生物质燃料用于铁矿烧结的研究进展

雷玉办，王 岩，李雪妹，秦 臻，石明芳
（广西现代职业技术学院 智能冶金学院，广西 河池 547000）

摘要：生物质燃料由于来源广泛、储量巨大且具有高发热值、高纯度、低成本的优势而具有良好的应用前景，其应用于烧结生产也是钢铁行业低碳绿色高质量发展的重要途径之一。本文从原料制粒、烧结过程、烟气减排三个方面对生物质燃料在铁矿烧结工艺中的应用进行系统性的归纳与分析。在原料制粒方面，生物质燃料相较于焦粉和无烟煤，在烧结生产时需要配入更大的水分，根据生物质燃料的种类该水分配比可能需要增加 1%～5%。在烧结过程方面，受限于燃烧特性，生物质燃料替代焦粉的比例不宜过高，一般为 10%～40%，进一步提高该配比则会出现烧结矿成品率和转鼓指数、烧结机利用系数的显著降低。在烟气减排方面，生物质燃料在降低烧结烟气中 CO、NO_x、SO_x、粉尘和二噁英等有害污染物排放量方面作用显著。对于大规模工业化应用，仍需继续加深理论与试验探索，进一步提高生物质燃料的可获得性，统筹生物质燃料回收加工处理的配套产业，并加大包括投资鼓励等政策支持。

关键词：生物质燃料；焦粉；制粒；烧结；烟气
中图分类号：TF053；TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)01－0018－09
doi：10.13403/j.sjqt.2024.01.003

Research progress on use of biomass fuels for iron ore sintering

LEI Yuban, WANG Yan, LI Xuemei, QIN Zhen, SHI Mingfang
(Institute of Intelligent Metallurgy, Guangxi Modern Polytechnic College, Hechi 547000, Guangxi, China)

Abstract: Biomass fuel has a good application prospect due to such advantages as wide sources, huge reserves, high calorific value, high purity and low cost, and its application in sintering production is also one of the important ways for low-carbon, green and high-quality development of the iron and steel industry. The application of biomass fuel during the iron ore sintering process is systematically summarized and analyzed from such three aspects as raw material granulation, sintering process and fume emission reduction. In terms of raw material granulation, compared with breeze and anthracite, biomass fuel needs to be mixed with greater moisture mass fraction during sintering production, and the moisture distribution ratio may need to be increased by 1%～5% according to the type of biomass fuel. In terms of sintering process, limited by combustion characteristics, the proportion of biomass fuel replacing breeze should not be too high, generally 10%～40% and further increasing the ratio will lead to a significant reduction in the sinter yield and drum index and sintering machine utilization coefficient. In terms of fume emission reduction, biomass fuel plays a significant role in reducing the emission of harmful pollutants such as CO, NO_x, SO_x, dust and dioxin in sintering fume. For large-scale industrial applications, it is still necessary to continue to deepen theoretical and experimental exploration, further improve the availability of biomass fuel, coordinate the supporting industries of biomass fuel recycling, processing and treatment, and increase policy support, including investment incentives.

Key words: biomass fuel; breeze; granulation; sintering; fume

收稿日期：2022－08－23；**修回日期**：2022－11－22
基金项目：广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2022KY1434)
作者简介：雷玉办(1988—)，男，副教授，从事冶金新材料方面的研究工作。

铁矿烧结工序作为钢铁长流程中的能源消耗和污染物排放大户，当下面临着愈发严峻的环保减排压力。近年来，诸多烧结低碳减排研究已经相继开展及实践，如超厚料层烧结、料面喷吹、烟气末端脱除系统、烟气还原工艺等[1-3]，其主要研究领域聚焦于工艺技术端的优化与烟气的末端处理，达到了一定的提质增效、优化产出和节能减排的效果，但对于我国庞大的烧结工序体量而言，节能降耗效果仍然有限，且缺乏有效的源头减排技术举措的应用。随着双碳战略在钢铁行业的进一步推进，使用清洁可持续能源进行源头减排降耗已经成为绿色低碳生产最主要的途径之一。在高炉炼铁领域，天然气、兰炭、生物质、废塑料、橡胶等材料的喷吹工艺均有了一定的研究和实践进展[4-5]。以农林废弃物为主的原料经过粉碎、混合、挤压、烘干等工艺制成的成型生物质燃料是当前清洁燃料的最优选择，其一般具有发热量大、纯度高、杂质成分少、成本低等优势，且全球每年生产的干基生物质材料就有 1 000 亿吨以上，而实际作为能源使用的生物质燃料甚至未达到总量的 1%，因此，采用生物质作为燃料具有广阔的应用前景[6]。对于铁矿烧结而言，生物质燃料替代焦粉成为近些年来国内外研究的重点[7-8]。

基于此，本文回顾、总结与分析了近年来国内外学者和研究机构对于生物质燃料在铁矿烧结工序流程中的应用研究，包括生物质燃料特性分析、烧结应用机理、优化处理以及可行性分析，旨在为双碳背景下生物质燃料在烧结生产中的高效应用提供技术思路和参考。

