



“碳中性”碳源秸秆炭对保护渣 熔化行为的影响

上官端艳, 许玉红, 郭志鹏, 郝子怡, 李 涛, 谭 敏, 谷少鹏*

(华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063210)

摘要: 炭质材料作为保护渣中不可或缺的原料之一, 主要发挥调控保护渣熔化行为的作用。“双碳”背景下, 现有炭质材料存在固定碳、N 和 S 含量高等导致碳、NO_x 和 SO₂ 高排放问题, 严重影响生态环境。其次存在不可再生及成本高等问题, 急需寻找一种可再生且环境友好型的炭质材料进行代替。研究提出了一种“碳中性”、可再生以及储量丰富的固体废弃物秸秆炭作为保护渣新型碳源, 研究了炭黑 C611 和秸秆炭各自的基本物理性能, 系统分析了碳的种类和含量对保护渣熔化行为的影响规律。研究结果表明: 秸秆炭的比表面积和平均粒径均大于炭黑 C611, 固定碳含量低于炭黑 C611。随着秸秆炭含量增加, 保护渣的软化温度、熔化温度和流动温度均明显升高, 其中秸秆炭对熔化温度的影响效果最为明显。随着秸秆炭含量增加, 保护渣的熔化速度降低, 当碳含量为 8% 时, 秸秆炭对保护渣熔化速度的控制效果与炭黑 C611 相同。

关键词: 秸秆炭; 炭黑 C611; 物理性能; 保护渣; 熔化行为; 连铸

中图分类号: TF77

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)01-0094-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.01.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of straw charcoal as a “Carbon Neutral” carbon source on the melting behavior of mold flux

SHANGGUAN Duanyan, XU Yuhong, GUO Zhipeng, HAO Ziyi, LI Tao, TAN Min, GU Shaopeng*

(School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: Carbonaceous materials are one of the essential components in mold flux, mainly serving to regulate its melting behavior. Under the background of the “dual carbon” strategy, conventional carbon materials exhibit high contents of fixed carbon, nitrogen, and sulfur, resulting in excessive emissions of CO₂, NO_x, and SO₂, which pose serious environmental concerns. Moreover, their non-renewability and high cost further limit their sustainable application. Therefore, it is urgent to explore the renewable and environmentally friendly alternatives. The research proposed a “carbon-neutral”, renewable and abundant solid waste, straw charcoal, as a new type of carbon source for protective slag. The respective basic physical properties of carbon black C611 and straw charcoal were investigated, and the influence of carbon types and contents on the melting behavior of mold fluxes were systematically analyzed. The results indicate that straw charcoal possesses a higher specific surface area and larger average particle size than carbon black C611, though its fixed carbon content is relatively lower. With in-

收稿日期: 2025-05-07; 修回日期: 2025-05-22; 接受日期: 2025-05-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3705200, 2022YFB370520); 河北省高等教育科学技术研究项目(QN2024193); 燕赵钢铁实验室区域创新能力提升项目(YZISL2024031); 石家庄市基础研究计划项目(241790857A)。

作者简介: 上官端艳, 2004 年出生, 女, 河南信阳人, 本科, 主要从事冶金保护渣的研究工作, E-mail: duanyanshanguan@163.com; *通信作者: 谷少鹏, 1987 年出生, 男, 河北石家庄人, 博士, 讲师, 长期从事连铸结晶器保护渣的开发与制备的研究工作, E-mail: spgu@ncst.edu.cn。

creasing straw charcoal content, the softening temperature, melting temperature, and flowing temperature of mold flux increase noticeably, with the melting temperature being the most affected. As the carbon content of straw increases, the melting rate of the mold flux decreases. When the carbon content is 8%, the control effect of straw charcoal on the melting rate of the protective residue is the same as that of carbon black C611.

Key words: straw charcoal; carbon black C611; physical properties; mold flux; melting behavior; continuous casting

0 引言

连铸保护渣是由基料、熔剂及炭质材料等组成的硅酸盐材料^[1],其核心作用包括减少钢液热损失的绝热保温、隔绝空气防止二次氧化、润滑铸坯减少粘结、改善结晶器传热及吸收非金属夹杂物等^[2-4]。其中,炭质材料因不润湿特性及高熔点可抑制熔滴聚集,并作为“骨架”调控渣层结构分布,是控制保护渣熔化行为的关键组元^[5-7]。

炭质材料的种类、含量及粒度直接影响保护渣熔化行为^[8-9]。已有研究表明:炭质材料种类通过改变熔融结构影响熔化速度^[10-11];碳含量过高会延长燃烧反应时间,导致熔化速率降低,甚至形成富碳层,过低则加速熔化消耗,引发铸坯质量问题^[12];碳含量增加会减小熔化结构中烧结层厚度^[13];而粒度细化可更有效抑制熔化速率,细碳粒(如 48 μm(300 目)、25 μm(500 目)超细石墨)的控速效果优于粗碳粒^[14]。因此,合理选择炭质材料的种类、粒径及加入量,是优化保护渣性能、提升连铸稳定性的核心环节。

