



油田生产过程污染物源头协同治理的思考与建议：以聚驱采出水处理过程控制油泥产生为例

王庆吉^{1,2,3}, 杨雪莹^{2,3}, 李炯^{1,2}, 王庆宏¹, 桂雨飞^{1,2}, 裴茂辰^{1,2}, 史权¹, 陈春茂^{1,✉}

1. 中国石油大学(北京)化学工程与环境学院, 北京 102249; 2. 石油石化污染物控制与处理国家重点实验室, 北京 102206; 3. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司, 北京 102206

摘要 聚合物驱作为三次采油的重要技术之一, 已在多个油田规模化应用。但在该类采出水破乳、絮凝、分离过程中, 聚丙烯酰胺转移进入固相, 形成了稳定性高、处理难度大的含聚污泥, 给污水处理系统带来了严重的污染负荷, 同时也造成聚丙烯酰胺大量浪费。通过含聚污泥的产生机制, 归纳总结了现有采出水破乳分离工艺存在的问题, 指出了水固同治是“双碳”背景下含聚采出水绿色低碳处理及资源化的方向。

关键词 含聚污水; 含聚污泥; 破乳分离; 水固同治

随着石油开采注水开发方式的大面积推广实施, 国内采出水总量已接近 $20 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中含聚合物采出水占比不断升高, 历经多年发展, 其破乳分离技术已形成相对成熟的物理、化学及物理-化学耦合工艺^[1]。对于中高浓度聚合物造成的高乳化含油采出水的破乳、油水固分离等问题, 处理难度和代价仍然较大。一直以来, 以高能耗、高剂耗、高产泥为代价换取理想分离效果的技术思路, 导致了采出水处理工艺冗长、碳排放量高、运行成本高等一系列问题。例如, 高浓度聚驱污水, 在常规两级沉降的基础上, 改变了药剂体系配方、增设了曝气或气浮工艺、并逐渐由连续式向序批式转变, 使得系统有效停留时间延长、能耗上升、产泥量大幅增加。因此, 油田生产过程中污水污泥协同治理, 是“双碳”背景下高含水化学驱油田绿色低碳转型的重要方向之一。

1 含聚采出水的来源、特征和处理现状

聚合物驱作为三次采油的重要技术, 已在我国大庆油田、胜利油田、渤海油田等多个油田规模化应用^[2-4]。油田开发后期含油污水的产生量刚性增长, 随着聚合物驱油技术的广泛应用, 含聚合物采出水含量逐年增多, 仅大庆油田该类采出水总量已超过 $6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[5]。与常规采油污水不同, 聚驱采出水的成分要复杂得多, 聚合物的存在使采出水油滴粒径减小、表观黏度大、乳化程度加剧、稳定性强, 处理难度大幅增加。

采出水的破乳分离方法主要有物理、化学及物理-化学耦合方法。物理分离主要包含重力分离、离心分离^[6]、电破乳^[7]、超声破乳^[8]、微波破乳^[9]等, 可根据具体情况选择合适的方法或组合使用, 以提高石油回收率和采出水的净化效果。其中重力分离和离心分离对普通含油污水的分离效果较好且运行操作简单, 是目前应用最广泛的分离方式, 超声、微波破乳等技术尚不成熟, 因此工程应用较少。在实际工程应用中, 随着采出水中聚合物含量增加, 传统的重力沉降或离心旋流方式难以满足中高含聚体系油水分离需求, 因此常与化学破乳联合使用, 并以阳离子型反相破乳剂应用效果最好^[10-11]。

目前含聚采出水破乳分离仍然存在一些问题, 一方面, 物理分离效率的提升对设备本身要求较高, 部分

收稿日期: 2023-12-19; 录用日期: 2024-01-17

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1806201-01); 中国石油天然气股份有限公司基础前瞻性科技专项资助项目(2023ZZ1305)

第一作者: 王庆吉(1982—), 男, 博士, 正高级工程师, wangqingji@petrochina.com.cn; ✉通信作者: 陈春茂(1978—), 男, 博士, 研究员, c.chen@cup.edu.cn

