热解与烧结协同处置富碳有机固废的新工艺

叶恒棣[1]，蔡飞翔[2]，丁成义[3]，龙红明[3]，李刚强[4]，刘唐猛[1b]，苏俊杰[2]，李俊杰[1a]，李 谦[1a]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司 a. 工程技术研究中心；b. 湖南中冶长天节能环保技术有限公司，湖南 长沙 410205；
2. 宝山钢铁股份有限公司，上海 201900；3. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243032；
4. 湖南诚钰环保科技有限公司，湖南 娄底 417009）

摘要：绿色低碳是钢铁工业发展的重要方向。针对当前市政固废有机能源利用率低、二次污染大等问题，本文提出有机固废热解与烧结耦合的协同处置新工艺。本文以橡胶、滤布、废布等有机固废为对象，研究有机固废最优热解工艺制度及烧结配料制度，并开展工业试验。结果表明：实验室研究中，废布在400 ℃热解渣中固定碳质量分数高、热值高，性质与焦炭相近；工业应用中，控制过量空气系数为0.45、热解温度为553 ℃条件是回转窑不结窑、二噁英风险低、热解残碳保留多的较优工况，热解残碳可达53.95%；以10%的热解渣替代烧结料中7%的焦粉可以降低烧结工序固体燃料消耗，同时烧结矿成品率和转鼓强度几乎不下降，是最优的燃料结构制度。

关键词：有机固废；热解；烧结；工艺制度
中图分类号：X799.3；X75；TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)06－0049－08
doi：10.13403/j.sjqt.2022.06.084

A new process of co-processing carbon-rich organic solid waste with pyrolysis and sintering

YE Hengdi[1], CAI Feixiang[2], DING Chengyi[3], LONG Hongming[3], LI Gangqiang[4], LIU Tangmeng[1b], SU Junjie[2], LI Junjie[1a], LI Qian[1a]
(1. *Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., a. Engineering Technology Research Center; b. Hunan Zhongye Changtian Energy Conservation and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changsha* 410205, *Hunan, China*; 2. *Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai* 201900, *China*; 3. *School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan* 243032, *Anhui, China*; 4. *Hunan Chengyu Environmental Protection Technology Co., Ltd., Loudi* 417009, *Hunan, China*)

Abstract: Green and low carbon is an important direction for the development of iron and steel industry. Aiming at the problems of low utilization rate of organic energy and serious secondary pollution of municipal solid waste at present, a new process of co-processing organic solid waste by pyrolysis and sintering is proposed. In this paper, organic solid wastes such as rubber, filter cloth and waste cloth are taken as objects, the optimal pyrolysis process system and sintering proportioning system of organic solid wastes are studied, and industrial experiments are carried out. The results show that, in laboratory research, the fixed carbon content of waste cloth in pyrolysis slag at 400 ℃ is high, its calorific value is high, and its properties are similar to those of coke. In industrial application, controlling the excess air coefficient to 0.45 and the pyrolysis temperature to 553 ℃ is a better working condition for the rotary kiln, which has the advantages of no kiln formation, low dioxin risk and more residual carbon in pyrolysis, and the residual

收稿日期：2022－10－5；**修回日期**：2022－11－05
基金项目：湖南省科技人才托举工程项目(2022TJ－N02)；国家重点研发计划资助项目(2022YFC3901405)；安徽省自然科学基金资助项目(2208085QE145)
作者简介：叶恒棣(1964—)，男，正高级工程师，从事固废治理与冶金环保装备等领域的研究工作。
通信作者：李 谦(1991—)，男，博士，高级工程师，从事冶金及城市固废资源化的研究工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

carbon in pyrolysis can reach 53.95%. Replacing 7% coke powder in sintered material with 10% pyrolysis slag can reduce the consumption of solid fuel in sintering process, and at the same time, the finished product rate of sinter and drum strength hardly decrease, which is the best fuel structure system.

