放最低。

关键词：烧结工序；LCA；长期能源替代规划系统（LEAP）模型；碳减排
中图分类号：X757 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)03－0126－08
doi：10.13403/j.sjqt.2026.03.055

Analysis on carbon emissions in sintering process based on LCA and emission reduction strategies

LI Haiying, LI Yan, JIAO Pengfei, HE Teng, ZHANG Guijie
(College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract: China's steel industry emits about 15% of CO_2 annually, with the sintering process accounting for 11.5% of total emissions. To investigate the key sources of CO_2 emissions from the sintering process, the LCA method is used to systematically calculate the carbon emissions throughout the entire process from raw material extraction to sinter production. On this basis, combined with the Long-range Energy Alternatives Planning System (LEAP) model, one baseline scenario, three enhanced emissions scenarios, and one comprehensive scenario are constructed to simulate and forecast carbon emission trends from 2025 to 2050 under different emissions strategies. The results show that compared to the baseline scenario, the carbon emissions potential of the other four scenarios is 0.293, 0.222, 0.06, and 0.529 respectively, and the carbon emissions of the capacity optimization scenario are significantly lower than those of the technology enhancement scenario. Among various sintering energy-saving and emissions technologies, the cold-consolidated pelletizing technology for returning ore has the lowest carbon emissions.

Key words: sintering process; LCA; Long-range Energy Alternatives Planning System (LEAP) model; carbon emission reduction

钢铁产业是我国国民经济的支柱产业、建设现代化强国的重要支撑，同时也是我国最具有国际竞争力的产业之一[1]。2025 年，我国粗钢产量达到 9.61 亿 t[2]，全球粗钢产量为 18.49 亿 t，约占世界粗钢产量的 52%[3]。中国钢铁工业对碳排放的贡献约占全国总排放的 15% 和全球总排放的 50% 以上[4-5]。因此，降低钢铁行业的碳排放是我国实现“双碳”目标的重点之一。我国钢铁生产

收稿日期：2025－07－25；**修回日期**：2025－09－30
基金项目：河北省自然科学基金资助项目(E2022209138)；唐山市重点研发项目(21130231C)
作者简介：李海英(1971—)，女，博士，教授，从事工业节能与环境保护方面的研究。
通信作者：李 艳(2001—)，女，硕士研究生，从事工业节能与环境保护方面的研究。

方式以长流程为主，烧结工艺是铁矿粉造块的核心技术环节，其能耗占企业总能耗的 9%～12%，同时产生的 CO_2 则占总排放量的 11.5%[6]。因此，对烧结工序进行碳排放分析及其影响因素研究，有利于推进钢铁行业低碳技术革新和实现碳中和目标。

生命周期评价(LCA)起源于 1969 年，如今该方法已广泛应用于能源系统、交通、纺织等行业。目前，国内外对钢铁行业的 LCA 进行了多项研究。例如，赵秀娟等[7]运用 CML2001 方法研究分析烧结工艺的环境影响，结果表明，烧结工序全生命周期中，烧结矿生产过程对环境影响最大。OLMEZ 等[8]对土耳其钢铁工艺和产品的生命周期评价结果表明炼钢工艺对环境的总体影响最大，其次是烧结。易正明等[9]利用生命周期全面分析了铁矿烧结过程中的环境影响，得出能源消耗、人体毒性和全球变暖是生产过程中环境影响最突出的 3 类。

由斯德哥尔摩环境研究所和美国波士顿大学联合研发的长期能源可替代规划系统(Long-range Energy Alternatives Planning System，LEAP)是一种自下而上的能源环境核算工具，可对生产过程中各影响因素进行定量分析，并评估不同技术路径下的能源消耗与污染物排放变化[10]。例如，ATES 等[11]利用 LEAP 模型，探索了土耳其钢铁行业的能源效率和 CO_2 减排潜力，发现在 SEI、AEI 和 CPT 情境下，能源强度率分别降低 13%、38% 和 51%。何志斌等[12]利用 LEAP 预测了云南省 2020—2030 年农业领域的碳排放量，发现碳排放贡献量最大的因子是化肥的生产与使用。

本研究运用 LCA 方法，系统剖析了从铁矿石开采、运输至烧结矿生产全链条的 CO_2 排放特征，识别其关键排放源。同时，通过构建 LEAP 模型，设置基准情景、产能优化情景、技术强化情景、能源结构优化情景及综合情景，对 2025—2050 年烧结工序的 CO_2 排放趋势进行系统性预测，并针对性地提出了企业低碳转型路径与减排策略。

