

◀ 油气开采 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2012.03.022

新型微凝胶深部调驱体系研究进展

伍 嘉¹, 蒲万芬¹, 董钟骏², 贾 虎¹, 李俊中¹, 杜 洋³

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500; 2. 中国石油川庆钻探工程有限公司川西钻探分公司, 四川成都 610051; 3. 中国石油川庆钻探工程有限公司地质勘探开发研究院, 四川成都 610051)

摘要: 微凝胶是一种微米级颗粒溶液或分散凝胶溶液, 主要用于油藏深部调驱, 具有控水和驱油双重功能。微凝胶主要依靠微米级颗粒吸水膨胀封堵地层孔喉, 而且当一定数量的颗粒在喉道处堆积时, 可产生封堵, 使水完全绕流, 实现逐级深部调驱。在调研国外微凝胶深部调驱体系研究现状的基础上, 介绍了微米级微凝胶宏观形态及内部高度交联结构、受热膨胀性能以及在孔喉中的逐级封堵机理, 分析了温度、盐等因素对微凝胶膨胀性能的影响, 最后研究了在多孔介质中的迁移及其对油藏的适应性, 证实微凝胶是一项具有良好应用效果和应用前景的调驱技术。

关键词: 微凝胶 深部调驱 提高采收率

中图分类号: TE358⁺.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890(2012)03-0107-05

Advances of the New Deep Oil Displacement and Profile Control Agent Micro-Gel

Wu Jia¹, Pu Wanfen¹, Dong Zhongjun², Jia Hu¹, Li Junzhong¹, Du Yang³

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation(Southwest Petroleum University), Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. Chuanxi Drilling Company of Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, CNPC, Chengdu, Sichuan, 610051, China; 3. Geological Exploration & Development Research Institute of Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, CNPC, Chengdu, Sichuan, 610051, China)

Abstract: Micro-gel is a micron-grade particle solution or dispersion gel solution, mainly used in deep oil reservoir profile control, having the dual function of water control and oil displacement. It mainly relies on the micron particles swelling to block the pore throat, in addition, when the number of particles is accumulated in the throat, the resulted block can make water flow around completely and thus achieve its deep profiling effect step by step. Through extensive literature research, the paper focused on an overview of research on the micro-gel deep profile control system abroad, summed up the macroshape and the internal cross bonding structure of micro-gel, summarized the expansion properties under heating conditions and the mechanism of plugging of micro-gel, analyzed the impact of salinity and temperature on its expansion property. Its immigration in porous media and adaptation to oil reservoir have been studied, and the result shows the micro-gel is effective and promising in profile control.

Key words: micro-gel; deep profile control; enhanced oil recovery

近年来, 深部调驱技术作为高含水期改善厚油层水驱开发效果, 挖潜层内剩余油的一项重要措施得到了迅速发展, 但是目前常用调驱剂存在一系列亟待解决问题, 如 DDG 凝胶中的铝离子在孔隙介质中大量损失且在地层中易与地层流体发生反应生成沉淀, 很难达到预期效果; CDG 凝胶或预交联体膨颗粒的成胶时间难以控制, 在地层中的稳定性不

高, 难以运移到在地层深部。为此, 20 世纪末国外研究机构开发出了一种新型微凝胶(micro-gel)调驱

收稿日期: 2011-07-15; 改回日期: 2012-02-22。

作者简介: 伍嘉(1985—), 男, 四川南充人, 2009 年毕业于西南石油大学应用化学专业, 油气田开发工程专业在读硕士研究生, 主要从事提高采收率方面的理论与技术研究。

联系方式: wj13807612@126.com

体系,成功应用于现场并得到进一步发展。但我国对微凝胶调驱体系的研究较少,除河南油田进行了现场应用外,其他科研机构的研究只是停留在室内试验。为推动我国微凝胶调驱体系的研究,为我国微凝胶调驱体系的研究提供借鉴和参考,笔者对微凝胶深部调驱体系国外研究现状进行了综述,着重介绍了其相对于传统调驱体系的优良深部调驱性能,分析了其在我国低渗、特低渗油藏的应用优势及前景。

