



铜冶炼烟气中 SO₃ 生成及 烟灰催化氧化 SO₂

张 勤^{1,2}, 吴雅楠¹, 陈佳程¹, 苏迎彬¹, 刘海鹏¹, 杨洪英^{1,2}

(1. 东北大学 冶金学院, 沈阳 110819;

2. 东北大学 多金属矿生态冶金重点实验室, 沈阳 110819)

摘 要: 通过 FactSage 7.2 软件对铜冶炼烟道的气相体系进行热力学平衡研究, 考察了温度、气相主要组分等因素对平衡烟气中 SO₃ 含量的影响。此外, 在固相催化实验平台, 针对铜冶炼烟灰对 SO₂ 催化氧化的影响进行了实验研究。结果表明: 温度和烟气中 O₂ 初始含量对 SO₃ 的平衡浓度影响较大, 烟气中 SO₂ 初始含量对 SO₃ 平衡浓度影响相对较小; 铜冶炼烟道飞灰促进了烟气中 SO₂ 向 SO₃ 的转化。

关键词: 铜冶金; 热力学; 三氧化硫; 飞灰; 催化氧化

文章编号: 1004-0609(2020)-09-2144-07

中图分类号: X511

文献标志码: A

以硫化矿为原料进行的铜火法冶炼过程会产生大量硫氧化物气体 SO_x, 硫氧化物以 SO₂ 为主, 同时, 含有少量的 SO₃^[1-4]。冶炼烟道内部环境复杂, 在烟气气相组分和冶炼烟灰固相催化的复合作用下^[5-6], 发生一系列的物理化学反应, 使得烟气中部分 SO₂ 又会转化为 SO₃。SO₃ 会与烟道中的水蒸气结合生成硫酸蒸汽, 含有硫酸蒸汽的烟气经过余热锅炉时, 温度降低至酸露点以下硫酸蒸汽就会冷凝, 对余热锅炉以及收尘设备造成严重腐蚀^[7-8]。SO₃ 在烟气中的体积分数是影响酸露点的主要因素^[9-10], 酸露点会随着 SO₃ 体积分数的增加而增高。酸露点升高将迫使余热锅炉出口处温度提高, 严重影响换热效率。此外, SO₃ 的存在将会降低收尘设备的工作效率以及增加烟气净化时的污酸量^[11-12]。因此, 控制烟气中 SO₃ 的浓度成为铜冶炼行业发展一个亟待解决的问题。目前, 控制烟气中 SO₃ 浓度方面的研究大部分集中在燃煤电厂, 主要采用在工艺过程中加入钙、镁碱性化合物的方法将 SO₃ 脱除或吸附^[13-18], 取得了良好的效果。

有色冶炼烟气的特点之一是高 SO₂ 浓度^[19-20], 且 SO₂ 需要经过收尘和净化等工序后进行制酸。现阶段控制烟气中 SO₃ 浓度所采用的方法不能实现在保留 SO₂ 的同时去除烟气内的 SO₃, 并且还存在着不同程度的能耗高、投入成本大、产生二次污染、脱硫产物

难以处理和利用等问题。本文作者拟通过研究铜冶炼烟气在进入上升烟道和通过余热锅炉时, 温度、O₂ 浓度、初始 SO₂ 浓度、铜灰成分等各种因素对烟气中 SO₃ 生成以及 SO₂ 向 SO₃ 转化的影响, 进而研发出适用于铜冶炼行业抑制和降低烟气中 SO₃ 含量的技术和手段。

1 体系温度对烟气中 SO₃ 平衡的影响

考察某厂铜闪速熔炼烟气的实际生产数据, 给出了烟气初始组分(总的物质的量设为 1 mol)的体积分数, 如表 1 所示。计算中当变动某一组分的初始摩尔量以考察其影响时, 其余组分的初始摩尔量均固定为此初始值。

表 1 模拟烟气组分

Table 1 Composition of simulating flue gas

Gas composition	<i>n</i> /mol	Content, <i>x</i> /%
SO ₂	0.20	20
SO ₃	0.02	2
O ₂	0.03	3
CO ₂	0.10	10
N ₂	0.55	55
H ₂ O	0.10	10

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0210403)

收稿日期: 2019-08-16; 修订日期: 2020-05-28

通信作者: 杨洪英, 教授, 博士; 电话: 024-83673932; E-mail: yanghy@smm.neu.edu.cn

考察 SO₂、O₂ 的初始含量、温度变化对平衡气相组成以及平衡时 SO₂ 转化率的影响, 其中 SO₂ 转化率计算式如式(1)所示:

$$\alpha = \left(1 - \frac{n_{\text{SO}_2, \text{eq}}}{n_{\text{SO}_2, \text{in}}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: α 为 SO₂ 的转化率; $n_{\text{SO}_2, \text{in}}$ 、 $n_{\text{SO}_2, \text{eq}}$ 分别为 SO₂ 的初始量和平衡量。

