

煤焦油电脱盐脱水技术研究进展

乔婧¹,殷海龙^{2,3},孙显锋¹,李正¹,张生军¹

(1. 陕西煤业化工技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710065; 2. 西安交通大学 化学工程与技术学院, 陕西 西安 710049;

3. 陕西煤业化工集团有限责任公司, 陕西 西安 710065)

摘要:煤焦油中含有的水、无机盐、金属和固体杂质会对后续加工装置产生不利影响,也会降低二次加工原料和后续产品的品质。因此,在煤焦油加工过程中,需先对煤焦油进行预处理。与其他预处理技术相比,煤焦油电脱盐脱水技术具有对原料适应性宽、处理过程中不易发生缩合生焦、脱盐脱水效果好等优点,具有广阔的发展空间。笔者简述了煤焦油电脱盐脱水技术原理,综述了煤焦油电脱盐脱水技术在破乳方面的研究热点,包括煤焦油破乳机理、破乳动力学以及破乳剂用量、破乳剂种类等因素对破乳效率的影响,探讨了针对煤焦油特性改进的电脱盐脱水技术和目前工业应用上存在的问题及解决对策。最后,提出开发新型破乳剂、进行破乳剂的复配和组合多种脱盐脱水技术是未来主要的研究和发展方向。

关键词:煤焦油;电脱盐;脱水;破乳

中图分类号:TQ52

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)04-0014-06

Research progress on electric desalting and dehydration technology of coal tar

QIAO Jing¹, YIN Hailong^{2,3}, SUN Xianfeng¹, LI Zheng¹, ZHANG Shengjun¹

(1. Shaanxi Coal and Chemical Technology Institute Co., Ltd., Xi'an 710065, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Shaanxi Coal and Chemical Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: The impurities of water, inorganic salts, metals and solid contained in coal tar have adverse effects for the subsequent processing device and also can reduce the quality of secondary processing raw materials and follow-up products. Therefore, in the process of coal tar processing, it is necessary to pretreat coal tar first. Compared with other pretreatment technologies, the desalting and dehydration technology of coal tar has a lot of developing room, such as wide adaptability to raw materials, less condensation coke and good desalting and dewatering effect. The principle of electric desalting and dehydration of coal tar was briefly described. The research hotspots of coal tar electric desalting and dehydration technology in the aspect of demulsification were summarized, including the mechanism and kinetics of demulsification, the effects of amount and types of demulsifier on demulsification efficiency. Then the improvement of electric desalting and dehydration technologies based on the characteristics of coal tar and the problems and corresponding countermeasures in industrial applications were discussed. Finally, it is proposed that the main research and development directions in the future are to develop a new type of emulsifiers, and compound the emulsifiers and combine a variety of desalting and dehydration techniques.

Key words: coal tar; desalting; dehydration; demulsification

0 引言

我国是一个煤炭资源丰富,石油、天然气相对短缺的国家,为了保障能源安全,近年来不断加强对煤炭资源的开发利用,发展了多种煤化工技术,如焦化、气化、液化、中低温热解等,使煤炭转化为气态、液态和固态产物,其中液态产物即为煤焦油。煤焦

油按照干馏温度和生产过程的不同可分为高温煤焦油、中温煤焦油和低温煤焦油。煤焦油经进一步加工,可获得液体燃料和芳烃、酚、萘等有机化工原料。

煤焦油中含有水分、无机盐、金属和固体杂质(煤粉、焦粉、炭黑等),若不进行预处理,会给后续装置带来操作风险,如水分会增加设备负荷和能耗;无机盐可能腐蚀设备;金属导致催化剂中毒、缩短开

收稿日期:2018-10-21;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18102110

作者简介:乔婧(1986—),女,陕西西安人,工程师,从事煤焦油加工方向研究。E-mail:qiaojing@sxcti.com

引用格式:乔婧,殷海龙,孙显锋,等.煤焦油电脱盐脱水技术研究进展[J].洁净煤技术,2019,25(4):14-19.

QIAO Jing, YIN Hailong, SUN Xianfeng, et al. Research progress on electric desalting and dehydration technology of coal tar[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 14-19.



