

# 防砂酸化技术研究与应用

王德盛

中油辽河油田公司高升采油厂工艺研究所

DOI: 10.12238/jpm.v4i11.6393

**[摘要]** 针对目前高升油田的油井采取常规酸化措施后, 出砂井出砂加剧的问题, 研究应用了出砂井防砂酸化技术。该技术对近井地带固砂、远井地带的解堵效率起到优化作用, 对于进一步改善高升油田的开发效果、提高其采收率具有重要意义。

**[关键词]** 防砂; 酸化技术; 增油; 研究与应用;

## Research and application of sand prevention and acidification technology

De-sheng wang

(Technology Research Institute, Gaosheng Oil Production Plant, CPC Liaohe Oilfield Company, Liaoning Panjin 124010)

**[Abstract]** In view of the problem of conventional acidification measures in the oil well of Gaosheng oil field. This technology optimizes the efficiency of sand fixation and remote well in the near well zone, which is of great significance to further improve the development effect and improve the recovery of the high-rise oil field.

**[Key words]** sand control; acidification technology; oil increase; research and application;

### 引言

目前高升采油厂总开井 683 口, 其中出砂生产井 417 口, 出砂比例为 61.05%, 通过常规油井酸化解堵措施能够解除近井地带无机污染堵塞。但是近几年大量油井在酸化解堵后逐渐暴露以下问题, 严重影响到措施效果: 油田进入开发中后期, 油井出砂越来越严重, 部分油井受污染后又不得不实施酸化措施, 酸液进入地层后破坏岩石骨架, 导致酸化后加剧出砂, 造成油井不能正常生产, 有的井甚至因出砂卡泵、卡管而造成大修, 据统计, 此类井年平均 5 口, 年损失产量约 3000t。这个问题已经严重制约了油井酸化大规模实施。

### 1 现状分析

目前, 针对防砂酸化技术的研究不多, 但对于防砂和酸化的单独研究较多, 防砂技术有化学防砂和机械防砂, 酸化技术有多氢酸、缓速酸和新型多氢酸等。近年来, 对于氟硼酸防砂技术, 由于其兼顾酸化和防砂两项特点, 科研人员对它的研究较多。氟硼酸防砂技术最早来自于地层酸化技术, 在用氟硼酸对地层进行酸化的过程中发现: 经过酸化后的地层, 渗透率提高, 产量增加, 最为主要的是能够减少油井细粉砂出砂, 增加油井的开采周期。

用氟硼酸治理油层出砂的机理是通过氟硼酸的水解产生的氢氟酸与地层矿物发生化学反应来稳定油层矿物, 减少油层矿物微粒位移, 减少油井出砂, 由于氟硼酸水解反应速度较慢, 可以使处理液能够深入油层, 提高固砂波及范围, 增加油层产

量, 延长油井生产周期。针对氟硼酸与地层矿物的化学反应机理, 国外研究单位都进行了深入研究。国内应用氟硼酸防砂报道来至于早期玉门油田在治理油层出细粉砂和粘土的防治。玉门油田在对地层进行深度酸化过程中, 不但油井产量增加, 同时油井出砂也得到了大大的改善, 在此基础上开展了氟硼酸防砂的油井治理措施, 并取得了较好的实验效果。氟硼酸防砂的机理主要是通过氟硼酸对地层粘土的稳定和地层微粒与岩石的胶结作用, 从而减少了地层出砂。

随着油井防砂和酸化技术的发展, 油井防砂和酸化技术已从以前的单一技术发展到今天的全方位、综合性的工艺技术, 两项成熟技术的结合对油田的稳产和增产起到一定的积极作用, 需要对其进一步研究。

### 2 防砂酸化技术研究

#### 2.1 油井出砂机理研究

从理论上分析油井出砂是指油井内随油井开采过程中液体的产出而产生砂粒的产出过程。油井出砂来至于油层中的矿物, 不同的地层矿物组成产生的油井砂也不同。因此油井出砂受油层矿物的性质控制, 一般认为是由于地层矿物环境发生改变才导致地层砂的产生。

油井出砂从宏观上看是由于地层岩石受到地层压力、水平应力及地层孔隙压力的联合作用, 在油井未被开采前, 各种应力处于平衡状态, 当油层被开采后地层中的应力结构发生改变, 导致地层岩石受到破坏, 岩石破坏主要有两种方式: 剪切

