

文章编号:0253-9985(2011)04-0631-06

聚合物溶液对岩石电阻率及岩电参数的影响

焦翠华¹,王 军²,刘兵开³,王振宇¹,王延忠²,辛治国²,杨 峰³

(1. 中国石油大学,北京 102249; 2. 中国石化 胜利油田分公司 地质科学研究院,山东 东营 257015;

3. 中国石化 胜利油田分公司 测井公司,山东 东营 257061)

摘要:砂岩油层经过聚合物驱替后,聚合物的吸附和滞留是否会导致岩石的导电特征发生变化,是否会引起岩电参数发生变化,将决定饱和度解释模型及参数的选取。通过对不同浓度、不同矿化度的聚合物溶液驱岩石电阻率的实验测量,研究了聚合物溶液对岩石电阻率及岩电参数的影响。得到如下结论:当聚合物溶液矿化度大于4 000 mg/L时,聚合物浓度对溶液电阻率、岩石电阻率及岩电参数的影响均很小,测井解释时可以不予考虑,研究成果为聚合物驱后饱和度解释奠定了基础。

关键词:溶液矿化度;溶液电阻率;岩石电阻率;岩-电参数;聚合物溶液

中图分类号:TE359

文献标识码:A

Influences of polymer solution on rock resistivity and various indexes

Jiao Cuihua¹, Wang Jun², Liu Bingkai³, Wang Zhengyu¹, Wang Yanzhong², Xin Zhiguo² and Yang Feng²

(1. China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Geological Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257015, China;

3. Logging Company, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: For sandstone reservoirs after polymer flooding, the selection of saturation interpretation models as well as their parameters depends on whether electric characters and parameters of the reservoirs change with the adsorption and retention of polymer. Based on experiment measurements of resistivity of reservoir rocks after flooded by polymer solutions of different concentration and salinity, we studied the influence of polymer flooding on rock resistivity and various indexes, and came to a conclusion that when the salinity is greater than 4 000 mg/L, the polymer solution has a relative small impact upon the resistivity (only 5.8% as polymer concentration increases from 0 to 3 000 mg/L) and various indexes, and thus can be ignored during logging interpretation. The study laid down a sound foundation for a better interpretation of saturation after polymer flooding.

Key words: solution salinity, solution resistivity, rock resistivity, rock-electrical parameter, polymer solution

聚合物驱是指向油藏中注入高相对分子质量的水溶性聚合物溶液的驱油方法,通过增加驱替相的粘度,改善水油流度比,调整吸水剖面,提高波及效率,从而提高采收率^[1-3]。但是,国内外对聚合物的注入及滞留对储层岩石电性特征及岩电参数的

影响研究很少^[4-6]。本研究选用孤岛油田中一区聚合物驱替用的阴离子型聚丙烯酰胺及孤岛油田中一区馆(陶组)三段的岩心,实验测量了聚合物溶液对岩石电阻率及岩电参数的影响,为该区聚合物驱后饱和度解释模型的选取奠定基础。

收稿日期:2010-06-23;修订日期:2011-05-02。

第一作者简介:焦翠华(1960—),女,教授,测井。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX0511-003)。

1 聚合物浓度及矿化度对溶液电阻率的影响

实验用聚合物为日本三菱的 MO - 4000 - HSF, 主要成分为阴离子型聚丙烯酰胺。采用矿化度为 1 000, 2 000, 3 000, 4 000 mg/L 的氯化钠溶液配制聚合物母液并分别稀释至聚合物浓度为 0,

300, 500, 800, 1 000, 1 200, 1 500, 2 000, 2 500, 3 000 mg/L。利用电阻器及电阻率仪测量聚合物溶液的电阻率(图 1; 表 1, 表 2)。

1.1 聚合物浓度对溶液电阻率的影响

聚合物浓度从 0 增加到 3 000 mg/L, 矿化度为 1 000 mg/L 的溶液电阻率从 8.250 下降到 7.280 Ω · m, 下降绝对幅度为 0.970 Ω · m,

