

# 错流旋转填料床中络合铁-888 法 脱除模拟气中 $H_2S$

于 永, 刘有智, 祁贵生

(中北大学山西省超重力化工工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

**摘要:**以错流旋转填料床为脱硫设备, 络合铁-888 复合体系为脱硫剂, 对模拟气中的  $H_2S$  进行了脱硫实验研究。考察了气液流量比、超重力因子、气体流量、 $H_2S$  入口质量浓度对脱硫率的影响, 并对比分析了 888、络合铁及络合铁-888 复合体系的脱硫效果。结果表明, 在气、液接触极短时间内, 络合铁-888 复合体系获得了 99% 以上的脱硫率, 较 888 及络合铁脱硫剂的脱硫率明显提升, 说明脱硫剂复合之后性能得到优化, 脱硫能力更强。相比 888 脱硫剂, 络合铁体系更适用于旋转填料床脱硫过程, 其受气体流量变化影响较大, 适合于脱除低含硫尾气中  $H_2S$  的场合。

**关键词:** 错流旋转填料床; 脱硫; 络合铁; 888;  $H_2S$

**中图分类号:** TE992.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2014)07-0140-05

## $H_2S$ removal from analog gas by chelated iron-888 method in a cross-flow rotating packed bed

YU Yong, LIU You-zhi, QI Gui-sheng

(Research Center of Shanxi Province for High Gravity Chemical Engineering and Technology,  
North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:**  $H_2S$  removal from analog gas by chelated iron-888 method is investigated in a cross-flow rotating packed bed. The influences of gas-liquid flow ratio, high gravity factor, gas flow rate and mass concentration of  $H_2S$  in feed gas on  $H_2S$  removal efficiency are studied. The desulfurization effects of 888, chelated iron and chelated iron-888 system are comparatively analyzed. It illustrates that over 99% of  $H_2S$  removal efficiency of chelated iron-888 multiplex desulfurizer can be acquired in a very short gas-liquid contact time, which is obviously promoted compared with the 888 desulfurizer and chelated iron desulfurizer. Experimental results show that the desulfurization properties are optimized after the desulfurizers are recombined and the desulfurization ability of multiplex desulfurizer becomes stronger. Compared with the 888 desulfurizer, chelated iron desulfurizer is more suitable for the desulfurization process of rotating packed bed, which is greatly affected by the change of gas flow rate and is appropriate for the removal of low-concentration  $H_2S$ .

**Key words:** cross-flow rotating packed bed; desulfurization; chelated iron; 888;  $H_2S$

在石油化工、天然气化工、煤化工等生产过程中, 都会产生含硫化氢( $H_2S$ )的气体。气体中  $H_2S$  的存在不仅腐蚀仪表管道, 影响化工生产过程<sup>[1]</sup>, 更会危害人体健康, 造成环境污染。因此, 脱除气体中  $H_2S$  就成为现代化工生产过程中的重要环节。根据  $H_2S$  的理化性质及来源, 众多脱硫方法应运而生, 其中湿式氧化法因其适用范围广、处理量大、脱硫效率高、可回收硫磺等特点而应用最多, 已成为国内外主流的脱硫方法<sup>[2]</sup>, 并形成了许多各具特色的脱硫工艺, 目前工业应用较多的方法有 ADA 法、络合铁法、栲胶法、PDS(888)法等。但因研发及工程化差异, ADA 法及络合铁法在国外应用较多<sup>[3-6]</sup>, 以美国、英国、法国等为代表; 而栲胶法及 PDS

(888)法则在国内应用较多, 属我国特有的脱硫技术。

ADA 法、络合铁法、栲胶法、PDS(888)法, 这 4 种脱硫方法在工业化应用过程中各具特色, 各有优缺点。以国内应用为例, 单独使用 PDS(888)法及栲胶法的脱硫企业最多, 工艺较成熟; 但存在脱硫液硫容偏低、再生速度慢等缺点, 从而导致脱硫液循环量大, 吸收及再生设备庞大, 能耗高, 设备投资大等问题; 同时, 脱硫过程中所产生的硫颗粒较微细, 采用浮选-熔硫模式能耗较高, 这也导致脱硫系统的物能消耗增大, 费用增加。对此, 人们进行了大量的探索与实践, 提出了更加高效的复合脱硫方法, 即 2 种或 2 种以上的脱硫剂复合使用的新技术, 以强化

