轧钢油泥与生物质共热解特性

孙 美[1]，王静松[1]，石建红[2]，李卫国[2]，佘雪峰[1]，薛庆国[1]
（1. 北京科技大学 钢铁冶金新技术国家重点实验室，北京 100083；
2. 广东华欣环保科技有限公司，广东 韶关 512199）

摘要：为探究轧钢油泥与生物质混合共热解处理工艺，本文利用热重分析仪在N_2气氛下对轧钢油泥、生物质（玉米秸秆、稻草秸秆）单独热解并对3种不同混合配比的轧钢油泥与生物质混合进行试验研究，讨论上述混合物的协同热解特性；同时，在不同升温速率（β）条件下，采用Friedman-Reich-Levi法对混合热解过程进行动力学分析，得到动力学参数。结果表明：轧钢油泥的热解过程主要为水分析出、油分分解、铁氧化物还原3个主要阶段，生物质的热解主要失重阶段为挥发分析出；玉米秸秆、稻草秸秆与轧钢油泥共热解协同作用与生物质种类和混合比有关，当生物质混合比为70%时促进作用更明显，稻草秸秆对轧钢油泥的促进作用优于玉米秸秆；两种生物质与轧钢油泥共热解的活化能出现随转化率的增加先升高后降低的趋势，在转化率为0.6或0.7时达到最大活化能，为52.45～80.02 kJ/mol。

关键词：轧钢油泥；生物质；共热解；动力学；活化能
中图分类号：TF09；S216.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2023)04－0119－08
doi：10.13403/j.sjqt.2023.04.063

Co-pyrolysis characteristics of steel rolling oil sludge and biomass

SUN Mei[1], WANG Jingsong[1], SHI Jianhong[2], LI Weiguo[2], SHE Xuefeng[1], XUE Qingguo[1]
(1. State Key Laboratory of New Technology of Iron and Steel Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Guangdong Huaxin Environmental Protection Technology Co., Ltd., Shaoguan 512199, Guangdong, China)

Abstract: In order to explore the co-pyrolysis treatment process of mixing steel rolling oil sludge and biomass, a thermogravimetric analyzer is used to pyrolyze steel rolling oil sludge and biomass (corn stalk and straw stalk) separately under N_2 atmosphere, and some experiments are carried out by mixing three kinds of steel rolling oil sludge and biomass with different mixing ratios, and the synergistic pyrolysis characteristics of the above mixtures are discussed. At the same time, under different heating rate (β) conditions, the dynamic analysis of the hybrid pyrolysis process is carried out by the Friedman-Reich-Levi method, and the dynamic parameters are obtained. The results show that the pyrolysis of steel rolling oil sludge is mainly composed of 3 main stages: dehydration, oil decomposition and iron oxide reduction, and the main weight loss stage of biomass pyrolysis is de-volatilization. The synergistic effect of co-pyrolysis of corn stalk, straw stalk and steel rolling oil sludge is related to the type and mixing ratio of biomass, and the promotion effect is more obvious when the biomass mixing ratio is up to 70%, while the promotion effect of straw stalk on steel rolling oil sludge is better than that of corn stalk. The activation energy of co-pyrolysis between the two kinds of biomass and steel rolling oil sludge has a tendency to increase first and then decrease with the increase of conversion rate, when the conversion rate is 0.6 or 0.7, the maximum activation energy is 52.45～80.02 kJ/mol.

收稿日期：2022－10－22；**修回日期**：2022－11－10
基金项目：国家重点研发计划专项基金资助项目(2019YFC1905703)；广东省省级科技计划资助项目(200916166271479)
作者简介：孙 美(1996—)，女，硕士研究生，从事固体废物处理与利用方面的研究。
通信作者：薛庆国(1966—)，男，教授，博士生导师，从事冶金资源综合利用方面的研究。

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

Key words: steel rolling oil sludge; biomass; co-pyrolysis; dynamics; activation energy

轧钢油泥是钢铁企业生产过程中产生的废弃物，通常在轧钢与炼钢工艺中产生较多，主要由铁屑、氧化变质的润滑油、水和其他杂质组成，具有刺鼻性气味、不易流动、化学性质稳定的特点[1]。轧钢油泥在自然条件下难以降解，属于危险废物(HW08)，长期堆积既占用土地又污染环境，处理不当会对人体健康和环境造成极大危害[2]。据统计，每生产1 t钢材，轧钢油泥的产生量约为0.86 kg[3]。2021年中国钢材产量为13.4亿吨，轧钢油泥的产生量约为115万吨。

