

调剖球研制及性能评价研究

王新亮 张 勇

中石化河南油田分公司石油工程技术研究院 河南 南阳 473132

摘要: 油田注水开发后期,受储层非均质性的影响,油藏纵向矛盾日益突出,注入水单层突进,致使中低渗油层储量难以有效动用。然而化学调剖剂量大、工作量大、费用高。投球调剖技术是成本低廉的调剖工艺,套变、大斜度、出砂、薄互层均适用,不动管柱,且调堵球可回收,无大修风险,调堵球只封堵炮眼,不影响储层,措施效果可通过补投、洗井等方式随时调整。

关键词: 注水;纵向矛盾;投球;调剖

作为一种创新技术,调剖工艺凭借其成本效益高、施工简便、适应性强等特点,成为了优化油田注水策略的有效选择。通过投放专门设计的调堵球,该技术能够在不进行大规模修井作业的情况下,精准地封堵那些导致水突进的炮眼,并且可以根据具体的油田状况进行实时的效果调整。本文将针对调剖技术的研发及其性能的评估进行深入探讨,旨在展现该项技术作为提高企业经营效率和油田开发质量的重要工具的潜力与价值,同时基于实际案例分析其不同地质条件下的应用效果,为油田注水开发提供新的解决思路和技术支持。通过本文的研究和分析,期望能够为油田综合调剖管理提供科学依据和参考,推动油田经营向更高效、更经济的方向发展。

1 技术现状

投球调剖并不是一项新技术,早年华北、大港、中原等油田有过应用,但措施有效期短、施工成功率低。调研发现:调堵球封堵率低,措施有效期短,停注即失效。分析原因是因为调堵球性能不达标及工艺参数设计不合理。

问题1:调堵球内部气泡造成同一密度批次的调堵球密度差极大,当停注后调堵球有沉、有浮,是造成停注失效的主要原因之一。

问题2:配方设计不合理,各原材料之间融合性不好,造成调堵球耐压强度低,注水压力将调堵球压碎,是造成措施有效期短的主要原因。

2 投球调剖技术研究

2.1 技术原理

投球调剖技术通过井口测试阀门投球,注入水携带调堵球至目的层,调堵球自主选择封堵强吸层炮眼,实现调整吸水剖面的目的。在注水管线安装投球装置或者用泵车投球,将调堵球投入井筒,调剖球受到液流的推动力作用,在注水水流及重力的作用下,向井壁方向运动。封堵高渗层,迫使注入水向中低渗层,能够有效的控制高渗层吸水量,提高中、低渗层的吸水量,从纵向上改变注水井的吸水剖面,提高注水波及系数。

2.2 调剖球配方研制与评价

2.2.1 调剖球的主材优选

调剖球密度 $0.98-1.05\text{g/cm}^3$ ($\pm 0.001\text{g/cm}^3$)可调,耐温 $\geq 120^\circ\text{C}$,耐老化性好等,通过对热塑性高分子材料的性质对比,优选HDPE为主材,HDPE为非极性结晶性高分子材料,熔点 135°C ,密度 $0.94-0.96\text{g/cm}^3$ 小于1,添加少量密度大于1的材料就可调控调剖球密度,软化点 $105-120^\circ\text{C}$,耐酸碱腐蚀,可回收利用。

表1 调剖球主体材料对比效果表

	高密度聚乙烯	聚丙烯	尼龙6	聚苯乙烯	聚碳酸酯
密度 g/cm^3	0.95	0.92	1.13	1.05	1.22
熔融温度 $^\circ\text{C}$	135	170	220	185	260
耐老化	√	√	×	√	×
热变形温度 $^\circ\text{C}$	120	100	80	100	130
能否选为基材	优选	可选	否	否	否

2.2.2 密度调节剂优选

密度调节剂的选择依据:密度大于1.05,密度相对较大,加入的量少。要和HDPE具有较好的相容性,尽可能

减小密度调节剂对基体树脂的力学性能的影响。氯化聚乙烯(CPE)为聚乙烯的氯化产物,和HDPE的相容性较好,少量CPE的加入会提高HDPE的冲击强度,而且其密

度为1.43，远超调剖球密度的上限值，故优选CPE为密度调节剂。

PVC软化点为80-85℃，密度1.35-1.45g/cm³，压缩强度55-85MPa。因此可以调整PVC与HDPE的混合比例使选堵球的密度为1.01g/cm³，而且耐热温度可到80℃。为了增加HDPE和PVC的相容性和共混材料的弹性，可以加入CPE作为增容增韧剂。