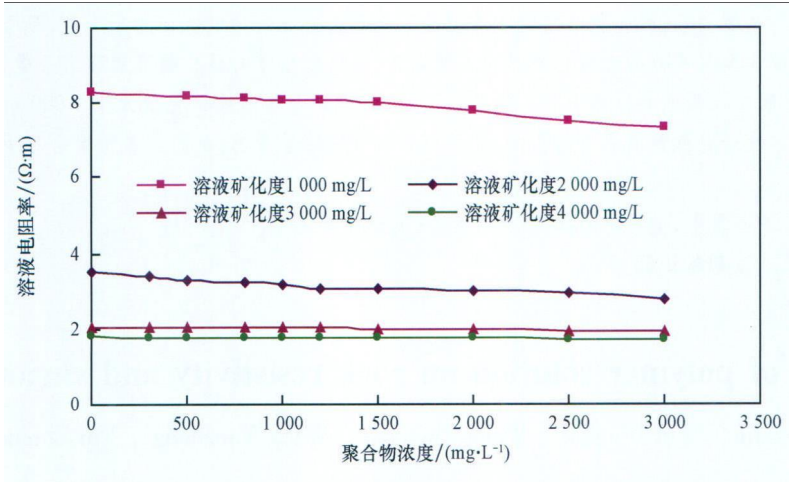


图 1 溶液电阻率与聚合物浓度、溶液矿化度的关系
Fig. 1 Diagram showing the relation among solution resistivity, polymer concentration and solution salinity

表 1 相同矿化度条件下溶液电阻率与聚合物浓度的关系

Table 1 Statistics showing relation between solution resistivity and polymer concentration of the same solution salinity

溶液矿化度/ (mg · L ⁻¹)	聚合物浓度/ (mg · L ⁻¹)	溶液电阻率/ (Ω · m)	溶液电阻率变化 绝对幅度/(Ω · m)	溶液电阻率变化 相对幅度, %
1 000	0	8.250		
	500	8.130	0.120	1.455
	1 000	8.050	0.200	2.424
	1 500	7.970	0.280	3.394
	2 000	7.750	0.500	6.061
	2 500	7.470	0.780	9.455
	3 000	7.280	0.970	11.758
4 000	0	1.845		
	500	1.810	0.035	1.881
	1 000	1.782	0.063	3.420
	1 500	1.781	0.064	3.458
	2 000	1.780	0.065	3.539
	2 500	1.742	0.103	5.588
	3 000	1.738	0.107	5.799

表 2 相同聚合物浓度条件下溶液电阻率与矿化度的关系

Table 2 Statistics showing the relation between solution resistivity and solution salinity of the same polymer concentration

聚合物浓度/ (mg · L ⁻¹)	溶液矿化度/ (mg · L ⁻¹)	溶液电阻率/ (Ω · m)	溶液电阻率变化 绝对幅度/(Ω · m)	溶液电阻率变化 相对幅度, %
0	1 000	8. 250		
	2 000	3. 562	4. 688	56. 621
	3 000	2. 083	6. 167	74. 483
	4 000	1. 845	6. 405	77. 353
500	1 000	8. 130		
	2 000	3. 341	4. 789	58. 901
	3 000	2. 068	6. 063	74. 569
	4 000	1. 810	6. 320	77. 733
1 000	1 000	8. 050		
	2 000	3. 204	4. 846	60. 196
	3 000	2. 051	5. 999	74. 524
	4 000	1. 782	6. 268	77. 865
1 500	1 000	7. 970		
	2 000	3. 064	4. 906	61. 558
	3 000	2. 037	5. 933	74. 437
	4 000	1. 780	6. 190	77. 670
3 000	1 000	7. 280		
	2 000	2. 827	4. 453	61. 169
	3 000	1. 959	5. 321	73. 096
	4 000	1. 738	5. 542	76. 126

相对幅度为 11. 758%;矿化度为 4 000 mg/L 的溶液电阻率从 1. 845 下降到 1. 738 Ω · m,下降绝对幅度仅为 0. 107 Ω · m,相对幅度为 5. 799%。实验结果表明,聚合物浓度对溶液电阻率的影响随溶液矿化度的增加而减小,当矿化度大于 4 000 mg/L时,聚合物浓度的变化对溶液电阻率影响已经很小(图 1;表 1)。

1. 2 溶液矿化度对溶液电阻率的影响

相同聚合物浓度条件下,溶液矿化度从 1 000 增加到 4 000 mg/L 时,溶液电阻率下降绝对幅度为 6 Ω · m 左右,相对幅度为 77%左右(图 1;表 1)。实验结果表明,聚合物溶液电阻率受矿化度的影响比聚合物浓度的影响大的多,是影响溶液电阻率的主要因素。

综上所述可知,当聚合物溶液矿化度小于 4 000 mg/L时,溶液电阻率受溶液矿化度和聚合

物浓度的双重影响;当聚合物溶液矿化度大于 4 000 mg/L时,溶液电阻率受溶液矿化度的影响为主。

2 聚合物溶液对岩石电阻率的影响

2. 1 聚合物溶液对饱含水溶液岩石电阻率的影响

实验所用岩样为自胜利油田孤岛中一区馆三段的砂岩。岩样经过处理后,测试其基础参数长度、直径、孔隙度及空气渗透率。采用与地层水矿化度相近的 5 000 mg/L 的氯化钠溶液配制日本三菱 M0 - 4000 - HSF 聚合物母液并分别稀释至聚合物浓度为 0, 500, 1 000 mg/L;选择 3 组平行样品,分别抽空并饱和已配制的 3 种浓度的聚合物溶液;测试并记录岩样完全饱和聚合物溶液时的岩石电阻率(R_0),(图 2;表 3)。

