

多层填料错流旋转填料床 深度净化烧结烟气

段姗姗,袁志国*,高亚洁,张春阳,李航天

(中北大学超重力化工过程山西省重点实验室,山西省超重力化工工程技术研究中心,
山西太原 030051)

摘要:针对钢铁冶炼行业中烧结烟气的特点及目前工业生产中所面临的困难,采用多层填料错流旋转床为吸收设备,NaOH为吸收剂,开展了超重力因子 β 、液气比 L/G 和不同进口 SO_2 浓度对脱硫率 η 的影响实验研究。结果表明,在 $\beta=55$ 、 $L/G=2.0\text{ L/m}^3$ 、 $C_{SO_2,in}=1\ 680\text{ mg/m}^3$ 时,双层进液的脱硫率是单层进液的1.7倍,出口浓度低于 35 mg/m^3 ,可实现深度净化。浓度增加到 $C_{SO_2,in}=4\ 396\text{ mg/m}^3$ 时,脱硫率仅下降0.75%,说明多层错流床适用的 SO_2 范围较宽。同时,可脱除细颗粒物,低浓度粉尘的出口浓度低于 10 mg/m^3 ,实现同时深度脱硫除尘,达到超低排放标准。

关键词:旋转填料床;烧结烟气;脱硫率;除尘效率

中图分类号:X511

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2019)05-0207-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.05.046

Deep purification of sintering flue gas by multi-layer packing cross-flow rotating packed bed

DUAN Shan-shan, YUAN Zhi-guo*, GAO Ya-jie, ZHANG Chun-yang, LI Hang-tian

(Shanxi Provincial Key Laboratory of Hige-oriented Chemical Engineering, Research Center of Shanxi Province for Hige-oriented Chemical Engineering and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Given the characteristics of sintering flue gas in the iron and steel smelting industry and some difficulties faced in industrial production, the experimental study on SO_2 absorption by NaOH solution in a multi-layer packing cross-flow rotating packed bed is performed and the effects of high gravity factor β , liquid-gas ratio L/G and different input concentrations of SO_2 on the removal rate of SO_2 are investigated. The results show that the desulfurization rate of the double-layer liquid feed is 1.7-2 times that of the single-layer liquid feed when $\beta=55$, $L/G=2\text{ L/m}^3$, $C_{SO_2,in}=1\ 680\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Under the same conditions, the outlet concentration is below $35\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, achieving deep purification. The desulfurization rate decreases by only 0.75% when SO_2 input concentration increases to $4\ 396\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, indicating that this multi-layer packing cross-flow rotating packed bed is suitable for a wide range of SO_2 input concentrations. Meanwhile, fine particles can be removed by it, and the outlet concentration of low concentration dust is less than $10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, translating that the bed can achieve simultaneous deep desulfurization and dust removal to achieve ultra-low emission standards.

Key words: rotating packed bed; sintering flue gas; desulfurization rate; dust removal efficiency

工业废气是污染物 SO_2 的主要来源,随着空气污染日趋严重,国家相应出台了一系列的政策加强对钢铁烧结烟气的控制,从2012年到2018年,烧结烟气的 SO_2 和粉尘排放标准由 200 mg/m^3 和 50 mg/m^3 下降到 35 mg/m^3 和 10 mg/m^3 ^[1-3],对烧结烟气行业来说是新的挑战和发展。

而烧结烟气主要是原料在高温烧结过程中烧结台上产生的,由于产生烟气的过程有所不同,所以与火电厂的烟气相比是存在一定差别的,具有烟气体

量大且变化频繁($4\ 000\sim 6\ 000\text{ m}^3/\text{t}$)、 SO_2 浓度波动大($300\sim 6\ 000\text{ mg/m}^3$)、粉尘含量高($0.5\sim 15\text{ g/m}^3$)等特点^[4-5]。净化烧结烟气最为有效的方法是末端治理,国内大部分烧结厂采用电除尘,除尘后粉尘浓度在 $40\sim 80\text{ mg/m}^3$ ^[6];脱硫工艺则是直接套用火电厂的技术,以石灰石-石膏法居多^[7-8]。但是石灰石-石膏法存在易堵塞结垢的问题,并且所需的液气比较大,运行费用较高,出口 SO_2 浓度在 $0\sim 200\text{ mg/m}^3$ ^[9],在新的排放标准下,必须对原有装置和技术进行改