1 微凝胶深部调驱体系研究现状

20世纪末国外研究机构研发了一种新型微凝胶(micro-gel)调驱体系,该体系具有无毒,机械、化学、热稳定性好,颗粒大小可控的特点。在恶劣条件下微凝胶也具较好的稳定和膨胀性能,能够轻松向地层深部运移,改善地层非均质性,提高注入水波及效率,提高驱油效率,适合地质条件恶劣、低渗油藏的调堵调驱作业。

1986年,R. Pelton项目组报道了Poly(NIPAM)温敏型微凝胶,这是对微凝胶较早的系统研究^[1]。随后开发了温敏型、pH敏感型等一系列凝胶,这些凝胶主要采用乳液聚合方式合成^[2-4]。

1997年,BP石油公司、Mobil石油公司、ChevronTexaco石油公司和Ondeo Nalco能源服务公司合作开发了一种具有时间延迟性、高度膨胀的微凝胶用于深部调驱,从而提高原油采收率的技术,命名为“Bright Water”^[5]。微凝胶调驱技术首次引入了石油工业,为调驱技术注入了强劲的动力。Bright Water微凝胶调驱技术在矿场试验中取得成功,并呈现出优越的特性,引起了石油工业的广泛关注。

1999年,Guy Chauveteau等人介绍了一种全新的产品^[6]:水溶无毒、软的、稳定的、颗粒大小可控的微凝胶调驱体系。凝胶微球为乳酸锆与磺化聚丙烯酰胺的交联体系,受各种物理化学条件(pH值、盐、温度等)影响不大,在孔隙介质中有良好的运移性,不仅可用于油田堵水,同时可使非均质油藏尽快趋于一致,适合复杂油藏调堵调驱作业。随后几年,Guy Chauveteau等人一直致力于对这种微凝胶的研究,取得了一系列进展,并在矿场试验中取得成功。

2008年,Celine Cozic等人^[7]通过一系列试验研究,大大改善了微凝胶的抗盐性能,扩展了这种凝胶微球技术的使用范围。

目前国内有关微凝胶调驱的研究报道很少,只有河南油田做过一些尝试,还在完善阶段。

2 微凝胶的结构及性能

2.1 内部结构

微凝胶是指微米级、内部高度交联后的聚合物凝胶微球,其内部为复杂的网络结构,在溶剂中有一定的膨胀性,受力易变形,环境温度、pH值、离子浓度的变化会引起微凝胶的膨胀和收缩。图1(a)、(b)为微凝胶内部复杂的交联结构;图1(c)为线性聚合物,没有交联点;图1(d)表示交联点^[8]。交联程度直接影响微凝胶的性能,中度交联微凝胶在温度升高时其膨胀性能强于高度交联微凝胶,膨胀时间缩短,而膨胀后的强度低于高度交联微凝胶。可以通过控制交联程度,实现微凝胶膨胀时间、膨胀倍数、凝胶强度的控制。

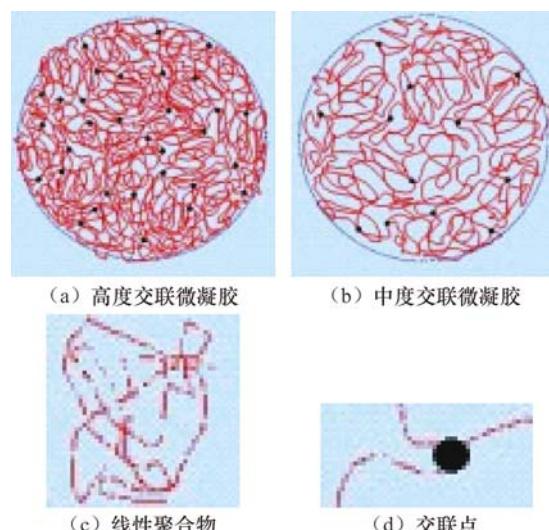


图 1 微凝胶与线性聚合物内部结构对比

Fig. 1 Internal structure of micro-gel and linear polymer

2.2 形态

微凝胶的分子结构介于支链大分子和宏观网络聚合物之间,其分子链被限定在一定区域内、进行分子内交联而形成网状结构,是经过交联的乳状液颗粒。在微凝胶颗粒之间,或者说在各微凝胶分子之间,不存在化学键,在溶剂中有一定的膨胀性,在适当溶剂中微凝胶能像线性或支链聚合物一样“溶解”。这种“溶解”实质上大部分是膨胀,带有少部分溶解,膨胀的微凝胶可稳定分散于溶剂中,形成胶体分散体系。与线性聚合物相比,即使在高质量分数