1　生物质燃料及其预处理

最常被用作燃料的生物质通常来源于农林作物、生物燃料制造残留物、食品或农产品加工残留物、农业生产残留物，具体来源分类如图 1 所示。需要注意的是，生物燃料是指通过生物资源生产的燃料乙醇、生物柴油和航空生物燃料等，不同于生物质燃料。



图 1　常用生物质燃料来源

Fig. 1　Common biomass fuel sources

生物质燃料与传统的用于烧结的碳素燃料焦粉和无烟煤性质有着显著差异，主要表现在能量值、有机物/无机物含量、化学成分和一些物理性质方面。通常煤粉和焦粉的能量密度、热值、固定碳含量和矿物质含量高于生物质燃料，但同时 S、N 等造成烧结工序污染负担的元素含量也明显高于生物质燃料。生物质燃料的挥发性物质含量偏高，在燃料层面具有更为清洁绿色的潜力，但最大缺点是由于含水量较高等原因其热值偏低。表 1 给出了典型的生物质燃料与焦粉、煤粉的性能指标对比[6,9]。

表 1　典型生物质、焦粉、无烟煤性质

Table 1　Typical properties of biomass, coke breeze and anthracite

燃料种类	质量分数/%						密度/($kg \cdot m^{-3}$)	热值/($MJ \cdot kg^{-1}$)
	C	S	N	灰分	挥发分	水分		
向日葵壳	50.00	0.14	0.71	3.20	76.40	9.30	544.00	16.00
榛子壳	55.10	0.04	0.42	1.09	67.85	11.00	565.00	18.20
杏仁	48.80	0.03	0.18	0.49	81.37	9.30	286.00	16.70
玉米秸秆	41.80	0.20	0.94	13.01	67.06	8.30	—	15.68
甘蔗渣	47.58	0.11	0.91	9.87	76.95	5.53	—	17.31
商业木炭	82.20	0.02	0.58	4.50	32.70	4.60	286.00	33.10
焦粉	85.40	0.60	1.30	12.10	1.50	5.50	880.00	28.00
无烟煤	88.50	0.56	1.31	5.00	6.40	4.20	860.00	30.65

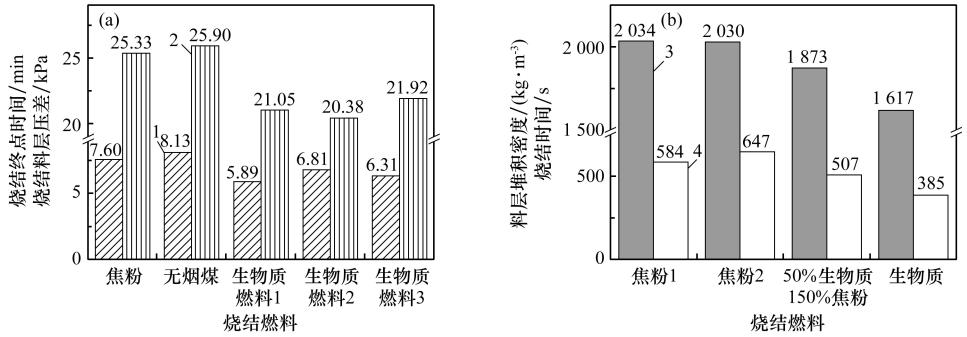
由表1可以看出，生物质原材料密度小，含碳量偏低，挥发分和水分含量过高，热值也相对偏低，因而需要对生物质原材料进行压缩成型、碳化等预处理，使其可以作为高效燃料。生物质的压缩成型可以方便运输与后续处理，碳化过程则是通过无氧化去除生物质原材料中的大部分挥发分和水分，使得生物质成型燃料具备更高的固定碳含量和能量密度(发热值)；此外，经碳化后生物质燃料会形成大量气孔结构，其比表面积会大于焦粉、无烟煤等传统燃料。而对于烧结工艺，通常要求燃料粒度中小于3 mm的部分占比达到80%以上，因而同时需要将生物质成型燃料进行破碎研磨。已有研究表明，合适的碳化温度能够将生物质燃料的固定碳质量分数提升至80%以上，挥发分质量分数降低至5%~7%，同时生物质燃料的比表面积经过碳化处理后也会大幅降低，通常降低幅度可达50 m^2/g，其性能更为接近传统碳素燃料[10-11]。

2 生物质燃料制粒研究进展

生物质成型燃料与传统燃料在物理特性上表现出相当大的差异性，而这些物理特性会对烧结制粒过程、料层分布情况以及后续的点火烧结行为产生显著影响，因而生物质燃料的应用，首先要从制粒工序进行优化控制，诸多学者也做了较多的研究。