Key words: organic solid waste; pyrolysis; sintering; process system

钢铁流程和市政有机固废中有许多橡塑类、织物类有机固废，这些固废中富含碳元素，且热值高，具有很高的利用价值[1]。但是，其在使用过程中沾染了有机物、重金属等毒害物质，变成了有机危险废物，必须按危废的要求进行管理和处置。一般有机危废采用“回转窑 + 二燃室”的二次焚烧工艺进行处理，该工艺将焚烧之后的残渣经过温度稳定固化后进行安全填埋，这种做法不仅造成二次污染，还存在固废中碳资源的浪费问题。

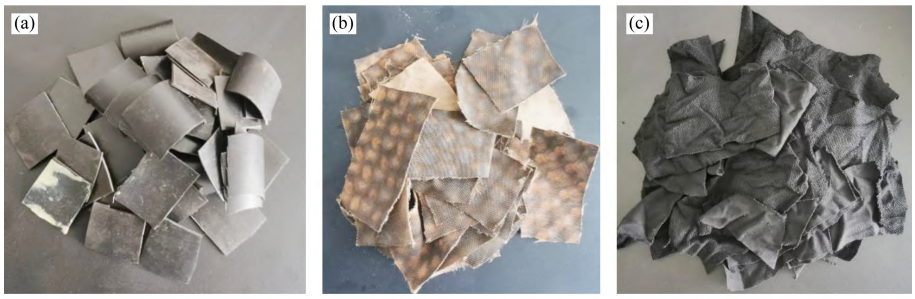
与填埋处理技术相比，热解是一种将有机固废能源化的有效方法，近年来正引起越来越多研究者的关注[2-3]。YUE 等[4]在固定床热解平台上，研究了市政有机固废在 N_2 和 CO_2 条件下的热解产物特性，发现在热解气氛中加入 CO_2 有利于提高热解半焦和热解气的产量，降低焦油产量，并且有利于提高 CH_4 在热解气中的占比。本文作者研究不同温度(400 ~ 900 ℃)、气氛(CO_2/N_2)、加热速度等条件下轧钢油泥热解产物的变化规律发现[5]，油泥中铁质量分数很高，热解时固体产物占比基本维持在85%左右，热解有利于油泥金属化率的提高。柳培文等[6]采用多种催化剂对轮胎进行催化热解，发现 NaOH 能明显提高气体产物中 H_2 和 CH_4 的体积分数，并降低 H_2S 的排放量，CaO 的脱硫效果最好。尹艳山等[7]利用管式炉试验平台，研究了樟树叶和废纸屑两种木质纤维类有机固废在 500 ~ 1 000 ℃热解时焦炭结构的演化规律，发现固废中的草酸钙在 500℃ 内就会分解转化为方解石，并且在温度达到 800 ℃后进一步分解形成生石灰。

前人研究大多聚焦在热解工艺的优化改进，没有深入探究如何进一步利用热解产物。本文采用热解方法作为有机固废的预处理工序，在去除有机固废中大部分挥发分以满足烧结进料要求，尽可能保留热解渣中的固定碳，以替代部分烧结工序中的化石燃料，研究热解与烧结耦合处置有机固废的新工艺，以期为钢铁工业绿色低碳发展提供新方向，并为行业有机固废处理提供借鉴与参考。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

热解试验所采用的 3 种原料分别为橡胶、滤布和废布，将其破碎成大小均匀的块状，如图 1 所示。其中，橡胶质硬、形状规则、不易变形，滤布和废布质软、形态不规则、易揉搓变形。



(a) 橡胶；(b) 滤布；(c) 废布

图 1 破碎后热解前的 3 种有机固废原料

Fig. 1 Three raw materials of organic solid waste after broken and before pyrolysis

3 种有机固废原料的元素和工业分析如表 1 所示。由表 1 可知：3 种原料都含有较高的 C 元素，其中橡胶的 C 质量分数最高，为 85.42%，废布的 C 质量分数最低，为 55.77%。在原料的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

富碳程度上，三者都有成为供热燃料的成分基础。3 种原料的 Cl 质量分数均较低，都小于 0.1%。3 种原料的挥发分质量分数都较高，其中橡胶达到 95.24%，废布最低也接近 84%。从挥发分角度而言，通过热解固碳及释放挥发分，将 3 种固废掺混进入烧结工序都意义深远。废布的灰分质量分数为 0.22%，远低于橡胶和滤布；除此之外，废布的固定碳质量分数最高，为 13.21%，明显高于橡胶和滤布，后两者几乎不含固定碳。

