高含水油泥干化技术研究进展*

张哲娜[1,2] 姜忠民[3] 仝 坤[1,2]

(1. 石油石化污染物控制与处理国家重点实验室;2. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司;
3. 中国石油辽河油田公司)

摘 要 针对油田和炼化企业产生的高含水油泥运输成本高、堆放面积大、深度处理难度大的问题,指出干化减量是实施高含水油泥资源化、无害化最为直接、经济、有效的前提。从技术原理及应用等方面综述了目前高含水油泥脱水干化处理技术,包括热干化、超热蒸汽喷射、新型干化技术(微波干化、电渗透干化、油炸干化)等,详细介绍了各种方法的原理、研究实例和优缺点,为高含水油泥干化及后续处理提供借鉴。

关键词 高含水; 油泥; 减量化; 干化

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2019.05.002 **文章编号:** 1005-3158(2019)05-0005-04

0 引 言

高含水油泥(油泥的一种)是油气田开发和炼制过程中产生并经过机械脱水、含水率一般高达 80%以上的油泥。随着全球经济的迅速发展和原油劣质化加剧,高含水油泥的数量日益增加、处理难度增大。据不完全统计,我国油田和炼化企业的污水处理系统以及原油生产储运系统每年产生高含水油泥超过 500 万 t[1-2]。高含水油泥成分十分复杂,一般由水(80%以上)、老化原油、沥青质、悬浮固体、细菌质以及铜、铬、汞等重金属盐类组成,呈现乳化严重、黏度大、难以沉降脱水等特点[3-4]。此外,高含水油泥还含有大量的苯系物、酚类、蒽类等有毒有害难降解有机物质,如果直接堆放或处理不当将危害生态环境和人类健康[5]。在《国家危险废物名录》(2016 版)中,油泥被归类为危险废物(HW08 废矿物油),明确要求需按危废进行管理。随着国家环保要求的日益提高,油泥的减量化、资源化、无害化处理成为必然的发展趋势,而降低高含水油泥的含水率实现减量化是实施其资源化、无害化最为直接、经济、有效的前提[6-7]。本文从技术原理及应用等方面综述了目前高含水油泥的脱水干化工艺中广泛采用的处理技术,为高含水油泥的减量化提供理论和实践参考。

1 高含水油泥干化概述

高含水油泥较高的含水率造成运输成本高、堆放体积大,同时还给深度处理处置带来困难,如高含水油泥水分蒸发引起的能量损失常导致无害化、资源化较有前景的热解工艺无法稳定、连续运行[8-9],且由此产生的大量冷凝水还增加了后续油水分离的成本,因此,高含水油泥干化处理对热解技术的成本控制和推广运行起到至关重要的作用。

高含水油泥干化是通过各种加热手段导入热量,使水分蒸发而进行的固-液分离操作[10-11]。高含水油泥干化可去除结合水以外的全部水分,含水率一般可降至 30%以下,减量化程度高,不仅降低了储运费用和后续设备处理负荷,还由于干化后油泥热值的大幅提升实现自持燃烧,减少辅助燃料的消耗,在解决油泥最终去向问题的同时,也实现了降低能耗的目标[12-13]。

2 高含水油泥干化技术

高含水油泥干化技术主要包括热干化、超高温蒸汽喷射、新型干化法(包括微波干化、电渗透干化和油炸干化)等,其中应用最广泛的是热干化技术。

2.1 热干化技术

热干化技术是热媒通过直接(热对流)或间接(热传导)的方式使污泥受热,水分蒸发,达到污泥干化的目的。直接热干化是湿污泥和加热后的热介质(蒸汽、烟气等)直接接触混合,热媒与蒸发水汽、干化过程中污泥的副产气一同排出,过程不产生灰尘,干污泥粒径可控,但排气量大,后续废气收集、治理的费用和难度高[14-15]。目前常用的污泥直接热干化技术主

* 基金项目:石油石化污染控制与治理国家重点实验室资助项目(2016G-5103);中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目(2016E-1205,2017D-4611)。

张哲娜,2016 年毕业于天津大学化工工艺学工程与技术专业,硕士,现在中国石油集团安全环保技术研究院有限公司环保技术研究所从事固废处理工作。通信地址:北京市昌平区黄河北街 1 号院 1 号楼,102206。E-mail:zhangzhena@cnpc.com.cn。

要有带式干化和转鼓式干化技术。由于高含水油泥组分的复杂性，在直接热干化过程中挥发的石油烃类物质与传热介质接触会污染热源，且存在一定的安全风险，因此尽管直接热干化技术在市政污泥中的应用较多，但成功的高含水油泥干化工程案例较少[11,16]。

