

# 轮南油田注水井“三不”工艺的建议

鲍全生 张振清

(华北石油管理局)

新疆塔里木盆地轮南油田三叠系一油组为边水油藏,但边水不活跃,试采中能量下降较快,为此开发方案确定对该油组进行注水补充能量。注水井不洗井、不增注和不下涂料油管则是针对轮南油藏特点提出的。所谓“三不”并不是绝对的,而是在相对较长时间内不洗井、不增注。要实现“三不”工艺必须在试验基础上确立注水开发油藏的水质标准,还要对注入水进行除氧处理;用氯杀菌控制细菌含量,进行精细过滤等,使注入水达到不腐蚀、不堵塞、不结垢的要求。除此之外,还要有先进可靠的水质监测系统做保证,才能实现注水井两年半以上不洗井、不增注的目的。

**主题词** 新疆 轮南油田 注水井 不确定性+洗井+增注 除氧 杀菌 水质管理 水质监测

作者鲍全生,1937年生。1960年毕业于北京石油学院采油专业。曾在大庆油田任技术员、试验大队大队长、技术科长等职,调华北油田后曾任采油厂主任工程师,现任采油工艺研究所副总工程师,高级工程师。张振清(女),1945年生。1970年毕业于北京石油学院采油专业。曾在长庆油田工作,现任采油工艺研究所综合室工程师。

轮南油田三叠系一油组平均渗透率为  $370.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度为19%;岩石表面润湿性为偏亲水,粘土含量一般为2%~5%(其中以高岭石为主,占65%以上),水敏试验为弱水敏性;水驱油试验在合理的注入速度下,无水期波及系数可达40%左右。从以上条件看,基本上是有利于注水的。虽然具有一定的水敏性,但通过控制水质,有针对性地添加一定量的防膨剂,可以减小其影响程度。

轮南油田水质特点是:污水含铁高达72mg/L、 $\text{Ba}^{2+}$ 为30mg/L、 $\text{Sr}^{2+}$ 为408mg/L、 $\text{CO}_2$ 为60.4mg/L、总矿化度为270385mg/L。水源水中含有大量细菌,如轮南1井水源水中含硫酸盐还原菌(SRB)为  $3.2 \times 10^3$  个/mL,腐生菌(TBG)为  $10^2 \sim 10^3$  个/mL。无论注淡水或污水,都有可能产生严重的腐蚀和结垢而堵塞地层。

轮南油田油层埋藏深(一般在4700m以上),且地处沙漠边缘地区,气候条件恶劣,工作难度也大。因此要求注水井在不下涂料油管的情况下,达到两年甚至更长的时间不洗井、不增注,保持注水能力不下降或少下降,注入压力不升高,并要满足配注要求。

注水井“不洗井、不增注、不下涂料油管”(简称三不)的关键在注入水水质的管理,只要注入水与地层配伍,满足地层粘土不膨胀、不腐蚀,与地层水混合不沉淀、不结垢、不堵塞油层的要求,由国内外油田开发实例证明,完全可以实现“三不”。

## 一、可行性论证

### (一)国内外油田开发实例

根据加拿大9个不同类型的油田开发经验,几乎没有一个油田靠洗井来维持注水井的注入量,或解决注水井的堵塞问题,基本做法是严把水质关,在一个较长时间内,做到不洗井、吸水量不下降、注水压力不回升。

我国南海潮10-3油田,油层有效厚度0.5~38m,孔隙度16.6%~21.6%,渗透率 $92 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 908 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。该油田注水两年半以来,在单井注水量较高的情况下(最高达1437~890m<sup>3</sup>/d),地层吸水能力不下降,注水压力稳定。主要做法是对注水井进行除氧处理,用氯杀菌,进行精细过滤等三个环节。

华北留17断块油田,空气渗透率平均为0.015 $\mu\text{m}^2$ ,孔隙度17%,共有13口注水井,全部注入清水。由于没有采取精细过滤,不到两年时间注水压力由20MPa上升到25MPa以上,地面注水泵由25MPa换装为32MPa。1988年注入水开始采用精细过滤,到1990年已有1年多不但没有洗井,注入压力也没有上升,注水量稳定。