表 1　3 种试验原料的元素和工业分析(质量分数)

Table 1　Elementary and proximate analysis of three raw materials　　%

原料名称	C	H	O	N	S	Cl	挥发分	灰分	水分	固定碳
橡胶	85.42	12.36	0.94	—	0.38	0.05	95.24	4.63	0.13	—
滤布	84.87	13.54	1.59	—	—	0.03	89.55	7.97	1.49	0.99
废布	55.77	5.55	37.00	0.66	1.01	0.02	83.93	0.22	2.64	13.21

1.2　试验方法

1.2.1　热解试验

试验过程：将 3 种有机固废原料分别放于刚玉坩埚中，将坩埚置于腔式热解炉内；再向热解炉内通入流速为 1 L/min 的 N_2，设置通气时间为 30 min，使热解炉内的空气排出；随后将 N_2 流速调整为 500 mL/min，以 10 ℃/min 的升温速率将原料分别从室温升至 350～600 ℃进行热解，升至目标温度后保温 0.5 h。热解试验后，采用 MRU VARIO PLUS 煤气分析仪对 CH_4、CO、CO_2 和 H_2 同步检测。

1.2.2　烧结杯试验

将 450 ℃热解条件下废布的热解渣放入烧结杯中，以等热量替代和非等热量替代两种方式，开展热解渣掺烧对烧结矿质量的影响研究。在等热量替代试验中，保持烧结料层中的总热量不变，分别以 5%、10%、15%的热解渣配比，用热解渣的热量等量替代焦粉的热量；在非等热量替代试验中，则是以 10%的热解渣的热量分别替代 10%、7%、5%焦粉的热量。不同热解渣替代条件下的烧结燃料结构如表 2 所示。

表 2　不同热解渣替代条件下的烧结燃料结构(质量分数)

Table 2　Sintering fuel structure under different substitution ratio of pyrolysis slag　　%

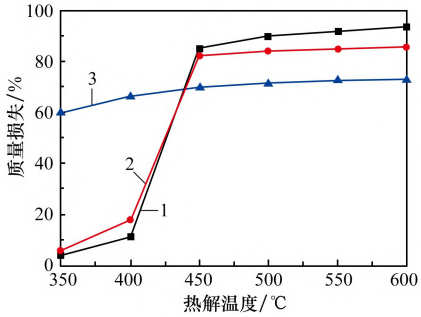
试验方案	固体燃料	热解渣	合计
基准(100%焦)	3.80	0	3.80
95%焦+5%渣	3.61	0.19	3.80
90%焦+10%渣	3.42	0.38	3.80
93%焦+10%渣	3.53	0.38	3.91
95%焦+10%渣	3.61	0.38	3.99
85%焦+15%渣	3.23	0.57	3.80

2　结果与讨论

2.1　热解工艺制度

2.1.1　热解质量及形态变化

考查 350～600 ℃热解温度对 3 种有机固废热解过程质量损失的影响，结果如图 2 所示。由图 2 可以看出，随着热解温度的升高，3 种原料的质量损失均有增大的趋势。橡胶和滤布



1—橡胶；2—滤布；3—废布。

图 2　热解温度对有机固废热解过程质量损失的影响

Fig. 2　Influence of pyrolysis temperature on mass loss of organic solid waste

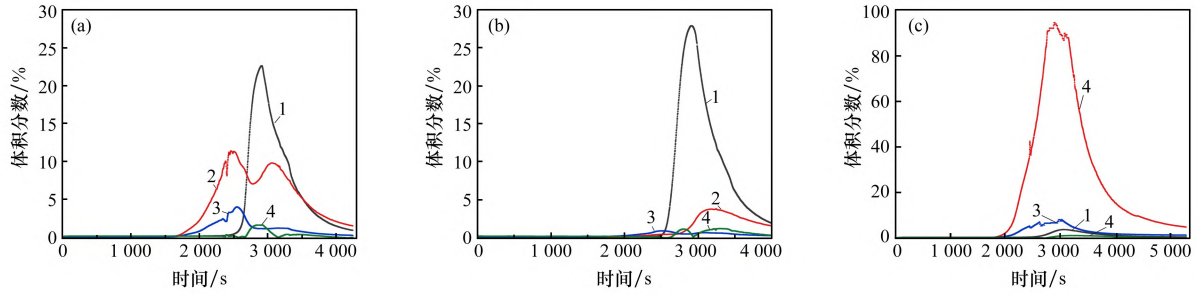
的质量损失波动较为明显，尤其是在 400～450 ℃区间质量损失剧烈增加，随后继续升温对质量损失影响不明显。600 ℃热解时，橡胶和滤布的质量损失分别最高达到 93.89%和 85.83%，而随着热解温度的升高废布的质量损失波动较小；当热解温度为 450 ℃时，废布的质量损失为 70.1%，低于橡胶和废布。这其中，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