1　研究方法与模型构建

1.1　LCA 方法

钢铁行业 LCA 研究分为 4 个部分：目标与范围定义、生命周期清单分析、生命周期影响评价和结果解释。目标与范围定义在于界定研究对象的覆盖范围及生命周期阶段，确保后续分析的逻辑一致性。生命周期清单分析是指对生产过程中相关投入与产出进行定量的数据采集、计算与分析[13]。影响评价通过将清单数据转化为预设的影响类别指标，并分析其特征化结果。最后基于影响评价结果，对产品/系统/工艺的生命周期过程进行解释，识别薄弱环节以及潜在的优化路径，对整个生命周期过程得出结论[14]。

1.2　烧结工序 CO_2 排放计算方法

研究将《中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》与 LCA 方法相结合，基于实际生产数据，该钢铁企业烧结工序碳排放总量计算如下：

$$E = \sum_i \left[m_i \cdot \left(C_i + \sum_j D_{i,j} \cdot C_j \cdot t \right) \right] + \sum_i N_i \cdot F_i \cdot D_i \cdot O_i \cdot \frac{44}{12} + \sum_i A_i \cdot E_i + A_e \cdot E_e \tag{1}$$

式中：m_i 是第 i 种原料消耗量，t；C_i 是第 i 种原料开采过程中的碳排放因子，tCO_2/t；$D_{i,j}$ 是第 i 种原料通过第 j 种运输方式的运输距离，km；C_j 是第 j 种运输方式的碳排放因子，kg/(t·km)；t 是空车修正系数，取 1.67[15]；N_i 是第 i 种化石燃料的平均低位发热量，kJ/kg；F_i 是第 i 种化石燃料消耗量，t；D_i 是第 i 种化石燃料的单位热值含碳量，tC/TJ；O_i 是第 i 种化石燃料的碳氧化率，%；A_i 是第 i 种熔剂的消耗量，t；E_i 是第 i 种熔剂的碳排放因子，tCO_2/t；A_e 是电力消耗量，kWh；E_e 是电力排放因子，$kgCO_2/kWh$。

1.3　LEAP 模型

LEAP 模型主要是通过构造模型结构和数据输入，模拟能源系统在不同情境下的运行情况。LEAP 模型分别按式(2)、(3)计算 CO_2 排放量和减排潜力。

$$E_{CO_2} = \sum_i \sum_j \sum_n f_{n,j,i} \cdot e_{n,j,i} \cdot P_{j,i} \tag{2}$$

$$\Delta E_{CO_2} = \frac{\Delta q_i}{Q_o} \tag{3}$$

式中：$f_{n,j,i}$ 为工序 i 生产过程中 j 设备消耗的第 n 种类型的 CO_2 排放因子；$e_{n,j,i}$ 为第 i 种工序中由设

备 j 生产过程中消耗的第 n 种类型能源总量；$P_{j,i}$ 是第 i 种工序主要设备 j 的产品产量。Δq_i 是各情景减排量；Q_0 是基准情景的 CO_2 排放量。

1.4 研究目标与系统边界

本研究目标确定为“量化生产 1 t 烧结矿的碳排放，识别主要排放源，提出减排措施”。本文参考类似烧结工序碳排放的生命周期评价方法，选择“摇篮到大门”为本次评价系统边界的参考范围，以生产 1 t 烧结矿为功能单位，CO_2 排放系统边界如图 1 所示。

2 生命周期清单分析

2.1 工艺流程

烧结工艺流程如图 2 所示。由图 2 可知，该工艺通过将铁矿石、熔剂和燃料按比例配料、混合，加水制粒形成混合料。混合料均匀铺在烧结台车上，由点火器点燃表层。在抽风机作用下，燃烧带逐渐向下移动，燃烧产生的高温使部分物料熔融黏结，最终固结成块状烧结矿，整个过程的废气经净化处理后排放。

2.2 数据清单

研究数据主要来源于某大型钢铁厂的生产报表，原料开采和运输碳排放因子来源于 Ecoinvent 和 CLCD 数据库，其余碳排放因子系数等来源于《省级温室气体清单编制指南(试行)》、《国家温室气体排放因子数据库》。