间接热干化是热介质（蒸汽、导热油等）加热干化机器壁，并通过连续搅拌促进器壁与干化机内污泥接触传热。此类技术传热效率和水分蒸发速率低于直接干化技术，但在干化过程中由于污泥不与热介质接触，产生的尾气量较小，而且可以采取有效措施避免烟气污染，因此装置的环境保护性能较好。间接热干化系统流程简单，操作简便，装置易于控制，干化后污泥的干度可以调节控制，在干化器终端干污泥产物为粉末状[17]。目前污泥间接热干化常用的技术主要有圆盘式干化、桨叶式干化、薄膜式干化，其干燥速率分别为 10～12，15～20，25～35 kg/(m^2 · h)，吨能耗分别为 855～955，800～885，800～900 kW/h[12,18]。张立宏等[19]探索了桨叶式干燥机处理高含水油泥的可行性，以饱和蒸汽为热源，将含水率 77.6%的炼油厂高含水油泥在 180℃下干化至含水率 30%，热值达到 17.78×10^3 kJ/kg。该装置处理规模 60 kg/h，结构紧凑，占地面积小，连续运行，传热效率高并具有自净能力。博天环境集团股份有限公司[20]采用圆盘干化机处理了某炼油厂高含水油泥，干化机热媒采用 160℃蒸汽，干化后油泥减量化明显，含水率由 83%～90.7%降至 40%以下，具有较高热值，可做掺烧燃料。该实验装置占地小，运行自动控制，操作简单方便，工艺适合推广，但工程应用时需要增加除尘器和控制油气挥发产生的异味。

直接-间接联合热干化是对流-传导热干化技术的有效结合，该干化系统由于采用两种传热组合，传热效率高，停留时间短，装置无返料系统，但机械搅拌过程中易产生粉尘从而影响载气的循环，干化颗粒的粒径也无法控制[12,21]。该类型技术的代表有流化床干化技术和涡轮薄层干化技术。天津石化采用意大利 VOMM 公司的薄层干化技术建成处理能力 1 万 t/a 油泥干化装置，并于 2012 年进行高含水油泥与活性污泥掺混（比例 1∶2 或 1∶1）干化实验，装置运行稳定，干化后混合油泥含固率由 12%提高至 73%以上，减量化效果明显。但干化运行过程中产生的油气在微负压环境下存在一定的爆炸风险，此外，由于高含水油泥黏性大，附着在桨叶上，影响传热效果，增加能耗[22]。

到目前为止，能耗大是热干化法的主要问题，且含油率高的高含水油泥处置在国内还缺少较成熟的工程经验。因此应尽可能利用热电厂的高温烟气或污泥消化产生的热量进行废热利用以降低能耗，并通过控制进泥含油率、干燥设备腔体内氧含量，采取有效的惰性化措施，保持入口处于微正压，保证含油率高的高含水油泥热干化的安全性[16,23]。

2.2 超热蒸汽喷射技术

超热蒸汽喷射技术是利用 500～600℃的超热蒸汽对浓缩脱水后的高含水油泥进行干化处理。高温蒸汽以超音速从喷嘴喷出并在干化室内与高含水油泥正面碰撞，在超音速所产生的能量作用下，高含水油泥被瞬时破碎成细小颗粒，最后通过旋风分离器实现油气、水汽与固相分离。超热蒸汽喷射设备具有处理效果好、设备紧凑、易于维护、回收油质纯净等优点[24]。由中国石油吉林油田公司 2010 年开发的 5 t/h 超热蒸汽喷射高含水油泥处理装置，经过两个试验周期的运行表明，处理后固体残渣中含水率低于 10%，残渣含油率≤0.3%，原油回收率达 99%以上，符合减量化、资源化的原则，为高含水油泥的处理开辟了一条新路[25]。目前该技术处于推广阶段，设备能耗还有待改进。

2.3 新型干化技术

2.3.1 微波干化技术

微波干化技术是利用频率 300 MHz～300 GHz、波长 0.001～1 m 的微波通过热效应及非热效应破坏高含水油泥的絮状体系，实现油、水、固的三相分离的处理方法[26]。不同于传统热干化传热机理，微波干化依靠高含水油泥中极性水分子在电磁场中高速的热运动获得热能，进而对高含水油泥外部及内部同时加热，大大缩短了热传导时间，因此加热速率快、加热均匀且易于控制[27]。同时高含水油泥中液相的相对运动使其稳定结构遭到破坏，加速油水分离过程，从而提高其脱水性[28]。刘晓娟等[29]以长庆油田某油区的高含水油泥为研究对象验证了高含水油泥微波干化的可行性，并粗略推算出 10 m^3 高含水油泥经重力沉降后在 20 kW 功率的微波作用下 15 h，可使其含水量由 85%降为 45%。因此使用微波干化技术对高含水油泥进行处理是完全可行的。微波干化技术的优点是设备少、占地面积小，缺点是需要消耗大量电能，普及难度较大。

