

ASP 混合液流量测量方法

吴应湘¹ 钟兴福¹ 田树祥² 吕殿龙² 张爱霞²

1 中国科学院力学研究所 2 大庆油田测试技术服务分公司

摘要: ASP (碱—表面活性剂—聚合物) 混合液是一种非牛顿流体, 具有较强的腐蚀性。本文在非牛顿流体力学基础上, 分析了 ASP 混合液的流动特性, 介绍了一种用电磁流量计测量 ASP 混合液流量的方法, 模拟试验表明, 外流式电磁流量计在不同粘度下具有较好的线性响应, 可以测量高粘度非牛顿流体流量, 现场实验表明, 外流式电磁流量计可以测量油田注入井中 ASP 混合液的流量。

关键词: ASP 复合驱 非牛顿流体 电磁流量计 测量

Flow Rate Measurement of ASP Mixture Fluid

Wu Yingxiang¹ Zhong Xingfu¹ Tian Shuxiang² Lu Dianlong² Zhang Aixia²

1 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

2 Daqing Oilfield Logging and Testing Services Company

Abstract: This paper presents a measurement technique to deal with ASP (Alkali-Surfactant-Polymer), a kind of non-Newtonian fluid with strong corrosion behavior. Based on non-Newtonian fluid mechanics and particularity of ASP mixture fluid, an out-flow electromagnetic flow-meter was inducted to measure the flow rate of ASP mixture fluid. Good linear response was obtained through experiments in a wide range of viscosity, which shows that this kind of flow-meter can be used to measure the flow rate of high viscosity non-Newtonian fluid, especially to measure ASP mixture fluid flow rate in injection well.

Keywords: ASP flooding, Non-Newtonian fluid, electromagnetic flow-meter, measurement.

前言

以提高地下石油资源采收率为目标的三次采油技术中, 聚合物驱、三元复合驱和多元泡沫驱等三次采油技术逐渐成为大庆油田持续稳产的主要措施, 其中 ASP (碱—表面活性剂—聚合物三元复合) 驱油是一种三次采油新技术, 矿场试验表明, ASP 驱油比水驱提高原油采收率 20% 左右。在 ASP 驱油的配套技术工程中, 测井工程技术中面临的问题之一就是注入井中 ASP 混合液注入剖面的测量问题, 测量的目的在于了解并掌握 ASP 混合液在注入井中的分层吸入量, 并对 ASP 驱油效果进行分析, 调整注入参数, 评价措施后的效果。ASP 驱主要是在注入水中加入一定量的碱、表面活性剂和聚合物, 通过扩大注入液波及体积来提高油田的采收率。但是 ASP 使用高分子量的聚合物, 其溶于水后会使得溶液的粘度成倍增加, 使混合液的流变性发生变化, 成为非牛顿流体, 而且碱对金属等物质有较强的腐蚀性, 使得传统的涡轮流量计等传感器不适应新的测量环境, 这就要求设计并研制一种新型的流量传感器, 用来测量粘度高、腐蚀性强的非牛顿流体的流量。

电磁流量计由于无阻力件及可动部件，测量不受液体的密度、粘度、压力等变化的影响等特点，而且量程比宽，能适用于测量强腐蚀性液体的场所，可作为测量 ASP 溶液流量的首选传感器。本文在非牛顿流体力学基础上，分析了 ASP 混合液的流动特性，选择了用电磁流量计测量 ASP 混合液流量的方法，在模拟试验范围内，外流式电磁流量计具有较好的线性响应特征，可以测量高粘度非牛顿流体流量，已在现场测量了 600 多口井，解决了测井工程技术中高粘度 ASP 驱注入剖面的测量问题。

ASP 混合液的流动特性

研究表明，ASP 混合液为非牛顿流体^[1]，其流变方程遵循指数模式：

$$\gamma = \left(\frac{\tau}{k}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

式中： τ —剪切应力，达因；
 γ —剪切速率，达因/厘米；
 k —稠度系数，达因/厘米²/秒ⁿ；
 n —流变指数或幂指数，无因次。

实验证明，对于聚合物溶液， $0 < n < 1$ ，而且当雷诺数小于 5000 时呈层状流动。由此计算，油田注水井中套管内径为 125mm，注入井口聚合物浓度为 1000ppm 时所对应的粘度约为 27cp，所以当井口注入量小于 108m³/d 时，井筒中呈现层流。由于层流时管子中心处流速最大，速度剖面呈抛物线型，紊流时流速剖面较为平坦，因此要设计的传感器使速度剖面影响最小化。对于幂律流体，其圆管层流的无因次速度分布^[2]：

$$\frac{\gamma}{v} = \left(\frac{3n+1}{n+1}\right) \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{n+1}{n}}\right] \quad (2)$$