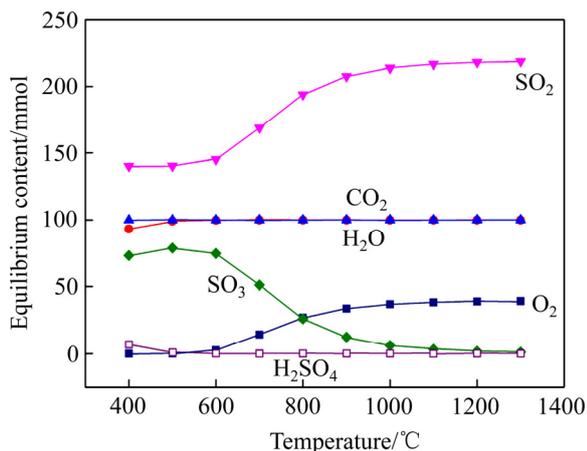


图1 烟气温度对平衡组分的影响
Fig. 1 Effect of temperature on equilibrium gaseous amount

对于 SO₂ 和 SO₃ 之间相互转化, 温度在 2SO₂(g)+O₂(g)⇌2SO₃(g) 这一可逆反应的方向上起十分重要作用, 为研究温度对冶炼烟气平衡组分的影响, 设定烟气组分为初始态, 绘制平衡相图如图 1 所示。

由图 1 可知, 温度对冶炼烟气平衡组分的影响非常明显。在 500 °C 以下, 冶炼烟气中 SO₃ 可以与 H₂O 结合生成 H₂SO₄ 蒸汽; 在 500~1300 °C 内 H₂SO₄ 蒸汽不能稳定存在。在 400~1100 °C 内, 随着温度升高冶炼烟气内 SO₂ 和 O₂ 含量逐渐增加, SO₃ 含量逐渐减少; 在 1100~1300 °C 内, SO₃ 基本不存在, 这是由于温度的升高促进了 SO₃ 的分解, 在 1100 °C 以上时 SO₃ 完全分解为 SO₂ 和 O₂。

2 烟气中初始 O₂ 含量对 SO₃ 平衡浓度的影响

考察烟气初始 O₂ 含量对气相平衡组分的影响, 固定 O₂ 和 N₂ 的初始摩尔量之和为 0.58 mol, 选取 500、700、900、1300 °C 四个温度分别计算不同 O₂ 初始含量下的平衡气体含量, 结果如图 2 所示。