该钢铁企业烧结工序共拥有 2 台 210 m^2 烧结机和 1 台 240 m^2 烧结机，料层厚度为 700 mm，年产烧结矿 596.85 万 t。在钢铁生产过程中，持续产生大量工业过程数据，但数据采集环节常受信号干扰与传输异常影响，原始数据存在缺失，因此需要进行预处理。首先利用统计四分位数展布法识别并去除异常值，正常数据阈值范围为[$Q_1 - 1.5Q_2, Q_3 + 1.5Q_2$]。其中阈值范围中 Q_2 按公式(4)计算。

$$Q_2 = Q_3 - Q_1 \tag{4}$$

式中：Q_2 为四分位距，表示数据中间 50% 范围的展布；Q_3 为上四分位数，即处于数据集 75% 位置的值；Q_1 为下四分位数，处于数据集 25% 位置的值。

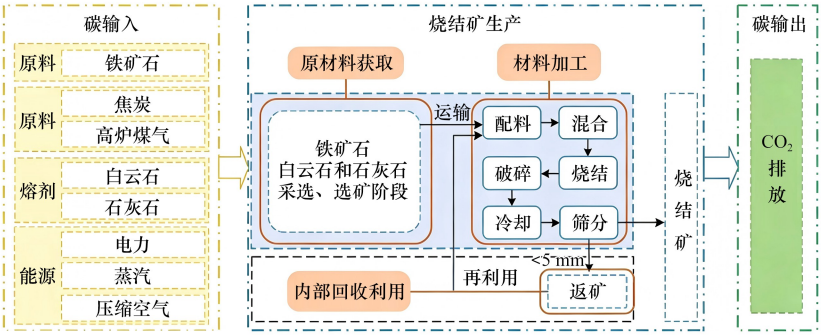


图 1 CO_2 排放系统边界

Fig. 1 System boundary of CO_2 emissions

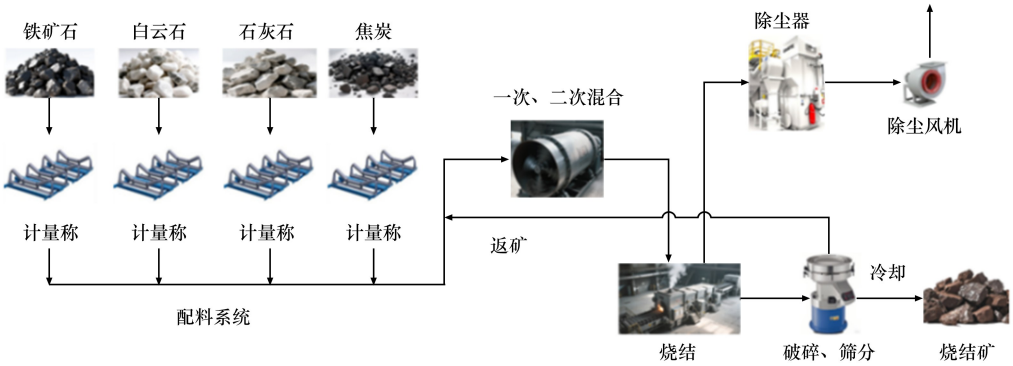


图 2 烧结工艺流程

Fig. 2 Sintering process flow

以该钢铁企业某月 4 种物质消耗量绘制箱线图进行异常值检测，检测结果如图 3(a)所示。对于检测到的异常值，采用 Lagrange 多项式插值法填补缺失值并维持数据的完整性。

$$L(x) = \sum_{i=0}^{n} y_i \cdot \prod_{j=0}^{n} \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \tag{5}$$

式中：$L(x)$表示插值多项式在 x 处的估计值；y_i 是第 i 个已知点的因变量值，x_j是第 j 个已知点的自变量，x_i是第 i 个已知点的自变量。再次检测结果如图 3(b)所示。