收稿日期: 2014-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(21376229); 山西省研究生优秀创新项目(20103084); 山西省高等学校科技创新项目(2013128); 山西省科学技术发展计划(工业部分)(20130321035-02)

作者简介: 于永(1979-), 男, 博士生, 讲师, 从事超重力过程强化方面研究; 刘有智(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 从事化工过程强化方面的研究, 通讯联系人, 0351-3921986, lyzzhongxin@126.com。

系统的脱硫性能,达到节能降耗、节约成本的经济效果。相关研究如广西大学张冬云等<sup>[7]</sup>对栲胶-络合铁体系进行了脱硫研究,发现适宜的栲胶浓度有利于脱硫液再生,增加溶液中络合铁的浓度可增大脱硫液硫容。中国氮肥工业协会王文善<sup>[8]</sup>在其文章中也提出复合脱硫剂,其以栲胶法为例,在栲胶溶液中加入888,与单独栲胶法相比,硫容可提高1倍,液体循环量可减少1/3~1/2,不但降低电耗,还可以脱除一些有机硫。

对于脱硫设备,目前工业应用以塔设备为主,包括填料塔、筛板塔、鼓泡塔等,但存在气液流动不均匀、相间传质效率低、设备体积庞大、维修困难、能耗高等缺点。而超重力旋转填料床作为一种新型、高效的传质设备具有传质效率高、设备体积小、安装维修方便、能耗低等优点,在气体净化领域表现出独特的优势<sup>[9-11]</sup>。鉴于此,本文中选用硫容大、脱硫速率快、绿色环保的络合铁法<sup>[12-14]</sup>,与脱硫剂活性较高、副反应少、应用范围广的888法复合,采用错流旋转填料床为脱硫设备,对模拟气中的H<sub>2</sub>S开展了脱硫实验研究,考察了各种操作参数对脱硫率的影响,并对比分析了888、络合铁及络合铁-888复合体系的脱硫性能,旨在得出错流旋转填料床中络合铁-888法脱硫的最佳操作条件,为其工业化应用提供理论依据。

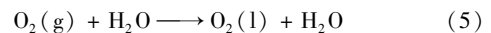
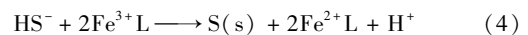
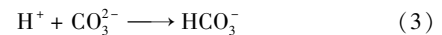
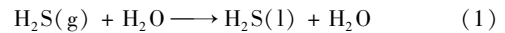
## 1 实验部分

### 1.1 实验原理

#### 1.1.1 络合铁法脱硫原理

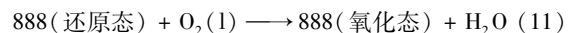
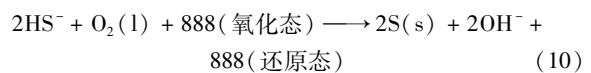
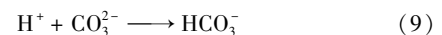
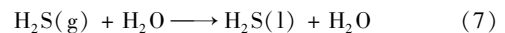
络合铁溶液吸收H<sub>2</sub>S的过程主要是模拟气中

的H<sub>2</sub>S从气相转入液相后,液相中的H<sub>2</sub>S部分解离出H<sup>+</sup>和HS<sup>-</sup>,其中H<sup>+</sup>和碱液中的CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>等离子结合,从而降低了H<sup>+</sup>的浓度,使得溶液对H<sub>2</sub>S的吸收过程可连续进行。而解离出的HS<sup>-</sup>则被氧化性较强的Fe<sup>3+</sup>L氧化为单质硫;同时,Fe<sup>3+</sup>L被还原为Fe<sup>2+</sup>L,后通过氧气将其再生,并循环使用。相关的反应方程式如下(式中L表示络合剂):