移动阅读

工周期;固体杂质会加重物料流动对管道的磨损、影响二次加工原料及产品的质量^[1],可见,煤焦油加工前的预处理至关重要。在石油炼制领域,原油预处理通常使用的方法为电脱盐脱水,由于煤焦油的性质与原油较相似,近年来研究人员对煤焦油电脱盐脱水技术进行了探索,文献[2-3]将电脱盐脱水技术应用于高温煤焦油预处理,通过对破乳剂种类和分离温度、电场强度等工艺条件的优化,达到了后续工艺对原料含盐含水量的要求,且具有较好的经济效益。在电脱盐脱水技术应用于中低温煤焦油预处理方面,目前已有工业化应用装置,但中低温煤焦油与原油有较大差异,如密度大、氧含量高、含煤粉等固体杂质,采用现有的电脱盐脱水技术和设备进行煤焦油净化还存在很多难点。因此需要针对电脱盐脱水技术在煤焦油预处理方面的局限性,对相关机理、关键技术和设备进行深入研究,使其广泛应用于煤焦油预处理过程。

本文概述了煤焦油电脱盐脱水原理以及破乳剂和电脱盐脱水技术的研究进展,总结了目前工业应用过程中出现的问题和解决对策,提出了煤焦油电脱盐脱水技术的研究和发展方向的建议。

1 煤焦油电脱盐脱水原理

电脱盐脱水技术是采用加热、添加破乳剂和高压电场,使油破乳、油中小水滴极化,逐渐聚结为大水滴而发生沉降,从而实现脱水^[4],同时伴随溶于水的盐和金属的脱除。煤焦油电脱盐脱水原理如图1所示。

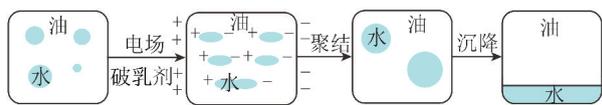


图1 煤焦油电脱盐脱水原理示意

Fig. 1 Principle of electrical desalting and dehydration of coal tar

由图1可以看出,煤焦油的电脱盐脱水是通过煤焦油的破乳脱水过程实现,关键步骤为水滴的聚结和沉降。在电场作用下,煤焦油中的水滴沿电场方向极化,相邻水滴间的聚结力为

$$f = 6\epsilon E^2 r^2 (r/d)^4 \quad (1)$$

其中, f 为相邻水滴间的聚结力; ϵ 为油相介电常数; E 为电场强度; r 为水滴半径; d 为两水滴间的距离^[5]。两水滴的聚结力与电场强度的平方成正比,电场越强,聚结力越大,越易聚结,因此可通过增大电场强度促进水滴聚结。若电场强度过大(当 $E \geq$ 电场临界分散强度时),已聚集的较大水滴受电分

散作用开始分散,降低了脱盐脱水效率^[6],一般选择强电场梯度为700~1000 V/cm,弱电场梯度为300~400 V/cm^[7]。两水滴的聚结力与水滴半径的平方和半径与距离比值的四次方成正比,可通过注水的方式促进水滴聚结,注水后煤焦油中含水量增加,水滴的直径变大,水滴间的距离变小,易于水滴聚结。此外,注水还可溶解油中的盐,有利于煤焦油净化。但若注水量过大,能耗增加,电脱盐设备的负荷增加,易造成脱水不及时,导致脱水效率下降^[8]。注水量为5%~10%,且应选择软化水、净化水或含盐量较低的洗涤水,注水的pH值一般控制在7.5左右^[9]。

水滴的沉降符合球形粒子在静止流体中自由沉降的斯托克斯(Stokes)定律,当水滴直径 $>0.5 \mu\text{m}$ 时,水滴沉降速度为

$$u = \frac{d_1^2(\rho_1 - \rho_2)}{18\nu_2\rho_2}g \quad (2)$$

其中, u 为水滴沉降速度,m/s; d_1 为水滴直径,m; ρ_1 为水的密度, kg/m^3 ; ρ_2 为油密度, kg/m^3 ; ν_2 为油黏度, m^2/s ; g 为重力加速度, m/s^2 。增大水滴直径、增加煤焦油和水的密度差、减小煤焦油的黏度,均可加快水滴沉降速度。一般采用加热方式增加水滴的沉降速度,加热温度控制在100℃左右,加热后,油品黏度降低,有利于油水分离。为避免煤焦油中的轻组分和水蒸气,引起操作扰动,影响净化效果,压力控制在0.8~2.0 MPa^[10]。

