烧结工艺硫平衡分析及行为的研究

贾 真[1]，张 松[2,3]，桂祥友[3]，刘 建[3]，王 杰[2]，曾水银[4]

(1. 九源天能(北京)科技有限公司，北京 100083；2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083；3. 毕节市工业和信息化局 毕节市大数据产业发展中心，贵州 毕节 551700；4. 首钢水城钢铁(集团)有限责任公司，贵州 六盘水 553000)

摘要： 针对烧结工艺中硫迁移规律不够明晰的问题，文章以华北地区某钢铁企业为研究对象，对烧结工艺的生产数据进行了系统、全面的硫平衡计算分析，表明烧结工艺中硫的主要来源为燃料、混匀矿和返矿，占了硫收入项的87.81%；对烧结过程硫的迁移行为和规律进行了详细分析，发现硫主要以SO_2的形式随烧结烟气排出，其余的则以硫酸盐的形式残留于成品烧结矿、返矿、除尘灰中。

关键词： 烧结工艺；硫平衡；硫行为

中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)05－0051－08

doi： 10.13403/j.sjqt.2023.05.070

Sulfur balance analysis and sulfur behavior research of sintering process

JIA Zhen[1], ZHANG Song[2,3], GUI Xiangyou[3], LIU Jian[3], WANG Jie[2], ZENG Shuiyin[4]

(1. Sinowise(Beijing) Technology Co.,Ltd.,Beijing 100083,China; 2. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science & Technology Beijing,Beijing 100083,China; 3. Bijie Big Data Industry Development Center, Bijie Bureau of Industry and Information Technology,Bijie 551700,Guizhou,China; 4. Shougang Shuicheng Iron & Steel(Group) Co.,Ltd.,Liupanshui 553000,Guizhou,China)

Abstract: Aiming at the problem that the sulfur migration law in the sintering process is not clear enough, a steel enterprise in north China is taken as the research object, and a systematic and comprehensive sulfur balance calculation and analysis on the production data of the sintering process is conducted. The results show that the main sources of sulfur in the sintering process are fuel, blending ore and return ore, accounting for 87.81% of the sulfur revenue. The migration behavior and law of sulfur in the sintering process are analyzed in detail, and it is found that sulfur is mainly discharged with the sintering flue gas in the form of SO_2, and the rest remained in the finished sinter, return ore and fly ash in the form of sulfate.

Key words: sintering process; sulfur balance; sulfur behavior

钢铁工业是支撑我国经济健康发展的重要基础产业，为我国经济社会的高速发展作出了重要贡献[1]。2021年我国的粗钢产量已达到10.33亿吨，较新中国成立之初的15.8万吨增长了数千倍，占世界粗钢产量的比重也从不足1‰猛增到现在的52.94%，稳居世界首位[2]。

烧结工艺是钢铁工业的核心环节之一，其能源消耗约占重点钢铁企业能耗总量的10%～15%，

收稿日期： 2022－11－21；**修回日期：** 2023－02－09

基金项目： 毕节市科协学术研究课题(BSKX－2022003)

作者简介： 贾 真(1982—)，男，硕士研究生，高级工程师，从事炼铁、环保节能等方面的研究。

通信作者： 张 松(1989—)，男，博士研究生，高级工程师，从事矿物加工、炼铁等方面的研究。

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

SO_2 的排放量占比更是高达 40%～60%[3-4]。我国钢铁行业每年 SO_2 的排放量达 1.05×10^6 t[5]，虽然重点钢铁企业的 SO_2 排放量从 2000 年的 5.56 kg/t 下降到 2021 年的 0.3 kg/t，降幅高达 94.6%[6]，取得了显著的成效，但是随着《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》[7]的实施，要求烧结机机头、球团焙烧烟气 SO_2 的小时排放质量浓度均值不得高于 35 mg/m³，对钢铁行业如何绿色、高质量的发展提出了具体要求。为了明晰烧结工艺中硫迁移规律，文章以华北地区某钢铁企业烧结生产数据为基础，进行了系统、全面的硫平衡计算，旨在查明烧结过程硫的来源、去向以及迁移规律，为实现 SO_2 的达标排放提供根本遵循和理论依据。

