

氮气泡沫在稠油油藏的堵水效果分析

葛会光

辽河石油勘探局有限公司石油华农技术服务分公司

DOI: 10.12238/jpm.v5i7.7002

[摘要] 氮气对于边底水较活跃的油藏,可以起到抑制底水锥进的作用,降低油井综合含水,其机理是利用油水粘度差,氮气优先接触水锥,使其向油层下部转移,油水界面降低,在重力分异作用下,注入的氮气就会进入微构造高部位形成人工气顶,增加地层能量,驱替顶部原油向下移动。驱替并形成隔热层,有利于提高整体热效率。

[关键词] 氮气; 隔热层; 底水锥进; 油水粘度; 热效率

Analysis of water blocking effect of nitrogen foam in heavy oil reservoir

Ge Huiguang

Liaohe Petroleum Exploration Bureau Co., LTD. Petroleum Huannong Technical Service Branch

[Abstract] nitrogen for edge bottom water more active reservoir, can have the effect of inhibiting bottom water cone into, reduce the oil well integrated water, its mechanism is the use of oil and water viscosity, nitrogen priority contact water cone, make it to the lower layer, lower, under the action of gravity separation, the injected nitrogen into micro structure high formation of artificial gas top, increase formation energy, drive for the top crude oil move down. Drainage and forming a thermal insulation layer is conducive to improving the overall thermal efficiency.

[Key words] nitrogen, heat insulation, bottom water cone inlet; oil-water viscosity and thermal efficiency

1 油田基本情况

油田为受断裂遮挡的构造-岩性油藏,主要含油层系为中侏罗统 J2 地层,油层埋深在 250m-310m 之间,沉积类型以三角洲前缘的水下分支河道为主,孔隙度 41.4%、渗透率 $2154.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层属特高孔、特高渗储层,非均值性强,地面原油密度 0.9452g/cm^3 ,原油粘度 $3251\text{mPa}\cdot\text{s}$,地层水矿化度为 5231mg/l 。油田发育边、底水,水体比较活跃,大小约为油藏原体积的 4-11 倍,随着稠油吞吐热采进入中高轮次阶段,油藏边底水侵入严重,回采水率由第一周期的 0.76 升高到第四周期的 2.50,含水率由热采初期的 50%升高到 78%,含水率 90%以上的油井占总井数的 40%。针对油田边底水稠油开采过程中,边底水的渗透严重制约了稠油开采步伐,通过调研发现,氮气泡沫堵水技术比较适合目前油田开发的需要。

2 氮气泡沫堵水原理

氮气对于边底水较活跃的油藏,可以起到抑制底水锥进的作用,降低油井综合含水,其机理是利用油水粘度差,氮气优先接触水锥,使其向油层下部转移,油水界面降低,在重力分异作用下,注入的氮气就会进入微构造高部位形成人工气顶,增加地层能量,驱替顶部原油向下移动。驱替并形成隔热层,有利于提高整体热效率。泡沫粘度高且高温稳定,是一种水基选择性封堵剂,优先进入含水饱和度高的地层,在该层起封堵作用。它在含水饱和度高的地层能稳定存在,在含油饱和度高的地层则不能稳定存在,因表面活性剂优先吸附在油水界面上,使泡沫的气-液表面失去表面活性剂的保护而合并,导致

泡沫破坏。另外,当泡沫进入水淹层后,由于贾敏效应,微泡在孔道内形成气锁,气锁现象是可以叠加的,层层气泡的堆积则形成了横放的金字塔形状,达到了封堵的作用,而且它的封堵能力随渗透率增加而增大,泡沫优先进入渗透性好的大孔道,它在大孔道中流动具有较高的视粘度,流动阻力随注入量的增加而增大,当增加到超过大孔道中的渗流阻力后,便越来越多的流入小孔道,泡沫在小孔道中的流动视粘度低,小孔道中含油饱和度高,泡沫稳定性差,从而起到了堵水不堵油的作用。

3 起泡剂性能评价

对实验所用的耐高温起泡剂进行性能评价,主要评价耐高温起泡剂的起泡能力、泡沫稳定性以及在 50°C 和 350°C 条件下封堵性能。采用搅拌法,以起泡体积和半衰期为评价指标,对其起泡能力和泡沫稳定性进行了研究,在 20°C 温度下,100mL 质量分数为 0.5% 的泡沫溶液以 3000r/min 的转速高速搅拌 1min,形成 690mL 泡沫,半衰期可达 144min。表明该起泡剂具有良好的起泡性能和泡沫稳定性。封堵性能评价所用的填砂管模型尺寸为: $\phi 25\text{mm} \times 600\text{mm}$,填砂管的水测渗透率为 $2.5 \mu\text{m}^2$ 。评价指标为阻力因子,阻力因子是泡沫封堵前后填砂管驱替压差的比值。实验中注入速度为 1mL/min ,首先测量地层水驱替填砂管稳定时的压差,之后测量氮气泡沫(气液体积比为 1:1)注入后填砂管的驱替压差,计算得到阻力因子后,随后再以同样的流速注入地层水,直到驱替压力稳定时为止,计算得到残余阻力因子,在 50°C 和 350°C 条件下均表现为泡沫阻力因子随

