

清防蜡技术的研究及应用

杨红静¹, 杨树章¹, 马廷丽^{1,2}, 高立国¹

(1.大连理工大学 精细化工国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2.九州工业大学 生命体工学研究科, 北九州 808-0196, 福岡, 日本)

摘要: 介绍了国内外清防蜡工艺的研究进展, 总结了结蜡机理及结蜡影响因素, 并对比分析了已被各油田广泛使用的四种防蜡技术(机械清蜡、表面能防蜡、化学清防蜡和微生物清防蜡)的防蜡机理、特点、适用性及现场应用效果, 以便能为各油田在生产实践中, 有针对性地选择合适的清防蜡技术提供理论依据, 为清防蜡技术的未来发展奠定一定的基础。提出改进现有技术和开发高效、稳定、多功能的清防蜡剂是清防蜡技术的未来发展方向。

关键词: 结蜡机理; 结蜡影响因素; 清防蜡技术; 机械清蜡; 表面能防蜡; 化学清防蜡; 微生物清防蜡

中图分类号: TE358⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)03-0130-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.03.020

Study and Application of Paraffin Removal and Prevention Technologies

YANG Hong-jing¹, YANG Shu-zhang¹, MA Ting-li^{1,2}, GAO Li-guo¹

(1.State Key Laboratory of Fine Chemicals, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2.Kyushu Institute of Technology Graduate School of Life Science and Systems Engineering, Kitakyushu 808-0196, Fukuoka, Japan)

ABSTRACT: Recent research progress regarding paraffin removal and prevention technology was introduced. Paraffin deposition mechanisms and corresponding influencing factors were summarized. Four prevention technologies as well as their paraffin prevention mechanisms, characteristics, applicability and field test effects were analyzed in comparison, which could serve as theoretical basis of selecting proper paraffin prevention technologies and foundation of further development of the technologies in production practices in various oilfields. Finally, it is proposed that future development of certain technologies should focus on optimization of existing technologies and development of efficient, stable and multifunctional projects.

KEY WORDS: paraffin deposition mechanism; influencing factors of paraffin deposition; paraffin control technology; mechanical paraffin removal technology; surface energy paraffin prevention technology; chemical paraffin removal technology; microbial paraffin removal

我国 90%的原油是蜡质原油, 大部分含蜡量大于 20%, 有的甚至高达 40%, 由于蜡在原油中的溶解度

随温度的升高而升高, 因此, 油田开采之前, 蜡能完全溶解在高温、高压的原油中, 而在开采和运输过程

收稿日期: 2016-09-28; 修订日期: 2016-10-20

Received: 2016-09-28; Revised: 2016-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51402036, 51273032)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51402036, 51273032)

作者简介: 杨红静 (1990—), 女, 硕士, 主要研究方向为表面微结构的性质与应用。

Biography: YANG Hong-jing (1990—), Female, Master, Research focus: properties and application of surface microstructure.

通讯作者: 高立国 (1982—), 男, 博士, 主要研究方向为光催化及表面结构。

Corresponding author: GAO Li-guo (1982—), Male, Doctor, Research focus: photocatalysis and surface microstructure.

中,蜡在低温、低压原油中的溶解度下降。当温度降至析蜡点(WAT, Wax Appearance Temperature, 蜡晶开始析出的温度)以下时,就会破坏蜡在原油中的溶解平衡,致使蜡结晶析出,并沉积在抽油杆、油管壁、抽油泵及其他采油设备上。原油结蜡会增加原油的黏度,减小油流动面积,增加流动阻力,进而增加输油能耗,降低产量,甚至堵塞管路,导致停产^[1-3]。结蜡问题普遍存在于油田的生产和运输过程中,给油田的生产造成巨大的经济损失。文中综述了目前国内常用的四种清防蜡技术,重点分析和对比了每种清防蜡技术的防蜡机理、优缺点及适用性,以便能为各油田在生产实践中,有针对性地选择合适的清防蜡技术提供理论依据。

1 蜡的成分及结蜡机理

原油中的蜡沉积物主要由蜡组成,还含有少量胶质、沥青质、泥砂等。生产过程中的蜡分为石蜡和微晶蜡两种,其中石蜡的主要成分是正构烷烃(C_{18} ~ C_{35}),晶体形状为板状、带状或鳞片状,相对分子质量为350~500,密度为880~905 kg/m³,熔点50℃左右。微晶蜡以异构烷烃 C_{30} ~ C_{60} 为主要成分^[4],结晶为针状,相对分子质量为500~800,熔点为60~90℃。从晶型来看,石蜡的蜡晶之间能够聚集形成大晶块蜡,是导致油井堵塞、影响油井产量的主要原因^[5-8]。

