

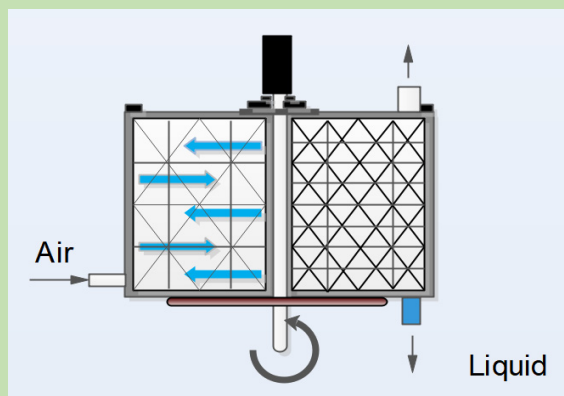
High gravity intensified dry denitrification process for ammonia production

Hui HE^{1,2}, Guisheng QI^{1,2*}, Youzhi LIU^{1,2}, Qi ZHENG^{1,2}, Huiyun REN^{1,2}

1. College of Chemical Engineering and Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

2. Research Center of Shanxi Province for High Gravity Chemical Engineering and Technology, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract: At present, liquefied ammonia is mostly used as reducing agent in selective catalytic reduction (SCR) denitrification. But there are some safety problems such as high pressure storage and easy leakage of liquefied ammonia. The use of ammonia as reducing agent can effectively avoid such problems and the cost is low. In this work, the technology of ammonia stripping from ammonia water by high gravity was applied to SCR denitrification process (needs ammonia gas 5vol%~10vol%). Taking air-ammonia water as experimental system and rotating packed bed as ammonia blowing equipment.



The effects of inlet temperature, high gravity factor and volume ratio of gas to liquid on blowing rate and ammonia production rate with two packings of stainless steel were investigated. The results showed that when the treatment gas was 4~10 m³/h, the blowing rate of the two packings was accelerated with inlet temperature, high gravity factor and volume ratio of gas to liquid increased. The inlet temperature and high gravity factor performed a positive effect on ammonia production rate while the volume ratio of gas to liquid showed a negative effect. The ammonia production rate was more than 10%. The high gravity ammonia water blowing technology could be used in SCR denitrification technology. When the treatment gas was 50~700 m³/h, the high concentration of ammonia nitrogen wastewater (1wt%) was stripped off, the ammonia production rate was at most 3.0%. Although it did not meet the SCR denitrification requirements, but could combine the blown ammonia nitrogen wastewater with the ammonia stripping process to save ammonia consumption.

Key words: cross-flow rotating packed bed; selective catalytic reduction, blow off rate of ammonia; ammonia nitrogen wastewater

收稿: 2018-10-23, 修回: 2018-12-20, 网络发表: 2019-02-19, Received: 2018-10-23, Revised: 2018-12-20, Published online: 2019-02-19

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(编号: 2016YFC0204103); 山西省重点研发计划资助项目(编号: 201703D111018)

作者简介: 何辉(1991-), 男, 山西省太原市人, 硕士研究生, 研究方向为超重力化工过程强化, E-mail: 1085451867@qq.com; 祁贵生, 通讯联系人, E-mail: zbdxqgs@126.com.

引用格式: 何辉, 祁贵生, 刘有智, 等. 超重力强化干法脱硝制氨工艺. 过程工程学报, 2019, 19(4): 845-852.

He H, Qi G S, Liu Y Z, et al. High gravity intensified dry denitrification process for ammonia production (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(4): 845-852, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218289.

超重力强化干法脱硝制氨工艺

何 辉^{1,2}, 祁贵生^{1,2*}, 刘有智^{1,2}, 郑 奇^{1,2}, 任慧云^{1,2}

1. 中北大学化学工程与技术学院, 山西 太原 030051

2. 山西省超重力化工工程技术研究中心, 山西 太原 030051

摘 要: 将超重力法氨水吹脱制氨技术用于选择性催化还原(SCR)脱硝工艺(需氨 5vol%~10vol%), 以空气-氨水为实验体系、旋转填料床为吹氨设备, 考察了进气温度、超重力因子、气液体积比在装填不同填料时对脱氨率和产氨率的影响规律。结果表明, 处理气量为 4~10 m³/h 时, 丝网和乱堆两种不锈钢填料的吹脱率均随进气温度、超重力因子和气液体积比增大而增大; 产氨率随进气温度和超重力因子增大而增大, 随气液体积比增大而降低, 产氨率达 10% 以上, 与 SCR 法所需浓度一致, 表明超重力氨水吹脱所制氨浓度可用于 SCR 脱硝。处理气量为 50~700 m³/h 时, 吹脱浓度 1wt% 的氨氮废水, 产氨率最大为 3.0%。虽不满足 SCR 脱硝要求, 但可将氨氮废水吹脱和氨水吹脱工艺相结合, 节约氨水消耗量。

关键词: 错流旋转填料床; 选择性催化还原脱硝; 氨脱除率; 氨氮废水

中图分类号: TQ051; TQ026 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2019)04-0845-08

1 前 言

传统制氨工艺包括尿素热解工艺^[1-4]和液氨气化工工艺^[5], 其中尿素热解工艺安全性好, 但运行成本高且工艺复杂; 液氨气化工工艺运行成本低, 但液氨需高压储存且易泄漏, 存在安全隐患。因此, 需寻找一种安全、成本低的制氨工艺。旋转填料床^[6]是一种强化气液微观混合的设备, 其利用高速旋转的填料产生巨大的离心力, 使气液流速及填料有效比表面积大大提高, 在高分散、高混合、强湍动及界面急速更新的情况下, 解吸液体与气体以极大的相对速度在弯曲流道中接触, 强化解吸过程。与吹脱池、吹脱塔相比, 该方法气体用量小、不易结垢堵塞、设备体积小。