从图 2(a)中可以看出, 在 500 °C 下, 随着 O₂ 的加入量从 0 增加至 7%, 平衡气相组分中 SO₂ 的含量从

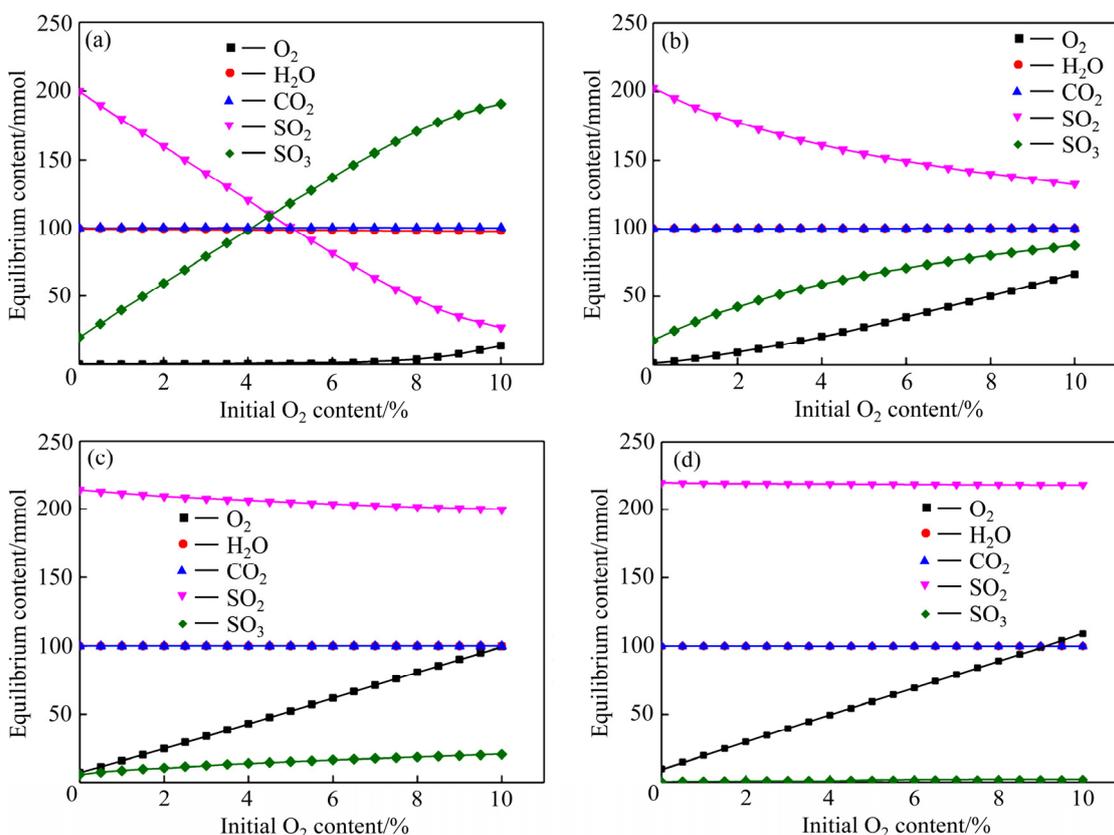


图2 初始 O₂ 含量对平衡组分的影响
Fig. 2 Effect of initial amount of O₂ on equilibrium gaseous amount: (a) 500 °C; (b) 700 °C; (c) 900 °C; (d) 1300 °C

200 mmol 减少到 27 mmol, 而平衡组分中的 SO_3 含量从 20 mmol 增加到 190 mmol, 这说明 O_2 的加入明显促进了 SO_2 向 SO_3 的转化。对比图 2(a)、(b)和(c)发现, 在 500、700、900 °C 下加入 O_2 均能促进 SO_2 向 SO_3 转化。当 O_2 加入量均为 10% 时, 在 500 °C 下平衡时 SO_3 量增加 170 mmol, 在 700 °C 下平衡时 SO_3 量增加 60 mmol, 在 900 °C 下平衡时 SO_3 量增加 16 mmol, 这说明随着温度升高加入 O_2 促进 SO_2 向 SO_3 转化的效果逐渐减弱, 这是由于 SO_2 向 SO_3 的转化过程是放热反应, 当温度升高平衡会向 SO_3 分解的方向移动。图 2(d) 显示在 1300 °C 下 SO_3 不能稳定存在, 即便初始 O_2 含量增加 10% 的情况下, 平衡组分中 SO_3 的含量仍然为 0。此时 SO_3 将完全分解为 SO_2 和 O_2 , 这与郭学益等^[3]的研究成果相符。

3 烟气中初始 SO_2 含量对 SO_3 平衡浓度的影响

考察初始 SO_2 含量对气相平衡组分的影响, 固定 SO_2 和 N_2 的初始摩尔量之和为 0.58 mol, 选取 500、700、900、1300 °C 四个温度分别计算不同 O_2 初始含量下的平衡气体含量, 其结果如图 3 所示。从图 3(a)

中可以看出, 在 500 °C 下, 初始 SO_2 浓度变化对平衡组分中 SO_3 和 O_2 含量影响较为显著。在初始 SO_2 含量从 0 增加到 10% 过程中, 平衡组分中的 SO_3 含量增加 59 mmol, 基本把烟气中的 O_2 消耗完全。但初始 SO_2 含量继续增加, 从 10% 增加到 30% 过程中, 平衡组分中的 SO_3 含量基本不再增加。这说明在 O_2 充分的条件下, 初始 SO_2 含量提高能增加由 SO_2 向 SO_3 转化的量, 但是由于冶炼过程是一个急剧耗氧过程, 冶炼烟道内 O_2 含量相对于 SO_2 是极低的, 冶炼烟气中 SO_2 的增加并不能对 SO_3 的生成有很大的促进作用。

从图 3(b)和(c)中可以看出, 在 700 °C 和 900 °C 的较高温度下, 初始 SO_2 含量的增加也会促进 SO_3 的生成, 但是随着温度升高促进作用减弱, 这也是由反应的放热特性所导致的。从图 3(d)中可以看出, 1300 °C 时, 平衡气相组分中不存在 SO_3 , 这与上述 2.1 节的分析相符。

