宝钢湛江烧结协同处置废脱硫剂的研究与应用

赵利明，匡朝辉，李 明
（宝钢湛江钢铁有限公司，广东 湛江 524000）

摘要：为解决湛江钢铁煤气精制单元产出的废脱硫剂返烧结资源化利用问题，通过化学成分、XRD、热重分析等研究废脱硫剂的各项理化性能，并进行相关烧结杯试验及工业生产实践，研究废脱硫剂对烧结矿产、质量及烟气排放指标的影响。结果表明：废脱硫剂中的 S 主要以单质形式存在，Fe 以硫化铁、氧化铁、硫酸铁三种形式均匀存在；废脱硫剂在低于 135 ℃时较为稳定，高于该温度会相继发生结晶水脱除和单质 S 氧化反应；废脱硫剂与烧结原料进行预混后以 0.01%~0.10% 配入混匀矿进行生产，烧结矿的产、质量和烧结烟气排放均可以达标，能够实现废脱硫剂全部回收利用。

关键词：烧结；废脱硫剂；烟气排放；资源化利用
中图分类号：X757；TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-8764(2022)02-0101-09
doi：10.13403/j.sjqt.2022.02.031

Research and application of co-processing of waste desulfurizer in Baosteel Zhanjiang sintering

ZHAO Liming, KUANG Zhaohui, LI Ming
(*Baosteel Zhanjiang Iron and Steel Co., Ltd., Zhanjiang* 524000, *Guangdong*, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of resource utilization of waste desulfurizer returned to sintering from gas refining unit of Zhanjiang Iron and Steel, the various physical and chemical properties of waste desulfurizer are studied by chemical composition, XRD and thermogravimetric analysis, and relevant sintering pot tests and industrial production practices are conducted to study the effects of waste desulfurizer on quantity and quality of sintering ore and flue gas emission indices. The results show that the S in the waste desulfurizer mainly exists in the form of monomers, and the Fe exists uniformly in the form of iron sulfide, iron oxide and iron sulfate; the waste desulfurizer is more stable below 135 ℃, and above that temperature, crystalline water removal and simple substance S oxidation reaction will occur successively; the waste desulfurizer is premixed with the sintering raw materials and mixed into the blended ore at 0.01%~0.10% for production, and the quantity and quality of sinter and flue gas emission can be up-to-standard, and all the waste desulfurizer can be recycled.

Key words: sintering; waste desulfurizer; flue gas emission; resource utilization

钢铁冶炼过程产出的焦炉、高炉煤气等可燃性气体中往往含有大量的 H_2S，其在利用前需要进行脱硫处理[1-2]。目前，钢铁厂大多采用脱硫剂对煤气进行处理，利用脱硫剂中的 Fe_2O_3 与煤气中的 H_2S 发生化学反应，将煤气中的 H_2S 转变为 S 或 FeS、Fe_2S_3，同时吸附煤气中的部分焦油和萘等有机物，从而达到将煤气进行脱硫、精制的目的[3-4]。但是，煤气精制产生的废脱硫剂难以处理，正逐渐成为一种新的固体废弃物和环境污染源[5]。

湛江钢铁炼铁厂煤气精制单元采用干法对煤气进行脱硫处理，每年产生约 4 000 t 废脱硫剂。通常采取填埋法来处理废脱硫剂，但限于实际条件该方法无法实施，而返脱硫剂厂家处

收稿日期：2021-08-11；**修回日期**：2021-10-14
作者简介：赵利明(1982—)，男，高级工程师，从事烧结生产和技术方面的管理工作。

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

理成本为 8 000 ~ 10 000 元/吨。国内其他钢铁厂已有烧结协同处置先例：通过烧结使废脱硫剂中的 Fe、Ca 等元素进入烧结矿，S 元素以 SO_2 的形式进入烧结烟气，从而实现废脱硫剂烧结协同处置[3]。宝钢湛江钢铁烧结单元现已采用行业中较先进的活性炭烟气净化工艺，对 SO_2 的处理能力较强，具有将废脱硫剂进行烧结协同处置的能力[6-7]。但是，宝钢湛江的废脱硫剂性质与其他钢铁厂并不相同，配入烧结对烧结矿的产、质量指标和烟气污染物排放的影响也有差别。此外，由于废脱硫剂中 FeS 在空气中(温度≥40 ℃)极易自燃，这对脱硫剂的运输、贮存条件等有特别要求[8]。

基于上述情况，本文对宝钢湛江产出的废脱硫剂的基础特性进行深入研究，并在实验室和工业化试验的基础上对该废脱硫剂进行烧结协同处置研究与实践应用，以期可降低废脱硫剂的排放量和处置成本，并为钢铁行业内煤精废脱硫剂的处置提供参考。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