式中： γ —剪切速率，达因/厘米；
 v —流体速度，厘米/秒；
 r —任意点的半径，厘米；
 R —管道半径，厘米。

从公式 (2) 可知，幂律流体在圆管层流的速度分布除与管道半径、任意点的半径有关外，还与 k 和 n 等取决于流体性质的参数有关，图 1 给出了幂律流体层流速度剖面图，从给出的无因次速度剖面看出， k 、 n 不同，其速度剖面也不同。由于不同浓度的 ASP 溶液的 k 、 n 值很难获得，因此不易选择测量中心流速的传感器测量流量。电磁流量计测量的信号在整个充满磁场的空间中形成，它是管道截面上的平均值，因此可作为测量三元复合溶液的首选传感器。

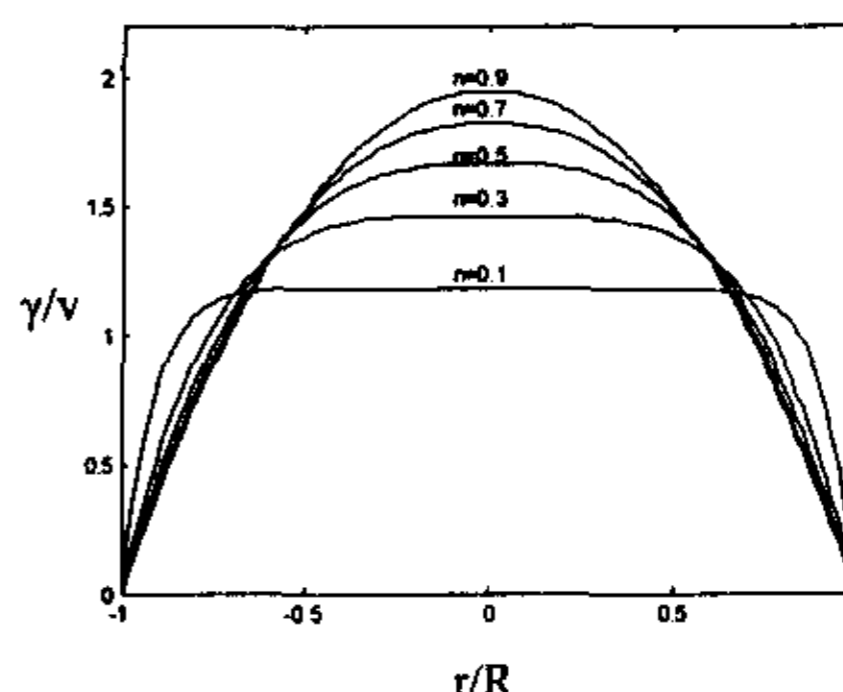


图 1 幂律流体层流速度剖面图

电磁流量计测量原理

外流式电磁流量计主要测量流过电磁流量仪器外部和管道内部环形空间中导电液体的流量，不管流体的性质如何，只要具有微弱的导电性（电导率大于 8×10^{-5} s/m）即

可进行测量。如图 2 所示，根据法拉第电磁感应原理，当导电液体在磁场强度为 B 的磁场中以速度 V 运动时，切割磁力线而产生电场 E ，关系为：

$$\vec{E} = \vec{V} \times \vec{B} \quad (3)$$

则在流体环的 a 和 b 两点之间产生感应电动势

ϵ_{ab} ：

$$\epsilon_{ab} = \int_a^b (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (4)$$

式中 $d\vec{l} = 2\pi r \vec{e}_\phi$ ， $l \in [r, R]$ ， r 为电磁流量计外半径， R 为管道内半径。可以看出，传感器输出信号 ϵ 是一个与平均流速成线性关系的电动势，因此有：