烧结工序最终生命周期清单中的输入部分如表 1 所示(产品输出为 1 t 烧结矿)。

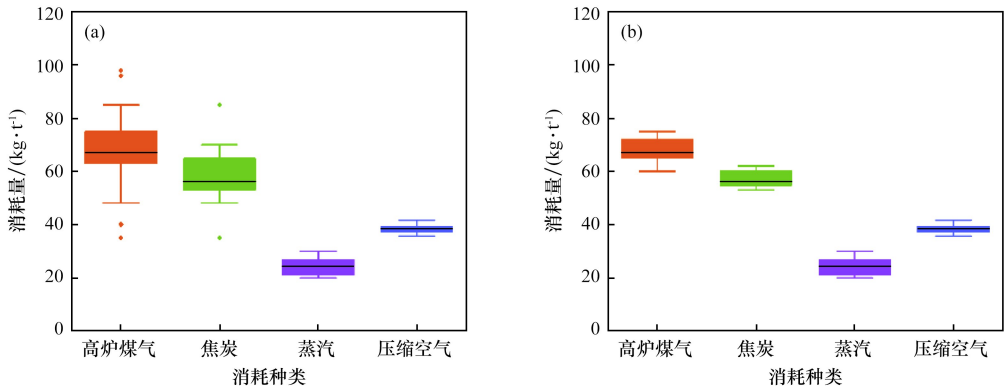
3　生命周期影响评价

该企业烧结工序碳排放经公式计算得出每个阶段的碳排放量及所占配比如图 4 所示。由图 4 可知，生产每吨烧结矿的 CO_2排放量约为 351 kg。烧结工序碳排放主要来源化石燃料燃烧，化石燃料产生的 CO_2占比约为 62%；其次是原料开采阶段，其排放量占 CO_2排放总量的 13%；由于该企业部分铁矿石需要进口，运输阶段产生的碳排放占排放总量的 5%；熔剂分解和外购电力产生的碳排放分别占 11% 和 10%。

4　基于 LEAP 模型的多情景碳排放预测

为探究钢铁企业低碳转型路径，本研究基于可持续发展理论，紧密衔接《钢铁行业产能置换实施办法》(工信部，2021 年)及《钢铁行业极致能效技术清单(T80)》等政策导向，构建动态仿真模型。通过设定基准情景(BAU)、产能结构优化情景(COS)、节能技术强化情景(TIS)、能源结构优化情景(ESO)及综合情景(IS)，量化分析不同发展模式下企业未来的碳排放演变规律与减排潜力。

技术推广潜力旨在量化减排技术随时间的渗透程度，将静态的减排能力转化为对未来碳排放趋势的动态模拟，这使得对不同减排情景下碳排



(a) 数据预处理前；(b) 数据预处理后

图 3　数据预处理

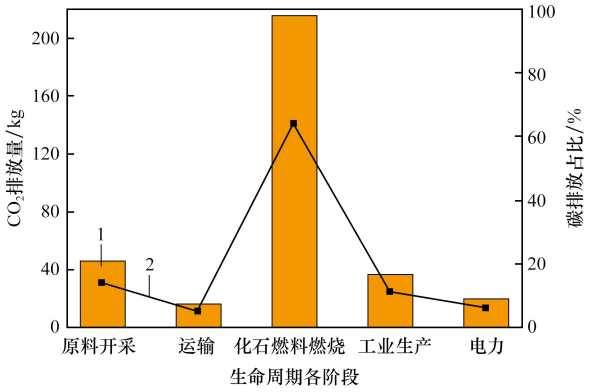
Fig. 3　Data pre-processing

表 1　烧结工序生命周期清单(输入部分)

Table 1　Life cycle inventory table of sintering process (input section)

原料输入/(kg·t⁻¹)				能源输入				
铁矿石	白云石	石灰石	焦炭	电力/(kWh·t⁻¹)	蒸汽/(m³·t⁻¹)	水/(m³·t⁻¹)	压缩空气/(m³·t⁻¹)	高炉煤气/(m³·t⁻¹)
831.5	47.12	34.47	54.89	26.91	25.91	1.28	38.32	69.07

运输输入						
种类	公路平均运距/km	公路运输量/t	铁路平均运距/km	铁路运输量/t	水运平均运距/km	水运运输量/t
焦炭	755	0.016	928	0.038	—	—
非金属矿石	76	0.593	670	0.228	7 000	0.091



