

引用格式: 睢芬. 塔河油田缝洞型超深超稠油藏效益开采技术研究[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(2): 94-100.

SUI F. Study on benefit extraction technology of super deep super heavy fractured-vuggy reservoir in Tahe Oilfield[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 94-100.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.02.016

塔河油田缝洞型超深超稠油藏效益开采技术研究

睢芬

(中国石化西北油田分公司采油二厂, 新疆 轮台 841604)

摘要: 塔河油田超稠油地质储量大, 埋藏深, 在地层中具有流动性, 举升中随着温度降低, 黏度增大, 流动能力减弱, 无法采出, 主要采取掺稀油降黏开采。低油价以来, 受掺入稀油和采出稠油销售价差影响, 且稀油重复做功产生能耗, 导致效益降低。为提高超稠油油藏开采效益, 从地层、井筒、地面三个节点开展工艺探索、技术攻关及先导试验工作。以矿物绝缘电缆加热、纳米保温油管为主的保温开采取得明显效果, 累计节约稀油 9.86×10^4 t, 可在超稠油油藏进行推广。耐温抗盐水溶性降黏剂获得突破, 抗硫螺杆泵举升工艺取得进展, 均为超稠油油藏效益开采提供充分条件。地面高效集输实施技术原理简单, 但涉及管网改造、设备升级, 成本高, 实施繁, 现试验设备准备中。地层降黏技术难度大, 目前处于技术论证阶段。通过超稠油低成本开采技术的发展完善及集成应用, 提高开发效益, 并综合考虑, 针对具体井况找出瓶颈, 在技术体系中筛选配套工艺技术, 以达到超稠油效益开采的目的, 提升油田应对低油价的能力。

关键词: 超稠油开采; 地层降黏; 井筒保温; 井筒降黏; 高效举升; 效益开采

中图分类号: TE345

文献标识码: A

Study on benefit extraction technology of super deep super heavy fractured-vuggy reservoir in Tahe Oilfield

SUI Fen

(No. 2 Oil Production Plant, Sinopec Northwest Oilfield Company, Luntai, Xinjiang 841604, China)

Abstract: The super heavy oil of Tahe Oilfield has high geological reserves, deep burial, and fluidity in the reservoir. During lifting, as the temperature decreases, the viscosity increases and the flow capacity decreases, leading to the impossible production. Therefore, recovery mainly adopts dilute oil to reduce adhesion. With the continuous drop in oil prices, the influence by the sales price difference between the added dilute oil and the produced heavy oil, and the energy consumption caused by the repeated work of dilute oil, lead to the decrease of the benefit. In order to improve the production efficiency of super heavy oil reservoir, the technology exploration, technical tackling and pilot test are carried out from three aspects of stratum, wellbore and surface. The application of mineral-insulated copper-clad cable heating and nano thermal insulation tubing has achieved remarkable results, saving 98 600 tons of dilute oil. It can be popularized in such super heavy oil reservoirs. The breakthrough of temperature-resistant and salt-resistant water-soluble viscosity reducer and the progress of the sulfur-resistant screw pump lift technology provide sufficient conditions for the efficiency recovery of super heavy oil reservoirs. The principle of efficient ground gathering and transportation is simple, but involves the network transformation and equipment upgrade, with high cost and complex implementation. Now the test equipments are in preparation. As the technology of formation viscosity reduction is very difficult, it is in the stage of technical demonstration. The development and integrated application of low-cost recovery technology for super heavy oil improve the development benefit. And after general consideration, the bottleneck is found out according to the specific well conditions, and the matching technology in the technical system is select, so as to achieve the goal of efficiency recovery for super heavy oil, and improve the ability of oilfields to cope with low oil prices.

