

油基钻屑高温等离子体气化熔融处理技术研究

文平¹, 于海龙^{2*}, 吴曙程²

(1. 中石化华东石油工程公司, 江苏南京 210019; 2. 常州大学石油工程学院, 江苏常州 213164)

摘要: 为了降低钻井成本, 简化处置流程, 减少油基钻屑转运带来的安全隐患, 设计了一种撬装式高温等离子体气化及熔融处理系统及装置。介绍该系统的各个模块及运行原理, 并进行了关键装置的结构设计和传热计算, 同时对该系统部分实验结果进行了验算, 得出该系统产出合成气热值为 266 844 kJ/h, 占输入燃料热值的 81%。

关键词: 油基钻屑; 高温等离子体; 气化; 熔融; 固体废弃物

中图分类号: TH3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)03-0216-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.03.043

Study on high temperature plasma gasification-melting treatment of oil-based drilling cuttings

WEN Ping¹, YU Hai-long^{2*}, WU Shu-cheng²

(1. East China Petroleum Engineering Company, Sinopec, Nanjing 210019, China;

2. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: With the increasing intensity of shale gas exploitation year by year, the amount of oil-based drilling cuttings needs to be dealt with is also increasing. Oil-based drilling cuttings are dangerous solid wastes, and their disposal costs account for a large proportion of drilling costs. In order to reduce the drilling cost, simplify the disposal process, and reduce the safety risks caused by oil-based drilling cuttings transport, a skid-mounted high-temperature plasma gasification and melting treatment system and device is designed. Each module of the system and the principle of operation are introduced, and the structure design and heat transfer calculation for key devices are carried out, and some experimental results of the system are checked. The calorific value of syngas produced by the system is 266,844 kJ·L⁻¹, accounting for 81% of the calorific value of the input fuel.

Key words: oil-based drilling cuttings; high temperature plasma; gasification; melt; solid wastes

油基钻屑是在石油天然气开采钻井的过程中, 利用油基钻井液进行钻井作业所产生的废弃泥浆, 经过固控设备分离后需要处置的固体废弃物, 即地层岩屑或泥土表面被包裹上油基钻井液的一种固体废弃物, 是一种含有矿物油、各种添加剂及重金属的复杂多相体系^[1]。

由于钻井的要求, 油基钻井液通常包含多种复合油类, 包括原油、柴油、煤焦油、合成油、动物油、植物油以及矿物油等。而且这种废弃钻屑通常还含有各种化学处理剂、加重材料、黏土等成分^[2]。依据钻井各种条件的不同, 产生的有毒废弃物成分复杂且不稳定, 因此, 很难处理废弃的钻屑。油分是油基钻井液的主要成分, 质量分数为 50%~100%。故废弃的油基钻屑中的油性物质是最主要的污染物。

近年来, 随着科技的进步, 我国对页岩气这种非常规能源的开采力度不断加大, 油基钻屑的产生量

不断攀升, 处置不当会造成严重的环境污染。随着相关环境法律法规的出台, 国家对钻井业的达标要求, 以及国家对保护环境的要求, 解决油气田中油基钻屑的污染问题已经成为石油工业对环境保护的重要研究课题^[3]。

发达国家从 20 世纪 80 年代前后就开展了对含油固体废物处理的系统研究, 至 20 世纪 90 年代已经形成了较为完善的相关环保法规^[4]。国外对于油基钻屑的油含量均有严格规定, 美国各个州根据处于湿地还是旱地, 要求油含量在 200~800 mg/L 不等^[5]。我国于 2011 年 2 月 16 日颁布的《农用污泥中污染物控制标准》(GB 4284—1984) 中规定油含量低于 0.3%^[6]。

钻井液按照分散体系的不同可以分为水基钻井液、油基钻井液、合成基钻井液^[7]。油基钻井液在承受高温、抗盐钙侵蚀、稳定井壁、保护油气层等方

收稿日期: 2021-11-22; 修回日期: 2022-01-21

作者简介: 文平(1970-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为石油钻井工程, wenping.oshd@sinopec.com; 于海龙(1982-), 男, 博士, 教授, 研究方向为固废处理、新能源与多能互补技术, 通讯联系人, yhl@cczu.edu.cn。