传统炭质材料虽能有效调控保护渣熔化行为,但其高固定碳、S 及 N 含量会导致使用过程中释放 CO_x、SO_x、NO_x 等污染物,危害生态环境与人体健康,制约“双碳”战略推进;同时,作为一次性化石能源,其资源枯竭问题亦日益凸显^[15]。开发可再生、环境友好型炭质材料成为必然趋势。生物质能作为全球第四大能源(仅次于煤炭、石油、天然气),具有来源广泛、储量巨大、S/N 含量低及疏松多孔、比表面积大等特性^[15]。我国秸秆资源丰富,其炭化产物(秸秆炭)作为可再生“碳中性”材料,已在铁矿石烧结、高炉炼铁等领域展现替代潜力,可部分替代焦粉、煤粉并显著降低碳排放^[16-18]。

尽管现有研究明确了炭质材料对保护渣熔化性能的调控规律,但传统炭质材料的环境与资源问题尚未解决。因此,笔者提出以“碳中性”秸秆炭作为保护渣新型配碳材料,通过系统表征秸秆炭与传统炭质材料(如炭黑 C611)的基本物性,并研究其对保护渣熔化性能的影响,旨在为“碳中性”“环保型”保护渣理论发展提供支撑。

1 试验方案与方法

1.1 设计保护渣组分

试验以 CaO-SiO₂-Al₂O₃-Na₂O-CaF₂-MgO 为基础渣系,采用化学纯试剂配制而成,其中 Na₂O 以 Na₂CO₃ 代替,基础渣系中各化学组分占比见表 1。8 组保护渣样品各组分含量见表 2。序号 A 为基础保护渣,不含任何炭质材料,作为对照组。序号 S4~S10 代表配入不同秸秆炭含量的保护渣样品,C4~C10 为配入不同炭黑 C611 含量的保护渣样品。

表 1 保护渣基础渣系的化学组成

Table 1 The chemical composition of the basic slag system of mold flux %

NO.	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaF ₂	MgO
A	30.5	30.5	5.0	12.0	20.0	2.0

表 2 保护渣配碳比例

Table 2 Carbon ratio in mold flux %

NO.	A	Straw charcoal	Carbon black C611
S4	96	4	0
S6	94	6	0
S8	92	8	0
S10	90	10	0
C4	96	0	4
C6	94	0	6
C8	92	0	8
C10	90	0	10

1.2 炭质材料基本性能表征方法

炭质材料的种类、粒径以及含量对保护渣熔化性能有直接影响^[19],因此,研究系统分析了秸秆炭和炭黑 C611 两者在基本性能上的差异。

采用元素分析仪(SDCHN636)检测炭质材料中的 C、H、O 和 N 元素含量。试验前需要对设备的气密性进行检测,检测无误后,将设备预热至 950 ℃,然后对样品进行检测。采用工业分析仪(SDTGA1200)检测炭质材料的水分、灰分和挥发分等。

采用激光粒度仪(Mastersizer 3000)检测炭质材料的粒度,其检测范围为 0.01~3 500 μm。选择湿法测量模式,重复测量 3 次,取平均值。采用氮吸附仪(Quantachrome)检测炭质材料的比表面积。高纯氮气(99.9%)作为吸附质,液氮提供低温环境,将样

品置于 200 ℃ 真空脱气 6 h, 然后将预处理后的样品装入样品管, 置于液氮浴中, 进行比表面积检测。通过 TG-DSC 探究炭黑 C611 和秸秆炭的着火点温度, 称取 20 mg 样品置于刚玉坩埚内, 在空气气氛下以 10 ℃/min 的升温速率从 20 ℃ 升至 1 400 ℃, 试验结束后通过设备自带软件进行分析。

利用 XRD(Bruker D8 ADVANCE)对炭质材料矿相进行检测。利用 Cu-K α 辐射以 10 °/min 的扫描速度在 2 θ 为 10° ~ 90° 范围内进行测量。利用扫描电镜观察炭质材料的形貌。在试验开始前需要对炭质材料进行离子溅射镀膜, 增强其导电性。

1.3 保护渣熔化性能测试

1.3.1 熔化温度测定

试验采用熔化温度测试装置(见图 1)测定保护渣的软化温度、熔化温度和流动温度。将充分研磨后的保护渣样品压成 $\varnothing 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 圆柱试样, 将其置于石英垫片上送入管式炉内, 以 15 ℃/min 的升温