Key words: super heavy oil mining, formation viscosity reduction, wellbore insulation, wellbore viscosity reduction, high-efficiency lifting, efficiency recovery

收稿日期: 2019-10-09。

作者简介: 睢芬(1988—), 女, 本科, 工程师, 从事采油工艺研究工作。通讯地址: 新疆库尔勒市轮台县轮南邮电所转采油二厂, 邮政编码: 841604。E-mail: 710481286@qq.com

基金项目: “十三五”国家科技重大专项“塔里木盆地碳酸盐岩油气田提高采收率关键技术示范工程”(2016ZX05053)。

碳酸盐岩油藏约占世界石油储量的52%,全球油气总产量的60%,油藏物性较好,以裂缝型油藏为主,油田产量高,是世界重要的石油增储上产领域之一^[1-2]。塔河油田缝洞型油藏是一个在大型古隆起上经过多期构造岩溶作用形成的,以溶洞、溶蚀孔隙为储集空间,以裂缝为渗流通道,没有统一的油水界面,具有正常压力系统和地温梯度的底水块状未饱和稠油油藏^[3-7]。塔河油田超稠油地质储量达 8.5×10^8 t,埋藏深度5 500~7 000 m,原油沥青质含量25%~62%,地下原油黏度260~736 mPa·s,地面原油黏度 $1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^7$ mPa·s,地层水矿化度达 2.4×10^5 mg/L,硫化氢含量 $1.0 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$ mg/m³。超稠油在地层具有流动性,举升过程中,随着温度降低,黏度增大,在3 000米左右失去流动能力,无法采出。塔河油田超深稠油开采实施井筒降黏,利用相似相溶原理,主要以掺稀油降黏开采为主^[8-12]。

受掺入稀油和采出稠油销售价差影响,且稀油重复做功产生能耗,均导致效益降低。2017年采用混配掺稀油 414×10^4 t,开采稠油 281.5×10^4 t,稀稠比1.47,50美元/bbl油价下,稀稠油价差损失高达12.12亿元。此外经测算,现今70美元/bbl油价下,每天增加稀油用量80 t(稀稠比上升0.01),造成年效益损失达1 244万元。

2015年以来,采油二厂持续攻关超稠油效益开采技术,在保温开采、井筒降黏、高效举升三方面取得了实质性的进展,在地层降黏和高效集输方面也有新的认识和试验,不断实践和完善超稠油效益开采技术体系。

1 地层降黏技术

塔河油藏埋藏深、温度高,普遍认为超稠油在地层中具有流动性,随着效益开发的要求及稠油开采体系不断完善,认为地层降黏具有重要意义。塔河油田油藏因超深、超稠、高温、高压、高矿化度特性,常规降黏剂难以满足地层条件,目前处于技术论证阶段,形成技术储备。①地层分散降黏,通过降黏剂提前介入,利用地热能量,抑制胶质沥青质低温交联,可提高降黏效率;②地层乳化降黏,针对定容体油藏单井,实施水基性降黏驱替“吞吐”,达到改变油、水、岩石间的润湿性,增加裂缝吸水,增强剩余油的“剥离”,即表面活性驱替与举升一体化双重目

的。目前论证硫化钼纳米分散降黏与水基降黏剂降黏驱替可行性。

2 保温开采技术

前期应用过整体式电加热技术,主要采用集肤效应原理^[13-14],存在热效率低,故障高的特点,难以有效推广。总结前期应用的经验,现场试验应用了矿物绝缘加热技术^[15]和纳米涂层保温油管^[16-17]工艺,均取得了明显的效果。

2.1 矿物绝缘电缆加热技术

矿物绝缘加热电缆由三根发热导体、氧化镁绝缘层、高强度不锈钢护套一体化集成,在电缆内部实现尾端星型连接(图1),单根超长无外观接点,整体等径,方便常用下井设备施工作业。地面配套加热控制柜和升压变压器及相关附件。