1—CO_2排放量；2—碳排放占比。

图 4 烧结工序全生命周期 CO_2 排放量

Fig. 4 Life cycle CO_2 emissions from the sintering process

放轨迹的模拟更符合工业实际。这一分析为制定分阶段、可实施低碳技术路线提供了量化依据。各项技术的推广潜力如表 4 所示。

5 模拟结果分析

2025—2050 年烧结矿产量及 CO_2 排放量在 5 种情景下的发展趋势以及不同情景下 CO_2 排放量、碳减排潜力和技术对比分别如图 5、6 所示。

由图 5、6 可知，2025—2050 年 COS 和 IS 情景下烧结矿产量均呈下降趋势。BAU、TIS 与 ESO 的 CO_2 排放呈先升后降的变化趋势，于 2030 年达峰；其中 BAU 排放由 209.5 万 t 增至 219.9 万 t 后降至 192.7 万 t，TIS 应用极致能效技术有效降低了单位排放强度，且随着技术普及率的增加，碳排放量达到峰值后下降更快(2050 年降至 149.8 万 t)，ESO 受焦炭替代率限制减排潜力最低。COS 与 IS 减排显著：COS 通过产能置换与电炉比提升，推动排放持续降至136.2万t(2050年)；IS整合

表 2 各情景参数设置

Table 2 Parameter settings for each scenario

情景	参数设置
基准情景	延续当前生产模式,烧结矿产量保持年均 596.85 万 t,无新技术渗透,能源结构中焦炭占比 5%,电力排放因子不变
产能优化情景	依据《钢铁行业产能置换实施办法》,2030 年产能下降 4% 并达峰,2035 年下降 12%,2040 年下降 20%,2045 年下降 25%,2050 年下降 35%。其他参数保持不变
技术强化情景	基于 LCA 结果,重点推广极致能效技术,以降低固体燃耗为主,按照表 3 设置
能源结构优化情景	2030 年清洁能源发电占比为 25.2%,2035 年占比为 41%,2040 年占比为 45.3%,2050 达 54%,焦炭占比由 2025 年的 5% 下降到 2050 年的 1%。其他参数保持不变
综合情景	同时实施产能优化、技术强化和能源结构优化措施,实现最大程度的碳减排

表 3 烧结工序极致能效技术

Table 3 Ultimate energy efficiency technology in sintering process

技术名称	技术原理	关键节能	技术类型
余热回收发电技术	回收烧结矿冷却过程中的废热用以发电,减少外购电力	吨烧结矿外购电耗降低约 45 kWh,对应吨矿 CO_2 排放减少约 12.5 kg	末端回收
厚料层烧结技术	增加烧结料层厚度,充分利用上层热量预热下层料,减少热损失,改善烧结矿强度	返矿率降低 7.11%,吨烧结矿固体燃料消耗降低 2.99 kg	过程优化
烧结混合料预热技术	利用低温废气等热源对混合料进行预热,蒸发部分水分,降低点火器的燃气消耗	吨烧结矿降低固体燃料消耗约 1.1 kg	过程优化
烧结返矿冷固球团技术	将大量的返矿通过冷态黏结工艺制成高强度的冷固球团,减少循环复烧	吨烧结矿固体燃料消耗降低约 30 kg,工序综合能耗下降约 36 kgce/t	源头减碳
小球烧结技术	将混合料制成小球,改善料层透气性,提高烧结效率	吨烧结矿固体燃料消耗降低1.3 kg,工序电耗降低 0.895 kWh	辅助过程优化
烧结环冷机液密封技术	对环冷机进行密封改造,减少漏风,提高余热回收效率	吨烧结矿可实现余热回收产蒸汽80 kg(1.8 MPa,270 ℃)以上	辅助末端回收

产能优化、技术强化与能源替代，实现排放量直线下降(2050 年 90.7 万 t，降幅 56.7%)。研究表明，单一措施减排有限，产能优化与技术强化是核心，多路径协同是烧结环节深度脱碳的必要路径。