日本新日铁的KAWAGUCHI等[12]选择了3种固定碳质量分数为90%左右的生物质燃料、焦粉以及无烟煤进行实验研究。其中，3种不同的燃料粒度分别为粗粒度(1~5 mm)、细粒度(0.5~1.0 mm)和标准粒度(<0.25 mm)粒级质量分数为20%，[0.25,1.00) mm粒级质量分数为35%，[1.22, 2.00) mm粒级质量分数为21%，[2.00,4.80) mm粒级质量分数为24%。结果表明，对于焦粉和无烟煤，细粒度燃料制粒后成品率指标最优，粗粒度则最差，而对于生物质燃料，其结果相反。相较于焦炭和无烟煤，生物质燃料由于大的比表面积和多孔性，更容易与矿粉黏附而制粒，且一部分水分也会进入到生物质的孔隙中，使得高燃烧率的生物质燃料燃烧受到一定抑制，反而增加了烧结矿的成品率。从这个层面上来看，生物质燃料制粒时需要设置比焦粉、无烟煤更粗的燃料粒度和更高的水分添加量。在8%的水分配比下，制粒后准颗粒堆积烧结料层压差和烧结时间结果如图2(a)所示。由图2(a)可以看出，使用生物质燃料后料层压差普遍降低，这意味着料层透气性更好，因而烧结速度增快，烧结时间缩短。

澳大利亚联邦科学与工业研究组织矿物研究所(commonwealth scientific and industrial research organisation, CSRIO)也展开过相似的研究[13]，其采用焦粉、木炭、刺槐炭等进行了制粒与烧结试验。试验首先采用制粒试验测定不同混合料的料层透气性确认了不同类型燃料所需的水分添加量，发现生物质炭所需要的水分水平显著高于焦粉，因而，进一步地设置焦粉组和生物质组试验的水分质量分数分别为7.0%~9.5%和8.0%~14.0%，相应的料层堆积和烧结时间结果如图2(b)所示。试验结果表明，在部分或全部使用生物质炭后，



研究结果：(a) 新日铁；(b) CSRIO

1—烧结料层压差；2—烧结终点时间；3—堆积密度；4—烧结时间。

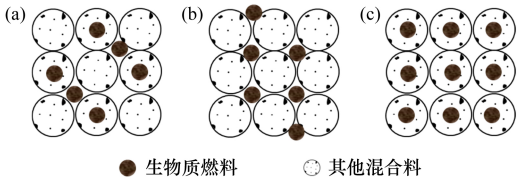
图2 生物质燃料对烧结料层及烧结时间的影响

Fig. 2 Effect of biomass fuels on sintering material layer and sintering time

料层的堆积密度显著降低，烧结时间也显著缩短，这与 KAWAGUCHI 等的研究结果相似。

中南大学甘敏等[14]通过试验发现，在 1 000 ℃等温燃烧测试中，生物质燃料和焦粉的平均燃烧速度分别为 6.00%/min 和 4.15%/min，且随着生物质燃料配比的提高，燃烧效率从 87.83%降低到了 85.15%，因而提出需要针对生物质燃料的应用制定合适的制粒工艺，合理分配热量并控制燃烧效率以达到最优的烧结矿产、质量指标。图 3 展示了试验中设计的 3 种不同的制粒工艺下准颗粒的组成结构。其中，图 3(a)为常规制粒工艺，是将生物质燃料和其他燃料一起进行制粒；图 3(b)为生物质燃料迟滞制粒工艺，其将其他混合料先制粒 3 min，随后加入生物质燃料继续制粒1 min，使生物质燃料黏附在准颗粒表面；图 3(c)为生物质燃料预制粒，其将生物质燃料与其他细颗粒铁矿石、生石灰一起预先制粒 4 min，使生物质燃料包裹于准颗粒内部，再加入其他原料继续制粒 4 min。不同制粒工艺下烧结结果如表 2 所示。由表 2 可知，生物质燃料的加入能够改善制粒，提高烧结速度，但同时由于其燃烧过快和效率较低，成品率、利用系数、转鼓指数均有下降，而对于同样比例的生物质燃料，不同的制粒工艺表现出了不同的烧结指标。其中，生物质燃料预制粒工艺的预制粒对改善烧结效果有着显著的作用，尽管略微地降低了烧结速度，但成品率、利用系数和转鼓指数均有大幅度的改善。显然，生物质燃料包裹在准颗粒内部对于烧结过程的燃烧、热量控制是最为有利的。

浙江大学能源清洁利用国家重点实验室周昊等[15]对生物质燃料的预制粒技术进行了进一步研究，其在预制粒工艺中采用燃料与磁铁精粉以及熟石灰混合，将水分质量分数固定为7.7%。试验