该工艺加热原理为纯电阻加热,加热效率高,有效解决了稠油在井筒举升过程中,受温度降低而导致的黏度增加、摩阻增大的难题,有效节约了稀油,提高了油井产能。

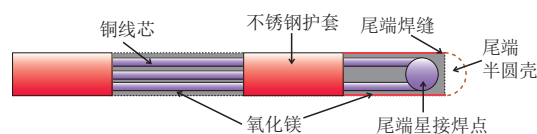


图1 矿物绝缘电缆结构

Fig. 1 Structure of mineral insulation cable

现场实施中,将矿物绝缘电缆下入油管中,加热混合液,提高流体温度,从而降低管柱沿程摩阻,达到减少掺稀用油、增加产量的目的。采油二厂矿物绝缘电缆加热降黏已实施13井次,平均井温65℃,提升17℃,掺稀比下降31.2%,日节约稀油263.3 t,累计节约稀油97 774.2 t(表1)。

三芯一体矿物绝缘电缆工艺主要适应条件为:①10区、12区高黏稠油井;②含水<10%;③掺稀比>1.5的自喷井、机抽井。攻关实现了抽稠泵泵下加热、电泵泵上加热及无级调功三项技术,拓展了矿物绝缘电缆的应用范围。

其中,TH12319CH抽油机井70/32抽稠泵泵下尾管内采取1 200 m三芯一体矿物绝缘电缆加热,泵上油管外采用1 530 m单芯不锈钢护套矿物绝缘伴热,应用后井温上升32℃,稀稠比下降0.9,日节约稀油

表1 矿物绝缘电缆应用效果统计
Table 1 Statistic for application effectiveness of mineral insulated cable

井号	实施日期	井口温度增加/℃	日增油/t	日节约稀油/t	稀稠比差	稀稠比降低幅度/%	累节约稀油/t	累增油/t
TH12445	20170416	12	0	0			6 228.5	201.8
TH12248	20170115	36	10.4	59.9	-1.76	65.96	36 467.3	940.8
TH10342	20170811	10	0	0	0	18.45	9 601.1	221.4
TH12386	20170820	45	9.6	0	0.10	-5.32	2 270.0	1 431.4
TH12340	20170830	1	2.5	35.3	-1.07	38.34	20 161.8	5 987.3
S99	20170908	14	6.7	16.4	-0.41	28.48	5 896.2	2 760.8
TH10377X	20171113	16	19.1	26.0	-0.42	37.23	8 715.2	3 174.4
TH12218	20180618	17	7.1	24.2	-0.82	36.85	2 550.9	1 674.5
TH10375	20180708	8	0.9	9.1	-0.23	15.41	861.7	155.0
TH10367	20180709	18	2.8	24.8	-0.84	44.72	1 895.0	193.6
TH12277	20180716	23	0	6.3	-0.15	7.40	565.0	44.0
TH12549H	20180724	17	6.7	35.5	-1.23	47.26	2 132.6	414.6
TH12319CH	20180902	32	7.3	25.8	-0.93	39.34	428.9	118.3
平均值		17			-0.65			
合计			73.1	263.3		31.18	97 774.2	17 317.9

25.8 t,日产油增加8 t,抽油机悬点载荷下降18 kN。应用矿物绝缘电缆后井温上升,井筒内混合液黏度降低,摩擦阻力下降,产量增加。因井口温度上升,井筒内混合液黏度下降,可降低掺稀油量。此外,混合液加热降黏后,悬点载荷下降,泵况明显改善。

电泵井采取泵上油管三芯一体矿物绝缘电缆加热,受限于电泵泵况改善不明显,且稠油电泵稳定性不够,日节约稀油6.3 t。下步继续攻关电泵泵下矿物绝缘电缆加热工艺,目前主要瓶颈在井口电缆穿越。

因地面生产管线防腐设计后耐温65℃,且三芯一体矿物绝缘电缆加热耗电高(4 000 kW·h),增加采油成本,需对矿物绝缘电缆加热功率进行效益测算,使用无级变频调功控制柜,实现温度精确控制,动态调节井筒温度场,适用防腐管线,节能降耗,投用后平均电量消耗下降20%以上。