面具有独特的优越性,是一种功能优良的钻井液体系,适合应用于各种复杂地质钻井中^[8]。目前,世界各国对油基钻屑处理的方法主要有:①固化处理技术,优点是成本低廉,处理周期短,缺点是处理后占地面积大,存在降解风险;②回注处理技术,可以消除地面污染,缺点是成本昂贵,对地层要求高;③生物处理技术,优点是石油烃类污染物质能彻底降解,成本低廉,缺点是处理周期长,处理要求高,难推广;④焚烧处理技术,优点是设备少,处理量大,工艺简单,缺点是二次污染严重,剩余能源回收率较低;⑤热解吸处理技术,优点是能够回收油类物质,无污染,高减容,缺点是成本昂贵,工艺复杂,条件严苛,难推广。

基于各种技术的处理难度以及处理量,我国主要利用高温焚烧和固化填埋处理油基钻屑。直至今日,还没有一套化学清洗系统或化学改造油类的系统能够满足严格的环保“零”排放标准。究其原因在于,油基钻屑中油的存在方式复杂,吸附于钻屑表面的油采用物化方法可去除,而由于强力作用填充于钻屑中的孔隙油异常顽固,物化方法难以去除,采用生物深度法处理,才能达到油消除的目的。然而这种技术的处理效率和对高技术人员的要求难以满足。所以,寻找环保高效处理油基钻屑的技术刻不容缓。

1 国内外研究进展

1.1 等离子体气化技术简介

等离子体是不同于固、气、液3态物质的第四态,具有其他3种形态没有的特效,也被成为“超气态”、“电浆体”。

高温等离子体气化技术并不是全新的技术,早在20世纪70年代,美国西屋公司与美国宇航局合作研发了等离子体炬。高温等离子体气化技术是在高温的条件下,将废弃物的有机部分中的强化学键分解,使大分子有机物分解为简单的小分子或原子^[9-12]。等离子体气化技术处理油基钻屑类似于热解吸处理技术处理油基钻屑。不同的是,等离子体气化技术是利用等离子体炬的高温射流,在绝氧环境下产生1 200~2 000℃的高温,将油基钻屑熔融成液态,其中水和石油类物质全部裂解重组,破坏掉其中大分子有毒物质,产生的小分子物质是以H₂和CO为主的合成气体。油基钻屑熔融后的液态物质在冷却水的激冷下,迅速凝固成惰性稳定的玻璃体物质,玻璃体物质满足建筑材料的强度要求。

由高温等离子体气化熔融炉中的主要反应化学式的反应焓变可知,当碳转化为一氧化碳时,碳的热值仅有28%被消耗,剩余的72%得以保留在一氧化碳中。而对于实际的燃料,一般都包含氢元素,此时原始燃料中的热值保留在气体中的比例会更高,可达75%~88%,这也是气化技术得以工业化应用的重要原因^[13]。

1.2 国内外技术发展现状及趋势

自20世纪70年代开始,等离子体技术处理废弃物在很多领域中得到了应用,包括生物质、城市生活垃圾、危险工业废弃物、医疗垃圾等。赵增立等^[14]研究了利用氮气作为等离子体气体来热解杉木粉,结果表明,在引入水蒸汽后,H₂和CO的体积含量之和保持在95%左右。Prieto等^[15]研究了利用非热等离子体重整重油。结果表明,改变放电间距和放电功率,能量效率随着功率的增加而减少,随着电极间距的增大而增大。Diaz等^[16]进行了利用等离子体蒸汽重整系统处理废物的研究,实验结果表明,二氧化碳的含量随着温度升高而减少,而H₂和CO是主要的气相产物。Rafiq等^[17]研究了利用滑动弧等离子体反应器自热重整含丙烷的废油。实验结果表明,随着蒸汽流量的增加,H₂、CO₂和C²⁺浓度增加,而CO和CH₄浓度减少,CO和H₂产率以及热效率都降低。Chernets等^[18]研究了利用蒸汽电弧等离子体处理医疗废物和含碳材料。结果表明,该过程能够确保杀死细菌,而且不产生呋喃和二噁英,同时原材料几乎能完全转化。

国外高温等离子体处理技术以美国西屋等离子体公司(现Alter NRG部门)为代表,至今已有30多年等离子体气化技术的应用经验。Alliance Federated能源(AFE)公司于2010年2月采用西屋公司的等离子体技术,建设25 MW废弃物等离子体气化发电项目。此外,Plasco还与中国节能集团合资,准备在北京建100 t/d的实验装置。德国Bellwether公司研制了“集成式等离子体气化技术”,通过热电联产、能量循环再利用方式,使得系统整体效率显著提升,总体能量转化效率达到80%。

