

新排放标准下的硫磺回收尾气 处理技术选择

韩科^{1*}, 刘春辉²

(1. 中国神华煤制油化工有限公司北京工程分公司, 北京 100011;
2. 中国神华煤制油化工有限公司鄂尔多斯煤制油分公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017209)

摘要: 随着《石油炼制工业污染物排放标准 (GB 31570—2015)》的发布, 硫磺回收装置尾气二氧化硫排放限值由先前的 960 mg/m³ 降至 400 mg/m³, 特别排放限值更是要求 100 mg/m³。介绍了几种能够满足新排放标准的硫磺回收尾气处理技术, 简要比较并分析了不同尾气处理技术的经济性指标和优缺点, 提出了硫磺回收尾气处理技术选择的思路。

关键词: 新排放标准; 硫回收尾气; 技术选择

中图分类号: TQ125.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)09-0159-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.09.037

Selection of treatment technology for tail gas from sulfur recovery facility to meet new emission standard

HAN Ke^{1*}, LIU Chun-hui²

(1. Beijing Engineering Company, China Shenhua Coal to Liquid and Chemical Co., Ltd., Beijing 100011, China;
2. Ordos Coal Liquefaction Company, China Shenhua Coal to Liquid and Chemical Co., Ltd., Ordos 017209, China)

Abstract: With the issue of "Emission Standard of Pollutants for Petroleum Refining Industry (GB 31570—2015)", the emission limits of sulfur dioxide in tail gas from sulfur recovery facility drops to 400 mg·m⁻³ from the previous 960 mg·m⁻³, in some special areas the limit is 100 mg·m⁻³. This paper introduces several tail gas treatment technologies that can meet new emission standard, and then compares and analyzes their advantages, disadvantages and economic index briefly, and finally proposes advices for selection of treatment technologies for tail gas from sulfur recovery facility.

Key words: new emission standard; tail gas from sulfur recovery; technology selection

随着全球环境保护法规、条例趋于严格, 硫磺回收装置已成为石油炼制企业和煤化工企业生产必备的环保装置。2015年4月16日国家环境保护部同时发布《石油炼制工业污染物排放标准 (GB 31570—2015)》、《石油化学工业污染物排放标准 (GB 31571—2015)》2项标准规范, 其中《石油炼制工业污染物排放标准 (GB 31570—2015)》针对硫磺回收装置的二氧化硫排放限值定为 400 mg/m³, 对于大气环境容量较小, 生态环境脆弱, 容易发生严重大气环境污染问题的地区, 二氧化硫排放限值定为 100 mg/m³。

1 现有硫回收尾气处理工艺存在的问题

新标准发布前, 硫磺回收装置的尾气排放均执行《大气污染物综合排放标准 (GB 16297—1996)》中二氧化硫排放限值 960 mg/m³ 的要求, 在此基础上, 国内大多数硫磺回收装置主要采用 2 种工艺路线, 分别是①两级克劳斯+加氢还原+胺液吸收+尾

气焚烧工艺, ②两级克劳斯+催化氧化+尾气焚烧工艺。但是随着新标准的发布, 这 2 种工艺已不能满足要求, 主要原因如下。

(1) 两级克劳斯+加氢还原吸收+尾气焚烧工艺
该工艺的尾气处理技术是将尾气通过加氢反应, 将含硫组分 SO₂、S_x、COS 和 CS₂ 还原成 H₂S, 然后利用胺液进行选择吸收, 经过胺液再生后, 解吸出的硫化氢作为原料循环至两级克劳斯部分。该工艺存在的问题是: ①加氢反应器的转化率与催化剂性能紧密相关, 虽然近几年催化剂的性能已有所提高, 但仍有一部分二氧化硫和有机硫没有被转化为硫化氢, 因此不能被胺液吸收, 而是混入尾气中排放; ②尾气中的硫化氢虽然被胺液吸收, 但由于受到反应平衡的影响, 无法达到全部吸收的程度, 仍有大约 0.5% 左右硫化氢混入尾气中排放, 无法达到标准的要求。

(2) 两级克劳斯+催化氧化+尾气焚烧工艺
该工艺的尾气处理技术是在催化氧化反应器中

添加选择性氧化催化剂,直接将尾气中的硫化氢氧化成单质硫。该工艺的主要问题在于,虽然经过专利商多年的研究和开发,但是选择性氧化催化剂的转化率提高程度有限,仍有约 1% 的硫化物混入到尾气中排放,使得尾气中的二氧化硫含量不能满足新标准的要求。