（a）常规制粒；（b）生物质燃料迟滞制粒；（c）生物质燃料预制粒

图 3　针对生物质燃料的不同制粒工艺示意

Fig. 3　Schematic diagram of different granulation processes for biomass fuels

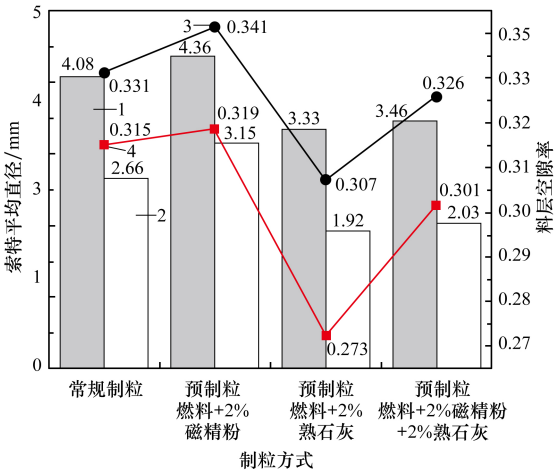
结果如图 4 所示。由图 4 可知，用生物质燃料替代 40%焦粉时，由于生物质燃料颗粒形状不规则、表观密度降低，制粒准颗粒的索特平均直径(为描述颗粒尺寸分布的指标，能够更为直观地反映颗粒的实际尺寸和形态)变小，但生物质燃料替代 40%焦粉后料层的空隙率会升高，这也从侧面反映了生物质燃料必须配合更高的水分才能发挥制粒优势。使用燃料与磁铁精粉混合预制粒能够显著增大制粒准颗粒的粒度和料层空隙率，而熟石灰预制粒则会带来相反的效果。

对于生物质燃料制粒过程，新日铁和 CSRIO 的研究人员是从烧结矿成品率和烧结料层透气性的表现为导向往回追溯开展制粒性能优化研究，通过改善生物质燃料粒度组成和水分配比来优化制粒工艺。而甘敏等是基于生物质燃料本身的燃烧特性判断其对制粒性能的影响进而优化制粒工艺，从而改善生物质燃料的制粒性能和烧结性能。这些不同的研究都表明了生物质燃料的燃烧效率高、燃烧速度快和孔隙发达是对制粒过程产生影响最大的因素，相应地在制粒过程中应适当提高水分、优化工艺以降低其燃烧速度、提高其成球性能，进而帮助提高生物质燃料烧结时的料层透气性和成品率。

表 2　不同制粒工艺下生物质燃料使用时的烧结指标

Table 2　Sintering index of biomass fuels in use under different granulation processes

燃料种类	生物质燃料配比(质量分数)/%	制粒工艺	烧结速度/($mm \cdot min^{-1}$)	成品率/%	利用系数/($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	转鼓指数/%
焦粉	0	常规制粒	21.94	72.66	1.48	65.00
混合燃料	40	常规制粒	24.73	65.30	1.43	63.27
混合燃料	40	生物质燃料迟滞制粒	25.69	64.68	1.40	61.36
混合燃料	40	生物质燃料预制粒	24.43	72.81	1.57	66.33



1、2—索特平均直径；3、4—料层空隙率。

图 4 生物质燃料预制粒工艺对制粒性能的影响

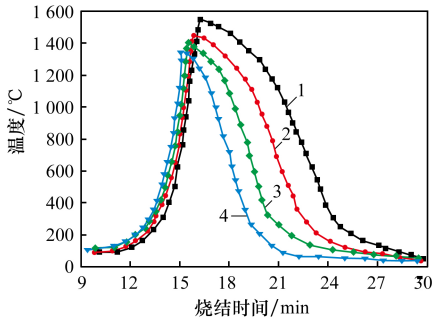
Fig. 4 Effect of pre-granulation process of biomass fuel on granulation performace

3 生物质燃料烧结过程研究进展

生物质燃料由于其制粒分布特性以及燃烧特性与焦粉的差异，在点火烧结过程中对料层的热分布有着直接影响，进而影响着烧结过程的固相、液相反应以及烧结工序的经济技术指标。赵加佩等[16]建立了燃烧模型并集成到铁矿石二维烧结模型中，对模拟结果与实验结果比对分析，发现当生物质炭替代焦炭时，火焰前沿温度和燃烧效率显著降低，而火焰前沿沿料层向下的速度加快，显然生物质燃料对准颗粒黏附层厚度的影响和自身燃烧特性影响着烧结过程。

陈贺等[17]利用红外测温仪对烧结过程距料层顶部 375 mm 处扫描测温，在不同生物燃料配比下得到的结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，随着生物质燃料配比增加，达到最高温度的时间变快，这也意味着烧结速度增快，但由于生物质燃料燃烧速度快，料层间固液反应时间缩短，料层透气性变好，热量前沿传递速度变快，随之而来，配比料层中能达到的最高温度会降低。从这个角度分析，生物质燃料配比过高是不利于烧结过程黏结相生成、流动与冷凝的。

大量的研究都表明，使用生物质燃料不利于烧结过程高质量黏结相的生成，进而破坏烧结指标。英国谢菲尔德大学的 OOI 等[18]用葵花籽壳制作的生物质燃料进行烧结试验探究，结果表明，



1—焦粉；2—20% 生物质燃料；3—40% 生物质燃料；4—60% 生物质燃料。

图 5 不同生物质燃料配比下料层中温度变化趋势

Fig. 5 Temperature trends in the materials layer with different biomass fuel ratios

