

烟气氨法脱硫中氨逃逸及副产物氧化问题的探究

马振¹, 万皓^{2*}

(1. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444; 2. 上海大学能源管理办公室, 上海 200444)

摘要:采用单因素实验分析法探讨了氨法脱硫中氨逃逸的控制问题,在烟气温度为 90℃,吸收液质量分数为 1%,液气比 L/G 为 5 的工艺条件下,尾气中氨逃逸量可以得到有效的抑制,烟气出口 NH₃ 质量浓度为 19 mg/m³,同时脱硫效率高达 95% 以上。详细比较不同 CoSO₄ 催化剂浓度下亚硫酸铵的氧化效果,并采用正交实验分析后得出在 CoSO₄ 催化作用下, (NH₄)₂SO₃ 的最佳氧化工艺参数(NH₄)₂SO₃ 初始浓度为 1.35 mol/L,反应温度为 50℃,pH 为 4。

关键词:氨法脱硫;氨逃逸;脱硫效率;亚硫酸铵;氧化率

中图分类号:X701.3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)02-0125-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.02.032

Ammonia escape and oxidation of by-product in process of ammonia desulfurization from flue gas

MA Zhen¹, WAN Hao^{2*}

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Energy Management Office, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The single factor experiment method is used to study the control of ammonia escape in ammonia desulfurization process. When flue gas temperature is 90℃, mass fraction of absorption solution is 1% and L/G is 4, the amount of ammonia in the tail gas can be effectively inhibited. The concentration of NH₃ in exit flue is 19 mg/m³ and desulfurization efficiency is more than 95%. Detailed analysis has been given for the effect of oxidation of ammonium sulfite in different catalyst concentrations. After the analysis of the orthogonal results, it is concluded that under the catalysis of cobalt sulfate, the optimum oxidation parameters for ammonium sulfite are as follows: 1.35 mol/L of concentration of (NH₄)₂SO₃, 4 of pH and 50℃ of reaction temperature.

Key words: ammonia desulfurization; ammonia escape; desulfurization efficiency; ammonium sulfite; oxidation rate

随着社会经济的快速增长,大气环境的污染问题也变得更为严峻。中国的能源消耗长期以来一直以煤炭为主,导致了空气的污染也多为煤烟型污染。大气中主要的污染物 SO₂ 最大的来源就是煤炭燃烧。在中国煤炭总产量中,75% 的原煤被用来直接燃烧,燃煤产生的废气严重污染了空气,而燃煤所排放的 SO₂ 占到了全国总排放量的 87%。中国部分地区所用燃煤为高硫煤,而且燃煤设备未能采取有效的脱硫措施,这更加剧了 SO₂ 对环境的污染破坏^[1]。SO₂ 给生态环境和经济社会都带来了严重的影响和破坏。中国 SO₂ 的排放量已占到了世界的 15.1%,在众多工业烟气排放中,火电厂是 SO₂ 的排放大户,且呈逐年增加的趋势,然而,火电厂燃煤烟气 SO₂ 的去除率却一直维持较低的水平,电力工业承担着 SO₂ 减排的艰巨任务。因此,如何加强对燃

煤烟气中 SO₂ 的控制是亟需解决的问题,是防治大气污染的紧迫任务^[2]。

烟气脱硫是控制 SO₂ 排放中应用非常广泛的脱硫技术,是最经济、有效的 SO₂ 控制方法。烟气脱硫技术既要效率高,又要满足低费用、低成本的需求^[3]。其中,氨法脱硫因其脱硫效率高、经济效益好等特点,得到了越来越广泛的应用。氨法脱硫是利用氨水洗涤烟气中的 SO₂ 产生亚硫酸铵,并循环利用亚硫酸铵吸收液的脱硫过程^[4]。作为一种新型的湿法脱硫工艺,氨法脱硫有逐步取代石灰石膏法的趋势,然而,因脱硫过程中氨逃逸、副产物氧化率较低等问题的存在,影响了其脱硫效果及经济效益,使得氨法脱硫在工业中的应用受限^[5]。减少氨逃逸引起的损失,提高 (NH₄)₂SO₃ 的氧化率是氨法脱硫工艺实现工业化的关键^[6]。

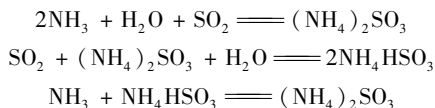
收稿日期:2015-07-29;修回日期:2015-12-14

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2009AA064102)