废脱硫剂的化学成分、粒度组成分别如表 1、2 所示。由表 1 可知：废脱硫剂中 CaO 和 TFe 质量分数分别为 25.90% 和 9.10%，还含有 5.89% 的 C，配入烧结原料可替代部分钙质熔剂和固体燃料，具有较大的利用价值；废脱硫剂中 S 的质量分数达到 32.29%，烧损高达 35.66%，其配入烧结后将对烧结过程、烧结矿产量和质量以及烧结烟气污染物排放产生显著影响。由表 2 可知：废脱硫剂的粒度均在 10 mm 以下，平均粒度为 6.05 mm，其中 5 ~ 8 mm 粒级占比为 88.17%，粒度偏粗，可能会对烧结成矿造成不利影响。

表 1 废脱硫剂的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical composition and burning loss of waste desulfurizer %

TFe	FeO	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	C	S	H_2O	烧损
9.10	1.80	25.90	0.90	1.00	0.30	5.89	32.29	12.83	35.66

表 2 废脱硫剂的粒度组成和平均粒度

Table 2 Size distribution and mean size of waste desulfurizer

粒度组成(质量分数)/%								平均粒度/mm
+10 mm	8 ~ 10 mm	5 ~ 8 mm	3 ~ 5 mm	2 ~ 3 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	-0.5 mm	
0	4.05	87.74	4.73	1.09	1.06	0.41	0.92	6.05

废脱硫剂的外观和内部剖面形貌如图 1 所示。由图 1 可知，自然状态下废脱硫剂为深蓝黑色圆柱体，切面边缘颜色与外部一致，而内部呈现暗黄色，这可能与废脱硫剂中硫的分布有关。

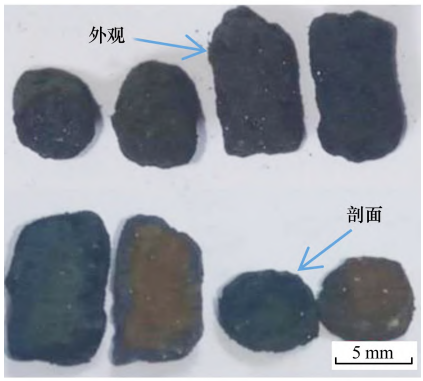


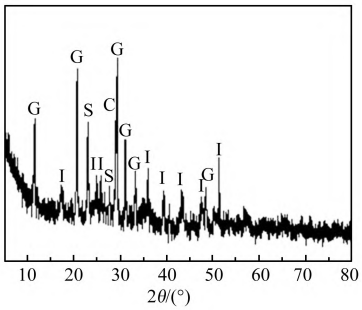
图 1 废脱硫剂的外观和剖面形貌

Fig. 1 Appearance and profile of waste desulfurizer

废脱硫剂的矿物组成和元素赋存状态通过 X 射线衍射(XRD)结合化学分析法进行分析，XRD 图谱如图 2 所示。由图 2 可知，废脱硫剂主要由硫酸钙、硫化铁、碳酸钙和 S 单质等构成。此外，分析表明，废脱硫剂中的 S 主要以元素硫、硫化物与硫酸盐等形式存在，Fe 以硫化铁、氧化铁、硫酸铁三种形式存在。废脱硫剂中元素 S 占比为 77.18%，硫酸盐占比为 15.73%，硫化物占比仅为 7.09%。而废脱硫剂中 Fe 在氧化物、硫化物及硫酸盐中比较均匀分布，基本上各占三分之一左右。因此，废脱硫

