

自吸条件下火山岩气藏水锁伤害效应实验

郭和坤^{1,2}, 李太伟¹, 李海波^{1,2}, 刘建坤³, 薛小佳⁴

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007
2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007
3. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101
4. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司油气工艺技术研究院, 西安 710021

摘要 水锁效应广泛存在于火山岩气藏中, 是火山岩气藏的损害类型之一, 严重影响着火山岩气藏的开发效果。本文结合核磁共振技术通过室内实验研究, 探讨低渗透火山岩气藏自吸作用下的水锁伤害机制及伤害程度, 通过气驱反排实验模拟了火山岩气藏水锁解除过程。研究表明: 各渗透率级别的火山岩岩心自吸吸入水饱和度与吸水时间并非呈线性关系, 自吸开始的 2h 之内, 岩心含水饱和度急剧增加, 随着自吸时间的增加, 岩心含水饱和度增加幅度越来越小, 自吸 16h 后岩心吸入水量已基本保持不变; 应用核磁共振技术研究了吸入水量与孔隙结构的关系, 发现孔隙结构越复杂, 岩心吸水量越大; 通过反排实验发现, 岩心含水饱和度以及水锁伤害率随反排孔隙体积(PV)数的增加而减小并趋于平缓, 反排 25PV 后水锁伤害基本得到解除; 针对目前水锁伤害评价存在的不足, 结合储层中水锁伤害的产生和解除, 提出一种改进的水锁伤害评价方法——动态水锁评价方法。

关键词 水锁效应; 自吸; 核磁共振; 含水饱和度; 火山岩气藏

中图分类号 TE311

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.24.009

Laboratory Study of Water Locking Damage Under Imbibition in Volcanic Gas Reservoirs

GUO Hekun^{1,2}, LI Taiwei¹, LI Haibo^{1,2}, LIU Jiankun³, XUE Xiaojia⁴

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang, Langfang 065007, Hebei Province, China
3. Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China
4. Research Institute of Oil and Gas Technology, Changqing Oilfield, China National Petroleum Corporation, Xi'an 710021, China

Abstract Water locking happens widely in volcanic gas reservoirs, and will seriously affect the reservoir development. Based on the lab experiments combined with the NMR technology, the damage degree and the damage mechanism under the spontaneous imbibition condition are studied, and the water lock removal process in volcanic gas reservoirs is simulated by the gas flood experiment. It is shown that the water saturation due to the spontaneous imbibition is not linear with respect to the imbibition time, the saturation in the cores is increased dramatically in the first 2h from the time when the imbibition begins, after 16 hours the spontaneous imbibitions are stopped and the saturation remains almost unchanged. Applying the NMR technology to the relation between the water absorption and the pore structure, it is found that the more complex the pore structure, the larger the amount of the water imbibitions will be. The gas is used to draw the water from the cores, and it is discovered that with the increase of the pore volume, the water saturation and the damage rate due to the water locking decrease and they tend to be in moderate levels, the water lock damage is basically avoided after 25 pore volumes are driven by gas. To overcome the drawbacks of the evaluation methodology in water blocking, an improved method, the dynamic evaluation method in water blocking, is proposed.

Keywords water blocking; spontaneous imbibition; NMR; water saturation; volcanic gas reservoirs

收稿日期: 2011-06-14; 修回日期: 2011-08-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB209500); 国家自然科学基金项目(10672187)

作者简介: 郭和坤, 高级工程师, 研究方向为油气层物理、核磁共振技术, 电子邮箱: nmrgkh69@petrochina.com.cn

吸 16h 后岩心吸入水量已基本保持不变,16h 岩心吸水量已占全部吸水量的 97%左右。通过图 1 可以发现,连接各点通常可得两条直线段,斜率较大者,称为自吸线段,反映了在毛管力作用下强润湿性液体吸入量随时间的变化。直线斜率较小者,称为扩散线段,反映了自吸结束后由于分子的热运动,液相扩散而使润湿相随时间有一个微弱的变化趋势^[9]。在此阶段,毛管力被其他力平衡,自吸作用结束,岩心中含水饱和度的增加主要由扩散所致。因此,吸入水饱和度和吸水时间并非线性关系,其关系表现为随时间的增加而减少并逐渐趋于平缓。