#### 1.1.2 888法脱硫原理

以Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>为碱源,碱液中的H<sub>2</sub>S部分解离为H<sup>+</sup>和HS<sup>-</sup>;在888催化剂的作用下,液相HS<sup>-</sup>被液相中的氧气氧化为单质硫,被还原了的888催化剂也通过液相溶解氧将其氧化再生,并循环使用。相关的反应方程式如下:



络合铁-888法脱硫工艺主要是利用络合铁脱硫剂直接参与脱硫反应的特点,其硫容随液相铁浓度的增加而增大,以此来提升复合工艺的工作硫容;同时,利用888脱硫催化剂较高的载氧能力以及极高的释放氧的活性等特点,提高脱硫及再生过程中

(上接第139页)

磷。后期因加强了对进水有机磷的预处理,在不降低进水TP的前提下,出水TP得到一定的控制,基本保持在8 mg/L左右,去除率80%以上。

## 3 结论

经1年的连续监测结果表明,在进水水质污染物指标有较大波动时,COD<sub>Cr</sub>、氨氮、TP的平均去除率分别为85%、87.64%、76%,出水COD<sub>Cr</sub>、氨氮、TP的平均浓度分别为188、4.7、17.3 mg/L,后期经增加除磷预处理后,出水磷浓度能达到8 mg/L。该生化系统的运行效果表明,A<sup>2</sup>/O工艺对农药废水水质和环境变化的适应能力较强,对有机物、氮和磷的同步去除效果好,有较强的抗冲击负荷能力。

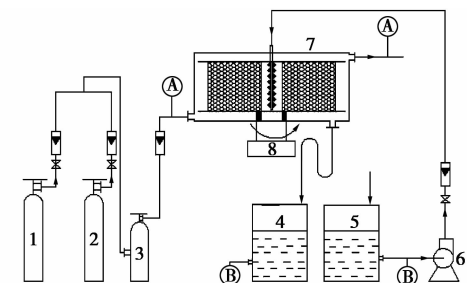
## 参考文献

- [1] 陈伟青,谢有奎.有机磷农药废水净化方法的进展[J].西南给排水,2006,28(4):28-31.
- [2] 吴启模,吴建忠,杨兵.Fe<sup>2+</sup>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>氧化法处理农药废水[J].环境工程水,2005,23(5):88-89.
- [3] 程寒飞,郑俊,陈祥宏.臭氧氧化+水解酸化+氧化沟工艺处理综合农药废水[J].中国给水排水,2002,28(5):50-52.
- [4] 陈凌霞,魏峰,徐志伟.A+A<sup>2</sup>O工艺在泰安市污水处理厂的应用[J].中国给水排水,2005,21(12):83-85.
- [5] 杨志泉,周少奇,何伟.改良A<sup>2</sup>/O工艺生物脱氮除磷应用研究[J].中国给水排水,2010,26(1):79-82.
- [6] 彭轶,彭永臻,吴昌永.A<sup>2</sup>/O工艺中的反硝化除磷[J].环境工程学报,2008,2(6):753-754.
- [7] Mulkerins D, Dobson A D W, Collieran E. Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters[J]. Environ Int, 2004, 30(2):120-125. ■

氧的利用率,以此提升脱硫及再生效率,减少副反应,节能降耗。

## 1.2 实验装置与流程

实验流程如图 1 所示,含  $H_2S$  模拟气经缓冲罐 3 混合均匀后,由进气口进入错流旋转填料床,沿轴向通过填料层;脱硫液由泵打入旋转填料床液体进口,经转鼓中心的液体分布器均匀喷洒在填料层内侧,在高速旋转的填料作用下,沿填料层径向向外运动,其与沿轴向通过的气体错流接触,完成脱硫过程。



1— $H_2S$  钢瓶;2— $N_2$  钢瓶;3—缓冲罐;4—富液槽;  
5—贫液槽;6—液泵;7—错流旋转填料床;8—电机;  
A—气体检测采样点;B—液体检测采样点