目前，轧钢油泥的常见处理方法主要有焚烧法、热解法、溶剂萃取法、调质-分离、化学热洗涤法、生物处理法，还有微波、超声等辅助处理方法[4-9]。但上述方法大多都存在投资成本高、工艺复杂、能耗大和污染环境等问题，而热解技术具有处理彻底、能源回收率高、减量效果好、污染物排放少等特征，是处理油泥的有效资源化和减量化手段[10]。随着“双碳”目标的提出，清洁能源的使用势必成为趋势。生物质能源是一种可实现CO_2零排放的可再生能源。将生物质与轧钢油泥共热解，不仅可以利用生物质疏松多孔的特性降低油泥黏度，便于轧钢油泥的处理，而且油泥和其他物质共热解相比于单物质热解一般存在协同作用。ZHOU等[11]研究发现，添加一定量的杏核有利于含油污泥热解反应的发生；王江林等[12]研究发现，在轧钢油泥中掺混聚丙烯不仅可以提高CO和CO_2产率，而且降低了反应所需活化能；巩志强等[13]通过试验发现，微藻颗粒的存在会增加物料内部孔隙，更方便热解气体的逸出，促进热解反应发生。

然而，目前国内外关于轧钢油泥与生物质的共热解特性及产物分布情况的研究相对较少。为此，本文选用玉米秸秆和稻草秸秆这两种生物质分别与轧钢油泥进行混合热解，通过分析轧钢油泥、生物质以及掺混样品的热解失重特性和动力学参数，为轧钢油泥与生物质掺混共热解工艺提供动力学基础数据支持，以此为基础探索生物质对轧钢油泥热解特性的影响规律。

1 材料与方法

1.1 试验原料

试验轧钢油泥取自宝钢某轧钢厂，其在室温条件下呈黑褐色且较为黏稠，并伴有刺鼻性气味。本文选用的生物质为玉米秸秆与稻草秸秆，采用有机元素分析仪以及《煤的工业分析方法》(GB/T 212—2008)对这两种生物质和轧钢油泥进行理化特性分析。试验先将生物质破碎、筛分，选用粒度为0.15~0.50 mm的小颗粒作为原料，得到原料的分析结果如表1所示。

表1 生物质和轧钢油泥的元素分析和工业分析(质量分数)

Table 1 Elemental analysis and industrial analysis of biomass and steel rolling oil sludge %

原料名称	元素分析				工业分析		
	N	C	H	S	水分	挥发分	灰分
玉米秸秆	1.686	38.071	5.219	0.274	22.69	52.12	10.51
稻草秸秆	1.490	40.564	5.572	0.245	19.27	54.38	13.32
轧钢油泥	0.142	41.847	8.822	0.841	22.66	56.21	18.57

1.2 装置与试验方法

进行热解试验前，采用机械混合法将轧钢油泥与生物质(玉米秸秆、稻草秸秆)按不同质量比(30∶70,50∶50,70∶30)均匀混合，得到混合样品。

采用热重分析仪对生物质、轧钢油泥及掺混不同配比生物质的轧钢油泥进行热重分析。样品质量约为10 mg，样品坩埚材料为Al_2O_3，试验载气为高纯氮气(99.99%)，流量设定为100 mL/min，升温速率设定分别为10、20 ℃/min和30 ℃/min，由室温升温至1 000 ℃。获得生物质、轧钢油泥单独热解及混合时共热解的失重特性。

1.3 数据处理

为考察不同混合比生物质(玉米秸秆、稻草秸秆)与轧钢油泥共热解的协同交互作用，本文对理论加权计算得到的TG(失重率)或DTG(失重速率)曲线和试验值进行对比分析。共热解的理论值是轧钢油泥与生物质单独热解各相产物试验值及相应的混合比通过加权平均计算得到[14]，计算方法如式(1)所示。

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

$$Y_{cal}=Y_{oil}+(1-\omega)Y_{bio} \quad (1)$$

式中：ω 为混合样品中轧钢油泥的质量分数，%；Y_{oil}为轧钢油泥单独热解时实际的 TG 或 DTG 值，%；Y_{bio}为生物质单独热解时实际的 TG 或 DTG 值，%。