橡胶在热解温度低于550 ℃时，热解产物几乎都是热解油，冷却后也呈油状胶质态。

2.1.2 热解气体成分分析

在热解温度为600 ℃的条件下，对3种有机固废热解过程的气相产物 CH_4、CO、CO_2 和 H_2 的排放情况进行研究，得到3种情况下气相产物的排放情况如图3所示。由图3可知：橡胶在热解温度为600 ℃时，CH_4、CO、和 CO_2 的最高体积分数分别为22.60%、11.39%和3.99%，平均体积分数分别为3.24%、3.32%和0.74%；热解滤布时，CH_4、CO、和 CO_2 的最高体积分数分别为27.92%、3.77%和0.85%，平均质量分数分别为4.17%、1.34%和0.26%；而热解废布时，CH_4、CO、和 CO_2 的最高质量分数分别为3.63%、92.13%和6.32%，平均质量分数分别为1.22%、34.21%和1.14%，废布在热解过程中气相产物主要为CO。



（a）橡胶；（b）滤布；（c）废布

1—CH_4；2—CO；3—CO_2；4—H_2。

图3 3种固废在600 ℃热解过程中的气体排放情况

Fig. 3 Gas emissions during 600 ℃ pyrolysis process of three solid wastes

由图3还可看出，废布热解气中可燃组分的体积分数高于橡胶和滤布，这主要是因为橡胶和滤布是高分子聚合物，其主要组分是多环芳烃或者长链烃结构，在热解时首先以大分子结构析出，然后继续断键生成大量 CH_4 分子。此外，低温热解气中存在大量油分，容易在管道内冷凝。而废布是棉纤维结构，存在羧基、甲基、氢基等容易分解的基团，其热解时容易形成轻质小分子气体，因此可燃组分相对较高，尤其是CO组分较高[8-9]。

2.1.3 热解固相产物分析

（1）热解固相产物元素和工业分析。3种原料的热解固相产物元素和工业分析结果如表3所示。由表3可知：橡胶在为350 ℃热解时，其热解固相产物中C质量分数最高，为86.55%，高于原料中C质量分数，在550 ℃热解时其热解固相产物中C质量分数最低，仅为15.29%；滤布在350 ℃热解时，其热解固相产物中C质量分数最高，为80.21%，在600 ℃热解时其热解固相产物中C质量分数最低，仅为13.38%；废布在为600 ℃热解时，其热解固相产物中C质量分数最高，为90.03%，在350℃热解时其热解固相产物中C质量分数最低，为84.00%，均高于原料中C的质量分数。随着热解温度的升高，橡胶和滤布热解的固相产物中C质量分数总体呈不断降低的趋势，废布热解产物中C质量分数呈不断增加的趋势。

分析热解后固相产物中挥发分的质量分数变化发现，橡胶、滤布和废布中该值均随着热解温度的升高而降低，其中橡胶与滤布中该值的变化波动较大，而废布中该值的变化波动较为平缓。相对来说，废布的热解产物比橡胶和废布对烧结的影响更小。

总体而言，橡胶和滤布中的C大多以挥发分碳的形式存在，热解温度太低，残碳中的挥发分高，对烧结有不利影响；热解温度太高，则质量损失太大，而且残碳中C的质量分数也很低。而废布中存在一定量的固定碳，采用400 ℃热解，可以去除大量挥发分，且热解底渣中C质量分数高达80%以上，是较合适的烧