烟气中 SO_2 含量取决于冶炼工艺和原料的含硫量, 难以从外部施加影响对其进行改变。此外, 结合第 2 节烟气初始 O_2 含量对 SO_3 平衡组分影响的计算结果可知, 抑制铜冶炼烟气中 SO_3 的生成, 降低烟气中 O_2 含量要比降低冶炼烟气中 SO_2 含量更可行, 效果也更明显。

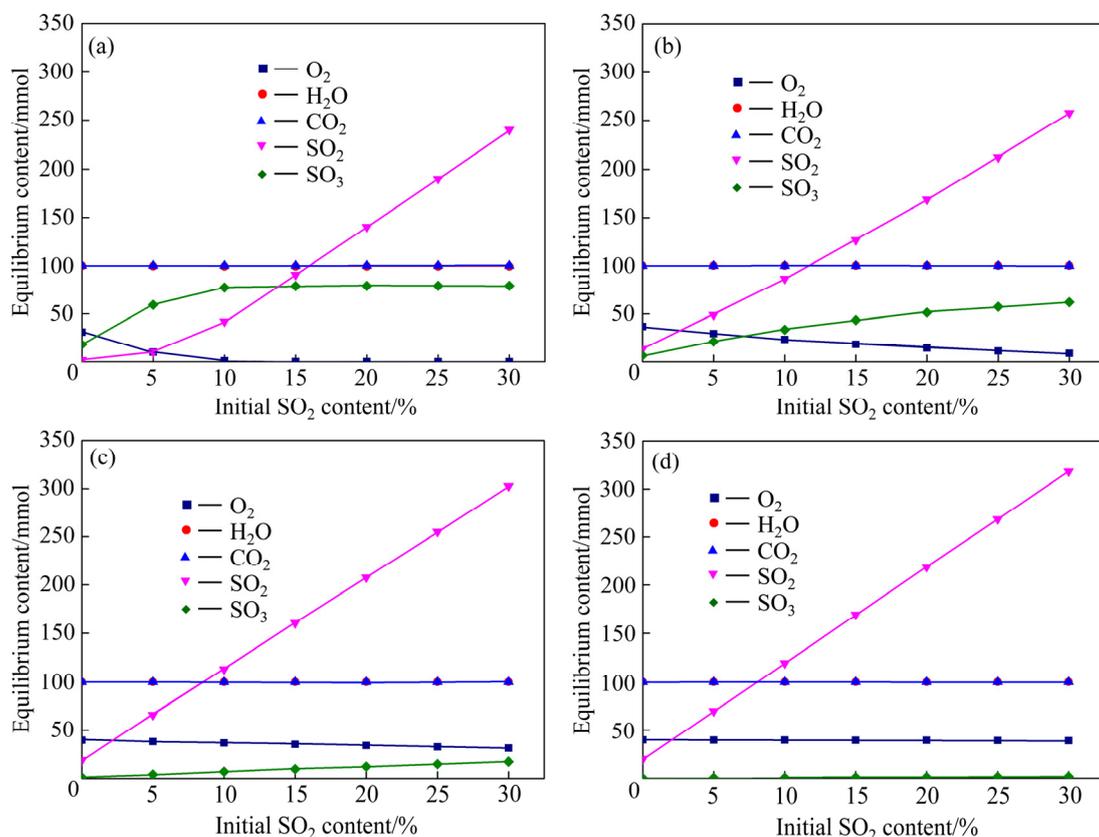


图 3 初始 SO_2 含量对平衡组分的影响

Fig. 3 Effect of initial amount of SO_2 on equilibrium gaseous amount: (a) 500 °C; (b) 700 °C; (c) 900 °C; (d) 1300 °C