破坏和拉伸破坏。

剪切破坏是大多数油井出砂的基本机理,通常以岩石力学的 Mohr-Coulomb 破坏准则为基础,剪切作用是由油井射孔井眼周围应力作用的结果,主要是由于生产压差引起的,由于井筒及射孔孔眼附近岩石所受周向应力及径向应力差过大,造成岩石剪切破坏,离井筒或射孔孔眼的距离不同,产生破坏的程度也不同,从炮眼向外可依次分为:颗粒压碎区、岩石重塑区、塑性受损区及变化较小的未受损区。若岩石的抗剪切强度低,抵抗不住孔周围的周向、径向应力差引起的剪切破坏,井壁附近岩石将产生塑性破坏,引起出砂。

形成剪切破坏的主要因素是油藏压力的衰减或生产压差过大,如果油藏能量得不到及时补充或注水效果差或者生产压差超过岩石的强度,都会造成地层的应力平衡失稳,形成剪切破坏。拉伸破坏是岩石出砂的另一个机理,该机理认为由于油层流体流动产生的径向拉力超过岩石的抗拉强度时,岩石就会产生拉伸破坏。拉伸破坏机理是由于井底液体产出过程对于岩石的拖曳作用引起的。流体由油藏渗流至井筒,沿程会与地层颗粒产生摩擦,在井筒周围压力梯度及流体的摩擦携带作用下,岩石承受拉伸应力,流速越大,摩擦力越大,施加在岩石颗粒表面拖曳力越大,当此力超过岩石的抗拉强度时,岩石发生拉伸剥离破坏。

在实际生产中,油井出砂是两种作用共同作用的结果,两种机理共同作用并相互影响。受剪切破坏的地层,地层岩石的强度遭到破坏,岩石的抗拉强度降低,由于生产井井眼周围压力梯度产生的压差造成岩石破碎,而压力梯度直接影响流体的流速,压力梯度的增大必然导致流体流速的增大,从而增加流体与地层矿物的摩擦力,加大了流体的拖曳力,造成对地层的拉伸破坏。因此剪切破坏严重的地层会对流体的拖曳力更加敏感。

油井出砂的微观机理认为出砂是由于地层流体流动时对地层岩石颗粒的冲蚀作用而引起的。流体流经砂体表面时,对砂石表面产生的摩擦力是造成出砂的主要作用力,当砂粒未被胶结或胶结较弱时,单个砂粒就将从岩石上脱离下来随流体而发生移动,导致油井出砂。

## 2.2 油井出砂原因分析

油井出砂的机理研究指出油井出砂主要是由于岩石的剪切和拉伸破坏引起的油井出砂。在现实生产中,引起油井出砂的原因较多,从油井开钻到完井、投产,中间的许多因素都有可能造成地层的破坏引起油井出砂。从出砂原因分析,可分为先天性原因和开发因素。

先天性原因是指砂岩地层胶结矿物胶结岩石强度的强弱,一般来说,胶结矿物数量多、类型好、分布均匀、地质年代早,砂岩油气藏的胶结强度就大,反之就小。地层胶结物以钙质胶结为主的砂岩较致密,地层强度高。而以泥质胶结的砂岩较疏松,强度较低。胶结方式中以孔隙式胶结性能最好,其它如孔隙一接触式,接触式的胶结强度较低。颗粒的大小,形状及分选性也影响胶结强度,细的分选差而带有棱角的颗粒其胶结较

好(其它条件相同时),反之粗颗粒分选好的圆颗粒则表现为弱胶结。从岩石力学的角度分析,地层的胶结性质直接影响了岩石颗粒固有的剪切强度,低的地层强度是造成地层出砂的主要内在因素。岩石的固结力还包括地层流体与颗粒之间的毛细管作用力。毛细管作用力与地层流体的粘度、流体的饱和度、岩石表面的润湿性有关。含油饱和度越高,则胶结较好(其它对比条件相同),反之,则胶结程度下降,这是因为油相颗粒界面张力较大的缘故。原油粘度也对胶结强度产生影响,原油粘度越大,胶结强度大,岩石表面亲水性强,胶结性不好。