下($40\% \sim 60\%$),微凝胶溶液的黏度都很低,黏度随分子量的变化较小。微凝胶分散液呈现很大的假塑性,即在静置或低剪切速率下黏度较高,随着剪切速率的增大,黏度大幅度下降。图 2 为微凝胶在偏光显微镜下观察到的形态,其圆球度非常高,且粒度分布范围很窄^[9];图 3 为大颗粒凝胶与微凝胶在溶液中的分布形态^[10]。

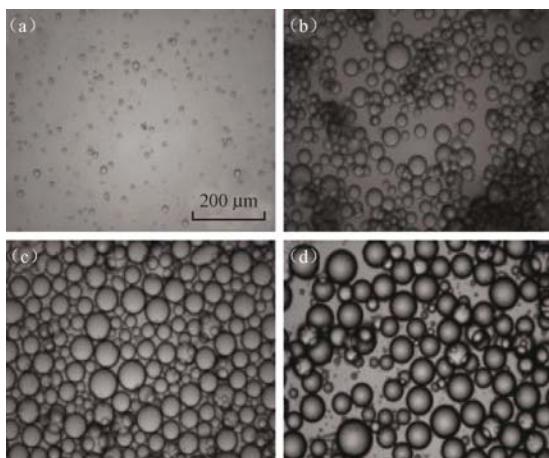


图 2 偏光显微镜下微凝胶形态

Fig. 2 Shape of micro-gel in polarization microscope

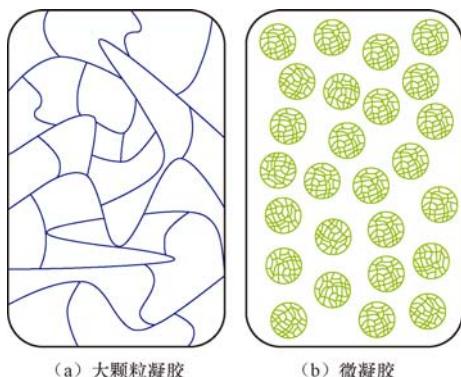


图 3 大颗粒凝胶与微凝胶宏观形态对比

Fig. 3 Macroshape of coarse gel and Micro-gel

2.3 封堵机理

微凝胶封堵机理主要为吸附层膨胀封堵,与孔喉尺寸匹配的热敏性微凝胶随注入水进入多孔介质,在孔隙壁发生吸附作用,形成吸附层,在地层温度的作用下吸水膨胀,在喉道处对水流产生阻力,改变其流动方向,使注入水绕过高渗层进入低渗层。当多个微凝胶颗粒同时在喉道处堆积时,颗粒之间相互作用,也可产生封堵^[11]。

D. Rousseau 等人^[12]对微凝胶形成的吸附层厚度、吸附密度和吸附层的流变性进行了详细研究。

研究结果显示:吸附层厚度为 $1.7 \mu\text{m}$,与所注入的微凝胶直径 $2 \mu\text{m}$ 相差不大;吸附层在一定范围内不随注入量的增加而改变。D. Rousseau 还提出了控制吸附层厚度的 3 种方法:1) 注入粒径大小不同的微凝胶;2) 控制注入微凝胶溶液的质量浓度;3) 控制注入时的剪切速率。

2.4 膨胀性能

微凝胶是一种热敏感凝胶颗粒,在油藏温度过渡带产生膨胀堵塞效应。该调驱剂有别于传统的聚合物微球调驱剂,聚合物微球是单纯依靠吸水发生体积膨胀,其膨胀倍数往往受限于地层水矿化度、pH 值等许多因素。微凝胶是高度交联的磺化聚丙烯酰胺凝胶微球,具有分散性凝胶特征,其双交联结构使微凝胶同时具有不稳定和稳定 2 种内部交联特征,在地层温度作用下,不稳定的交联结构会加速降解,降低颗粒的交联密度,使颗粒吸收周围的水膨胀,膨胀后体积可以增大数百倍,足以封堵高渗透层;而稳定交联结构长期有效,使微凝胶空间网络结构不易降解,在孔隙中长期存在,因而在油藏环境下既有颗粒膨胀,也具有一定黏度,能够发挥深部流体转向和流度控制作用,提高波及效率^[13-14]。