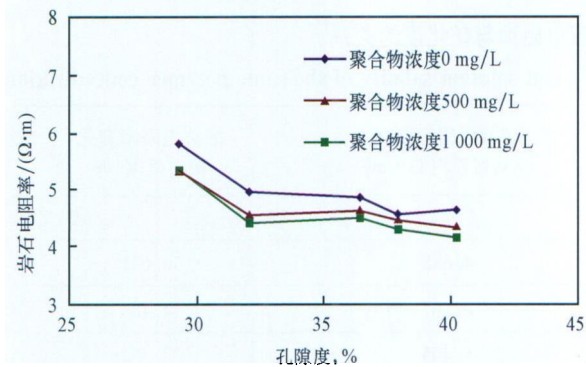


图2 不同聚合物浓度条件下岩石电阻率与孔隙度的关系

Fig.2 Diagram showing the relation between rock resistivity R_0 and porosity Φ of the different polymer concentration

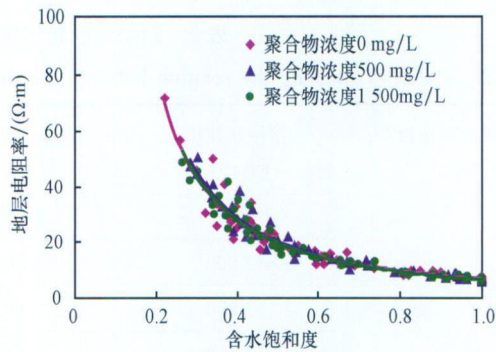


图3 不同聚合物浓度条件下岩石电阻率与含水饱和度的关系

Fig.3 Diagram showing the relation between rock resistivity R_i and water saturation S_w of the different polymer concentration

表 3 聚合物浓度对岩石电阻率 R_0 影响统计

Table 3 Statistics showing the influence of polymer concentration on rock resistivity R_0

孔隙度, %	聚合物浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	岩石电阻率/ ($\Omega \cdot \text{m}$)	电阻率变化绝对 幅度/($\Omega \cdot \text{m}$)	电阻率变化 相对幅度, %
29.28	0	5.811		
	500	5.316	0.494	8.505
	1 000	5.352	0.458	7.879
32.08	0	4.953		
	500	4.554	0.396	8.006
	1 000	4.403	0.547	11.045
36.47	0	4.866		
	500	4.625	0.245	5.038
	1 000	4.485	0.385	7.897
37.93	0	4.551		
	500	4.442	0.108	2.365
	1 000	4.288	0.262	5.757
40.24	0	4.615		
	500	4.344	0.266	5.781
	1 000	4.146	0.464	10.068

从图 2 及表 3 可知,孔隙度一定时,随聚合物浓度从 0 增加到 1 000 mg/L,岩石电阻率下降绝对幅度平均值为 0.423 $\Omega \cdot \text{m}$,相对幅度平均值为 8.529%。

2.2 聚合物溶液对岩石电阻率的影响

实验所用岩样同样为胜利油田孤岛中一区馆三段的砂岩。岩样经过处理后,测试其基础参数长度、直径、孔隙度及空气渗透率。选择 3 组平行样品,用 5 000 mg/L 的氯化钠溶液饱和岩样,然后用变压器油驱替至束缚水状态;用 5 000 mg/L 的氯化钠溶液配制日本三菱 MO-4000-HSF 聚合物母液并分别稀释至聚合物浓度为 0, 500,

1 500 mg/L;分别用上述 3 种聚合物溶液驱替岩样中的油至束缚水状态;记录该过程中的岩样电阻率 R_i 的变化(图 3;表 4)。

当含水饱和度一定时,随聚合物浓度从 0 增加到 1 500 mg/L,岩石电阻率下降绝对幅度平均值为 0.261 $\Omega \cdot \text{m}$,相对幅度平均值为 1.142%。因此,当矿化度为 5 000 mg/L 时,聚合物浓度对岩石电阻率影响很小,建立饱和度模型可以不予考虑。

3 聚合物溶液对岩电参数的影响

不同聚合物浓度条件下的岩石地层因素(F)