2 满足新标准的硫回收尾气处理技术介绍

随着新标准的发布,在硫磺回收尾气处理技术领域掀起了一场革命性风暴,为迎合新标准规范的“苛刻要求”,越来越多的专利专有技术供应商开始关注新型尾气处理技术的开发和应用,同时,一些早期因装置投资大、运行成本高、操作流程复杂却能够达标排放的工艺也重新重现,促使尾气处理技术市场的竞争日趋白热化,为了确保硫磺回收装置尾气能够达标排放,同时考虑到未来环保要求将越来越严格,众多专利技术供应商纷纷按照尾气二氧化硫 100 mg/m³ 的指标要求,开发新工艺。目前国内能够满足新标准的硫回收尾气处理技术主要有以下几种。

(1) 加氢还原吸收+尾气焚烧+氢氧化钠吸收组合工艺技术

该组合工艺是在加氢还原吸收及尾气焚烧工艺后面增加氢氧化钠吸收工艺。氢氧化钠吸收法主要是利用烟气中的二氧化硫与氢氧化钠反应,生成亚硫酸钠,并将亚硫酸钠作为循环吸收浆液,吸收烟气中的二氧化硫。部分亚硫酸钠经氧化反应,生成硫酸钠后排出界区^[1-2]。该组合工艺已由山东三维石化工程股份有限公司申请专利。

该工艺的基本流程是:硫磺尾气和氢气在燃烧炉混合室与燃料气燃烧的高温烟气混合至 300℃ 左右进入加氢还原反应器,在加氢催化剂的作用下,使尾气中的单质硫及硫化物(SO₂、COS、CS₂、S_x)几乎全部转化为硫化氢,该过程气经冷却后进入脱硫吸收塔脱除绝大多数的硫化氢及部分二氧化碳,吸收了硫化氢、二氧化碳的溶剂(富液)进入再生塔,再生塔顶的硫化氢气体返回至克劳斯装置作为原料,再生后的溶剂(贫液)返回吸收塔循环使用。自吸收塔顶排放的净化尾气进入尾气炉焚烧,将净化尾气中剩余的硫化氢和氧硫化碳全部转化为二氧化硫,烟气经换热器回收部分热量后进入氢氧化钠吸收塔进行急冷和吸收二氧化硫,吸收二氧化硫后的净化烟气经吸收塔塔顶排气筒排空^[3-4]。

加氢还原吸收工艺是利用 MDEA 吸收硫化氢,但是由于 MDEA 与硫化氢是络合反应,受反应平衡的限制,通过增加胺液的循环量和提高胺液的贫度,可以在一定程度上降低尾气二氧化硫的排放,但是增加的投资和能耗相当大,并且不能保证生产波动时尾气二氧化硫含量能够低于 400 mg/m³,更是无法达到 100 mg/m³ 环保标准。而氢氧化钠吸收是酸碱中和反应,反应机理简单,速度快,而且比较彻底,通过将这 2 种工艺进行组合,既能够发挥 2 种工艺成熟可靠的优势,又能够满足环保标准的排放要求。

(2) 氨法脱硫工艺技术

氨法脱硫是以碱性强、活性高的液氨(或氨水)作吸收剂,吸收烟气中的二氧化硫,最终转化为硫酸铵化肥的湿法烟气脱硫工艺。目前国内外

(上接第 158 页)

[8] 杨剑,姜宏,赵会峰.超白浮法玻璃生产过程中气泡与液流的特征及其相互关系[J].玻璃与搪瓷,2015,43(2):10-16.

[9] 田英良,张港,孙诗兵.铝硅酸盐玻璃的澄清研究[J].武汉理工大学学报,2009,31(22):117-119.

[10] 王倩,应浩,韩高荣.高硼硅玻璃的复合澄清剂研究[J].玻璃,2006,33(1):6-10.

[11] 彭寿,张冲.平板玻璃在光电显示领域的应用及发展趋势[J].中国玻璃,2012,(2):3-8.

[12] 彭容秋.锡冶金[M].长沙:中南大学出版社,2005:4-6.