图 4 为电镜扫描下观察到的膨胀后微凝胶的网状结构^[15],颗粒开始处于压缩状态——“原核”状态,受热后原核吸水膨胀成“玉米花状”^[5]。

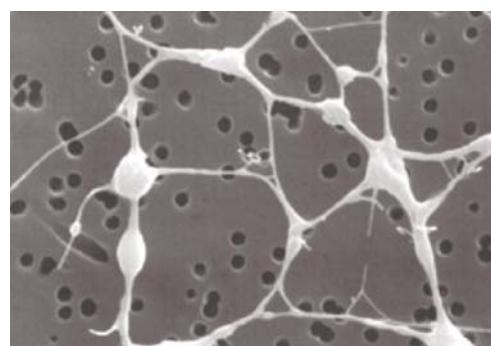


图 4 原核膨胀结构电镜扫描照片

Fig. 4 Stereo scan photograph of pronucleus swelling

2.5 稳定性

Guy Chauveteau 和 Yujun Feng 等人^[16-18]研究了微凝胶在 70°C 下老化 30 d, pH 值 $4 \sim 11$ 和剪切速率 $1.7 \sim 128.5 \text{ s}^{-1}$ 等条件下的稳定性,结果表明,在 3 种条件下吸附层厚度几乎没有变化。证明其具有优异的机械、化学性能和热稳定性,即使处于恶劣的地层条件下,凝胶微球也具有较好的稳定性和膨胀性。

Céline Cozic^[7]等人对凝胶微球在盐水中的分散性和稳定性进行了细致研究,结果表明,不同质量浓度的凝胶微球可以在各种质量浓度盐水中分散并稳定存在。在注入 20 g/L 的 NaCl 溶液,100 g/L NaCl+8 g/L CaCl₂ 溶液和 200 g/L NaCl+15 g/L CaCl₂ 溶液 3 种情况下进行了流动试验,吸附层厚度变化不大,高渗岩心渗透率依然得到有效降低,表明凝胶微球耐盐性能优异,适合高盐储层的调驱作业。

2.6 多孔介质中的运移

颗粒在膨胀之前的尺寸必须和目的层岩石孔喉尺寸分选相匹配。体系的滤失特征和颗粒的运移研究表明,为了确保更好地注入和运移,最初的颗粒直径必须小于储层孔喉尺寸的 1/10;浓度的确定要以注入水方便携带为前提^[5]。Guy Chauveteau 给出了孔喉平均半径的计算方法^[19]:

$$r_h = 1.15 \sqrt{8K/\phi} \quad (1)$$

式中: r_h 为岩石的平均孔喉半径,μm;K 为岩石渗透率,D; ϕ 为岩石的孔隙度。

微凝胶粒径属于微米级,而且分散在含表面活性剂的水中,其溶液黏度与水相差不大,很容易注入地层,在多孔介质中运移;又由于微凝胶颗粒是一种有弹性、易变形的凝胶微球,遇到微小孔喉时,在压差作用下发生弹性形变,进入孔喉,向深部运移,再封堵,再运移,实现逐级调剖驱油^[20]。

D. Rousseau 等人^[12]对微凝胶在多孔介质中的运移进行了详细研究。试验采用 10 cm 长的 SiC 岩心,孔隙度 40%~42%,渗透率 2.5~3.5 D,孔隙体积 7.5~8.0 cm³,在岩心夹持器设置了 5 个压力监测点(如图 5、图 6 所示),出口端装有带刻度的毛细管以及分光光度计,用以测量产出液中微凝胶的含量。试验分两次在流量 2 cm³/h、剪切速率 10 s⁻¹条件下注入 400 mg/L 微凝胶,测试其在孔隙中的运移能力。通过各监测点的压力分别计算出 BC、CD、AE 段注入前后微凝胶溶液的流度减少量(注入前、后微凝胶溶液流度的比值,用以表征其运移能力),通过出口端带刻度的毛细管以及分光光度计计算产出液质量浓度与原始质量浓度的比值,即产出液相对质量浓度。第一次注入时,在注入量为 1 倍孔隙体积前,流度减少量从 1 开始线性增加至 2,说明微凝胶在孔隙中有一定吸附,对后续注入颗粒的运移产生一定阻力,但影响并不明显,因为随后出口端产出液相对质量浓度达到 95%~100%,而且 1~5 倍孔隙体积时流度减少量为 2,保持恒定,说明虽