1.4　热解反应动力学分析方法

为了更好地反应样品的失重特性，本文采用动力学模型对热解过程进行动力学分析，得到热解反应活化能变化规律，通过对活化能大小的比较来判断反应发生的难易程度。

Friedman-Reich-Levi(Friedman)法是一种典型无模式的等转化率法[15]，其通过多条升温速率曲线确定动力学参数，该模型与反应机理函$f(\alpha)$的选取无关，使得到的活化能更接近真实值，避免因机理函数的选择带来的误差[16]。动力学的一般形式：

$$\frac{d\alpha}{dT}=kf(\alpha) \quad (2)$$

式中：α 为热重过程中某时刻的转化率；T 为温度，K；k 是反应的速率常数。

结合 Arrhenius 公式和升温速率 $\beta=dT/dt$(β 为升温速率，K/min)，可得：

$$\frac{d\alpha}{dT}=\frac{A}{\beta}\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)f(\alpha) \quad (3)$$

式中：A 为频率因子，min^{-1}；E 为活化能，kJ/mol；R 为摩尔气体常数，取为 8.314 J/(K·mol)。

由上式移项取对数即可得 Friedman 方程：

$$\ln\left[\frac{\beta d\alpha}{dT}\right]=\ln[Af(\alpha)]-\frac{E}{RT} \quad (4)$$

$$\alpha=\frac{m_0-m}{m_0-m_\infty} \quad (5)$$

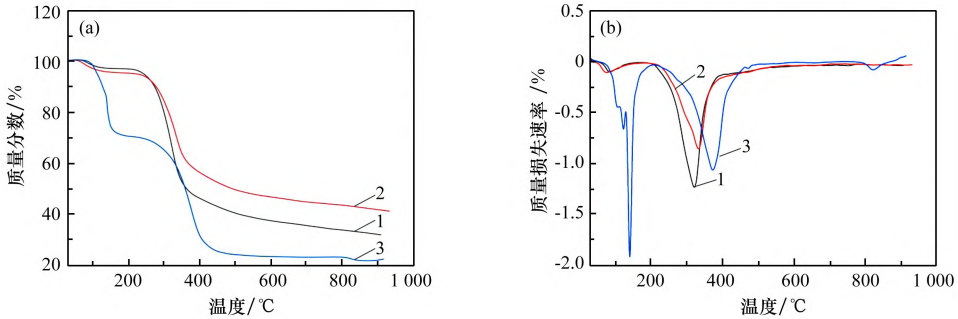
式中：m_0 为样品的初始质量，g；m 为热解某一时刻的质量，g；m_∞为热解反应结束的质量，g。

取转化率 α 为某些特定值，找到不同升温速率(β)下所对应的 $d\alpha/dT$ 和温度 $1/T$，利用 $\ln(\beta d\alpha/dT)$对 $1/T$ 作图，采用线性拟合直线，然后根据拟合直线的斜率(E/R)，即可求出活化能。

2　结果与讨论

2.1　生物质和轧钢油泥的热重分析

玉米秸秆、稻草秸秆两种生物质和轧钢油泥在升温速率 $\beta=20$ ℃/min 时的 TG 和 DTG 曲线如图 1 所示。由图 1 可知，轧钢油泥单独热解失重过程可分为 3 个基本反应阶段。第一阶段轧钢油泥的温度小于 175 ℃，其主要是水分析出；第二阶段(175 ~ 464 ℃)为主要失重阶段，失重率为 46.4%，主要为油分的分解，DTG 曲线上最大失重峰所对应的温度为 374 ℃；第三阶段(680 ~ 916 ℃)主要是轧钢油泥中的铁氧化物与热解生成的半焦产物发生还原反应。不同种类的生物质在惰性气氛下热解的 TG 和 DTG 曲线大体趋势相同，温度小于 210 ℃为热解的第一阶段，生物质水分析出；在 210 ~ 521 ℃为生物质热重失重阶段，稻草秸秆的失重率为 46.25%，玉米秸秆的失重率为 57.46%，主要是半纤维素、纤维素和木质素等成分发生分解，生成大量挥发性气体[17]；温度大于 521 ℃后，主要发生木质素的深度裂解和碳化。对比分析生物质和轧钢油泥单独热解的 DTG 曲线可知，玉米秸秆和稻草秸秆主要失重阶段峰值对应的温度均低于轧钢油泥，原因是轧钢油泥中的官能团比生物质的官能团结构更加复杂。