速率加热, 设备自动记录试样的高度变化以及对应的过程温度。图 2 为保护渣熔化过程示意图, 样品降到原样品高度的 75% 时, 认为样品开始软化, 此时的温度即样品的软化温度; 样品降到原样品高度的 50% 时, 认为样品开始熔化, 此时的温度即样品的熔化温度; 样品降到原样品高度的 25% 时, 认为样品开始流动, 记录此时的温度为样品的流动温度。

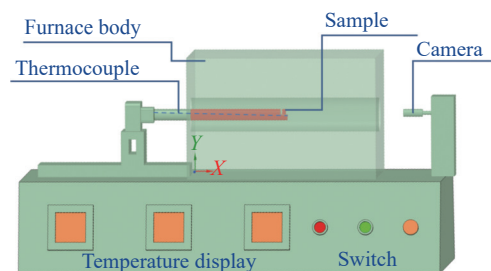
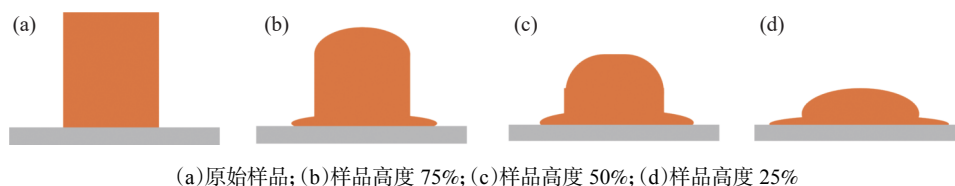


图 1 熔化温度测试装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of melting temperature testing device



(a)原始样品; (b)样品高度 75%; (c)样品高度 50%; (d)样品高度 25%

图 2 样品熔化过程示意

Fig. 2 Schematic diagram of sample melting process

1.3.2 熔化速度测定

采用全自动熔点熔速仪测试保护渣的熔化速度。样品在 1 350 ℃ 恒温状态下, 从开始熔化到样品达到流动状态, 即高度为 25% 时所需要的时间作为保护渣的熔化速度。

2 结果与讨论

2.1 秸秆炭与炭黑 C611 的物理性能表征

2.1.1 组分分析

两种炭质材料的元素分析、工业分析、热值以及物性分析结果见表 3 ~ 5。由表 3 可知, 秸秆炭中 N、S 含量相对较少, 为炭黑 C611 中相应元素含量的一半左右, 燃烧过程中产生较少的 NO $_x$ 、SO $_2$, 有利于保护环境。其 O 和 H 含量高于炭黑 C611, 表明秸秆炭比炭黑 C611 容易燃烧。结合表 4 可知, 秸秆炭的水分含量高于炭黑 C611。秸秆炭的固定碳含量和热值均低于炭黑 C611, 使得秸秆炭在使用过程中可以减少二氧化碳的排放, 也减少了富碳层

的产生。由表 5 可知, 秸秆炭比表面积和粒径远大于炭黑 C611, 这与几位学者的研究结果相一致^[20-23], 与炭黑相比, 秸秆炭可以更好地吸附物质。

2.1.2 炭质材料的燃烧特性

着火点是衡量样品着火特性的重要特征, 反映样品燃烧的起始温度。研究采用 TG-DSC 试验检测炭质材料的着火点, 将 TG 基线下降段切线与基线交点对应的温度定义为着火点温度, 见图 3 所示。从图中可以发现, 秸秆炭的着火点温度为 440 ℃, 炭黑 C611 的着火点温度为 497 ℃, 秸秆炭的着火点温度略低。从 TG 曲线发现, 秸秆炭的质量损失在着火点附近明显加快, 表明其开始剧烈燃烧。炭黑 C611 的质量损失主要集中在较高的温度区间。从 DSC 曲线发现, 秸秆炭在着火点附近有一个明显的放热峰, 说明秸秆炭在 440 ℃ 附近时燃烧反应剧烈, 炭黑 C611 则在 600 ℃ 附近时燃烧反应剧烈。综合来看, 在相同试验条件下, 秸秆炭比炭黑 C611 更容易燃烧, 燃烧起始温度低, 燃烧反应更加充分。

表 3 炭质材料元素分析
Table 3 Elemental analysis of carbon materials

Carbon materials	C	N	O	H	S
Straw charcoal	44.56	0.62	35.35	4.11	0.13
Carbon black C611	72.84	1.02	14.38	2.9	0.35

表 4 炭质材料工业分析
Table 4 Industrial analysis of carbon materials

Carbon materials	Industrial analysis/%				Calorific value/(MJ·kg ⁻¹)
	Ash content	Volatile matter content	Moisture content	Fixed carbon content	
Straw charcoal	5.13	12.25	11.87	80.51	33.79
Carbon black C611	1.41	5.48	4.17	94.47	36.40