### (二)轮南油田三叠系一油组油层“三不”工艺要求

1. 注入水中机械杂质粒径对油层堵塞的影响 根据华北油田研究院进行的不同粒径悬浮液注入试验结果得出:当注入水中颗粒直径与孔隙直径之比为1/3~1/6时,堵塞最严重。

根据轮南油田一油组12块岩样试验数据统计,岩心平均喉道半径为6.12 $\mu\text{m}$ ,按粒径为孔隙直径的1/6计算,要求机械杂质粒径小于2 $\mu\text{m}$ ,堵塞速度较低。

2. 机械杂质含量对油层堵塞的关系 注水时油层的堵塞不仅与悬浮物粒径有关,还与悬浮物颗粒的浓度、地层渗透率及累积注入量等因素有关。根据华北油田试验得出的机杂粒径、孔隙半径、堵塞速度关系式如下

$$C = (K_0 - 1) \rho / 3.24 \times 10^{-4} V_i X_i$$

$$V_i = \Sigma Q / 2\pi R h$$

$$X_i = d_i^5 \times 10^4 / \{7.3f^3 [11d_{\text{孔}}/f - (f+60)/(f+1.1)]^2 + 3 \times 10^4\}$$

$$f = (k/\varphi)^{1/2}$$

$$K_0 = K_0 / K_i$$

式中  $C$  ——机械杂质浓度,mg/L;  $K_0$  ——渗透率比值;  
 $\Sigma Q$  ——累积注入量,mL;  $\varphi$  ——孔隙度,小数;  
 $R$  ——污染半径,cm;  $K_0$  ——初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  
 $h$  ——注入厚度,cm;  $\rho$  ——机械杂质密度,g/cm<sup>3</sup>;  
 $d$  ——粒径, $\mu\text{m}$ ;  $t$  ——注入时间,s;  
 $K$  ——渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $V$  ——注入速度,mL/cm<sup>2</sup>·min;  
 $K_i$  ——某一累积注入量相对应的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

用上述关系式对轮南油田三叠系一油组按注水3年,渗透率下降不超过1/3考虑,并按日注水150m<sup>3</sup>计算,机械杂质浓度应小于3mg/L;若按日注量300m<sup>3</sup>计算,机械杂质浓度应小于1.5mg/L。

3. 含油量对地层渗透率的影响 轮南三叠系油藏在注水过程中,不仅要考虑注淡水,为了解决水源和防止环境污染,还应把污水回注到地层。但是污水中呈悬浮状态的残存原油颗粒同

机械杂质一样能够堵塞地层,造成渗透率下降。

华北油田研究院用不同浓度的乳化油对不同渗透率的岩心进行试验得出:注入水中含油量最高不超过 30mg/L。但是根据膜滤系数的测定结果(图 1),含油浓度大于 15mg/L 以后,膜滤系数就很低,膜滤系数要大于 15,含油量只能小于 10mg/L。

4. 腐生菌对注入系统的影响 腐生菌在注入系统是广泛存在的,其表现形式为有大量的粘液存在。由细菌粘液形成的堵塞用酸化处理和活性增注处理是不起作用的,即便对注水井采用反洗,也常常得不到预期效果。根据华北油田岔一联的经验,控制 TGB 在  $10^2$  个/mL 以上发现有结膜,而其它站控制在  $10^2$  个/mL 以下没有发现结膜,因此,TGB 应控制在  $10^2$  个/mL 以下。

5. 腐蚀对油层及注入系统的影响 根据轮南油田水质腐蚀性评价试验结果(见表 1)可以得出以下结论:

(1)注入水中溶解氧的含量是影响腐蚀的重要因素,即使在不加缓蚀剂的情况下,只要控制氧的含量(如加除氧剂等),也可以使腐蚀速度大幅度降低。

(2)单注清水时,由于清水中溶解氧含量比污水中氧含量高,腐蚀速度比注污水快。

(3)清水和污水混注时,如果溶解氧相同,不同清污水比例其腐蚀速度基本相似。

①溶解氧含量的确定。根据试验可以看出(图 2、图 3),在相同条件下(即  $CO_2$  和  $H_2S$  含量均为 0,试验温度均为  $40^\circ C$ ),原油污水的腐蚀速度远远高于轮南 1 水源井清水的腐蚀速度。按部颁标准腐蚀速度为 0.076mm/a 考虑,原油污水溶解氧含量应低于 0.025mg/L,清水溶解氧含量可适当放宽。

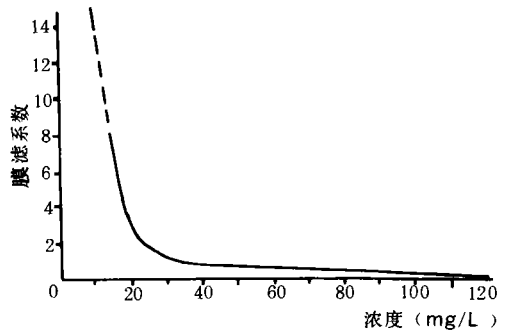


图 1 乳化油浓度与膜滤系数关系

表 1 轮南小区水腐蚀试验

污水与清水配比 污:清	水中溶解氧 (mg/L)	试片失重 (g)	腐蚀速度 (mm/a)	备 注
1:0	0.6	0.004 1	0.096	
1:0	0	0.001 4	0.033	加除氧剂除氧
0:1	5.0	0.016 0	0.373	
0:1	0	0.000 9	0.021	加除氧剂除氧
1:1	2.0	0.008	0.198	
1:1	0	0.002 1	0.051	加除氧剂除氧
1:4	1.5	0.005 5	0.128	
2:3	1.5	0.004 8	0.112	
3:2	1.5	0.004 5	0.105	
4:1	1.5	0.004 8	0.112	

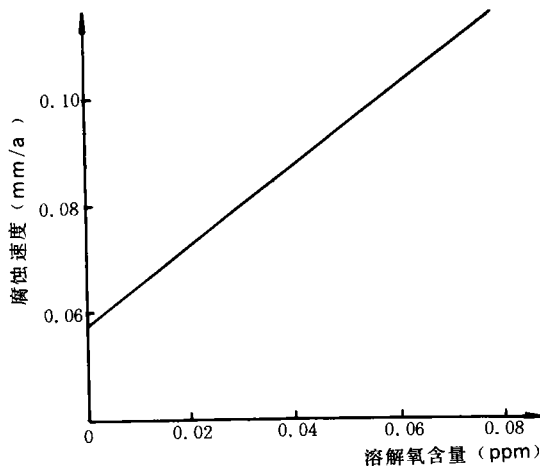


图2 轮南油田地层水中溶解氧与腐蚀速度关系

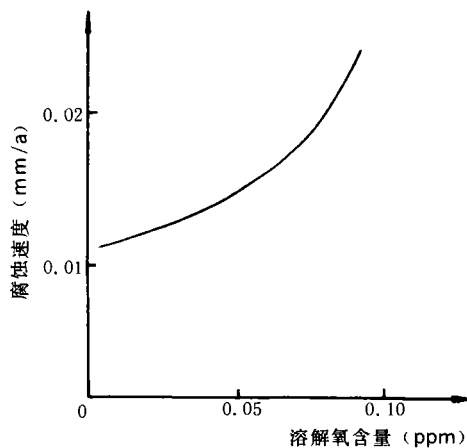


图3 轮南油田清水中溶解氧与腐蚀速度关系

②硫酸盐还原菌(SRB)对注水的影响。表2是用失重法研究厌氧条件下,碳钢的腐蚀失重与时间的关系。从试验结果可以看出:a. 没有SRB菌种或单独接有SRB菌种,金属的腐蚀速度变化不大;b. 没有SRB菌种,但配有定量的FeS时,金属的腐蚀速度增加;c. 当SRB菌种与FeS同时存在时,其金属的腐蚀失重猛增。这说明SRB本身对金属腐蚀的影响并不是至关重要的,但是当水中含有硫化物时,对金属的腐蚀相当严重。