2.2 纳米涂层保温油管技术

纳米涂层保温油管的主要结构组成是常规钢制油管、保温层以及保护层。

保温油管是采用纳米超级绝热技术及材料设计高效超薄的保温涂层,直接将涂层材料包裹在油管外壁上,具有极佳的保温效果。保温油管具有以下特点:①导热系数为0.018 W/(m·K);②超薄涂层,涂层厚度4~5 mm;③使用性能稳定,具有防水、防油、防腐,耐磨、耐酸碱特点;④耐腐蚀性强,耐硫化氢含量达到10 000 mg/m³;⑤制作工艺简单,使

用寿命长,可反复修复利用;⑥质量轻,仅比普通油管每千米增重500 kg。两端作业段(30 cm)及管箍段涂层厚度1 mm(该段的纳米隔热涂层经过了特殊处理,作业时,可以使用原来规格的吊具和管钳,管钳的咬痕不影响涂层功能),具体性能参数见表2。同时利用高强度、耐高温、耐磨交联物制成保护层,以解决保温油管在储运、安装、清洗时可能造成的破损问题。

表2 纳米保温油管基本性能参数
Table 2 Basic performance parameters of nanometer insulation pipe

项目	采油工况要求	纳米保温油管性能指标
导热系数[W·(m·K) ⁻¹]	≤0.018	≤0.012
涂层厚度/mm	≤6	5
耐高温/℃	≥120	130
抗腐蚀	硫化氢、二氧化碳	硫化氢浓度<1%、 二氧化碳浓度<1%
耐浸泡	三相混合油液	可长期使用
耐压/MPa	≥35	35
机械性能	耐碰撞、耐磨	耐碰撞、耐磨
维修	快速修复	适用
使用深度/m	≥2 500	3 000

现场应用效果良好,具有降黏、节约稀油用量、增加产能、降低能耗的作用。

塔河油田抽稠油泵配合纳米保温涂层油管复合工艺在现场应用2井次,平均井温提升11℃,平均稀稠比降低幅度9.01%,累计节约稀油796 t,累计增油1 979 t(表3)。

表3 纳米涂层保温油管应用效果统计
Table 3 Statistic for application effect of nano coating insulation pipe

井号	下深/m	井口温度增加/℃	日增油/t	日节约稀油/t	稀稠比差	稀稠比降低幅度/%	累节约稀油/t	累增油/t
TH12266X	2 807	20	5	4.6	-0.1	6.25	270	1 439
TH10387	2 221	1	8	6.0	-0.2	11.76	526	540
平均值	2 514	11			-0.2	9.01		
合计			13	10.6			796	1 979

3 井筒降黏技术

井筒降黏开采研发了耐温抗盐低含水乳化的水溶性降黏剂^[18],及新型高效油溶性降黏剂。

3.1 耐温抗盐水溶性降黏技术

复合水溶性降黏剂由李链型两性表面活性剂为主剂,以及具有耐温、抗盐、渗透、分散、反转等功能辅剂共14种表面活性剂组成,提高了对沥青质的亲和力,确保高盐条件下对超稠油的稳定乳化。

复合水溶性降黏剂X6Z55在TK688井进行两轮次试验。第一轮次试验2018年7月30日—8月8日,第二轮次试验2018年9月30日—10月20日,试验中油井生产反映出三个阶段,药剂置换稀油阶段、排水阶段、回压高集输制约中止。分析原因为药剂溶液与稀油密度差、重力作用发生渗透形成油水段塞,稀油、药剂均不能与稠油发挥有效的混配作用;药剂稀油置换结束后,药剂溶液注入量大于采出量,致使药剂溶液在稠油界面与筛管之间形成“水锁”,此时仅有药剂溶液及少量的置换稠油进入泵筒,井口表现为高含水;降低药剂注入量后,油水比大于1,药剂不能发挥有效的降黏作用,且井下无混配器,56/38抽稠泵剪切力小,混配性差,形成的油水分散体系不稳定,在集输过程中油水分离,井口出液表现为明水与稠油分离,回压高。

此化学降黏药剂与工艺配套存在局限性:①水

溶性降黏剂分散能力及56/38型抽稠泵混配力弱的原因,形成的乳状液稳定性差,易于油水分离,造成地面管线集输困难;②室内试验是在80℃条件下实验,而2 600 m泵筒温度不确定能否到达80℃,而且在举升过程中温度下降,降黏剂与稠油分散性差。