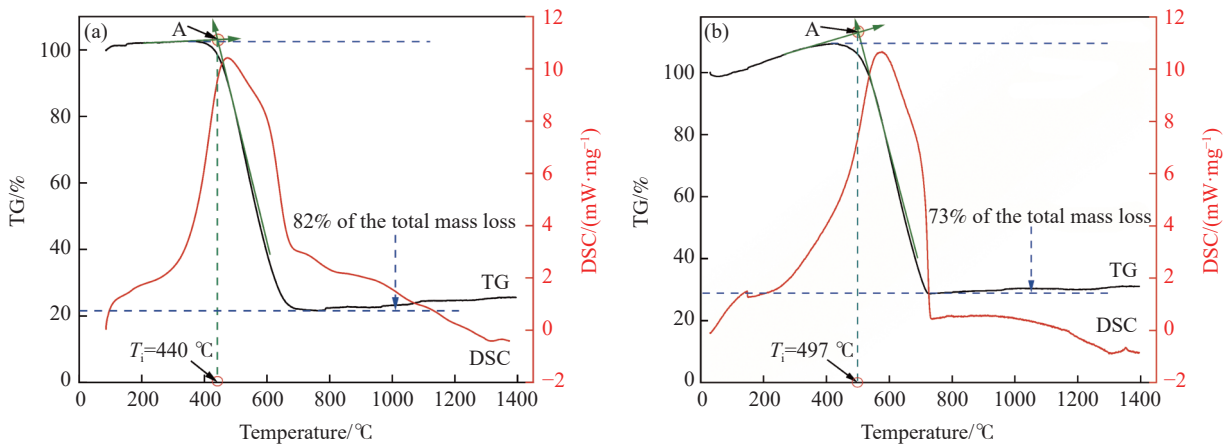
表 5 炭质材料物性分析
Table 5 Physical and chemical properties analysis of carbon materials

Carbon materials	Average particle size/ μm	Specific surface area/(m ² ·g ⁻¹)
Straw charcoal	59.34	1 267.42
Carbon black C611	8.98	116.10

2.1.3 微观结构和能谱分析

图 4(a)(b)为两种炭质材料的扫描电子显微镜 (SEM) 图, 用于分析炭质材料的形貌。从图 4(a)中可以看出秸秆炭表面粗糙, 呈长条状, 通过扫描电镜可以观察到层状骨架, 保留植物纤维的管状形貌, 具有丰富的孔隙结构, 孔壁粗糙; 从图 4(b)中可以发现炭黑

C611 呈现颗粒状, 粒径为 10 μm 左右, 表面相对光滑, 具有规则的形状, 结构紧密, 无明显孔隙结构。图 4(c)(d)为两种炭质材料的能谱图, 从图中可以看出, 秸秆炭和炭黑 C611 均以 C 和 O 元素为主, 同时含有一定的 N、Si 和 S 元素, 但元素含量在比例上存在差异。秸秆炭中氧含量相对较高, 炭黑 C611 中碳含量更高。



(a) 秸秆炭; (b) 炭黑 C611

图 3 两种炭质材料的燃烧特性

Fig. 3 Combustion characteristics of two carbon materials

2.1.4 矿相分析

采用 X 射线衍射仪 (XRD) 分析炭质材料的矿相结构, 如图 5 所示。从图 5(a)中可以看出, 秸秆炭的 XRD 图谱呈现出较为弥散的衍射峰形, 没有明显尖锐且高强度的特征峰, 呈现出无序、低结