然流动阻力有所增大,但流度不随注入量增大、颗粒的堆集而降低,对后续注入颗粒的运移影响不大;第一次注入结束后再对同一岩心进行第二次注入,流度减少量初始值为 1.5,说明第一次注入的微凝胶膨胀后增加了流动阻力,流度减少,但注入 1 倍孔隙体积之后,流度减少量值仍然只增大至 2,且在注入量为 1~17 倍孔隙体积时,流度减少量不随注入量改变,产出液相对质量浓度在注入 2 倍孔隙体积后达到 95%~100%,说明微凝胶颗粒能够在孔隙中良好运移,不随注入量增大而受到影响。

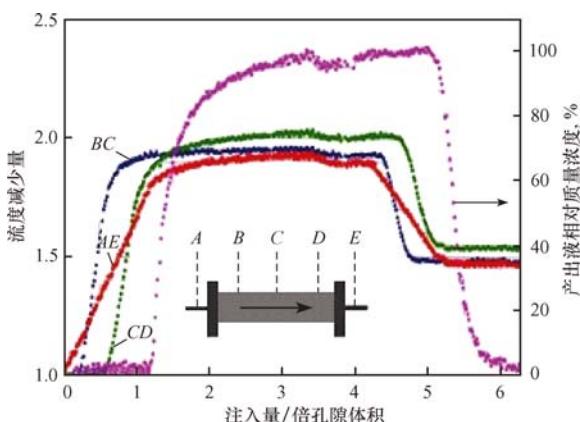


图 5 多孔介质中的运移测试,第一次注入

Fig. 5 Testing of locomotion in porous medium, first flooding

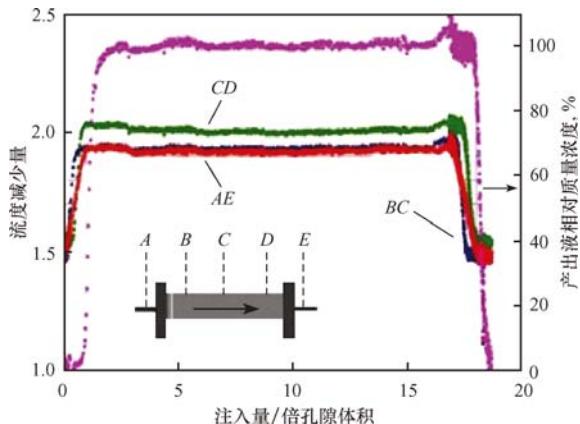


图 6 多孔介质中运移测试,第二次注入

Fig. 6 Testing of locomotion in porous medium, second flooding

2.7 油藏适应性

James Pritchett 等人^[5]对 Bright Water 微凝胶调驱技术的油藏适应性进行了归纳:1) 稀油油藏;2) 油井过早见水,且含水率较高;3) 渗透率极差较大,高渗透层的渗透率至少为低渗透层 5 倍;4) 高

渗透层的渗透率大于 100 mD(124~3 400 mD);
 5) 高渗透层的孔隙度大于 17%; 6) 裂缝不发育或为微裂缝; 7) 油藏温度 50~150 °C; 8) 微凝胶体系在注入井与生产井之间运移时间大于 30 d; 9) 注入水矿化度低于 70 000 mg/L。

随着研究的不断深入, 微凝胶调驱技术会不断发展、完善, 将会适用于更多类型的油藏。

3 结论及建议

1) 微凝胶具有优异的化学、机械性能和热稳定性, 抗温抗盐性能优良; 在地层中的膨胀倍数及膨胀时间能够实现人为控制; 多个微凝胶颗粒在孔喉处架桥、堵塞, 在压差作用下, 堵塞的颗粒能向地层深处推进, 再堵塞, 再运移, 形成动态堵塞, 实现深部调驱。