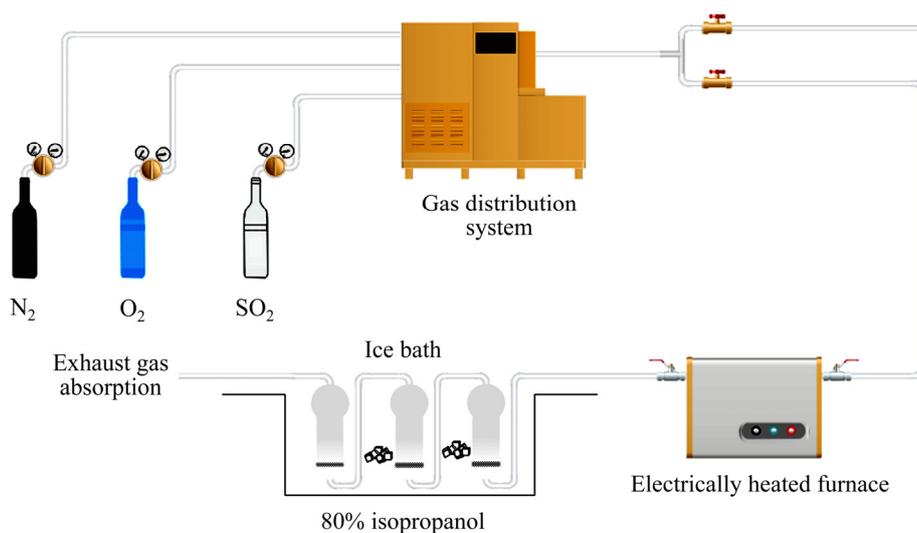


图4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental device

4 铜灰对烟气中 SO₂ 催化氧化的影响

4.1 铜灰催化氧化实验平台

为研究铜冶炼烟灰对 SO₃ 的催化氧化效果, 搭建了固相催化实验平台。实验平台主要由配气系统、反应系统和吸收系统三部分组成。根据实验要求的不同, 可以在实验平台进行均相实验以及铜灰异相催化实验, 实验装置如图4所示。

反应系统由管式炉、石英管、密封装置组成。温度调控范围为 200~1200 °C, 控温精度为 ±1 °C。

所用石英管内径 8 mm, 外径 12 mm, 长为 800~1000 mm。配气系统采用质量流量计精确控制流量。根据要求配置实验气体, 然后在反应系统内进行均相/非均相反应。反应结束后采用异丙醇吸收法^[21]捕集和检测 SO₃。

本文以山东某冶炼厂电除尘灰作为参照物开展了相关工作, 铜灰主要成分如表2所示, 其中位粒度直径为 5.504 μm, 比表面积为 1161 m²/kg, 其中 97% 的粒度 < 25.56 μm, 烟灰成分和粒度分析分别如表2和图5所示。

表2 铜厂电除尘灰主要元素定量分析

Table 2 Quantitative analysis of main elements of electric dust removal ash in copper plant (mass fraction, %)

Pb	S	Zn	As	SiO ₂	Cu	Al ₂ O ₃	Fe _T
11.4	10.5	9.95	9.19	7.02	5.91	3.88	3.52

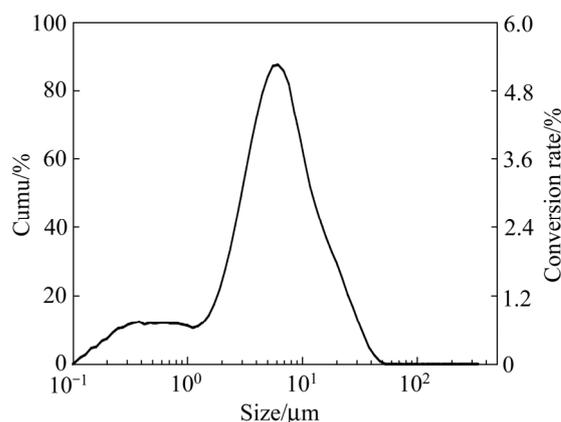


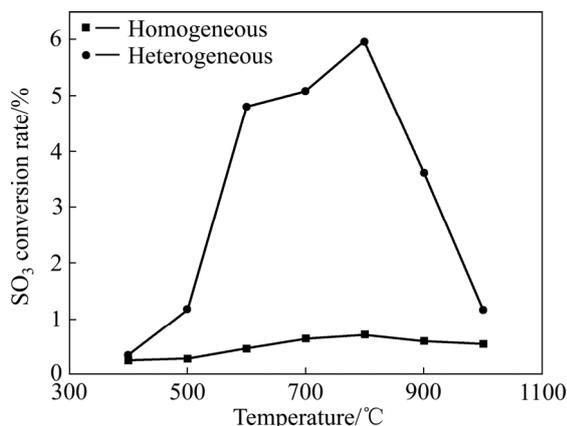
图5 铜厂电除尘灰粒度分析

Fig. 5 Particle size analysis of copper smelting ESP dust

将铜灰置于烟气固相催化实验平台进行 SO₂ 催化氧化实验, 实验设定气体总流量为 200 sccm、初始 O₂ 浓度为 0~25%、初始 SO₂ 浓度为 5%~25%、烟气温度区间 400~1000 °C, 进行铜灰对 SO₂ 催化转化影响的研究, 并将实验结果与均相实验(未添加铜灰进行催化)的结果进行对比, 实验结果分别如图5~7所示。