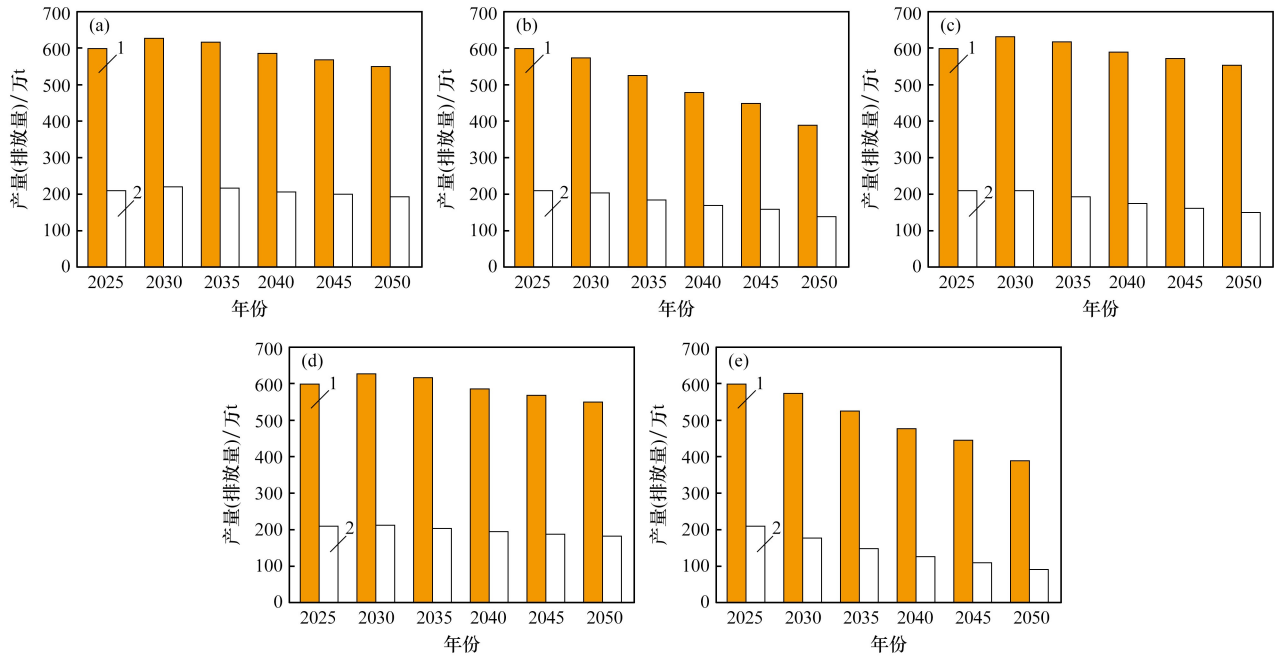
图 6(b)直观反映了各情景相对于 BAU 的减排能力随时间的变化。由图 6(b)可知，所有减排情景的潜力值均随预测期推进而持续增长。一方面模型中设定的各项减排措施的累积效应随时间不断增强，另一方面基准情景在缺乏主动减排措施下，随着设备老化、效率提升缓慢，其排放强度与减排情景的差距日益增大。至 2050 年，各情景的碳减排潜力值分别为 0.06、0.222、0.293、0.529，这一数据不仅表明该企业碳减排潜力很大，还再次证明了多措并举实现深度减排的必要性。

传统烧结流程高度依赖固体燃料燃烧并需要将返矿循环复烧。而图 6(c)中各项技术的碳排放量均随技术普及率提升而持续降低，且减排潜力差异显著，正体现了它们从源头、过程到末端的变革，实现系统性减碳。

表 4　6 种技术推广普及率

Table 4　Promotion and adoption rates of six technologies　　%

技术名称	2025	2030	2035	2040	2045	2050
余热回收发电技术	25	40	50	60	70	80
厚料层烧结技术	80	85	87	90	93	95
烧结混合料预热技术	50	60	70	80	90	95
烧结返矿冷固球团技术	10	25	45	60	70	85
小球烧结技术	60	75	85	90	93	95
烧结环冷机液密封技术	40	65	80	90	95	98