1 烧结工艺简介

烧结矿是世界上钢铁企业使用最广泛的高炉炉料。在我国，烧结矿是高炉冶炼的主要炉料，占比约为 65%～70%，远高于球团矿的 15%[8-9]。烧结是一个热团聚过程[10]，将铁矿粉、熔剂、燃料、返矿、含铁二次资源及代用品等按比例组成混合料，配以适合水量，经混合后均匀铺于烧结机的台车之上，在负压为 9.8～15.7 kPa，温度为 1 100～1 300 ℃条件下进行烧结，经一系列复杂的物理化学反应后，低熔点物质在高温下熔化为液态物质，冷凝过程中将烧结料黏结起来，从而完成烧结矿固结[11-12]，如图 1 所示。烧结工艺是一个典型的高排放和高污染的环节，SO_2 的排放量占整个钢铁工业的 40%～60%。

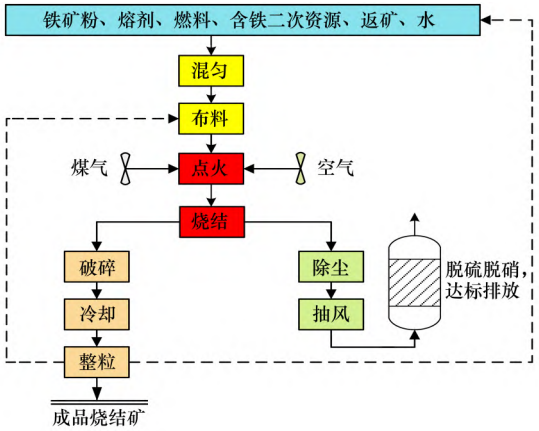


图 1 烧结矿生产工艺流程

Fig. 1 Process flow of sinter production

2 硫平衡计算

根据华北地区某烧结厂生产日报表确定硫的收入项和支出项，上料质量和产量按每小时的质量来计算。

2.1 硫收入项

烧结工序的硫收入项主要来源于混匀矿、熔剂、燃料、除尘灰和返矿。

2.1.1 混匀矿带入项

混匀矿既有国内外铁矿粉，又有钢渣、铁皮等二次含铁资源，计算混匀矿带入的硫质量公式:

$$S_{混匀矿}=\sum_{i=1}^{n}S_{矿i}=\sum_{i=1}^{n}(G_{矿i}\times X_{矿i}\times 10) \quad (1)$$

式中: $S_{混匀矿}$为混匀矿中硫质量，kg/h; $S_{矿i}$是混匀矿 i 组分中硫质量，kg/h; $G_{矿i}$为混匀矿 i 组分的上料质量，t/h; $X_{矿i}$为混匀矿 i 组分中硫的质量分数，%。混匀矿组分及含硫量计算如表 1 所示。

表 1 混匀矿组分及含硫量计算表

Table 1 Calculation on composition and sulfur content of blended ore

混匀矿组分	上料质量/(t·h⁻¹)	占混匀矿质量分数/%	硫质量分数/%	含硫质量/(kg·h⁻¹)	占总硫质量分数/%
自产加工粉	23.7	1.96	0.680	161.160	25.50
自产结矿筛下物	146.3	12.08	0.028	40.964	6.48
球团筛下物	5.3	0.44	0.012	0.636	0.10
生矿筛下物	30.3	2.50	0.032	9.696	1.53
澳块筛下物	2.6	0.21	0.020	0.520	0.08
渣铁(加工)	2.6	0.21	0.830	21.580	3.42
钢渣	43.5	3.59	0.078	33.930	5.37
氧化铁皮(干铁皮)	5.3	0.44	0.010	0.530	0.08

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

表 1(续)

混匀矿组分	上料质量/(t·h^{-1})	占混匀矿质量分数/%	硫质量分数/%	含硫质量/(kg·h^{-1})	占总硫质量分数/%
氧化铁粉(酸再生)	2.6	0.21	0.013	0.338	0.05
澳矿粉	365.0	30.14	0.020	73.000	11.55
秘鲁粗矿粉	34.3	2.84	0.430	147.490	23.34
扬迪粉	197.7	16.33	0.008	15.816	2.50
巴西卡拉加斯粉	349.2	28.84	0.010	34.920	5.52
秘鲁原矿粉	2.6	0.21	3.520	91.520	14.48