目前, 超重力解吸技术已成功用于吹脱氨氮废水。沈浩等^[7]使用离心传质机吹脱含氮废水, 脱氮率为 10%~15%, 并认为氮去除率与水中氨浓度无关。祁贵生等^[8]用空气吹脱氨氮废水, 旋转填料床比传统吹脱设备具有较高脱氨氮率且对废水中的易挥发油类组分、COD 等都有较好的去除作用。焦伟洲等^[9,10]吹脱某焦化厂氨氮废水, 单级氨氮脱除率达 75%, 比塔设备高 35%, 出口氨浓度低于国家合成氨厂废水排放标准。柳来栓等^[11]使用旋转填料床处理某厂氨氮废水, 温度和废水 pH 值对氨氮脱除率影响较大。

本研究以旋转填料床作为吹脱设备, 以空气为汽提剂处理氨氮废水, 将水中的游离氨分子解吸到气相中, 通过一系列实验, 考察各因素对脱氨率和产氨率的影响, 验证吹脱后气相中氨浓度能否满足 SCR 脱硝要求, 为干法脱硝制氨工艺提供新思路。

2 实 验

2.1 材料与试剂

氨水(相对分子质量 35.045, 工业级, 纯度约为 25%, 汇鸿源化工有限公司), 甲基红(相对分子质量 269.30, 分析纯, 纯度 0.1%, 沈阳从科化工有限公司), 硫酸(相对分子质量 98.078, 分析纯, 纯度 95%~98%, 成都市科隆化学品有限公司), 无水乙醇(工业纯, 浓度 99.70wt%, 天津化工试剂三厂), 氢氧化钠(相对分子质量 40, 纯度 ≥96.00%, 天津化工试剂三厂), 超纯水实验室自制。

2.2 实验流程

以错流旋转填料床(实验室自制)为吹氨设备, 所用丝网填料和乱堆填料均为不锈钢, 前者孔隙率为 95%, 比表面积为 780 m²/m³, 后者孔隙率为 93%, 比表面积为 239 m²/m³。采用空气-氨水体系, 考察各因素对脱氨率和产氨率的影响。采用化学滴定法测定液体出口氨水浓度, 用硫酸吸收法测定气体中氨浓度^[12]。

2.2.1 超重力法吹脱氨水小试实验流程

超重力法吹氨小试流程如图 1 所示, 空气经风机进入空气缓冲罐, 经阀门和气体流量计计量后进入空气加热器, 空气加热到指定温度后穿过内径 30 mm、外径 124 mm、高 70 mm 的填料, 同时, 储液槽中的氨水在离心泵作用下经液体流量计后, 通过液体进口进入位于转子中心的液体分布器, 由液体分布器均匀喷洒在填料内缘, 在高速旋转的填料作用下, 氨水溶液在离心力作用下沿径向填料外缘运动, 氨水溶液被撕裂成液丝、液滴和液膜, 增大了液体表面积, 提高了更新速率。空气与氨水在旋转填料床内充分接触, 吹脱后生成的氨气由装水的氨气回收槽吸收后排入空气, 液体由出口排入废液槽中。液体出口和气体出口分别设置浓度检测口。