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

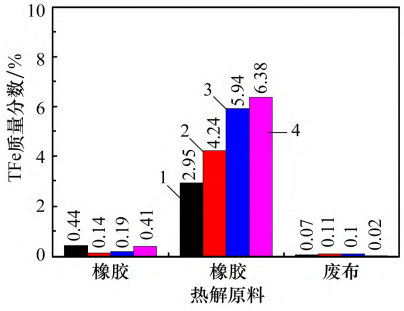
表 3　热解固相产物的元素和工业分析

Table 3　Elementary and proximate analysis of pyrolysis residues

原料名称	温度/℃	化学元素(质量分数)/%					工业分析(质量分数)/%			
		C	H	O	N	S	挥发分	灰分	水分	固定碳
橡胶	350	86.55	13.32	0.13	—	—	94.93	4.82	0.25	0.00
	400	85.76	13.49	0.76	—	—	93.55	6.13	0.32	0.00
	450	58.96	10.05	30.20	0.74	0.05	57.37	36.48	2.14	4.01
	500	15.29	1.82	82.65	0.25	0.24	14.74	20.21	5.00	60.05
	600	19.39	1.08	79.17	0.20	0.36	8.41	19.16	2.18	70.25
滤布	350	80.21	12.59	7.20	—	—	80.52	13.36	0.51	5.61
	400	74.72	11.70	13.59	—	—	81.42	12.00	0.72	5.86
	450	26.61	3.22	69.55	0.27	0.34	25.40	65.88	1.68	7.04
	500	15.45	1.30	82.90	0.25	0.36	18.41	19.40	2.89	59.30
	600	13.38	0.95	85.23	0.24	0.44	11.97	12.46	2.31	73.26
废布	350	84.00	2.46	4.66	1.55	7.33	41.54	1.07	1.60	55.79
	400	88.30	3.28	4.85	1.78	1.78	16.79	1.43	3.05	78.73
	450	89.05	3.84	4.82	2.30	0	16.17	1.33	2.52	79.98
	500	89.33	3.54	4.30	1.80	1.03	15.79	1.68	2.32	80.71
	550	89.98	3.66	4.08	1.65	0.63	15.34	1.22	2.40	81.04
	600	90.03	3.63	—	—	—	14.98	1.43	1.77	81.82

结燃料。

（2）热解固相产物 TFe 质量分数分析。3 种原料热解固相产物 TFe 质量分数分析结果如图 4 所示。由表 4 可知：滤布热解固相产物中 TFe 质量分数整体较高，当热解温度为 450 ℃时，TFe 质量分数达到 6.38%，而橡胶热解固相产物中 TFe 质量分数次之。滤布和橡胶来源于钢铁企业，而废布主要来源于城市生活垃圾[10]，故其热解固相产物中 TFe 质量分数最低。



温度/℃：1—原料；2—350；3—400；4—450。

图 4　热解固相产物 TFe 质量分数

Fig. 4　TFe content in pyrolysis solid residues

（3）热解固相产物热值分析。橡胶和滤布热解产物中含碳量高，但固定碳质量分数极低。根据热值计算经验公式，废布及其热解固相产物的热值分析结果如表 4 所示。由表 4 可知：热解后废布热值大幅提升，在热解温度为 350 ℃时，其热解固相产物热值已达到 29.92 MJ/kg；当热解温度 400 ℃时，热值增加到 32.30 MJ/kg；随后继续增加热解温度，产物热值缓慢增加，变化不大。废布热解固相产物的热值随热解温度的升高而升高，而通常烧结焦粉热值约为 30 MJ/kg，即废布热解固相产物的热值与焦粉相当而略高于焦粉。

表 4　废布及其热解固相产物的热值分析

Table 4　Heat value analysis of waste cloth and its pyrolysis residues　　MJ/kg

废布	热解固相产物					
	350 ℃	400 ℃	450 ℃	500 ℃	550 ℃	600 ℃
19.15	29.92	32.30	33.22	33.04	33.43	33.42

2.1.4　工业热解条件

在某钢铁企业危废处置工程开展热解处置工业试验研究，试验原料为含铁油泥、废活性炭、有机树脂的混合物。试验过程中，原料经混匀后，由上料抓斗送进回转窑进行处置。在

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

传统焚烧工艺中，焚烧过量空气系数(α)一般为1.05～1.20，以保证物料充分焚烧。给风量过低会导致炉温太低，热反应无法持续进行，甚至导致回转窑熄火或结圈。因此，在热解处置过程中，控制进风量，使α处于0.4～0.7，具体运行参数如表5所示。