2 电脱盐脱水在煤焦油预处理中的研究

2.1 破乳剂

煤焦油中煤粉与焦粉含量、比例、粒度对煤焦油乳状液的稳定性和黏度具有决定性作用^[11],煤焦油来源不同,性质差异较大,需要根据煤焦油的特性选择合适的破乳剂,同时还需兼顾经济性,并考虑对后期产品质量和收率的影响。

2.1.1 破乳机理

破乳剂对乳状液的作用复杂,机理尚未有定论,目前由原油破乳过程提出的机理有:相转移、碰撞击破界面膜机理、增溶机理、褶皱变形机理等^[12]。煤焦油破乳机理的研究相对较少,目前主要有:①煤焦油的特性对乳状液稳定性和破乳机理的影响。文献[13-14]对低温煤焦油的物理性质、化学组成、胶质和沥青质含量进行研究,发现煤焦油密度与水密度差越小、胶质和沥青质含量多、蜡含量越高,乳状液越稳定,油水分离难度越大。由斯托克斯(Stokes)定律可知,油、水密度差小,沉降慢,油水不

易分离。胶质、沥青质和蜡含量均是主要的成膜物质,界面膜阻碍水滴间的聚合,使破乳难度加大,因此,胶质、沥青质等物质含量越高,乳状液越稳定,越不易破乳。②破乳剂结构与性能的关系。张慧敏^[15]探讨了含氟破乳剂的分子结构、链段长度与破乳效果的关系,发现破乳剂链越长、支化度越大,越不容易破乳,这与普遍认为的支化度越大,润湿性能和渗透效应越好,破乳效果越好不一致,可能是因为随着链长度的增大,聚集体体积增大,扩散速度减慢,且支化度大时,聚集体支状结构易相互缠绕,使界面模量增大,破乳难度增加。

2.1.2 破乳动力学

近年来,对乳状液动力学的研究发现,它既受油水界面性质的影响,也与油中添加剂种类、油水两相含量比、分散项粒径大小与分布特征等因素有关,普遍认为破乳动力学非常复杂,相关研究主要集中在分散相液滴受力变形、聚集、碰撞及其聚结与破裂等^[16]。王军策等^[17]以 von Smoluchowski 提出的快速聚集理论为基础,建立了动力学模型,并进行了拟合和验证,发现影响电场破乳脱水速率的因素有电场强度、电场频率、水滴直径、乳化液中水相含量、温度和黏度等。

2.1.3 破乳剂使用量

破乳剂的最佳使用量一般是其浓度不超过其临界胶束浓度。文献[18-19]研究发现,在电脱盐脱水技术处理煤焦油过程中,破乳剂浓度小于其临界胶束浓度时,破乳效果随着加入量的增加而提高;当破乳剂浓度超过其临界胶束浓度后,破乳效果增加不明显或有所减弱。这是因为破乳剂浓度低于其临界胶束浓度时,破乳剂以单体形式吸附在油水界面,吸附量与浓度成正比,油水界面张力随破乳剂浓度的增加逐渐降低,脱水效果逐渐提高。当破乳剂浓度接近临界胶束浓度时,界面吸附趋于平衡,界面张力几乎不再下降,脱水效果达到最佳。如再增大破乳剂浓度,破乳剂分子开始聚集形成团簇的胶束,脱水率可能下降。

2.1.4 破乳剂种类

20世纪20—80年代,国外破乳剂的发展经历了3代更迭。第1代是阴离子型破乳剂,包括磺酸盐、羧酸盐,由于用量大(1 000 mg/L)且效果差,基本已淘汰。第2代是低分子量非离子型聚醚破乳剂,其耐酸、碱、盐,破乳效果有所提高,用量为100~500 mg/L。第3代是高分子量聚醚型破乳剂,以环氧乙烷、环氧丙烷嵌段共聚物为主体的聚醚型破乳剂的效果最佳,用量低于100 mg/L。我