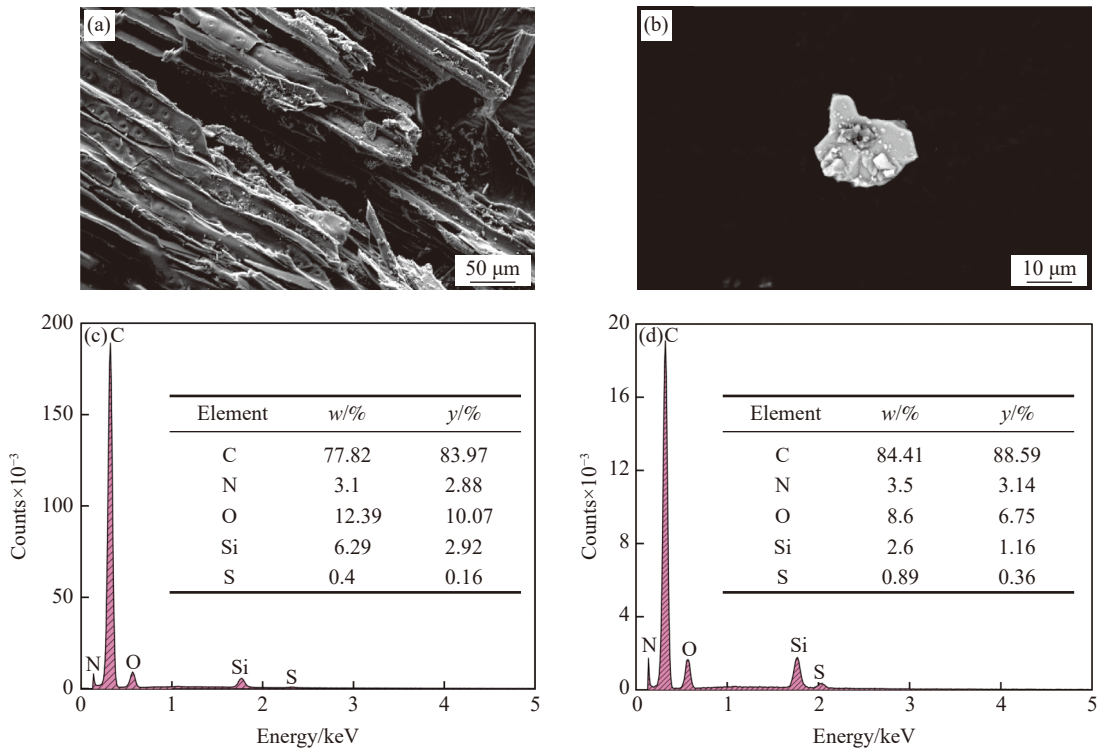
晶度的特征; 从图 5(b)中可以看出, 炭黑 C611 的 XRD 图谱中在 2θ 为 $20^\circ \sim 40^\circ$ 时存在一个较强衍射峰, 表明炭黑 C611 中存在一定程度的石墨化结构。同时, 在其他角度也有一些较弱的衍射峰出现, 反映出炭黑 C611 中可能存在多种晶相结构。与秸秆炭

相比, 炭黑 C611 的衍射峰相对尖锐且强度较高, 说明炭黑 C611 的结晶度相对较高, 晶体结构更为有序。

2.2 炭质材料对保护渣熔化温度的影响

两种保护渣样品的软化温度如图 6 所示, 由图 6 可知, 保护渣的软化温度与碳含量(4%、6%、8%、10%)呈线性正相关, 在同一配碳量下, 两种保护渣的软化温度变化较为缓慢, 秸秆炭作为可再生、碳中性和环境友好型的新型炭质材料, 与炭黑

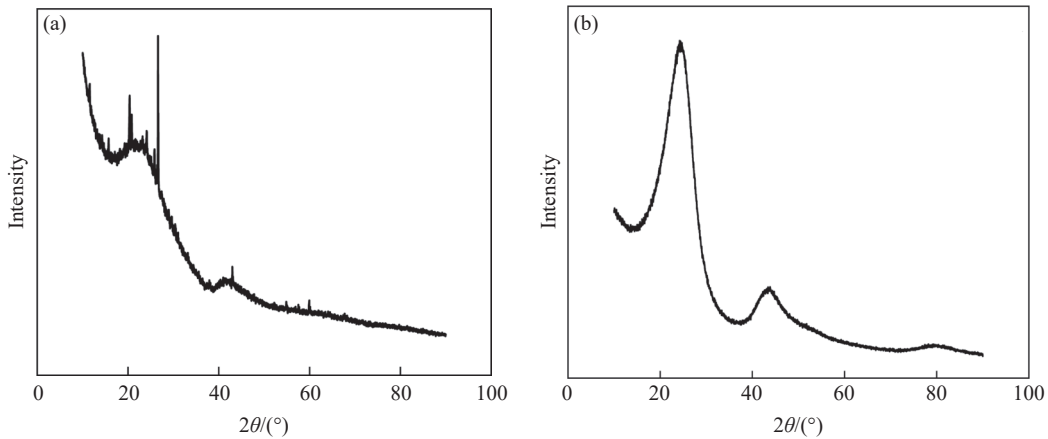
C611 对保护渣软化温度的影响效果相差不大。对比两种保护渣的熔化温度, 见图 7。可以发现, 保护渣的熔化温度随碳含量的增加(4%~10%)而升高。此外, 含秸秆炭的保护渣样品熔化温度曲线整体上高于含炭黑 C611 的保护渣样品, 说明秸秆炭的引入对保护渣熔化温度的延缓效果更强。这是因为秸秆炭的比表面积和粒径远大于炭黑 C611 的, 促使秸秆炭与保护渣的接触面积增大, 从而更加有效地阻碍保护渣颗粒的熔化聚集。