2.1.2 吸水量与孔隙结构的关系

核磁共振技术最大的优势之一是不仅能够准确分析任意形状、尺寸的岩石样品,而且作为一项快速、无损、能够全面反映孔隙信息的检测技术,可以对岩心孔隙中流体的含量进行定量分析^[10]。因此,可以在不影响实验结果的前提下在不同的实验阶段对岩心进行核磁共振测量,分析不同实验阶段的核磁共振 T_2 谱变化情况,从微观角度分析岩心孔隙中流体的变化情况。

由图 1 可以发现,不同岩心吸入水饱和度差异很大,如序号分别为 2# 和 10# 的 2 块岩心吸入水饱和度分别仅为 6.85% 和 10.40%,岩心最终含水饱和度分别为 86.49% 和 77.04%。但序号为 3# 和 5# 的岩心吸入水饱和度较大,分别为 39.15% 和 35.38%,岩心最终含水饱和度分别为 87.13% 和 86.19%。对应的岩心最终含水饱和度差异不大,但其自吸水量却差异非常明显。通过对上述岩心饱和、束缚及不同吸水阶段核磁共振 T_2 谱(图 2)对比可以发现, T_2 谱分布范围越宽、两峰峰值对应弛豫时间差距越大则吸水量越小,弛豫时间较长的大孔隙中含水饱和度基本保持不变,该部分孔隙是自吸实验中残余气分布的主要孔隙空间。而对于 T_2 谱呈单峰态分布的岩心,自吸水饱和度较大,大小孔隙均被水充填,残余气饱和度较小。

因此,储层孔隙结构越复杂、孔径分布差异越大、孔喉连通性越差导致的储层微观非均质性越强,则自吸实验时岩心吸水量越小,连通性较差的大孔隙是残余气分布的主要孔隙空间。而微孔隙较为发育、非均质性较弱的储层自吸水饱和度和较高,残余气饱和度较小。