收稿日期:2018-09-27;修回日期:2019-03-07

作者简介:段姗姗(1992-),女,硕士生;袁志国(1978-),男,博士,教授,研究方向为工业气体深度净化及流场模拟和可视化,通讯联系人,57559139@qq.com。

造或增加处理级数,但大多旧厂存在场地紧张等问题^[10],而传统的设备占地面积和空间大,改造难以实施,因此,研发烧结烟气高效脱硫除尘设备将成为实现经济型发展的重要课题。

超重力技术是一种新型技术,具有强化传质传递过程、实现自清洗防止填料堵塞的独特优势^[11-13]。学者们^[14-16]将超重力技术与各种脱硫工艺相结合进行了大量研究,结果表明,旋转填料床确实可减小设备体积、有效提高脱硫除尘效率。

为此,本研究针对烧结烟气的特点及亟待解决的问题,采用 NaOH 为吸收剂,在多层填料错流旋转床中模拟脱除烟气中的微细粉尘和 SO₂ 实验研究,探索各操作参数分别对脱硫率和除尘效率的影响,为超重力深度净化烧结烟气的工业化提供理论支持。

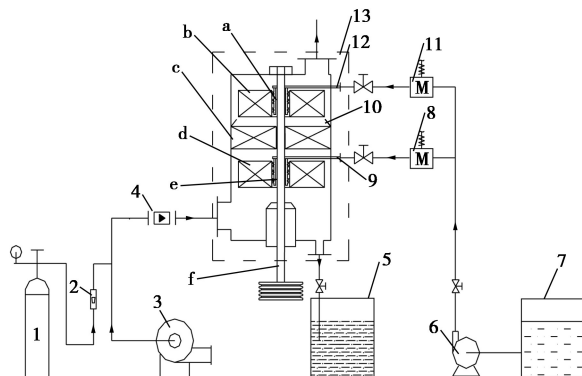
1 实验

1.1 实验试剂

SO₂ 气体(体积分数 ≥ 99.9%,晋太气体有限公司),NaOH(片状工业纯,内蒙古君正化工有限责任公司),粉煤灰粒径 0.01~5 μm(平均粒径 2.45 μm)。

1.2 实验装置及流程

实验装置多层填料错流旋转床^[17]如图 1 中 13 所示,由中北大学超重力化工过程山西省重点实验室自制。该设备不同于普通旋转填料床,由 3 部分构成,分别为上下 2 个填料转子和中间 1 个填料定子,液体可由上下 2 个进液口同时进入。填料为塑料花环填料,具有空隙率大、不易堵塞、阻力小等特点^[18]。特性参数如表 1 所示。



1—SO₂ 钢瓶; 2—转子流量计; 3—鼓风机; 4—涡街流量计; 5, 7—液体储罐; 6—离心泵; 8, 11—电磁流量计; 9, 12—进液管; 10—集液槽; 13—多层填料错流超重力装置; a, e—液体分布器; b, d—转子; c—填料定子; f—转轴

图 1 实验工艺流程

表 1 填料的特性参数

层数	内径/mm	外径/mm	轴向高度/mm
1	65	199	$h_1 = 100$
2	65	219	$h_2 = 79$
3	65	199	$h_3 = 100$

实验工艺流程如图 1 所示,空气由鼓风机鼓入和粉尘或来自钢瓶的 SO₂ 混合,经过流量计计量之后从底部的气体进口进入,在压力的作用下依次经过每层填料,最后由顶部的气体出口排出。水或脱硫液从储罐经过泵从液体进口进入,经液体分布器均匀地喷洒在填料内缘,由内向外经过高速旋转的填料被切割成液丝、液滴和液膜,与自下而上的气体充分接触后,由底部的液体出口排出到储液槽。

1.3 表征方法

旋转填料床进出口 SO₂ 浓度采用综合烟气分析仪 KM9106 在线监测,采用 TFC-30s 粉尘采样仪对粉尘进行采样后称重计算进出口粉尘浓度。除尘效率或脱硫率 η 的计算公式如下:

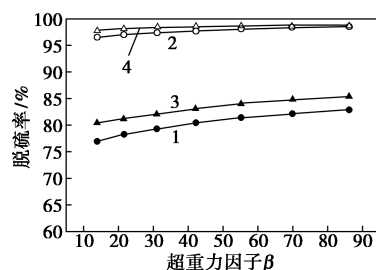
$$\eta = (C_{in} - C_{out}) / C_{in} \times 100\%$$