由表 1 可知，混匀矿的上料总质量为 1 211 t/h，带入的硫质量为 632.100 kg/h，平均含硫质量分数为 0.052%。混匀矿中的含硫量影响权重较大的是自产加工矿粉、秘鲁粗矿粉、秘鲁原矿粉、澳矿粉，分别占 25.50%、23.34%、14.48%和 11.55%；其余组分的影响权重相对较小，均低小于 7%。

2.1.2　熔剂带入项

熔剂主要以石灰石粉、烧结石灰石和白灰粉为主，配加部分套筒窑副产物。计算熔剂带入的硫质量公式:

$$S_{熔剂}=\sum_{i=1}^{n}S_{熔剂i}=\sum_{i=1}^{n}(G_{熔剂i}\times X_{熔剂i}\times 10) \quad (2)$$

式中: $S_{熔剂}$为熔剂中硫质量，kg/h; $S_{熔剂i}$是熔剂中 i 组分的硫质量，kg/h; $G_{熔剂i}$为熔剂 i 组分的上料质量，t/h; $X_{熔剂i}$为熔剂 i 组分中硫的质量分数,%。熔剂矿组分及含硫量计算如表 2 所示。

表 2　熔剂组分及含硫量计算表

Table 2　Calculation on composition and sulfur content of flux

熔剂组分	上料质量/(t·h^{-1})	占熔剂质量百分比/%	硫质量分数/%	含硫质量/(kg·h^{-1})	占总硫质量分数/%
套筒窑除尘灰	4.0	2.79	0.024	0.960	1.75
套筒窑高钙石灰石筛下物	7.9	5.50	0.016	1.264	2.30
套筒窑石灰石	10.5	7.31	0.040	4.200	7.64
石灰石粉	18.4	12.81	0.036	6.624	12.05
烧结石灰石	67.2	46.80	0.020	13.440	24.45
白灰粉	35.6	24.79	0.080	28.480	51.81

由表 2 可知，熔剂的上料总质量为 143.6 t/h，带入的硫质量为 54.968 kg/h，平均含硫质量分数为 0.038%。熔剂中的含硫量影响权重较大的是白灰粉、烧结石灰石粉、石灰石粉，分别占 51.81%、24.45%和 12.05%。这三种组分占了熔剂总含硫量的 88.31%，其余组分影响相对较小。

2.1.3　燃料带入项

燃料由固体燃料和气体燃料组成，计算燃料带入的硫质量公式:

$$S_{燃料}=S_{固体燃料}+S_{气体燃料}=G_{固体燃料}\times X_{固体燃料}\times 10^{3}+Q_{气体燃料}\times C_{气体燃料}\times 10^{-6} \quad (3)$$

式中: $S_{燃料}$是燃料带入的硫质量，kg/h; $S_{固体燃料}$是固体燃料的硫质量，kg/h; $G_{固体燃料}$为固体燃料的上料质量，t/h; $X_{固体燃料}$为固体燃料中硫的质量分数,%; $S_{气体燃料}$为气体燃料带入的硫质量，kg/h; $Q_{气体燃料}$为标准状态下的干气体燃料流量，m^3/h; $C_{气体燃料}$为气体燃料中硫的质量浓度，mg/m^3。燃料组分及含硫量计算如表 3 所示。

表 3　燃料组分及含硫量计算表

Table 3　Calculation on composition and sulfur content of fuel

燃料组分	含硫质量/(kg·h^{-1})	占总硫质量分数/%
水熄焦	504.000	99.97
点火煤气	0.127	0.03

注: 表 3 中水熄焦上料量为 67.2 t/h,S 质量分数为 0.75%;点火煤气上料量为 7 906.8 m^3/h,S 质量浓度为 16.04 mg/m^3。

燃料带入的硫主要是通过固体燃料水熄焦带

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

入，其带入的硫质量为504.000 kg/h，占燃料含硫总质量(504.127 kg/h)的99.97%，这主要是因为单位成品烧结矿需要的点火煤气量小。

2.1.4 除尘灰带入项

除尘灰来自于烧结和高炉冶炼生产环节的回收利用，计算除尘灰带入硫质量，计算公式如下:

$$S_{除尘灰} = S_{高炉除尘灰} + S_{烧结除尘灰} \quad (4)$$

$$S_{高炉除尘灰} = G_{高炉除尘灰} \times X_{高炉除尘灰} \times 10 \quad (5)$$

$$S_{烧结除尘灰} = G_{烧结除尘灰} \times X_{烧结除尘灰} \times 10 \quad (6)$$

式中: $S_{除尘灰}$ 是除尘灰带入的硫质量，kg/h; $S_{高炉除尘灰}$是高炉除尘灰的硫质量，kg/h; $G_{高炉除尘灰}$为高炉除尘灰的上料质量，t/h; $X_{高炉除尘灰}$为高炉除尘灰中硫的质量分数,%; $S_{烧结除尘灰}$是烧结除尘灰的硫质量，kg/h; $G_{烧结除尘灰}$为烧结除尘灰的上料质量，t/h; $X_{烧结除尘灰}$为烧结除尘灰中硫的质量分数,%。除尘灰组分及含硫量计算如表4所示。

表4 除尘灰组分及含硫量计算表

Table 4 Calculation on composition and sulfur content of dust ash

除尘灰组分	上料质量/(t·h^{-1})	占除尘灰质量百分比/%	S质量分数/%	含硫质量/(kg·h^{-1})	占总硫质量分数/%
高炉除尘灰	29.0	80.33	0.29	84.100	67.13
烧结除尘灰	7.1	19.67	0.58	41.180	32.87

由表4可知，除尘灰的上料质量为36.1 t/h，带入硫的质量为125.280 kg/h，平均含硫量为0.35%，高于混匀矿的平均含硫量，其中高炉除尘灰带入的硫质量为84.100 kg/h，占除尘灰含硫总质量的67.13%，而烧结除尘灰带入硫质量的占比是32.87%。

2.1.5 返矿带入项

返矿来自于烧结和高炉冶炼生产环节的回收利用，计算返矿带入的硫质量公式如下:

$$S_{返矿} = S_{高炉返矿} + S_{烧结返矿} = G_{高炉返矿} \times X_{高炉返矿} \times 10 + G_{烧结返矿} \times X_{烧结返矿} \times 10 \quad (7)$$

式中: $S_{返矿}$是总返矿中硫质量，kg/h; $S_{高炉返矿}$是高炉返矿的硫质量，kg/h; $G_{高炉返矿}$为高炉返矿的上料质量，t/h; $X_{高炉返矿}$为高炉返矿中硫的质量百分数,%; $S_{烧结返矿}$是烧结返矿的硫质量，kg/h; $G_{烧结返矿}$为烧结返矿的上料质量，t/h; $X_{烧结返矿}$为烧结返矿中硫的质量分数,%。返矿组分及含硫量计算如表5所示。

表5 返矿组分及含硫量计算表

Table 5 Calculation on components and sulfur content of returned ore

返矿组分	上料质量/(t·h^{-1})	占返矿质量百分比/%	S质量分数/%	含硫质量/(kg·h^{-1})	占总硫质量分数/%
高炉返矿	167.4	26.24	0.019	31.806	19.45
烧结返矿	470.5	73.76	0.028	131.740	80.55

由表5可知，返矿的上料质量为637.9 t/h，带入硫的质量为163.546 kg/h，平均含硫量为0.026%，和混匀矿的平均硫质量分数处于同一水平，其中高炉返矿带入硫质量为31.806 kg/h，占返矿含硫总质量的19.45%，而烧结返矿带入硫质量的占比达到80.55%。

2.2 硫支出项

烧结硫支出项主要包括烧结矿残留、返矿残留、烧结除尘灰携带、烧结废气携带等4项。

2.2.1 烧结矿残留项

计算烧结矿残留的硫质量公式:

$$S'_{烧结矿} = G'_{烧结矿} \times X'_{烧结矿} \times 10 \quad (8)$$

式中: $S'_{烧结矿}$为烧结矿携带的硫质量，kg/h; $G'_{烧结矿}$为烧结矿的产量，t/h; $X'_{烧结矿}$为烧结矿中硫的质量分数,%。根据生产报表，烧结矿产量为1 317.8 t/h，化验其硫质量分数为0.028%，则烧结矿带出的硫质量为368.984 kg/h。

2.2.2 烧结返矿残留项

计算烧结返矿残留的硫质量公式:

$$S'_{返矿} = G'_{返矿} \times X'_{返矿} \times 10 \quad (9)$$

式中: $S'_{返矿}$为烧结返矿携带的硫质量，kg/h; $G'_{返矿}$为返矿的产量，t/h; $X'_{返矿}$为返矿中硫的质量分数,%。在烧结生产稳定时，高炉返矿和烧结返矿都能达到平衡，即产生的返矿量等于配入的返矿量，并且返矿的硫质量分数波动非常小，基本上保持不变，所以$S'_{返矿} = S_{返矿} = 163.5$ kg/h。