采用纳米无机粒子填充聚合物可利用无机纳米粒子

的刚性、尺寸稳定性和热稳定性，使聚合物的力学性能、加工性能以及电性能得到改善，起到补强、增韧、阻隔等良好改性效果，因此，采用纳米SiO₂、CaCO₃来填充HDPE获得性能优良的调剖球材料。

成功制备了密度可调、力学性能较优、容易成型加工的HDPE/CPE、HDPE/PVC/CPE共混材料以及HDPE/SiO₂和HDPE/CaCO₃复合材料，并对其性能进行评估，这四种材料均可用于制备调剖球。

表2 四种调剖球配方材料性能对比表

不同配方	密度调节	刚性	韧性	加工性	耐热性	耐压性
HDPE/CPE	满足要求	好	一般	容易	易变黄	满足要求
HDPE/PVC/CPE	满足要求	一般	低	容易	易变黄	满足要求
HDPE/SiO ₂	满足要求	一般	好	容易	好	满足要求
HDPE/CaCO ₃	满足要求	好	较好	容易	好	满足要求

3 HDPE/CPE 共混材料制备及性能评价

3.1 共混材料配方计算方法

根据原料混合后体积和不变原理，进行密度公式的演算。

$$m_1 = m_3 \cdot x \quad (1)$$

$$m_2 = m_3 \cdot (1-x) \quad (2)$$

$$V_1 = \frac{m_3 \cdot x}{\rho_1} \quad (3)$$

$$V_2 = \frac{m_3 \cdot (1-x)}{\rho_2} \quad (4)$$

$$V_3 = V_1 + V_2 \quad (5)$$

$$m_3 = V_3 \cdot \rho_3 \quad (6)$$

将式(1)、(2)、(3)、(4)、(5)带入式(6)中得出：

$$x = \frac{\rho_1(\rho_2 - \rho_3)}{\rho_3(\rho_2 - \rho_1)}$$

3.2 共混材料配方设计

总质量为300g，抗氧剂：0.5%，根据密度计算公式得出详细配方。

表3 HDPE/CPE共混材料的配方设计

共混材料密 (g/cm ³)	HDPE wt%	HDPE 质量 (g)	CPE 质量 (g)
0.98	89.71	269.13	30.87
1.00	83.98	251.94	48.06
1.01	81.32	243.96	56.04
1.03	75.81	227.43	72.57

3.3 HDPE/CPE共混材料的制备过程

将HDPE、CPE置于80℃烘箱中8小时，使原料充分

烘干。按照配方称料，装于自封袋中，滴入适量液体石蜡，摇晃自封袋，使原料混合充分。设定同向双螺旋杆挤出机，进行原料的共混挤出，得到共混材料长条。共混材料长条通过造粒机得到共混材料颗粒，将材料颗粒通过真空压膜机进行成型加工，为了避免CPE的氧化，成型温度设定为170-175℃。保压3分钟，不通冷凝水直接将样品取出，用做下一步的密度测试，避免CPE的氧化。

3.4 工艺参数调节与实验过程

HDPE的通常挤出温度为180-200℃，首次实验挤出机温度设置为：一区160℃，二区187℃，三区190℃，四区187℃，机头185℃，熔体180℃。结果实际密度均大于理论值。密度增大可能原因：(1)在材料制备过程中温度过高发生了氧化交联反应；(2)在材料制备过程中螺杆转速较快，剪切致使氧化降解。为了解决该问题，通过正交实验，改变熔体温度和螺杆转速分析密度增大的主要原因：

表4 工艺参数正交实验设计

熔体温度 (°C)	170	175	180	185	190	195
螺杆转速 (rpm)	60	70	80	90	100	110

得出结论：CPE在180℃以上容易氧化，CPE氧化是导致样品实际密度增大的主要原因，因此对熔融共混的温度即同向双螺旋杆挤出机各区温度做了调整。调整后见下表：

表5 调整后的挤出工艺参数

区位	一区	二区	三区	四区	机头	熔体
初始温 (°C)	160	187	190	187	185	180
改进温 (°C)	167	174	175	173	173	170
螺杆转速 (rpm)	100	100	100	100	100	100

3.5 HDPE/CPE共混材料密度的测定

作者简介：王新亮（1973-），男，2008年大学毕业，工程师，现主要从事稠油开发技术研究工作。

将实验过程所得的矩形长条进行密度测定。测定过程简述：矩形样条分为理论密度为1的两种和不为1的三种，测量理论密度为1的试样的实际密度时，浸渍液选为无水乙醇；测量理论密度不为1的试样的实际密度时，浸渍液选为去离子水。为了降低实验误差，每种试