图 1 错流旋转填料床中络合铁-888 法  
脱除  $H_2S$  实验流程图

## 1.3 实验方法

实验所用的络合铁脱硫剂为一种由多组分组合的复配络合铁溶液<sup>[15]</sup>,以  $Na_2CO_3$  为碱源,调节络合铁脱硫液的 pH 为 8.5,然后向络合铁溶液中加入少量的 888 脱硫剂,使复合脱硫液中 888 脱硫剂的浓度控制在 20 mg/L,总铁质量浓度为 4.2 g/L,即可配制成实验所需的络合铁-888 复合脱硫液,脱硫液温度为 18 ~ 19℃。实验所用的  $H_2S$  模拟气由来自钢瓶的  $H_2S$  和载气  $N_2$  按一定体积比混合得到, $H_2S$  入口质量浓度 100 ~ 3 000 mg/ $m^3$ 。采用重铬酸钾法测定络合铁溶液中  $Fe^{2+}$  与  $Fe^{3+}$  的浓度;采用分光光度法测定 888 脱硫液中 888 催化剂的浓度;采用 PHS-3C 型精密 pH 计测定溶液的 pH。采用碘量法测定入口气相中  $H_2S$  质量浓度,汞量法与硫化氢气体检测仪共同测定出口气相中  $H_2S$  质量浓度。

## 1.4 药品与仪器

$H_2S$  气体,体积分数 99.9%,山西宜虹气体工业有限公司;氮气,体积分数 99.99%,山西宜虹气体工业有限公司;888 脱硫剂,长春东狮科贸实业有限公司;重铬酸钾、单质碘、碘化钾、硫代硫酸钠、乙酸锌、氧化汞,分析纯,成都艾科达化学试剂有限公

司;PHS-3C 型精密 pH 计,上海精密仪器有限公司;M40 型硫化氢气体检测仪,美国英思科公司;721 型分光光度计,上海精科实业有限公司。

## 1.5 脱硫率与超重力因子的计算

以错流旋转填料床为脱硫设备,采用图 1 所示实验流程开展脱硫实验。采用脱硫率( $\eta$ )来表征  $H_2S$  的脱除效果,由式(12)计算。采用超重力因子( $\beta$ )来表征超重力场的强度,由式(13)计算。

$$\eta = (c_{in} - c_{out})/c_{in} \times 100\% \quad (12)$$

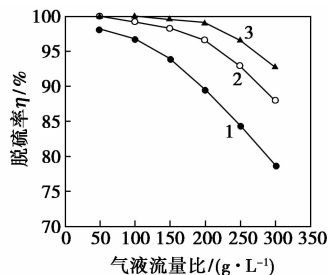
$$\beta = \omega^2 r/g \quad (13)$$

式中, $c_{in}$ 、 $c_{out}$  分别表示旋转填料床进、出口中的  $H_2S$  质量浓度,mg/ $m^3$ ; $\omega$  为角速度, $s^{-1}$ ; $r$  为转子的平均半径,m; $g$  为重力加速度, $m/s^2$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 气液流量比 ( $G/L$ ) 对脱硫率 ( $\eta$ ) 的影响

对于超重力络合铁脱硫系统而言,气液流量比 ( $G/L$ ) 是一个重要的操作参数,其直接影响脱硫装置的气体处理量及液体循环量,并关系到整个脱硫系统的能耗及运行成本。本实验在固定气体流量 ( $G$ ) 的条件下,通过改变液体流量 ( $L$ ) 来调节  $G/L$ 。在超重力因子  $\beta = 76$ ,气体流量  $G = 4 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H_2S$  入口质量浓度  $c_{in} = 1 513 \text{ mg}/\text{m}^3$  时, $G/L$  对脱硫率( $\eta$ ) 的影响如图 2 所示。由图 2 可知,888、络合铁及络合铁-888 复合体系的  $\eta$  均随  $G/L$  的增大而降低,这是由于在  $G$  一定的情况下, $G/L$  的增大必然导致  $L$  的减小;同等条件下, $L$  的减小将导致床内填料表面的润湿程度减小,有效传质比表面积减小,气液相间传质推动力下降,不利于脱硫,从而出现  $\eta$  下降的趋势。