式中, C_{in} 和 C_{out} 分别为旋转填料床进、出口烟气中 SO₂ 或粉尘质量浓度, mg/m³。

2 结果与讨论

2.1 超重力因子 β 对脱硫率 η 的影响

当液气比分别为 2.0、2.5 L/m³, 烟气流量为 170 m³/h, 进口 SO₂ 质量浓度为 1 680 mg/m³ 时, 考察超重力因子 β 对脱硫率 η 的影响, 结果如图 2 所示。



1—单层进液 $L/G=2.0$ L/m³; 2—双层进液 $L/G=2.0$ L/m³; 3—单层进液 $L/G=2.5$ L/m³; 4—双层进液 $L/G=2.5$ L/m³

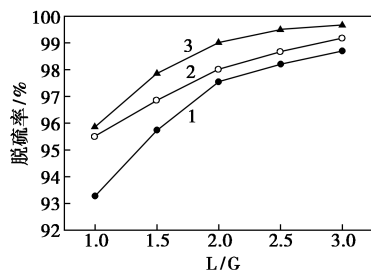
图 2 超重力因子 β 对脱硫率 η 的影响

由图 2 可知,无论双层进液与单层进液,随着 β 增大, η 均呈现增长的趋势。当 $\beta < 55$ 时, η 的增长趋势较为显著,当 $\beta > 55$ 时, η 的增加趋势变缓。这主要是因为当 $\beta < 55$ 时,高速运转的填料对液体具

有切割作用,使得液体形成更微小的液滴液丝液膜,气液接触面积增加,同时, β 增大也会使得气液相界面更新速率加快,从而极大地提高了 SO_2 脱除效率;当 $\beta > 55$ 时,一方面随 β 增大,气液接触时间显著缩短,虽然以上强化仍然存在,但强化和削弱效果有所抵消,另一方面在 $\beta = 55, L/G = 2.0 \text{ L/m}^3$ 时,单层进液和双层进液的脱硫率已经分别达到81.43%、98.01%,出口 SO_2 浓度已经分别低于350、35 mg/m^3 ,推动力减小导致吸收率降低,使 η 增加变缓。当 $\beta = 55, L/G = 2.0 \text{ L/m}^3$ 和 $L/G = 2.5 \text{ L/m}^3$ 时,双层进液的脱硫率是单层进液的1.7~2.0倍,这是因为当双层进液时,气体通过填料定子时,气体与填料间的相对滑移速度增大,使得气体得到再分布,从而加剧气相扰动,传质效率增加^[19],进而增大脱硫率 η 。综合考虑,超重力因子 β 控制在55~86较适宜。

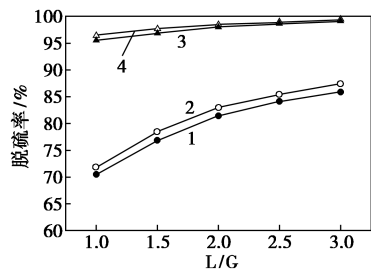
2.2 液气比 L/G 对脱硫率 η 的影响

在烟气流量为 $170 \text{ m}^3/\text{h}$,进口 SO_2 浓度为 1680 mg/m^3 ,超重力因子 β 分别为55、86时,考察液气比 L/G 对脱硫率 η 的影响,结果如图3所示。



1— $G = 140 \text{ m}^3/\text{h}$; 2— $G = 170 \text{ m}^3/\text{h}$; 3— $G = 200 \text{ m}^3/\text{h}$

(a) $C_{\text{in}} = 1680 \text{ mg/m}^3, \beta = 55$



1—单层进液 $\beta = 55$; 2—单层进液 $\beta = 86$; 3—双层进液 $\beta = 55$;

4—双层进液 $\beta = 86$

(b) $G = 170 \text{ m}^3/\text{h}, C_{\text{in}} = 1680 \text{ mg/m}^3, \beta = 55, 86$