开发因素造成油气井出砂主要是由于不恰当的开采方式造成地层强度的变化引起的地层出砂。随着油气田开发期延续,油气层压力自然下降,储层砂岩体承载压力的负荷逐渐增加,致使砂粒之间的应力平衡破坏,胶结破坏,造成地层出砂。另外地层注水可能使储层中的粘土膨胀分散,有的还会随地层流体迁移使地层胶结力下降。油田开发因素导致油井出砂的原因有以下几个方面:

(1) 油层压力下降产生的油井生产压差导致油井出砂。地层压力是靠地层孔隙流体压力和岩石本身的强度支撑的,随着油井的开采,地层内流体逐渐被采出,造成了地层的亏空,地层压力下降,上覆岩层压力增加了对地层岩石的应力,这种应力会使得岩石发生破坏,导致油井出砂。

(2) 地层流体流速对出砂的影响。对于疏松砂岩岩层来说,常常是速敏性较强的地层,当地层内流体低于临界流体流速时,虽然地层内部微粒也会位移,但这种微粒会在油层内部形成砂拱,进一步阻止地层出砂,在一定程度上还有益于地层的防砂。但当流体流速进一步提高时,微粒位移的砂拱逐渐增大,同时稳定性降低,进一步提高流体流速时,砂拱将被破坏,造成油井出砂。随着流速的增加,出砂越来越严重。

(3) 油井注水开采时,注水对油井出砂的影响。当油井进行注水开采时,一方面由于注水恢复了一定的地层压力,有利于地层的保护,同时另一方面由于外来流体对地层的作用可能导致地层的伤害,引起地层出砂。从岩石力学角度看,对地层注水时,地层孔隙含水上升,地层颗粒间毛细管力下降,地层强度下降。由于注水过程中注入水对岩石的冲刷作用导致地层岩石受流体拖曳力的影响而产生岩石破坏,容易造成地层岩石的破碎而引起地层出砂。由于注入水的加入,也可能引起地层中粘土矿物的膨胀,粘土矿物的胶结性降低,更容易产生油井出砂和油井孔隙的堵塞。

(4) 外来因素造成的地层伤害对出砂的影响。在油井的钻井、完井、开采过程中由于各种外来因素的影响均有可能对地层结构造成破坏,引起地层伤害,造成地层出砂。一方面是外界条件对地层的影响,主要包括压力、温度、酸碱度等因素引起的地层物性的改变,另一方面是外来物质对地层的伤害,包括钻井液、完井液、射孔弹等都可能带来外来物质进入地层,这种外来物质的进入,有可能对地层的孔隙度起到有益的作用,也有可能造成地层孔隙的堵塞,降低地层的渗透率,造成

地层岩石强度的破坏导致油井出砂。

### 2.3 酸液体系的确定

化学防砂技术中氟硼酸具有一定的防砂功能，防砂的机理主要是通过氟硼酸对地层粘土的稳定和地层微粒与岩石的胶结作用。同时，新型多氢酸在酸化过程中，对地层有一定的保护作用，避免了地层二次沉淀，因此，酸液体系选择为氟硼酸和新型多氢酸。

氟硼酸使用浓度的确定：在温度为 50℃ 条件下，测定不同浓度氟硼酸对岩心粉的溶蚀，实验结果见图 1。

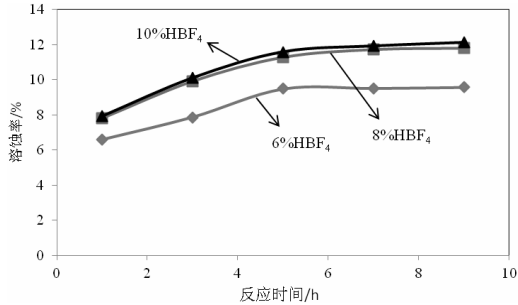


图 1 不同浓度氟硼酸对岩心粉的溶蚀率

从图 1 可以看出，氟硼酸浓度为 8% 时，溶蚀率和浓度为 10% 的相差不多，因此，选择氟硼酸的使用浓度为 6%~8%。

### 2.4 化学固砂剂的筛选和评价

出砂井防砂在这里选择化学固砂法，首先通过固化温度这一标准对固砂试剂进行初步筛选，再进行固化时间以及生产成本等多个方面的因素综合考虑后选定了糠醛树脂，该树脂的固化温度范围较广，在 40℃~350℃ 范围内都可以固化，具有一定的耐温性。