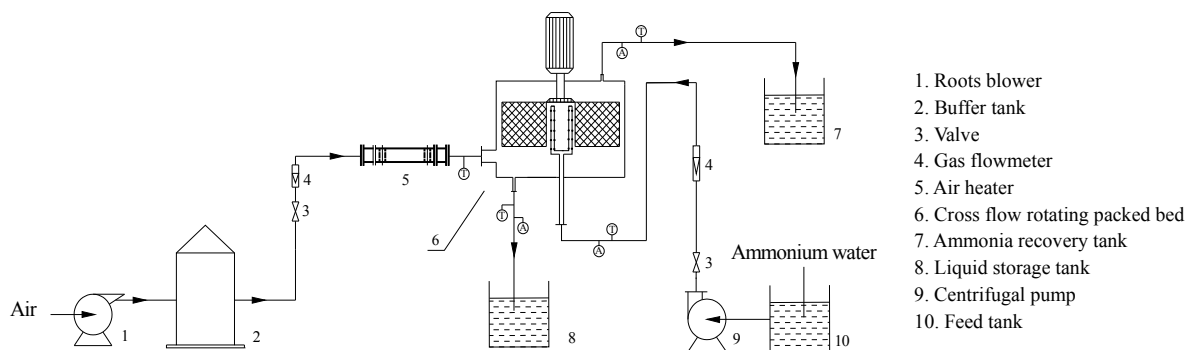


图1 超重力法吹脱氨水小试实验流程

Fig.1 Pilot test flow chart of stripping ammonia water by high gravity method

2.2.2 超重力法吹脱氨氮废水中试实验流程

超重力法吹氨中试流程如图2所示,以内径190 mm、外径375 mm、高175 mm的旋转填料床为吹氨设备,除空气加热器外,其余与图1相同。

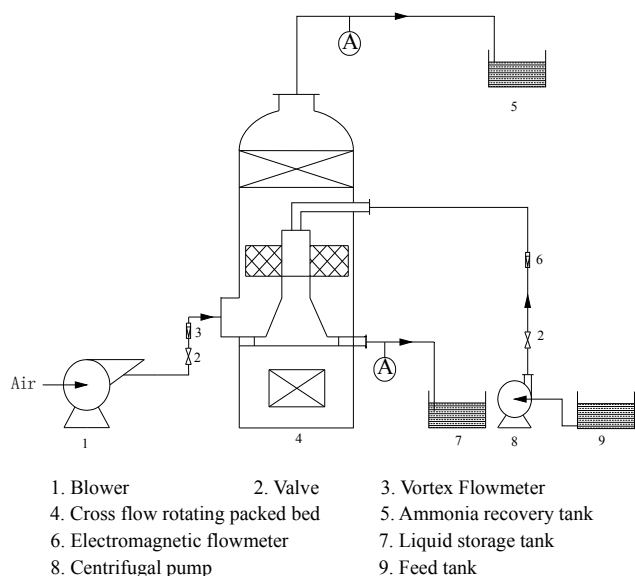


图2 超重力法吹脱氨水中试实验流程

Fig.2 Experimental flow chart of stripping ammonia water by high gravity method

2.3 分析及数据处理

2.3.1 脱氨率

脱氨率 η (%)是衡量装置传质性能的最重要指标,计算如下:

$$\eta = (x_1 - x_2) / x_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中, x_1, x_2 分别为吹脱前后氨水的浓度(%)。

2.3.2 产氨率

产氨率计算如下:

$$Y_2 = Y_1 - L(X_2 - X_1) / G \quad (2)$$

$$y = Y_2 / (1 + Y_2) \quad (3)$$

式中, Y_1, Y_2 分别为气体进、出口氨气与气相中其它组分的摩尔比, L 为液体的摩尔流量(mol/h), X_1, X_2 分别为进、出口氨水与液相中其它组分的摩尔比, G 为气体的摩尔流量(mol/h), y 为产氨率(%)。

2.4 不同 pH 值下游离氨含量

氨水吹脱过程中,氨水中 OH^- 浓度显著影响游离氨含量。氨水中的氨主要以游离氨(NH_3)和氨离子(NH_4^+)形式存在,二者相加为总氨(NH_{3T}),总氨浓度计算如下(C 为各成分浓度):

$$C_{\text{NH}_{3T}} = C_{\text{NH}_4^+} + C_{\text{NH}_3} \quad (4)$$

氨在水中发生电离反应,存在化学平衡 $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$, 电离产生的 NH_4^+ 可发生水解,但由于氨水中有大量 OH^- , 故可忽略 NH_4^+ 的水解,只考虑氨水中的电离反应,电离平衡常数 K_b 计算如下:

$$K_b = C_{\text{NH}_4^+} C_{\text{OH}^-} / C_{\text{NH}_3} \quad (5)$$

变形得:

$$C_{\text{NH}_4^+} = K_b C_{\text{NH}_3} / C_{\text{OH}^-} \quad (6)$$

将亨利定律 $p_e = H C_{\text{NH}_3}$ 和式(6)代入式(4),得:

$$C_{\text{NH}_{3T}} = p_e K_b / H C_{\text{OH}^-} + p_e / H \quad (7)$$

式中, p_e 为氨水中游离氨的蒸汽分压(Pa), $H \approx E M_s / \rho_s$ 为亨利常数(kPa·m³/mol), E 为亨利系数(kPa), M_s 为溶剂摩尔质量(kg/kmol), ρ_s 为溶剂密度(kg/m³)。

通过式(7)得不同 pH 值下的 p_e , 利用亨利定律求出氨水中游离氨的浓度 C_{NH_3} 。不同 pH 值下氨水中游离氨占总氨的百分比($C_{\text{NH}_3} / C_{\text{NH}_{3T}}$)如表1所示。由表可知,氨水中游离氨比例随 pH 值升高先迅速增大后趋于平缓, pH=11 时游离氨含量达 90.47wt%。氨水浓度较高时,其中多数 NH_4^+ 与 OH^- 结合,游离氨含量较低;氨水浓度

较低时, 其中的 NH_4^+ 含量较少, 较多的氨以游离氨形式存在, 游离氨含量较高。

表 1 不同 pH 值下游离氨在总氨中的含量

Table 1 Content of free ammonia in total ammonia at different pH values							
pH	7	8	9	10	11	12	13
Content of free ammonia/wt%	0.67	5.52	34.02	78.12	90.47	91.99	92.16

Note: Temperature 25 °C, ammonia water concentration 25wt%, pressure 101.325 kPa.

氨水吹脱过程符合双膜理论, 总传质速率方程为

$$N_{\text{NH}_3}=K_G(p_{\text{NH}_3}^*-p_{\text{NH}_3})=K_L(C_{\text{NH}_3}-C_{\text{NH}_3}^*) \tag{8}$$

式中, N_{NH_3} 为总传质速率[$\text{kmol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$], K_G 为气相传质系数[$\text{kmol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Pa})$], $p_{\text{NH}_3}^*$ 为与氨水中游离氨浓度平衡的气相分压(Pa), p_{NH_3} 为气相中游离氨分压(Pa), K_L 为液相传质系数[$\text{kmol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Pa})$], $C_{\text{NH}_3}^*$ 为与气相分压平衡的液相氨浓度(mol/L)。

从式(8)可以看出, 分压差($p_{\text{NH}_3}^*-p_{\text{NH}_3}$)或浓度差($C_{\text{NH}_3}-C_{\text{NH}_3}^*$)越大, 则 N_{NH_3} 越大, 氨水中的游离氨占比越高, 吹脱过程中氨的传质速率越高, 吹脱率也越高。