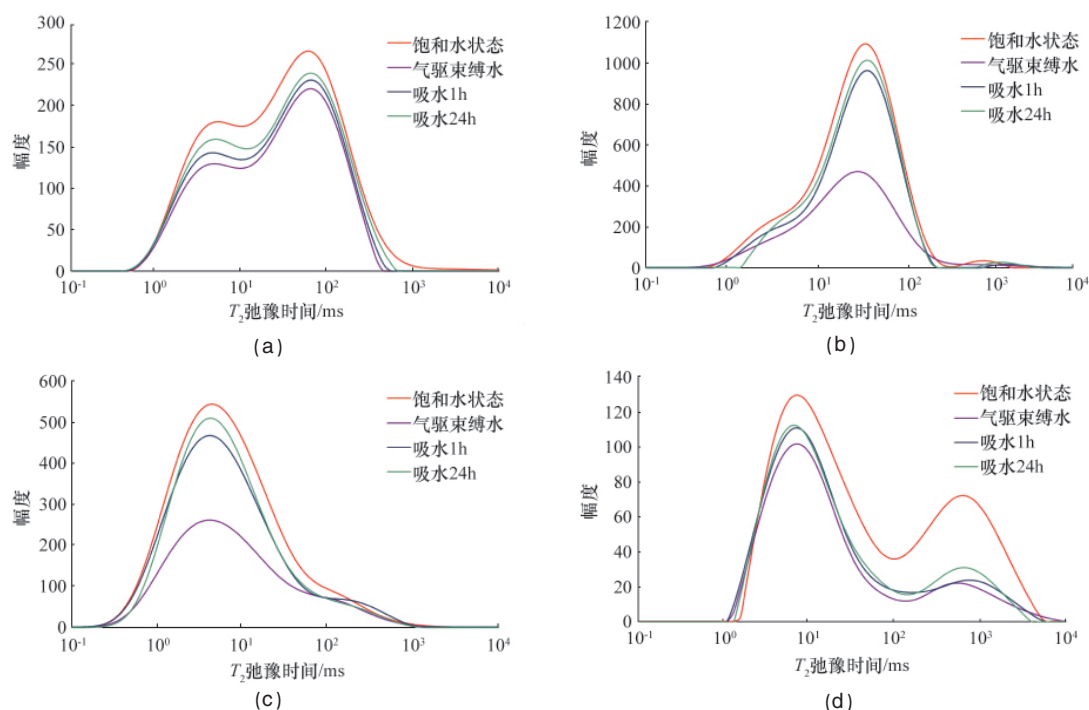


图 2 2#(a)、3#(b)、5#(c)和 10#(d)岩样饱和、束缚及不同吸水状态核磁共振 T_2 谱

Fig. 2 Changes of NMR T_2 spectrum distribution under the bound water state, the saturated water and the different bibulous state in No. 2 (a), No. 3 (b), No. 5 (c) and No. 10 (d) cores

2.2 不同渗透率岩心水锁效应实验

2.2.1 水锁伤害率的评价方法

在储层的开发中,水锁效应对渗透率造成伤害已经形成共识,但关于其定量评价方法,目前尚无统一规范,只是针对具体作用过程,不同学者采取了不同的实验方法进行评价,客观准确地评价水锁伤害是近年来水锁研究的焦点^[2]。

赖南君等^[2]模拟低渗透气藏在各种作业过程中外来流体对基质的作用情况,采用的实验方法是:先测定干岩样的气相渗透率;在一定压力下用地层水在岩心出口端反向作用一定时间后,用高压气体正向驱替足够长时间,测定岩心的气测渗透率,此种方法所测定的干岩样的气测渗透率与储层岩心在束缚水饱和度下的渗透率具有一定差异,干岩样的气测

渗透率不能代表储层条件下岩心在束缚水饱和和度下的渗透率,所测量出的水锁伤害率比实际偏高。

廖锐全等^[11]采用静态岩心流动实验方法,通过测定束缚水饱和和度下的油相渗透率变化评价水锁效应对渗透率的伤害。其操作步骤是:将岩心抽真空后,用地层水饱和;正向用煤油驱替,驱至油水两相平衡后,测油相渗透率(K_{01});反向注入模拟地层盐水,排至无油流为止;正向用煤油测伤害后的渗透率(K_{02});所得水锁伤害率 $D=[(K_{01}-K_{02})/K_{01}]\times 100\%$ 。由于水锁伤害大小会随着不同反排 PV 数得到不同程度的解除,因此此种方法未能给出不同反排阶段水锁伤害率的变化。

加拿大学者 Bennion 给出了一个公式,用于预测水锁效应的严重程度^[12]:

$$APT_i=0.251gK_a+2.2S_{wi} \quad (1)$$

其中, APT_i 为水锁指数; K_a 为气测渗透率; S_{wi} 为原始含水饱和和度。赵春鹏等^[13]用实验室模拟储层条件下测得的束缚水饱和和度的值 S_{wir} 与 1 之差近似地代替式(1)中的原始含水饱和和度,对式(1)进行了改进:

$$APT_i=0.251gK_a+2.2(1-S_{wir})$$

这种方法只能定性分析岩心水锁程度,无法定量计算岩心水锁伤害率的大小。

综上所述,对于低渗透砂岩气藏储层的开发中水锁效应对渗透率造成伤害已经形成共识,不同学者针对具体问题,采取了不同的实验条件和实验评价方法对水锁伤害进行了评价,也得出一些建设性的结论和建议。借鉴前人对水锁伤害率的评价方法,提出一种动态水锁评价方法,将水锁伤害率定义为

$$D=(K_o-K_{nPV})/K_o$$

其中, K_o 为使用非稳态恒压气驱法气驱 50PV 建立束缚水后测得的岩心的渗透率,表示未发生水锁效应时的储层的原始渗流能力; K_{nPV} 为气相反排 n PV 时岩心的渗透率,表示储层发生水锁后不同反排阶段渗透率的变化。此种方法的优势是能较为真实地模拟储层发生水锁的过程,能定量给出不同反排阶段岩心水锁伤害率的变化,对水锁伤害进行动态描述,能更进一步认识储层水锁伤害机制。