[13] 黄位森.锡[M].北京:冶金工业出版社,2000:8-10.

[14] 养尊先,岳爱文,敬承斌,等.芒硝及玻璃 REDOX 对玻璃液澄清效果的影响[J].硅酸盐通报,2001,20(6):43-46.

[15] 田英良,孙诗兵.新编玻璃工艺学[M].北京:中国轻工业出版社,2009:235-237.

[16] 吴喜龙,王欢,贺小塘,等.玻纤工业用铂铑合金漏板的提纯工

艺[J].贵金属,2013,34(2):46-50.

[17] 施苾寒.铂、钯材料 ICP 分析方法的研究[J].上海计量测试,2009,36(5):25-27.

[18] 朱若华,邹洪,贺闰娟.贵金属元素铂、铑、钯的分析进展[J].分析实验室,2004,23(2):82-92.

[19] 李小甫.铂材料的强化及其应用[J].有色金属,2004,56(3):21-25.

[20] 毛利权,韩吉庆,唐进,等.铂铑合金性能研究[J].铸造技术,2010,31(11):1439-1440.

[21] 高建枢.玻璃纤维工业与铂铑金属[J].玻璃纤维,2009,(5):34-40.

[22] 田英良,孙诗兵,梁新辉,等.TFT-LCD 基板玻璃熔窑与供料道设计原理与结构浅析[J].玻璃与搪瓷,2010,38(4):4-7.

[23] 黄利光,任志威,吴加锋.负压澄清浮法玻璃熔窑设计探讨[J].玻璃,2013,40(6):13-15.

[24] 杨凤翔.玻璃电熔技术[J].玻璃与搪瓷,1991,(3):37-44. ■

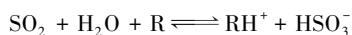
掌握氨法脱硫专利技术的代表性供应商主要有江苏新世纪江南环保股份有限公司、洛阳天誉环保工程有限公司和北京国信恒润能源环境工程有限公司等。

氨法脱硫的基本流程是:硫回收尾气经焚烧炉充分燃烧后,所有的硫化物都转化为二氧化硫、三氧化硫,经余热回收,送氨法脱硫塔,经洗涤降温、氨液吸收,使得尾气中的二氧化硫、三氧化硫几乎全部转化为亚硫酸铵、硫酸铵溶液,亚硫酸铵经氧化得到一定浓度的硫酸铵溶液,一定浓度硫酸铵溶液经排油泵送入硫酸铵结晶装置,经浓缩、结晶、分离、干燥得到硫酸铵化肥,除雾后的净烟气经塔顶排气筒排放^[5]。

氨法脱硫工艺的实质也是酸碱中和反应,吸收剂碱性越强,越利于吸收,而且氨吸收烟气的二氧化硫是气-液反应,反应速度快,反应完全,吸收剂利用率高,可以做到很高的脱硫效率,使排放气中的二氧化硫含量小于 100 mg/m^3 ^[6]。

(3) 离子液吸收工艺技术

目前国内外具有代表性的离子液吸收专利技术供应商主要有成都华西化工科技有限公司和荷兰SHELL公司旗下的康索夫公司。离子液吸收工艺采用的吸收剂是以有机阳离子、无机阴离子为主,添加少量活化剂、抗氧化剂组成的水溶液,该吸收剂对二氧化硫气体具有良好的吸收和解吸能力^[7]。脱硫机理如下:



上式中 R 代表吸收剂,该反应是可逆反应,低温下反应从左向右进行,高温下反应从右向左进行。离子液循环吸收法正是利用此原理,在低温下吸收二氧化硫,高温下将吸收剂中二氧化硫再生出来,从而达到脱除和回收烟气中二氧化硫的目的^[8]。

该工艺的基本流程是:克劳斯尾气经焚烧炉充分燃烧后,所有含硫组分全部转化为二氧化硫,进入水洗塔,经洗涤、降温后进入离子液吸收塔下部,在吸收塔内烟气与自上而下的离子液(贫液)逆向接触,烟气中二氧化硫被离子液吸收,剩余气体由塔顶放空。吸收二氧化硫后的离子液(富液)进入再生塔,溶液中二氧化硫被再生气汽提出来送至上游克劳斯装置作为原料,再生后的贫液循环回吸收塔,重新吸收二氧化硫^[9]。