#### 2.4.1 固砂剂加量对固化反应的影响

糠醛树脂的固化剂采用氯化铵试剂，按照石英砂的重量比，氯化铵的加量范围确定在 1~3% 之间，糠醛树脂的加量在 4~12% 之间，优选出八组配量进行实验。取一定量的上述石英砂于搅拌器中，分别加入固化剂，树脂等处理剂后搅拌均匀，后在钢管模具中制作固结岩心，固化温度为 50℃，固化时间为 24h。测定固结样品抗压强度，实验结果见表 1。

表 1 固砂剂加量对固化反应的影响

固化剂: 树脂	抗压强度 /MPa	固化剂: 树脂	抗压强度 /MPa
1:4	9.88	1.5:6	18.74
1:5	12.63	2:4	11.22
1.5:4	14.75	2:5	13.14
1.5:5	15.92	2:6	18.55

从表 4-51 可以看出，不同加量制作的固结体岩心的抗压强度基本上都在 10MPa 以上，当固化剂:树脂=1.5:6 时，抗压强度可以达到 18.74MPa。

#### 2.4.2 固化时间对固化反应的影响

取一定量的上述石英砂于搅拌器中，分别加入固化剂，树脂等处理剂后搅拌均匀，后在钢管模具中制作固结岩心，固

温度为 50℃，通过改变固化时间来评价其对固化反应的影响，结果见图 4-52

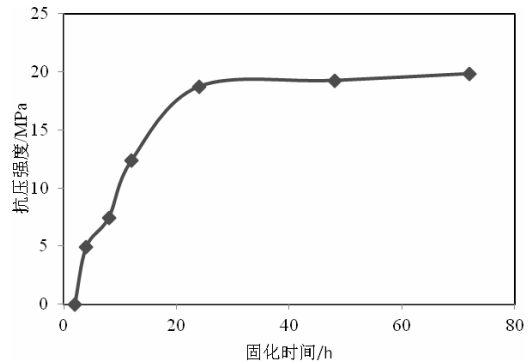


图 2 固化时间对固化反应的影响

从图 2 可以看出，随着固化时间的延长，岩心的抗压强度逐渐增大后趋于平稳；固化时间为 24h 时，抗压强度为 18.72MPa，再延长固化时间，抗压强度值变化不大。

#### 2.4.3 固化温度对固化反应的影响

取一定量的上述石英砂于搅拌器中，分别加入固化剂，树脂等处理剂后搅拌均匀，后在钢管模具中制作固结岩心，选择标准固化时间为 36h，通过改变固化温度来评价其对固化反应的影响，结果见图 3。

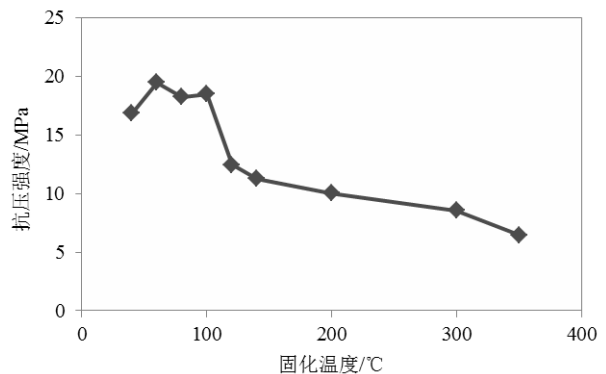


图 3 固化温度对固化反应的影响

从图 3 可以看出，在温度为 100℃ 以内时，固化后岩心的抗压强度都在 15MPa 以上；在温度范围为 200℃~350℃ 时，岩心的抗压强度为 6.47MPa~10.02MPa，大于高温防砂剂规定标准 4.0MPa，说明糠醛树脂在高温环境下具有一定的稳定性。

#### 2.4.4 岩心冲砂出砂率评价

通过对固结岩心样品进行大流量长时间的冲砂实验，冲水量为 30mL/min，上端压力维持在 3MPa 左右，研究固结后的地层能否稳定不出现骨架结构跨塌的情况，实验结果见表 2。

表 2 岩心冲刷出砂率评价

冲刷时间/h	出砂量/g	出砂率/%
24	0.2418	0.11
36	0.4177	0.19
48	1.0560	0.48

从表 2 可以看出，冲刷时间达到 48h 时，出砂率为 0.48%，

出砂率较小, 说明糠醛树脂的固砂效果较好。

### 2.4.5 固化岩心渗透率的变化率

将松散石英砂倒入岩心模具中, 用 2MPa 的压力压制岩心 3 分钟后, 测定松散岩心溶液渗透率, 然后将砂子取出烘干, 加入固砂剂的最优加量, 混合制成岩心, 用同样的方法测定渗透率, 评价其渗透率变化率, 实验结果见表 4-55。