解决结蜡问题的关键是明确结蜡机理,因此国内外很多研究人员做了这方面的研究^[9-12]。目前研究的结蜡机理包括分子扩散、剪切分散、布朗扩散3种^[13-14]。其中,分子扩散是研究最为广泛的机理:当管壁温度低于原油析蜡点时,管线径向存在温度梯度,靠近管壁处的蜡晶温度较低,优先析出。由于蜡的溶解度随温度的降低而降低,并且管壁处石蜡的析出会造成该处原油中溶解的蜡分子浓度的降低,于是在管中心和管壁间形成浓度梯度,油流中的蜡分子在浓度梯度的影响下,从管中心向管壁扩散,为管壁上的继续结蜡创造条件^[15-16]。根据这个机理,只要管壁处温度低于原油析蜡点便会有蜡析出。

2 结蜡影响因素

结蜡影响因素的研究对制定清防蜡措施具有重要的指导意义。通过观察结蜡过程发现,影响原油结蜡的因素主要有原油的组成、原油中水和杂质的含量、油井开采条件(温度、压力)、管壁的光滑程度及表面性质^[17-19]。

2.1 原油的组成

原油组成对结蜡现象具有非常重要的影响,原油中还含有不同程度的胶质、沥青质,它们的存在也会影响石蜡结晶。胶质为表面活性物质,可吸附在蜡晶上,从而阻止结晶的生长。沥青质是由胶质的进一步聚合生成的,能使得石蜡很好地分散在其中。因此,胶质、沥青质可缓解结蜡^[20]。

2.2 原油中的水和机械杂质^[21]

含水量的增加会使结蜡问题有所减轻,原因有两个:一是水的比热容大,使得含水量增加后可减少油流温度的降低速率;二是提高含水量使得管壁上形成一层不利于石蜡沉积的水膜,削弱了石蜡在管壁析出的亲和力。原油中的机械杂质(泥、砂和铁屑)会成为石蜡结晶的核心,促使蜡晶析出,加剧结蜡。

2.3 油井的开采条件

温度越低,析蜡越多,原因是蜡在油中的溶解度随温度的降低而降低。压力低于原油饱和压力时,溶解气析出。气体析出不但降低了原油中轻组分的含量,且气体膨胀使原油损失一部分热量,温度降低,也会促进结蜡^[22]。

2.4 流速和管壁特性

室内实验证明,流速与结蜡量呈正态分布,如图1所示^[23-24]。起始时,结蜡量随着流速增大而增加,单位时间内通过的蜡量也增加,故结蜡强度增强。当速度超过临界速度后,随流速的增大,结蜡强度反而减弱,结蜡速率降低。原因是随着流速增大,油流对管壁的冲刷作用增强,导致结蜡层变薄,达到缓解结蜡的目的。

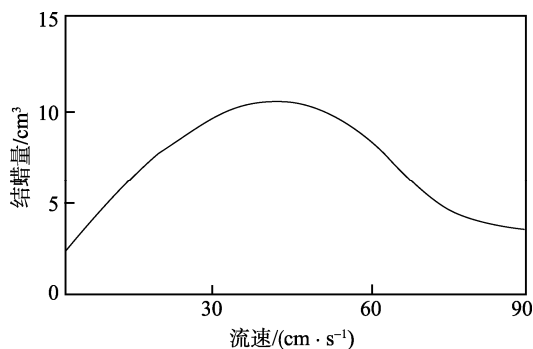


图1 石蜡沉积与流速的关系^[23]

Fig.1 The relationship between paraffin deposition and flow velocity

3 油井防蜡措施

为了解决结蜡问题,清除结蜡对生产的影响,国

内外学者做了大量的研究工作。目前国内外应用最普遍的清防蜡技术包括机械清蜡、表面能防蜡、化学清防蜡和微生物清防蜡技术等。文中对各种清防蜡技术的防蜡机理、特点及现场应用进行了总结。

3.1 机械清蜡

3.1.1 机理

机械清蜡的机理是用专门的工具刮除管壁和抽油杆上的蜡,并靠液流将蜡带至地面的清蜡方法。它是一种既简单又直观的清蜡方法,广泛应用于自喷井和抽油井中^[24-27]。

自喷井刮蜡装置如图 2 所示^[28],原理是刮蜡片利用铅锤的重力作用向下运动,再通过绞车拉动钢绳向上运动,如此反复上下运动即可刮蜡,并利用液流将刮下的蜡带至地面,达到机械清蜡的目的。有杆抽油井的机械清蜡是将刮蜡器安装在抽油杆上,达到清蜡的目的^[29]。