(4) 低温甲醇洗工艺

低温甲醇洗技术是以甲醇有机溶剂作为吸收剂,利用甲醇在低温下对二氧化碳、 H_2S 、 COS 等酸

性气体溶解度大的物理特性,同时或分段脱除原料气中酸性气体的一种气体净化方法,目前已在很多行业得到广泛应用^[10]。

考虑到煤化工硫磺回收尾气中同时含有氧化态硫化物和还原态硫化物,可以通过加氢还原反应使硫磺回收尾气中硫化物全部以还原态硫化氢形式存在,这样,可将其引入低温甲醇洗装置,实现脱硫的目的。

该工艺的基本流程是:自硫磺回收装置来的尾气经加氢将尾气中的硫及硫化物全部转化为硫化氢后进入激冷塔,与急冷水逆流接触降温后送至低温甲醇洗装置再吸收塔单元,利用低温甲醇实现硫化氢的选择性吸收,吸收硫化氢的甲醇富液在再生单元将硫化氢解吸后循环回硫磺回收装置,进而实现硫回收尾气的超低排放^[11]。

3 不同尾气处理技术的工业化应用情况

(1) 加氢还原吸收+氢氧化钠吸收组合工艺:加氢还原吸收工艺和氢氧化钠吸收工艺均属于国内外成熟工艺技术,目前该组合工艺已有多套工业化装置投用,运行情况基本稳定,产生一定量的硫酸钠废水,送污水处理厂进行处理。

(2) 氨法脱硫工艺:氨法工艺作为一种成熟的烟气脱硫工艺,在锅炉烟气脱硫行业已被广泛接受,并且已有多套氨法脱硫装置应用于硫磺回收的尾气处理,脱硫效果良好,气溶胶、氨逃逸和硫酸铵结晶的问题也得到了进一步的改善。

(3) 离子液脱硫工艺:国内部分冶炼、炼油和硫酸企业的烟气脱硫采用离子液脱硫工艺,由于该工艺脱出的二氧化硫腐蚀性较强,因此对系统内的材质要求较高,脱出的二氧化硫可直接作为硫磺回收装置的原料气或制硫酸工艺的原料气,装置运行情况比较平稳。

(4) 低温甲醇洗工艺:该工艺理论上讲能够达到近 100% 硫回收率,并且流程简单、投资节省、能耗低,目前已有正在实施建设的工业化装置,但是仍需要深入研究硫回收尾气对低温甲醇洗装置运行的影响。

4 几种尾气处理技术的经济性比较

4.1 各工艺技术比较的基础

对于绝大多数石油化工、煤化工项目建设单位来说,习惯性将尾气处理技术与硫磺回收技术合并为一个标书,针对整套装置(即硫磺回收+尾气处

理)进行性能考核,所以,为了比较不同尾气处理技术的经济性,需联合硫磺回收部分,对比整套装置的经济性。现假定在我国内蒙古鄂尔多斯地区某新建煤化工项目上一套 2.5 万 t/a 的硫磺回收及尾气处理装置,其中,硫磺回收采用两级克劳斯工艺,尾气处理分别采用上述 4 种工艺技术,形成 4 种技术方案。方案一:两级克劳斯+加氢还原吸收+氢氧化钠吸收;方案二:两级克劳斯+氨法脱硫(装置界区内不设置硫酸铵结晶设备,硫酸铵溶液送锅炉硫磺结晶系统一并处理);方案三:两级克劳斯+离子液脱硫;方案四:两级克劳斯+加氢还原+低温甲醇洗(煤化工项目均配备低温甲醇洗装置提取粗合成气中的酸性气,界区内不增设低温甲醇洗装置,利用现有装置)。

4.2 总硫收率、硫磺产量及尾气排放指标对比

各工艺技术方案总硫收率、硫磺产量及尾气排放指标对比见表 1。

表 1 总硫收率、硫磺产量及尾气指标对比表

	方案一	方案二	方案三	方案四
总硫收率/%	99.90	99.95	99.95	99.99
硫磺产量/(t·d ⁻¹)	76.6	73.4	77.4	78.2
尾气 SO ₂ 指标/(mg·m ⁻³)	<100	<100	<100	<100

由表 1 可以看出,4 种技术方案的尾气二氧化硫排放指标均能够达到 100 mg/m³ 以下。总硫收率均达到了 99.9% 以上,特别是方案四能达到 99.99%,因此方案四的硫磺产量也是最高的。