3 结果与讨论

3.1 小试实验

3.1.1 进气温度对脱氨率和产氨率的影响

固定超重力因子 $\beta=58.19$ 、气液体积比 $R=500$ 、液体进口温度 20 °C, 考察进气温度对脱氨率 η 和产氨率 y 的影响, 结果如图 3 所示, 两种填料的 η 和 y 均随进气温度增大线性增大。丝网填料 $y=21.5\%\sim31.3\%$, 120 °C时 η 最高可达 47.0%; 乱堆填料 $y=20.4\%\sim29.2\%$, 120 °C时 η 最高可达 42.0%。进气温度提高, 气相体积传质系数和体积传热系数迅速增大, 加强了气液在填料层中的传热效果, 氨水传热较多, 温度升高, 游离氨在水中的溶解度下降, 游离氨从液相向气相的传递速率增加, 吹脱率迅速增大。随进气温度增加, 产氨率增大, 这是因为脱氨率增大, 液相中氨向气相中转移增多, 气相中氨浓度增大, 产氨率增大。进气温度为 30 °C时, 产氨率高于 10%, 即常温时可产生满足 SCR 脱硝要求的氨气。

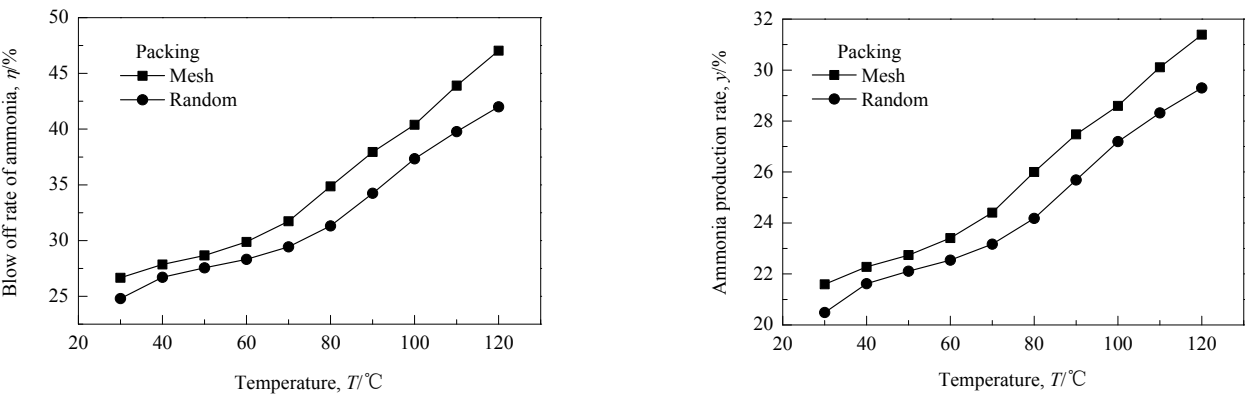


图 3 进气温度对脱氨率和产氨率的影响

Fig.3 Influence of intake air temperature on blow off rate of ammonia and ammonia production rate

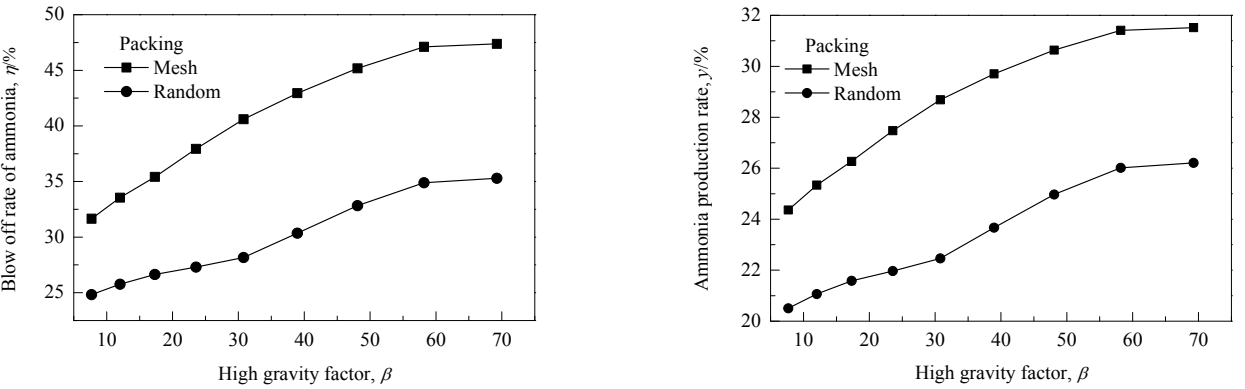
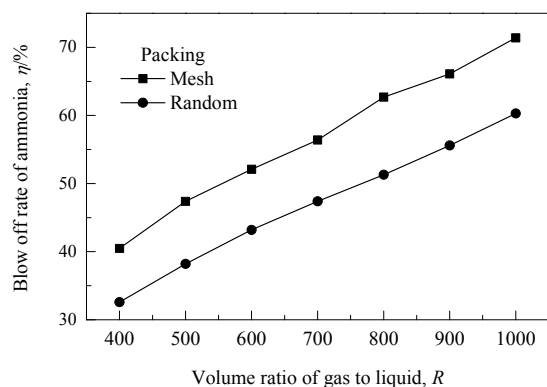


图 4 超重力因子对脱氨率和产氨率的影响

Fig.4 Influence of high gravity factor on blow off rate of ammonia and ammonia production rate