(a) TG 曲线；(b) DTG 曲线

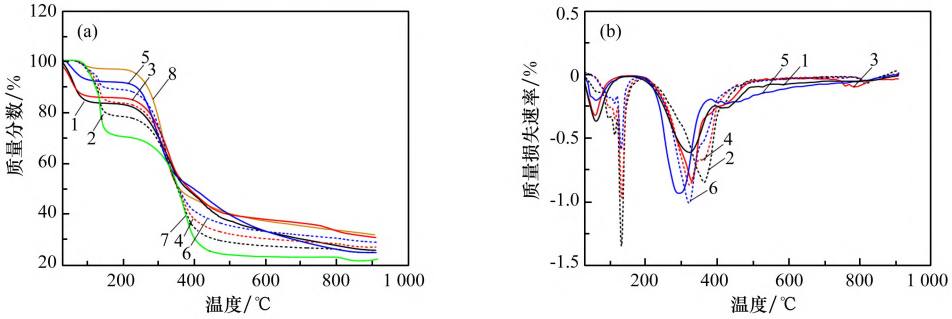
1—玉米秸秆；2—稻草秸秆；3—轧钢油泥。

图 1　$\beta=20$ ℃/min 时轧钢油泥和生物质单独热解的 TG 及 DTG 曲线

Fig. 1　TG and DTG curves of steel rolling oil sludge and biomass pyrolysis when $\beta=20$ ℃/min

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

轧钢油泥共热解的 TG/DTG 曲线和加权 TG/DTG(cal)曲线分别如图 2、3 所示。由图 2 的 TG 曲线可以看出，随着生物质质量分数的增加，共热解热重曲线有下移趋势，失重率增大。对比图 2、3 的 DTG 曲线可知，轧钢油泥与玉米秸秆共热解的失重速率均比轧钢油泥与稻草秸秆共热解的失重速率低。

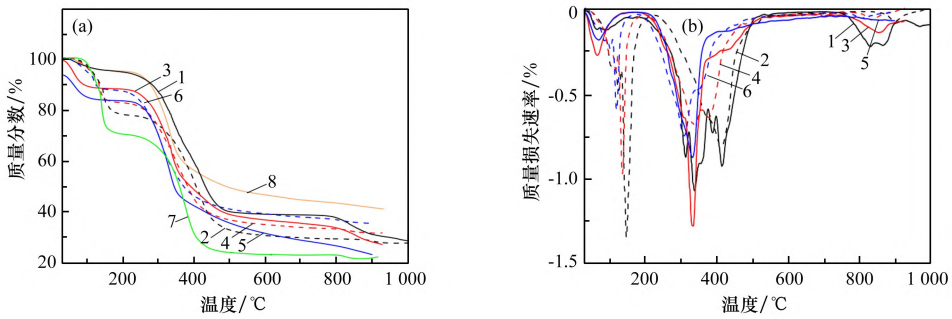


(a) TG 曲线；(b) DTG 曲线

1—玉米秸秆 30%；2—玉米秸秆 30%(cal)；3—玉米秸秆 50%；4—玉米秸秆 50%(cal)；5—玉米秸秆 70%；6—玉米秸秆 70%(cal)；7—轧钢油泥；8—玉米秸秆。

图 2 轧钢油泥和玉米秸秆混合共热解实际与加权 TG/DTG 曲线对比

Fig. 2 Comparison of actual and weighted TG/DTG curve of mixed co-pyrolysis of steel rolling oil sludge and corn stalk



(a) TG 曲线；(b) DTG 曲线

1—稻草秸秆 30%；2—稻草秸秆 30%(cal)；3—稻草秸秆 50%；4—稻草秸秆 50%(cal)；5—稻草秸秆 70%；6—稻草秸秆 70%(cal)；7—轧钢油泥；8—稻草秸秆。

图 3 轧钢油泥和稻草秸秆混合共热解实际与加权 TG/DTG 曲线对比

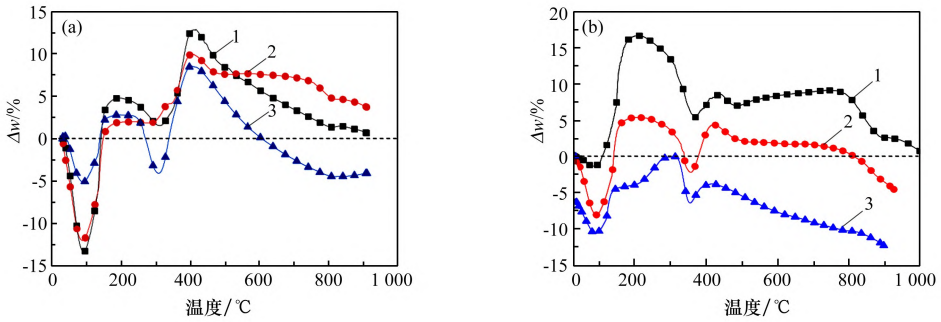
Fig. 3 Comparison of actual and weighted TG/DTG curve of mixed co-pyrolysis of steel rolling oil sludge and straw stalk