表 4 聚合物溶液对岩石电阻率影响统计

Table 4 Statistics showing the influence of polymer concentration on rock resistivity R_t

含水饱和度, %	聚合物浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	岩石电阻率/ ($\Omega \cdot \text{m}$)	电阻率变化绝对 幅度/($\Omega \cdot \text{m}$)	电阻率变化 相对幅度, %
45	0	23.344		
	500	23.323	0.117	0.500
	1 500	23.154	0.286	0.812
50	0	19.827		
	500	19.738	0.089	0.448
	1 500	19.594	0.233	1.175
55	0	17.104		
	500	16.972	0.132	0.771
	1 500	16.847	0.257	1.502
60	0	14.946		
	500	14.787	0.159	1.065
	1 500	14.677	0.269	1.798

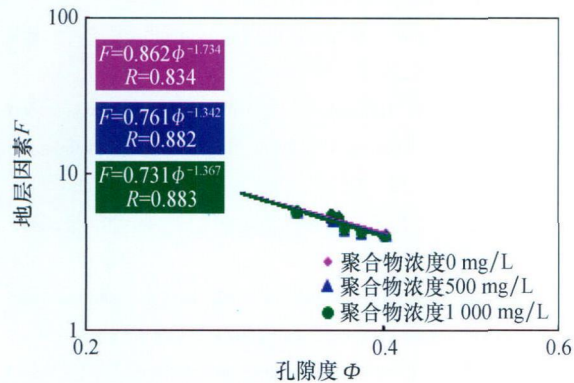


图 4 不同聚合物浓度条件下地层因素与孔隙度关系
Fig. 4 Diagram showing the relation between formation factor and porosity at different polymer concentrations

与孔隙度(Φ)的关系在双对数坐标系下是直线,表明阿尔奇公式仍然适用(图 4)。随聚合物浓度从 0 增加到 5 00 mg/L,岩性系数(a)值从 0.862 变化到 0.761,变化绝对值为 0.101,相对值为 11.1%;胶结指数(m)值从 1.737 8 变化到 1.841,变化绝对值为 0.103,相对值为 5.9%;随聚合物浓度从 500 增加到 1 000 mg/L 时, a 值从 0.761 变化到 0.732,变化绝对值为 0.029,相对值为 3.8%; m 值从 1.841 变化到 1.876,变化绝对值为 0.035,相对值为 1.90%。

不同聚合物浓度下的电阻增大系数(I)与含水饱和度(S_w)的关系在双对数坐标系下是直线,同样表明阿尔奇公式仍然适用(图 5)。随聚合物

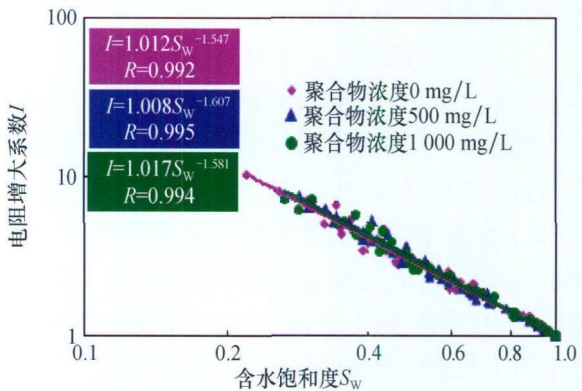


图 5 不同聚合物浓度条件下电阻增大系数与含水饱和度关系
Fig. 5 Diagram showing the relationship between increasing resistivity coefficient and saturation at different polymer concentration

浓度从 0 增加到 500 mg/L 时,岩性系数(b)值从 1.012 变化到 1.008,变化绝对值为 0.004,相对值为 0.39%;饱和度指数(n)值从 1.547 变化到 1.607,变化绝对值为 0.060,相对值为 3.73%;随聚合物浓度从 500 增加到 1 500 mg/L 时, b 值从 1.008 变化到 1.017,变化绝对值为 0.009,相对值为 0.88%; n 值从 1.607 变化到 1.581,变化绝对值为 0.026,相对值为 1.62%。

实验结果表明,当聚合物溶液矿化度为 5 000 mg/L 时,岩电参数 a, b, m, n 受聚合物浓度的影响很小。但是,因 m 值会随着孔隙结构的变

化而变化, n 值随岩石润湿性的变化而改变^[7-10]。因此,测井解释时要根据不同地区、不同开发阶段重新测定岩电参数。

4 结论

1) 当溶液矿化度达到4 000 mg/L时,随聚合物浓度从0增加到3 000 mg/L,溶液电阻率相对减小仅为5.8%;而当聚合物浓度一定时,随溶液矿化度从1 000增加到4 000 mg/L,溶液电阻率相对减小为77%左右。