替代 10% 的焦粉对烧结指标和烧结矿的质量无明显影响，继续提高生物质配比则出现负面影响，因而认为 10% 的生物质燃料替代焦粉占比是适宜的。印度理工学院的 JHA 等[19]则选用木屑生物质燃料和木炭替代焦粉的交互性进行研究，结果表明：全焦粉生产的烧结矿的冷态强度指标最优，而配入 10% 木屑生物质燃料就会大幅降低烧结矿强度，而木炭则在能接受的烧结矿强度降低范围内最高取代 30% 的焦粉，但全焦粉烧结的烧结矿还原性最差。这是因为焦粉烧结时高温时间更长，液相易于堵塞气孔，降低了烧结矿的还原性。因此，可以在木炭、木屑生物质燃料和焦粉间寻求一个平衡配比。相似的，甘敏等[20]的研究也表明了不同类型的生物质燃料的适宜配加比例不同。基于物理特性的差异，木炭、秸秆生物质和木屑生物质适宜替代焦粉的最大占比(质量分数)分别为 40% 、20% 和 15% 。

显然，上述研究都提到了生物质燃料燃烧过快和高温持续时间短带来的影响，而在褐铁矿为主要矿种进行烧结时，液相生成量较大且易于黏结，液相过多则会阻碍燃料燃烧，因而需要搭配燃烧性能更优的燃料[21]。此外，生物质燃料燃烧过快的特点恰好与褐铁矿液相生成更快的特性契合，因而生物质燃料可能更契合于高褐铁矿比例的烧结。对此，范晓慧等[22]对 50% 褐铁矿配比下的生物质燃料烧结进行了研究，分别采用不同配比的生物质燃料进行高褐铁矿烧结杯试验，得到的烧结指标如表3所示。由表3可以看出，采用

表 3　高褐铁矿配比下生物质燃料配比对烧结指标的影响

Table 3　Effect of biomass fuel ratios on sintering index at high limonite proportion

质量分数/%				烧结速度/($mm \cdot min^{-1}$)	利用系数/($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)
褐铁矿配比	生物质燃料配比	成品率	转鼓指数		
0	0	85.19	1.65	23.15	65.11
50	0	82.20	1.62	23.35	64.82
	20	82.97	1.69	25.42	66.48
	40	81.23	1.65	25.66	65.07
	60	77.28	1.58	26.88	64.14

褐铁矿烧结时，烧结矿的成品率和转鼓强度都相对较低，而使用 20% 生物质燃料替代焦粉时，褐铁矿烧结的烧结速度、成品率、转鼓强度和利用系数相较于全焦粉烧结分别提升 2.07 mm/min、0.77%、1.66% 和 0.07 $t/(m^2 \cdot h)$。但当生物质燃料配比达到 60% 时，各项指标还是出现了显著下降。烧结矿的微观结构也显示，高褐铁矿配比下，铁酸钙形态发生变化，液相侵蚀现象明显，当加入 20%~40% 的生物质燃料后，铁酸钙和磁铁矿晶粒的交织态成为主要的矿物结构。因而可以认为，生物燃料在 20%~40% 的替代焦粉比例下适应褐铁矿烧结。

一些生物质燃料中碱金属元素含量显著高于焦粉和无烟煤[23-24]。周昊等[25]的实验和热力学分析表明，$CaCl_2$ 添加剂可以显著降低生物质烧结时烧结矿中的碱金属含量，原料中 CaO 含量的增加有利于碱金属的脱除，因此适当提高碱度有利于生物质燃料的烧结应用，且木炭因为较高的 CaO 含量更适合减少烧结矿中碱金属含量。

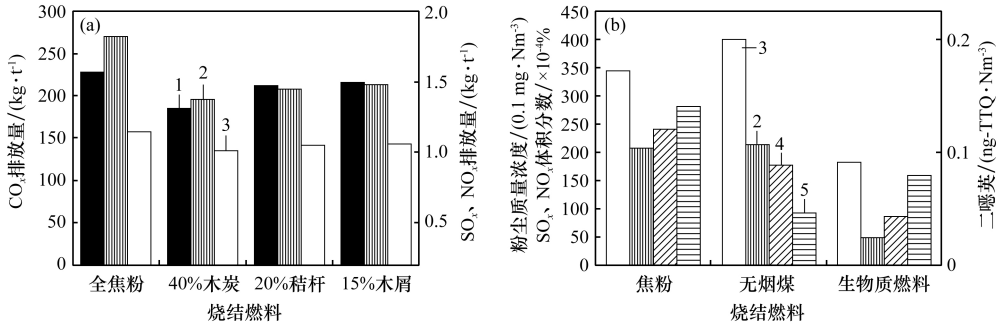
生物质燃料的燃烧特性几乎是所有研究中都最为关心的特性，其燃烧速度快，进而导致烧结料层中液相生成量不足或结晶形态不完善，这是破坏烧结产、质量指标最重要的原因，导致了生物质燃料在烧结中无法大比例使用，因而大量的研究都集中于探寻烧结过程中生物质燃料的最优配比。尽管众人的研究已经表明，燃烧特性越好的生物质燃料适宜的使用比例就越低，但在实际的生产中，需要根据具体的原(燃)料条件来试验探究最为合适的配比。优劣势互补也是生物质燃料在特定原料条件下应遵循的使用准则。