图3 液气比 L/G 对脱硫率 η 的影响

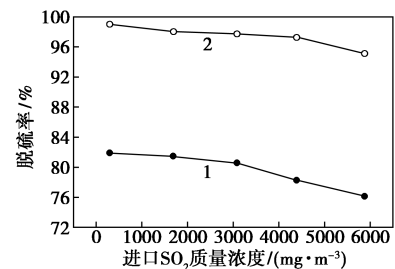
由图3可看出,在相同的操作条件下, η 随 L/G 增大而增大,这是因为在 β 和进口 SO_2 浓度不变时, L/G 增加,处理单位烟气的液体量增加,填料的润湿程度和液膜的表面更新速率都增大。从图3(a)可以看出,在气量为 $140 \text{ m}^3/\text{h}$ 时这种增长趋势更为明

显,并且在较小的液气比之下,液量较少脱硫率较低,随着 L/G 增加,填料润湿程度增加,脱硫率明显提高;同时,液相中 SO_2 浓度随着液量的增加而降低,传质推动力加强,更有利于吸收,使 η 增加。当 $L/G > 2 \text{ L/m}^3$ 时,增加趋势变缓,这是因为填料充分润湿后,液量不断增加使液膜厚度增大,传质阻力增大,因此脱硫率 η 增加变得较为缓慢。

从图3(b)可知,在相同操作条件下,双层进液的脱硫率 η 是单层进液的1.2倍左右,当 $\beta = 55, L/G$ 分别为 $2.0, 3.0 \text{ L/m}^3$ 时,双层进液的脱硫率分别为98.01%、99.17%。综合考虑运行费用和脱硫率, L/G 控制在 2 L/m^3 为宜,出口浓度低于 35 mg/m^3 ,可实现单台设备深度净化的要求。

2.3 入口 SO_2 浓度对脱硫率 η 的影响

在烟气流量为 $170 \text{ m}^3/\text{h}$,超重力因子 β 为55和液气比为 2.0 L/m^3 时,考察不同入口浓度对脱硫率 η 的影响,结果如图4所示。



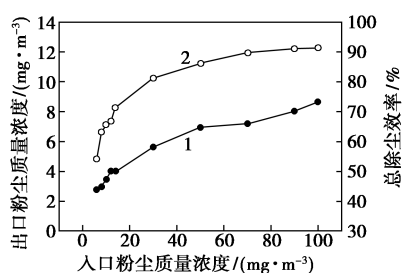
1—单层进液; 2—双层进液

图4 入口 SO_2 浓度对脱硫率 η 的影响

从图4可以看出,随着入口 SO_2 浓度的增加,脱硫率逐渐减小,减小的幅度渐渐增大。这是因为入口浓度增加,气相传质推动力会增加,有利于脱硫;而另一方面,当单位处理量达到一定值后,推动力就会下降,同时,浓度增大,使得一部分 SO_2 来不及与吸收液充分接触,导致脱硫率下降。从实验结果看,当单层进液时, SO_2 进口浓度从 1680 mg/m^3 升高到 4396 mg/m^3 ,脱硫率从81.43%降低到78.28%,下降幅度在3%左右;而当双层进液时,在相同操作条件下,脱硫率从98.01%下降到97.26%,下降幅度仅为0.75%。这充分说明多层填料错流床相比于普通旋转床适用的 SO_2 范围较宽。

2.4 入口粉尘浓度对除尘效率的影响

超重力因子55,气量为 $170 \text{ m}^3/\text{h}$,液气比为 2.0 L/m^3 时,考察入口粉尘浓度对除尘效率的影响,如图5。



1—出口粉尘浓度;2—总除尘效率

图 5 入口粉尘浓度对除尘效率的影响

从图 5 中可以看出,随着入口粉尘浓度的增加,除尘效率逐渐增大。当入口粉尘浓度低于 10 mg/m^3 时,除尘效率在 65% 左右,出口粉尘浓度小于 5 mg/m^3 ; 当入口粉尘浓度由 30 mg/m^3 增加到 100 mg/m^3 时,除尘效率由 81.25% 升高到 91.35%,这可能是因为粉尘入口浓度变高时,粒子间的间距变小,粒子与液滴之间碰撞的概率增加,进而加强了粉尘的收集^[20]。但出口粉尘浓度仍在 $5.60 \sim 8.65 \text{ mg/m}^3$, 满足 10 mg/m^3 的排放标准。