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

剂中的 S 比较容易脱除，但由于废脱硫剂中含有少量 FeS，需注意废脱硫剂在运输、贮存过程发生的发热甚至自燃现象。



G—$CaSO_4$；I—FeS_2；C—$CaCO_3$；S—S_2。

图 2　废脱硫剂 XRD 图谱

Fig. 2　XRD spectrum of waste desulfurizer

1.2　试验方法

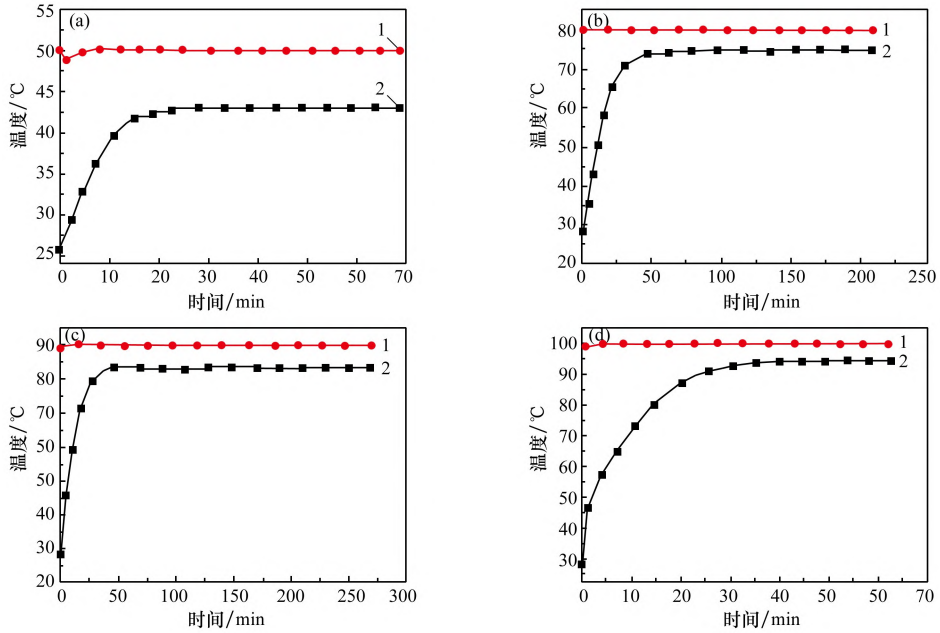
为考查在堆积时因废脱硫剂氧化对运输、贮存和烧结等过程的影响，本文对废脱硫剂的氧化及热解特性，包括自热现象及热分解行为进行研究。采用水浴加热的方式探究温度、湿度对废脱硫剂氧化的影响，具体步骤：① 将废脱硫剂样品在 80 ℃下真空干燥至其质量不再变化；② 采用雾化喷水的方式向干燥后的废脱硫剂中分别添加一定量的水；③ 将装好料的烧杯（每组取 200 g）密封防止水分蒸发，在其中央处留一小孔用于监测温度，然后将烧杯放入恒温水浴锅内，并插入温度计监测升温过程中废脱硫剂的温度变化，判断有无明显氧化放热现象。

采用热重分析仪（德国耐驰，STA 449F3）研究废脱硫剂的热解特性，在空气气氛下升温速率分别为 5、10、15、20 ℃/min，测温范围为室温 ~700 ℃。

2　废脱硫剂的基础特性

2.1　温度和水分对氧化自热的影响

自然水分质量分数（12.83%）的废脱硫剂在不同环境温度下料堆温度变化如图 3 所示。由图 3 可知，废脱硫剂分别在 50、80、90、100 ℃下堆存，短时间内料堆温度随环境温度迅速上升，在 40 min 内料堆温度基本上升到最高点，料堆的最终温度与环境温度差距约为 5 ~ 10 ℃；在试验温度和时间范围内，废脱硫剂料堆均未观察到明显的氧化自热现象。试验结果表明，自然水分质量分数的废脱硫剂料堆产生自燃的可能性较小。



温度/℃：（a）50；（b）80；（c）90；（d）100

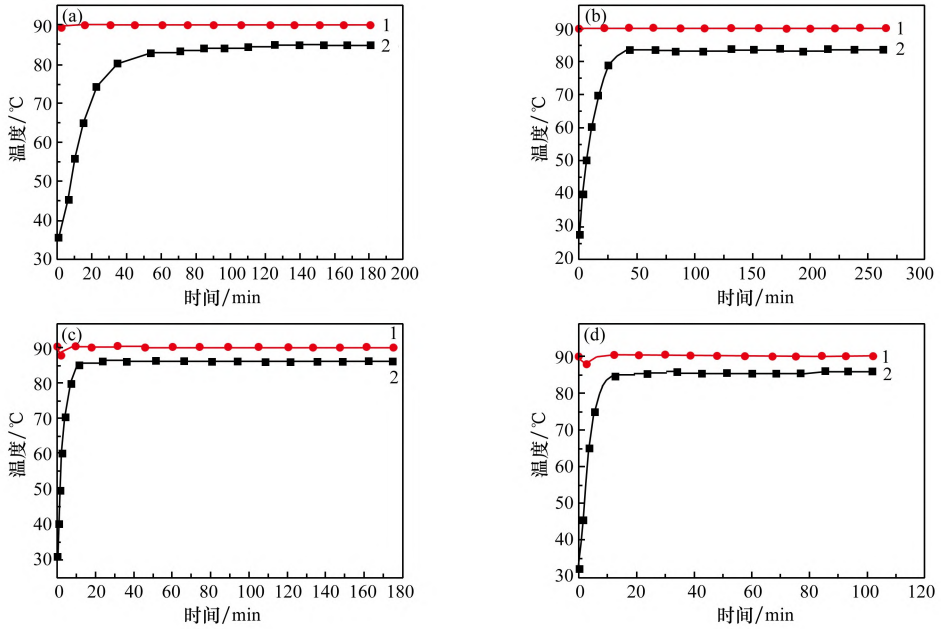
1—水浴锅温度；2—料堆温度。

图 3　废脱硫剂在不同环境温度下的被动升温曲线

Fig. 3　Passive heating curve of waste desulfurizer at different ambient temperatures