$$Q = k(R^2 - r^2)\epsilon \quad (5)$$

式中 Q 为流量， K 为仪器常数。如果标定出 K ，测得 ϵ ，就可得到对应的流量 Q 。

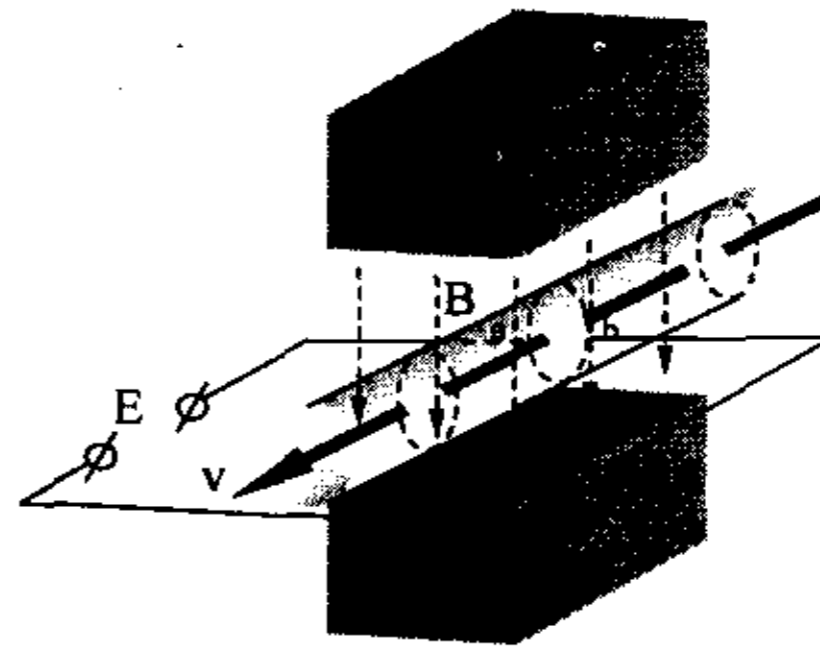


图 2 电磁流量计测量原理示意图

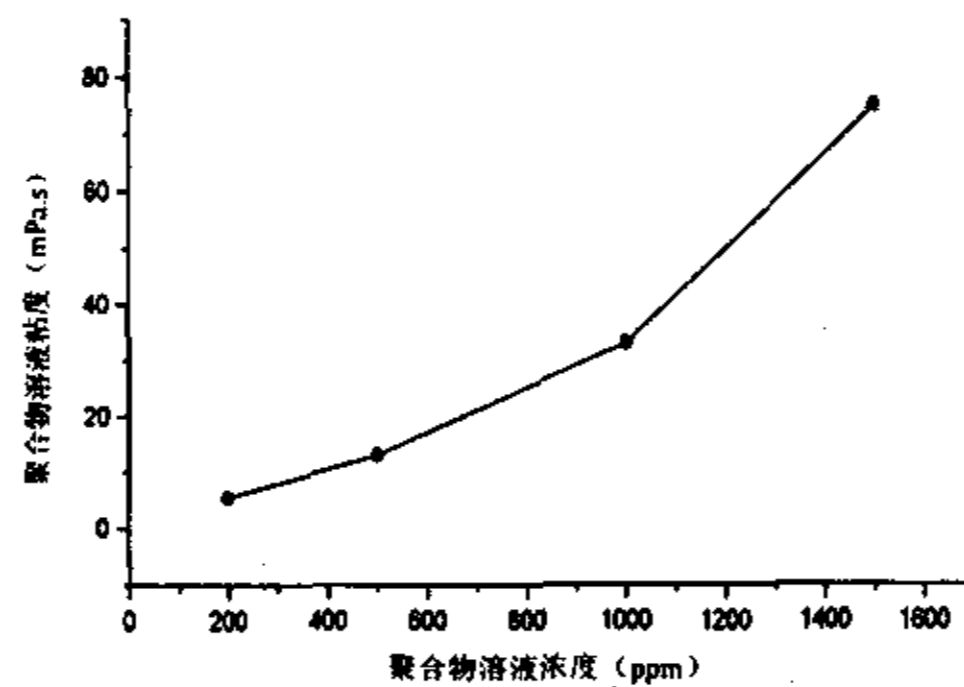


图 3 聚合物溶液浓度与粘度关系

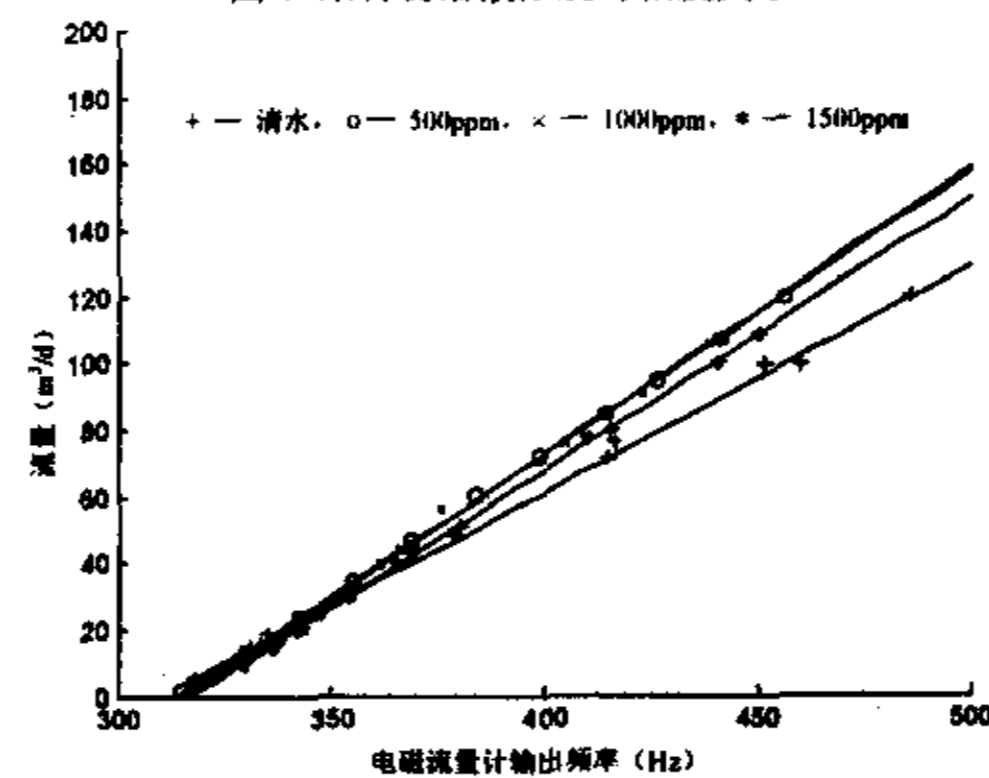


图 4 不同浓度下流量与电磁流量计输出频率关系

仪器响应实验

实验是在大庆油田测试技术服务分公司三采实验室进行的，由于 ASP 混合液中含有碱，实验时用聚合物的水溶液来代替 ASP 混合液。现场使用的 ASP 混合液的浓度一般为 700~1200ppm，实验中的聚合物溶液范围为 500~1500ppm。图 3 给出了不同浓度聚合物溶液和粘度的关系，聚合物浓度越大，其水溶液粘度越高。图 4 给出了不同浓

度下流量与电磁流量计输出频率之间的关系,在浓度为 500ppm 和 1000ppm 的聚合物溶液中,仪器的响应几乎重合,与浓度为 1500ppm 的聚合物溶液中的仪器响应也相差不多,但与清水中的仪器响应特征线相差较大。另外,不同流量下电磁流量计输出频率的变化关系基本保持一致,都呈线性变化,而且直线的斜率变化很小,这说明在同一注入条件下,仪器的输出频率随聚合物溶液浓度变化不大,即仪器的输出频率受溶液浓度或粘度的影响较小,也就是说,电磁流量计受速度剖面影响小,可以测量高粘度流体流量。

应用实例