2.2.2 水锁伤害率与气体反排 PV 数的关系

图 3 为气体反排 PV 数与水锁伤害率之间的关系,12 块全直径岩心气相反排 1PV 时水锁伤害率为 13.76%—78.59%,平均 53%;反排 5PV 时,伤害率为 6.31%—61.93%,平均 33%;气相反排 25PV 时,其中 6 块岩心水锁伤害已经完全解除,剩余 6 块水锁伤害率平均小于 10%。因此,水锁伤害与气体反排量密切相关,随着气体反排 PV 数的增加水锁伤害率呈减小趋势,反排 25PV 后水锁伤害基本得到解除,这是因为火山岩中黏土矿物含量较低,水锁伤害由可动水滞留引起,为暂时性水锁伤害。

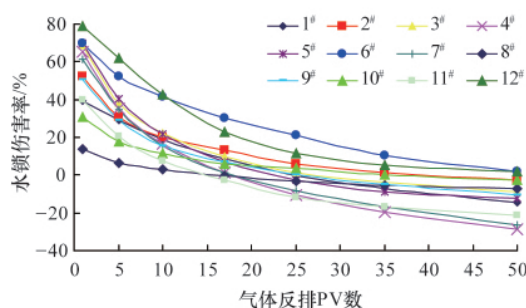


图 3 气体反排 PV 数与水锁伤害率关系

Fig. 3 Relation between the water blocking damage rate and different gas drive pore volumes

从图 3 还可以发现,12 块全直径岩心的水锁伤害率的减小并不是随着气体反排量的增加而均匀降低的,而是反排初期减大幅度较大,反排后期减大幅度较小。自吸完成后赋存于岩心孔隙和喉道中的水以 3 种不同方式存在:(1) 存在于大孔隙和喉道中的自由水,它们在重力作用下可以自由流动,不需要附加压力;(2) 存在于较小孔隙和喉道中的毛细管水,由于毛细管力的存在,此种水在重力作用下不能自由流动,必须施加附加压力才能够从毛细管高压端流向低压端;(3) 存在于岩石孔隙喉道表面的吸附水,它们与岩石表面以静电引力或分子间力联系,这种水与岩石表面连接紧密,附加压力也很难使其流动^[14]。图 4 为 4# 和 5# 岩样饱和、束缚水、吸水最终以及反排 1PV、5PV、17PV、50PV 后的核磁共振 T_2 谱,发现反排 17PV

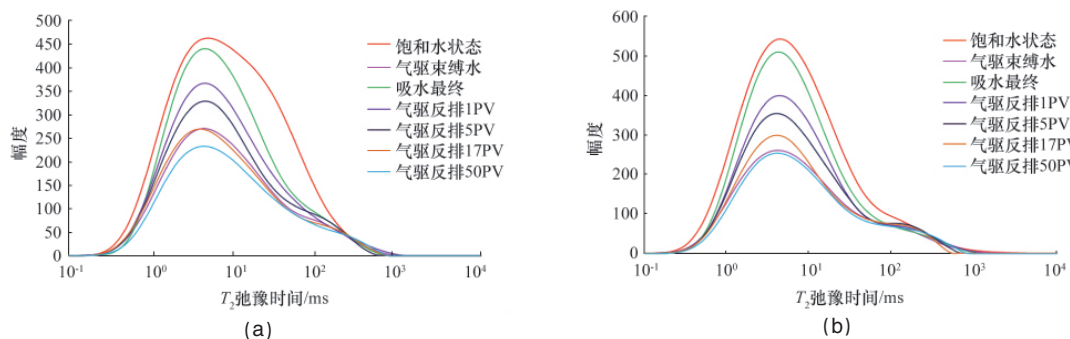


图 4 4#(a) 和 5#(b) 岩样饱和、束缚水以及不同反排 PV 数的核磁共振 T_2 谱

Fig. 4 Changes of NMR T_2 spectrum distribution under the bound water state, the saturated water and the different gas drive pore volumes in No. 4 (a) and No. 5 (b) cores