4　生物质燃料烧结尾气排放研究进展

生物质原材料的灰分和 S、N 含量普遍低于焦粉与无烟煤，其在化学成分上具有更优的清洁性，因而生物质燃料最为显著的优势就是能够减少烧结过程的含 N、S、C 等元素的气体污染物排放量。

大量的研究已经证明了生物质在污染物减排方面的显著作用。甘敏等[20]在基于烧结指标优劣确定了木炭、秸秆生物质燃料和木屑生物质燃料的最佳配比后，在其最佳配比下监测了主要气体污染物 CO_x、SO_x、NO_x 的排放量，结果表明，相较于全焦粉烧结，使用 40% 木炭、20% 秸秆生物质燃料和 15% 木屑生物质燃料时 CO_x 减排量(质量浓度下降幅度)分别为 18.65%、7.19% 和 5.39%，SO_x 减排量分别为 38.15%、31.79% 和 28.90%，NO_x 减排量分别为 26.76%、18.31% 和 15.49%。新日铁[12]还通过试验监测了焦粉、无烟煤、生物质燃料对粉尘和二噁英排放的影响，结果表明，生物质燃料烧结时，SO_x 和 NO_x 质量浓度降低，同时粉尘也显著降低，而二噁英排放量则低于焦粉烧结而略高于无烟煤烧结。

刘超[26]研究了生物质燃料改性以实现烧结过程的污染物减排，具体的改性方法：采用高压喷雾枪将润湿剂喷洒到生物质炭表面(改性润湿剂的成分主要为尿素溶液)，提高生物质炭的黏附力；随后将 CaO 粉末均匀多次添加到生物质炭中接触和填充。经过改性处理，生物质炭孔隙率降低、反应性惰化且铁酸钙生成条件改善。此外，尿素润湿剂还辅助减少了 NO_x、SO_x 排放；CaO 粉末辅助催化还原 NO_x；尿素的热解产物还能够吸收 Cl 源，遏制二噁英的反应生成。总体而言，生物质



研究结果：(a) 甘敏等；(b) 新日铁

1—CO_x；2—SO_x；3—NO_x；4—粉尘；5—二噁英。

图 6 生物质燃料烧结对污染物排放影响

Fig. 6 Impact of biomass fuel sintering on pollutant emissions

燃料改性处理既改善了烧结指标又进一步地实现了烧结污染物减排，进一步提高生物质燃料的使用比例[27-29]。基于生物质燃料改性，试验还实现了 50% 替代比例的生物燃料烧结的同时进行烟气循环，在不影响烧结矿质量的情况下 SO_2 和 NO_x 分别减排 42.6% 和 65.8% 以上。甘敏等[30]也在烧结烟气循环工艺中着重研究了生物质燃料应用的影响，研究认为：生物质燃料烧结燃烧效率高但能源利用率低；在烟气循环工艺烟气中，CO 进行二次燃烧优化了料层的热量分配模式，进一步降低了污染物的排放量。在该研究中，最优的生物质燃料烧结烟气循环参数为 40% 的含 CO 烟气循环比例、55% 的烟气循环覆盖面积，与不循环烟气的条件下相比，烟气中 CO_x、NO 和 SO_2 减排量分别从 18.65%、26.76% 和 38.15% 降低为 31.78%、45.07% 和 44.51%。

浙江大学能源清洁利用国家重点实验室从生物质燃料的理化特性出发，解析其燃烧行为，并对负载 $Cu_{0.1}Ce_{0.9}O_2$ 催化剂的生物质燃料样品进行了烧结试验研究，得到结论：在烧结过程中燃烧产生的初级 CO 扩散到催化剂表面会按照 Mars-Van Krevelen 机理氧化成 CO_2，在 3% 质量分数的催化剂负载下，生物质燃料配比能够显著提高，燃烧效率能够达到 98%，且烧结过程的 CO 排放显著降低，且不影响烧结矿的质量指标[31]。

综合之前的研究来看，生物质燃料只要能够替代一定比例的焦粉或无烟煤，则其本身污染物元素含量低的特性就能直接带来减排效果，且 SO_2 和 NO_x 的减排效果显著优于碳减排效果。而对于基于尿素溶液改性、烟气循环和 $Cu_{0.1}Ce_{0.9}O_2$ 催化剂进一步增强生物质燃料减排特性的研究则同样是基于生物质燃料的特性而提出的，这些工艺技术手段在实验层面都取得了显著的成效，但在生产实践中仍有待进一步考察。