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

不同水分质量分数(0%~40%)的废脱硫剂在固定环境温度(90 ℃)下的料堆温度变化如图4所示。由图4可知，不同水分质量分数的废脱硫剂在90 ℃下堆存，料堆温度逐渐上升至85 ℃左右，且废脱硫剂含水量越高，料堆的升温速度越快。这是由于水具有更快的传热速度，因而水分越高的料堆的升温速度越快[9]。此外，在试验温度和时间范围内，废脱硫剂料堆的温度均未观察到明显的氧化自热现象。



含水量/%：(a) 0；(b) 12.8；(c) 30；(d) 40

1—水浴锅温度；2—料堆温度。

图4 不同含水量废脱硫剂的被动升温曲线

Fig. 4 Passive heating curve of waste desulfurizer with different water content

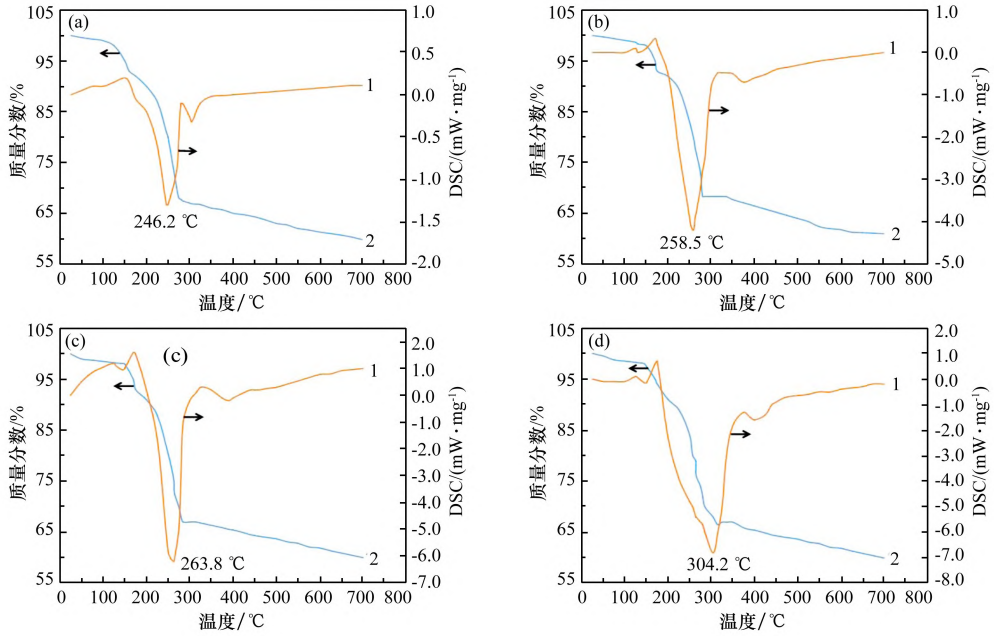
上述研究表明，在对废脱硫剂进行运输和贮存时，废脱硫剂短时间内并不会产生明显的氧化自热现象，料堆不会急剧升温产生自燃。但在试验过程中也可能存在废脱硫剂氧化自热与受热升温过程重叠导致氧化自热现象无法分辨的可能。实际中由于蓄热或者外来火源的作用，对于废脱硫剂的贮存应特别注意，并随时监测料堆的内部温度。

2.2 废脱硫剂的热解特性

配入烧结后，废脱硫剂在升温过程中发生分解、氧化等行为，其和常规烧结原料中S元素转化和迁移对烧结矿产、质量和烧结烟气中SO_2质量浓度有重要影响[10-11]。在空气气氛下，废脱硫剂以不同的加热速率由室温加热到700 ℃，样品质量与放热速率随温度的变化关系如图5所示。

由图5可知，在不同的加热速率下，废脱硫剂的加热失重过程均有一个明显的放热峰。以加热速率为10 ℃/min时废脱硫剂的TG-DSC曲线[图5(b)]为例，在224.0~290.0 ℃范围内，样品失重率达到24.15%，占总失重(39.13%)的61.72%，其中在温度为258.5 ℃时出现强烈的放热峰。这是因为该温度达到了S的闪点(硫磺闪点为207 ℃)，单质S燃烧变成了SO_2，而单质S占废脱硫剂中总S的77.18%，所以出现了明显的放热峰与质量变化。在放热峰前面出现了一个小的吸热峰(135~175 ℃)，质量变化为6.36%，这是由于结晶水脱除导致的失重和吸热。此外，废脱硫剂在135 ℃以前较为稳定，没有明显的吸、放热现象，这与废脱硫剂的氧化自热试验结果相符合。

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



升温速率/（℃·min^{-1}）：（a）5；（b）10；（c）15；（d）20

1—DSC 曲线；2—TG 曲线。

图 5　废脱硫剂在不同升温速率下的 TG-DSC 曲线(空气气氛)