后期继续攻关改进药剂配方,提高药剂的分散性能及在低温下的适应性;选择配合混配性能较好的螺杆泵或配套混配器井进行试验;药剂注入量与泵排量需要摸索匹配,避免注入量过大,造成“水锁”;优化加注工艺,缩短药剂加注过量导致井口出液长期高含水,造成油井产量和药剂损失。

3.2 新型高效油溶性降黏剂

常规降低稠油黏度的开发技术,只在某阶段降低了黏度,条件发生变化后黏度是可逆的。目前,比较前沿的技术是通过稠油改质,使长碳链裂解为短碳链组分,达到不可逆降黏效果。室内评价药剂浓度在0.1%时,节约稀油29%(表4)。目前继续按照黏度梯度进行室内试验,评价药剂普适性。

4 高效举升技术

稠油高效举升方面则开展了抗硫螺杆泵^[19]及天然气掺稀气举技术^[20]攻关及研究,取得了实质性进展及认识,结合有杆泵、电潜泵泵深与掺稀混配点分离思路设计^[21],为超稠油低成本效益开采提供了支撑。

表4 新型高效油溶性降黏剂室内试验效果统计
Table 4 Indoor experiment results of new high efficiency oil-soluble viscosity reducer

井号	加药浓度/%	稀稠比	原始黏度/(mPa·s)	稀油量/g	稠油量/g	掺稀后黏度/(mPa·s)	降黏率/%
TK688	0.1	2:1	480 000	100	50	1 460	28.08
		2:1		100	50	1 050	
	1.3:1	65		50	3 360	27.08	
	1.3:1	65		50	2 450		
TH12555	0.1	2:1	420 000	100	50	1 340	26.86
		2:1		100	50	980	
	1.3:1	65		50	2 860	29.37	
	1.3:1	65		50	2 020		

4.1 抗硫螺杆泵举升技术

螺杆泵具有运动部件少、泵效高、抗黏性好的天然优势,因此入泵黏度相对其他开采方式较高,对超稠油含水后混配不均井举升适应性强。

通过定子橡胶优化试验,开展定转子力学分析,

优化设计杆柱结构等三方面技术改进,进一步提升螺杆泵稠油适应性。

地面驱动螺杆泵累计应用7口井,主要用于6、7区低黏度稠油井掺稀优化,现场试验表明能有效克服稠油乳化,累计节约稀油13 955 t,增油13 833 t,应用效果显著(表5)。

表5 地面驱动螺杆泵应用效果统计

Table 5 Statistic of application effect of ground drive screw pump

井号	日增油/t	日节约稀油/t	稀稠比差	稀稠比降低幅度/%	累节约稀油/t	累增油/t
TK690	7.0	1.40	-0.1	10.0	2 432	3 218
TK654	6.6	6.57	-0.4	57.1	3 690	3 735
S66	-14.0	1.84	-0.2	33.3	717	580
TK661	0.6	-2.40	0.1	-10.0	4 262	4 416
TK696X	-0.5	-1.88	0.1	-8.3	844	946
TK697	8.2	20.75	-0.8	53.3	1 900	792
TH10255X	12.0	8.91	-0.3	33.3	110	146
平均值			-0.2	24.1		
合计	32.5	35.19			13 955	13 833

4.2 天然气掺稀气举技术

利用天然气溶解降黏和气举举升双重作用可降低掺稀油用量,释放稠油产能,提高稠油开采效益,采用井筒模拟装置,测量不同流态下原油黏度,结合试验井降黏效果,评价游离气对于降黏效果影响,明确了油气混溶状态为天然气降黏效果最佳状态。

通过高温高压配样器,研究不同温度(50, 70, 90, 110 ℃)下,重质油(TH12340)和中质油(TH10270)注天然气溶解度(m^3/m^3)随压力变化规律,在恒温条件下,天然气在原油中的溶解度随压力增大而增大,但增大的幅度逐渐减小,成非线性关系(图2)。