为了研究热解反应过程中轧钢油泥与两种生物质共热解过程中的协同相互作用，采用共热解试验 TG 和理论 TG 的差值(Δw)[12]来评价二者的协同作用程度。$\Delta w > 0$，两者为抑制作用；$\Delta w < 0$，两者则表现为促进作用。轧钢油泥与两种生物质(玉米秸秆、稻草秸秆)在不同混合比下的 Δw 曲线如图 4 所示。由图 4 可知：轧钢油泥与玉米秸秆共热解过程中，玉米秸秆混合比为 70% 的样品温度在 270 ~ 337 ℃和 607 ℃以上的 $\Delta w < 0$，表现为促进作用；玉米秸秆混合比为 30% 和 50% 的样品在除水分析出阶段的其他过程表现为相互抑制作用，且在温度约为 407 ℃时，抑制效果最显著，其共热解质量损失的试验值与理论值的差值达到 8.45%。轧钢油泥与稻草秸秆共热解过程中，稻草秸秆混合比为 70% 时，整个反应过程中的 Δw 均小于零，说明在此混合比时稻草秸秆和轧钢油泥的共热解相互促进。3 种混合比中，随着生物质混合比的增大，两者的共热解更易表现为相互促进作用，且稻草秸秆优于玉米秸秆。

2.2 动力学分析

采用 Friedman-Reich-Levi(Friedman)法对轧钢油泥和两种生物质单独热解时进行动力学分析，得到玉米秸秆和稻草秸秆拟合结果，如图 5 所示。根据拟合直线的斜率(E/R)即可求出反应活化能，

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

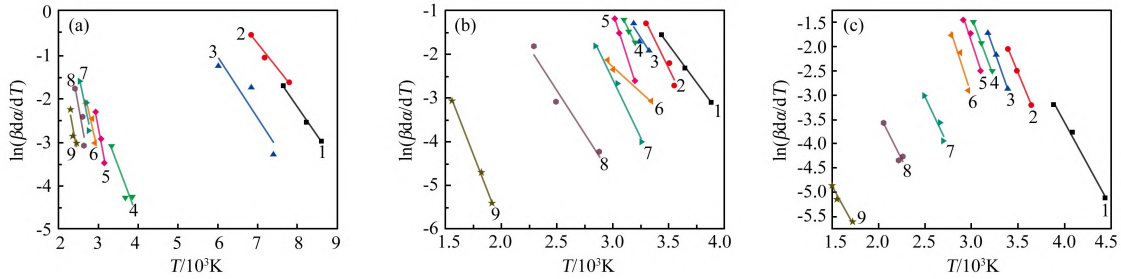


（a）玉米秸秆；（b）稻草秸秆

玉米或稻草秸秆混合比/%：1—30；2—50；3—70。

图 4　轧钢油泥与两种生物质在不同混合比下的 Δw 曲线

Fig. 4　The Δw curve of steel rolling oil sludge and two kinds of biomass under different mixed mass fraction



（a）轧钢油泥；（b）玉米秸秆；（c）稻草秸秆

α：1—0.1；2—0.2；3—0.3；4—0.4；5—0.5；6—0.6；7—0.7；8—0.8；9—0.9。

图 5　轧钢油泥和两种生物质 Friedman 法拟合结果

Fig. 5　Fitting results of steel rolling oil sludge and two kinds of biomass using Friedman method

计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知：两种生物质的活化能存在随转化率先增大后减小的趋势，且都在转化率 $\alpha = 0.6$ 时活化能最大，玉米秸秆热解、稻草秸秆热解的最大活化能分别为 82.19、48.75 kJ/mol；轧钢油泥热解活化能的变化与文献[18]中 E-α 关系相

表 2　两种生物质和轧钢油泥 Friedman 法得到的热分解反应活化能

Table 2　Activation energy of thermal decomposition reaction obtained by Friedman method of two kinds of biomass and steel rolling oil sludge

转化率	玉米秸秆		稻草秸秆		轧钢油泥	
	活化能/(kJ·mol^{-1})	R^2	活化能/(kJ·mol^{-1})	R^2	活化能/(kJ·mol^{-1})	R^2
0.1	28.66	0.999 1	28.91	0.992 8	21.06	0.996 0
0.2	41.38	0.966 8	38.11	0.999 6	29.51	0.976 0
0.3	34.22	0.873 9	45.20	0.998 2	31.68	0.844 2
0.4	43.08	0.995 3	42.55	0.999 8	50.13	0.895 6
0.5	66.46	0.999 1	47.68	0.959 8	79.95	0.949 9
0.6	82.19	0.882 1	48.75	0.928 7	51.48	0.894 3
0.7	54.24	0.987 4	33.18	0.930 3	35.76	0.879 9
0.8	44.09	0.954 9	31.31	0.917 7	42.02	0.880 5
0.9	32.85	0.999 1	27.58	0.975 8	49.69	0.817 5