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

2.2.3　烧结粉尘携带项

烧结除尘灰主要来自机头和机尾，计算烧结过程产生的粉尘所含硫质量公式如下：

$$S'_{烧结粉尘} = G'_{烧结粉尘} \times X'_{烧结粉尘} \times 10 \quad (10)$$

式中：$S'_{烧结粉尘}$为烧结粉尘携带的硫质量，kg/h；$G'_{烧结粉尘}$为烧结粉尘的产量，t/h；$X'_{烧结粉尘}$为烧结粉尘中硫的质量分数。烧结除尘灰组分及含硫量计算如表 6 所示。

表 6　烧结除尘灰组分及含硫量计算表

Table 6　Calculation on composition and sulfur content of sintering dedusting ash

烧结除尘灰组分	产品质量/(t·h^{-1})	占烧结除尘灰质量百分比/%	S 质量分数/%	含硫质量/(kg·h^{-1})	占总硫质量分数/%
烧结机头灰	2.2	26.19	1.42	31.240	64.28
烧结机尾灰	6.2	73.81	0.28	17.360	35.72

由表 6 可知，烧结产生的机头灰与机尾灰的总的产量为 8.4 t/h，带入的硫质量为 48.600 kg/h，除尘灰的平均硫质量分数为 0.58%，处于高水平。烧结机头灰带出的硫质量为 31.240 kg/h，占烧结除尘灰携带硫总质量的 64.28%，烧结机尾灰含硫量较低，其携带的硫质量占除尘灰含硫总质量的 35.72%。

2.2.4　烧结废气携带项

计算烧结废气携带的硫质量公式：

$$S'_{烧结废气} = Q'_{烧结废气} \times C'_{烧结废气} \times 10^{-6} \quad (11)$$

式中：$S'_{烧结废气}$为烧结废气携带硫的质量，kg/h；$Q'_{烧结废气}$为标准状态下烧结废气的干气流量，m^3/h；$C'_{烧结废气}$为标准状态下干烟气中 S 质量浓度，mg/m^3。根据生产数据统计，已知烧结废气的平均产量为 1 693 000 m^3/h，含硫量的平均值为 520 mg/m，则烧结废气的含硫量为 880.360 kg/h。

2.3　硫平衡分析

根据计算列出烧结工序硫平衡表，如表 7 所示。硫收入项与支出项的计算误差为 1.25%。

表 7　烧结工序硫平衡表

Table 7　Sulfur balance of sintering process

硫收入			硫支出		
收入项目	带入硫质量/(kg·h^{-1})	带入硫质量分数/%	支出项目	支出硫质量/(kg·h^{-1})	支出硫质量分数/%
混匀矿	632.100	42.71	烧结矿	368.984	25.25
熔剂	54.968	3.71	返矿	163.546	11.19
燃料	504.127	34.06	除尘灰	48.600	3.32
除尘灰	125.280	8.47	烧结废气	880.360	60.24
返矿	163.546	11.05	—	—	—

由表 7 可知，从硫收入项来看，烧结工序中各组分的含硫量权重从大到小为：混匀矿、燃料、返矿、除尘灰、熔剂，其中：燃料和混匀矿的硫带入量占了 76.77%，除尘灰和返矿占了 19.52%，表明烧结工艺中硫的主要来源为燃料和混匀矿。从硫支出项来看，硫的去向主要是随烧结废气排出和残留在烧结矿中，而除尘灰和返矿一般都循环利用而未对外排放，整体残留在烧结矿中的硫占比为 25.25%，所以烧结矿硫的脱除率可达 74.75%。

3　硫迁移行为的分析

根据料层高度的变化，自上而下可分为烧结矿层、燃烧层、预热层、冷料层、铺底料层。它们随点火开始，依次出现，然后随着烧结的进行，逐渐消失，最后只剩下烧结矿床[11,13]，如图 2 所示。