国自20世纪60年代开始破乳剂的研究,主要集中在聚醚型破乳剂,至20世纪80年代末,已研发40余种破乳剂^[20]。20世纪90年代以来,随着稠油比例的增加,原油乳状液稳定性增加,破乳能力更高、破乳温度更低、用量更少、适应性更强的新型破乳剂不断涌现,如含硅类破乳剂^[21]、聚磷酸酯型破乳剂、超高分子量破乳剂、生物破乳剂^[22]、离子液体破乳剂^[23]等,利用破乳剂间的协同作用,将2种或2种以上的破乳剂进行复配,也是开发高效破乳剂的重要方法。

煤焦油破乳剂的研究主要是聚醚型破乳剂的筛选、合成以及复配。破乳剂的筛选一般以煤焦油为原料,对常用原油破乳剂进行筛选。于世友等^[3]对石油行业原油常用破乳剂进行筛选,同时考虑破乳剂的用量及其对高温性能的影响,筛选出水溶性聚氧乙烯聚氧丙稀聚醚破乳剂。朱肖曼等^[24]在高温煤焦油中加入6种破乳剂,发现醇类聚醚破乳剂效果最佳。方梦祥等^[25]从5种破乳剂中筛选出一种有机胺类破乳剂,脱水效果较好,且减小了焦油的黏度。

在破乳剂合成方面,马博文^[26]自制聚醚破乳剂,其亲油基和亲水基分别在油相和水相中具有更强的作用力,可替代沥青质等天然乳化剂,降低了表面张力,增强了脱水效果。张颀等^[27]合成了改性的聚醚破乳剂,以新鲜的煤焦油乳状液为原料,脱水效果较好。李学坤等^[19]通过单因素试验发现,破乳剂种类对煤焦油电脱盐脱水效果影响较大,由多乙烯胺类引发剂合成的破乳剂效果最佳,与商业破乳剂破乳效果对比,发现水溶性破乳剂较适合煤焦油电脱盐脱水过程。

在破乳剂的复配方面,张菊等^[28]研究了2种破乳剂复配比例、添加量对煤焦油净化效果的影响,得出破乳剂I和J复配比例为2:3时,可将中低温煤焦油含水率降至3%以下,不同的复配剂对脱盐脱水有协同效果。孙鹏等^[29]针对低温煤焦油的比重大且与水接近、黏度高、乳化性强等特点,在电脱盐脱水过程中将一种多功能复合型的助剂添加到煤焦油原料中,起到良好的辅助降黏、破乳作用,提高了脱盐脱水效率。因而复配能够增强破乳效果,增大破乳剂的应用范围。

2.2 电脱盐脱水技术的改进

原油电脱盐脱水一般采用典型的二级电脱盐工艺,如直接将煤焦油用于原油净化工艺,很难达到预期效果。根据煤焦油特点,通过对现有工艺的改进、设计新型装置以及与其他技术组合来达到脱盐脱水

的目的。文献[30]通过添加一级电脱单元,即三级电脱盐装置,获得了较高的脱盐脱水率。文献[31]采用具有水上油电脱盐罐和下水油电脱盐罐的新型装置和针对密度大于 1 g/cm^3 的煤焦油提出的一种高度集成化的撬装式电脱盐脱水装置(该装置设有集油包,同时可分离较重的煤焦油和比重较轻的浮油)来达到较好的脱盐脱水效果。还有研究人员通过与其他脱盐脱水技术的组合来实现提高煤焦油净化的效率。李泓等^[32]采用离心分离、过滤、蒸馏与电脱盐脱水技术相结合的方法对煤焦油进行处理,不仅可达到净化的目的,而且进行了脱氨水、脱酚等处理。唐应彪等^[33]采用离心分离、化学反应脱金属脱灰分、电脱盐脱水等技术,使煤焦油达到深度脱盐、脱水、脱金属、脱灰分、脱杂质的效果。韩金奇等^[34]将煤焦油经过二级过滤后加热后,通过电脱盐脱水、再加热并进行脱水处理,对煤焦油进行了有效的净化。

3 煤焦油电脱盐脱水技术的工业应用

目前电脱盐脱水技术已在部分煤焦油加氢企业中进行了工业应用,工艺流程如图2所示^[30]。用混合泵将煤焦油与稀释油按一定比例在管道中混合,同时加入破乳剂等助剂,加热后依次通过3级电脱盐罐,净化后煤焦油中的水分、固体杂质、金属的净化率大于95%。