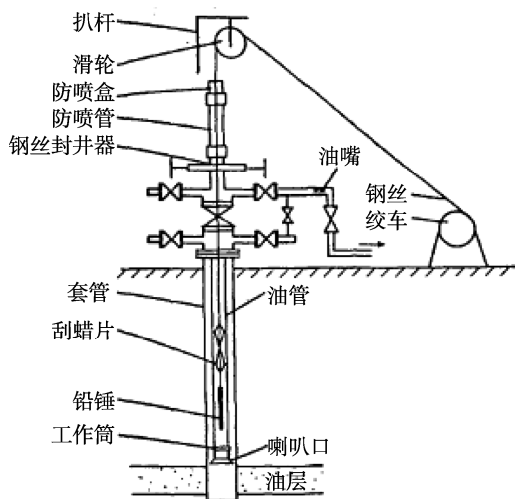


图 2 自喷井刮蜡片清蜡装置^[28]

Fig.2 Wax cleaning device of flowing well

3.1.2 特点及应用

机械清蜡是一种比较经济合理的清蜡方式,适用于含蜡量高、清蜡周期短的油井^[30]。它因简单易行、成本较低的优点成为早期最常用的清蜡技术。长庆油田第二采油厂使用了 JL-02 型油井自动清蜡器,取得了明显的清蜡效果^[31]。2000 年,鲁红光等^[32]为寻求一种简单有效的抽油井清蜡技术,利用 62JL-04 型抽油井机械式自动清蜡器^[22](如图 3 所示)进行现场试验。结果表明,机械清蜡避免了加药、热洗等生产维护性措施,大大降低了成本,操作简单,管理方便,具有一定的经济和社会效益。机械清蜡的缺点是清除的积蜡易落入井底造成堵塞,对设备的磨损严重,会

因机械问题或不正当的优化导致清管无效^[33]。现已大部分被热油洗井或化学方法取代^[34]。

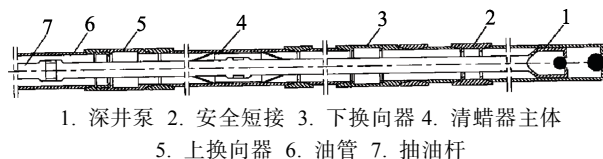


图 3 机械式自动清蜡器安装

Fig.3 Installation scheme of automatic wax cleaner

3.2 表面能防蜡

3.2.1 机理

表面能防蜡技术包括油管内衬防蜡和涂层防蜡,它的防蜡机理是通过改善表面的润湿性和提高管壁的光滑度,使得石蜡很难沉积在管壁表面^[35-37]。

3.2.2 玻璃内衬油管

玻璃内衬油管的防蜡机理是在油井和管壁衬上一层由不同氧化物烧结组成的玻璃衬里^[38],这种衬里不仅可以提高表面光滑度,还可以提高表面的亲水(憎油)性,不利于石蜡的沉积,起到防蜡作用。同时这种玻璃内衬是热的不良导体,减少了油流的热损失,可缓解蜡晶析出^[39]。玻璃内衬油管具有使用寿命长,减少更换管柱的费用,耐腐蚀的优点。这种方法的缺点是不耐冲击,运输条件苛刻,只适宜在自喷井和气举井上使用^[35,38-39]。

1993 年,曾佳才等^[39]为解决鄯善油田井筒及地面管线结蜡问题,引进了内衬油管防蜡技术,并对其进行了现场应用。结果显示,玻璃内衬油管在自喷井中防蜡效果很好,不仅延长了热洗周期,而且取得了可观的经济效益,充分说明了内衬油管在低密度、低凝固点、低粘度的鄯善油田及其他油田推广具有广阔的应用前景。2009 年,谢飞、吴明等^[38]针对高含水率油田,通过对玻璃内衬管道与普通管道的性能对比分析及实例计算发现,玻璃内衬管道在低温集油中可以降低能耗,减少阻力损失,提高经济效益(见表 1)。

表 1 各方案费用年值计算^[38]

Tab.1 The annual cost calculation sheet of each scheme

方案类型	建设投资费用 年值/万元	年运行费 用/万元	费用年值/ 万元
普通管环装流程	3.90	2.08	5.98
玻璃内衬管环状流程	4.20	0.31	4.51

3.2.3 涂料油管

涂料油管的防蜡机理与玻璃内衬油管相似,是在井筒和管壁涂一层表面光滑且亲水性强的物质,以提高表面光滑度和亲水性^[35]。兰州化学物理研究所的张学俊等为解决因蜡沉积问题造成的巨大经济损失,从改变管道表面润湿性考虑,在管壁涂一层疏油涂层,

使得表面具有疏油性,可使得蜡沉积物与管壁之间的粘附力减小,更易脱落,实现防蜡^[40],并在实验室评价了硅、氟树脂以及丙烯酸树脂等涂层在各大油田的防蜡效果(见表 2)^[40]。由表 2 可见,所用树脂涂层均具有一定的防蜡效果,其中硅树脂的最大防蜡率可达 74.7%。另外,聚氨酯涂层防蜡技术也已在沈阳油田不同区块结蜡油井进行了试用和推广,防蜡效果非常明显^[41]。