3.1　燃烧层分析

燃烧层发生的反应主要有燃烧、分解、气化、液相形成等物理化学反应，温度一般为 1 100 ~ 1 500 ℃[11]，焦炭燃烧过程中无机硫以硫元素的形式析出，然后被氧化成为 SO_2[14]，其释放时间比混合矿更早，浓度也更高[15]。而有机硫逐渐生成硫化氢、硫醚等，当温度超过 300 ℃可与氧气生产 SO_2[13]。此外，混匀料通过固相反应形成低熔点矿物，在高温下软化进一步形成液相，而硫

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

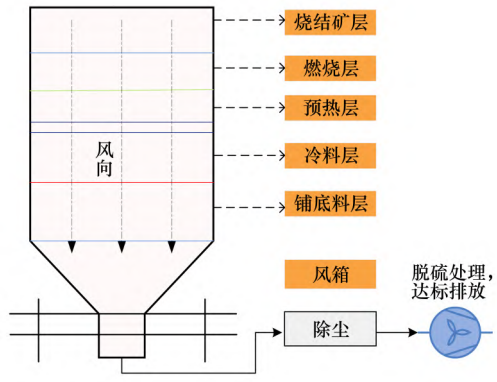


图 2 烧结过程示意

Fig. 2 Schematic diagram of sintering process

酸盐需在较高温度下才能分解释放硫[16]。

有机硫反应:

$$4C_xH_yS_z+(4x+y+4z)\,O_2=4zSO_2\uparrow+4xCO_2\uparrow+2yH_2O \quad (12)$$

无机硫反应:

$$7FeS_2+19O_2=2Fe_2O_3+Fe_3O_4+14SO_2\uparrow \quad (13)$$

$$2MSO_4=2MO+2SO_2\uparrow+O_2\uparrow \quad (14)$$

3.2 预热层分析

预热层的混匀料被燃烧层流下来的热气预热和干燥，并发生剧烈的热交换反应，使得热气迅速下降到 100 ℃以下。发生的主要反应有碳酸盐分解、结晶水脱除、氧化还原等反应，硫以硫酸盐和 SO_2 的形式生成。[13]

熔剂分解反应如下:

$$CaCO_3=CaO+CO_2\uparrow \quad (15)$$

$$CaCO_3\cdot MgCO_3=CaO+MgO+2CO_2\uparrow \quad (16)$$

硫酸盐生成反应如下:

$$CaO+SO_2=CaSO_3\downarrow \quad (17)$$

$$2CaO+2SO_2+O_2=2CaSO_4\downarrow \quad (18)$$

无机硫反应与(13)、(14)相似。

3.3 冷料层分析

冷料层也称过湿层，大量水蒸气在负压条件下随废气下移，废气与冷料(原始混合料)接触后冷凝析出集中于此，此区域含水量明显升高，对 SO_2 的吸附作用增强，导致过湿层硫含量明显高于其他区域[12,17]。

SO_2 的吸附反应:

$$SO_2+H_2O=H_2SO_3 \quad (20)$$

$$2H_2SO_3+O_2+2CaO=2CaSO_4\downarrow+2H_2O \quad (21)$$

3.4 铺底料层分析

铺底料的主要组成是成品烧结矿(从成品筛分系统中分出一部分烧结矿作铺底料)，其主要起到防止高温带接近炉箅、过滤粉尘、均匀气流等作用，从而提高设备的使用寿命[18]。

SO_2 的吸附反应:

$$CaO+SO_2=CaSO_3\downarrow \quad (22)$$

3.5 硫迁移行为分析

整个烧结过程是在负压和排气条件进行的，烧结过程中燃烧产生的 CO_2 气体的体积分数相对平稳(图 3)[19]，但 SO_2 质量浓度在点火阶段和烧结终点前存在两个明显的峰值区间(图 4)[20]。结合以上分析，表明 SO_2 的排放遵循硫化物氧化和硫酸盐分解→料层吸附→再分解→解吸的迁移及循环富集机制[20]，最终原料中 60% 以上的硫以 SO_2 的形式随烧结烟气排放，剩下的则以硫酸盐的形式残留于烧结矿、除尘灰及返矿中。

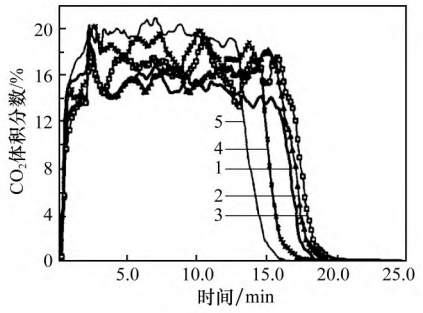


图 3 烧结过程 CO_2 气体排放体积分数[19]