国内等离子体气化技术起步较晚,在我国,等离子体气化技术的研究方向集中在医疗废弃物、煤以及生物质上,仅有少数城市以及企业采用等离子体气化技术处理城市生活垃圾和工业废弃物。等离子体气化技术在我国尚未得到大规模工业和商业的应用。中科院力学研究所从20世纪90年代末开始研究等离子体气化技术,自主研发了等离子体气化技

术的示范装置。浙江大学从 1997 年开始对等离子体熔融处理焚烧飞灰进行了研究,并自主研发了双阳极直流热等离子体熔融装置。中科院广州能源所联合中国科技大学建立了一套拥有直流电弧等离子体热解气化的实验系统的实验室。复旦大学提出一种采用水蒸汽作为有机废物的气化介质的等离子体气化技术。2004 年,PEAT 国际公司在台湾台南的国立成功大学(NCKU)建造了一个等离子体弧废物处理设施,设备能够处理 3~5 t 废物^[19]。2013 年 1 月,Alter NRG 在武汉建立了西屋的等离子体气化装置,每天处理约 100 t 生物质废物^[20]。2014 年 4 月 22 日,中国第一个等离子体垃圾处理项目在贵州毕节准核开工^[21]。2018 年 3 月,中国航天科技集团六院 11 所源动力公司自主研发的等离子体炉渣气化熔融固废处理示范工程项目在江苏盐城连续稳定运行超 30 d,有机污染物焚毁率可达 99.99%。中广核环境公司在广东省清远市建设了等离子体危废处理项目^[22]。

2 新型油基钻屑高温等离子体气化熔融处理系统

2.1 高温等离子体气化熔融处理系统

基于高温等离子体气化技术,设计了一种撬装式高温等离子体气化熔融处理系统。系统分为 2 个子系统:处理系统和控制系统。处理系统是高温等离子体气化熔融处理系统的主要系统,也是矿井油基岩屑的主要反应场所,同时能反馈数据信息给控制系统进行处理;控制系统用于处理系统的信息状况,以统一协调各系统之间的联系,进行控制。以统一协调处理系统各子系统之间的联系,进行控制。处理系统分为 4 个模块:进料模块、高温等离子体气化熔融工作模块、合成气后处理模块以及冷却水循环模块。系统模块关系如图 1 所示。

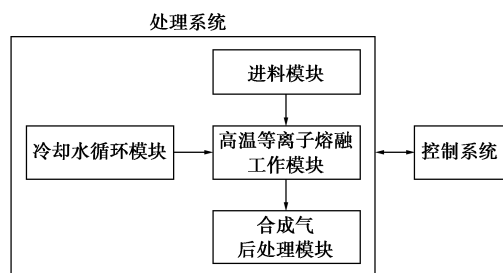


图 1 系统模块关系

收集到的油基钻屑运输储存后统一进行预处理。油基钻屑通过进料模块,被送入高温等离子体

气化熔融工作模块。在高温绝氧的条件下,有机物部分在短时间内以极快的速度被气化解,生成了以 CO、H₂ 和 CH₄ 为主的小分子的可燃合成气。之后合成气进入合成气后处理系统,将合成气中含量较少的 HF、HCl 等酸性气体处理掉。经过处理后的合成气可以直接送入燃气发电机,用于补给等离子体炬的用电量,也可以统一收集后出售。无机物则被熔融成玻璃体硅酸盐及金属产物,熔融态产物被收集起来,经过循环冷却水模块激冷后,形成的玻璃体物质强度满足建筑材料的规定要求,可以当作路基和建筑材料使用。图 2 为高温等离子体气化熔融技术的工艺流程。图 3 为高温等离子体气化熔融处理系统的示意图。

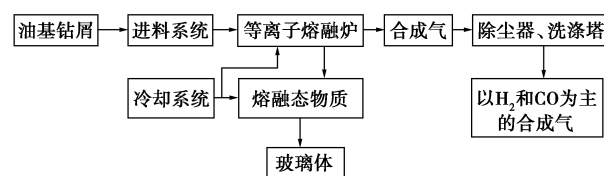
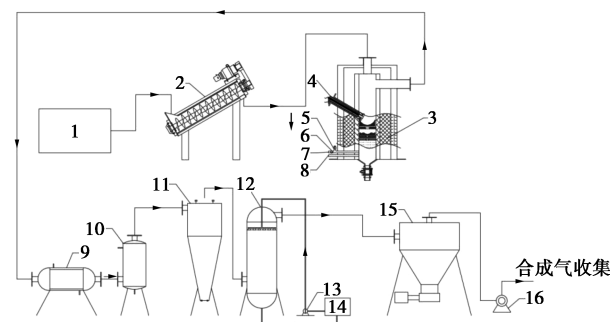