3.1.2 超重力因子 β 对脱氨率和产氨率的影响

固定进气温度 120℃、气液体积比 $R=500$ 、液体进口温度 20℃,考察超重力因子 β 对脱氨率 η 和产氨率 y 的影响,结果如图4所示,两种填料的 η 和 y 均随 β 增加呈先增大后不变的趋势。丝网填料 $y=24.3\%\sim 31.5\%$, $\beta=58.19$ 时 η 达到峰值 47.0%;乱堆填料 $y=20.5\%\sim 26.2\%$, $\beta=58.19$ 时 η 达到峰值 35.0%。随 β 增大,液体在填料内受到的离心力增大,氨水与填料的碰撞更剧烈,氨水很快被旋转的填料分割成更小的液滴,比表面积迅速增大,表面更新速率加快,与空气进行错流接触,气相体积传质系数大大提高,使传质性能增强,增大了吹脱率;但 β 持续增大,氨水在填料内的停留时间缩短,气液未能充分接触,游离氨由液相进入气相所需时间接近于停留时间,不利于吹脱,且此时液滴的破碎程度和液体湍动程度可能达到极限,有效的气液接触面积基本保持不变,因此脱氨率不变。产氨率随 β 变化的趋势与脱氨率相同,可达 10%以上。综合各因素,最适宜的超重力因子 $\beta=58.19$ 。



3.1.3 气液体积比 R 对脱氨率和产氨率的影响

固定进气温度 120℃、超重力因子 $\beta=58.19$ 、液体进口温度 20℃、氨水进料量为 10 L/h,通过调节气量考察气液体积比 R 对氨水脱氨率 η 和产氨率 y 的影响,结果如图5所示。两种填料的 η 均随 R 增加线性增大, y 随 R 增大线性减小。丝网填料 $y=24.4\%\sim 33.3\%$, $R=1000$ 时 η 达 71.4%;乱堆填料 $y=22.0\%\sim 29.2\%$, $R=1000$ 时 η 达 60.3%。在液量一定的条件下,随气液比增大,风速和风量相对增大,使空气与氨水的相对速度迅速增大,空气与填料层中的氨水液滴发生强烈撞击,使氨水更好与空气接触,氨水中的游离氨迅速向气相传递,使脱氨率呈线性增长趋势。随气液比增大,单位时间的空气流量增大,而氨水进料量固定不变,降低了游离氨在有限时间内进入气相的浓度,使氨在空气中的占比降低,表现为产氨率下降。本实验是为解决氨源问题,脱氨率无需太大。为节省能耗,可改变气液比,使产氨率达到 10%,实验表明两种填料的产氨率均可满足。

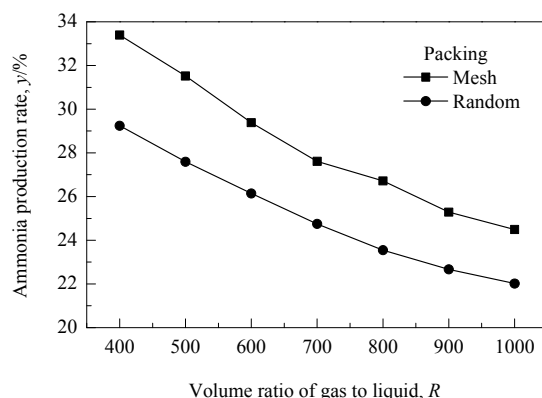


图5 气液体积比对脱氨率和产氨率的影响

Fig.5 Influence of volume ratio of gas to liquid on blow off rate of ammonia and ammonia production rate

由上述实验可知,在实验范围内,两种填料的产氨率均超过 10%,满足 SCR 脱硝所需氨浓度,超重力法氨水吹脱所制氨可用于 SCR 脱硝。

3.2 中试实验结果与关联式建立

3.2.1 中试实验

为进一步接近工况条件,对超重力法制氨工艺进行中试实验。超重力法氨水吹脱过程中,吹脱为主要产氨过程,因此考察常温常压下操作参数对脱氨率 η 和产氨率 y 的影响。固定液体进口温度为 20℃,氨水进料量为 0.1 m³/h,考察超重力因子 β 和气液体积比 R 对 η 和 y 的影响,结果如图6所示。可以看出, η 随 β 增大先迅速增大后缓慢增大,随 R 增大先迅速增大后缓慢增大最后下降。这是因为随气液比增大,空气对氨水的破碎作用增

强,脱氨率增大;气液比继续增大,气体停留时间缩短,减少了空气对氨水的冲击,使脱氨率下降。 y 随 β 增大先迅速增大后缓慢增大,随 R 增大先迅速降低后缓慢降低。相同条件下,中试结果与小试结果有差异,可能是因为小试实验气量较小,相同气液比下液量较低,氨水不能大量附着在填料上,且小试实验设备体积小,气液停留时间短,吹脱效果低于中试实验。图6(d)中A区域为氨气爆炸极限,在实际操作过程中必须避免氨气处于该浓度范围。产氨率处于爆炸极限的气液体积比为 850~2000,气液比不能设定在该范围内。产氨率为 10%~15%时,需加稀释风机对氨气进行稀释,使进入 SCR 反应器的氨浓度为 5%~10%。超重力因子=131.67,气液体积比为 3000~7000 时,产氨率可达 4.8%~11.1%。