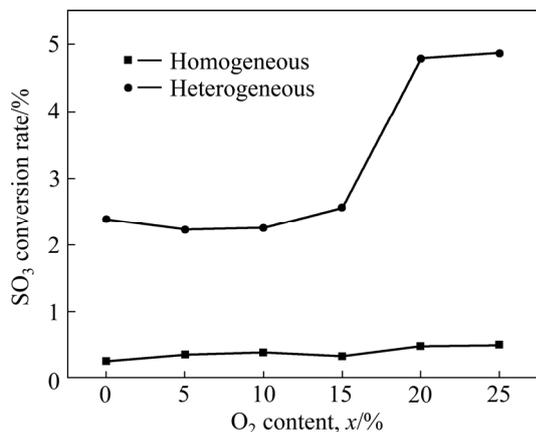
4.2 铜灰作用下温度对烟气中 SO₂ 催化氧化的影响

铜灰作用下温度对烟气中 SO₂ 催化氧化的影响如图6所示。从图6中可看出, 在未加入铜灰的均相实验条件下, SO₂ 的转化率在 400~1000 °C 间均没超过 1%。当加入铜灰后, SO₂ 的转化率大幅度提高, 并在 600~800 °C 时有一个 5%~6% 的最大值; 当温度超过 800 °C 时, 转化率开始下降, 温度成为反应的限制性环节。

图6 烟气温度对SO₂转化率的影响Fig. 6 Effect of flue gas temperature on SO₂ conversion ratio

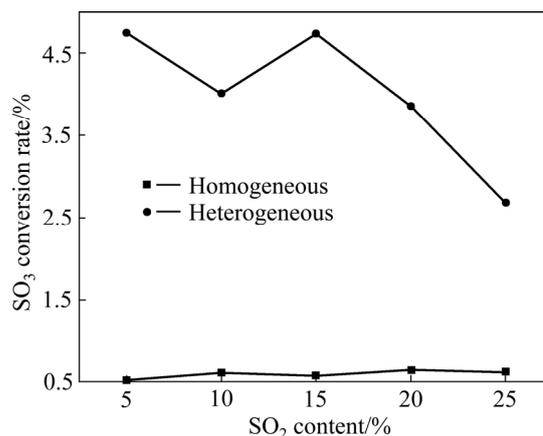
4.3 铜灰作用下O₂浓度对烟气中SO₂催化氧化的影响

铜灰作用下O₂浓度对烟气中SO₂催化氧化的影响如图7所示。从图7中可以看出,在未加入铜灰的均相实验条件下,烟气中SO₂的转化率随着氧气含量的增加不很明显。加入铜灰后,SO₂转化率有了很大提高,当O₂浓度高于15%时,SO₂转化率提高得更加迅速。

图7 O₂含量对SO₂转化率的影响Fig. 7 Effect of O₂ amount on SO₂ conversion

4.4 铜灰作用下初始SO₂浓度对烟气中SO₂催化氧化的影响

铜灰作用下初始SO₂浓度对烟气中SO₂催化氧化的影响如图8所示。从中可知,在铜灰作用下,烟气中初始SO₂浓度对SO₂催化氧化都有促进作用,所有试验数据点都大于均相条件下SO₂的转化率。

图8 初始SO₂含量对SO₂转化率的影响Fig. 8 Effect of initial SO₂ amount on SO₂ conversion ratio

4.5 均相模拟实验与铜灰异相催化实验结果分析

铜冶炼烟道中SO₃的形成主要有两部分,一部分是由均相氧化作用产生,另一部分是由铜灰等固相催化作用产生。基于FactSage软件的热力学模拟研究,主要说明温度、气相组成等因素对铜冶炼烟气中平衡组分和SO₂的均相氧化作用。在实验平台所做的铜灰对烟气中SO₂催化氧化实验,除了研究温度、气相组成等因素对冶炼烟气中SO₂的均相氧化作用外,更为主要的目的是对冶炼烟气中铜灰等固体颗粒物对SO₂的异相催化氧化作用进行研究。

研究表明:均相实验结果与热力学模拟研究结果中的变化趋势一致。随着温度升高,冶炼烟气中SO₂和O₂含量逐渐增加,SO₃含量逐渐减少;初始O₂含量的增加能明显促进SO₂向SO₃的转化;初始SO₂浓度的增加对SO₃生成的影响相对较小。在实验平台获得的均相研究数据,SO₃转化率均小于热力学软件的模拟结果,这是由于实验中无法达到热力学完全平衡时状态,且有一定的动力学限制。从加入铜灰后的SO₂异相催化实验中可以清楚看到,铜灰对于SO₂向SO₃的转化作用效果很明显。在不同温度、不同初始O₂浓度、不同初始SO₂浓度条件下,铜灰异相催化效果均明显高于均相氧化结果。