表5 工业试验运行参数

Table 5 Operating parameters of industrial experiment

项目	窑头温度/℃	过量空气系数	焚烧量/(t·h^{-1})	窑尾温度/℃	窑头天然气量/(m^3·h^{-1})	窑头助燃风量/(m^3·h^{-1})	一次风/(m^3·h^{-1})	二燃室天然气量/(m^3·h^{-1})
工况1	553	0.45	3.25	688	108	1 087	3 801	466
工况2	631	0.71	3.25	788	290	1 400	5 979	417

项目	二燃室助燃风量/(m^3·h^{-1})	烟囱烟气含氧量/%	二燃室出口温度/℃	烟气量/(m^3·h^{-1})	底渣残碳量/%	底渣烧失量/%	底渣挥发分/%	综合处置能耗/(kg·t^{-1})
工况1	5 013	11.4	1 107	18 640	53.95	56.56	3.29	129.8
工况2	3 528	11.8	1 120	19 410	8.95	9.69	5.49	282.1

由表5可以看出：当控制α为0.45时，窑头温度为553 ℃，窑尾温度为688 ℃，总氧气量为18 640 m^3/h，所获得的热解渣的残碳量达到53.95%，挥发分为3.29%。由此可知，该热解渣可以作为燃料加入烧结进行协同处置。进一步提高给氧量为0.71时，窑头温度上升至631 ℃，窑尾温度上升至788 ℃，与工况1相比，由于二燃室入口烟气温度上升，所以二燃室消耗的天然气量减少，但总烟气量略有上升，达到19 410 m^3/h。由于给氧量增加、温度升高，残渣中含碳量仅为8.95%，挥发分质量分数为5.49%，与工况1相比，热解残碳大幅降低。计算表明，工况1的固废综合处置能耗(折标煤)为129.85 kg/t，与工况2相比，能耗下降53.9%。作为工业热解来讲，工况1显然是更合适的热解工艺制度，过量空气系数应控制在0.45左右，窑头温度控制在550 ℃左右。

有机物中不可避免会含有一些Cl元素，这些Cl在热反应过程中容易与含碳基团形成二噁英等有毒物质。二噁英从头合成或前驱体合成需要温度为200～500 ℃，且在有氧或重金属催化的条件下进行[11-12]。在工况1的条件下，系统内供氧不足，温度达到550 ℃，理论上不利于二噁英的合成。二噁英的熔点为303～306 ℃，沸点为421～465 ℃[11]，即使有少部分二噁英存在，也会以气相形式进入二燃室，在1 100 ℃条件下停留时间超过2 s，随后充分分解。综上所述，工况1是有利于二噁英控制和高碳热解渣生成的较优工业热解条件。

2.2 烧结工艺制度

2.2.1 等热量替代

在等热量替代试验中，在固定烧结燃料配比为3.8%、混合料水分为7.0%条件下，研究热解渣不同掺混比对烧结矿产、质量指标的影响，结果如表6所示。

由表6可知，随着掺混比的增加，烧结速度逐渐加快，由20.22 mm/min提升为21.54 mm/min，这是由于热解渣的添加提升了烧结混

表6 热解渣添加量对烧结产质量指标的影响(等热量替代)

Table 6 Influence of pyrolysis residue addition on sintering quality and yield(equicaloric replacement)

试验方案	烧结速度/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓指数/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})	烧结终点温度/℃
基准(100%焦)	20.22	73.07	68.00	1.437	63.04	431
95%焦+5%渣	20.63	72.68	66.67	1.426	59.61	416
90%焦+10%渣	21.34	71.06	65.46	1.418	56.64	403
85%焦+15%渣	21.54	69.74	64.05	1.391	54.92	388