通过调节气液比可控制产氨率，无需稀释氨气浓度即可使产氨浓度达 5%~10%，可简化 SCR 脱硝工艺。

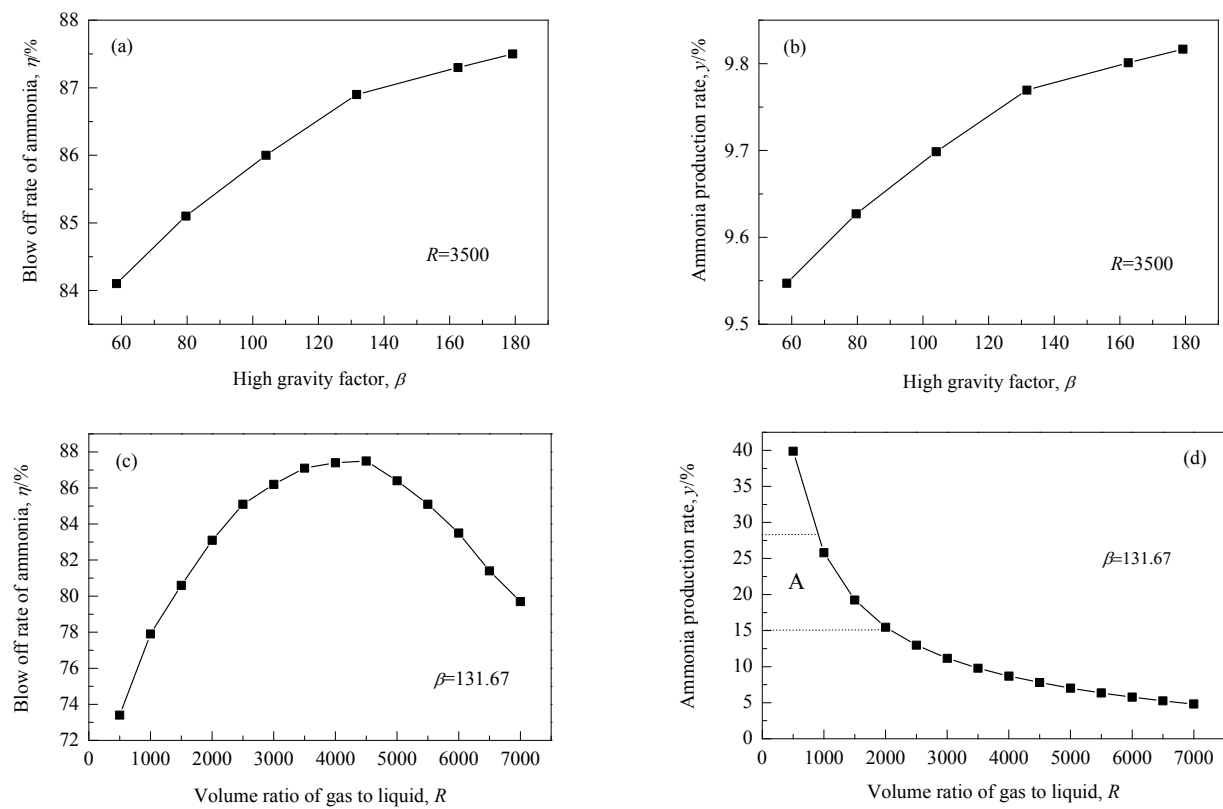


图 6 超重力因子和气液比对脱氨率和产氨率的影响

Fig.6 Influence of high gravity factor and volume ratio of gas to liquid on blow off rate of ammonia and ammonia production rate

3.2.2 产氨率计算关联式建立

超重力法制氨工艺的产氨率 y 与超重力因子 β 和气液体积比 R 等操作参数有关。为方便通过调节操作参数控制产氨浓度，对中试实验数据拟合，得如下关联式：

$$y=2980.96\beta^{0.13356}R^{-0.7368} \tag{10}$$

关联式计算值与实验值如图 7 所示，二者的相对误差小于 10%，相关系数大于 0.999。

3.3 吹脱氨氮废水实验

不同行业产生的氨氮废水及其它物质含量不同，某稀土分离厂排出的氨氮废水的水质主要指标^[13]如表 2 所示，可见相同条件下不同初始浓度的碱皂废水和碳氨沉淀洗涤废水中氨氮去除率非常接近，表明废水中其它杂质对吹脱效果影响较小。

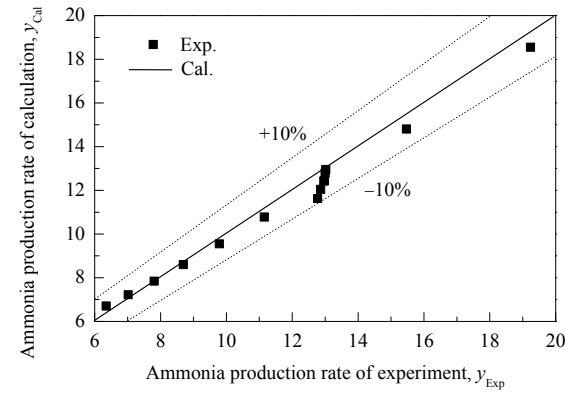


图 7 产氨率计算值与实验值的对比

Fig.7 Comparison between calculated ammonia production rate and experimental value

表 2 氨氮废水水质指标

Table 2 Main indexes of wastewater quality

Waste water	NH ₃ -N/(mg/L)	COD/(mg/L)	FeS ₂ /(mg/L)	pH
Alkaline soap wastewater	4200	1152	2~3	6.5
Carbon amine precipitation washing water	1570	16	—	6.67

研究^[14]表明，吹脱法氨氮废水中的 COD 脱除率较低，几乎可忽略不计，需在氨氮废水中加入其它物质或

与其它技术耦合才能脱除 COD。文献^[13]未对氨氮废水进行预处理(处理 FeS₂)，氨氮废水浓度降至 8 mg/L，而

实际工况下是将氨氮废水与来自双氧水储槽的双氧水同步注入预处理桶,开启搅拌器反应去除 FeS_2 ,吹脱后氨氮废水含量平均为 8.58 mg/L ,因此可认为对氨氮废水的吹脱无影响。相较于氨氮废水中 FeS_2 含量较低的情况,在强碱性条件下,铁元素会与 OH^- 生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 或 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 沉淀,虽消耗了 OH^- ,但量很小,可忽略不计;硫元素被空气中的氧气氧化为 SO_4^{2-} 。因此本实验中浓度为 $1\text{wt}\%$ 的氨氮废水用氨水和去离子水配制,未考虑其它成分的影响。