2) 当聚合物溶液矿化度达到5 000 mg/L时,对于同一孔隙度而言,随聚合物浓度从0增加到1 000 mg/L,岩石电阻率相对减小仅为8.5%左右;对于同一含水饱和度而言,岩石电阻率相对减小仅为1.3%左右。因此,测井解释时可以不予考虑聚合物浓度对岩石电阻率的影响。

3) 当聚合物溶液矿化度大于4 000 mg/L时,岩电参数 a, b, m, n 基本不受聚合物浓度的影响,但不同地区、不同开发阶段的测井解释需要重新测定岩电参数。

4) 实验中应用的聚合物为日本三菱生产的MO-4000-HSF,为阴离子型聚丙烯酰胺,其他类型聚合物(非离子型、阳离子型)对溶液电阻率、岩石电阻率及岩电参数的影响还应实验测量。

参 考 文 献

- [1] 利特马恩(美). 聚合物驱油[M]. 杨普华, 杨育森, 译. 北京: 石油工业出版社, 1991: 1-5.
Littmann W. Polymer flooding. Yang Puhua, Yang Yusen translator. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 1-5.
- [2] 胡博仲, 刘恒, 李林. 聚合物驱采油工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 9-59.
Hu Bozhong, Liu Heng, Li Lin. Polymer flooding oil production engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 9-59.
- [3] 孙焕泉, 张以根, 曹绪龙. 聚合物驱油技术[M]. 山东: 东营: 石油大学出版社, 2002: 1-5.
Sun Huanquan, Zhang yigen, Cao Xulong. Polymer flooding technology [M]. Shandong Dongying: University of Petroleum Publishing, 2002: 1-5.
- [4] 赵培华. 油田开发水淹层测井技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 16-45.
Zhao Peihua. Logging technologies of water flooded layer of oil-field development [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 16-45.
- [5] 刘兵开, 穆津杰. 聚合物驱岩石电阻率变化特征的实验研究[J]. 测井技术, 2003, 27 (增刊): 44-46.
Liu Bingkai, Mu Jinjie. Experiment on rock resistivity in the process of polymer flooding [J]. Logging Technology, 2003, 27 (S0): 44-46.
- [6] 陈德坡, 张兴平, 高建. 不同类型聚合物水淹层解释方法研究[J]. 测井技术, 2008, 32(4): 292-295.
Chen Depo, Zhang Xingping, Gao Jian. Research on log interpretation methods of different polymer water-flooded layers [J]. Logging Technology, 2008, 32(4): 292-295.
- [7] 黄隆基. 润湿性对岩石电阻率影响的模型估算[J]. 地球物理学报, 1995, 38(3): 405-410.
Huang Longji. Model evaluation of wettability effect on rock resistivity [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(3): 405-410.
- [8] 李秋实, 周荣安, 张金功, 等. 阿尔奇公式与储层孔隙结构的关系[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 364-366.
Li Qiushi, Zhou Rongan, Zhang Jingong. Relations between archie's formula and reservoir pore structure [J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(4): 364-366.
- [9] 孙建孟. 阿尔奇参数实验影响因素分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(2): 39-41.
Sun Jianmeng. Influential factors in archie parameters experiment [J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2006, 25(2): 39-41.
- [10] 罗娜. 阿尔奇公式数值分析及其意义[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 111-114.
Luo Na. Numerical analysis of archie formulae and its meanings [J]. Acta Petroei Sinica, 2007, 28(1): 111-114.
- [11] Budd P M. Polymers and water: an overview [C] // Finch C A. Industrial water-soluble polymers. London: The Royal Society of Chemistry. 1996.
- [12] Wang Demin, Cheng Jiecheng. Viscous - elastic polymer can increase microscale displacement efficiency in cores [J]. SPE63227, 2000: 1-10.
- [13] Han Xianqing, Wang Weiying. The viscoelastic behavior of HPAM solutions in porous media and its effects on displacement efficiency [J]. SPE30013, 1995: 14-17.
- [14] 何胡军, 王秋语, 程会明. 孤岛中一区聚合物驱后储层参数变化规律[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 255-259.
He Hujun, Wang qiuyu, Cheng huiming. A study on reservoir parameter change after polymer injection in Block 1 of the central Gudao [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2): 255-259.
- [15] 高建, 侯加根, 王军, 等. 聚合物驱后砂岩储层岩石物理特征变化机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(3): 22-26.
Gao Jian, Hou Jiagen, Wangjun. Variation mechanism of petrophysical property of sandstone reservoir after polymer flooding [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(3): 22-26.

(编辑 高岩)