1—888;2—络合铁;3—络合铁-888

888, 20 mg/L, pH = 8.5; 络合铁 4.2 g/L, pH = 8.5

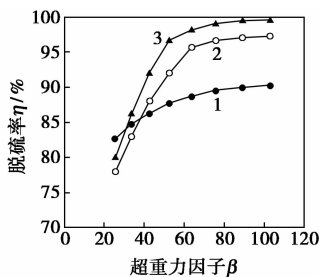
图 2 气液流量比  $G/L$  对  $\eta$  的影响

考察络合铁-888 复合体系的脱硫性能发现,在  $G/L = 200$  时,复合脱硫剂体系仍可获得超过 99% 以上的脱硫率;本实验在精脱硫条件下,复合体系的  $G/L$

取 200 为宜。由实验结果还可发现,在满足 99% 以上的精脱硫要求时,复合体系的  $G/L$  较单独的络合铁及 888 体系明显增大,说明络合铁与 888 复合之后,脱硫性能得到优化,脱硫能力更强;同时,较高的  $G/L$  也意味着液体循环量大幅减小,相应的设备体积、能耗等也将显著降低,这意味着络合铁与 888 脱硫剂复合之后可以起到节能降耗的作用。

## 2.2 超重力因子( $\beta$ )对脱硫率( $\eta$ )的影响

旋转填料床内超重力场的强度通常由超重力因子( $\beta$ )的大小来衡量, $\beta$  越大,说明超重力场越强。而  $\beta$  的大小又由床内转子的大小及转速来确定,在设备转子大小不变的情况下,转子转速越高, $\beta$  就越大。因此, $\beta$  的改变主要是靠转子转速的改变来实现的。本实验在气液流量比  $G/L = 200$ , 气体流量  $G = 4 \text{ m}^3/\text{h}$ , H<sub>2</sub>S 入口质量浓度  $c_{\text{in}} = 1491 \text{ mg}/\text{m}^3$  时, $\beta$  对脱硫率( $\eta$ )的影响如图 3 所示。由图 3 可知,888、络合铁及络合铁-888 复合体系的  $\eta$  均随  $\beta$  的增大而升高,这是由于  $\beta$  越大,转子转速越高,旋转的填料所产生的离心力越大,其对床内液体产生巨大的剪切作用,使液体在极短时间内分散为尺寸极小的流体微元,填料层内气、液相间传质速率加快而使得  $\eta$  升高。



1—888;2—络合铁;3—络合铁-888

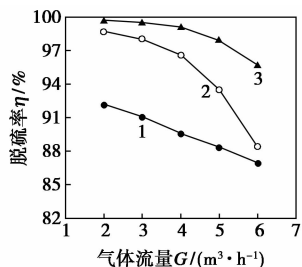
888, 20 mg/L, pH = 8.5; 络合铁 4.2 g/L, pH = 8.5

图 3 超重力因子  $\beta$  对  $\eta$  的影响

分析络合铁-888 复合体系的脱硫率变化规律发现,在  $\beta < 76$  时, $\eta$  随  $\beta$  的增大而快速升高到 99%;当  $\beta > 76$  时, $\eta$  随  $\beta$  的变化已不明显,其始终保持在 99% 以上,但电机能耗却随之增大。因此,本实验适宜的  $\beta$  取 76。此外,由图 3 还可得出,旋转填料床对络合铁脱硫过程有明显的强化作用,表现为随  $\beta$  增大, $\eta$  变化明显,曲线斜率较大;而 888 脱硫过程的曲线则较平缓,斜率较小。由此可知,相比较 888 脱硫剂,络合铁更适用于旋转填料床脱硫过程。

## 2.3 气体流量( $G$ )对脱硫率( $\eta$ )的影响

在气液流量比  $G/L = 200$ , 超重力因子  $\beta = 76$ , H<sub>2</sub>S 入口质量浓度  $c_{\text{in}} = 1506 \text{ mg}/\text{m}^3$  时,气体流量( $G$ )对脱硫率( $\eta$ )的影响如图 4 所示。由图 4 可知,888、络合铁及络合铁-888 复合体系的  $\eta$  均随  $G$  的增大而降低。这是由于  $G$  的增大使得气、液两相在填料层内的接触反应时间缩短而不利于脱硫过程,表现为  $\eta$  下降的变化趋势。考察  $G$  变化对络合铁-888 复合体系脱硫率的影响可知,当  $G > 4 \text{ m}^3/\text{h}$  时, $\eta$  开始下降到 99% 以下。在本实验设备精脱硫的条件下,适宜的  $G$  取  $4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。