5 结论

1) 温度对铜冶炼烟气中SO₃平衡组分有显著影响。在500℃以下,冶炼烟气中的H₂O蒸气能够与SO₃结合生成H₂SO₄;在500~1300℃范围内,H₂SO₄不能稳定存在。在400~1100℃,随着温度升高,冶炼

烟气中SO₂和O₂含量逐渐增加,SO₃含量逐渐减少,在1100~1300℃内,SO₃不能稳定存在,完全分解为SO₂和O₂。

2) 热力学计算结果表明铜冶炼烟气中初始O₂浓度和SO₂浓度均对体系SO₃平衡组分有显著的影响。在400~1100℃内,初始O₂含量的增加能明显促进SO₂向SO₃的转化,而初始SO₂浓度的增加对SO₃生成的影响相对小一些。抑制铜冶炼烟气中SO₃生成,降低烟气中O₂含量要比降低冶炼烟气中SO₂含量可行、效果也更加明显。

3) 铜冶炼烟道飞灰明显促进了SO₂向SO₃的转化。在铜灰作用下,体系温度、烟气中初始O₂浓度和SO₂浓度对SO₂转化率的影响远远大于均相条件的影响。

REFERENCES

- [1] WU Q R, SUN X H, SU Y B, WEN M N, LI G L, XU L W, LI Z J, REN Y J, ZOU J, ZHENG H T, TANG Y, DUAN L, WANG S X, ZHANG Q. Behavior of sulfur oxides in nonferrous metal smelters and implications on future control and emission estimation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(15): 8796–8804.
- [2] 余齐汉. 熔炼烟气中SO₃发生率的研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2002, 19(1): 18–21.
YU Qi-han. The study on SO₃ productivity rate in oxygen-rich flash smelting gas[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2002, 19(1): 18–21.
- [3] 郭学益, 闫书阳, 王亲猛, 王松松, 田庆华. 富氧熔炼烟气中三氧化硫的形成与抑制[J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(10): 2077–2085.
GUO Xue-yi, YAN Shu-yang, WANG Qin-meng, WANG Song-song, TIAN Qing-hua. Formation and inhibition of SO₃ in oxygen-enriched smelting flue gas[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(10): 2077–2085.
- [4] 丁晨星. 闪速炼铜烟气SO₃发生率上升原因分析和对策[J]. *中国有色冶金*, 2000, 29(2): 53–55.
DING Chen-xing. Analysis and countermeasures on rising of SO₃ in flue gas from copper flash smelting[J]. *Nonferrous Smelting*, 2000, 29(2): 53–55.
- [5] BELO L P, ELLIOTT L K, STANGER R J, SPÖRL R, SHAH K V, MAIER J, WAL T F. High-Temperature Conversion of SO₂ to SO₃: Homogeneous experiments and catalytic effect of fly ash from air and oxy-fuel firing[J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28: 7243–7251.
- [6] SARBASSOV Y, LUNBO D, MANOVIC V, ANTHONY E J. Sulfur trioxide formation/emissions in coal-fired air- and oxy-fuel combustion processes: A review[J]. *Greenhouse Gases Science & Technology*, 2018, 8(5): 402–428.
- [7] 荆巨峰. 铜富氧澳斯麦特熔炼余热锅-运行实践[J]. *世界有色金属*, 2015, 22(2): 55–57.
JING Ju-feng. The operation practice of copper oxygen-enriched Ausmelt smelting waste heat boiler[J]. *World Nonferrous Metal*, 2015, 22(2): 55–57.
- [8] 张基标, 郝卫, 赵之军, 胡兴胜, 殷国强. 锅炉烟气低温腐蚀的理论研究和工程实践[J]. *动力工程学报*, 2011, 31(10): 730–733.
ZHANG Ji-biao, HAO Wei, ZHAO Zhi-jun, Hu Xing-sheng, YIN Guo-qiang. Theoretical and practical research on mechanism of low-temperature corrosion caused by boiler flue gas[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2011, 31(10): 730–733.
- [9] 李加护, 任忠强, 方立军. 烟气酸露点估算方法[J]. *热力发电*, 2018, 47(3): 56–61.
LI Jia-hu, REN Zhong-qiang, FANG Li-jun. Estimation methods for acid dew point of flue gas[J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(3): 56–61.
- [10] XIANG B X, ZHANG M, YANG H R, LU J F. Prediction of acid dew point in flue gas of boilers burning fossil fuels[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(4): 3365–3373.
- [11] 张雪峰, 杨正大, 李响, 常倩云, 王毅, 苏秋风, 邱坤赞, 郑成航, 高翔. SO₃对高湿静电场中电晕放电的影响机制研究[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(9): 3268–3275.
ZHANG Xue-feng, ZHANG Zheng-da, LI-Xiang, CHANG Qian-yue, WANG Yi, SU Qiu-feng, QIU Shen-zan, ZHEN Cheng-hang, GAO Xiang. Effect of SO₃ on corona discharge in high humidity electrostatic field[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(9): 3268–3275.
- [12] YAN C, ZHOU H C, JIANG W, CHEN C W, PAN W P. Studies of the fate of sulfur trioxide in coal-fired utility boilers based on modified selected condensation methods[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(9): 3429–3434.
- [13] GALLOWAY B D, SASMAZ E, PADAK B. Binding of SO₃ to fly ash components: CaO, MgO, Na₂O and K₂O[J]. *Fuel*, 2015, 145: 79–83.
- [14] PATRICIA C. Status of flue gas desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physico-chemical control processes of wet limestone FGDs[J]. *Fuel*, 2015, 144: 274–286.