着泡沫注入量的增加而增大，但在注入相同体积泡沫时，50℃时的阻力因子要比350℃时大得多，表明泡沫的封堵性能随着温度的升高而显著降低。但在350℃时，泡沫的阻力因子仍可达到49，远远大于地层水突破所需的最小阻力因子4。在注入泡沫后继续注入地层水，阻力因子会有所降低，但降低幅度较小，在50℃时，注入4PV的地层水后阻力因子从120降到了81，在350℃时阻力因子从49降到了33，阻力因子保留率仍可达到67%。因此，所使用的耐高温起泡剂在低温和高温下都能有效地封堵水侵通道，并且其封堵有效期较长。

4 氮气泡沫堵水技术影响因素及应用条件

4.1 氮气泡沫堵水实验设计

根据目标油田边水稠油油藏的特点，设计了一种可以模拟边水的实验装置，利用该装置研究了氮气泡沫堵水技术的影响因素和应用条件。影响因素考虑了储层水侵程度（参数为周期吞吐含水率）、边水能量（参数为边水压力）、原油黏度、储层非均质性和注入方式。通过对影响因素的研究，可以明确该技术的应用条件。该实验装置由3个部分组成：油藏模拟部分、边水模拟部分和注入流体部分。油藏模拟部分由两个填砂管组成，所用填砂管尺寸为 $\phi 50\text{mm} \times 1000\text{mm}$ 。边水模拟部分由1个中间容器和1个恒压气泵组成，中间容器充满地层水。注入流体部分由蒸汽发生器、高压氮气瓶、泡沫剂容器和恒流泵组成。实验装置见图2。实验温度为50℃，所用水为目标油田的地层水，所用原油为P8H的油样，蒸汽注入温度为340℃。实验步骤如下：

- (1) 连接实验装置，检查装置气密性；
- (2) 先用地层水饱和填砂管，然后再用原油饱和填砂管；
- (3) 准备注蒸汽，当蒸汽温度满足要求时，将蒸汽连接到装置上，然后向装置注入蒸汽30mL；
- (4) 关闭注蒸汽阀门，并焖井2min；
- (5) 打开边水模拟部分阀门开始生产，无油采出或者吞吐含水率达到98%时停止，记录生产过程中的油体积、水体积和生产时间，计算产油量和吞吐含水率；
- (6) 重复(3) - (5)，直至吞吐含水率分别达到70%、80%、90%（模拟不同水侵程度）；
- (7) 先注入氮气段塞，再注入氮气泡沫段塞，再注入蒸汽段塞；
- (8) 关闭注蒸汽阀门，并焖井2min；
- (9) 打开边水模拟部分阀门开始生产，无油采出或者吞吐含水率达到98%时停止，记录生产过程中的油体积、水体积和生产时间，计算产油量和吞吐含水率；
- (10) 重复(7) - (9)直至吞吐含水率达到98%后停止实验。

4.2 氮气泡沫堵水技术影响因素

4.2.1 水侵程度的影响

以周期吞吐含水率为评价指标，研究了储层水淹程度对该技术的影响。周期吞吐含水率越高代表储层水淹程度越严重，边水水侵越严重。所用原油为目标油田P8H井现场获取的油样，边水压力为5.0MPa，砂层模型渗透率为 $2.5\mu\text{m}^2$ ，共完成3组实验。注入氮气泡沫后，周期吞吐含水率会显著降低且降低幅度随着水淹程度的增加而增大，表明该技术针对水淹程度严重的储层控水效果最好。对比3组实验的采收率曲线也呈现同样的规律，分析认为主要原因是由于蒸汽吞吐采出水主要由蒸汽

冷凝水和侵入的边水组成，当周期吞吐含水率70%时采出水中以蒸汽冷凝水为主，此时边水的水淹程度较低，水侵通道较少，注入氮气泡沫封堵后蒸汽冷凝水依然会大量采出，周期吞吐含水率下降的幅度就相对较低，控水效果不明显，当周期吞吐含水率80%和90%时，边水水淹程度较为严重，此时注氮气泡沫能有效封堵水侵通道，显著降低周期吞吐含水率，控水效果较好。