1—888;2—络合铁;3—络合铁-888

888, 20 mg/L, pH = 8.5; 络合铁 4.2 g/L, pH = 8.5

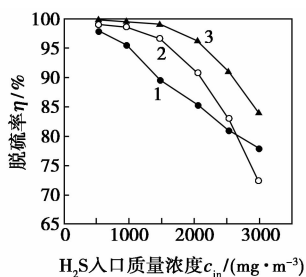
图 4 气体流量  $G$  对  $\eta$  的影响

同时,由图 4 还可看出,络合铁溶液的  $\eta$  受  $G$  变化影响较大,表现为曲线下降明显,斜率较大;而 888 脱硫液的  $\eta$  受  $G$  变化影响较小,表现为曲线下降平缓。说明在旋转填料床脱硫时,888 脱硫液受气量变化影响较小,其脱硫效果相对更稳定一些,络合铁脱硫液受气量变化影响较大;而当 888 与络合铁复合之后,不仅复合体系的脱硫性能得到提升,而且其受气量变化的影响也大幅减小。

## 2.4 H<sub>2</sub>S 入口质量浓度( $c_{\text{in}}$ )对脱硫率( $\eta$ )的影响

在气液流量比  $G/L = 200$ , 超重力因子  $\beta = 76$ , 气体流量  $G = 4 \text{ m}^3/\text{h}$ , H<sub>2</sub>S 入口质量浓度( $c_{\text{in}}$ )对脱硫率( $\eta$ )的影响如图 5 所示。由图 5 可知,888、络合铁及络合铁-888 复合体系的  $\eta$  均随  $c_{\text{in}}$  的升高而显著下降,这是由于各种体系对 H<sub>2</sub>S 的吸收都有一定的吸收容量,表现为脱硫剂的硫容;在硫容范围内,理论上 H<sub>2</sub>S 可被脱硫液完全吸收;超过硫容范围,部分 H<sub>2</sub>S 在气液接触极短时间内,就会未经脱硫液吸收而直接排出,体现为脱硫率下降。本实验考察  $c_{\text{in}}$  对络合铁-888 复合体系的影响,发现  $c_{\text{in}}$  超过  $1520 \text{ mg}/\text{m}^3$  时, $\eta$  开始降至 99% 以下; $c_{\text{in}}$  越大, $\eta$  下降越明显;说明较高浓度含硫尾气 ( $c_{\text{in}} >$

1 520 mg/m<sup>3</sup>) 对实验中的错流旋转填料床络合铁-888 复合体系的脱硫率影响较大。



1—888; 2—络合铁; 3—络合铁-888

888, 20 mg/L, pH = 8.5; 络合铁 4.2 g/L, pH = 8.5

图 5 H<sub>2</sub>S 入口质量浓度  $c_{in}$  对  $\eta$  的影响

此外,由图 5 还可得出,当  $c_{in} > 2\ 000\ \text{mg/m}^3$  时,随  $c_{in}$  的增加,络合铁体系的  $\eta$  下降趋势较 888 体系明显,曲线斜率较大,说明较高浓度的含硫气对络合铁体系的影响要比 888 体系大。而对于  $c_{in} < 1\ 000\ \text{mg/m}^3$  的低含硫气,络合铁体系则表现出稳定的脱硫性能和较高的脱硫效率。由此可知,相比 888 脱硫剂,络合铁脱硫剂更适用于脱除低含硫尾气中的 H<sub>2</sub>S。

相比逆流旋转填料床,错流旋转填料床具有结构简单、制造费用低、维修方便、气相压降小、处理气量大等特点,更适用于工业化应用。但其也可能因填料与壳体之间间隙控制不佳以及工艺参数不优化等情况而出现气体短路问题,影响脱硫效率。此外,钢瓶配气的实验条件以及实验参数的稳定性问题也可能对实验结果有一定的影响。

