

文章编号: 2095—0411 (2013) 03 - 0088 - 05

天然气脱硫技术研究现状与发展趋势^{*}

王 剑¹, 张晓萍², 李恩田¹, 马 路¹, 王树立¹

(1. 常州大学 江苏省油气储运技术重点实验室, 江苏 常州, 213016; 2. 总装备部工程设计研究总院, 北京 100028)

摘要: 目前天然气的脱硫方法主要有湿法脱硫、干法脱硫、生物法脱硫、膜法脱硫等。随着研究的深入, 离子液体技术、超重力脱硫以及臭氧氧化法等新技术为天然气脱硫领域拓展了新的方向。介绍了现有常用的脱硫工艺, 指出了各法的优势及存在的问题, 并提出了今后脱硫技术的发展趋势。

关键词: 天然气; 硫化氢; 脱硫技术

中图分类号: TQ 028.8

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095—0411.2013.03.022

Research on Current Status and Development Trends of Natural Gas Desulfurization Technology

WANG Jian¹, ZHANG Xiao-ping², LI En-tian¹, MA Lu¹, WANG Shu-li¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology, Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. Special Engineering Design and Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: Nowadays, the desulfurization technologies include wet desulfurization, dry desulfurization, biological desulfurization, and desulfurization by membrane process, etc. As research continues, natural gas desulfurization is expanded to a new orientation by ionic liquid desulfurization, high gravity and ozone oxidize method. In this paper, some general desulfurization methods were introduced, the advantages and existent problems were pointed out, and the development tendency of desulfurization was also presented.

Key words: natural gas; H₂S; desulfurization technology

天然气是一种优质、清洁的能源和化工原料, 而且使用方便, 拥有较高的综合经济效益。我国拥有丰富的天然气资源, 但是约 30% 左右的天然气中含有大量硫元素, 其中 H₂S 含量大于 1% 的天然气储量占到总储量的 1/4, 普光气田开采出的天然

气中 H₂S 含量甚至高达 13%~18%, 有机硫化物高达 340.6 mg/m³^[1]。H₂S 的存在不仅会造成设备和管道的腐蚀、危害人体健康, 其燃烧产物也会污染环境, 因此在诸多设计规范及环保标准中都对硫化物的排放做了明确规定, 如 GB16297《大气

^{*} 收稿日期: 2012 - 12 - 10

基金项目: 江苏省科技厅计划项目 (BY2011127, BY2012095); 中石油科技创新基金项目 (2012D - 5006 - 0604)

作者简介: 王剑 (1989 -), 男, 江苏徐州人, 硕士生; 通讯联系人: 王树立。

污染物综合排放标准》规定,排放天然气中 SO_2 的质量浓度不能高于 $0.4\text{mg}/\text{m}^3$ 。为了适应日益严格的环保要求及开发出新气质趋向复杂化的背景下,迫切需要加大对天然气脱硫技术的研究。

1 湿法脱硫

湿法脱硫的基本原理是利用特定的吸收剂与气体逆流接触将 H_2S 脱除,吸收 H_2S 后的富液可以通过再生进行循环利用。

1.1 物理吸收法

物理吸收法一般采用特殊的有机复合物做吸收剂,利用吸收剂对硫化物等酸性气体溶解性大的特点来脱硫。主要有低温甲醇法、多乙二醇二甲醚法、N 甲基吡咯烷酮法等。

低温甲醇法又叫冷甲醇法,是由德国的 Linde 公司和 Lurgi 公司共同开发的。甲醇在低温下对 H_2S 等酸性组份的吸收能力强,当温度从 20°C 降到 -40°C 时, CO_2 的溶解度约增加 6 倍,在 -40 至 -50°C 时, H_2S 的溶解度比 CO_2 大 6 倍,以此来选择性吸收。该工艺具有诸多优点:在保证后续净化要求的基础上可以对组分气中的 CO_2 、 H_2S 以及 COS 等硫化物加以回收利用,回收的 CO_2 纯度可满足尿素生产需求,同时从富含 H_2S 的溶液中可用克劳斯法回收硫磺^[2];净化气中总硫含量可降至小于 $0.1\mu\text{L}/\text{L}$ ^[3];反应过程中不起泡,对设备无腐蚀。但是,甲醇有毒,需要在整套设备中增加制冷系统,这给操作和维修带来了一定困难。目前,国内已有多套大型合成氨净化装置采用了该工艺,不过该工艺属于国外技术,需要购买专利软件包,低温甲醇技术的国产化仍有待时日。