严重水淹储层中边水水侵通道数量和体积要大于弱水淹和中水淹储层，同等条件下严重水淹油藏的边缘水侵水量要多得多。注入氮气泡沫后，堵塞了入侵通道，大大减少了入侵水量。由于侵入通道数的不同，严重水淹油藏的侵入水减少量远远大于弱水淹和中水淹油藏，因此氮气泡沫注入后严重水淹油藏的周期吞吐含水率减少程度更为显著。此外，严重水淹油藏的入侵通道含油饱和度较低，因此氮气泡沫封堵在严重水淹储层中更为稳定，蒸汽扩大波及体积和提高采收率效果更为显著。

4.2.2 边水能量的影响

以边水压力为参数研究了边水能量对该技术的影响，其中边水压力为5.0MPa时，对应边水水体倍数为10倍。所用原油为P8H井原油，填砂管渗透率为 $2.5\mu\text{m}^2$ ，周期吞吐含水率达到90%时注入氮气泡沫，共完成3组实验。实验结果表明：边水能量越强，边水水侵速度越快，边水突破时间越短。当边水压力为2.5MPa时，边水突破发生在第4吞吐轮次；当边水压力为10.0MPa时，第2吞吐轮次边水就发生了突破。边水压力为2.5MPa和5.0MPa时，氮气泡沫堵水效果显著，边水压力为10.0MPa时，堵水效果不佳。主要原因是氮气泡沫的封堵强度是有限的，当边水压力为10.0MPa时，注入的氮气泡沫不能有效封堵水侵通道，在强边水的驱动下会部分回采出来，堵水效果不佳。

5 氮气泡沫堵水在油田的应用

5.1 选进原则

- (1) 储层厚度大、油层物性好的井：优选储层厚度大于6m，油层孔隙度大于25%，原始含有饱和度大于70%的油井。
- (2) 剩余含油饱和度较高的井：优选剩余含有饱和度大于60%的井。
- (3) 选择前期（第1、第2轮次）吞吐生产效果较好，但后期产量下降，含水明显升高的井。
- (4) 含水持续在90%以上，且邻井含水较低、生产效果好的井。
- (5) 水质全分析矿化度较高的井。油田地层水矿化度为5231mg/l，锅炉水的矿化度为2296mg/l，油井水质矿化度大于5000mg/l，可确定该井已被水淹。
- (6) 井况较好，固井质量合格的井。

5.2 应用效果

在油田选取油层厚度大，储层物性好，剩余油富集，井况正常的高含水井进行氮气泡沫堵水试验。现场试验实施了435、459、436等8口高含水井，均见到明显的增油效果，平均单井日产油量比试验前提高了17倍，含水下降40%，平均有效期213天，试验8口井累计增油达14536.8t。其中435井储层厚度18m，油层孔隙度30.9%，原始含油饱和度78.1%，储层物性较好，投产初期日产油23.8t，含水33.9%，第1、第2轮吞吐生产效果较好，进入第3轮后含水异常升高，含水率由40%快速升高到100%，并持续高含水，对比周围邻井均正常生产，含

水在60%以下，取样水质样品矿化度5563mg/l(地层水矿化度5231mg/l)，确定底水锥进。2015年10月针对435井底水锥进高含水，首先开展了氮气泡沫堵水试验，通过注蒸汽通道以高压的方式注入氮气10000m³，提高近井地区的压力，促使近井地带水锥下移，挤注泡沫凝胶35m³(表面活性剂+耐高温树脂凝胶液)，封堵近井串流孔道，抑制底水锥进，再注入氮气5000m³，增加地层能量，驱替顶部原油，形成隔热层，完成施工后注入蒸汽热采。措施实施后435井底水锥进得到有效控制，8天排水期，稳产11个月，日产油大于10t维持7个月，最高日产油达到25.4t，稳产期含水保持在60%左右，含水率最低达到11.0%，单井日产量增加10.9t，含水下降44%，措施有效期322天，增油3326.9t。

上接第149页

4.4 河流沉积物管理案例研究

以三峡水库为例。三峡水库是世界上最大的水库之一，长江上游的沉积物输入量巨大，造成了水库充满沉积物的问题。为了有效管理沉积物，保护水库功能和水资源可持续利用，采取了多种管理措施。