表 2 树脂涂层的防蜡效果
Tab.2 The anti-wax effect of resin coating

结蜡板 涂覆材料	$P_R/\%$		
	青海原油	胜利原油	辽河原油
硅 2	74.7	68.1	71.3
氟 2	68.4	54.4	66.1
氟 1	65.8	51.5	64.7
丙烯酸树脂	65.8	49.2	60.1
醇酸树脂	21.1	31.7	34.1

为解决结蜡问题,2013 年,李卫平等^[2]采用转化涂层防蜡与热处理相结合的方法在碳钢上制得一层具有良好防蜡性能的花瓣状微结构转化涂层,如图 4 所示。分别对普通碳钢、热处理的碳钢、有经热处理的转化涂层碳钢表面进行蜡沉积测试,防蜡效果如图 5 所示。由图 5 可见,经热处理的转化涂层碳钢表面蜡沉积量很少,表现出良好的防蜡性能。涂料油管不耐磨,同样仅适用于自喷井和连续气举井防蜡^[29]。

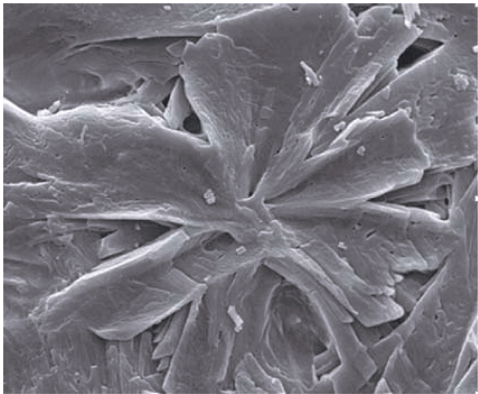


图 4 转化涂层的扫描电镜图片
Fig.4 SEM images of conversion coating

3.3 化学清防蜡

3.3.1 机理

化学清防蜡是指利用化学药剂对油井进行清防蜡,是目前应用较为广泛的一种防蜡方法。化学清防蜡剂根据其作用机理通常分为三种:能溶解石蜡的芳香烃溶剂;能抑制或改变蜡晶生长的聚合物蜡晶改性剂;能抑制颗粒聚集,使蜡晶处于分散状态的蜡晶分

散剂^[17]。

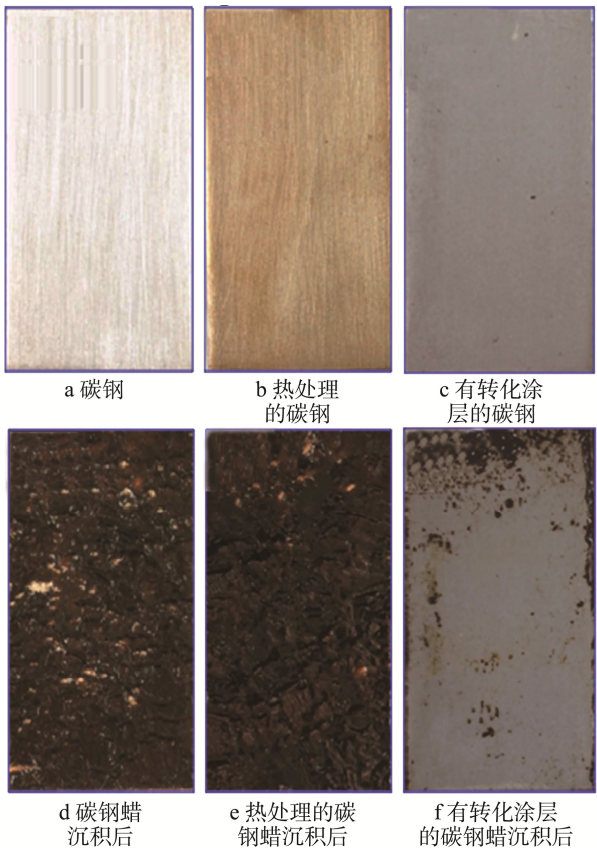


图 5 样品照片
Fig.5 Photographs of specimens

3.3.2 特点及应用

化学防蜡的优点是除了清防蜡效果好,同时一些清防蜡剂还具有降凝、降粘甚至解堵的作用^[42-44],综合性能优良,因而在辽河油田、长庆油田、胜利油田等油田广泛应用。目前研制和开发的清防蜡剂产品性能单一、选择性强^[20,38]。2001 年,刘扬^[32]针对热洗清蜡易压井、能耗大的问题,提出应用化学防蜡代替热洗清蜡,现场应用效果显示,化学防蜡实现了油井连续性生产,提高了油井的有效生产时率,获得了显著的经济效益。2007 年,张煜^[45]研制了 YS-3 清防蜡剂,并对其进行了性能测定,结果见表 3、表 4。

表 3 防蜡率测定结果^[45]
Tab.3 Result of the of anti wax rate

清防蜡剂	结蜡量/g	防蜡率/%
空白	2.45	
CX-3	1.68	31.4
PR-PI-C3	1.76	27.2
YS-3	1.01	58.8
YS-5A	1.82	25.7