2.3.2 电渗透干化技术

电渗透污泥干化是在外加直流电场的作用下，使污泥中带电颗粒向阳极靠近，分散介质扩散层的反离

子携带水分向阴极运动,使污泥中的结合水、间隙水变成游离水,因此电渗透干化技术可去除大量由机械脱水无法去除的水,且体系能耗远小于热干化的理论能耗[30-32]。吉林石化针对炼油厂高含水油泥开展了电渗透技术工艺优化试验,结果表明,电渗透技术可破坏其表面微生物结构,使其含水率降至 60%以下,后续干燥处理可使含水率进一步降至 20%以下,再经碳化处理,可将含水率降至 1%以下,有机物得到回收,运行成本低于直接焚烧[33-34]。尽管电渗透干化技术能耗低、药耗少、装置简单且占地面积小,但在实际运用中仍存在一些问题,如随着高含水油泥的含水率降低,其电阻变大,耗电量增加,同时阳极材料易被腐蚀,引发脱水故障[35-36]。因此,高含水油泥的电渗透干化技术无法大范围推广应用。

2.3.3 油炸干化技术

污泥的油炸干化技术是利用高温废油对高含水油泥进行传质和传热处理使水分脱除的过程。废油通过热对流的方式使高含水油泥表面受热,同时热量以热传导的方式进入其内部,在传质和传热的共同作用下,高含水油泥呈现多孔结构且渗透性被破坏,水分随着油的引入以蒸汽的形式脱除[12,37-38]。张珂等[39-40]利用车用废润滑油对辽河油田高含水油泥进行了油炸脱水实验研究,结果表明该技术可实现高含水油泥的高效脱水,脱水后油泥可作为燃料使用,此外还为车用废润滑油提供了一条资源化利用的新途径,实现以废治废的效果。相对于传统的热干化技术,油炸干化技术脱水效率高、传热效率快、设备简单且具有更低的能量损失和能量消耗,但其运行成本受废油价格的影响,目前该技术尚处于研发阶段。

2.4 技术发展趋势

虽然高含水油泥的主要成分是水,但也含有一定量的矿物油和非油有机物,干化处理应脱水减量和回收油并重,热干化处理过程中应避免温度过高致油气大量挥发再冷凝堵塞管路、除尘器,不凝气逸散致二次污染,应根据后续处理工艺采用适宜干化技术实现节能和减排。

3 结束语

高含水油泥的干化处理可达到深度减量效果,利于后续资源化利用和无害化处理,具有良好的环境和经济效益。目前高含水油泥干化技术大多源于市政污泥的干化处理,由于高含水油泥成分复杂,很多技术和设备并不适用,典型、成熟的高含水油泥干化处理案例较少。因此,应根据高含水油泥的特点,选择低油气挥发并有效回收油气资源的技术,确保装置的长周期安全、平稳运行。此外,为进一步降低高含水油泥干化处理成本实现节能减排,还应结合建设环境、能源条件和最终处置要求选择适宜干化技术。

参 考 文 献

[1] DENG S, WANG X, TAN H, et al. Experimental and modeling study of the long cylindrical oily sludge drying process[J]. Applied thermal engineering, 2015(91): 354-362.

[2] 曲天煜,刘发强.炼油厂含油污泥干化技术进展[J].环境工程,2017,35(增刊):35-38.

[3] LIU C, ZHANG Y, SUN S, et al. Oil recovery from tank bottom sludge using rhamnolipids[J]. Journal of petroleum science and engineering, 2018(170):14-20.

[4] HU G, LI J, ZENG G. Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review[J]. Journal of hazardous materials, 2013, 261(13): 470-490.

[5] HUANG Q, HAN X, MAO F, et al. Effect of the particle surface on oil recovery from petroleum sludge[J]. Energy & fuels, 2014, 28(7):4480-4485.

[6] 韩国勇.含油污泥减量化工艺试验及对比[J].油气田环境保护,2017,27(2):24-26.

[7] 王玉华,陈传帅,孟娟,等.含油污泥处置技术的新发展及其应用现状[J].安全与环境工程,2018,25(3): 103-110.

[8] ZHANG K, ZHU J, ZHOU Y, et al. Analysis the fry-drying process of oily sludge sample[J]. Chemical engineering research and design, 2014, 92(11):2396-2403.

[9] 齐加胜,黄欣欣.含油污泥工程化处理工艺技术研究[J].石油化工应用,2018,37(1):29-32.