物理强化分离措施的使用会受到操作条件、水质复杂性和环境温度等因素的限制,同时物理停留时间的延长也会受到处理规模、占地面积、建设投资等因素的约束^[12];另一方面,为达到生产需求得到理想的化学破乳效果,有时需要使用大量的化学药剂,尤其是随着聚驱采出水中聚合物含量升高,如果药剂添加量不合理或操作不当,不仅会造成药剂投加浪费严重,还会给处理工艺和系统带来较大的污染负荷。马尧等^[13]研究表明,采出水处理系统中净水剂对污泥增量的贡献率为10%~15%,助沉剂的贡献率则为30%~35%,山金城^[14]模拟了海上油田斜板絮凝除油工艺,采用有机阳离子型清水剂CPAM,对影响黏性含聚污泥产生量的主要因素权重进行了评估,结果表明不同因素对污泥产生量的影响程度排序为聚合物浓度>固悬物粒径>聚合物分子质量>固悬物浓度>原油含量,即聚合物浓度和固悬物浓度为黏性絮体生成量的主要因素。因此含聚污水处理过程聚合物的控制可从源头抑制含聚油泥的产生,在污水处理的同时实现固废减量。

2 含聚油泥的来源、特征和处理现状

2.1 含聚油泥的来源、总量和危害

含聚油泥的产生通常包含以下几部分:一是在石油开采过程中岩石砂泥会随着采出水带到地面;二是水中部分溶解性物质析出形成的(如除铁、除硫等);三是大量残余聚合物包裹原油进入泥相,成为废弃物的一部分,驱油剂含量越高,采出物混相加剧越严重,含聚油泥产泥量也会越多。与常规油田区块不同。在采用聚驱工艺的油田区块会产生大量含聚油泥^[15]。

这些油泥来自原油集输系统和采出水处理系统的管线清洗、储罐底泥、浮渣和油水过渡层等^[12],有调查研究表明,我国每年的含聚油泥产量高达 100×10^4 t以上^[16]。而且随着聚驱生产规模扩大和开发的持续深入,长期的注聚导致储层岩石结构被严重破坏,采出液中的携带的砂石含量和聚合物含量都有增长趋势,近年来,大庆、胜利、大港等国内较大规模的油田该问题都较为突出。水驱稀油处理系统中污泥产量仅占来液量的0.5%^[13],聚驱由于污泥含水率高,产泥量远超水驱,实际生产中污泥产量常超过来液量的5%^[17]。黄锐^[18]对某海上油田含聚油泥的产生过程分析,表明聚合物的吸附架桥作用增加了油水界面的厚度和强度,提高了整个体系的稳定性;同时聚合物的存在增强了水相的粘度,体系对悬浮物的吸附作用增强,增加了含聚油泥的产量。赵鹏等^[19]对渤海海上油田聚驱采出液沉降罐中的两组含油污泥样品进行分析,结果显示其含水率较高,分别为55.65%和54.07%,含油量为18.92%和19.26%,聚合物质量分数则高达24.16%和25.35%。聚合物驱采出液中聚合物的质量浓度通常在 $50\sim 200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但部分油田单井返排聚丙烯酰胺质量浓度高达 $800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,以某采油联合站日处理量 $43\ 000\text{ m}^3$ 来计算,无法被有效利用的聚合物干粉量达 $2\sim 8\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,不但造成聚合物的浪费,还会提高水和污泥的处理成本^[20]。

含聚油泥的危害不仅仅体现在量的增长,其成分的变化也使得油田集输系统和污泥处理系统都不堪重负,含聚油泥中的原油、驱油剂、金属离子及岩石颗粒等包裹缠绕并相互作用,聚合物与吸附在界面的胶质和沥青层的界面物质会生成高强度的界面膜,进而形成一种极其稳定的悬浮乳状液体系,对油气生产地面工艺各环节产生危害。在原油储罐中,由于聚合物的存在,清罐过程的难度往往增大,油水过渡层的驻留会影响电脱水器的正常运行^[21];在采出液输送过程中,聚合物的存在使得流动性变差,会导致管线堵塞,进而严重影响集输系统压力和能耗^[22];在污泥处理过程中,泥中聚合物含量的升高使得热水洗效能变差,热分解过程中,聚合物胶体有较为明显的挂壁现象,在加热过程中发生性质变化形成凝胶,当壁面温度进一步升高时出现焦化现象,形成牢固的焦化垢层,严重影响装置的热传递效率^[23]。刘晓瑜^[24]调查发现,某油田的含聚油泥中,油含量占比约45%~50%,黏性较大,成分复杂,乳化程度高,依靠物理法固相难以彻底分离,同时聚合物的残留又大大增加了后续的污泥资源化和无害化处理的难度。