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

合料的制粒效果，改善了料层透气性，导致烧结速度加快；掺混热解渣后，烧结矿的成品率、转鼓指数和利用系数均呈下降趋势，分别由基准值的 73.07%、68.00% 和 1.437 t/(m²·h)降至 69.74%、64.21% 和 1.391 t/(m²·h)。这是由于烧结速度加快，料层中高温反应不能充分进行，导致烧结矿质量有所降低。同时发现，随着热解渣添加量的不断提高，烧结终点温度逐渐下降，由基准值 431 ℃降至 388 ℃，这是由于热解渣的粒度与焦炭相比较细，在烧结过程中热量快速释放，透气性变好导致料层无法持续蓄热[13]，这也是烧结矿产、质量下降的重要原因。固体燃料消耗随着热解渣掺混比的增加明显降低，由基准值 63.04 kg/t 降低为 54.92 kg/t。

2.2.2　非等热量替代

在非等量替代的条件下，添加 10% 热解渣并考察焦炭量增加对烧结矿产、质量指标的影响，结果如表 7 所示。由表 7 可知：当焦炭量由 90% 分别增加到 93% 和 95% 时，烧结矿产、质量指标改善。这是由于焦炭量的增加促进了燃料热量的释放以及改善了料层蓄热效果，提高了烧结料层温度，从而对烧结矿产、质量指标造成影响。

表 7　热解渣添加量对烧结矿产、质量指标的影响(非等热量替代)

Table 7　Influence of pyrolysis residue addition on sintering quality and yield(non-equicaloric replacement)

试验方案	烧结速度/(mm·min⁻¹)	成品率/%	转鼓指数/%	利用系数/(t·m⁻²·h⁻¹)	固体燃料消耗/(kg·t⁻¹)	烧结终点温度/℃
基准(100%焦)	20.22	73.07	68.00	1.437	63.04	431
90%焦+10%渣	21.34	71.06	65.46	1.418	56.64	403
93%焦+10%渣	21.00	73.01	66.83	1.433	57.96	419
95%焦+10%渣	20.86	72.43	66.75	1.425	60.21	428

研究表明，适当提高料层温度有助于铁酸钙的生成。当焦炭量提高到 93% 时，烧结终点温度由 403 ℃升至 419 ℃，同时成品率和转鼓指数分别由 71.06%、65.46% 提升至 73.01%、66.83%；固体燃料消耗有所提高，由 56.64 kg/t 增至 67.96 kg/t；继续提高焦炭量到 95% 时，终点温度提高，过高的料层温度抑制了铁酸钙的生成(铁酸钙生成温度为 1 200 ℃以下)[14-15]，因此，烧结矿产、质量有所下降，但依旧高于 90% 时的指标。由此可知，适当提高烧结料层的温度有利于改善烧结矿的产、质量指标。

综合而言，在烧结工序添加热解渣新工艺对城市固废在烧结过程的资源再利用和降碳目标是有利的，其对烧结矿产、质量产生一定不利影响，但也在可控范围之内，尤其(93%焦+10%渣)燃料结构是较为合理的配比方案。

3　结　论

(1) 废橡胶、废滤布等有机固废原料中的碳绝大部分以挥发分的形式存在，在不同温度热解条件下几乎没有固定碳产生，热解气中含有大量的油分；废布是织物结构，450 ℃热解可以得到固定碳质量分数为 85.98% 的热解渣，具备替代烧结原料焦粉的的潜力。

(2) 工业研究表明，过量空气系数控制为 0.45，热解温度为 553 ℃是回转窑不结窑、二噁英风险低、热解残碳保留多的较优工况，热解残碳可达 53.95%。

(3) 以等热量的方式用热解渣替代烧结焦粉，热解渣的添加比越大，烧结工序能源消耗下降越明显，但是烧结矿的质量也有所下降；以 10% 的热解渣替代 7% 的焦粉，烧结工序能源消耗下降 5.08 kg/t，烧结矿质量基本不发生下降，可实现有机固废中热量资源化回用。

参考文献：

[1] 路娟娟,金琼. 城市固体废物处理及资源化利用的方法研究[J]. 资源节约与环保,2021(5):121-122.
LU Juanjuan, JIN Qiong. Research of diposal and utilization method of municipal solid waste[J]. Resource conservation

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

and environmental protection,2021(5):121 - 122.

[2] 陈万福,王志强,曾晖,等. 钢铁行业有机固废危废采用热裂解工艺处理可行性分析[J]. 山东冶金,2022,44(3):56 - 57;60.
CHEN Wanfu, WANG Zhiqiang, ZENG Hui, et al. Feasibility analysis of thermal cracking industrial treatment of hazardous organic solid waste in iron and steel industry. Shandong Metallurgy,2022,44(3):56 - 57;60.