表 4 降凝幅度和降粘率测定数据 (加剂量 100 mg/L)

Tab.4 Data of pour point reduction rate and viscosity reduction rate

清防蜡剂	结蜡量/g	降凝幅度/℃	原油粘度/(mPa·s)	降粘率/%
空白	23		98.386	
YS-3	18	5	79.024	19.7
CX-3	21	2	93.696	4.8

3.4 微生物清防蜡

3.4.1 机理

微生物清防蜡技术的机理主要表现在三个方面^[46-49]

1) 细菌对石蜡的降解作用。微生物能以石蜡为食物,使石蜡降解为轻质组分,从而降低原油的析蜡点,使蜡不易析出。

2) 细菌体及其代谢产物的表面效应。生物新陈代谢所产生的多种具有生物表面活性特征的物质能与蜡晶发生作用,参与蜡晶形成,改变蜡晶形态,阻止蜡晶进一步生长。同时有机酸、乙醇等代谢产物可提高蜡的溶解能力。

3) 细菌对石蜡的分散乳化作用,菌液能阻止石蜡的聚集。

3.4.2 特点及应用

微生物清防蜡技术因其独特的优点,如施工简单、操作费用低、作用周期长、环保无污染等^[50],已

被广泛应用于美国、加拿大等国家,在国内也应用于河南、胜利、辽河、新疆、大港等油田。由于微生物的生长对原油物性的各种适应性指标要求不高,因此微生物防蜡技术的适用范围比较广泛(见表 5)^[51]。局限是微生物在温度较高、重金属离子含量较高、盐度较大的油藏条件下易遭到破坏,而且培养微生物的条件不易控制^[37]。

表 5 常见微生物防蜡技术的应用范围^[51]

Tab.5 Application range of the microbial wax prevention technology

条件项	可适应范围	最佳条件范围
井筒温度/℃	<90	<65
井筒压力/MPa	<50	<20
矿化度/(mg·L ⁻¹)	<150 000	<100 000
含蜡量/%	>3	>3
地面原油粘度/(mPa·s)	<5 000	100~3 000
油井含水/%	5~80	10~50

针对原油物性及沉积蜡块样品特性,对微生物进行室内评价,可以为现场试验提供理论依据。2005 年,吴慧敏等^[52]采用 AD-4 微生物防蜡剂应用于河南油田,结果表明,这种微生物防蜡剂不仅能够降低开采电流、减轻油井负荷,还能延长检泵周期,具有很好的防蜡效果,见表 6^[46]。2006 年,王静等^[53]也筛选出 N5 和 BS-6 细菌,并将其应用于高蜡井,取得了良好的现场防蜡效果。

表 6 加微生物防蜡剂前后参数对比

Tab.6 Comparison of parameters pre-adding and post-adding microbial anti-wax agent

井号	加前负荷/kN		加后负荷/kN		加前电流/A		加后电流/A		检泵周期/d	
	最大	最小	最大	最小	上	下	上	下	加前	加后
B162	60.48	20.53	59.20	19.34	39	42	35	38	343	718
T234	66.04	40.16	63.63	41.80	85	74	58	50	343	340
T219	72.74	20.97	66.49	15.77	24	26	15	15	128	426
安 2036	68.58	41.80	68.43	47.01	22	17	20	21	57	102
安 2105	70.66	30.20	69.91	35.11	23	18	26	25	77	185

4 结语

我国大部分原油含蜡量高,结蜡问题给原油生产和运输带来许多困难,因此,油井的清防蜡一直是亟待解决的问题。文中根据油井结蜡机理、影响因素,总结了目前国内外广泛使用的四种清防蜡技术的防蜡机理、特点及现场应用效果,每种清防蜡技术均有其各自的优点和适应性。

机械清蜡:简单易行、成本较低,适用于含蜡量高、清蜡周期短的油井。

2) 表面能防蜡:使用寿命长,耐腐蚀,适宜在

自喷井和气举井上使用。

3) 化学防蜡:清防蜡效果优异,同时具有降凝、降粘等作用。适用于水的质量分数低于 50%、蜡的质量分数低于 30%、蜡的分布为 C₁₃~C₄₀ 之间的油井。

4) 微生物防蜡:施工简单、操作费用低、作用周期长、环保无污染,适用于各种含蜡油井,应用范围比较广泛。

以上各种清防蜡技术广泛应用于各大油田,但均存在各自的问题。为克服现有清防蜡工艺存在的不足,对于不同的油田,由于原油物性、开采条件、结蜡程度的不同,应根据实际情况,对比各种技术的优