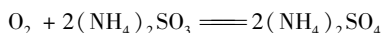
作者简介:马振(1990-),男,硕士生;万皓(1975-),男,博士,副教授,研究方向为循环经济技术与管理等,通讯联系人,15809589980@163.com。

1 氨法脱硫原理

氨法脱硫以水溶液中的 NH_3 与 SO_2 反应为基础,氨是一种碱性吸收剂,氨水将废气中的 SO_2 脱除,生成亚硫酸铵与亚硫酸氢铵的混合液^[7],用 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3-\text{NH}_4\text{HSO}_3$ 吸收液循环洗涤含 SO_2 的烟气,吸收液中定期补充氨气进行中和,使吸收液中的 NH_4HSO_3 转变为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$,以防止 SO_2 从溶液内逸出而降低吸收能力。



亚硫酸铵在一定条件下会分解为 SO_2 逸出,为稳定烟气中的 SO_2 ,需将 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 氧化成 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 。



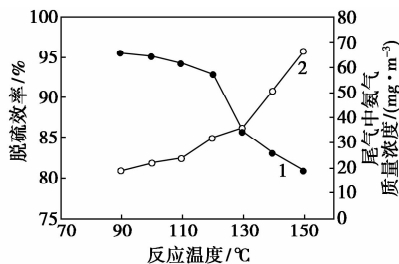
2 氨逃逸问题

氨逃逸是指氨法脱硫中气态氨随烟气排出脱硫装置的现象^[8]。采用单因素变量分析方法,讨论了反应温度 T 、吸收液浓度 C 、液气比 L/G 等工艺条件对脱硫中氨逃逸量的影响。实验以循环的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3-\text{NH}_4\text{HSO}_3$ 混合液作为吸收剂,模拟烟气从脱硫塔底端进入,循环吸收液从顶端喷淋进入,为了维持吸收能力,间断性地向系统注入氨水将 NH_4HSO_3 转化为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$,模拟的烟气由空气压缩机提供的氧气与 SO_2 混合而成,塔出口氨气浓度

由红外氨气分析仪检测, SO_2 浓度的测定采用非分散红外吸收法(HJ 629—2011)。

2.1 不同进口烟气温度的氨逃逸

在烟气流量 $60 \text{ m}^3/\text{h}$, SO_2 浓度 $2500 \text{ mg}/\text{m}^3$ 的条件下,实验采用的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 吸收液质量分数 2%,液气比 L/G 为 5,探究不同反应温度下的氨逃逸量与脱硫效率,结果如图 1 所示。在脱硫过程中,烟气温度通过影响吸收液的温度而影响到亚硫酸铵的溶解度及氨逃逸量。由图 1 可知,进口烟气温度在 110°C 处,脱硫效率将产生明显的下降,此时,由于温度较高, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的氧化率增大,吸收液中 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的含量减少,对 SO_2 的吸收能力变小,降低了脱硫效率。在 110°C 后氨气的逃逸量开始大量增加,这是由于 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的氧化率增大,容易形成硫酸盐气溶胶,会引起大量的氨逃逸问题^[9],因此,烟气温度越低,氨逃逸量越小。但进口烟气温



1—脱硫效率;2—尾气中 NH_3 质量浓度

图 1 进口烟气温度对氨逃逸的影响

上述 6 种设备组合成烟气治理系统。脱硫脱硝、除尘同时还能有效抑制二噁英生成,使排放烟气中污染物浓度满足《危险废物焚烧污染控制标准》的限值。

参考文献

- [1] Li X D, Ren Y, Ji S S, et al. Emission characteristics of hazardous components in municipal solid waste incinerator residual ash [J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2015, 16(4): 316–325.
- [2] Njagi N A, Oloo M A, Kithinji J, et al. Health-care waste incineration and related dangers to public health: Case study of the two teaching and referral hospitals in Kenya [J]. Journal of Community Health, 2012, 37(6): 1168–1171.
- [3] 岳强, 范亚民, 耿磊, 等. 危险废物焚烧工程烟气治理工艺设计 [J]. 环境卫生工程, 2012, 20(4): 28–30.
- [4] 谷吉林. 旋转喷雾干燥法(SDA)脱硫工艺系统的应用研究 [J]. 中国环保产业, 2007, (6): 38–42.
- [5] 蔡小峰, 李晓芸. SNCR-SCR 烟气脱硝技术及其应用 [J]. 电力科技与环保, 2008, 24(3): 26–29. ■