Fig. 5　TG-DSC curve of waste desulfurizer at different heating rates(Air atmosphere)

4 组不同升温速率下放热峰的特征参数如表 3 所示。由表 3 可知，随着升温速率的提升，废脱硫剂的 DSC 曲线峰值温度与终止温度向高温方向移动，由宽度和高度的变化可看出峰形增大，TG 曲线质量变化增大。这是由于随着升温速率的增加，单位时间产生的热效应增大，产生的温度差也随之增大，峰值温度升高；同时由于升温速率的增大，热惯性变大，峰形变宽。由此表明，废脱硫剂受热易产生热分解，在实际烧结过程中升温速率将更大，废脱硫剂中的 S 将更容易向烧结废气中迁移，而进入烧结烟气中的 S，可以通过活性碳烟气净化工艺进行回收[7]。

表 3　不同升温速率下废脱硫剂 TG-DSC 曲线的特征参数

Table 3　Characteristic parameters of TG-DSC curve of waste desulfurizer at different heating rates

升温速率/(℃·min^{-1})	起始温度/℃	峰值温度/℃	终止温度/℃	温度宽度/℃	高度/(mW·mg^{-1})	质量变化/%
5	226.6	246.2	272.3	45.7	1.32	16.90
10	224.0	258.5	290.9	66.9	3.97	20.73
15	226.9	263.8	289.7	62.8	6.90	21.49
20	197.3	304.2	334.8	137.5	5.74	25.78

3　烧结杯试验

进行不同配比废脱硫剂的 9 组试验，包括不添加废脱硫剂的基准试验、添加一定量废脱硫剂(0.1%、0.3%、0.5%、0.8%、1.0%)以及适宜废脱硫剂下不同碱度(1.7、1.8、1.95)的烧结杯试验。

3.1　废脱硫剂配比的影响

3.1.1　烧结指标

在烧结矿碱度为 1.78、混合料水分质量分数为 8%、焦粉配比为 3.8% 的条件下，废脱硫剂配比对烧结指标的影响如表 4 所示。由表 4 可知：随着废脱硫剂配比的增加，烧结矿转鼓强度变差，利用系数下降；废脱硫剂配比为

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

表 4 不同废脱硫剂配比对烧结指标的影响

Table 4 Impact of different waste desulfurizer ratio on sintering production index

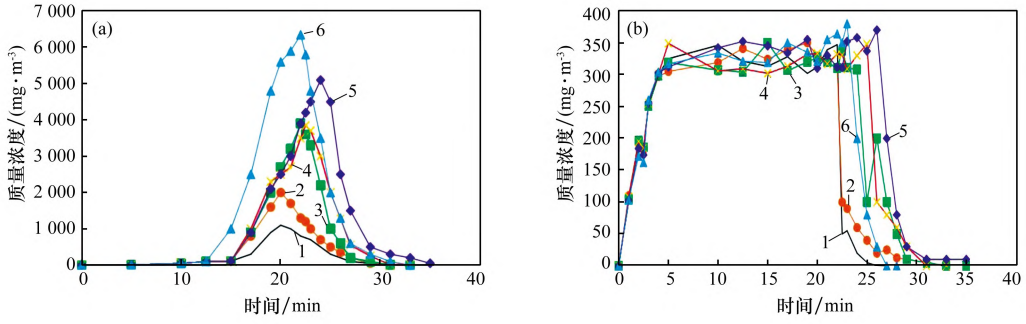
废脱硫剂配比/%	透气性/ mmH_2O	垂直烧结速度/ ($mm \cdot min^{-1}$)	转鼓强度/%	成品率/%	利用系数/ ($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	固体燃料消耗/ ($kg \cdot t^{-1}$)	R
0.0	67.75	24.10	65.80	73.30	1.41	56.30	0.95
0.1	67.60	24.75	61.73	71.12	1.41	58.71	1.01
0.3	78.25	23.21	61.47	71.87	1.34	57.29	1.00
0.5	77.00	23.86	61.60	71.08	1.33	57.94	1.03
0.8	77.05	22.67	61.27	71.09	1.32	58.59	1.01
1.0	68.50	22.67	61.20	71.59	1.28	59.28	0.98

0.3%~1.0%时，固体燃料消耗增加。由此可见，废脱硫剂的配入量需严格控制。

3.1.2 烧结烟气

废脱硫剂配比对烧结烟气中 SO_2 和 NO_x 质量浓度的影响规律如图 6 所示。由图 6(a)可知，烧结烟气中 SO_2 质量浓度具有明显的峰值特征，当燃烧带接近烧结料底层，达到烧结终点之前，SO_2 排放质量浓度达到峰值。其释放规律受 S 在烧结料层的迁移规律所控制，即“硫化物、硫酸盐热分解生成 SO_2—烧结料层吸附 SO_2—再分解—SO_2 解吸”过程不断循环，直至烧结过程接近终点。烟气中 SO_2 质量浓度随废脱硫剂配比的增加而升高，烟气 SO_2 峰值质量浓度从基准方案中 1 273 mg/m^3 增大到配入 1.0%废脱硫剂时的 6 349 mg/m^3，这是由于废脱硫剂带入的 S 所致。