缺点和适应性, 有针对性地提出具体的清防蜡工艺技术, 以便能更准确地指导生产工作。

未来的清防蜡方向: 优化现有的清防蜡技术, 对现有的技术加以改进、创新或组合使用; 开发新的防蜡方案, 开发高效、稳定、环保、多功能的清防蜡剂和培养高效的清防蜡微生物品种。

参考文献:

- [1] WANG Zhi-wei, ZHU Li-qun, LIU Hui-cong, et al. A Conversion Coating on Carbon Steel with Good Anti-wax Performance in Crude Oil[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, 112: 266—272.
- [2] LI Wei-ping, ZHU Li-qun, LIU Hui-cong, et al. Preparation of Anti-wax Coatings and Their Anti-wax Property in Crude Oil[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, 103: 80—84.
- [3] ZHANG Xue-jun, TIAN Jun, WANG Li-juan, et al. Wettability Effect of Coatings on Drag Reduction and Paraffin Deposition Prevention in Oil[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2002, 36(1): 87—95.
- [4] 赵福麟. 采油用剂[M]. 东营: 华东石油学院出版社, 1987: 17—20.
ZHAO Fu-lin. Oil Recovery Agent[M]. Dongying: East China Petroleum Institute Press, 1987: 17—20.
- [5] 薛世君. 油井结蜡机理与清防蜡技术的配套应用[J]. 内蒙古石油化工, 2010(20): 106—108.
XUE Shi-jun. Paraffin Deposition Mechanism of Oil Wells and Supporting Application of Paraffin Removal and Prevention Technology[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2010(20): 106—108.
- [6] SUTTER E. Chemical Composition of Epicuticular Wax in Cabbage Plants Grown in Vitro[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1984, 62(1): 74—77.
- [7] REDING F P. Coating Composition Containing Wax and Ethylene-vinyl Acetate Copolymer: U S Patent 2877196[P]. 1959-03-10.
- [8] INUI H, MIYATAKE K, NAKANO Y, et al. Production and Composition of Wax Esters by Fermentation of *Euglena Gracilis*[J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 1983, 47(11): 2669—2671.
- [9] 胡文庭, 李关虎, 胡小冬, 等. 原油集输管线结蜡机理分析及动态结蜡实验研究[J]. 内蒙古石油化工, 2011(12): 5—6.
HU Wen-ting, LI Guan-hu, HU Xiao-dong, et al. Mechanism Analysis of Wax Deposition in Crude Oil Gathering Pipelines and Experimental Study of Dynamic Wax Deposition[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2011(12): 5—6.
- [10] HUNT E B J. Laboratory Study of Paraffin Deposition[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1962, 14(11): 1259—1269.
- [11] BURGER E D, PERKINS T K, STRIEGLER J H. Studies of Wax Deposition in the Trans Alaska Pipeline[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2013, 33(6): 1075—1086.
- [12] LEIROZ A T, AZEVEDO L F A. Studies on the Mechanisms of Wax Deposition in Pipelines[C]//Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 2005.
- [13] SADEGHHAZAD A, GHAEMI N. Microbial Prevention of Wax Precipitation in Crude Oil by Biodegradation Mechanism[C]//SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. [s.l.]: Society of Petroleum Engineers, 2003.
- [14] ETOUMI A. Microbial Treatment of Waxy Crude Oils for Mitigation of Wax Precipitation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 55(1): 111—121.
- [15] ARARIMEH A, DHURJATI P C, ANGELUS P, et al. Wax Formation in Oil Pipelines: A Critical Review[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011, 37(7): 671—694.
- [16] AZEVEDO L F A, TEIXEIRA A M. A Critical Review of the Modeling of Wax Deposition Mechanisms[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2003, 21(3): 393—408.
- [17] BRIAN F T, SURYA R. Mitigation of Paraffin Wax Deposition in Cretaceous Crude Oils of Wyoming[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, 45(1—2): 11—19.
- [18] WANG B, DONG L. Paraffin Characteristics of Waxy Crude Oils in China and the Methods of Paraffin Removal and Inhibition[C]//International Meeting on Petroleum Engineering. [s.l.]: Society of Petroleum Engineers, 1995.
- [19] DE JONG K P, MESTERS C, PEFFEROEN D G R, et al. Paraffin Alkylation Using Zeolite Catalysts in a Slurry Reactor: Chemical Engineering Principles to Extend Catalyst Lifetime[J]. *Chemical Engineering Science*, 1996, 51(10): 2053—2060.
- [20] 李振智, 崔长国, 唐周怀. 连续清防蜡工艺技术在中原油田的应用[J]. 石油钻采工艺, 2001, 23(1): 71—73.
LI Zhen-zhi, CUI Chang-guo, TANG Zhou-huai, Application of Continuous Wax Control and Removal Technologies in Zhong Yuan Oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2001, 23(1): 71—73.
- [21] 易安祥. 化学清防蜡技术及其在 HASSI 区块的应用[D]. 黑龙江: 东北石油大学, 2010.
YI An-xiang. Chemical Paraffin Technology and Its Application in HASSI Block[D]. Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2010.
- [22] 孙川生. 克拉玛依九区热采稠油油藏[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.