4.3 建设投资估算及吨产品成本对比

各工艺技术方案的建设投资估算及吨硫磺成本对比见表 2。

表 2 各工艺技术方案建设投资估算及吨硫磺成本对比表

	方案一	方案二	方案三	方案四
投资估算/万元	11000	7900	8000	6000
吨硫磺成本/元	570	475	717	354

由表 2 可以看出,方案一由于工艺流程较长,所需设备较多导致投资较高,方案四由于利用已有的低温甲醇洗装置,从而省去了尾气处理部分的投资而使总投资最低,方案三的投资略高于方案二。从吨硫磺成本上看,方案三成本最高,方案四成本最低,方案一的成本较方案二高出近 100 元。

4.4 三废排放对比

各工艺技术方案三废排放对比见表 3。

表 3 各工艺技术方案三废排放量对比表

	方案一	方案二	方案三	方案四
废催化剂/m ³	45	34	34	45
锅炉废水/(kg·h ⁻¹)	328	314	341	314
工艺废水/(kg·h ⁻¹)	1674	—	2250	1750
含盐废水/(kg·h ⁻¹)	52.5	—	2400	—
尾气/(m ³ ·h ⁻¹)	11827	20832	20314	7850

由表 3 可以看出,方案一和方案四由于增加了加氢还原单元,产生了一定量的加氢废催化剂,因此故废催化剂量比方案二和方案三要多一些;锅炉废水方面,方案三的锅炉排污最大,方案二和方案四最小;工艺废水方面,方案二基本没有工艺废水和含盐废水,方案三的工艺废水和含盐废水量最大,特别是含盐废水的排放量基本上是方案一的 40 倍;尾气排放量方面,方案四的尾气量最少,且送至低温甲醇洗装置循环吸收,硫磺回收装置无尾气排放,方案一较方案四要大一些,方案二和方案三的尾气排放量相对较大。

4.5 各装置占地面积对比

各工艺技术方案装置占地面积对比见表 4。

表 4 各工艺技术方案的装置占地面积对比表 m²

	方案一	方案二	方案三	方案四
占地面积	6500	4700	4965	4350

由表 4 可以看出,4 种方案中,方案一由于系统最多,故占地面积最大,方案四省去了尾气处理单元,故占地面积最小,方案二和方案三的占地面积相差不大。

5 硫磺回收尾气处理技术选择的思路

通过以上对 4 种技术方案的介绍及经济性比较,可以看出 4 种工艺技术各有优劣,在选择时也需要结合项目实际情况进行判断,下面简要介绍一下 4 种尾气处理技术的选择要点。

(1) 加氢还原吸收+氢氧化钠吸收组合工艺

首先,该组合工艺流程较长,系统较为复杂,建设投资和公用工程消耗都比较大。其次,如果硫回收装置的规模比较大,则氢氧化钠吸收工艺所产生的硫酸钠废水量就比较大,会对污水处理厂的操作负荷造成较大的影响,大大增加了污水处理的成本,如果要回收这部分硫酸钠作为产品出售,则需要设置后处理系统,势必会造成建设投资的增大以及公

用工程消耗的增多;如果硫回收装置规模比较小,产生的硫酸钠废水量比较少,可以考虑采用此组合工艺,但是产生的硫酸钠无法回收,从环保的角度来讲,这种工艺只是将一种废物转化为另外一种废物,对环境仍造成一定的影响,选择此工艺时一定要权衡利弊,多方考虑。

(2) 氨法脱硫工艺

氨法脱硫的优势在于其脱硫副产品硫酸铵是一种农用肥料,硫酸铵的销售收入能够冲抵运行成本,还可以给硫回收装置带来一定的经济效益,特别是对于大多数设置酚氨回收系统的煤化工项目来说,可以利用自产的液氨或废氨水作为脱硫吸收剂,达到用废水治理废气的目的。但是由于该工艺与锅炉氨法脱硫共用一套硫酸铵后处理系统,这就要求硫磺回收装置尽可能靠近锅炉氨法脱硫装置,根据氨法脱硫技术专利商的经验,此距离宜小于 800 m,超过此距离,一方面会引起硫酸铵结晶堵塞管道,另一方面也会造成管道过长,造价过大。因此,对于新建项目,如果考虑采用氨法脱硫工艺作为硫磺回收的尾气处理工艺,则需要在总图布置时,将硫磺回收装置尽量布置在锅炉氨法脱硫装置附近。