(a) 秸秆炭; (b) 炭黑 C611; (c) 秸秆炭能谱; (d) 炭黑 C611 能谱

图 4 两种炭质材料的扫描电镜和能谱

Fig. 4 SEM and EDS images of two carbonaceous materials



(a) 秸秆炭; (b) 炭黑 C611

图 5 炭质材料 XRD 分析

Fig. 5 XRD analysis of carbon materials

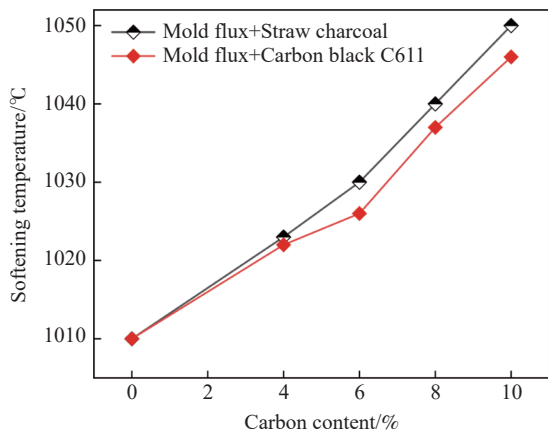


图 6 不同碳含量下保护渣的软化温度

Fig. 6 Softening temperature of mold flux with different carbon contents

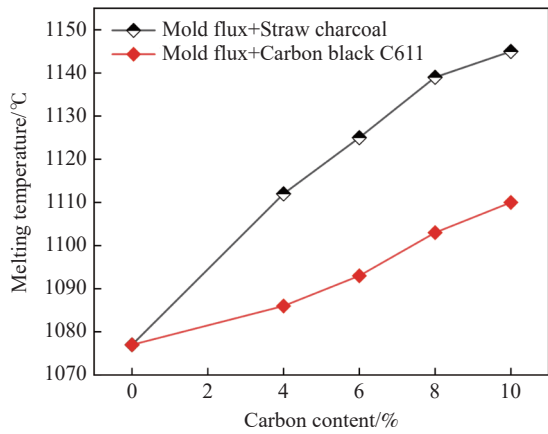


图 7 不同碳含量下保护渣的熔化温度

Fig. 7 Melting temperature of mold flux with different carbon contents

两种保护渣样品的流动温度如图 8 所示, 随着碳含量增加, 无论是配入秸秆炭还是炭黑 C611, 保护渣的流动温度均上升。在碳含量为 4%~8% 时, 含秸秆炭的保护渣样品流动温度总体较高于含炭黑 C611 的保护渣样品, 在碳含量为 10% 时, 秸秆炭对保护渣的流动温度的影响更大。

两种保护渣样品的熔化区间如图 9 所示。从图中可以发现, 碳含量对保护渣熔化区间影响显著, 且两种炭质材料的作用效果差异明显。与基础保护渣相比, 碳含量为 4% 时, 秸秆炭和炭黑 C611 均能明显缩短保护渣的熔化区间; 随着碳含量的增加, 保护渣熔化区间逐渐扩大。含炭黑 C611 的保护渣熔化区间变化较小, 呈线性变化; 而含秸秆炭的保护渣熔化区间变化较大, 呈非线性变化, 在碳含量为 4%~8% 时, 含秸秆炭的保护渣熔化区间小于基础保护渣的, 碳含量为 10% 时, 其熔化区间大于基础保护渣的。这是因为秸秆炭的粒径大于炭黑 C611 的,