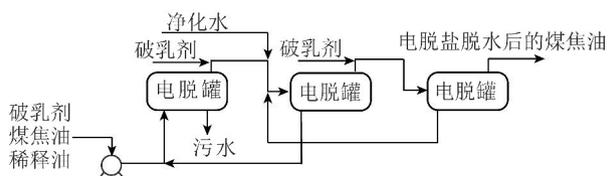


图2 煤焦油电脱盐脱水工艺流程

Fig. 2 Electrical desalting and dehydration process of coal tar

当前运行中存在的主要问题有:①煤焦油乳化性能强,油水分离速度较慢,增大了电场扩散不均匀的可能性;②煤焦油中盐类含量高,易腐蚀设备;③煤焦油黏度大,易黏附在脱盐罐绝缘材料上,产生电弧或电蚀现象;④煤焦油导电性能较强,可能发生短路和电极失活现象;⑤煤焦油成分复杂,电脱盐脱水后易产生悬浮物,影响净化效率。为此,文献[35-36]提出了改进方法和优化策略:选择合适的破乳剂,提高油水分分离速度;提高设备材料的防腐性能,延长设备使用寿命;增强绝缘材料绝缘特性,减少焦油吸附现象;全面研究煤焦油基本性质,解决或杜绝易引发事故的根源问题。

4 结语与展望

随着煤热解、气化、焦化技术的发展,煤焦油来源更加广泛,同时煤焦油产业链逐步延长,下游产品市场日益发展,对上游原料的要求也越来越严格。此外,相关政策的实施对煤焦油加工影响越来越大,尤其是近年来环保政策的逐步升级,给相关企业的生存和发展带来更大的压力和严峻的挑战。煤焦油企业亟需找出发展中的瓶颈,对现有技术进行优化,以应对日益严格的市场环境。其中,煤焦油净化技术是重中之重,如不能深度净化,不仅会对环境造成一定影响,还会妨碍煤焦油后期利用,限制其下游产品的品质提升空间,减弱企业竞争力,针对性地提出煤焦油预处理方案迫在眉睫。煤焦油密度大、含煤粉等固体杂质、种类多样、性质不稳定,且其中的水分均以油包水的乳化状态存在,不易被极化。煤焦油电脱盐脱水技术可通过添加破乳剂有效进行油水分离,还可通过改变破乳剂的种类、进行破乳剂的复配达到高效净化的效果。目前,在煤焦油破乳过程中,聚醚型破乳剂研究已取得一定的进展,未来应根据煤焦油特性,加快新型破乳剂的开发,进一步降低破乳剂用量,增加破乳速率,增强破乳效果。而破乳剂复配是解决目前破乳剂种类少、适用性不强的有效办法,应加强研究复配破乳剂的机理和复配规律。此外,近年来,新型脱盐脱水技术发展迅速,主要有超声波、膜法、微波辐射、生物法、高频辐射、水击谐波、 CO_2 破乳法等方法^[37],具有工艺简单、污染小等优点,在脱盐脱水领域也具有广阔的发展前景,未来可利用各方法的优势,将多种方法相结合,打破单一方法的局限性,研发出更科学、更高效的综合性脱盐脱水技术。综上,为达到深度脱盐脱水的目的,提高煤焦油适用性,保障后续设备长周期运行,需要从以下方面进一步深入研究:①针对煤焦油的特性开发新型破乳剂、进行破乳剂的复配;②开展多种脱盐脱水技术的组合研究。

参考文献(References):

- [1] 马宝歧,任沛建,杨占彪,等.煤焦油制燃料油品[M].北京:化学工业出版社,2011:68-71.
- [2] 方懿.煤焦油加工装置无碱蒸馏工艺改造[J].现代化工,2010,30(12):83-85.
FANG Yi. Alkali-free distillation process modification of coal tar processing plant[J]. Modern Chemical Industry, 2010, 30(12): 83-85.
- [3] 于世友,李志峰,江丹.高效破乳剂在焦化油水分分离中的试验与研究[J].莱钢科技,2006(4):31-33.