(1) 采取了定期的清淤工程，通过机械疏浚和人工清污等方式，将沉积物从水库中清除，以增加库容和恢复水流通畅性。

(2) 做好源头管理，加强上游土壤保持和防治措施，减少土壤侵蚀和泥沙输入，降低了沉积物的输入量。

(3) 针对沉积物的再利用，进行了研究开发，将沉积物转化为建筑材料和土壤改良剂等，实现了资源的可持续利用，减少了废弃物的产生。

在管理措施实施后，三峡水库沉积物的有效控制和管理取得了显著效果。水库的库容得到了恢复，提高了水电发电效率和防洪能力。同时，沉积物的再利用也减少了自然资源的消耗，并为相关产业提供了新的利用途径。

这个案例显示了在大型水库管理中如何有效地管理沉积物，保障水资源和环境的可持续发展，具有一定的借鉴意义和实践价值。

5 结论

上接第151页

施营销策略：利用自然语言处理和语音识别技术，提供智能化的客户服务，推动传统营销模式创新^[5]。

其次，利用人工智能技术，实现产品的智能化设计与开发，挖掘市场数据信息，预测产品的市场需求趋势，制定产品开发和制定营销策略，推动传统产品开发模式创新，从而提升产品性能和质量。

最后，人工智能技术分析客户需求与偏好，为客户提供个性化服务与解决方案；利用人工智能技术监测和评估服务质量，及时发现问题，提升服务质量，可以利用大数据分析和机器学习等技术，收集更准确、全面的数据，确定特定产品是否能真正满足客户需求，判断创新后的产品是否能满足目标客群的需求，提升企业产品设计与研发的成功率。

结语：

综上所述，人工智能时代下，企业管理变革是一个循序渐

6 结论

(1) 氮气泡沫堵水技术能有有效的封堵稠油油藏高含水目的层，抑制边底水锥进。

(2) 措施前后对比，日产油增加17倍，含水率下降40%。

(3) 氮气泡沫堵水施工简单，见效快，对边底水稠油油藏的开发具有指导意义。

(4) 水平井试验效果不理想，需进一步论证优化。

[参考文献]

[1]吴奇, 张义堂, 任芳祥.国际稠油开采技术论文集[C].北京:石油工业出版社, 2002: 300.

[2]王旭.辽河油区稠油开采技术及下步技术攻关方向探讨[J].石油勘探与开发, 2006, 33(4): 484-490.

河流沉积物对水资源的可持续发展具有重要影响，需要进行地质学评估和有效的管理措施。沉积物的形成和组成是评估其影响的基础，包括物理和化学特点、重要元素和矿物组成等。沉积物不仅对水质产生影响，还对水量、水动力学过程和水生生态系统造成影响。

为了管理河流沉积物，可以采取控制和管理策略，如河床治理、土地利用规划和管理、水土保持措施等。管理沉积物的处理技术包括沉积物的排除和稳定化，以及沉积物的可持续利用，可以实现资源的循环利用和最大化利用。

通过实际案例研究，如三峡水库沉积物管理，可见科学有效的管理措施能够实现沉积物控制和资源利用的目标，提高水库容量、水电发电效率和防洪能力。

综上所述，河流沉积物对水资源的可持续发展和管理具有重要意义。通过地质学评估和合理的管理策略，可以减少沉积物对水资源的负面影响，实现水资源的可持续利用，进一步促进健康的水资源管理和保护水生态环境的可持续发展。

[参考文献]

[1]袁瑞, 冯文杰, 张昌民, 等.长江武汉段天兴洲低滩沉积物粒度端元对河流—风成沙丘沉积环境的指示意义[J].地质论评, 2024, 70(02): 436-448.

[2]罗豪, 彭辉, 刘佳, 等.雅鲁藏布江上游支流沉积物的矿物组成特征[J].冰川冻土, 2023, 45(05): 1451-1462.

进的过程，需要企业考虑人工智能技术在企业管理各个环节和各个方面的应用，在细化企业管理内容和明确企业管理创新方向的基础上，推动企业管理与人工智能技术深度融合，发挥人工智能技术在企业管理中的最大作用。

[参考文献]

[1]姜莹.大模型技术对企业管理的影响探究[J].营销界, 2024, (03): 89-91.

[2]王琪.数字化转型背景下企业管理会计工具运用浅析[J].中国总会计师, 2023, (09): 136-138.

[3]黄静, 孙晶.人工智能环境下企业经营变革探析[J].华章, 2023, (07): 72-74.

[4]吴梦瑶.人工智能时代企业管理的融合发展与风险挑战分析[J].企业科技与发展, 2022, (04): 116-118.

[5]司晋华.人工智能时代企业管理变革的方法与路径[J].江西电力职业技术学院学报, 2021, 34(12): 139-140.