随着碳含量增加, 使得保护渣的分散性变差, 对保护渣的流动性能影响较大。总体而言, 秸秆炭作为保护渣的新型碳源, 可以起到延缓保护渣熔化的效果。

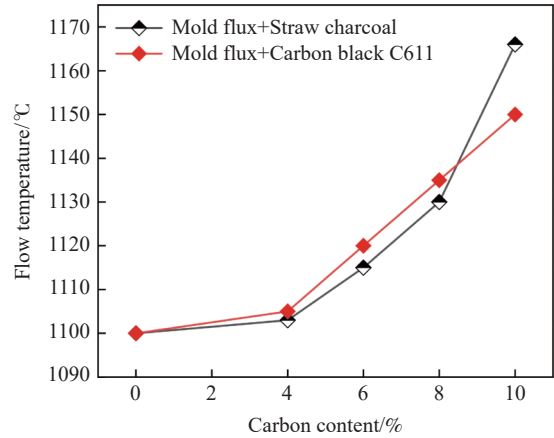


图 8 不同碳含量下保护渣的流动温度

Fig. 8 Flow temperature of mold flux with different carbon contents

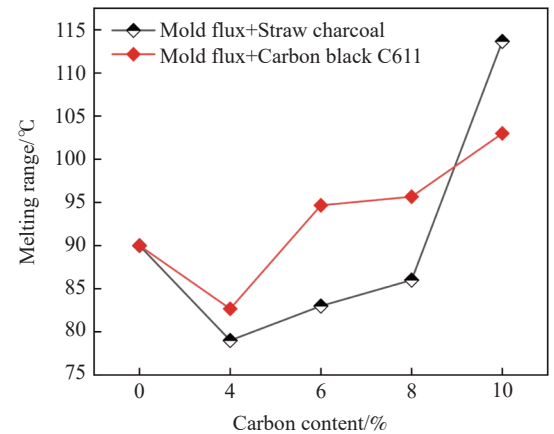


图 9 不同碳含量下保护渣的熔化区间

Fig. 9 Melting range of mold flux with different carbon contents

2.3 炭质材料对保护渣熔化速度的影响

碳含量对保护渣熔化速度的影响如图 10 所示, 由图 10 可以看出, 随着碳含量的增加, 两种炭质材料对熔化速度的控制作用显著。整体上, 炭黑 C611 对保护渣熔化速度的控制作用强于秸秆炭, 碳含量高于 6% 时, 含秸秆炭的保护渣熔化速度呈现减缓趋势, 含炭黑 C611 的保护渣熔化速度减缓后又恢复。整体而言, 含秸秆炭的保护渣和含炭黑的保护渣熔化速度没有显著差异, 主要有两个原因: 其一, 两种炭质材料特性上存在差异。秸秆炭是由生物质经过热解等过程制备得来的, 含有一定的挥发分和灰分, 碳化不完全, 一定程度上影响保护渣的熔化过程。

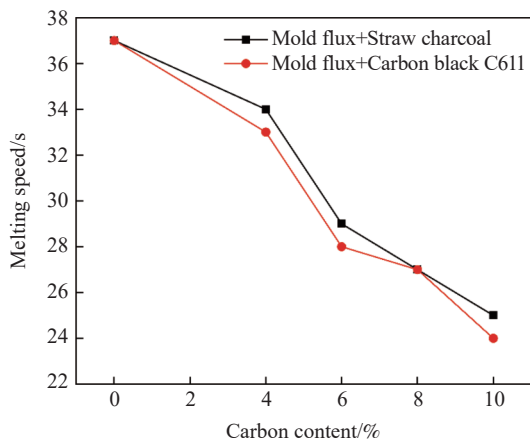


图 10 碳含量对保护渣熔化速度的影响

Fig. 10 Melting speed of mold flux with different carbon contents

炭黑主要由碳组成,挥发分和灰分含量相对较低,比较稳定;其二,两种炭质材料的热分解温度和燃烧特性不同。秸秆炭在相对较低温度时开始热分解,炭黑的热分解温度相对较高,主要在高温阶段才会发生明显变化。虽然秸秆炭的着火点较低,燃烧起始温度低,燃烧反应更加剧烈,但是这些特性在保护渣熔化过程中可能受如碳含量和保护渣的成分等多种因素的限制,导致其对熔化速度的提升作用与

炭黑相当。试验数据表明,秸秆炭作为保护渣新型碳源,具备控制保护渣熔化速度的潜力。

3 结论

1) 秸秆炭的固定碳含量(80.51%)和 C(44.56%) 均低于炭黑 C611(94.47% 和 72.84%), N(0.62%) 和 S(0.62%) 含量低于炭黑 C611(1.02% 和 0.35%); 秸秆炭的比表面积($1\ 267.42\ \text{m}^2/\text{g}$)和粒径($57.10\ \mu\text{m}$)均大于炭黑 C611($116.10\ \text{m}^2/\text{g}$ 和 $8.98\ \mu\text{m}$)。从 XRD 和扫描电镜分析发现,秸秆炭是一种复合材料,并且呈多孔结构;

2) 秸秆炭和炭黑 C611 都具有控制保护渣熔化行为的作用。在碳含量为 4%~10% 范围内,秸秆炭对保护渣的熔化温度影响最大。秸秆炭对软化温度和熔化温度的影响与炭黑 C611 的影响相差不大,对保护渣熔化区间的影响呈非线性变化;

3) 随着含碳量的增加,秸秆炭和炭黑 C611 的加入都降低了保护渣的熔化速度。在碳含量为 8% 时,两种保护渣的熔化速度一样。整体而言,秸秆炭作为保护渣的新型碳源,可以起到控制保护渣熔化行为的作用。