- [4] 王丽,李坚,王世琴.原油电脱盐脱水技术研究进展[J].广东石油化工学院学报,2014,24(3):6-9.
WANG Li,LI Jian,WANG Shiqin. Research progress of crude oil desalting and dewatering[J]. Journal of Guangdong University of Petrochemical Technology,2014,24(3):6-9.
- [5] 聂剑飞,李存玉.提高电脱盐合格率的探讨[J].广州化工,2010,38(2):106-109.
NIE Jianfei,LI Cunyu. Discussion on the improvement of the passing rate of electric desalting[J]. Guangzhou Chemical Industry,2010,38(2):106-109.
- [6] 苑世明.原油脱盐工艺研究[D].东营:中国石油大学(华东),2003:17-28.
- [7] 张风华,张永生,娄世松,等.原油电脱盐技术研究进展[J].化工科技,2013,21(1):71-74.
ZHANG Fenghua,ZHANG Yongsheng,LOU Shisong, et al. Research progress on electro-desalting technology of crude oil[J]. Science&Technology Chemical Industry,2013,21(1):71-74.
- [8] 金丽萍.常减压装置电脱盐的工艺优化[J].石油化工技术与经济,2011,27(2):37-42.
JIN Liping. Optimization on electric desalting process in atmospheric and vacuum distillation unit[J]. Technology & Economics in petrochemicals,2011,27(2):37-42.
- [9] 高明彦,孙建军.电脱盐设备在煤焦油加氢装置上的应用[J].广东化工,2012,39(5):193-194.
GAO Mingyan,SUN Jianjun. Electric desalting equipment in coal tar hydrogenation device[J]. Guangdong Chemical Industry,2012,39(5):193-194.
- [10] 任甲子,牛有睿,张双月.超声波在电脱盐系统中的应用[J].化工技术与开发,2017,46(1):53-59.
REN Jiazi,NIU Yourui,ZHANG Shuangyue. Application of ultrasonic in electric desalination system[J]. Technology & Development of Chemical Industry,2017,46(1):53-59.
- [11] 刘启兵.煤焦油乳化机理、破乳、脱水方法的研究[D].武汉:武汉科技大学,2001.
- [12] 刘海峰.原油乳状液化学破乳机理-钥匙说[J].化工进展,2010,29(S1):155-159.
LIU Haifeng. Chemical demulsification mechanism of demulsifier for water-in-crude oil emulsion-lock and key[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2010,29(S1):155-159.
- [13] 乔建江,詹敏,张一安.乳化原油的破乳机理研究 I:油水界面张力对破乳效果的影响[J].石油学报(石油加工),1999,15(2):1-5.
QIAO Jianjiang,ZHAN Min,ZHANG Yian. Study on the mechanism of petroleum emulsion's breaking I: Effect of interfacial tension on the effectiveness of demulsification[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section),1999,15(2):1-5.
- [14] 王世宇.低温煤焦油化学破乳脱水机理的基础研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2010.
- [15] 张慧敏.煤焦油破乳剂破乳机理研究[D].太原:山西大学,2015.
- [16] 刘闯,陈彬,张贤明,等.油水乳状液分散相动力学的研究进展[J].石油化工,2012,41(11):1333-1336.
LIU Ge,CHEN Bin,ZHANG Xianming, et al. Progress in kinetics of disperse phase in oil-water emulsion[J]. Petrochemical Technology,2012,41(11):1333-1336.
- [17] 王军策,李冬,李稳宏,等.煤焦油在电场中的脱水动力学研究[J].石油化工,2012,41(5):533-538.
WANG Junce,LI Dong,LI Wenhong, et al. Kinetics of coal tar dehydration in electric field[J]. Petrochemical Technology,2012,41(5):533-538.
- [18] 刘纾言,王鑫,孙鹏.中低温煤焦油电脱盐处理技术研究[J].当代化工,2017,46(9):1786-1791.
LIU Shuyan,WANG Xin,SUN Peng. Study on desalination technology of moderate-low temperature coal tar[J]. Contemporary Chemical Industry,2017,46(9):1786-1791.
- [19] 李学坤,李稳宏,冯自立,等.响应面法优化煤焦油电化学脱水的操作条件[J].石油化工,2013,42(10):1123-1129.
LI Xuekun,LI Wenhong,FENG Zili, et al. Optimization for electrochemical dehydration process of coal tar using response surface methodology[J]. Petrochemical Technology,2013,42(10):1123-1129.
- [20] 禹荣飞.原油破乳剂的应用现状综述[D].成都:西南石油大学,2015.
- [21] 苏崇永.硅基破乳剂的研究发展[J].当代化工研究,2017(5):110-112.
SU Chongyong. Research and development of silicon-based demulsifier[J]. Chemical Intermediate,2017(5):110-112.
- [22] 刘庆旺,贺梦琦,范振中.原油生物破乳剂的研究进展[J].科学技术与工程,2009,9(12):3395-3400.
LIU Qingwang,HE Mengqi,FAN Zhenzhong. Recent advances in crude oil bio-demulsifier[J]. Science Technology and Engineering,2009,9(12):3395-3400.
- [23] 田官伟,陈颖,王亚林,等.化学破乳机理及其研究进展[J].硅酸盐通报,2018,37(1):155-158.
TIAN Gongwei,CHEN Ying,WANG Yalin, et al. Chemical demulsification mechanism and its research progress[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2018,37(1):155-158.
- [24] 朱肖曼,张晓静,马博文.高温煤焦油脱水脱盐工艺优化研究[J].洁净煤技术,2016,22(3):61-64,68.
ZHU Xiaoman,ZHANG Xiaojing,MA Bowen. Dewatering and desalination process optimization technology of high temperature coal tar[J]. Clean Coal Technology,2016,22(3):61-64,68.
- [25] 方梦祥,余盼龙,石振晶.利用破乳剂对低温煤焦油进行初步脱水的研究[J].热科学与技术,2012,11(3):260-265.
FANG Mengxiang,YU Panlong,SHI Zhenjing. Experimental study on preliminary dehydration of low temperature coal tar by adding demulsifier[J]. Journal of thermal Science and Technology,2012,11(3):260-265.
- [26] 马博文.煤热解焦油化学破乳脱盐试验研究[J].洁净煤技术,2017,23(3):81-84.
MA Bowen. Study on chemical demulsification and desalination of coal pyrolysis tar[J]. Clean Coal Technology,2017,23(3):81-84.
- [27] 张颀,王世宇,孙会青,等.低温煤焦油二步法脱水试验研究[J].煤质技术,2009(6):43-49.