### 3 结论

(1) 以错流旋转填料床为脱硫设备,以络合铁-888 复合体系为脱硫剂,考察了气液流量比、超重力因子、气体流量、H<sub>2</sub>S 入口质量浓度对脱硫率的影响。结果表明,脱硫率随气液流量比、气体流量、H<sub>2</sub>S 入口质量浓度的升高而降低,随超重力因子的增大而升高。在实验范围内,适宜的操作条件为:气液流量比  $G/L = 200$ ,超重力因子  $\beta = 76$ ,气体流量  $G = 4\ \text{m}^3/\text{h}$ ;当 H<sub>2</sub>S 入口质量浓度  $c_{in} \leq 1\ 520\ \text{mg/m}^3$  时,错流旋转填料床中络合铁-888 复合体系的脱硫率可保持在 99% 以上,适合于低含硫尾气精脱硫场合。

(2) 对比分析了错流旋转填料床中 888、络合铁

以及络合铁-888 体系的脱硫性能。结果表明,络合铁与 888 复合之后,复合体系的脱硫性能得到优化,脱硫能力更强;相比 888 脱硫剂,络合铁体系更适用于旋转填料床脱硫过程,其受气体流量变化影响较大,宜应用于脱除低含硫尾气中 H<sub>2</sub>S 的场合。

### 参考文献

- [1] 张家忠,易红宏,宁平. 硫化氢吸收净化技术研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备,2002,3(6):47-52.
- [2] 郭峰,李发永. 络合铁法脱除 H<sub>2</sub>S 工艺的研究[D]. 东营:中国石油大学(华东),2007.
- [3] Eric T C, Touradj S, David H R. Transformation of polysulfidic sulfur to elemental sulfur in a chelated iron hydrogen sulfide oxidation process[J]. Anal Chim Acta, 1994, 299(1):97-111.
- [4] Memanus D, Martell A E. The evolution, chemistry and applications of chelated iron hydrogen sulfide removal and oxidation processes [J]. J Mol Cat A, 1997, 117(3):289-297.
- [5] Sheila J E, Ramunas J M, Arthur E M. Degradation of coordinated  $\beta$ -diketonates as iron chelate catalysts during the oxidation of H<sub>2</sub>S to S<sub>8</sub> by molecular oxygen [J]. Inorg Chim Acta, 2000, 299(1):9-15.
- [6] Simon P, Nicolas R, Abdelaziz B. Assessment of a redox alkaline/iron-chelate absorption process for the removal of dilute hydrogen sulfide in air emissions [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(22):6452-6461.
- [7] 张冬云,薛敏华,王孝英,等. 栲胶-NTA 络合铁体系的脱硫研究[J]. 天然气化工, 2005, 30(4):39-42.
- [8] 王文善. 国内外脱硫技术的发展状况及需要研究的问题[J]. 小氮肥设计技术, 2006, 27(2):1-6.
- [9] 祁贵生,刘有智. 超重力法脱除气体中硫化氢[J]. 化工进展, 2008, 27(9):1404-1407.
- [10] Jiang X P, Liu Y Z. Absorption of sulphur dioxide with sodium citrate buffer solution in a rotating packed bed [J]. Chin J Chem Eng, 2011, 19(4):687-692.
- [11] 祁贵生,刘有智. 错流旋转填料床中湿式氧化法脱除气体中硫化氢[J]. 石油学报:石油加工, 2012, 28(2):195-199.
- [12] Basil H. Nonisothermal gas absorption accompanied by a second-order irreversible reaction [J]. AIChE J, 1990, 36(1):141-146.
- [13] 徐宏建,张成芳. Fe(III)-EDTA 吸收 H<sub>2</sub>S 反应动力学的实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2001, 15(6):532-537.
- [14] Ebrahimi S, Kleerebezem R, Van loosdrecht M C M. Kinetics of the reactive absorption of hydrogen sulfide into aqueous ferric sulfate solutions [J]. Chem Eng Sci, 2003, 58(2):417-427.
- [15] 刘有智,于永,焦纬洲,等. 一种适用于超重力脱硫的络合铁脱硫剂:CN, 200910266168.6 [P]. 2010-11-03. ■