2.2 含聚油泥的处理方法和难点

含聚油泥的复杂度及处理难度远远大于普通污泥。含聚油泥被划入危险废物管理范围,需由有资质的单位处理处置。常规油泥可以采用焚烧、浓缩干化填埋、污泥调剖等方法来进行处理,而聚合物的存在导致含聚油泥的处理难度和危害远高于常规油泥。常规的调质-机械分离技术通常作为油泥处理的预处理手段^[25],对含油量低、聚合物浓度高的污泥效果不佳,路平等^[26]在试验期间开始时含水率可达到70%左右,但在运行一段时间后由于含聚油泥性能的变化以及药剂的适应性问题,脱水效果有所下降;热解^[27]与延迟焦化^[28]等

热处理技术是含聚污泥处理的有效手段，但高温下聚合物成分的存在会使油泥遇热膨胀形成胶状物质黏结在加热装备内壁，导致处理量和处理效率下降。余胜军等^[29]对河南油田污泥热分解工艺的调查中发现，含聚油泥经脱油脱水、晾晒处理后，含水量仍高达60%~70%，在长期的热分解过程中易产生炉膛结焦、省煤器及烟道堵塞等现象，增加装置的维护成本。生物法^[30]对环境友好，李彦超等^[31]采用溶剂萃取-微生物堆腐处理胜利油田含油污泥，处理后含油污泥的含油率小于0.3%，原油回收利用率最高可达92%。但适用范围窄，停留时间长，聚合物的存在会增加微生物的降解时间从而大幅降低处理效率^[32]。

因此，含聚油泥末端集中处理仍需开发新技术抵消聚合物的负面影响，更为重要的是，尽量减少含油污泥的产生量或者降低污泥中的聚合物含量，从源头对含聚污水和含聚油泥进行协同控制，从而大幅减少聚驱生产的地面建设产污量和治污能耗。

3 含聚污水污泥协同治理新路径和新方法

以提高污水处理效率、降低产泥量和减少清水配聚药剂浪费为目标，开发破乳分离新方法，优化含聚污水处理和回配工艺，充分利用污水中残留的聚合物资源，降低新鲜聚合物药剂的使用量，源头上减少污泥的产生，从而实现聚驱地面污水污泥的协同治理与资源化。

3.1 含聚油泥的源头抑制路径

聚合物驱采出水中聚丙烯酰胺与阳离子絮凝剂的静电和桥联吸附作用是含聚污泥产生的主要原因之一，高分子聚丙烯酰胺与阳离子型絮凝剂通过静电作用生成多孔三维网络结构，包裹、挟带聚集的油水混合物混凝而出，在未破乳时即将乳化油滴与聚合物等聚结，其本质并非使乳化滴油破乳，而是在未破乳时即将乳化油滴与聚合物等聚结，从而形成泥相^[33-34]。采出水中残余聚合物浓度越高、分子质量越大，破乳过程中黏性絮体生成量越多。因此，避免或削弱聚合物的静电和桥联吸附作用，有望在水处理的同时抑制含聚油泥生成，是实现“水固同治”的重要路径之一。

3.2 聚合物水相保留药剂开发

不同于水中的乳化液滴，水溶性聚合物是亲液胶体，为热力学稳定体系，聚合物与水之间无相界面。若能采用非荷电的化学药剂对乳状液进行高效破乳，并辅助物理分离方法，则有望实现原油与含残留聚合物污水的分离，不仅能够避免油泥的产生，回收了污水中的原油，而且保留聚合物的污水可资源化利用，代替清水配制驱油剂溶液回注地层驱油。因此，研发新型高效的破乳分离药剂，采出液和采出水处理的同时将聚合物保留在污水中，而不是将其与乳状液油一起絮凝去除进入固相，是抑制油泥生成和源头减量的重要方法和手段。

一直以来，破乳药剂的研发始终脱离不开“改头、换尾、加骨、扩链、接枝、交联、复配”等常规方法^[35]，药剂分子结构与乳液稳定性构效关系尚无深入研究。非离子药剂的设计开发缺乏明确的指向性，导向破乳功能较弱。如图1所示，高支化聚合物具备刚性空间结构，能通过控制树枝单元的结构、代数、聚合物主链之间的距离调节空间位阻，控制分子构型和理化性质，其分子末端可嫁接大量活性官能团，具有高度界面置换能力，从而实现更强的破乳效果，同时，其规整的结构有利于构效关系的深入探索和新型药剂进一步开发。