- ZHANG Yang, WANG Shiyu, SUN Huiqing, et al. Research on two-step dewatering test of low temperature coal tar [J]. Coal Quality Technology, 2009(6):43-49.
- [28] 张菊, 刘志玲, 张媛, 等. 中低温煤焦油脱水剂的复配研究[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(3):85-88.
- ZHANG Ju, LIU Zhiling, ZHANG Yuan, et al. Compounding reagent for medium-low temperature coal tar dewatering [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(3):85-88.
- [29] 孙鹏, 王鑫, 刘纾言. 一种处理煤焦油用助剂及其制备方法: CN106700085A [P]. 2017-05-24.
- [30] 杨占彪, 王树宽. 煤焦油的电脱盐脱水方法: CN100999675 [P]. 2007-07-18.
- [31] 常秋连, 张晓静, 马博文, 等. 一种煤焦油电脱盐实验装置: CN205170759U [P]. 2016-04-20.
- [32] 李泓, 韦伟, 王纪刚, 等. 一种煤焦油深加工预处理方法: CN105316018A [P]. 2016-02-10.
- [33] 唐应彪, 崔新安, 袁海欣, 等. 煤焦油脱金属及灰分脱除技术研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2015, 32(4):1-6.
- TANG Yingbiao, CUI Xin'an, YUAN Haixin, et al. Study on coal tar demetalization and de-ashing technologies [J]. Corrosion & Protection In Petrochemical Industry, 2015, 32(4):1-6.
- [34] 韩金奇, 刘戈, 曹坚. 煤焦油的预处理系统: CN206666454U [P]. 2017-11-24.
- [35] 高明辉, 魏峰. 煤焦油加工过程中电脱盐技术探讨[J]. 化工管理, 2017(13):95.
- [36] 边波, 雷声瑞. 对煤焦油电脱盐技术的思考与研究[J]. 化工管理, 2017(14):152-153.
- [37] 陈和平. 破乳方法的研究与应用新进展[J]. 精细石油化工, 2012, 29(5):71-76.
- CHEN Heping. The latest progress in the research and application of the demulsification methods [J]. Speciality Petrochemicals, 2012, 29(5):71-76.