参考文献

- [1] NIU Z Y, CAI Z Z, ZHU M Y. Dynamic distributions of mold flux and air gap in slab continuous casting mold[J]. ISIJ International, 2019, 59(2): 283-292.
- [2] BELL E W, COWAN J C, GAST L E. Potential lubricants for continuous casting of steel: Polyol esters of partially hydrogenated soybean acids[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1972, 49(10): 552-554.
- [3] MILLS K C, FOX A B. The role of mould fluxes in continuous casting-so simple yet so complex[J]. ISIJ International, 2003, 43(10): 1479-1486.
- [4] DU F. Study on simulation of lubrication of mold flux film[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (杜方. 连铸保护渣渣膜润滑模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.)
- [5] MILLS K C, FOX A B, LI Z, *et al.* Performance and properties of mould fluxes[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2005, 32(1): 26-34.
- [6] LIU C J, ZHU Y X, JIANG M F, *et al.* Temperatures of melting, solidification and crystallization of mold powder[J]. Steelmaking, 2001, 17(1): 43-47. (刘承军, 朱英雄, 姜茂发, 等. 连铸保护渣的熔化温度、凝固温度和结晶温度研究[J]. 炼钢, 2001, 17(1): 43-47.)
- [7] BENAVIDEZ E, SANTINI L, BRANDALEZE E. Decomposition kinetic of carbonaceous materials used in a mold flux design[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2010, 103(2): 485-493.
- [8] MILLS K C, DÄCKER C Å. The casting powders book[M]. Springer Nature, Cham 2017: 116.
- [9] YAN W, YANG Y, CHEN W, *et al.* Design of mould fluxes for continuous casting of special steels[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2015, 54, 467-476.
- [10] WANG H, TANG P, WEN G H, *et al.* Influence of carbon material on melting rate and melting structure of mold fluxes[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 22(8): 17-21.

- (王欢, 唐萍, 文光华, 等. 碳质材料对结晶器保护渣熔融特性的影响[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(8): 17-21.)
- [11] WEN Y L. Experimental study on sintering properties and melting speed of continuous casting mould fluxes[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
(温亚磊. 连铸保护渣烧结性能和熔化速度的实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.)
- [12] XIE B, GAN Y N, WU J F. Amount and schedule of carbon addition in CC mold fluxes[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1990, 2(1): 5-12.
(谢兵, 甘永年, 吴居福. 连铸结晶器保护渣配炭量及配炭方式的研究[J]. 钢铁研究学报, 1990, 2(1): 5-12.)
- [13] AI G Q. Effect of carbonaceous materials on melting performance of continuous casting protective slag[J]. Gansu Metallurgy, 2000(3): 13-17.
(艾国强. 炭质材料对连铸保护渣熔化性能的影响[J]. 甘肃冶金, 2000(3): 13-17.)
- [14] LIU Y Q. Study on melting and rheological properties of fluoride-free mold fluxes[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
(刘永庆. 连铸无氟结晶器保护渣的熔融及流变特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.)
- [15] KAWAMOTO M, NAKAJIMA K, KANAZAWA T, *et al.* Design principles of mold powder for high speed continuous casting[J]. Tetsu-to-hagané, 1994, 80(3): 219-224.
- [16] JI Z Y. Research on preparing biomass fuel for iron ore sintering with application of straw[D]. Changsha: Central South University, 2013.
(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.)
- [17] WANG L. Preparation and characterization of stalk char used in the blast furnace for injection[D]. Changsha: Central South University, 2013.
(王林. 高炉喷吹用的秸秆炭制备及表征[D]. 长沙: 中南大学, 2013.)
- [18] YANG M R, PENG Q, CHANG Y L, *et al.* Research progress of carbon emission reduction technology with biochar replacing pulverized coal/coke for blast furnace ironmaking[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(1): 490-500.
(杨梦茹, 彭琴, 常玉龙, 等. 生物炭替代煤粉/焦炭高炉炼铁碳减排技术研究进展[J]. 化工进展, 2024, 43(1): 490-500.)
- [19] BENAVIDEZ E, SANTINI L, MARTÍN A, *et al.* Master decomposition curve of carbonaceous materials used in casting powders[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 133: 695-701.
- [20] YOU J G, ZHANG G D, LIU H X, *et al.* Study on melting speed of continuous casting mold powder[J]. Journal of Anshan University of Science and Technology, 2006(3): 231-234.
(游杰刚, 张国栋, 刘海啸, 等. 含碳材料对连铸保护渣熔化速度影响的研究[J]. 鞍山科技大学学报, 2006(3): 231-234.)
- [21] ZHANG S D, WANG Q, LU Y J, *et al.* Effects of carbonaceous materials on the sintering property of mould fluxes[C]// Proceedings of the 2012 National Steelmaking-Continuous Casting Production Technology Conference (Part II), China Metallurgical Society College of Materials Science and Engineering, Chongqing Key Laboratory of Metallurgy, 2012: 73-78.
(张少达, 王谦, 鲁永剑, 等. 炭质材料对连铸保护渣烧结性能的影响[C]// 中国金属学会. 2012 年全国炼钢—连铸生产技术会论文集(下). 重庆大学材料科学与工程学院; 重庆市冶金重点实验室, 2012: 73-78.)
- [22] HAN F N, YU L, WEN G H, *et al.* Comprehensive understanding of the role of carbon black in the sintering and melting behavior of mold flux[J]. ISIJ International, 62(8): 1657-1665.
- [23] DUAN D F. Effect of carbon materials on sintering property of mould flux[J]. Naihao Cailiao, 2004(5): 339-342.
(段大福. 炭质材料对连铸保护渣烧结性能的影响[J]. 耐火材料, 2004(5): 339-342.)