由图 6(b)可知，点火过程 NO_x 质量浓度不断升高，在烧结开始 5 min 左右基本稳定，随后受燃烧温度和烟气负压影响，基本在 300~370 mg/m^3 范围内波动；当烟气温开始上升时，NO_x 质量浓度开始下降，烟气温度达到最高点(烧结终点)时，NO_x 质量浓度基本降至零。烟气中 NO_x 质量浓度也随着废脱硫剂配比的增加而升高，其由 300 mg/m^3 增加到 370 mg/m^3 但增加幅度小于烟气中 SO_2 的质量浓度。



(a) SO_2；(b) NO_x

废脱硫剂配比/%：1—0(基准组)；2—0.1；3—0.3；4—0.5；5—0.8；6—1.0。

图 6 不同废脱硫剂配比时烧结烟气排放物质量浓度变化规律

Fig. 6 Change law of mass coucentration of sintering flue gas emission with different waste desulfurizer ratio

考虑到现场脱硫装置对烟气中 SO_2 最大允许质量浓度为 1 500 mg/m^3，0.1%废脱硫剂配比时 SO_2 的峰值质量浓度为 2 036 mg/m^3，其只在达到峰值的短时间内超出限值，所以最终选取 0.1%为适宜的废脱硫剂配比。

3.2 碱度的影响

3.2.1 烧结指标

在废脱硫剂配比为 0.1%、水分质量分数为 8.0%的条件下，使用石灰石调节碱度，得到烧结指标的变化如表 5 所示。由表 5 可知：

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

随着碱度的升高，烧结矿利用系数提高、转鼓强度增大、固体燃料消耗下降。这是由于碱度提高后，烧结矿中的铁酸钙质量分数增加，矿石中的 Fe_2O_3 被针状铁酸钙共同胶结而形成的烧结矿强度高、冶金性能好。在配加脱硫剂时，适当提高碱度有利于改善烧结矿强度，提高烧结矿产量。

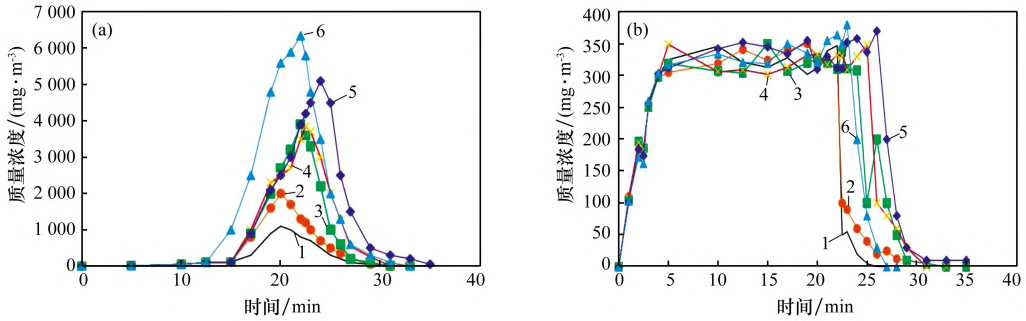
表 5　配入 0.1% 废脱硫剂时不同碱度对烧结指标的影响

Table 5　Impact of different alkalinity on sintering production index with 0.1% waste desulfurizer

碱度	焦粉配比/%	透气性/ mmH_2O	垂直烧结速度/ ($mm \cdot min^{-1}$)	转鼓强度/%	成品率/%	利用系数/ ($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	固体燃料消耗/ ($kg \cdot t^{-1}$)	R
1.70	3.8	59.20	24.93	58.73	70.27	1.41	59.37	1.04
1.70	4.0	84.50	23.45	62.53	75.84	1.41	57.34	0.86
1.78	3.6	65.90	23.41	61.73	69.77	1.31	56.96	1.05
1.78	3.8	67.60	24.75	61.73	71.12	1.41	58.71	1.01
1.80	3.6	71.00	25.19	61.67	70.06	1.41	56.37	1.05
1.80	3.8	76.80	24.73	62.67	74.00	1.45	57.14	0.90
1.95	3.6	53.50	28.25	61.87	69.61	1.57	57.85	1.05
1.95	3.8	71.00	25.70	63.93	73.80	1.50	55.46	0.95

3.2.2　烧结烟气

不同碱度条件下烧结烟气中 SO_2 与 NO_x 的峰值质量浓度如图 7 所示，由图 7 可知，烧结烟气中 SO_2 质量浓度变化规律同基准组基本相同。随着碱度提高，烧结烟气中 SO_2 质量浓度明显下降，峰值质量浓度由 2 194 mg/m^3 下降到1 562 mg/m^3，这是由于碱度提高后，料层中碱性物质对烟气中 SO_2 和 SO_3 吸附能力加强，导致烧结料层的脱硫能力下降，料层的残硫量提高，烟气中 SO_2 质量浓度下降。