Fig. 3 Mass concentration of CO_2 emission during sintering[19]

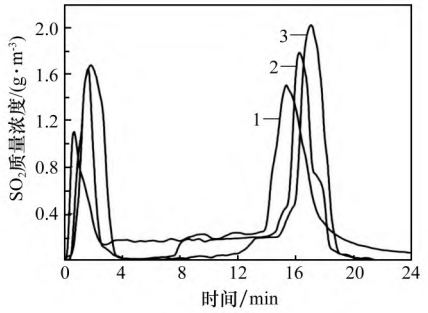


图 4 烧结过程 SO_2 气体排放质量浓度[21]

Fig. 4 Mass concentration of SO_2 emission during sintering[20]

4 结 论

(1) 烧结工艺中，硫的主要来源为燃料、混

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

匀矿和返矿，占了硫收入项的 87.81%；**硫主要去向是随烧结废气排出和残留在烧结矿中，残留在烧结矿中的硫仅占** 25.25%，**说明烧结矿硫的脱除率为** 74.75%。

（2）SO_2 **的排放遵循硫化物氧化和硫酸盐分解→料层吸附→再分解→解吸的迁移及循环富集规律，最终原料中** 60% **以上的硫以** SO_2 **的形式随烧结烟气排放，剩下的则以硫酸盐的形式残留于烧结矿、除尘灰及返矿中。**

参考文献:

[1] 王海风，平晓东，周继程，等. 中国钢铁工业绿色发展回顾及展望[J]. 钢铁，2023，58(2)：8－18.
WANG Haifeng，PING Xiaodong，ZHOU Jicheng，et al. Review and prospect of green development of Chinese steel industry[J]. Iron and Steel，2023，58(2)：8－18.

[2] World Steel Association. World steel in figures 2022[J/OL]. (2022－01－25)[2022－11－7]. https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/.

[3] 张建良，尉继勇，刘征建，等. 中国钢铁工业空气污染物排放现状及趋势[J]. 钢铁，2021，56(12)：1－9.
ZHANG Jianliang，WEI Jiyong，LIU Zhengjian，et al. Current situation and trend of air pollutants emission from China's iron and steel industry[J]. Iron and Steel，2021，56(12)：1－9.

[4] 张夏，郭占成. 我国钢铁工业能耗与大气污染物排放量[J]. 钢铁，2000，35(1)：63－68.
ZHANG Xia，GUO Zhancheng. Energy consumption and air pollutant discharge of China's iron and steel industry[J]. Iron and Steel，2000，35(1)：63－68.

[5] 史磊. 钢铁行业烧结烟气脱硝技术分析及对比[J]. 能源与节能，2020(3)：69－71；103.
SHI Lei. Analysis and comparison of sintering flue gas denitration technologies in the iron and steel industry[J]. Energy and Energy Conservation，2020(3)：69－71；103.

[6] 中华人民共和国生态环境部. 生态环境统计年报[EB/OL]. (2022－02－18)[2022－02－18]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtjnb/.
Ministry of Ecological Environment of the People's epublic of China. Annual report on ecological environment statistics[EB/OL](2022－02－18)[2022－02－18]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtjnb/.

[7] 生态环境部，国家发展和改革委员会，工业和信息化部，等. 关于推进实施钢铁行业超低排放的意见[环大气〔2019〕35号][EB/OL]. (2019－04－22)[2022－04－28]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019－10/10/content_5438149.htm?=a13946f000075a0200000003645b4ecd.
Ministry of Ecology and Environment，National Development and Reform Commission，Ministry of Industry and Information Technology，et al. Opinions on promoting the implementation of ultra low emission in the iron and steel industry[(2019) No. 35][EB/OL](2019－04－22)[2022－04－28]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019－10/10/content_5438149.htm?eqid=a13946f000075a0200000003645b4ecd.

[8] 青格勒，黄文斌，安钢，等. 低硅碱性球团矿制备技术研究[J]. 烧结球团，2022，47(1)：119－126.
QING Gele，HUANG Wenbin，AN Gang，et al. Research on the preparation technology of low silicon alkaline pellets[J]. Sintering and Pelletizing，2022，47(1)：119－126.