累计开展天然气掺稀气举降黏试验11井次,其

中机抽管柱配合注天然气4井次,自喷管柱6井次,电泵管柱1井次,在6、10、12区1小区进行了试验,累增油2 197 t,节约稀油4 880 t(表6)。

5 高效集输技术

塔河油田缝洞型油藏非均质性强,井间距大,油井生产管线平均长度2.5 km(最长5 km),井口混合液平均黏度1 500 $\text{mPa}\cdot\text{s}$,平均回压1.06 MPa。目前常用降回压方法主要有稀油伴送、盐水伴送,但其降回压效果差,导致稀油用量增加、产量下降。

在稠油效益开采的要求下,需要对地面集输工艺进行优化。目前优化方向主要有两个方向:①化学乳化伴输技术。试验生物酶伴输剂,该药剂主要

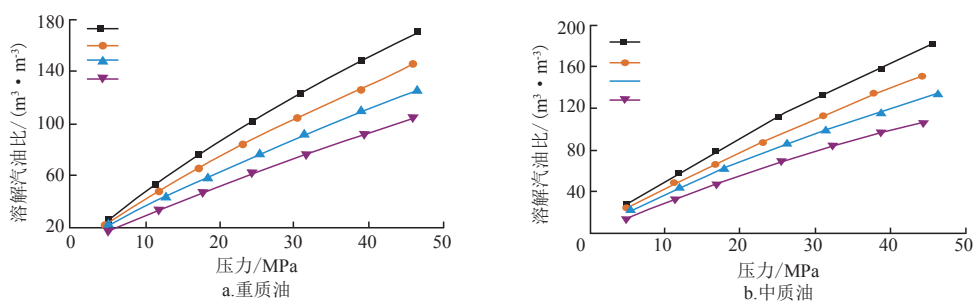


图2 压力与天然气溶解度关系曲线

Fig. 2 Relation between pressure and solubility of natural gas

表6 天然气掺稀气举技术应用效果统计
Table 6 Statistic of application effect of natural gas drainage gas lifting technology

井号	采油方式	增油量/(t·d ⁻¹)	节约稀油量/(t·d ⁻¹)	稀稠比差	稀稠比降低幅度/%	累节约稀油/t	累增油/t
TH12148	自喷	-7.0	0	0	0	617	909
TH12140	机抽	-1.0	6.4	-0.5	17.86	1 540	306
TH12124CH	自喷	-3.0	0	-2.6	100.00	0	0
TH121115	电泵	-3.2	-16.0	5.2	-83.87	299	40
TH121128	机抽	-5.0	0	-1.5	100.00	2	26
TH121101	自喷	5.0	11.0	-0.5	20.83	1 240	234
TH12118	自喷	2.0	6.2	-0.3	14.29	46	0
TH12186	自喷	2.0	-2.8	-0.3	14.29	770	165
TH121122	自喷	1.0	1	0	0	292	293
TH12192	机抽	0	-0.2	0	0	10	8
TH10121CH	机抽	12.5	-4.0	0.1	-10.00	64	216
平均值				-0.04	15.76		
合计		3.3	1.6			4 880	2 197

成分为生物药剂里的表面活性剂(亲水活性剂),易溶于水混合形成一种稳定的液体状态,这种稳定的溶液与原油极性相反相憎,具极度憎油性。当水溶液与地层原油混合液在管道的流动过程中,在液体冲刷或外力搅动的作用下水溶液会在管道四周内壁形成一层表活剂保护膜,阻止原油在管道表面粘滞,使得最终形成管道表面四周外围是带表活剂的水溶液,中间是稠油的O/W型乳状液的流动状态。已在TK688单井进行试验,加药后回压由1.88 MPa下降至1.63 MPa,日节约稀油2.8 m³,目前继续优化配方,计划扩大试验。②井口智能接喷装置。设计地面管道泵进行增压提流速降回压,解决综合回压高问题,目前在配置设备中。