(上接第 124 页)

4 结论

(1) 通过焚烧前预处理和合理的掺混搭配,有助于控制烟气中污染物的产生。

(2) 利用烟气急冷技术,避开二噁英的生成温度区间。少量二噁英经活性炭吸附、除尘器捕集后,能够有效控制二噁英的排放。

(3) 活性炭吸附、袋式除尘的使用,起到了除尘、脱硫、吸收二噁英、去除重金属的作用,是系统的重要组成部分。

(4) 半干法脱硫、湿式洗酸采用酸碱中和反应成功吸收烟气中的 HCl 、 HF 和 SO_2 等酸性污染物。

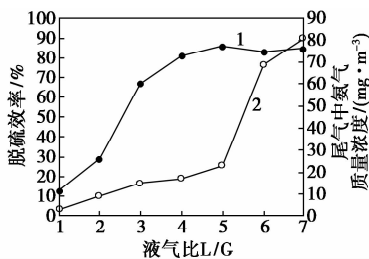
(5) 烟气经 SNCR-SCR 联合脱硝的系统后, NO_x 浓度达到排放要求。

采用余热锅炉、旋转喷雾干燥塔、活性炭喷射器、袋式除尘、湿式洗涤塔、SNCR-SCR 联合脱硝,

度过低不利于脱硫后副产物 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的氧化与结晶过程,对脱硫过程产生严重影响,选择在进口烟气温度为 90°C 条件下探讨氨逃逸问题,既达到较高的脱硫效率,又不影响后续的氧化与结晶过程。

2.2 不同液气比条件下的氨逃逸

液气比对氨逃逸量有着重要的影响,在烟气量为 $60\text{ m}^3/\text{h}$, SO_2 浓度为 $2\ 500\text{ mg}/\text{m}^3$ 条件下,设置反应温度 90°C ,吸收剂 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的质量分数为 2% ,探究不同液气比 L/G 下氨逃逸量的控制,结果如图 2 所示,随着液气比的增大,脱硫效率逐渐提高,但最终渐渐趋于稳定,在 L/G 为 5 时脱硫能力达到最大。这是因为液气比的提高可以增加传质系数,因此脱硫效率逐渐提高,但液气比 L/G 过高会造成吸收液无法充分接触反应,因此,脱硫效率趋于稳定。 L/G 为 5 处,氨的逃逸量也开始明显增加,可能因为较大的液气比条件下,过多的吸收液会使得小液滴凝聚成较大的液滴,减少了气液接触面积,吸收液利用率降低,引起氨气的逃逸, H_4HSO_4 的积累也造成氨逃逸量的增加。因此,选择在液气比 L/G 为 5 的条件下进行探究。



1—脱硫效率;2—尾气中 NH_3 质量浓度

图 2 不同液气比对氨逃逸的影响

2.3 不同吸收液质量分数下的氨逃逸

在烟气量为 $60\text{ m}^3/\text{h}$, SO_2 浓度为 $2\ 500\text{ mg}/\text{m}^3$, 反应温度为 90°C ,液气比 L/G 为 5 的条件下,取 C_i 质量分数为 $0.5\% \sim 4.0\%$ 的吸收液进行脱硫,结果如图 3, C_i 值小于 1.5% 时,脱硫效率迅速升高,而 C_i 值大于 1.5% 时,脱硫效率基本维持在 95% 左右,这是因为吸收液已达到了吸收 SO_2 的最大能力,过高的吸收剂质量分数降低了 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的利用率。根据实际工程经验,吸收剂浓度增高,喷淋塔出口的氨气浓度也随着增大,因为 SO_2 会与 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 反应生成 NH_4HSO_3 ,若 NH_4HSO_3 的浓度积累过多,会降低吸收液的吸收能力,产生大量的氨逃逸。在实验中,吸收液质量分数 C_i 值仅为 $1.5\%、2.0\%$ 时,检测到尾气中氨气的浓度就已高达 $11.0、21.2\text{ mg}/\text{m}^3$,均已超出国家排放标准,结合脱硫效率的因素,吸收液