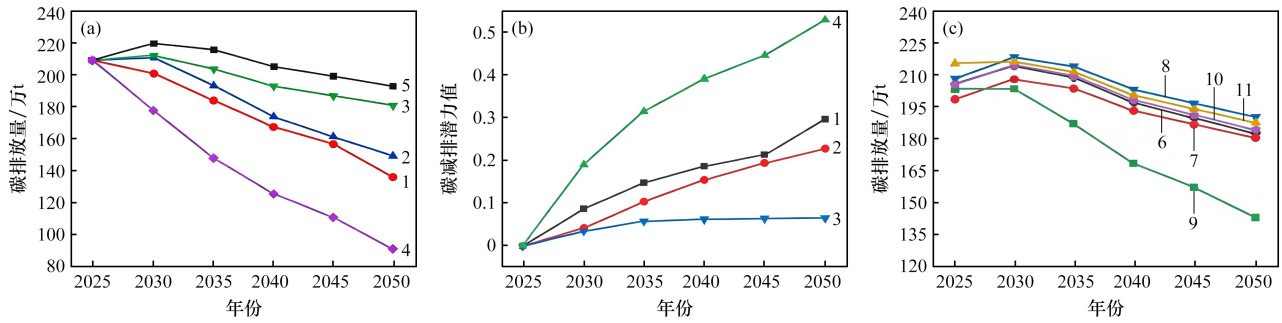


(a) BAU；(b) COS；(c) TIS；(d) ESO；(e) IS

1—烧结矿产量；2—CO_2 排放量。

图 5　2025—2050 年不同情景下烧结矿产量和 CO_2 排放量

Fig. 5　Sinter production and CO_2 emissions under different scenarios from 2025 to 2050



（a）碳排放量；（b）碳减排潜力；（c）技术对比

1—COS；2—TIS；3—ESO；4—IS；5—BAU；6—余热发电技术；7—厚料层烧结技术；8—烧结混合料预热技术；9—烧结返矿冷固球团技术；10—小球烧结技术；11—烧结环冷机液密封技术。

图 6 2025—2050 年不同情景下 CO_2 排放量、碳减排潜力和技术对比

Fig. 6 Comparison chart of CO_2 emissions, carbon reduction potential, and technologies under different scenarios from 2025 to 2050

6 结 论

本研究通过 LCA 和 LEAP 模型，系统核算了烧结工序的 CO_2 排放量并预测了 2025—2050 年不同减排策略下的碳排放量，得出主要结论如下。

（1）LCA 结果显示，吨烧结矿碳排放达 351 kg，其中化石燃烧贡献占 62%，为主要排放源。

（2）LEAP 模拟表明，各情景减排潜力随时间持续扩大，至 2050 年综合情景（IS）相对 BAU 减排率达 52.9%，潜力最为显著。碳排放总量排序：BAU > ESO > TIS > COS > IS，证实产能优化（COS）效果优于单一技术强化（TIS）。在技术层面，返矿冷固球团技术因大幅降低固体燃耗，表现出最低的碳排放水平。

（3）为实现深度减碳，建议优先推行产能优化策略，并重点集成应用返矿冷固球团、厚料层烧结及余热发电技术，构建“源头－过程－末端”全流程减排体系，以实现烧结工序的低碳转型。

参考文献：

[1] 孟鑫，李晨晓，赵鹏，等. 钢铁生产全流程中 CO_2 资源化利用技术进展[J]. 烧结球团，2024，49(6)：21－34.
MENG Xin，LI Chenxiao，ZHAO Peng，et al. Technological progress of CO_2 resource utilization in whole process of iron and steel production[J]. Sintering and Pelletizing，2024，49(6)：21－34.

[2] 国家统计局. 中华人民共和国 2025 年国民经济和社会发展统计公报[N]. 人民日报，2026－03－01(004).
Communique of the people's Republic of China on the 2025 National Economic and Social Development[N]. People's Daily，2026－03－01(004).

[3] 张华超，马丁，郎明松，等. 钢铁企业含锌粉尘综合利用技术研究进展[J]. 烧结球团，2026，51(2)：1－14.
Zhang Huachao，Martin，Lang Mingsong，et al. Progress in research on comprehensive itilization technologies for zinc-containing dust in steel enterprises[J]. Sintering and Pelletizing，2026，51(2)：1－14.

[4] BO X，LI Z L，QU J B，et al. The spatial-temporal pattern of sintered flue gas emissions in iron and steel enterprises of China[J]. Journal of Cleaner Production，2020，266：121667.

[5] 李杰，许蕊，张纹郁，等. 烧结烟气 CO 减排研究现状与展望[J]. 中国冶金，2025，35(7)：109－120.
LI Jie，XU Rui，ZHANG Wenxi，et al. Current status and prospects of research on CO emission reduction in sintering flue gas[J]. China Metallurgy，2025，35(7)：109－120.

[6] 陈思凡，项子豪，阮锦琦，等. 超厚料层烧结极致能效减碳研究进展与思考[J]. 烧结球团，2025，50(2)：1－9.
CHEN Sifan，XIANG Zihao，RUAN Jinqi，et al. Research progress and thinking on extreme energy efficiency and carbon reduction of ultra-thick material layer sintering[J]. Sintering and Pelletizing，2025，50(2)：1－9.