- SUN Chuan-sheng. Karamay Thermal Recovery of Heavy Oil Reservoirs in Nine Districts[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [23] 刘军善, 侯芸, 侯超, 等. 文东油田油井结蜡机理研究及防治技术[J]. 内蒙古石油化工, 2007(12): 382—384.
- LIU Jun-shan, GOU Yun, HOU Chao, et al. Investigation of Wax Deposition Mechanism and Prevention Technology in Wendong Oilfield[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2007(12): 382—384.
- [24] 孙雪姣, 吕涛, 肖荣鸽. 含蜡原油管道清、防结蜡技术[J]. 清洗世界, 2014, 30(3): 20—23.
- SUN Xue-jiao, LYU Tao, XIAO Rong-ge. Cleaning Wax and Preventing Paraffin Precipitation Technology of Waxy Crude Oil Pipeline[J]. Cleaning World, 2014, 30(3): 20—23.
- [25] SHOCK D A, SUDBURY J D, CROCKETT J J. Studies of the Mechanism of Paraffin Deposition and Its Control[J]. Journal of Petroleum Technology, 1955, 7(9): 23—28.
- [26] PASO K, SENRA M, YI Y, et al. Paraffin Polydispersity Facilitates Mechanical Gelation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, 44(18): 7242—7254.
- [27] LUYT A S, GEETHAMMA V G. Effect of Oxidized Paraffin Wax on the Thermal and Mechanical Properties of Linear Low-density Polyethylene-layered Silicate Nanocomposites[J]. Polymer Testing, 2007, 26(4): 461—470.
- [28] 邹德健. 水溶性和油溶性清防蜡剂研制与应用[D]. 黑龙江: 大庆石油学院, 2003.
- ZOU De-jian. Water Soluble and Oil Soluble Wax Remover [D]. Heilongjiang: Daqing Petroleum Institute, 2003.
- [29] 武继辉, 孙军, 贺志刚, 等. 油井清、防蜡技术研究现状[J]. 油气田地地面工程, 2004, 23(7): 14.
- WU Ji-hui, SUN Jun, HE Zhi-gang, et al. The Research Status of Paraffin Cleaning and Prevention[J]. Oil & Gas-field Surface Engineering, 2004, 23(7): 14.
- [30] 王尊策, 侯灵霞, 刘志刚, 等. 井下液力自动清蜡装置设计及试验研究[J]. 机械设计, 2013, 30(12): 58—61.
- WANG Zun-ce, HOU Ling-xia, LIU Zhi-gang, et al. Design and Experiment on Downhole Hydraulic Automatic Wax Removal Device[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(12): 58—61.
- [31] 马效忠, 吴宗福, 裴润有. 油井自动机械清蜡器的现场试验[J]. 石油矿场机械, 1995, 25(2): 30—31.
- MA Xiao-zhong, WU Zong-fu, PEI Run-you. The Field Test of Automatic Cleaning Paraffin Machine in Oil Well[J]. Oil Field Equipment, 1995, 25(2): 30—31.
- [32] 鲁红光, 陈保钢, 黄世秋, 等. 抽油井机械式自动清蜡装置工艺试验[J]. 石油矿场机械, 2000, 29(6): 19—21.
- LU Hong-guang, CHEN Bao-gang, HUANG Shi-qiu, et al. The Test of Model 62JL-04 Automatic Cleaning Paraffin Unit in the Pumping Well[J]. Oil Field Equipment, 2000, 29(6): 19—21.
- [33] FUNG G, BACKHAUS W P, MCDANIEL S, et al. To Pig or Not to Pig: The Marlin Experience with Stuck Pig[C]// Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 2006.
- [34] 刘伟. 油井清防蜡探讨[J]. 化工管理, 2013(8): 17.
- LIU Wei. To Research Paraffin Removal and Prevention[J]. Chemical Enterprise Management, 2013(8): 17.
- [35] 周飞, 刘建仪, 张广东, 等. 防蜡技术研究现状及展望[J]. 精细石油化工进展, 2010, 11(12): 19—21.
- ZHOU Fei, LIU Jian-yi, ZHANG Guang-dong, et al. Research Status Quo and Prospect of Paraffin Control Technology[J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2010, 11(12): 19—21.
- [36] NISHINO T, MEGURO M, NAKAMAE K, et al. The Lowest Surface Free Energy Based on-CF₃ Alignment[J]. Langmuir, 1999, 15(13): 4321—4323.
- [37] HASNAIN S M. Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Part I: Heat Storage Materials and Techniques[J]. Energy Conversion and Management, 1998, 39(11): 1127—1138.
- [38] 谢飞, 吴明, 王丹, 等. 玻璃内衬管道在低温集油中的应用[J]. 油气储运, 2009, 28(12): 65—67.
- XIE Fei, WU Ming, WANG Dan, et al. Application of Glass Liner Pipeline in Low Temperature Oil Gathering[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28(12): 65—67.
- [39] 曾佳才, 丁祥年, 宋其伟, 等. 内衬油管配套防蜡技术在鄯善油田的应用[J]. 石油钻采工艺, 1993, 15(6): 84—87.
- ZENG Jia-cai, DING Xiang-nian, SONG Qi-wei, et al. Application of Liner Pipeline Supporting Wax Prevention Technology in Shanshan Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1993, 15(6): 84—87.
- [40] 张学俊, 周兆福, 田军, 等. 树脂涂层在原油管输中的防结蜡研究[J]. 石油炼制与化工, 2002, 33(2): 28—30.
- ZHANG Xue-jun, ZHOU Zhao-fu, TIAN Jun, et al. Study on Using Resin Coatings for Inhibiting Wax Deposition in Pipeline Transportation of Crude Oil[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2002, 33(2): 28—30.
- [41] 岳大伟. 聚氨酯涂层油管用于油井防蜡[J]. 油田化学, 2008, 25(3): 207—209.
- YUE Da-wei. Polyurethane Coated Tubing for Paraffin Control in Oil Production Wells[J]. Oilfield Chemistry, 2008, 25(3): 207—209.
- [42] 陈立滇. 国外油田化学剂的现状与发展动态[J]. 油田化学, 1985, 2(3): 45—47.
- CHEN Li-dian. The Status and Development of Oilfield Chemicals in Foreign Countries[J]. Oilfield Chemistry, 1985, 2(3): 45—47.