常温常压下,固定液体进口温度为 20°C 、氨氮废水进料量为 $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$,考察超重力因子 β 和气液比 R 对脱氨率 η 和产氨率 y 的影响,结果如图8所示。可以看出, η 随 β 增大呈增大趋势,随 R 增大先迅速增大后缓慢增大, y 随 β 增大线性增大,随 R 增大先迅速降低后缓慢降低。由图可知, $R=150$ 时, $\eta=36.6\%$, y 最大,可达 3.0% ,但仍低于 5% 。虽然单独吹脱氨氮废水不能满足 SCR 脱硝所需氨浓度,但将氨氮废水吹脱与氨水吹脱工艺相结合,不仅可节约氨水量,还可实现“以废治废”。

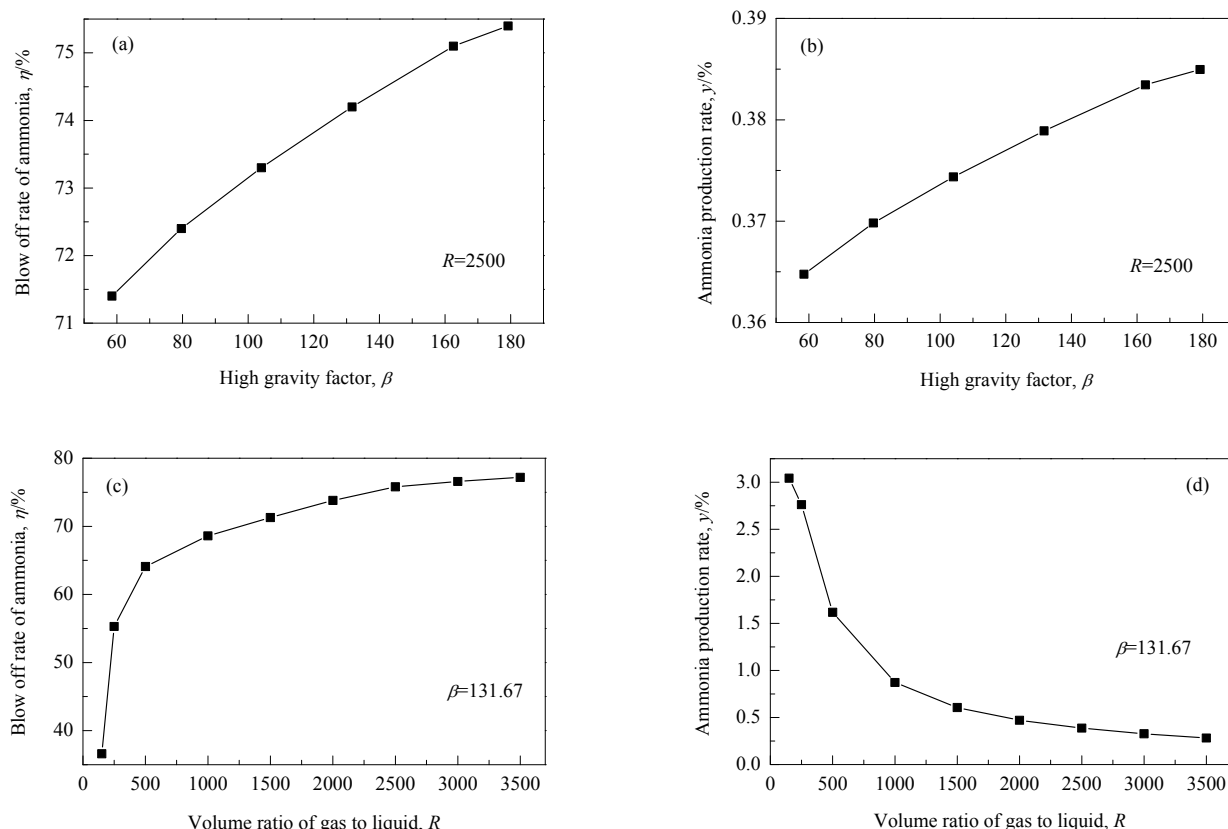


图8 超重力因子和气液比对脱氨率和产氨率影响

Fig.8 Influence of high gravity factor and volume ratio of gas to liquid on blow off rate of ammonia and ammonia production rate

4 结论

采用超重力法氨水吹脱技术,通过单因素实验考察各因素对脱氨率和产氨率的影响,得出以下结论:

(1) 气量为 $4\sim 10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,丝网和乱堆两种不锈钢填料的脱氨率均随进气温度、超重力因子和气液体积比增大而增大;产氨率随进气温度和超重力因子增大而增大,随气液体积比增大而降低,小试实验产氨率可达 10% 以上,满足干法脱硝需氨要求,超重力法氨水吹脱所制氨可用于 SCR 脱硝。

(2) 气量为 $50\sim 700 \text{ m}^3/\text{h}$ 、超重力因子 $\beta=131.67$ 、气

液体积比 $R=3000\sim 7000$ 时,产氨率 $y=4.8\%\sim 11.1\%$ 。 $y<5\%$ 时,可通过增大超重力因子或降低气液比增大产氨率,当 $y>10\%$ 时,可通过降低超重力因子或增大气液比降低产氨率,从而实现通过调节操作参数控制产氨率。在中试实验的基础上得超重力法制氨工艺中产氨率 y 与超重力因子 β 、气液体积比 R 的无因次关联式为 $y=2980.96\beta^{0.13356}R^{-0.7368}$,相关系数大于 0.999 ,实验值与拟合值的最大误差小于 10% ,相关性良好。