大庆油田杏二区中部 ASP 驱试验区位于杏二区中部,面积 2.294km²。注采井距 250m,共设计试验井 45,其中采出井 27 口,注入井 17 口。对试验区内的注入井进行了测试,并与井口计量结果对比,测量的总流量误差小于 5%。表 1 给出了西 6-P6 井测量结果和井口计量结果,点测流量数据准确地给出了各注入层段及合层的注入流量,测量的总流量与井口计量结果一致。

结 论

在非牛顿流体力学基础上,通过分析电磁流量计测量的信号的特点,给出用电磁流量计测量 ASP 混合液流量的方法,在模拟试验范围内,外流式电磁流量计受 ASP 混合液粘度变化的影响较小,具有较好的线性响应特征,可以测量高粘度非牛顿流体流量,通过现场测量的 400 多口井来看,测量的总流量与井口计量结果相比,误差小于 5%,证明外流式电磁流量计可以解决了测井工程技术中 ASP 驱注入剖面的测量问题。

表 1 西 6-P6 井测量结果 (日注入量 281.0 m³/d)

序号	层位	深度 m	流量计 脉冲值 Hz	总流量 m ³ /d	分层 吸入量 m ³ /d	相对 吸入量 %
1	葡 1 2	1042.0	555	281.0	0.0	0.0
2		1044.0	555	281.0	0.0	0.0
3	2-3	1046.4	555	281.0	0.0	0.0
4		1049.6	555	281.0	9.6	3.4
5		1051.0	545	271.4	22.5	8.0
6		1053.0	526	248.9	23.5	8.3
7	3-4	1055.2	506	225.6	18.3	6.5
8		1057.0	490	207.3	116.3	41.4
9		1058.0	391	91.0	91.0	32.4
10		1059.0	314	0.0	0.0	0.0
11		1061.0	314	0.0	0.0	0.0

参考文献

1. 康万利,董喜贵.三次采油化学原理.化学工业出版社,北京.1979.
2. 工程流体力学,水利电力出版社北京.1979.