图 2 工艺流程



- 1—储料仓;2—螺旋输送机;3—高温等离子体气化熔融炉;
- 4—等离子体炬;5—补水泵;6—循环泵 1;7—激冷室冷却水进口管;8—激冷室冷却水出口管;9—换热装置;10—激冷塔;
- 11—旋风分离器;12—洗涤塔;13—循环泵 2;14—洗涤液箱;
- 15—布袋除尘器;16—引风机

图 3 高温等离子体气化熔融处理系统示意图

如图 3 所示,收集到的油基钻屑可以直接通过螺旋输送机连续地压入高温等离子体气化熔融炉进行气化熔融。也可以经过离心脱油后干燥研磨成小块暂时存放在储料仓内,再通过螺旋输送机送入炉内。炉子进料入口处设有密封装置,保证良好的气密性,同时使高温等离子体气化熔融炉内处于缺氧甚至无氧的状态。接着,压入炉内的油基钻屑从炉膛上部落入炉膛处理室,室内设置有坩埚,用于盛装螺旋输送机输送进炉膛的矿井油基岩屑,及矿井油基岩屑在等离子体炬下热裂解的主要场所。炉膛处理室壁面设置了 3 个等离子体炬,等离子体炬功率可

以随着控制系统对室内温度作为反馈条件来进行适当调节。在高温等离子体射流的高温作用下,坩埚中的油基钻屑的无机物部分由固态相变为液态,液态物质顺着导流槽流入炉膛底部的激冷室中进行激冷,形成稳定的玻璃体物质。油基钻屑的有机物部分被高温气化后,生成了小分子的可燃合成气。合成气会往炉膛上部设置的出气口流入换热装置和激冷塔中,合成气温度降至 200℃ 左右,抑制二噁英的再生反应。之后进入旋风分离器清除掉合成气中大分子飞灰颗粒。然后进入洗涤塔与喷淋雾化的碱液和合成气中的酸性气体中和。之后进入布袋除尘器中,夹带的小颗粒粉尘被吸收,其中碱性成分进一步脱除气体中的酸性物质以及其他有害物质。本系统产生的合成气可以直接用于燃气发电,也可以进行收集用于化工生产,用于各种实验装置中等。能源会更有效地回收,符合生态的发展。

2.2 高温等离子体气化熔融处理系统设计

2.2.1 合成气热值

为了验证系统的合理性,利用高温等离子体气化熔融处理系统进行试验,一些初始参数及数据见表 1。

表 1 初始参数及数据

名称	数据
每千克油基钻屑热值 $Q_{ino}/(kJ \cdot kg^{-1})$	8500
每小时油基钻屑质量 $m/(kg \cdot h^{-1})$	162
等离子体炬输入功率 P/kW	100
每小时融渣热量 $Q_1/(kg \cdot h^{-1})$	314995
每小时渣吸热量 $Q_2/(kg \cdot h^{-1})$	234336
每小时散热损失 $Q_3/(kg \cdot h^{-1})$	35962
每小时气化所需热量 $Q_4/(kg \cdot h^{-1})$	35958

通过热力学第一定律,即可求出每小时生成合成气的热值。

$$Q_{in} = Q_{out} \quad (1)$$

$$Q_{in} = Q_{ino} + Q_{imp} = (q_{ino} \times m) + Pt \quad (2)$$

$$Q_{out} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (3)$$

式中, Q_{in} 为每小时总输入热量; Q_{out} 为每小时总输出热量; Q_{imp} 为每小时等离子体炬输入的热量; Q_{ino} 为每小时输入的油基钻屑的热量; Q_5 为每小时生成的合成气热量。