- [15] WANG Z Q, HUAN Q C, QI C L, ZHANG L Q, CUI L, XU X R, MA C Y. Study on the removal of coal smoke SO₃ with CaO[J]. *Energy Procedia*, 2012, 14: 1911–1917.
- [16] 潘丹萍, 吴昊, 黄荣廷, 张亚平, 杨林军. 石灰石-石膏法烟气脱硫过程中 SO₃ 酸雾脱除特性[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(2): 311–316.
PAN Dan-feng, WU Hao, HUANG Rong-ting, ZHANG Ya-ping, YANG Lin-jun. Removal properties of sulfuric acid mist during limestone-gypsum flue gas desulfurization process[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(2): 311–316.
- [17] 李小龙, 段玖祥, 李军状, 张文杰. 燃煤电厂烟气中 SO₃ 控制技术及其测试方法探讨[J]. *环境工程*, 2017, 35(5): 98–102.
LI Xiao-long, DUAN Jiu-xiang, LI Jun-zhuang, ZHANG Wen-jie. Control technology and determination methods of SO₃ in flue gas from coal-fired power plants[J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(5): 98–102.
- [18] 胡冬, 王海刚, 郭婷婷, 孙保民. 燃煤电厂烟气 SO₃ 控制技术研究及进展[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(35): 92–99.
HU Dong, WANG Hai-gang, GUO Ting-ting, SUN Bao-ming. Research and development of mitigating technology of SO₃ in flue gas from coal power plants[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(35): 92–99.
- [19] 潘云从, 蒋继穆. 重有色金属冶炼设计手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
PANG Cong-yun, JIANG Ji-mu. Heavy nonferrous metals smelting design manual[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.
- [20] 邱竹贤. 有色金属冶金学[M]. 冶金工业出版社, 1988.
QIU Zhu-xian. Non-ferrous metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988.
- [21] EPA Method-8 2009 Determination of sulfuric acid and sulfur dioxide emissions from stationary sources[S].

SO₃ formation and catalytic oxidation of SO₂ by fly ash in copper smelting flue gas

ZHANG Qin^{1,2}, WU Ya-nan¹, CHEN Jia-cheng¹, SU Ying-bin¹, LIU Hai-peng¹, YANG Hong-ying^{1,2}

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallurgical Mineral, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The thermodynamic equilibrium of gas phase system in copper smelting flue gas was studied by FactSage 7.2 software. The effects of temperature and major gas phase composition on SO₃ content in equilibrium flue gas were investigated. In addition, the effect of copper smelting ash on SO₂ catalytic oxidation was studied on the solid-phase catalytic experimental platform. The results show that temperature and initial content of O₂ in flue gas have great influence on the equilibrium concentration of SO₃, while initial content of SO₂ in flue gas has little effect on the equilibrium concentration of SO₃. The fly ash in copper smelting flue promotes the transformation of SO₂ to SO₃.

Key words: copper metallurgy; thermodynamics; sulfur trioxide; fly ash; catalytic oxidation

Foundation item: Project(2017YFC0210403) supported by the National Basic Research Development Program of China

Received date: 2019-08-16; **Accepted date:** 2020-05-28

Corresponding author: YANG Hong-ying; Tel: +86-24-83673932; E-mail: yanghy@smm.neu.edu.cn

(编辑 李艳红)