多乙二醇二甲醚和 N 甲基吡咯烷酮(NMP)都是重要的脱硫脱碳溶剂,工业上主要应用于处理 H_2S 含量较低、高含量 CO_2 、高酸气分压的天然气。工艺流程为:先将原料气中的 CO_2 降低到一定浓度,选择性脱除 H_2S ,最后利用闪蒸再生塔系统,将酸性组份大部分除去。其优点是在吸收过程中同时有选择性地吸收有机硫、并能够改变天然气的烃露点。大连理工大学冉旭等^[4]利用 NMP 对不同浓度的 SO_2 进行吸收实验,并进行了富液再生脱硫率的测定,得出在实验条件下 N 甲基吡咯烷酮的最高脱硫率达到 96%,而再生后 NMP 的最高脱硫率达到 89.3%。实际应用中,一般使用此工艺进行粗脱 H_2S 到 $100\text{mg}/\text{m}^3$,然后使用 ZnO

进行精脱来满足后续的工艺。

1.2 化学吸收法

化学吸收法是利用碱性溶液在常温下与 H_2S 发生可逆反应来脱硫,所得富液可通过升温分解来释放出 H_2S ,从而实现脱硫剂溶液的循环使用。

1.2.1 醇胺法

醇胺法是目前天然气脱硫中使用最广泛的方法,其原理是:有机醇胺化合物上存在氨基和羟基,氨基能够使醇胺水溶液呈现碱性,而羟基能够增大醇胺化合物的水溶性,降低有机蒸汽分压。反应式如下:



上述反应均为可逆反应,当温度较低、压力较高时,溶液吸收 H_2S ;当温度较高、压力较低时,解吸 H_2S ,溶液再生。

常用的醇胺类溶剂有一乙醇胺(MEA)、二乙醇胺(DEA)、二异丙醇胺(DIPA)和甲基二乙醇胺(MDEA)等,前几种吸收液可以划分为第一代醇胺类溶剂。该类醇胺溶剂由于对 H_2S 和 CO_2 选择性较低,且热稳定性较差,高温时易降解,目前的应用已不是很广泛。

第二代醇胺类溶剂是以 MDEA 叔胺为主,MDEA 对 H_2S 吸收能力强,有很高的选择性和较低的能耗,而且不会和 CS_2 ,COS 反应导致变质,已广泛用于克劳斯原料气提浓,斯科特法尾气处理等过程。印度 Basin 天然气处理厂采用 MDEA 法,处理量达到 $850 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$,能够将原料气中的 H_2S 和 CO_2 分别脱至 4×10^{-6} 和 50×10^{-6} (体积分数),得到了很好的脱除效果^[5]。长庆气田第三净化厂原料气中 CO_2 和 H_2S 的初始摩尔分数分别为 5.258% 和 0.028%,经处理后 H_2S 含量达到 $0.38\text{mg}/\text{m}^3$, CO_2 的摩尔分数为 2.418%^[6]。

第 3 代醇胺类溶剂是在 MDEA 的基础上,合成了选择性能比 MDEA 更好的空间位阻胺脱硫剂,如二氨基二甲基丙醇(AMP),BASF 公司的 aM-DEA01-06 系列配方溶剂。南化院开发了位阻胺脱硫脱碳新技术,研制出 3 种以位阻胺为主要溶剂的配方溶剂并测定其净化性能,结果发现在适用范围内较之其他溶剂性能更优,同时建成为阻胺脱硫复合溶剂中试生产装置并实现运行,为这 3 种为阻胺溶剂的工业应用打下基础^[7]。