表2 各种厌氧条件下碳钢的腐蚀失重与时间的关系

编号	不同的体系	不同时间每块钢片的失重(mg)				
		5周	10周	15周	20周	30周
1	无菌培养基	15		23		
2	接菌种培养基	15		28		
3	无菌培养基+FeS	30	89		209	
4	接菌培养基+FeS	18	34		46	
5	接菌培养基+FeS	109	169		324	313

在注水时,为了减缓金属腐蚀速度,世界上各油田对注入水中SRB控制都比较严格,原则上应不含SRB,但在实际应用上要求注入水中的SRB小于 $10^2$ 个/mL。

③水中游离 $CO_2$ 对腐蚀的影响。从图4( $O_2$ 含量0.2~0.3ppm, $H_2S$ 含量为0,试验温度45~50℃)的试验可以看出, $CO_2$ 含量增加,腐蚀速度增大,而且影响逐渐趋于平缓,根据腐蚀速度要求,应控制在10mg/L以下。

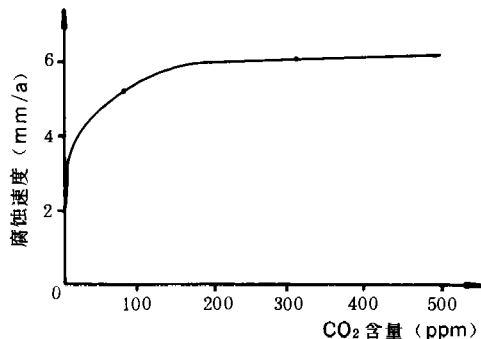


图4  $CO_2$ 对腐蚀的影响

6. 结垢对注水系统的影响 分别取轮南1水源并清水与轮南油田地层水按不同比例混合,在 $71 \pm 1^\circ C$ 恒温72小时,用失钙法测定 $CaCO_3$

和  $\text{CaSO}_4$  结垢 倾向,测定结果(见表 3)表明:(1)在  $71 \pm 1^\circ\text{C}$  温度下,清水有  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{CaSO}_4$  结垢趋势;(2)污水和不同比例的清水混合不结垢。

表 3 结垢趋势评定试验结果

地 层 水 : 淡 水	0:10	10:0	1:9	2:8	3:7	5:5	7:3	8:2	9:1
未加热水消耗 0.01M EDTA (mL)	0.83								
加热后消耗 0.01M EDTA (mL)	0.55	不	不	不	不	不	不	不	不
结垢量(计算值) (mg/L)	22.4	结	结	结	结	结	结	结	结
结垢率 (%)	33.7	垢	垢	垢	垢	垢	垢	垢	垢
水样体积 (m/L)	5	5	5	5	5	5	5	5	5

根据轮南油田污水分析,水中  $\text{SO}_4^{2-}$  为零,含有大量的  $\text{Ba}^{2+}$  和  $\text{Sr}^{2+}$ ,这种水和含有一定量的  $\text{SO}_4^{2-}$  水混合不结垢。因为污水中含有 60.4mg/L 的  $\text{CO}_2$ ,pH 值为 6.2,所以必须查清那几口井并含有  $\text{Ba}^{2+}$  和  $\text{Sr}^{2+}$ ,防止这种水与高含  $\text{SO}_4^{2-}$  的水混合时,由于温度、压力、pH 值的变化而形成  $\text{BaSO}_4$ 、 $\text{SrSO}_4$  结垢,这种垢一旦形成,除掉是非常困难的。最好的办法是防止这两种水相混合。