[10] 戴之希.污泥热干化过程中污染物的释放与控制研究[D].杭州:浙江大学,2018:4.

[11] 郝丹.污泥干化技术的研究与应用[D].大庆:东北石油大学,2015:17-20.

[12] TUNCAL T, USLU O. A review of dehydration of various industrial sludges[J]. Drying technology, 2014, 32(14):1642-1654.

[13] MANARA P ZABANIOTOUA. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion-A review[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2012, 16(5):2566-2582.

[14] LEONARD A, MENESES E, TRONG E L, et al. Influence of back mixing on the convective drying of residual sludges in a fixed bed[J]. Water research, 2008, 42(10/11):2671-2677.

[15] BENNAMOUN L, ARLABOSSEP LEONARD AN-

GELIQUE. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge[J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2013(28):29-43.
[16] 许志欣,蓝梅,孙文叶.污泥热干化技术浅析[J].市政技术,2016,34(1):117-120.
[17] TAO T, PENG X F, LEE D J. Thermaldrying of wastewater sludge: change in drying area owing to volume shrinkage and crack development[J]. Drying technology, 2005, 23(3):669-682.
[18] PEETERS BART. Mechanicaldewatering and thermal drying of sludge in a single apparatus[J]. Drying technology, 2010, 28(4):454-459.
[19] 张立宏,刘凯,赵侣璇,等.桨叶式干燥机干化含油污泥工艺研究[J].工业安全与环保,2017,43(2):87-89.
[20] 周吉平.圆盘干化技术处理含油污泥的研究[J].建材与装饰,2017(14):213-214.
[21] DENG W Y, YAN J H, LI X D, et al. Measurement and simulation of the contact drying of sewage sludge in a Nara-type paddle dryer[J]. Chemical engineering science, 2009, 64(24):5117-5124.
[22] 时永前.天津石化污泥干化装置运行分析[J].石油化工安全环保技术,2014,30(4):45-47.
[23] 黄永锋.含油污泥脱水-干化技术研究与应用[J].化工管理,2017(2):192-194.
[24] 李颖,王占生,李春晓,等.蒸汽喷射油泥处理设备的节能优化分析[J].油气田环境保护,2014,24(4):31-34.
[25] 曹亚祥.超热蒸汽喷射型含油污泥处理装置[J].油气田地面工程,2012,31(11):63-65.
[26] TYAGI KUMARV LO. Microwave irradiation: a sustainable way for sludge treatment and resource recovery[J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2013(18):288-305.
[27] 薛红艳,张鑫,姜文涛,等.脱水污泥热干化和微波干化过程及机理比较分析[J].环境科技,2014,27(6):14-17.
[28] 王旭.微波处理炼油污泥的实验研究[D].西安:西安石油大学,2012:34.
[29] 刘晓娟.油气田污泥脱水干化处理新途径研究[J].环境保护,2004(12):29-31.
[30] YANG L, NAKHLA G BASSIA. Electro-kinetic dewatering of oily sludges[J]. Journal of hazardous materials, 2005, 125(1/2/3):130-140.
[31] 闫晓彤.污泥电渗透生物干化耦合高干脱水工艺研究[D].天津:天津大学,2017:71.
[32] 杨涛.城镇污水厂剩余污泥电渗透深度脱水性能的研究[D].武汉:武汉大学,2017:15.
[33] 张晓君,杨春雨.吉林石化污泥资源化处理技术通过验收[J].精细石油化工,2016,33(3):35.
[34] 张晓君,杨春雨.含油污泥资源化利用添新工艺[J].化工管理,2016(1):86.
[35] TUAN P A, SILLANPA A M. Effect of freeze/thaw conditions, polyelectrolyteaddition, and sludge loading on sludge electro-dewatering process[J]. Chemical engineering journal, 2010, 164(1):85-91.
[36] 崔建,鲁伟,吴费强,等.污泥的弱超声电渗透脱水技术的分析[J].中国资源综合利用,2018,36(3):48-50.
[37] AYOL A DURAKG. Fate and effects of fry-drying application on municipal dewatered sludge[J]. Drying technology, 2013, 31(3):350-358.
[38] OHM T I, CHAE J S, LIM K S, et al. The evaporative drying of sludge by immersion in hot oil: Effects of oil type and temperature[J]. Journal of gazardous materials, 2010, 178(1/2/3):483-488.
[39] 张珂,朱建华,周勇,等.含油污泥的废油置换脱水特性[J].化工学报,2013,64(9):3396-3403.
[40] 张珂,朱建华,周勇,等.含油污泥油炸脱水过程中热-质耦合传递分析[J].石油学报(石油加工),2014,30(2):298-304.

(收稿日期 2019-08-22)
(编辑 王 薇)

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告