1.2.2 碱 法

碱法一般不采用强碱性溶液作吸收剂,而大多用 pH 在 9 - 11 之间的强碱弱酸盐溶液。常用的有碳酸盐法等。以碳酸钠溶液为例,将原料气与碳酸钠溶液在吸收塔内逆流接触,反应生成 NaHCO_3 和 NaHS 。真空碳酸盐法将吸收了 H_2S 的富液通过蒸汽蒸馏来实现溶液再生,应用此法与克劳斯法联合可使硫磺纯度达 99.7%,但冷却水和蒸汽的用量大,能耗高。热碳酸盐法是在减压条件下用蒸汽加热再生,释放出 H_2S 气体,同时使 Na_2CO_3 再生,此法主要用于原料气中含有氧气和 CO_2 含量较高的场合。国外 J. Krischan 等^[8]应用 NaOH , NaCO_3 以及 H_2O_2 为吸收液对进气量为 $180\text{m}^3/\text{h}$ 含有 CO_2 及 $1\,040\text{mL}/\text{m}^3$ H_2S 的原料气进行选择性吸收,结果脱硫率可达到 97%,在适当 pH 的条件下, CO_2 的被吸收量很少。

1.3 物理 - 化学吸收法

物理 - 化学吸收法是前二者的综合使用,所用脱硫剂属配方溶液,其脱硫效果比单一化学或物理吸收法更好,故该法将是天然气净化处理的主流。

砒胺法是应用最为广泛的物理 - 化学吸收法,采用环丁砒(物理溶剂)与 DIPA 或 MDEA(化学溶剂)相结合的方式吸收原料气中的硫成分,国内外已建装置超过 200 余套。该工艺流程结合了物理除硫和化学吸收二者的优势,在处理高酸气分压过程时,有较好的吸收能力,净化处理后的气体更好地满足了气质标准要求。德国 Grossenkneten 厂净化装置采用砒胺法将原料气中 6.5% H_2S , 9.5% CO_2 , $150\text{mg}/\text{m}^3$ 的 COS 净化至 H_2S 体积小于 4×10^{-6} , CO_2 为 4.9%, COS(以硫计)为 $4\text{mg}/\text{m}^3$ 。国内川渝气田引进壳牌公司开发的溶剂 Sulfinol - M(砒胺Ⅲ法),此法是在砒胺Ⅱ法工艺性能的基础上开发的,在用于 CO_2 含量高时脱除 H_2S 具备高负荷以及低再生能耗的优点^[9]。

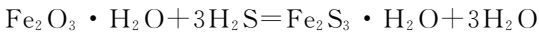
美国天然气研究院研制的 Morphosorb 工艺^[10],是以吗啉衍生物 N - 甲酰吗啉和 N - 乙酰吗啉混合物做吸收溶剂,用来选择性脱除硫化物,这些新型脱硫剂的研制为天然气脱硫提供了更多高效及经济化的选择。

2 干法脱硫

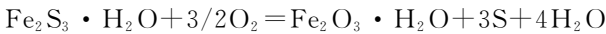
2.1 金属化合物法

该法是利用金属氧化物与硫化氢反应生成金属

硫化物与水,目前主要有海绵铁法、氧化锌法等。海绵铁法是将含有硫化氢的原料气通过装有海绵状铁的反应塔,其中 H_2S 与 Fe_2O_3 充分接触反应生成 Fe_2S_3 。当 Fe_2O_3 被转化接近完成时,向反应塔中吹入空气,在氧气的作用下, Fe_2S_3 又转变 Fe_2O_3 并释放出 S 元素,再生的氧化铁可以循环利用。反应方程式为:



再生的化学方程式为:



该工艺已经有多种改良方法获得了工业应用,具有工艺简单、操作简易、能耗低等优点,但是不适合于高温脱硫。土耳其的 Oguz 等^[11]尝试利用 $\text{Cu}/\text{SBA} - 15$ 氧化物做吸收剂在高温下处理含 H_2S 浓度较高的天然气,结果发现在含铜 21.97% 和 40.22% 的情况下,吸收剂对硫的吸收量的比例分别达到 0.63 以及 1.57。

2.2 非金属矿物吸收法

2.2.1 活性炭吸附法

活性炭是常用的一种固体脱硫剂,在常温下具有加速 H_2S 氧化为硫的催化作用并使之被吸附,常用于有氧、高湿度气氛中脱除低浓度硫化氢。传统的活性炭难以达到工业脱硫要求,而将活性炭浸渍在过渡金属中如 Fe_2O_3 、 CuO 等,可显著增强活性炭的催化活性。樊辉等^[12]以活性炭为载体,采用浸渍法制备了以 CuO 为活性组分的活性炭基脱硫剂 CuO/AC ,研究表明在适宜的条件下,穿透硫容可达 20.8%,脱硫性能好于国外的 RGM 技术。但是活性炭价格昂贵,再生过程中炭的损失严重,重复利用率不高,一时难以在我国大规模推广。