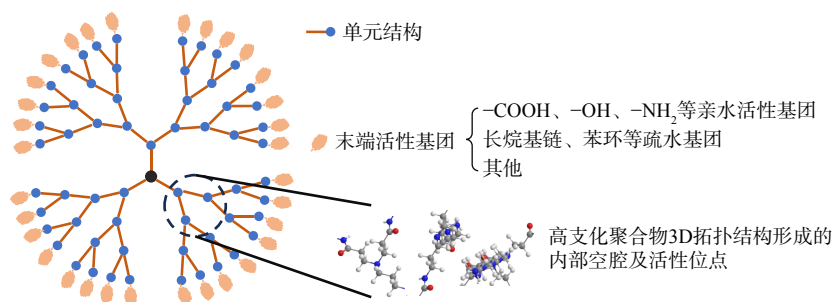


图1 高支化聚合物

Fig. 1 Highly branched polymers

借助分子模拟手段,可以精确设计并优化清洁型高效油水分离药剂的分子结构,通过调整分子的大小、形状和两亲基团,使其更有效地分离含聚体系中的油和水,例如在聚酰胺-胺结构上接枝聚醚,对聚驱原油乳液脱水率可达93%^[36];另外,借助流体模拟手段,开发具有高效分离性能和稳定性的设备,协同非离子药剂作用,实现药剂投加优化智能投加和性能提升,例如混凝气浮一体化装置能结合药剂的反应特性和分离时长,分级分段设计不同结构流态,对于破乳后乳化油滴和细小悬浮固体的捕捉和去除能力,都大大增强^[37]。

3.3 污水中聚合物循环利用

聚合物驱采对清水及药剂消耗量极为可观,仅大庆油田每年注水量超过 $8\times 10^8\text{ m}^3$,聚驱采出水量超 $6\times 10^8\text{ m}^3$,每年聚合物干粉使用量超过 $34\times 10^4\text{ t}$ ^[5]。随着注采规模扩大,对水资源的需求不容小觑,大庆油田多年前便采取了以采出水处理后稀释驱替液用于回注的策略,取得了一些宏观认知,例如含聚污水中残余聚合物的牺牲作用可以增加污水配聚的溶液黏度,减少新配聚合物的干粉使用量等,但仍存在若干问题,此方法对水质净化和水质稳定技术要求高,如水质没有完全达到稀释聚合物溶液的标准,则黏度损失较大且稳定性较差,影响聚合物驱的效果和效益。

借鉴采油工程中小分子表面活性剂牺牲效应保护深层注采的思路,采出水中的聚合物保留在水相中回用配聚,同样可以借助牺牲剂效应来降低采出水中降黏因素的影响,提高驱替液稳定性。金属离子对聚合物溶液黏度的影响方面上,许多科研工作者已经做出了大量的工作,关淑霞等^[38]通过实验测定不同种类盐对HPAM黏度的影响,表明 Fe^{2+} 对HPAM溶液黏度的影响最大,二价阳离子(Mg^{2+} 、 Ca^{2+})的降黏效果要强于一价阳离子(Na^+ 、 K^+)。但对于部分疏水缔合聚合物而言,一价和二价离子对聚合物的增黏行为未表现出明显差异性的影响^[39]。另外,微生物也会影响HPAM的降解,黄峰等^[40]的实验证明当在取样污水中培养硫酸盐还原菌达到 3.6×10^4 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$,在恒定温度、30℃、7d的培养条件时,在 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的HPAM溶液中,溶液的黏度损失率可达19.6%。因此要实现聚合物资源高效利用,需要根据所用驱油剂,针对性设计回配水处理工艺,适度去除或屏蔽较强的黏损影响因素,最大程度提高配聚回注水的保黏率,降低配聚成本,例如在含聚污水回注之前,通过金属离子屏蔽剂技术控制一、二价阳离子^[41],提高污水的再配聚性能。