注：R^2（R-squared）为决定系数，是一种衡量回归模型拟合优度的统计量，其取值范围为 0～1。R^2 越接近 1，说明回归模型对数据的拟合程度越好，反之则拟合程度较差。

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

符，即随着转化率的增加呈现先增加后减少再增加的趋势，第一次活化能的升高是由于挥发分沸点的升高，活化能的再次升高的原因可能为重质油的热解或高温段轧钢油泥中铁氧化物与残炭发生还原反应，使得反应难度加大。

玉米秸秆、稻草秸秆与轧钢油泥共热解Friedman模型热解反应活化能分别如表3、4所示。从表3、4可知，随着两种生物质混合比的增大，共热解的活化能整体上减小，这与上文分析中生物质添加量为70%比另外两种混合比更可能表现为促进作用是一致的；在混合比为70%时，轧钢油泥与稻草秸秆共热解的最大活化能为52.45 kJ/mol，轨钢油泥与玉米秸秆共热解的最大活化能为62.26 kJ/mol。

表3 玉米秸秆与轧钢油泥共热解Friedman模型热解反应活化能

Table 3 Activation energy of pyrolysis reaction of Friedman model for co-pyrolysis of corn stalk and steel rolling oil sludge

转化率	30%玉米秸秆		50%玉米秸秆		70%玉米秸秆	
	活化能/(kJ·mol^{-1})	R^2	活化能/(kJ·mol^{-1})	R^2	活化能/(kJ·mol^{-1})	R^2
0.1	16.16	0.943 4	14.07	0.979 0	13.85	0.921 2
0.2	18.13	0.927 8	16.54	0.811 2	28.09	0.883 4
0.3	36.67	0.824 7	39.56	0.883 8	31.67	0.958 1
0.4	39.81	0.954 8	47.73	0.836 2	45.85	0.960 2
0.5	60.38	0.947 8	65.23	0.997 0	47.24	0.999 8
0.6	75.63	0.990 3	76.72	0.974 2	58.74	0.955 1
0.7	82.02	0.984 3	70.34	0.968 4	62.26	0.964 6
0.8	55.17	0.930 7	60.14	0.787 8	54.47	0.944 3
0.9	45.89	0.928 4	58.14	0.953 1	51.81	0.811 3

表4 稻草秸秆与轧钢油泥共热解Friedman模型热解反应活化能

Table 4 Activation energy of pyrolysis reaction in Friedman model for co-pyrolysis of straw stalk and steel rolling oil sludge

转化率	30%稻草秸秆		50%稻草秸秆		70%稻草秸秆	
	活化能/(kJ·mol^{-1})	R^2	活化能/(kJ·mol^{-1})	R^2	活化能/(kJ·mol^{-1})	R^2
0.1	6.83	0.995 7	11.93	0.880 5	10.83	0.966 4
0.2	16.83	0.974 6	26.76	0.999 0	15.16	0.963 9
0.3	26.00	0.946 8	37.51	0.997 8	29.67	0.995 0
0.4	35.56	0.885 8	48.64	0.970 1	38.37	0.999 3
0.5	40.19	0.930 6	55.76	0.927 9	48.84	0.986 4
0.6	55.24	0.954 2	66.88	0.987 5	52.45	0.933 1
0.7	79.12	0.980 3	60.49	0.869 9	50.71	0.892 9
0.8	52.12	0.899 4	53.85	0.911 1	46.61	0.940 4
0.9	56.61	0.988 7	52..23	0.912 4	43.38	0.913 4

3 结 论

（1）轧钢油泥的热解失重过程主要分为3个基本反应阶段：温度小于175 ℃发生水分的析出；175~484 ℃主要发生油分的分解，是主要失重阶段；在680~916 ℃，轧钢油泥中的铁氧化物与热解生成的半焦产物发生还原反应。生物质的热解过程分为3个反应阶段：温度小于210 ℃发生物质水分析出；210~521 ℃主要是半纤维素、纤维素和木质素等成分发生分解；温度大于521 ℃后，主要发生木质素的深度裂解和碳化。