2.2.2 分子筛法

分子筛本质是一种硅铝酸盐,是通过氧的桥接作用而组成分子,在分子中有许多孔径均匀和排列整齐的孔道,致使其具有较大的内表面积和局部高度集中的极电荷。吸附过程主要是利用很强的亲硫化氢能力和较高的硫容量来脱除硫化氢。该法具有内表面积大,吸附能力强的优点,对于小型的 LNG 装置,可采用此法进行脱硫脱水^[13]。但是该法选择性差,再生能力不强。

3 膜分离法

膜分离法天然气脱硫是利用特殊的聚合物膜材

料对 H_2S 和 CH_4 的选择性不同,使 CH_4 和 H_2S 气体通过膜时产生溶解 - 扩散速度差异, H_2S 作为渗透气, CH_4 形成渗余气从而实现分离。国内赵会军等^[14]选用聚酰亚胺中空纤维膜对天然气中的 H_2S 进行脱除。实验结果表明,对 H_2S 含量为 $296\text{mg}/\text{m}^3$ 的原料气,单级膜组件脱硫率达 97%,产品气 H_2S 含量低于管输标准。J. Hao 等^[15]研究了膜循环级联的方式处理低品质天然气中的 H_2S 等酸性气体,发现将渗余气作为原料气再次利用,可以减少烷烃损失率并能够使总能耗降低 20% 左右。膜分离法装置简单,无动力设备,能耗低,污染小,但由于制膜工艺复杂,在实际工业中应用较少。

目前更为广泛使用的是将膜基气体分离与传统的物理吸附、化学吸收等方法结合起来的膜吸收技术^[16]。该技术是将天然气通过减压阀通入膜分离器的管腔,其中 H_2S 渗入到管腔外部被进入壳程的碱性吸收液吸收。吸收后的富液进入膜再生器可以通过加热再生,循环利用,而 H_2S 则可以被真空泵抽出,进入尾气罐,从而能够实现硫回收。韩永嘉等^[17]采用质量分数为 30% 的 MDEA 为吸收液,聚丙烯(PP)中空纤维微孔膜组件为吸收器,进行了烟气脱硫实验,结果表明模拟烟气中 SO_2 含量从 $57.2\text{g}/\text{m}^3$ 降到 $8.01\text{g}/\text{m}^3$,脱硫率达 86%。

对于吸收了硫化氢的富液进行循环再生利用是膜分离法脱硫的新方向。马路等^[18]采用汽提法和膜蒸馏技术对吸收了烟气的 MDEA 富液进行再生,结果表明两种方法的最大再生率相近,而膜蒸馏再生的最佳温度比汽提法低 47.8%,有效降低了能耗。膜吸收与膜蒸馏脱硫技术是且具有广阔运用前景的新工艺,虽然还处于实验阶段,但若将试验技术工业放大,必将产生良好的经济和环境效益。

4 生物脱硫

生物脱硫是一种新兴的脱硫工艺,利用一些微生物、细菌将 H_2S 转化为单质硫并回收。目前所应用的生物脱硫方法主要是在温和的外部环境条件下,利用有机微生物或酶对硫成分进行催化反应,将非水溶性硫化物逐步转化为水溶性化合物进而将硫成分脱除。叶姜瑜等^[19]采用 Bio - SR 工艺,利用铁盐吸收与氧化亚铁硫杆菌的联合作用对 H_2S 进行脱除实验,实验中硫化氢脱除效率达 98.4%。但是该技术在国内外主要还处在实验性探索阶段,应用于工业上的缺点是初始化运行微生物稳定周期较

长,并且要求来自供应商良好的技术支持。国外已实现工业化的是荷兰 Paques 公司与 Shell 公司联合的 Paques/Thiopaq 工艺。

5 其他方法

5.1 离子液体技术

近年来,离子液体(ILs)作为环境友好型溶剂,在天然气、汽油脱硫方面具有一般脱硫剂无法比拟的优势,该法具有熔点低、液程宽、污染小以及硫资源回收利用率高等优点。吸收硫化物的离子液体按阴阳离子不同可分为胍类、咪唑类和醇胺类等,目前国内外诸多研究都集中在运用实验法、量子化学计算法和分子模拟法来选择合适的脱硫离子液体^[20]。离子液体吸收 SO_2 的工程化试验研究已相当丰富,但工业应用仍处于起步阶段。离子液体聚合物和离子液体负载化等方法对离子液体的需求量少,脱硫效果好,并克服离子液体成本高,粘度大等缺点,是具有潜力的工业化应用形式。