表 3 固化岩心渗透率的变化率

初始渗透率/mD	固砂后渗透率/mD	渗透率伤害率/%	孔隙度/%
3042	2337	23.18	32.4%

从表 3 可以看出, 固化后岩心渗透率的伤害率为 23.18%, 孔隙度较大, 为 32.4%, 说明固砂剂的固砂效果较好。

### 3 现场应用情况

配方体系研究成功后, 在现场开展了技术应用, 在高升采油厂共实施了酸化防砂 5 井次, 其中有 1 口井待转抽, 目前, 措施投入 69.26 万元, 阶段增油 3107.7t, 投入产出比为 1:9.2。

典型井: 高 2-4-016 井高 24016 为 2015 年新井, 为高 18 块井, 2017 年 4 月、6 月连续砂卡, 生产时率较低, 探砂为地层细粉砂, 防砂难度大, 另外, 该井在砂卡的两次检泵后, 产量快速递减, 分析认为存在检泵污染。如果采用常规酸化, 将加剧出砂, 油井可能无法正常生产, 因此在该井应用了酸化防砂技术。

该井油层薄 (2.4m), 泥质含量高, 且出砂严重, 卡泵频繁, 采用多氢酸先将储层污染解除, 然后采用固砂体系对近井周围进行固砂, 形成挡砂屏障, 降低酸化后出砂风险。

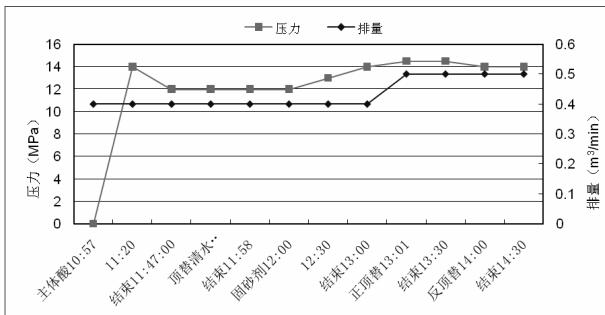


图 4 高 24016 施工曲线

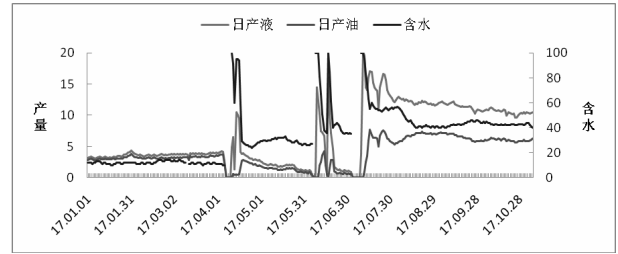


图 5 高 24016 生产曲线

从施工曲线看, 注入解堵剂时, 压力先升后降, 解除了污染, 注入固砂剂后, 压力开始缓慢上升, 说明在近井地带实现了一定的封堵。转抽后, 产量快速上升, 平均日增油 5.2t, 延长检泵周期 68d, 阶段增油 605t。

### 4 结论

(1) 通过积极探索、勇于创新、不断完善、使该项高效生产作业技术在现场施工中取得了较好的效果, 同时不断的优化施工工艺参数, 真正做到防砂和增油的目的, 使其发挥了最大效能, 取得了良好的经济效益和社会效益。

(2) 酸化防砂技术的成功应用, 不但解决了困扰高升油田的出砂问题, 使区块产量大幅度提高, 开发效果得到明显改善, 为高升油田的高效开发提供了技术支持, 具有显著的社会效益, 同时也为解决类似问题提供可借鉴的经验。

### 【参考文献】

[1]张秀波.泥质疏松砂岩防砂参数优化研究[J].科技与企业,2014,(5):180-180.  
 [2]周杰.疏松砂岩油藏防砂工艺研究及应用[J].内蒙古石油化工,2008,34(12):124-125.  
 [3]李宇波.酸化防砂一体化技术的研究及现场应用[J].内蒙古石油化工,2010,36(24):150-150.doi:10.3969/j.issn.1006-7981.2010.24.074.