[9] WANG Y Z，ZHANG J L，LIU Z J，et al. Recent advances and research status in energy conservation of iron ore sintering in China[J]. JOM，2017(69)，2404－2411.

[10] EISELE T C，KAWATRA S K. A review of binders in iron ore pelletization[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review，2003(24)：1－90.

[11] 王筱留. 钢铁冶金学：炼铁部分[M]. 北京：冶金工业出版社，2000.
WANG Xiaoliu. Iron and steel metallurgy：ironmaking[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2000.

[12] 向小平，刘武杨，朱梦飞，等. 基于提质降耗的烧结工艺优化研究[J]. 烧结球团，2021，46(5)：35－40.
XIANG Xiaoping，LIU Wuyang，ZHU Mengfei，et al. Optimization of sintering process based on quality improvement and consumption reduction[J]. Sintering and pelletizing，2021，46(5)：35－40.

[13] ZHANG Y Z，HAO S J，JIANG W F，et al. Study on sulfur existing form in sinter[C]//International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology(AEMT2011)，2011(284－286)：1279－1283.

[14] 陈凯华. 铁矿石烧结过程中二氧化硫的生成机理及控制[J]. 烧结球团，2007，32(4)：13－17.
CHEN Kaihua. Formation mechanism and control of sul-

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

fur dioxide during iron ore sintering [J]. Sintering and Pelletizing,2007,32(4):13 – 17.

[15] ZONG Y B,E L L,ZHANG L,et al. Emission of SO_2 from iron ore and fuel used in sintering process [C]// Proceedings of the 5th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking. Shanghai: Chinese Society of Metals,2009:533 – 536.

[16] YAN Z Q,WANG Z A,WANG X F,et al. Kinetic model for calcium sulfate decomposition at high temperature [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015(25),3490 – 3497.

[17] 唐贤容,王笃阳,张清岑. 烧结理论与工艺 [M]. 长沙:中南工业大学出版社,1992.
TANG Xianrong, WANG Duyang, ZHANG Qingcen. Sintering theory and technology [M]. Changsha: Central South University of Technology Press,1992.

[18] 臧疆文,张群,刘新娣,等. 用褐铁矿作烧结铺底料的研究 [J]. 钢铁,2002,37(5):1 – 4.
ZANG Jiangwen, ZHANG Qun, LIU Xindi, et al. Research on using limonite as sintering bedding [J]. Iron and Steel,2002,37(5):1 – 4.

[19] 朱德庆,潘建,何奥平,等. 铁矿烧结工艺中温室气体 CO_2 的排放规律 [J]. 中南大学学报:自然科学版,2005,36(6):944 – 948.
ZHU Deqing,PAN Jian,HE Aoping,et al. Emission law of greenhouse gas CO_2 in iron ore sintering process [J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition,2005,36(6):944 – 948.

[20] 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50页)

[14] 叶恒棣,周浩宇,王兆才,等. 高配比富氢燃料烧结技术研究及展望 [J]. 烧结球团,2020,45(5):1 – 7.
YE Hengdi,ZHOU Haoyu,WANG Zhaocai,et al. Research and prospect of high proportion hydrogen-rich fuel sintering technology. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(5):1 – 7.

[15] 许斌. 铁矿石均热烧结基础与技术研究 [D]. 长沙:中南大学,2012.
XU Bin. Research on fundamental and technology of heat-homogenizing sintering of iron ores [D]. Changsha: Central South University,2012.

[16] PAHLEVANINEZHAD M, EMAMI MD, PANJEPOUR M. The effects of kinetic parameters on combustion characteristics in a sintering bed [J]. Energy, 2014, 73: 160 – 176.

[17] 周乐,张卫军,刘馨,等. 烧结过程能量衡算软件的编制及应用 [J]. 冶金能源,2020,39(3):33 – 37;42.
ZHOU Le,ZHANG Weijun,LIU Xin,et al. Design and application of energy efficiency evaluation software for sintering process [J]. Energy For Metallurgical Industy, 2020,39(3):33 – 37;42.

[18] HUANG X X,FAN X H,CHEN X L,et al. Optimisation model of fuel distribution in materials bed of iron ore sintering process [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2018, 46(2):1 – 7.

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