4 结论

基于新型药剂的研发,借助物理强化分离设备,辅以地面工艺的耦合优化,进行含聚污水和污泥的源头协同治理,实现聚驱采出水的清洁循环和资源高效回用,是解决一直以来困扰聚驱地面产污难题的可行路径,其攻关应用前景广阔。目前,提高化石能源的清洁属性已经成为石油石化行业面临的转型难题,能源保供安全与“碳中和、碳达峰”的多种约束下,多污染物源头协同治理、碳污协同控制等技术的需求已迫在眉睫,这些技术与先进驱采技术的同步实施,不仅能确保油田稳产上产和降本增效开发,同时也符合国家减污降碳协同增效的低碳环保理念方针,其意义十分重大。

参考文献

- [1] 陈鹏,陈忠喜,白春云.大庆油田采出水处理工艺技术现状及其认识[J].*油气田地面工程*,2018,37(7):19-24.
- [2] FIROZJAI A M, SAGHAFI H R. Review on chemical enhanced oil recovery using polymer flooding: Fundamentals, experimental and numerical simulation[J].*Petroleum*,2020,6(2):115-122.
- [3] SUI X, CHEN Z, KURNIA I, et al. Alkaline-surfactant-polymer flooding of active oil under reservoir conditions[J].*Fuel*,2020,262:116647.
- [4] 陈明贵,陈登亚,梁洁,等.水溶性两亲聚合物稠油乳化剂的制备及驱油效率[J].*油田化学*,2019,36(2):306-313.
- [5] 杨清民.特高含水开发阶段水系统面临的挑战及技术对策[J].*油气田地面工程*,2020,39(9):39-43.
- [6] 梁金强,骆伟,李倩,等.离心脱水技术在老化油处理中的应用[J].*给水排水*,2014,50(S1):261-263.
- [7] 任博平.双向脉冲电场中水包油乳液的破乳研究[D].天津:天津大学,2019.
- [8] 于惠娟,刘海丽,刘东杰,等.采出液超声破乳技术应用研究[J].*油气田地面工程*,2022,41(10):12-15.
- [9] 肖恩楠.聚合物驱采出水微波破乳的离子液体促进效应研究[D].西安:西安石油大学,2021.
- [10] 葛阳,魏立新,晁萌,等.原油破乳剂研究进展与发展趋势[J].*化学工程师*,2022,36(06):68-72.
- [11] 丁彬,梁金禄,刘玉章,等.稠油化学破乳技术研究进展[J].*化工进展*,2010,29(S2):128-134.
- [12] 徐文江,戴照辉,温哲华,等.海上典型注聚油田产出液处理问题及措施研究[J].*工业水处理*,2016,36(8):93-96.
- [13] 马尧,严忠,杨媛,等.油田站场含油污泥产生量的规律性实验研究[J].*油气田地面工程*,2020,39(1):31-35.
- [14] 山金城.含聚采出水处理生成黏性絮体的影响因素及机理[J].*工业水处理*,2019,39(11):5.
- [15] 王琦.油田含聚油泥稳定机理研究[D].青岛:中国石油大学,2012.
- [16] 方健,滕大勇,齐远,等.油田含聚油泥性质及处理技术研究进展[J].*当代化工*,2019,48(08):1787-1790.