[3] 沈海萍,CLAUS Schmidt,宓虹明,等. 热解技术在有机固废能源化清洁利用方面的应用潜力分析[J]. 环境污染与防治,2008(7):67 - 73.
SHEN Haiping, CLAUS Schmidt, BI Hongming, et al. Applications of pyrolysis technology for comprehensive utilization of organic solid wastes[J]. Environmental pollution and prevention,2008(7):67 - 73.

[4] YUE C, GAO P, TANG L, et al. Effects of N_2/CO_2 atmosphere on the pyrolysis characteristics for municipal solid waste pellets[J]. Fuel: A journal of fuel science, 2022, 315(1): 123233.

[5] YE Hengdi, LI Qian, YU Hongdi, et al. Pyrolysis behaviors and residue properties of iron-rich rolling sludge from steel smelting[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2022,19:2152.

[6] 柳培文,徐小刚,吴玥. 催化剂对废轮胎热解特性影响研究[J]. 环境卫生工程,2020,28(6):66 - 70.
LIU Peiwen, XU Xiaogang, WU Yue. Study on the effect of catalyst on pyrolysis characteristics of waste tire[J]. Environmental Sanitation Engineering,2020,28(6):66 - 70.

[7] 尹艳山,王泽忠,田红,等. 木质纤维类生活垃圾热解过程矿物质和碳结构的演化规律[J]. 燃料化学学报,2015,43(2):160 - 166.
YIN Yanshan, WANG Zezhong, TIAN Hong, et al. Evolution of mineral matter and carbonaceousstructure during lignocellulosic municipal solid waste pyrolysis[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology,2015,43(2):160 - 166.

[8] UNAPUMNUK K, KEENER T, LU M, et al. Pyrolysis behavior of tire-derived fuels at different temperatures and heating rates [J]. Journal of the air & waste management association,2006,56(5):618 - 627.

[9] DENG Na, WANG Weiwei, CHEN Guangwu, et al. Pyrolysis characteristics of rubber compositions in medical waste[J]. Journal of Central South University,2013(9):2466 - 2471.

[10] 叶恒棣,李谦,魏进超,等. 钢铁炉窑协同处置冶金及市政难处理固废技术路线[J]. 钢铁,2021,56(11):141 - 147.
YE Hengdi, LI Qian, WEI Jinchao, et al. Technology route research of metallurgical and urban solid waste co-processing using steel indutrialfurnace[J]. Iron and Steel, 2021, 56(11):141 - 147.

[11] 罗阿群,刘少光,林文松,等. 二噁英生成机理及减排方法研究进展[J]. 化工进展,2016,35(3):910 - 916.
LUO Aqun, LIU Shaoguang, LIN Wensong, et al. Progress of formation mechanisms and emission reduction methods of PCDD/Fs[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016,35(3):910 - 916.

[12] 王肇嘉,秦玉,顾军,等. 生活垃圾焚烧飞灰二噁英控制技术研究进展[J]. 环境工程,2021,39(10):116 - 123.
WANG Zhaojia, QIN Yu, GU Jun, et al. Research progress of dioxin control technologies in fly ash from domestic watste incineration[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(10): 116 - 123.

[13] 葛园琴,李学金,徐智英. 烧结烟气湿法脱硫技术应用[J]. 环境科技,2011,24(4):53 - 55.
GE Yuanqin, LI Xuejin, XU Zhiying. Wet flue gas desulfurization technology in treatment of sintering gas[J]. Environmental Science and Technology,2011,24(4):53 - 55.

[14] 刘振林. 铁矿石烧结的铁酸钙生成特性研究[J]. 山东冶金,2003,25(6):46 - 49.
LIU Zhenlin. Study of producing characteristics of monocalcium ferrite in iron ore sintering[J]. Shandong Metallurgy, 2003,25(6):46 - 49.

[15] ZHANG Fang, AN Shengli, LUO Guoping, et al. Effect of basicity and alumina-silica ratio on formation of silico-ferrite of calcium and aluminum[J]. Journal of Iron & Steel Research, 2012,19(4):1 - 5.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net