5 结论与展望

本文通过分析生物质燃料在铁矿烧结工艺中的应用研究进展，从制粒、烧结、减排三个方面进行了系统性的归纳与分析，得到了以下结论：

(1) 生物质原材料相较于传统碳素燃料(焦粉与无烟煤)有着更大的比表面积、更高的孔隙率、更轻的密度，燃烧速度显著更快，发热量显著更低，S、N 等有害元素含量显著更高。生物质原材料在应用于铁矿烧结工序前须进行碳化处理以提高发热值和固定碳含量并减少挥发分比例。

(2) 生物质燃料烧结相较于焦粉和无烟煤烧结需要更大的水分配比。根据生物质燃料的种类该水分配比可能需要增加 1%~5%。多出的水分进入生物质燃料孔隙中能够减缓其燃烧速度，帮助改善烧结过程的液相生成，提高烧结成品率。此外，比焦粉、无烟煤设置更大的粒度，以及与精粉、熔剂预先制粒的工艺都能够通过阻缓燃烧改善生物质燃料应用时的烧结指标。

(3) 受限于燃烧特性，生物质燃料替代焦粉的比例不宜过高。根据生物质燃料的种类，该替代比例一般为 10%~40%，进一步提高使用比例则会出现成品率、利用系数和转鼓指数的显著降低。但生物质燃料的燃烧特性与高褐铁矿烧结是

相适应的，因而在高褐铁矿配比烧结时，可以尝试更高的生物质燃料替代比例。对于生物质燃料中可能存在的碱金属元素，可以适当提高烧结碱度并采用 $CaCl_2$ 喷洒的方法来减弱或消除不利影响。

（4）生物质燃料在降低烧结烟气中 CO、NO_x、SO_x、粉尘和二噁英等有害污染物排放量方面作用显著。此外，在生物质燃料烧结时采用烟气循环工艺、生物质燃料改性工艺、$Cu_{0.1}Ce_{0.9}O_2$ 催化工艺都能够进一步地降低烧结烟气中污染物含量。

从已有的研究中能够认识到，基于生物质燃料的特性和烧结工艺的需求出发，能够开发出新工艺，找到新材料去促进生物质燃料的高效使用。基于这一认知和出发点，还会有越来越多的如改性、催化和新工艺出现以帮助生物质燃料进一步提高替代比例。此外，对于工业规模级别的应用，下一步除了继续加深理论与实验探索外，还需要解决生物质燃料的可获得性、统筹回收加工处理等配套产业、加大工业探索的政策及资金支持等问题。

参考文献：

[1] 张建良，阚永海，张士军，等．全活性石灰强化烧结技术在超厚料层中的应用[J]．钢铁，2020，55(8)：56－61.
ZHANG Jianliang，KAN Yonghai，ZHANG Shijun，et al. Application of full active lime intensified sintering technology in ultra thick layer[J]. Iron and Steel，2020，55(8)：56－61.

[2] 王春鹏．利用烧结烟气中 CO 选择性催化还原 NO_x 的实验研究[D]．沈阳：东北大学，2015.
WANG Chunpeng. Experimental study of selective catalytic reduction of NO_x using CO in sintering flue gas [D]. Shenyang：Northeastern University，2015.

[3] WANG Y F，YANG T，WANG H Y，et al. Application of steam injection in iron ore sintering：fuel combustion efficiency and CO emissions [J]. Journal of Iron and Steel Research International，2023，30(1)：31－39.

[4] LIU Y，SHEN Y. Modelling and optimisation of biomass injection in ironmaking blast furnaces [J]. Progress in Energy and Combustion Science，2021，87：100952.

[5] 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，2015，34(1)：40－43.
ZHANG Dianbo，XU Hui，ZHU Jinming. Semi-coke injection trails for production of Baosteel No. 2 blast furnace[J]. Ironmaking，2015，34(1)：40－43.

[6] 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.

[7] 袁晓丽，李奇峰，黄维，等．生物质燃料在钢铁冶金中的研究进展[J]．重庆科技学院学报：自然科学版，2014，16(1)：106－109.
YUAN Xiaoli，LI Qifeng，HUANG Wei，et al. Research progress of biomass fuels on iron and steel industry[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition)，2014，16(1)，106－109.

[8] SUOPAJÄRVI H，KEMPPAINEN A，HAAPAKANGAS J，et al. Extensive review of the opportunities to use biomass-based fuels in iron and steelmaking processes[J]. Journal of Cleaner Production，2017，148：709－734.

[9] ZANDI M，MARTINEZ-PACHECO M，FRAY T A T. Biomass for iron ore sintering[J]. Minerals Engineering，2010，23(14)：1139－1145.

[10] 刘超，张玉柱，邢宏伟，等．生物质烧结燃料性能优化研究[J]．东北大学学报：自然科学版，2017，38(12)：1716－1720.
LIU Chao，ZHANG Yuzhu，XING Hongwei，et al. Research on performance optimization of biomass fuel for sintering[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science)，2017，38(12)：1716－1720.

[11] 季志云．应用秸秆制备铁矿烧结用生物质燃料的研究[D]．长沙：中南大学，2013.
JI Zhiyun. Research on preparing biomass fuel for iron ore sintering with application of straw[D]. Changsha：Central South University，2013.