（2）轧钢油泥分别与玉米秸秆和稻草秸秆两种生物质共热解时，生物质混合比为70%比50%和30%更可能表现为促进作用，更有利热解反应

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

的发生，此混合比也更利于轧钢油泥和生物质的成型，便于后续的处理与运输。

（3）通过 Friedman 模型发现，玉米秸秆、稻草秸秆与轧钢油泥共热解反应的活化能存在随转化率的增加先升高后降低的趋势。在生物质添加量为 70% 时，玉米秸秆与轧钢油泥热解的最大活化能为 62.26 kJ/mol，稻草秸秆与轧钢油泥热解的最大活化能为 54.45 kJ/mol，均小于轧钢油泥单独热解时的最大活化能 79.95 kJ/mol。为使活化能的计算更加精确，可以增加升温速率的组数，以消除升温速率对活化能带来的影响。

参考文献：

[1] 王昱,邹冲,李建云,等. 高炉喷吹煤粉混加冶金油泥的燃烧性能[J]. 钢铁,2020,55(8):115 – 122.
WANG Li, ZHOU Chong, LI Jianyuan, et al. Combustion performance of blast furnace pulverized coal mixed with metallurgical sludge[J]. Iron & Steel, 2020, 55(8): 115 – 122.

[2] 刘东东. 钢铁企业含油污泥减量化与资源化处理技术研究[D]. 开封:河南大学,2014.
LIU Dongdong. A study on technology of reducing and recycling oily sludge in steel enterprises[D]. Kaifen: Henan University, 2014.

[3] QIN L, HAN J, XIANG H, et al. Recovery of energy and iron from oily sludge pyrolysis in a fluidized bed reactor[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 154: 177 – 182.

[4] 侯洪宇,于淑娟,耿继双. 一种利用废酸泥生产烧结矿的方法:2013103982854[P]. 2013 – 09 – 05.
HOU Hongyu, YU Shujuan, Geng Jishuang. Production method of sinter ore utilizing waste sludge bearing HCl: 2013103982854[P]. 2013 – 09 – 05.

[5] 孟照瑜,袁新,赵金刚,等. “清洗 – 离心 – 热解法”处理油泥砂试验研究[J]. 山东化工,2019,48(22):134 – 136.
MENG Zhaoyu, YUAN Xin, ZHAO Jingang, et al. Experimental study on oil sludge sand treatment by cleaning - centrifugal-pyrolysis[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(22): 134 – 136.

[6] 安静,周龙涛,贾悦,等. 新疆油田含油污泥破乳 – 离心脱水工艺优化[J]. 环境工程学报,2021,15(8):2721 – 2729.
AN Jing, ZHOU Longtao, JIA Yue, et al. Process optimization of demulsification and centrifugal dewatering of oily sludge in Xinjiang oilfield[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(8): 2721 – 2729.

[7] 朱雨晴,佟乐,刘蔷薇,等. 生物法处理含油污泥研究进展[J]. 辽宁化工,2020,49(4):393 – 395.
ZHU Yuqing, TONG Le, LIU Qiangwei, et al. Research progress on biological treatment of oily sludge[J]. Liaoning Chemical Industry, 2020, 49(4): 393 – 395.

[8] 徐鹏飞,杨大正,耿继双,等. 热轧油泥在线气浮除油中试研究[J]. 鞍钢技术,2019(1):36 – 40.
XU Pengfei, YANG Dazheng, GENG Jishuang, et al. Study on pilot experiments for on-line removing oil from oil sludge resulted in hot rolling by gas flotation[J]. Angang Technology, 2019(1): 36 – 40.

[9] 潘志娟. 基于微波破乳和热解的含油污泥资源化处理研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
PAN Zhijuan. Study on resource treatment of oil sluge based on microwave demalsification and pyrolysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

[10] JIN Y, ZHENG X, CHU X, et al. Oil recovery from oil sludge through combined ultrasound and thermochemical cleaning treatment[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(27): 9213 – 9217.

[11] ZHOU X, JIA H, QU C, et al. Low-temperature co-pyrolysis behaviours and kinetics of oily sludge: effect of agricultural biomass[J]. Environmental Technology Letters, 2017, 38(3): 361 – 369.

[12] 王江林,林顺洪,杨宇,等. 轧钢油泥与聚丙烯共热解特性及产物分布[J]. 石油学报(石油加工),2022,38(3):644 – 652.
WANG Jianglin, LIN Shunhong, YANG Yu, et al. Co-pyrolysis characteristics and product distribution of mixed steel rolling oil sludge and polypropylene[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2022, 38(3): 644 – 652.

[13] 巩志强,杜爱勋,王振波,等. 油泥与微藻生物质掺混共热解动力学研究[J]. 石油学报(石油加工),2019,35(2):312 – 319.
GONG Zhiqiang, DU Aixun, WANG Zhenbo, et al. Reaction kinetics of sludge and microalgae co-pyrolysis[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section): 2019, 35(2): 312 – 319.