[7] 赵秀娟，贾俊龙，王倩. 碳中和背景下生命周期评价方法在烧结工序的应用[J]. 河北冶金，2021(7)：78－84.

ZHAO Xiujuan, JIA Junlong, WANG Qian. Application of life cycle assessment in the sintering process under the background of carbon neutrality[J]. Hebei Metallurgy, 2021(7):78 – 84.

[8] OLMEZ G M, DILEK F B, KARANFIL T, et al. The environmental impacts of iron and steel industry: A life cycle assessment study[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 130: 195 – 201.

[9] 易正明,陈卓,覃佳卓,等. 基于 LCA 方法的铁矿烧结过程环境影响评价[J]. 烧结球团,2022,47(2):88 – 95.
YI Zhengming, CHEN Zhuo, QIN Jiazhuo, et al. Environmental impact assessment of iron ore sintering process based on LCA method[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(2): 88 – 95.

[10] CHEN H T, WANG Z H, XU S, et al. Energy demand, emission reduction and health co-benefits evaluated in transitional China in a 2 ℃ warming world[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264: 121773.

[11] ATES S A. Energy efficiency and CO^2 mitigation potential of the Turkish iron and steel industry using the LEAP (long-range energy alternatives planning) system[J]. Energy, 2015, 90: 417 – 428.

[12] 何志斌,郝英杰,王盼,等. 基于 LEAP 模型的农业活动碳排放情景预测与减排路径分析[J]. 环境科技,2025,38(2):56 – 61.
HE Zhibin, HAO Yingjie, WANG Pan, et al. Scenario prediction and emission reduction path analysis of agricultural carbon emissions based on LEAP model[J]. Environmental Science and Technology, 2025, 38(2): 56 – 61.

[13] BEYLOT A, VILLENEUVE J. Accounting for the environmental impacts of sulfidic tailings storage in the Life Cycle Assessment of copper production: A case study[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 153139 – 145.

[14] JOHNSON E. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2003, 23(1): 129 – 130.

[15] 毛睿昌. 基于 LCA 的城市交通基础设施环境影响分析研究——以深圳为例[D]. 深圳:深圳大学,2017.
MAO Ruichang. Research on environmental impact analysis of urban transport infrastructure based on LCA: A case study of shenzhen[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017.

(上接第 118 页)

[12] 安胜利,黄兰,柴轶凡,等. 钢渣处理技术及资源化利用研究进展[J]. 钢铁,2025,60(3):1 – 12.
AN Shengli, HUANG Lan, CHAI Yifan, et al. Research progress of steel slag treatment technology and recycling utilization[J]. Iron & Steel, 2025, 60(3): 1 – 12.

[13] YE G Z, BURSTRÖM E, KUHN M, et al. Reduction of steel-making slags for recovery of valuable metals and oxide materials[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2003, 32(1): 7 – 14.

[14] ZHOU Y, WANG H Y, WANG H C, et al. Mechanism of arsenic distribution and migration during iron extraction by copper slag-steel slag combined reforming: A potential solution to refractory wastes[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 420: 138399.

[15] 胡岩卓,申振中,韩少慧,等. 双碳背景下转炉钢渣还原提质技术的研究现状及展望[J]. 钢铁钒钛,2025,46(3):81 – 91.
HU Yanzhuo, SHEN Zhenzhong, HAN Shaohui, et al. Research status and prospects of reduction and upgrading technology of converter steel slag under the Dual-Carbon background[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2025, 46(3): 81 – 91.

[16] 辛闯,何志军,刘吉辉. 铁矿粉烧结过程配加生物质炭燃料的试验与影响分析[J]. 钢铁,2025,60(9):194 – 203.
XIN Chuang, HE Zhijun, LIU Jihui. Experimental discussion and influence analysis on adding biochar fuel in sintering process of iron ore fines[J]. Iron & Steel, 2025, 60(9): 194 – 203.

[17] 韩跃新,周廷波,高鹏,等. 菱铁矿自磁化反应行为及调控机理[J]. 钢铁,2023,58(9):69 – 80.
HAN Yuexin, ZHOU Tingbo, GAO Peng, et al. Self-magnetization reaction behavior and regulation of siderite[J]. Iron and Steel, 2023, 58(9): 69 – 80.