6 结论

1) 地层降黏可从根本上降低原油黏度,从而减少井筒降黏和高效集输的投入成本,实现效益开采,但研发适合塔河超稠油的化学降黏剂任重而道远。

2) 井筒高效开采是塔河油田现阶段效益开采的主要手段。其中以矿物绝缘电缆和纳米保温油管为主的保温开采,效果好,普适性强,但成本较高;井筒化学降黏单井试验效果好,但是针对塔河非均质油藏特性的普适性药剂研发难度大;针对超稠油含水后混配不均问题实施稠油螺杆泵举升试验,效果好。

3) 塔河油田井间距大,冬季气温低,井口回压高,问题突出,以加药伴送的化学降回压取得初步试

验成效,地面加压的物理降回压方法待设备试验。

参考文献

- [1] 沈安江,陈娅娜,蒙绍兴,等.中国海相碳酸盐岩储层研究进展及油气勘探意义[J].海相油气地质,2019,24(4):1-14.
SHEN A J, CHEN Y N, MENG S X, et al. The research progress of marine carbonate reservoirs in China and its significance for oil and gas exploration[J]. Marine Petroleum Geology, 2019, 24(4): 1-14.
- [2] SUN Q, ZHANG N, MOHAMED F, et al. Structural regeneration of fracture-vug network in naturally fractured vuggy reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 165: 28-41.
- [3] 赵锐,赵腾,李慧莉,等.塔里木盆地顺北油气田断控缝洞型储层特征与主控因素[J].特种油气藏,2019,26(5):8-13.
ZHAO R, ZHAO T, LI H L, et al. Fault-controlled fracture-cavity reservoir characterization and main-controlling factors in the Shunbei hydrocarbon field of Tarim Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(5): 8-13.
- [4] 吕心瑞,李红凯,魏荷花,等.碳酸盐岩储层多尺度缝洞体分类表征——以塔河油田S80单元奥陶系油藏为例[J].石油与天然气地质,2017,38(4):813-821.
LYU X R, LI H K, WEI H H, et al. Classification and characterization method for multi-scale fractured-vuggy reservoir zones in carbonate reservoirs: An example from Ordovician reservoirs in Tahe oilfield S80 unit[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 813-821.
- [5] 鲜强,冯许魁,刘永雷,等.塔中地区碳酸盐岩缝洞型储层叠前流体识别[J].石油与天然气地质,2019,40(1):196-204.
XIAN Q, FENG X K, LIU Y L, et al. Pre-stack fluid identification for fractured-vuggy carbonate reservoir in Tazhong area[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 196-204.
- [6] 刘遥,荣元帅,杨敏.碳酸盐岩缝洞型油藏缝洞单元储量精细分类评价[J].石油实验地质,2018,40(3):431-438.
LIU Y, RONG Y S, YANG M. Detailed classification and evaluation of reserves in fracture-cavity units for carbonate