[14] 朱嘉卉. 含油污泥的理化特性研究与分析[D]. 杭

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

州:浙江大学,2014.
ZHU Jiahui. Research and analysis on physical and chemical properties of oily sludge[D]. Hanzhou: Zhejiang University,2014.

[15] 莫榴,林顺洪,李玉,等. 含油污泥与玉米秸秆共热解协同特性[J]. 环境工程学报,2018,12(4):1268-1276.
MO Liu,LIN Shunhong,LI Yu,et al. Synergy effect during co-pyrolysis of oily sludge and corn stalk[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(4): 1268-1276.

[16] LIU J,JIANG X,ZHOU L,et al. Pyrolysis treatment of oil sludge and model-free kinetics analysis[J]. Journal of hazardous materials,2009,161(2-3):1208-1215.

[17] 姚丛雪,王鑫,周一帆,等. 水稻和玉米的热氧化分解特性及几种动力学方法结果的比较[J]. 火灾科学,2020,29(2):98-105.
YAO Congxue, WANG Xin, ZHOU Yifan, et al. Compasion of thermo oxidative decomposition characteristics of rice and corn using several dynamic methods[J]. Fire Safety Science,2020,29(2):98-105.

[18] 鲁文涛,何品晶,邵立明,等. 轧钢含油污泥的热解与动力学分析[J]. 中国环境科学,2017,37(3):1024-1030.
LU Wentao,HE Pinjing,SHAO Liming,et al. Pyrolysis of rolling oil sludge and its kinetic analysis[J]. China Environmental Science,2017,37(3):1024-1030.

(上接第118页)

[14] 戚义龙,余正伟,吴宏亮,等. 烧结铁矿粉高温特性研究及过程耦合配矿评价模型的应用[J]. 烧结球团,2021,46(3):9-15.
QI Yilong,YU Zhengwei,WU Hongliang,et al. Research on high temperature properties of sintering iron ore powder and application of assessment model in ore blending based on process coupling[J]. Sintering and pelletizing, 2021,46(3):9-15.

[15] 龙红明,左俊,王平,等. 厚料层烧结高度方向均质性研究[J]. 烧结球团,2013,38(4):1-6.
LONG Hongmin,ZUO Jun,WANG Ping,et al. Study on homogeneity of thick layer sintering process in height direction[J]. Sintering and pelletizing, 2013, 38(4): 1-6.

[16] 周淑媛,康兴东,刘贵峰,等. 高铁低硅烧结技术的研究[J]. 烧结球团,2010,35(3):20-24.
ZHOU Shuyuan, KANG Xingdong, LIU Guifeng, et al. Study on homogeneity of thick layer sintering process in height direction[J]. Sintering and pelletizing, 2010, 35(3):20-24.

[17] 张庆军,李远亮,莫文玲,等. 不同MgO含量低硅烧结矿孔隙分布的多重分形研究[J]. 烧结球团,2012,37(5):6-11.
ZHANG Qingjun, LI Yuanliang, MO Wenling, et al. Multi-fractal research on pore distribution of low silica sinter with different MgO content[J]. Sintering and pelletizing,2012,37(5):6-11.

[18] 周江虹,章裕东,黄世来,等. 烧结过程风量合理分布实验研究[J]. 烧结球团,2021,46(1):37-42.
ZHOU Jianghong, ZHANG Yudong, HUANG Shilai, et al. Experimental study on equitable distribution of air quantity in sintering process[J]. Sintering and pelletizing,2021,46(1):37-42.

[19] 张建良,刘征建,焦克新,等. 炼铁新技术及基础理论研究进展[J]. 工程科学学报,2021,43(12):1630-1646.
ZHANG Jianliang,LIU Zhengjian,JIAO Kexin,et al. Progress of new technologies and fundamental theory about ironmaking[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(12):1630-1646.

[20] 刘代飞,曹海鹏,史先菊,等. 铁矿粉烧结过程建模与仿真研究现状[J]. 钢铁研究学报,2018,30(8):585-597.
LIU Daifei, CAO Haipeng, SHI Xianju, et al. Research status on modeling and simulation of iron ore sintering process[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 46(6):43-48.

[21] 丁晖,王宏元,徐冰,等. 双系统耦合平衡法在线计算烧结冷却机漏风率[J]. 烧结球团,2021,46(6):43-48.
DING Hui,WANG Hongyuan,XU Bin,et al. Online calculation of air leakage of sintering cooler with dual-system coupling balance method[J]. Sintering and pelletizing,2021,46(6):43-48.

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