的质量分数 C_i 选择以 1% 为宜。

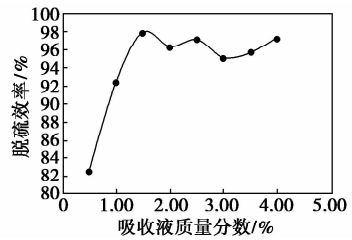


图 3 不同 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 吸收液下的脱硫效率

在烟气流量 $60\text{ m}^3/\text{h}$, SO_2 浓度 $2\ 500\text{ mg}/\text{m}^3$ 的条件下,分析反应温度 T 、吸收液质量分数 C_i 以及液气比 L/G 的影响,得出最优工艺条件为: T 为 90°C ,质量分数为 1% , L/G 为 5,此时,氨逃逸量得到了有效控制。

3 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的氧化问题

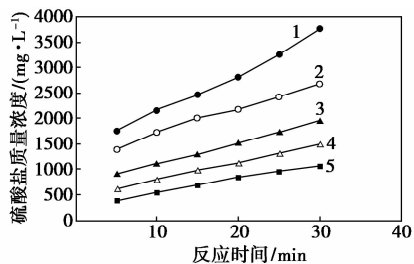
3.1 CoSO_4 的催化作用

氨法脱硫后吸收液中的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 会分解为 SO_2 ,影响后续的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 结晶过程^[10]。李伟等^[11]研究了不同硫酸盐催化剂作用下 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的氧化效率,得出钴离子具有较强的催化作用。从离子间的作用角度分析,与 $\text{Mn}、\text{Ni}$ 等离子比较,在硫酸钴氧化体系中,由于其离子半径与 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 更为接近,因此更易于发生相互作用,根据钴离子最外层分布状况,钴离子具有 $d^2(t_{2g}^6 e_g^1)$ 的低自旋电子组态,钴离子比 Mn 离子($d^5 t_{2g}^3 e_g^2$)等多出 1 个 e_g 空轨道,因此更容易接受电子对而形成配建,可能会促进其与 SO_3^{2-} 的结合,提高了 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的氧化效率。综合考虑,选择 CoSO_4 作为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 氧化过程中的催化剂。

配制 250 mL 的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 溶液,待温度稳定后装入反应器内,空气由压缩机经转子流量计与水饱和器后进入气体缓冲瓶,气体达稳定状态后通入氧化反应器中,反应在恒温水浴中进行,在亚硫酸铵初始浓度为 $1.0\text{ mol}/\text{L}$,温度为 55°C ,空气流量 $260\text{ L}/\text{h}$, $\text{pH} = 7.5$ 的条件下考察硫酸钴浓度对 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的影响,实验依次在 $0.002\ 0、0.004\ 5、0.009\ 0、0.020\ 0\text{ mol}/\text{L}$ 几个不同硫酸钴浓度条件下进行,以不加催化剂的一组作为对照。每隔一段时间采 1 次样,分析不同浓度催化剂下的氧化效果。反应中 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的浓度由碘量法测定。

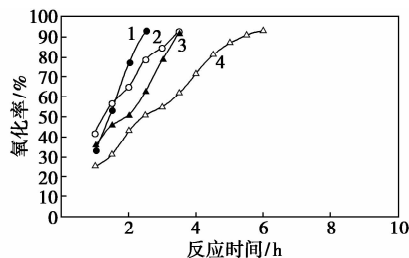
由图 4 可知,亚硫酸铵的氧化速率随着催化剂浓度的增加而增大,硫酸钴催化剂浓度在 $0.002 \sim 0.009\text{ mol}/\text{L}$ 时氧化速率增长较为缓慢,而硫酸钴浓

度增加至 0.02 mol/L 时,氧化速率有了较大的提高,是空白时 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 氧化速率的近 3 倍,30 min 内硫酸铵的浓度即可达到 3 500 mg/L,可见,硫酸钴对亚硫酸铵的氧化有很好的催化作用。图 5 显示了不同硫酸钴浓度下亚硫酸铵的氧化率,硫酸钴的浓度为 0.000 2 mol/L 时,氧化反应效率较低,达到 90% 的转化率需 6 h 以上,硫酸钴浓度为 0.004 5 ~ 0.020 0 mol/L 时,氧化效率高,氧化率在 4 h 内基本可达到 95% 以上。随着硫酸钴浓度升高,氧化效率也逐渐升高,硫酸钴浓度较低时,实现较高的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 氧化率耗时比较长,但催化剂浓度过高,可能抑制反应的进行,且增加工业化运行成本。