- fracture-cavity reservoirs[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(3): 431-438.
- [7] 金强,田飞,张宏方.塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞单元综合评价[J]. *石油实验地质*, 2015, 37(3): 272-279.
JIN Q, TIAN F, ZHANG H F. Comprehensive evaluation of fracture-cave units in karst carbonates in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(3): 272-279.
- [8] 郭继香,张江伟.稠油掺稀降黏技术研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(36): 124-132.
GUO J X, ZHANG J W. Review on the technology of blending diluting oil in heavy oil well[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(36): 124-132.
- [9] 朝鲁门,史继伟,张江,等.浅析塔河油田稠油井掺稀降黏工艺技术[J]. *化工管理*, 2018, 33(17): 51-52.
CHAO R M, SHI J W, ZHANG J, et al. Brief analysis of viscosity reduction technology for heavy oil wells in Tahe oilfield[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2018, 33(17): 51-52.
- [10] 王鹏,徐海霞,陈兰,等.高温稠油掺稀降黏开采辅助降黏剂的研究与应用[J]. *钻采工艺*, 2018, 41(1): 95-98.
WANG P, XU H X, CHEN L, et al. Development of viscosity reducer for thinning production of high temperature heavy oil[J]. *Drilling & Production Technology*, 2018, 41(1): 95-98.
- [11] 张成志.塔河油田稠油井掺稀油降黏工艺的应用分析[J]. *化工中间体*, 2015, 11(4): 55.
ZHANG C Z. Tahe oilfield heavy oil Wells with thin oil viscosity process analysis of the application[J]. *Chemical Intermediates*, 2015, 11(4): 55.
- [12] 贾晓燕.塔河油田深层稠油开采技术研究[J]. *西部探矿工程*, 2014, 26(4): 46-48.
JIA X Y. Study on recovery technology of deep heavy oil in Tahe Oilfield[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2014, 26(4): 46-48.
- [13] 熊小伟,王少亭,韩利宝,等.空心杆井筒电加热采油技术应用与实践[C]//宁夏回族自治区科学技术协会.第十五届宁夏青年科学家论坛石化专题论坛论文集.宁夏回族自治区:《石油化工应用》杂志社, 2019: 21-24.
XIONG X W, WANG S T, HAN L B, et al. Application and practice of electric heating oil mining technology for hollow drill[C]// paper presented at the Ningxia Hui Autonomous Region Science and Technology Association-The 15th Ningxia Youth Scientists Forum Petrochemical Thematic Forum Paper Collection-Ningxia Hui Autonomous Region: Petrochemical Application Magazine, 2019: 21-24.
- [14] 郑冰.电热杆在稠油举升工艺中的应用探讨[J]. *中国石油石化*, 2016, 15(S2): 40.
ZHENG B. Discussion on application of electric heating rod in heavy oil lifting process[J]. *China Petroleum*, 2016, 15(S2): 40.
- [15] 程仲富.塔河油田超深超稠油矿物绝缘电缆加热技术研究[J]. *长江大学学报(自科版)*, 2017, 14(21): 32-35.
CHENG Z F. The technology for heating with insulating cable in ultra-deep and ultra-heavy oil wells in Tahe Oilfield[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2017, 14(21): 32-35.
- [16] 郭道宏.油管隔热保温试验研究[J]. *石油矿场机械*, 2011, 40(11): 26-28.
GUO D H. Testing study of thermal insulation for tubing[J]. *Oil Field Equipment*, 2011, 40(11): 26-28.
- [17] 毕普跃,刘心田.稠油热采注汽管网保温技术应用分析[J]. *化工设计通讯*, 2017, 43(12): 61.
BI P Y, LI X T. Application and analysis of thermal insulation technology for hot oil injection steam pipe network[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2017, 43(12): 61.
- [18] 毛金成,刘佳伟,李勇明,等.超稠油化学降黏剂研究与进展[J]. *应用化工*, 2016, 45(7): 1367-1371.
MAO J C, LIU J W, LI Y M, et al. Research and development of super heavy oil viscosity reducer[J]. *Applied Chemical Industry*, 2016, 45(7): 1367-1371.
- [19] 郑磊,吴晓东,徐军,等.热采高温井全金属螺杆泵举升技术及其适应性[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(21): 206-211.
ZHENG L, WU X D, XU J, et al. Artificial lift technique of all metal progressing cavity pump used in thermal production wells and its adaptability[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(21): 206-211.
- [20] 宁碧,吴亚龙,李静嘉,等.气举工艺在稠油开采中的应用现状[J]. *中国石油和化工*, 2015, 15(12): 53-55.
NING B, WU Y L, LI J J, et al. Current status of application of gas lifting technology in heavy oil mining[J]. *China Petroleum and Chemical Industry*, 2015, 15(12): 53-55.
- [21] 杜林辉,梁志艳,蒋磊,等.稠油机采井泵深与掺稀混配点分离设计及应用[J]. *特种油气藏*, 2014, 21(3): 145-147.
DU L H, LIANG Z Y, JIANG Li, et al. Separate design between pump setting depth and mixing point for diluent oil blending in heavy oil mechanical producers and its application[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2014, 21(3): 145-147.

(编辑 柳超超)