- [17] 郭俊杰. 海上平台含聚污水处理工艺思考与应用[J]. 化工管理, 2022(04): 50-52.
- [18] 黄锐. 化学驱海上油田水处理流程含聚油泥产生原因分析及预防措施[J]. 广东化工, 2021, 48(6): 3-5.
- [19] 赵鹏, 陈斌, 王成胜, 等. 海上注聚油田含油污泥组成及结构特性分析[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2018, 20(2): 4.
- [20] 方洪波. 采油污水中保留聚合物对污水配制聚合物溶液黏度的影响[J]. 油田化学, 2021, 38(01): 173-178.
- [21] 尹旭明, 梁建斌, 侯辰光, 等. 渤海 A 平台分离器清罐作业提效[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(21): 24-25.
- [22] 冯英明, 魏利, 李卓, 等. 油田含油污泥热解技术及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022: 328.
- [23] 杨敬彪. m 油田含聚介质加热炉结垢原因分析及技术进展[J]. 科技与企业, 2012(15): 198-199.
- [24] 刘晓瑜, 王文斌, 尹先清, 等. 含聚油泥处理技术及研究进展[J]. 中外能源, 2013, 18(9): 86-91.
- [25] 余兰兰, 王丹, 吉文博. 调质-机械分离技术处理油田含油污泥[J]. 化工机械, 2011, 38(4): 413-416.
- [26] 路平, 曲兆光, 刘春雨, 等. 某终端沉降罐改造及污泥干化技术应用[J]. 中国石油和化工, 2016(S1): 314+306.
- [27] 李建柱, 李晓鸥, 封瑞江, 等. 油泥及其处理工艺发展现状[J]. 炼油技术与工程, 2009, 39(12): 1-4.
- [28] 李新春. 延迟焦化装置处理含油污泥的技术研究分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(3): 158-160.
- [29] 余胜军, 吕永恒. 河南油田含油、含聚合物污泥无害化处理的应用研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(2): 75-78+7.
- [30] JOHNSON O A, AFFAM A C. Petroleum sludge treatment and disposal: A review[J]. Environmental Engineering Research, 2019, 24(2): 191-201.
- [31] 李彦超, 李爱芬, 陈勇, 等. 含油污泥无害资源化处理技术研究[J]. 油气田环境保护, 2008(2): 25-28.
- [32] 张滨. 含油污泥物化—生物联合处理技术研究[J]. 化学工程与装备, 2009(11): 180-182.
- [33] 郭俊杰. 海上平台含聚污水处理工艺思考与应用[J]. 化工管理, 2022(4): 50-52.
- [34] 张顺, 赵德明, 迟军科, 等. 季铵盐改性的超支化聚酰胺胺的合成及其破乳效果[J]. 山东化工, 2021, 50(5): 1-4.
- [35] 胡渤, 王芳, 高宝玉, 等. 油田配聚污水水质对聚合物溶液黏度的影响及其机理[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(1): 80-85.
- [36] 周继柱, 张巍, 檀国荣, 等. 聚酰胺-胺星形聚醚原油破乳剂的合成与性能[J]. 精细石油化工, 2008, 25(5): 5-9.
- [37] 王庆吉, 胡景泽, 孙秀梅等. 石油石化含油废水混凝气浮处理系统研究进展[J]. 工业水处理, 2024, 44(3): 45-56.
- [38] 关淑霞, 范洪富, 朱建喜, 等. 聚丙烯酰胺黏度稳定性的测定[J]. 大庆石油学院学报, 2007(2): 113-114+121+131-132.
- [39] 王丽莉, 梁严, 李文宏, 等. 离子组成对低分子量聚合物抗盐行为的影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 174-184.
- [40] 黄峰, 范汉香, 董泽华, 等. 硫酸盐还原菌对水解聚丙烯酰胺的生物降解性研究[J]. 石油炼制与化工, 1999(1): 35-38.
- [41] 宋华, 宋莹莹, 陈彦广, 等. 金属离子屏蔽剂对 HPAM 溶液的增黏作用[J]. 油田化学, 2013, 30(4): 548-552+556.

(责任编辑: 金曙光)

Thoughts and suggestions on collaborative treatment of pollutant sources in oilfield production processes: An example taking the inhibition of oil mud formation in the treatment process of polymer flooding produced water

WANG Qingji^{1,2,3}, YANG Xueying^{2,3}, LI Jiong^{1,2}, WANG Qinghong¹, GUI Yufei^{1,2}, PEI Maochen^{1,2}, SHI Quan¹, CHEN Chunmao^{1,*}

1. China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Pollution Control, Beijing 102249, China; 3. CNPC Research Institute of Safety and Environmental Technology, Beijing 102249, China

*Corresponding author, E-mail: c.chen@cup.edu.cn

Abstract As one of the important technologies for tertiary oil recovery, polymer flooding technology has been applied on a large scale in many oil fields. This type of produced water undergoes demulsification, flocculation, and separation processes, causing polyacrylamide to settle into the solid phase. The resulting polymer-containing sludge has high stability and is difficult to handle. This not only brings a serious pollution load to the sewage treatment system, but also causes a large amount of waste of polyacrylamide. This paper summarized the existing problems in the current produced water emulsification and separation process through the generation mechanism of polymer-containing sludge. It was pointed out that “water-solid co-management” was the research direction for green, low-carbon treatment and resource utilization of polymer-containing produced water under the “dual-carbon” background.

Keywords polymer-containing wastewater; polymer-containing sludge; emulsification separation; water-solid co-management