由此可以得出,该系统每小时能够处理 162 kg 的油基钻屑。有机物气化后得到的合成气热值 Q_5 为 266 844 kJ/h,占输入燃料热值的 81%。

2.2.2 耐火耐热材料厚度

耐火材料厚度计算比较简单,采用简单的无内

热源一维稳态导热的方法就能够得出各层耐火材料的厚度。向火面耐火材料、背衬耐火材料、隔热保温材料以及填充保温材料分别采用高铬砖、铬刚玉砖、氧化铝空心球砖和岩棉。

计算中假定等离子炉仅通过圆筒壁四周向外散热,且通过各层耐火材料的热流量相同,假定每层耐火材料的表面温度,通过式(4)即可计算出各层耐火材料的厚度。

$$\Phi = 2\pi l \Delta T \lambda / (\ln d_{out} - \ln d_{in}) \quad (4)$$

式中, Φ 为热流量,W; l 为炉长,m; ΔT 为耐火材料的壁面温差,K; λ 为耐火材料的平均导热系数, $W/(m \cdot K)$; d_{in} 为耐火材料内径,m; d_{out} 为耐火材料外径,m。

由此可计算出各层耐火耐热材料的厚度,向火面耐火材料厚度为 0.048 5 m,背衬耐火材料厚度为 0.126 m,隔热保温材料厚度为 0.07 m,填充保温材料厚度为 0.002 m。

2.3 优势

相较于其他油基钻屑处理技术,高温等离子体气化熔融技术有着环保、安全、高效等特点。笔者团队设计的高温等离子体气化熔融处理系统有以下优势。

(1) 结构

炉膛内部装设坩埚,使油基钻屑得到充分反应。坩埚外沿处设有导流槽,导流槽作用为控制熔渣流动,防止熔渣堆积在炉膛内堆积结渣。

(2) 设计

本系统采用撬装式设计,拆装更加灵活。当一个处理点的油基钻屑处理完毕后,系统能够迅速拆卸,运输至下一个处理点进行装配。减少油基钻屑的收集运输成本,提高油基岩屑的处理效率。

(3) 处理效率

本系统在炉膛内安装了 3 根等离子体炬,相较于传统的单根等离子体炬布置,油基岩屑处理效率得到显著提高。

(4) 环保

本系统不加装二燃室,合成气通过后处理系统后收集利用。相较于传统高温等离子体气化系统而言,本系统降低了烟损失,提高了剩余能源的利用率,符合生态环保的发展。

3 总结及展望

经过试验以及计算得出,使用笔者团队设计的高温等离子体气化熔融处理系统处理油基钻屑,得

到的合成气热值为 266 844 kJ/h, 占输入燃料热值的 81%。利用合成气进行发电或者售卖都可以用于补偿高温等离子体气化熔融处理系统的运行成本, 更加符合生态的发展及资源的充分合理利用。

目前国外等离子体气化技术已经从理论基础研究过渡到了商业化应用上。虽然国内起步较晚, 但是我国的环保意识逐渐加强, 加之政府部门对于环保技术的扶持和投资, 等离子体气化技术在我国的发展潜力巨大。目前, 尚未发现国内外关于高温等离子体气化及熔融处理油基钻屑技术的研究, 利用等离子体技术处理油基钻屑的优势让这个研究项目具有极大的发展潜力。