（a）SO_2；（b）NO_x

碱度：1—1.7；2—1.78；3—1.80；4—1.95。

图 7　配入 0.1% 废脱硫剂时不同碱度下烧结烟气排放物浓度变化规律

Fig. 7　Change law of mass concentration of sintering flue gas under different alkalinity with 0.1% waste desulfurizer

烟气中 NO_x 质量浓度变化规律也同基准组基本相同，即点火过程 NO_x 质量浓度随点火温度的升高而升高；在一定范围内波动后在烟气温度开始上升时，NO_x 质量浓度开始下降；当烧结达到终点时，NO_x 质量浓度基本降至零。由此可知，碱度的变化对 NO_x 的影响不大。

4　生产实践

前期研究表明，在烧结混匀矿中配入不超过 0.15% 的废脱硫剂时，烧结矿的产量和质量没有明显变化，烧结烟气的脱硫、脱硝效果也没有受到影响[12]。在试验基础上，根据废脱硫剂的产出和烧结原料的实际情况在宝钢湛江钢

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

铁进行烧结协同处置煤精废脱硫剂的生产实践。

宝钢湛江钢铁煤气精制单元每年产生废脱硫剂约4 000 t，其可在烧结生产中的实际使用约4个月。以2017年的生产数据为例，根据废脱硫剂的年产量、更换时间、烧结矿产量等因素，确定废脱硫剂分别在3～6月和12月按0.01%、0.04%、0.07%、0.05%和0.02%分别配入混匀矿，每年可节约燃料成本约2 800万元。此外，配入烧结对烧结矿产、质量指标和烟气的影响如下。

（1）对烧结矿产、质量指标的影响。对使用脱硫剂前、后的烧结矿产、质量指标对比如表6所示。由表6可知，配入废脱硫剂前、后三项指标的差别不大。因此配入一定量的废脱硫剂不会对烧结矿质量产生很大影响，可以满足生产要求。

表6 使用废脱硫剂前后烧结矿产、质量变化

Table 6 Changes of sinter production quantity and quality before and after using waste desulfurizer

脱硫剂使用前后	转鼓强度/%	FeO质量分数	$RDI_{-2.8\ mm}$
使用后	80.4～82.1	8.87～9.35	31.6～36.4
使用前	80.0～82.0	8.83～9.23	31.3～33.8

（2）对烧结烟气污染物质量浓度的影响。由于煤精废脱硫剂的配入，4～6月烧结烟气中SO_2和NO_x的质量浓度上升，但经活性炭脱硫脱硝处理后，废气中SO_2和NO_x的质量浓度均达到排放标准。

5 结 论

（1）宝钢湛江钢铁煤精废脱硫剂中77.18%的S以单质形式存在，Fe以硫化铁、氧化铁、硫酸铁三种形式均匀存在。废脱硫剂有较好的稳定性，在20～90 ℃的环境温度下未发生明显的氧化放热反应，直接自燃的可能性较低。

（2）废脱硫剂在温度低于135 ℃时较为稳定，高于135 ℃时相继发生结晶水脱除反应和单质S氧化反应。在实际烧结升温过程中废脱硫剂受热容易发生氧化与分解反应，所含S元素以SO_2的形式进入烧结废气，从而达到烧结混合料中S的脱除。

（3）烧结协同处置废脱硫剂生产实践中，将废脱硫剂与含铁原料进行预混合以保证废脱硫剂在料场的存放安全，在匀矿中阶段性配入0.01%～0.10%的废脱硫剂，烧结矿产、质量指标未出现异常波动，烧结烟气污染物排放质量浓度在标准限值以下，从而实现废脱硫剂全部回收利用，每年节约外委处理成本约2 800万元。

参考文献：

[1] 陈远明. 华菱涟钢“废脱硫剂的无害化处置及再生利用”项目可行性研究[D]. 长沙:湖南大学,2010.
CHEN Mingyuan. Feasibility study on “harmless disposal and recycling of waste desulfurizer” project of hualinglian steel [D]. Changsha:Hunan University,2010.

[2] 马孟臣,刘自民,饶磊,等. 烧结处理焦炉煤气废脱硫剂的研究与应用[J]. 烧结球团,2017,42(1):54－57;62.
MA Mengchen,LIU Zimin,RAO Lei,et al. Study and application of desulfurizer for coke oven gas waste treatment by sintering[J]. Sintering and pelletizing,2017,42(1):54－57;62.

[3] 黄学能. 废脱硫剂用于烧结配矿的试验[J]. 武钢技术,2014,52(2):30－32.
HUANG Xueneng. Experiment of waste desulfurizer used in sintering ore blending[J]. Wisco Technology,2014,52(2):30－32.