(3) 离子液脱硫工艺

离子液脱硫工艺的优点在于对二氧化硫具有非常高的选择性,使得系统离子液循环量要远低于其他种类的吸收剂,降低了离子液填充量和系统运行能耗。同时,离子液一般没有蒸汽压,不挥发,降解率低,消耗和损失较小。产生的高浓度二氧化硫可送至硫回收制硫燃烧炉后部,不影响制硫烧嘴处硫化氢浓度。但是由于克劳斯部分的燃烧反应不可避免地产生一定量的三氧化硫,进入离子液吸收系统后,和水反应生成稀硫酸,再加上离子液吸收的二氧化硫本身腐蚀性很强,对设备和管道材质等级的要求很高,从而导致建设投资较大;另一方面,该工艺产生的含盐废水较多,系统补水较大,在技术选择时,一定要引起重视。

(4) 低温甲醇洗工艺

低温甲醇洗工艺处理硫磺回收尾气具有以下几个优势:①无需新建尾气处理装置,建设投资较小;②硫回收尾气量较小,对于低温甲醇洗装置运行影响不大;③该工艺可以获得理论上 100% 的总硫收率,无废气排放。但是,如果选择该工艺,则要求低温甲醇洗专利技术供应商在工艺包编制时,充分考虑硫磺回收尾气的处理方式及处理量,

尽可能避免硫磺回收尾气引起低温甲醇洗装置运行不畅。另外,该工艺的工业化装置目前还处在建设期,尚未经过工业化运行的检验,具有一定的技术风险。

6 结语

随着全球环境问题日益严峻,民众对于环保的呼声日益高涨。目前我国新建或运行投产的硫磺回收装置绝大多数面临尾气排放的环保压力,特别是在新环保标准《石油炼制工业污染物排放标准(GB 31570—2015)》颁布之后,更使企业的环保压力有增无减。本文中介绍的 4 种硫磺回收尾气处理工艺技术均能够满足环保排放要求,除低温甲醇洗工艺暂未工业化应用外,其他工艺均有投用的工业化装置,技术风险较低。在技术选择时,需要结合项目实际情况,统筹考虑各种工艺技术的优劣,必要时可以聘请专业团队进行评测,找出最适合本项目的工艺技术,实现环境、效益双赢的最终目标。

参考文献

- [1] 产文兵,万皓,宋桂东,等.钠碱法烟气脱硫工艺技术[J].上海大学学报:自然科学版,2013,19(5):474-478.
- [2] 吴金泉,李超南,陈剑超.回收副产物的钠碱法脱硫技术[J].中国环保产业,2012,(8):53-57.
- [3] 陈康良.SCOT 法尾气处理工艺技术进展[J].石油炼制与化工,2003,34(10):28-32.
- [4] 汪家铭,林鸿伟.SCOT 硫回收尾气处理技术进展及应用[J].化肥设计,2012,50(4):7-11.
- [5] 车建炜,申林艳,刘月生.氨法脱硫工程应用中的几个问题探讨[J].中国电力教育,20015,(S1):246-248.
- [6] 葛能强,邵永春.湿式氨法脱硫工艺及应用[J].硫酸工业,2006,(6):10-15.
- [7] 肖九高,汪志和.离子液脱硫技术在有色冶金领域的应用[A].第九届全国有色金属工业冶炼烟气治理专利技术推广及三废无害化处置研发技术研讨会论文集[C].全国有色金属工业冶炼烟气治理专利技术推广及三废无害化处置研发技术研讨会,2012.
- [8] 汪家铭.离子液烟气脱硫技术的开发与应用[J].精细化工原料及中间体,2012,(11):23-25.
- [9] Natalya V Likhanova, Diego Guzmán-Lucero, Eugenio A Flores, et al. Ionic liquids screening for desulfurization of natural gasoline by liquid-liquid extraction [J]. Molecular Diversity, 2010, 14(4): 777-787.
- [10] 赵代胜.煤化工 Claus 尾气循环处理技术方案探讨[J].现代化工,2016,36(11):150-155.
- [11] 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):2442-2448. ■