1—0.02 mol/L; 2—0.009 mol/L; 3—0.004 5 mol/L;
4—0.002 mol/L; 5—空白

图 4 不同 CoSO_4 浓度下 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的氧化速率



1—0.02 mol/L; 2—0.009 mol/L; 3—0.004 5 mol/L;
4—0.002 mol/L

图 5 不同 CoSO_4 浓度下 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的氧化率

3.2 正交实验分析

采用正交实验方法分析硫酸钴催化下亚硫酸铵氧化反应中各因素的影响效果。 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的初始浓度及空气流量的提高均会影响 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的氧化,本实验中二者为固定条件,空气流量的大小与 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的氧化率呈正比关系^[12], $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的氧化是一个气膜阻力控制的过程,气流量越大,流动越紊乱,氧气的传质系数就高,促进反应的进行,但空气流量增长到一定值时,氧的含量区域饱和,氧化速率增长变慢,实验中选取空气流量 $Q = 300 \text{ L/h}$ 。亚硫酸铵催化氧化过程中,当催化剂 Co^{2+} 的浓度增

加到一定值时, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 氧化速率变化不大,且过高浓度的硫酸钴会影响 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的纯度,实验中硫酸钴浓度选择为 2 mol/L。

氧化过程中 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 初始浓度、pH、温度 3 个反应因素的考察范围设置如下:混合吸收液 pH 的变化会影响到溶液中 NH_4HSO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的含量,进而影响 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的氧化率。pH 增大,溶液中 SO_3^{2-} 含量增加,降低了 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的氧化速率与传质速率,pH 较低时,溶液中 NH_4HSO_3 居多,其氧化速率比 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 快,但 pH 不易过低,否则会影响 SO_2 的吸收,pH 的考察选择 4、5、6、7 4 个水平。亚硫酸铵的初始浓度对其氧化反应也有着重要作用, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的浓度不宜太高,浓度越高,溶液黏度越大,液膜阻力越大,导致氧化速率下降,因此, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 在低浓度时,其反应速率和转化率较好,初始 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 浓度的水平设置为 1.25、1.35、1.45、1.55 mol/L。温度升高降低了溶液的黏度,传质阻力下降, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 氧化速率随之提高,但温度太高需要采取换热器等降温措施,增加生产成本。温度 T 选择 40、50、60、70℃ 4 个水平。本正交实验设计为三因素四水平,采用 $L_{16}(4^3)$ 正交表,分析结果如表 1。

表 1 正交实验数据分析

序号	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 浓度/ (mol·L ⁻¹)	溶液 pH	$T/^\circ\text{C}$	达到 80% 的 时间/h
1	1.15	4	40	5.65
2	1.15	5	50	5.13
3	1.15	6	60	5.72
4	1.15	7	70	5.16
5	1.25	4	50	6.35
6	1.25	5	40	5.12
7	1.25	6	70	5.36
8	1.25	7	60	7.05
9	1.35	4	60	7.62
10	1.35	5	70	8.86
11	1.35	6	40	6.95
12	1.35	7	50	6.68
13	1.45	4	70	9.15
14	1.45	5	60	6.36
15	1.45	6	50	5.99
16	1.45	7	40	7.76
A/4	5.4150	7.3925	6.3700	
B/4	6.0475	6.5675	6.0375	$T = 104.91$
C/4	7.5775	6.1050	6.6875	$T/16 = 6.557$
D/4	7.3650	6.1725	7.1325	

以平均值 $T/16$ 为基准,计算因素中各水平对应数据的平均值与基准的偏离,则各因素 4 个偏离的平方和即该因素 4 个水平下数据平均值间的离差,离差越大则影响越大。求解离差并判断各因素对实验结果的影响,计算过程如下。

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 浓度:

$$\begin{aligned} & (A/4 - T/16)^2 + (B/4 - T/16)^2 + \\ & (C/4 - T/16)^2 + (D/4 - T/16)^2 = \\ & 1.3042 + 0.2596 + 1.0414 + 0.6259 = 3.2311 \end{aligned}$$

pH:

$$\begin{aligned} & (A/4 - T/16)^2 + (B/4 - T/16)^2 + \\ & (C/4 - T/16)^2 + (D/4 - T/16)^2 = \\ & 0.698 + 0.0001 + 0.2043 + 0.1478 = 1.0502 \end{aligned}$$

反应温度 T :

$$\begin{aligned} & (A/4 - T/16)^2 + (B/4 - T/16)^2 + \\ & (C/4 - T/16)^2 + (D/4 - T/16)^2 = \\ & 0.035 + 0.2699 + 0.017 + 0.3312 = 0.6531 \end{aligned}$$