[12] KAWAGUCHI T，HARA M. Utilization of biomass for iron ore sintering[J]. ISIJ international，2013，53(9)：1599－1606.

[13] LOVEL R，VINING K，DELL'AMICO M. Iron ore sintering with charcoal[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy，2007，116(2)：85－92.

[14] GAN M，FAN X，JI Z，et al. Effect of distribution of biomass fuel in granules on iron ore sintering and NO_x

emission[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2014, 41(6): 430 – 434.

[15] LAI Z, LÜ L, MENG H, et al. Effect of coating structure of granulated quasi - fuel particles in iron ore sintering [J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2021, 16(3): e2629.

[16] ZHAO J, LOO C E, ZHOU H, et al. Modelling and analysis of the combustion behaviour of granulated fuel particles in iron ore sintering[J]. Combustion and Flame, 2018, 189: 257 – 274.

[17] 陈贺. 基于烧结杯的生物质烧结过程模拟仿真及实验研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2018.
CHEN He. Simulation and experimental study of biomass sintering process based on sintering cup[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.

[18] OOI T C, ARIES E, EWAN B C R, et al. The study of sunflower seed husks as a fuel in the iron ore sintering process[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(2): 167 – 177.

[19] JHA G, SOREN S, MEHTA K D. Partial substitution of coke breeze with biomass and charcoal in metallurgical sintering[J]. Fuel, 2020, 278: 118350.

[20] GAN M, FAN X, CHEN X, et al. Reduction of pollutant emission in iron ore sintering process by applying biomass fuels[J]. ISIJ international, 2012, 52(9): 1574 – 1578.

[21] 牛乐乐,刘征建,张建良,等. 铁矿粉矿物组成对烧结矿冶金性能的影响[J]. 钢铁,2019,54(9):27 – 32.
NIU Lele, LIU Zhenjian, ZHANG Jianliang, et al. Effect of mineral composition of iron ore on metallurgical properties of sinter[J]. Iron and Steel, 2019, 54(9): 27 – 32.

[22] 范晓慧,尹亮,季志云,等. 生物质炭强化高质量分数褐铁矿烧结研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(10):3559 – 3565.
FAN Xiaohui, YIN Liang, JI Zhiyun, et al. Effect of biomass fuel on sintering of high mass fraction limonite[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2015, 46(10): 3559 – 3565.

[23] 孟凡华,杨天华,孙洋,等. 生物质燃烧过程中碱金属迁移转化研究进展[J]. 可再生能源,2010,28(5):111 – 114.
MENG Fanhua, YANG Tianhua, SUN Yang, et al. Research progress migration and transformation of alkali metals during biomass combustion[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(5): 111 – 114.

[24] 杨文,纪晓瑜,董凯,等. 生物质燃烧过程中Cl及碱金属K,Na的析出特性[J]. 太阳能学报,2015,36(12):3072 – 3075.
YANG Wen, JI Xiaoyu, DONG Kai, et al. Releasing characteristics of chlorine and alkali metals(K and Na) in process of biomass combustion[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(12), 3072 – 3705.

[25] 周昊,邢裕健,周明熙,等. 生物质替代焦粉铁矿石烧结过程中的碱金属迁移行为[J]. 工程科学学报,2021,43(3):376 – 384.
ZHOU Hao, XING Yujian, ZHOU Mingxi, et al. Migration behavior of alkali metals in an iron ore sintering process with the substitution of biomass for coke breeze[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(3): 376 – 384.

[26] 刘超. 生物质燃料烟气循环烧结污染物控制研究[D]. 沈阳:东北大学,2018.
LIU Chao. Study on controlling pollutants in flue gas cycle sintering based on biomass fuel[D]. Northeastern University, 2018.

[27] KATAYAMA K, KASAMA S. Influence of lime coating coke on NO_x concentration in sintering process[J]. ISIJ International, 2016, 56(9): 1563 – 1569.

[28] KOEBEL M, ELSENER M, KLEEMANN M. Urea-SCR: A promising technique to reduce NO_x emissions from automotive diesel engines[J]. Catalysis Today, 2000, 59(3 – 4): 335 – 345.

[29] 龙红明,李家新,王平,等. 尿素对减少铁矿烧结过程二噁英排放的作用机理[J]. 过程工程学报,2010,10(5):944 – 949.
LONG Hongming, LI Jiaxin, WANG Ping, et al. Reaction mechanism of emission reduction of dioxin by addition of urea in iron ore sintering process[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(5): 944 – 949.

[30] GAN M, JI Z, FAN X, et al. Insight into the high proportion application of biomass fuel in iron ore sintering through CO-containing flue gas recirculation[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 232: 1335 – 1347.

[31] ZHOU M, ZHOU H, CHENG Y, et al. Investigation on the combustion behaviors of coke and biomass char in quasi-granule with CuO-CeO_2 catalysts in iron ore sintering [J]. Journal of the Energy Institute, 2020, 93(5): 1934 – 1941.