2) 建议充分结合现有凝胶颗粒合成技术, 对微凝胶合成及性能评价方法进行系统研究。并针对我国低渗透油藏的具体地质状况, 深入研究微凝胶在储层中的渗流规律、封堵机理和受热、吸水膨胀机理, 从根本上分析微凝胶深部调驱剂提高采收率的机理。

参 考 文 献

References

- [1] Mears S J, Deng Y, Cosgrove T, et al. Structure of sodium decyl sulfate bound to a poly(NIPAM) microgel particle[J]. *Langmuir*, 1997, 13(7): 1901~1906.
- [2] Kozakiewicz Joseph J, Dauplaise David L. Microemulsified functionalized polymers; US, 4956400[P]. 1990-09-11.
- [3] Dawson Jeffrey C, van Le Hoang. Method of controlling production of excess water in oil and gas well; US, 5465792[P]. 1995-11-14.
- [4] Harala Heinrich, Ludger Toerner, Juergen Biebel. Apparatus for the metered discharge of bulk material from a flexible supply container especially in a dosing system; US, 5735439[P]. 1998-04-07.
- [5] Pritchett James, Frampton Harry, Brinkman Joe, et al. Field application of a new in-depth waterflood conformance improvement tool[R]. SPE 84897, 2003.
- [6] Chauveteau G, Tabary R, Renard M, et al. Controlling in-situ

- gelation of polyacrylamides by Zirconium for water shut off [R]. SPE 50752, 1999.
- [7] Cozic Céline, Rousseau D, Tabary René, et al. Broadening the application range of water shut off/conformance-control microgels: an investigation of their chemical robustness [R]. SPE 115974, 2008.
- [8] Zaitoun A, Tabary R, Rousseau D, et al. Using microgels to shut off water in a gas storage well[R]. SPE 106042, 2007.
- [9] Binks Bernard P, Murakami Ryo, Armes Steven P, et al. Effects of pH and salt concentration on oil-in-water emulsions stabilized solely by nanocomposite microgel particles[J]. *Langmuir*, 2006, 22(5): 2050~2057.
- [10] Thorne Joanna B, Vine George J, Sbowden Martin J. Microgel applications and commercial considerations[J]. *Colloid Polymer Science*, 2011, 289(5/6): 625~646.
- [11] Ohms Danielle, McLeod Jennifer, Graff Craig J, et al. Incremental oil success from waterflood sweep improvement in Alaska[R]. SPE 121761, 2009.
- [12] Rousseau D, Chauveteau G, Renard M, et al. Rheology and transport in porous media of new water shut off/conformance control microgels[R]. SPE 93254, 2005.
- [13] Standiford B B, Dovan H T, Hutchins R D. High temperature stable gel; US, 5246073[P]. 1993-09-21.
- [14] Chauveteau G, Omari A, Tabary R, et al. Controlling gelation time and microgel size for water shut off[R]. SPE 59317, 2000.
- [15] Frampton H, Morgan J C, Cheung S K, et al. Development of a novel waterflood conformance control system [R]. SPE 89391, 2004.
- [16] Chauveteau Guy, Tabary René, Bon Christel le, et al. In-depth permeability control by adsorption of soft size-controlled microgels[R]. SPE 82228, 2003.
- [17] Chauveteau Guy, Tabary René, Blin Nicolas, et al. Disproportionate permeability reduction by soft preformed microgels [R]. SPE 89390, 2004.
- [18] Feng Yujun, Tabary René, Renard Michel, et al. Characteristics of microgels designed for water shut off and profile control [R]. SPE 80203, 2003.
- [19] Chauveteau Guy, Sorbie K S. Mobility control by polymers// Bavière Marc. Basic concepts in enhanced oil recovery processes[M]. London, New York: Elsevier Applied Science, 1991: 43~87.
- [20] Holden Deric A, Hendrickson Grant, Lyon L Andrew, et al. Resistive pulse analysis of microgel deformation during nanopore translocation[J]. *The Journal of Physical Chemistry: C*, 2011, 115(7): 2999~3004.