5.2 超重力脱硫技术

超重力能够加快不同分子间的扩散和相间传质过程,使液体形成微米至纳米级的膜或微小液滴,从而加大了气液接触面积,将相间传质速率提高 1~3 个数量级。冷继斌等^[21]对超重力技术应用于模拟天然气脱硫过程进行了实验研究,获得了 99% 以上的脱硫效率。祁贵生等^[22]采用超重力设备,以 PDB 为脱硫催化剂,对含硫化氢气体的原料气进行脱除实验,并考察了诸多因素对脱硫率的影响,得到 92.4% 的平均脱硫率,为该技术的工业应用奠定了基础。

目前,该工艺主要应用于液相氧化还原技术脱硫中,在常压 SCOT 单元脱硫、海上油气井平台伴生气脱硫等领域具有广阔的应用前景。但是由于流程长度有限,可能会发生溶液短路的情况,所以还需要进一步的深入研究。

5.3 臭氧氧化法

臭氧氧化法是近年来新兴的一种脱硫技术,主要是利用臭氧在催化剂或紫外线照射下快速分解出来的具有强氧化性的原子氧,将 H_2S 等恶臭物质氧化,使之生成高价态硫化物,而且在氧化过程中不会产生 SO_2 ,能够避免二次污染。氧化过程中即使臭氧过量,也会因为催化剂(如铁屑)的存在而

迅速分解, 不会对大气的污染。国内哈工大汪剑锋^[23]采用自主研发的高频无极紫外灯产生出的臭氧, 在紫外辐射的协同作用下, 光解氧化去除恶臭气体中的 H_2S , 脱硫率可达到 96.6%。该法不仅能够脱除硫化氢还具有除臭效果, 而且节能高效, 其规模化的工业应用还需要进一步的改善。

6 发展趋势

硫化氢脱除技术经过几十年的发展, 已取得很多成果。但是传统的脱硫方法若单独使用, 总是存在诸多弊端, 比如物理吸附剂普遍存在价格昂贵, 成本高的缺点; 而醇胺类溶剂虽然成本偏低, 但主要问题是富液的回收再利用技术不足, 导致资源的浪费; 干法脱硫剂的种类多, 可是对于操作条件要求比较严格而且脱硫率不高。

随着我国更多新气田的开发, 伴随而来的是天然气气质更加复杂化; 国家日益严格的环保标准以及不断拓展的海外油气业务都需要加强对天然气脱硫技术的深入研究^[24]。天然气脱硫技术的发展趋势主要是: ①通过加强对吸收剂分子结构的研究, 设计出新配方型的脱硫溶剂以及添加剂, 比如复合型物理-化学吸收剂, 能够结合二者的优势, 以便将来出现气质变化的情况下能有相应的解决措施。②在已有技术的基础上进行集成创新, 如膜吸收脱硫与膜蒸馏技术的结合, 不仅能够将天然气净化, 对吸收液的循环利用还可以大大节约成本, 而富液中的硫元素富集后可用于其他化工领域。③对传统的工艺流程加以优化, 如美国 Union Pacific Resources 公司的天然气净化厂就在贫液回路采用水平多级离心泵代替传统的贫液循环泵达到了降低成本的目的。国内气体净化厂可将脱硫及尾气处理等多部分进行串联, 如联合再生 SCOT 工艺, RAR 工艺等, 通过与上游脱硫部分共用一个再生系统, 以减少整个脱硫、硫回收等装置的占地, 节省投资。现有的技术加以改善形成新的工艺包可用来解决净化过程中遇到的气质变化、扩能、降耗等问题。

参考文献:

- [1] 吴基荣, 毛艳红. 高含硫天然气净化新工艺技术在普光气田的应用 [J]. 天然气工业, 2011, 31 (5): 99 - 100.
- [2] Al - Rawajfeh A E, Glade H, Ulrich J. CO_2 release in multiple - effect distillers controlled by mass transfer with chemical reaction [J]. Desalination, 2003, 156: 109 - 123.
- [3] 赵鹏飞, 李水弟, 王立志. 低温甲醇洗技术及其在煤化工中的应用 [J]. 化工进展, 2012, 31 (11): 2442 - 2443.
- [4] 冉旭. 基于旋流板塔的有机脱硫剂烟气脱硫性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [5] Treesh M E. Mararhon Uses mol - sieve to remove mercaptan sweetening from gas stream [J]. Oil Gas J, 2006, 104 (15): 62 - 65.
- [6] 王遇冬. 天然气处理原理与工艺 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 51 - 66.
- [7] 刘颖, 王治红. 天然气脱硫脱碳溶液研究进展与应用现状 [J]. 广州化工, 2012, 40 (7): 30 - 33.
- [8] Krischan J, Makaruk A, Harasek M. Design and scale - up of an oxidative scrubbing process for the selective removal of hydrogen sulfide from biogas [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 215 (216): 49 - 56.
- [9] 陈颖, 杨鹤, 梁宏宝, 等. 天然气脱硫脱碳方法的研究进展 [J]. 石油化工, 2011, 40 (5): 565 - 567.
- [10] Mohamed A Fahim, Taher A Alsahhaf, Amal Elkilani. Fundamentals of Petroleum Refining [M]. Safat: Macmillan, 2010: 377 - 382.
- [11] Oguz Karvan, Husnu Atakul. Investigation of CuO /mesoporous SBA - 15 sorbents for hat gas desulfurization [J]. Fuel Processing Technology, 2008, 89: 908 - 915.
- [12] 樊辉, 陈陆建, 赵红, 等. 活性炭基脱硫剂吸附脱除天然气中 H_2S 的研究 [J]. 天然气化工, 2011, 36 (1): 34 - 36.
- [13] 曹文胜. 分子筛吸附净化天然气实验研究 [J]. 集美大学学报: 自然科学版, 2011, 16 (6): 450 - 452.
- [14] 赵会军, 张庆国, 王树立, 等. 膜分离法脱除天然气中 H_2S 的实验研究 [J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31 (1): 121 - 124.
- [15] Hao J, Rice P A, Stern S A. Upgrading low - quality natural gas with H_2S and CO_2 selective polymer membranes Part II. Process design and economics of membranes stages with recycles streams [J]. Journal of Membrane Science, 2008, 107 (320): 108 - 122.
- [16] 蔡培, 王树立, 赵会军. 天然气脱硫工艺的研究与发展 [J]. 管道技术与设备, 2008, 20 (4): 17 - 18.
- [17] 韩永嘉, 王树立, 李辉, 等. 聚丙烯中态纤维膜吸收器烟气脱硫实验研究 [J]. 环境科学与技术, 2011, 34 (1): 155 - 157.
- [18] 王树立, 马路, 李恩田, 等. 膜蒸馏 MDEA 脱硫剂再生技术实验研究 [J]. 常州大学学报: 自然科学版, 2012, 24 (1): 42 - 43.
- [19] 叶姜瑜, 沈秀红, 王琳, 等. Bio - SR 工艺去除硫化氢气体的研究 [J]. 环境工程学报, 2012, 6 (2): 585 - 587.
- [20] 李红海, 李婧, 王伟文, 等. 离子液体脱硫性能研究与应用进展 [J]. 化学工业与工程, 2012, 29 (3): 73 - 75.
- [21] 冷继斌, 于少洋, 李振虎, 等. 超重力氧化还原法用于天然气脱硫的探索性研究 [J]. 化工进展, 2007, 26 (7): 1023 - 1027.
- [22] 祁贵生, 刘有智, 焦纬洲. 超重力法脱除气体中硫化氢 [J]. 化工进展, 2008, 27 (9): 1404 - 1407.

[23] 汪剑锋. 无极紫外灯光解氧化去除恶臭气体中硫化氢的研究 [D]. 深圳: 深圳研究生院, 2010.

[24] 陈胜永, 岑兆海, 何金龙, 等. 新形势下天然气净化技术面临的挑战及下步的研究方向 [J]. 石油与天然气化工, 2012, 41 (3): 265 - 267.