由此可得, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 初始浓度对 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 催化氧化效果的影响最大,而 pH 与反应温度 T 为次要因素,由图 6 中的因素效应曲线可知,最佳反应参数为:pH=4, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 初始浓度为 1.35 mol/L,反应温度 T 为 50℃。

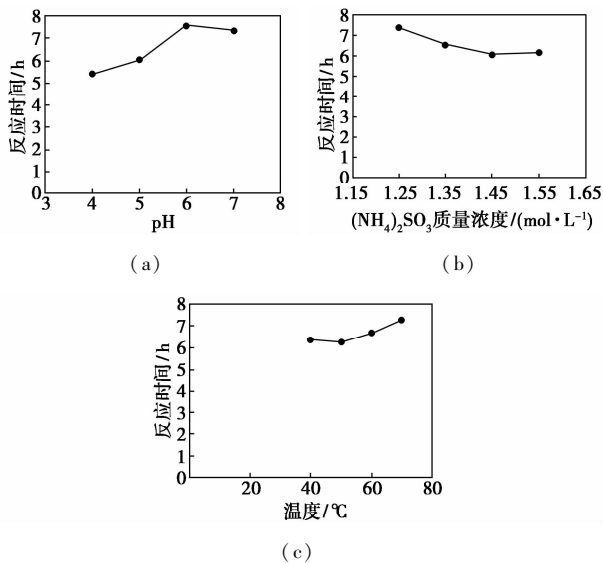


图 6 正交实验效应曲线

4 结论

(1)氨逃逸问题是影响氨法脱硫效果的关键因素,探讨了氨法脱硫中氨逃逸的控制问题,在模拟烟

气中,分析各因素条件的作用效果,在烟气温度 T 为 90℃,吸收液质量分数为 1%,L/G 为 5 的工艺条件下,氨逃逸量可以得到有效控制,同时,脱硫效率达 95% 以上。

(2)在硫酸钴催化剂的作用下,亚硫酸铵的氧化效率有很大的提高,氧化过程中 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 初始浓度为影响氧化效率的主要因素,其中,在 pH=4、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 浓度为 1.35 mol/L、 $T=50^\circ\text{C}$ 的条件下, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 的氧化效果最好。本文中提出的脱硫技术路线为氨法脱硫技术的改进提供建议,对脱硫中氨逃逸问题的控制及 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 氧化率的提高具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] 王文崇,武文江. 火电厂烟气脱硫及脱硝实用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2009.
- [2] 陈颖,李慧,李金莲,等. 氨法烟气脱硫脱硝一体化工艺的研究进展[J]. 化工科技,2010,18(2):65-69.
- [3] Gao H L, Li C T, Zeng G M. Experimental study of wet flue gas desulphurization with a novel type PCF device[J]. Chemical Engineering and Processing,2011,50(2):189-195.
- [4] He B S, Zheng X Y, Yan W, et al. Temperature impact on SO_2 removal efficiency by ammonia gas scrubbing[J]. Energy Conversion and Management,2003,44:2175-2188.
- [5] 申林艳,李文彦,陈君. 氨法烟气脱硫技术及几个问题的探讨[J]. 煤矿现代化,2005,(6):60-61.
- [6] 王玉春,李红英,薛士科. 烟气脱硫技术综合性能评价及方案选择[J]. 广东化工,2009,36(8):139-140.
- [7] 彭健,叶世超,柳海刚,等. 湿壁塔氨法烟气脱硫的非平衡模型[J]. 化学工程,2013,41(8):48-52.
- [8] 彭健,叶世超,柳海刚,等. 采用湿壁塔氨吸收法去除烟气中 SO_2 的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(17):55-58.
- [9] Yan J P. The formation and removal characteristics of aerosols in ammonia-based wet flue gas desulfurization[J]. Journal of Aerosol Science,2011,42:604-614.
- [10] Yan J, Bao J, Yang L, et al. The formation and removal characteristics of aerosols in ammonia-based wet flue gas desulfurization[J]. Journal of Aerosol Science,2011,42(9):604-614.
- [11] 李伟,周静红,肖文德. 高浓度亚硫酸铵氧化反应过程研究[J]. 华东理工大学学报,2001,27(3):226-229.
- [12] 吴泓. 氨法脱硫生产氨肥的清洁生产研究[J]. 环境保护与循环经济,2013,(7):31-38. ■