(3) 为节约氨水耗量,用氨氮废水代替氨水。当超重力因子 $\beta=131.67$ 、气液体积比 $R=150$ 时,氨氮废水-空气体系的产氨率达 3.0% ,虽达不到 SCR 脱硝所需浓

度,但可提供部分氨气,节约氨水用量。

参考文献

- [1] 王琦,王树荣,闫志勇,等.燃煤电厂SCR脱硝技术催化剂的特性及进展[J].电站系统工程,2005,21(3):4-6.
Wang Q, Wang S R, Yan Z Y, et al. The characteristic and development of SCR catalysts in coal-fired power plants [J]. Power System Engineering, 2005, 21(3): 4-6.
- [2] 张希衡.水污染控制工程[M].修订版.北京:冶金工业出版社,1993:12-15.
Zhang X H. Water pollution control engineering [M]. Revised Edition. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993: 12-15.
- [3] 唐受印,戴友芝,管德存,等.水处理工程师手册[M].北京:化学工业出版社,2000:485.
Tang S Y, Dai Y Z, Guan D C, et al. Water treatment engineer manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000: 485.
- [4] 汪大猷,徐新华,宋爽.工业废水中专项污染物处理手册[M].北京:化学工业出版社,2000:210.
Wang D H, Xu X H, Song S. Manual for treatment of specialized pollutants in industrial waste water [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000: 210.
- [5] 汤志刚,贺志敏,郭栋,等.焦炉烟道气双氨法一体化脱硫脱硝:从实验室到工业实验[J].化工学报,2017,68(2):496-508.
Tang Z G, He Z M, Guo D, et al. Desulfurization and denitration integrative process for coke oven flue gas using dual ammonia solution: from laboratory to industrial test [J]. CIESC Journal, 2017, 68(2): 496-508.
- [6] 刘有智.超重力化工过程与技术[M].北京:国防工业出版社,2009:1-5.
Liu Y Z. Chemical engineering process and technology in high gravity [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009: 1-5.
- [7] 沈浩,施南庚.用离心传质机对含氨废水进行吹脱[J].南京化工学院学报,1994,16(4):60-64.
Shen H, Shi N G. Stripping ammonia from ammonia water in centrifugal mass transfer apparatus [J]. Journal of Nanjing University of Chemical Technology, 1994, 16(4): 60-64.
- [8] 祁贵生,刘有智,王建伟,等.超重力法吹脱氨氮废水技术应用研究[J].煤化工,2007,35(1):61-63.
Qi G S, Liu Y Z, Wang J W, et al. Stripping ammonia-nitrogen wastewater by high gravity method [J]. Coal Chemical Industry, 2007, 35(1): 61-63.
- [9] 焦伟洲,刘有智,刘建伟,等.超重力旋转床处理焦化氨氮废水中试研究[J].现代化工,2005,25(7):257-259.
Jiao W Z, Liu Y Z, Liu J W, et al. Pilot study on coking ammonia-nitrogen wastewater by high-gravity rotary bed [J]. Modern Chemical Industry, 2005, 25(7): 257-259.
- [10] 焦伟洲,刘有智,章德玉.超重力旋转填料床在环境工业中的应用[J].四川环境,2005,24(1):78-82.
Jiao W Z, Liu Y Z, Zhang D Y. The application of high gravity rotating packed bed in environmental industry [J]. Sichuan Environment, 2005, 24(1): 78-82.
- [11] 柳来栓,谢国勇,刘有智.旋转填料床处理含氨废水实验研究[J].中北大学学报(自然科学版),2002,23(3):222-225.
Liu L S, Xie G Y, Liu Y Z. Experimental study on treatment of ammoniac nitrogen wastewater with rotating packed bed [J]. Journal of North China Institute of Technology (Natural Science Edition), 2002, 23(3): 222-225.
- [12] Conway E J, Byrne A. An absorption apparatus for the micro-determination of certain volatile substances: the micro-determination of ammonia [J]. Biochemical Journal, 1933, 27(2): 419-429.
- [13] 时钧.化学工程手册[M].北京:化学工业出版社,1996:1-20.
Shi J. Chemical engineering manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1996: 1-20.
- [14] 黄海明,肖贤明,晏波.氨吹脱处理稀土分离厂中氨氮废水试验研究[J].环境工程学报,2008,2(8):1062-1065.
Huang H M, Xiao X M, Yan B. Experimental research on treatment of ammonia nitrogen wastewater by ammonia stripping in a rare earths separation factory [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(8): 1062-1065.
- [15] 曹国平,王莉萍,王新德.吹脱法处理高浓度氨氮废水研究[J].化学推进剂与高分子材料,2008,6(6):54-57.
Cao G P, Wang L P, Wang X D. Study on dealing with high concentrated ammonia nitrogen wastewater by blow-off method [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2008, 6(6): 54-57.
- [16] 代明星,全学军,徐飞,等.阵列式直通填料塔用于氨氮废水吹脱的性能研究[J].重庆理工大学学报,2017,(3):90-96.
Dai M X, Quan X J, Xu F, et al. Air stripping of ammonia using a packed tower with array straight channel filler [J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2017, (3): 90-96.
- [17] Yin S, Chen K, Srinivasakannan C, et al. Enhancing recovery of ammonia from rare earth wastewater by air stripping combination of microwave heating and high gravity technology [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 337(2018): 515-521.
- [18] Yang S K, Lee E S, Kim H. A study on the recovery of nitrogen compound by air-stripping in ammonia nitrogen wastewater [J]. Journal of Energy & Climate Change, 2017, 12(1): 44-51.