2.5 工程应用

将超重力技术推广应用到某厂中,充分利用超重力技术强化传递、持液量小、设备体积小、填料层具有自清洗作用的优势^[12],采用钠碱吸收法进行了超重力脱硫的工业侧线试验,经过超重力设备后,尾气中 SO_2 含量下降至 35 mg/m^3 以下,脱硫效率达 99% 以上,粉尘浓度也在 10 mg/m^3 以下,说明该技术具有较大优势。

3 结论

(1) 多层填料错流旋转床中 NaOH 吸收 SO_2 , 无论单层进液还是双层进液,受超重力因子 β 、液气比 L/G 的影响显著,脱硫率 η 随其增长而增大,随进口 SO_2 浓度的增加而降低。

(2) 在 $\beta = 55$, $L/G = 2.0 \text{ L/m}^3$, $C_{\text{SO}_2, \text{in}} = 1680 \text{ mg/m}^3$ 时,多层填料错流旋转床双层进液比单层进液脱硫率提高 16.58%,出口浓度从 300 mg/m^3 左右降低到 35 mg/m^3 以下,实现了从粗脱到精脱的转换。进口浓度增加到 4396 mg/m^3 ,脱硫率仅降低 0.75%,适用 SO_2 浓度范围更宽。同时可有效脱除粉尘,避免填料堵塞。

参考文献

[1] 环保部.GB 28662—2012.钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准[S].

- [2] 冯凯.关于征求《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准》等 20 项国家污染物排放标准修改单(征求意见稿)意见的函[J].砖瓦,2017,(7):45-48.
- [3] 中华人民共和国生态环境部.钢铁企业超低排放改造工作方案(征求意见稿)[Z].2018.
- [4] 鲁健.烧结烟气特点及处理技术的发展趋势[J].内蒙古科技大学学报,2012,31(3):227-230.
- [5] 温斌,宋宝华,孙国刚,等.钢铁烧结烟气脱硝技术进展[J].环境工程,2017,35(1):103-107.
- [6] 张璞,王珩,李鹏飞,等.烧结烟气中污染防治技术应用现状[J].环境工程,2017,35(7):101-105.
- [7] 李小丽.国内烧结烟气脱硫工艺综述[C]//烧结工序节能减排技术研讨会文集,2009.
- [8] 张春霞,王海风,齐渊洪.烧结烟气污染物脱除的进展[J].钢铁,2010,45(12):1-11.
- [9] 李玉然,闫晓森,叶猛,等.钢铁烧结烟气脱硫工艺运行现状概述及评价[J].环境工程,2014,32(11):82-87.
- [10] 程罡,余波.冶金行业烟气脱硫现状分析与典型工艺介绍[J].工业安全与环保,2011,37(4):25-26.
- [11] Lin C C, Chu C R. Mass transfer performance of rotating packed beds with blade packings in carbon dioxide absorption into sodium hydroxide solution[J]. Separation & Purification Technology, 2015, 150:196-203.
- [12] 刘有智.超重力化工过程与技术[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [13] Lin C C, Kuo Y W. Mass transfer performance of rotating packed beds with blade packings in absorption of CO_2 into MEA solution[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2016, 97:712-718.
- [14] Jiang X, Liu Y, Meiduo G U. Absorption of sulphur dioxide with sodium citrate buffer solution in a rotating packed bed[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2011, 19(4):687-692.
- [15] Chu G W, Fei J, Cai Y, et al. Removal of SO_2 with sodium sulfite solution in a rotating packed bed[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(6):2329-2335.
- [16] Yuan Z, Liu Y, Song W, et al. Removal of SO_2 from flue gas by sodium phosphate buffer solution in a rotating packed bed[J]. Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research, 2014, 32(2):1397-1406.
- [17] 中北大学.一种多级错流旋转填料床传质与反应设备:CN, 201410672155X[P].2015-04-01.
- [18] 王伟之,张锦瑞,张书廷,等.花环填料在钠碱烟气脱硫中的应用[J].煤炭学报,2007,32(11):1187-1190.
- [19] 梁鹏飞,袁志国,高亚洁,等.填料定子对分层填料错流超重力装置强化气膜控制传质过程的研究[J].天然气化工:C1 化学与化工,2018,43(2):40-45.
- [20] Mohan B R, Biswas S, Meikap B C. Performance characteristics of the particulates scrubbing in a counter-current spray-column[J]. Separation & Purification Technology, 2008, 61(1):96-102. ■