[4] 钱红辉. 氧化铁脱硫剂的制备、改性及回收利用研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2010.
QIAN Honghui. Study on preparation,modification and recycling of iron oxide desulfurizer[D]. Wuhan:Wuhan University of science and technology,2010.

[5] YANG Yue,FAN Yongtao,LI Hongling,et al. Study on thermal decomposition process of semidry flue gas desulfurization ash[J]. Energy & Fuels,2019,33(9):9023－9031.

[6] 周茂军,张代华. 宝钢烧结烟气超低排放技术应用及分析[J]. 烧结球团,2019,44(3):58－63.
ZHOU Maojun,ZHANG Daihua. Application and analysis of ultra low emission technology of sintering flue gas in Baosteel [J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(3):58－63.

[7] 汪庆国,朱彤,李勇. 宝钢烧结烟气活性炭净化工艺和装备[J]. 钢铁,2018,53(3):87－95.
WANG Qingguo,ZHU Tong,LI Yong. Activated carbon purification process and equipment for sintering flue gas in Baosteel [J]. Iron and Steel,2018,53(3):87－95.

[8] 朱虹,潘国政,崔长虹,等. 天然气处理站废脱硫剂处置方

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

法[J]. 天然气技术,2008(5):54 - 56;65;79 - 80.
ZHU Hong, PAN Guozheng, CUI Changhong, et al. Disposal method of waste desulfurizer in natural gas treatment station [J]. Natural gas technology,2008(5):54 - 56;65;79 - 80.

[9] PAN Jian, SHI Benjing, ZHU Deqing, et al. Improving sintering performance of specularite concentrates by pre-briquetting process[J]. ISIJ International,2016,56(5):777 - 785.

[10] 潘建,朱德庆,崔瑜,等. 铁矿烧结烟气中 SO_2 的排放规律[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(6):1495 - 1500.
PAN Jian,ZHU Deqing,CUI Yu,et al. Emission law of SO_2 in iron ore sintering flue gas[J]. Journal of Central South University(Natural Science Edition),2011,42(6):1495 - 1500.

(上接第 73 页)

[14] 邸航,何志军,闫丽娟,等. 基于大型铁矿石熔滴检测设备的综合炉料性能[J]. 钢铁,2018,53(10):90 - 94.
DI Hang,HE Zhijun,YAN Lijuan,et al. Metallurgical property of mixed burden based on a large scale iron ore droplet testing equipment[J]. Iron & Steel,2018,53(10):90 - 94.

[15] 陶伟平. 矿石筛分与粉碎系统工艺流程的优化和改进[J]. 烧结球团,2019,44(4):51 - 56.
TAO Weiping. Optimization and improvement of the process flow of ore screening and pulverizing system[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(4):51 - 56.

[16] DONSKOI E,SUTHERS S P,FRADD S B,et al. Utilization of optical image analysis and automatic texture classification for iron ore particle characterization[J]. Minerals Engineering,2007,20:461 - 471.

[17] 左海滨,于文涛,张建良. 温度对天然块矿爆裂的影响[J]. 钢铁,2015,50(5):7 - 12.
ZUO Haibin, YU Wentao, ZHANG Jianliang. Effects of temperature on the decrepitation performance of natural lump ores [J]. Iron & Steel,2015,50(5):7 - 12.

(上接第 100 页)

[12] 范佳慧,周莉莉,朱春要. 熔融制样 - X 射线荧光光谱法测定除尘灰中 10 种组分[J]. 冶金分析,2019(10):61 - 66.
FAN Jiahui, ZHOU Lili, ZHU Chunyao. Determination of ten components in dust ash by X-ray fluorescence spectrometry with fusion sample preparation[J]. Metallurgical Analysis, 2019(10):61 - 66.

[13] ZHAN Guang, GUO Zhancheng. Basic properties of sintering dust from iron and steel plant and potassium recovery[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2013,25(6):1226 - 1234.

[14] 钱峰,于淑娟,侯洪宇,等. 烧结机头电除尘灰资源化再利用[J]. 钢铁,2015,50(12):67 - 71.
QIAN Feng, YU Shujuan, HOU Hongyu, et al. Recycling of the electric dust in sintering machine head[J]. Iron and Steel, 2015,50(12):67 - 71.

[15] GAN Min, JI Zhiyun, FAN Xiaohui, et al. Emission behavior and physicochemical properties of aerosol particulate matter (PM_{10}/$PM_{2.5}$) from iron ore sintering process[J]. ISIJ International,2015,55(12):2582 - 2588.

[16] 黎在时. 电除尘器的选型安装与运行管理[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
LI Zaishi. Selection, installation and operation management of electrostatic precipitator[M]. Beijing: China Electric Power Press,2005.

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