(三)确定合理的注入水水质标准

要保证达到“三不”要求及注水开发方案的顺利实施,必须严格合理地控制注入水水质。根据以上的试验及计算,结合该油藏储层特点,制定了注入水水质标准(见表 4)。

表 4 注入水水质标准

项 目	悬浮物			含铁	溶解气	含油	腐蚀率	细 菌		$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{S}$
	含量	膜滤	粒径					SRB	TGB		
油 田	(mg/L)	系数	( $\mu\text{m}$ )	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mm/a)	(个/mL)	(个/mL)	(mg/L)	(mg/L)
轮南油田	<1.5	$\geq 15$	<2	<0.5	<0.025	<10	<0.076	$\leq 10^2$	$\leq 10^2$	$\leq 10$	$\leq 10$
部颁标准	<3.0	$\geq 15$	<3	<0.5	$\leq 0.05$	<10	<0.076	$\leq 10^2$	$\leq 10^3$	$\leq 10$	$\leq 10$

二、“三不”工艺措施

根据轮南油田水样分析结果,要达到“三不”水质标准,必须对注入水进行除氧、防垢、杀菌、净化等处理工艺。

(一)精细过滤

机械杂质浓度和颗粒粒径是衡量注入水水质的主要指标之一,要达到注入水水质标准,机械杂质浓度应小于 1.5mg/L,粒径小于  $2\mu\text{m}$ ,目前必须依赖于精细过滤。国内精细过滤装置共有 3 种:(1)峰房式管状滤芯过滤器;(2)纤维球过滤器;(3)微孔烧结管过滤器。

以上 3 种精细过滤装置以微孔烧结管过滤效果最佳。

(二)除氧隔氧

氧气是产生腐蚀的重要因素。目前除氧、隔氧的方法比较多,国内几个油田使用的方法主要有以下几种:

(1)天然气和氮气密闭隔氧,华北油田采用天然气密闭隔氧,取得了比较好的效果。

(2)柴油密闭隔氧,长庆马岭油田采用柴油密闭流程,实现了密闭注水流程,水中溶解氧含量在 0.05mg/L 以下,达到良好的隔氧效果。

(3)南海涠10-3油田对海水采用物理和化学方法综合脱氧,即设置真空脱氧塔及添加脱氧剂,含氧量低于0.01mg/L。

### (三)管道容器的防腐涂层

为了防止管道及容器的内腐蚀,管道容器除采用阴极保护外,还可采用环氧树脂喷涂衬里内涂层,或管道装强磁防垢器。可选用包头磁性材料厂生产的WC-1型磁化防垢器。

### (四)投加杀菌剂

原水源中含有大量的SRB和TGB,同时油田开采过程中也会有大量的细菌生成,因此需要筛选高效杀菌剂和投药量,按时按量投药杀菌。

### (五)投加缓蚀剂和阻垢剂

水源中除细菌和游离氧外,还存在着大量的 $\text{CO}_2$ 、 $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 等,会产生严重的腐蚀和结垢现象,需要筛选缓蚀剂和阻垢剂并按时按量投放。

### (六)化学剂的配伍性

在注水过程中,需要投加杀菌剂、缓蚀剂、脱氧剂及阻垢剂等多种化学药剂。当多种化学药剂同时使用时,可能会发生药剂的不配伍现象,从而产生沉淀物,因此在投加多种化学药剂以前一定要做配伍性试验。

### (七)监测系统

先进可靠的监测方法是达到水质标准的重要保证。因此对悬浮物、溶解氧、腐蚀速率及细菌等都要按时、定期地进行监测。

根据上述分析可得出以下几点结论:

1. 根据“三不”要求,轮南油田三叠系一油组油藏注入水的水质是实现“三不”的关键,必须严把水质关,达不到水质要求坚决不能注入油层。
2. 除了对注入水质严格处理外,还要有一套先进的监测技术和系统的管理措施,才有可能实现注水井“三不”要求。
3. 根据水质要求和计算分析结果,三年内可以达到不洗井、吸水能力下降小于 $\frac{1}{3}$ 的效果。
4. 污水中存在着 $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ ,一定要防止产生难以除去的 $\text{BaSO}_4$ 和 $\text{SrSO}_4$ 结垢。
5. 不洗井是相对的,只是洗井周期比较长,可以不建单独洗井流程,建议配一台吉林油田生产的XJC-30型洗井液处理车。
6. 以上论证是针对轮南油田特点提出的,仅供现场工作者参考。

(本文收到日期:1991年12月29日)

[本文责任编辑 万冰蓉]