- [43] 廖久明, 滕滕. 水包油型清蜡剂的研制[J]. 精细化工, 1995, 12(4): 44—47.
LIAO Jiu-ming, TENG Teng. Study on O/W Type Paraffin Remover[J]. Fine Chemicals, 1995, 12(4): 44—47.
- [44] 刘扬. 化学防蜡在低产油井的应用[J]. 河南石油, 2001, 15(2): 30—31.
LIU Yang. Application of Chemically Preventing Paraffin in Low Yield Oil Wells[J]. Henan Petroleum, 2001, 15(2): 30—31.
- [45] 张煜. YS-3 清防蜡剂的研制[J]. 油田化学, 2007, 24(1): 17—18.
ZHANG Yu. Anti-waxing Chemical Agent YS-3 for Use at Panguliang Oil Field[J]. Oilfield Chemistry, 2007, 24(1): 17—18.
- [46] 吴慧敏, 刘延坡, 吴莉玲, 等. AD-4 微生物防蜡剂培育与应用[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(2): 41—43.
WU Hui-min, LIU Yan-po, WU Li-ling, et al. Breeding and Application of Microbe Paraffin Inhibitor AD-4[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(2): 41—43.
- [47] HE Z, MEI B, WANG W, et al. A Pilot Test Using Microbial Paraffin-removal Technology in Liaohe Oilfield[J]. Petroleum Science and Technology, 2003, 21(1-2): 201—210.
- [48] MIGET R J, OPPENHEIMER C H, KATOR H I, et al. Microbial Degradation of Normal Paraffin Hydrocarbons in Crude Oil[C]// International Oil Spill Conference. [s.l.]: American Petroleum Institute, 1969: 327—331.
- [49] WILSON J J, CHEE W, O'GRADY C, et al. A Field Study of Downhole Microbial Paraffin Control[C]// Proceedings of the Annual Southwestern Petroleum Short Course. [s.l.]: Texas Tech University, 1993: 346.
- [50] NITU S, BANWARI L. Isolation and Characterization of a Potential Paraffin-wax Degrading Thermophilic Bacterial Strain *Geobacillus Kaustophilus* TERI NSM for Application in Oil Wells with Paraffin Deposition Problems[J]. Chemosphere, 2008, 70(8): 1445—1451.
- [51] 孙耀国. 油井微生物防蜡技术应用[J]. 复杂油气藏, 2009, 2(1): 69—72.
SUN Yao-guo. Application of Microbial Wax Prevention Technology in Oil Wells[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2009, 2(1): 69—72.
- [52] 林传博, 贾云鹏, 范琳, 等. 微生物清防蜡技术研究进展[J]. 辽宁化工, 2013, 42(2): 169—173.
LIN Chuan-bo, JIA Yun-peng, FAN Lin, et al. Research on Microorganism Wax Prevention and Removal Technology[J]. Liaoning Chemical Industry, 2013, 42(2): 169—173.
- [53] 王静, 高光军, 徐德福, 等. 清防蜡菌种的评价及现场试验[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(1): 52—55.
WANG Jing, GAO Guang-jun, XU De-fu, et al. Evaluation and Field Experiment on Bacteria to Remove and Control Paraffin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 28(1): 52—55.