参考文献

- [1] 孙根行, 王丽芳, 符丹, 等. 废弃油基钻井岩屑焚烧处理基础[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(3): 59-63, 67.
- [2] 卫清茂. 浅谈钻井固化工堆放场工程设计[J]. 内蒙古石油化工, 2015, (21): 62-63.
- [3] 杜国勇, 熊大富, 刘宇程, 等. 完钻钻井液混合液固化处理技术研究[J]. 石油与天然气化工, 2006, 35(3): 242-243.
- [4] 赵敏, 张海玲, 杨琴. 国内外含油污泥处理处置的标准研究[C]. 中国环境科学学会学术年会论文集, 2014.
- [5] 单海霞, 何焕杰, 袁华玉, 等. 油基钻屑处理技术研究进展[J]. 河南化工, 2012, (15): 26-29.
- [6] 胡佑立. 新形势下页岩气开发建设中存在的环保问题及处理技术[J]. 中小企业管理与科技: 下旬刊, 2017, (6): 64-65.
- [7] Junttila J, Dijkstra N, Aagaard-Sorensen S. Spreading of drill cuttings and sediment recovery of three exploration wells of different ages, SW Barents Sea, Norway[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 135: 224-238.
- [8] Angle C W, Dabros T, Hamza H A. Demulsifier effectiveness in treating heavy oil emulsion in the presence of fine sands in the production fluids[J]. Energy & Fuels, 2007, 21(2): 912-919.
- [9] Yang Liqing, Wang Haojing, Wang Hongfei, et al. Solid waste plasma disposal plant[J]. Journal of Electrostatics, 2011, 69(5): 411-413.
- [10] Tang L, Huang H, Hao H, et al. Development of plasma pyrolysis/gasification systems for energy efficient and environmentally sound waste disposal[J]. Journal of Electrostatics, 2013, 71(5): 839-847.
- [11] Arena U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review[J]. Waste Management, 2012, 32(4): 625-639.
- [12] Chris Higman, Maarten van der Burgt. Chapter 5-gasification processes[M]. London: Gasification Elsevier Inc, 2003.
- [13] 朱凤森. 旋转滑动弧等离子体裂解生活垃圾气化焦油化合物的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [14] 赵增立, 李海滨, 吴创之, 等. 生物质等离子体气化研究[J]. 太阳能学报, 2005, (4): 468-472.
- [15] Prieto G, Okumoto M, Shimano K, et al. Reforming of heavy oil using nonthermal plasma[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(5): 1464-1467.
- [16] Diaz G, Leal-Quiros E, Smith R A, et al. Syngas generation from organic waste with plasma steam reforming[J]. Journal of Physics Conference, 2014, 511: 012081.
- [17] Rqfiq M H, Hustad J E. Biosyngas production by autothermal reforming of waste cooking oil with propane using a plasma-assisted gliding arc reactor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(14): 8221-82334.
- [18] Chernets O V, Korzhyk V M, Marynsky G S, et al. Electric arc steam plasma conversion of medicine waste and carbon containing materials[C]. International Conference on Gas Discharges, 2008: 465-468.
- [19] PETA international. National cheng kung university-tainan, taiwan[OL]. [2009-04-09]. http://www.peat.com/national_cheng.html.
- [20] Internet Archive. AlterNRG announces commissioning of biomass gasifier at waste to liquids facility in China[OL]. [2013-03-07]. <https://web.archive.org/web/20130307175931>.
- [21] 等离子体气化技术落地贵州毕节[OL]. [2014-06-13]. http://gxt.guizhou.gov.cn/gxdt/szdt/201611/t20161107_9552281.html.
- [22] 中国环卫科技网. 揭秘一万度高温垃圾熔融处理技术: 能代替垃圾焚烧吗?[OL]. [2018-08-29]. https://www.cn-hw.net/news/201808/29/40201_1.html. ■
- [1] 廖巧丽, 米镇涛. 化学工艺学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [2] 肖铭, 李燕, 管凤堂, 等. 液氮洗联产 LNG 工艺模拟与改良[J]. 现代化工, 2019, 39(8): 216-220.
- [3] 杨国洞, 张泽海, 刘欣, 等. 液氮洗装置优化改造总结[J]. 氮肥技术, 2016, 37(6): 26-27.
- [4] 董忠民, 冯永发. 液氮洗工艺探讨[J]. 大氮肥, 1998, 21(4): 264-266.
- [5] 薛天祥. 脱除变换气中微量 CO 的方法探讨[J]. 煤化工, 2001, (2): 27-29.
- [6] 李燕, 张述伟, 俞裕国. 液氮洗模拟分析与优化[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(2): 212-217.
- [7] 张寒修, 王延吉. 液氮洗生产问题探讨[J]. 辽宁化工, 2018, (3): 235-237.
- [8] 李玉顺, 顾朝晖, 杨声, 等. 液氮洗的模拟与优化[J]. 化学工程, 2016, 44(12): 66-69.
- [9] 杨豹, 徐震. 液氮洗冷箱堵塞原因分析与改进措施[J]. 消费导刊, 2018, (32): 113.
- [10] 高峰, 尹俊杰. 探讨液氮洗原料气中氮气含量的高限值[J]. 大氮肥, 2012, 35(3): 181-184.
- [11] 孙彦泽, 谷志杰. 浅谈合成气深冷分离技术[J]. 石化技术, 2017, 24(3): 84-85.
- [12] 秦立民, 张述伟, 俞裕国. 液氮洗工艺模拟分析与改造研究[J]. 化肥工业, 2005, (1): 42-47.
- [13] 经文魁. 化工过程稳态模拟技术的现状和发展趋势[J]. 现代化工, 1995, 15(2): 17-20.
- [14] 郭慧雄, 赵卓雅, 赵秋松, 等. 一种能回收甲烷的液氮洗涤装置及其方法: CN 201610517358. 0[P]. 2016-12-07. ■

(上接第 215 页)

以上均为液氮洗工艺在实际生产中优化工艺设计、节约设备成本、提高经济效益指明了方向、提供了指导。

参考文献