样选取10根样条，两根一组，每组测量5次。在采用新的熔融共混温度后，实际密度与理论密度的差值满足精度 $\pm 0.001\text{g/cm}^3$ 的要求，整体密度较之前下降，

最后的密度结果见下表：

表6 HDPE/CPE共混材料的实际密度

理论值 (g/cm^3)	0.98	1.00	1.01	1.02	1.03
改进前测量值 (g/cm^3)	0.987	1.002	1.016	1.026	1.036
改进后测量值 (g/cm^3)	0.983	1.002	1.011	1.025	1.035
浸渍液	去离子水	无水乙醇	去离子水		

3.6 不同温度下HDPE/CPE共混材料密度测定

考虑到共混材料实际应用下高温环境与经济技术指标中密度的精度要求，对共混材料进行了不同温度下的密度测试。随着温度的升高，调剖球密度随温度升高有所降低，水的密度随温度升高降低的幅度要比调剖球的

大，由此判断共混材料在高温环境下使用，密度值可满足技术指标。

4 调剖球性能评价

4.1 调剖球密度测定

表7 调剖球密度测定值

理论值 (g/cm^3)	0.98	1.00	1.01	1.02	1.03
测量值 (g/cm^3)	0.983	1.002	1.011	1.025	1.035
浸渍液	去离子水	无水乙醇	去离子水		

从测定的调剖球材料密度可见，密度最大的偏差为 $\pm 0.005\text{g/cm}^3$ ，最小的偏差为 $\pm 0.001\text{g/cm}^3$ 。更为精确调控密度对调剖球的应用有利。

4.2 调剖球的耐温性

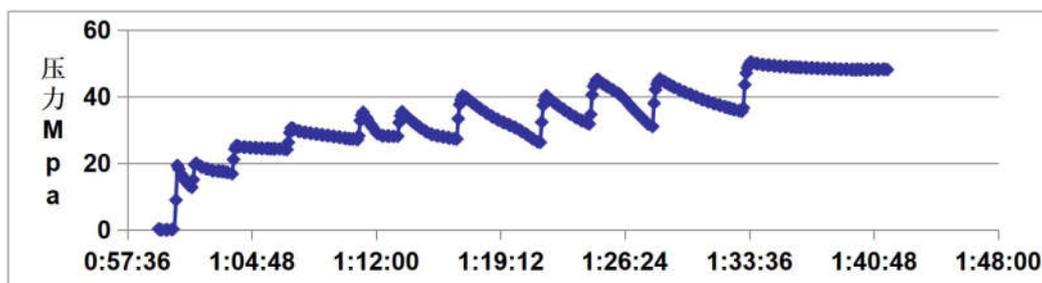
在高温滚子加热炉中对HDPE/CPE调剖球进行耐温性能评价。50-100 $^{\circ}\text{C}$ 温度下，15天调剖球的形状没有发生变化，说明耐温性能良好。高温120 $^{\circ}\text{C}$ 温度下，3天后变

黄的原因，在后续的配方设计中加入了复合抗氧剂B215（1010和168按1:2复配）来减小高温氧化和降解的影响，耐温性进一步提高。

4.3 调剖球耐压性能

调剖球耐压性能测试，要求给调剖球施加单向压差50MPa压力下（采用单向9.5mm炮眼模拟装置），稳压5min，无剪切破碎为合格；

表8 调剖球耐压测试曲线



从实验结果来看，调剖球整体没有破裂，但有些轻微变形，说明球体具有一定柔韧性能，能够承受50MPa压力。通过原料的优化选择，配方的精确计算，获得了低成本、密度可调、耐温耐压的调剖球。

结束语

调剖球密度 $0.98\text{-}1.05\text{g/cm}^3$ ($\pm 0.001\text{g/cm}^3$) 可调，耐温 $\geq 120^{\circ}\text{C}$ ，耐老化性好。

通过配方、模具、注塑工艺的改进，最终研制出具有高密度精度、高耐压强度的调堵球。

参考文献

- [1]孙同文,刘永安,牛宗奎,等.投球调剖工艺技术研究[J].油田化学,2003,20(1):20-22.
- [2]张晓文,寇微,王丽莉,等.大斜度井投球分注技术在辽河油田的研究与应用.科技创新导报,2015(11):4.