前从岩心中流出来的主要是存在于较大孔喉自由水和毛细管水,由于没有附加压力的存在,自由水以极快的速度从岩心中流出,由于气相反排的压力大于毛管力,毛管水也得以流动,因此反排 17PV 前含水饱和度下降迅速,水锁伤害得以明显改善;反排 17PV 后从岩心中流出来的主要是赋存于小孔喉中的毛管水及吸附水,这部分毛管水被较大毛管力限制,流动困难,而吸附水的失去主要是由于岩石表面水膜的水分子作热运动,蒸发的水分子被氮气携带出去,但是吸附水膜不能流动且蒸发缓慢,因此这一阶段含水饱和度下降缓慢,水锁伤害未得以明显改善。

3 结论

(1) 实验所用岩心为全直径岩心,更能反映火山岩溶洞裂缝渗流特征,比小岩心更具代表性,通过实验发现,低渗透火山岩气藏的水锁伤害具有普遍性和严重性。

(2) 渗透率不同的火山岩岩心自吸吸入水饱和度和吸水时间并非线性关系,数据分析表明自吸开始的 2h 之内,岩心自吸水量占全部自吸水量 82%,自吸 16h 岩心吸水量已占全部吸水量的 97% 左右。

(3) 应用核磁共振技术研究了吸入水量与孔隙结构的关系,发现孔隙结构越复杂,岩心吸水量越大。

(4) 通过反排实验发现岩心含水饱和度以及水锁伤害率随反排 PV 数的增加而减小并趋于平缓,反排 17PV 后岩心含水饱和度以及水锁伤害率基本保持不变,反排 25PV 后水锁损害基本得以解除。

(5) 针对目前水锁伤害评价存在的问题和不足,结合储层中水锁伤害的产生和解除过程提出了一种改进的水锁伤害评价方法。

参考文献 (References)

- [1] 孟小海, 伦增岷, 李四川. 气层水锁效应与含水饱和度关系[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(6): 48-49.
Meng Xiaohai, Lun Zengmin, Li Sichuan. *Daqing Petroleum Geology and Exploitation*, 2003, 22(6): 48-49.
- [2] 赖南君, 叶仲斌, 刘向君, 等. 低渗透致密砂岩气藏水锁损害实验研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(4): 125-127.
Lai Nanjun, Ye Zhongbin, Liu Xiangjun, et al. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(4): 125-127.
- [3] 曾伟, 陈舒, 向海洋. 异常地含水饱和度储层的水锁伤害[J]. 天然气工

业, 2010, 30(7): 42-44.

Zeng Wei, Chen Shu, Xiang Haiyang. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(7): 42-44.

- [4] 贺成祖, 华明琪. 水锁效应机理[J]. 钻井液与完井液, 1996, 13(6): 13-15.
He Chengzu, Hua Mingqi. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 1996, 13(6): 13-15.
- [5] 赵春鹏, 李文华, 张益, 等. 低渗气藏水锁伤害机理与防治措施分析[J]. 断块油气田, 2004, 11(3): 45-46.
Zhao Chunpeng, Li Wenhua, Zhang Yi, et al. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2004, 11(3): 45-46.
- [6] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006: 211-222.
Qin Jinshun, Li Aifen. *Petrophysics* [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006: 211-222.
- [7] Kornev K G, Neimark A V. Spontaneous penetration of liquids into capillaries and porous membranes revisited [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2001, 235(1): 101-113.
- [8] 李鹏, 康毅力, 游利军, 等. 致密砂岩液相毛细管自吸调控实验研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(S1): 71-74.
Li Peng, Kang Yili, You Lijun, et al. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2007, 22(S1): 71-74.
- [9] 高玲, 王建华. 油气储集岩物性特征的自吸法及其应用 [J]. 矿物岩石, 1999, 19(1): 39-42.
Gao Ling, Wang Jianhua. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1999, 19(1): 39-42.
- [10] 周宇, 郭和坤, 魏国齐, 等. 火山岩束缚水饱和度核磁共振测量方法 [J]. 科技导报, 2011, 29(5): 24-25.
Zhou Yu, Guo Hekun, Wei Guoqi, et al. *Science and Technology Review*, 2011, 29(5): 24-25.
- [11] 廖锐全, 徐永高, 胡雪滨. 水锁效应对低渗透储集层的损害及抑制和解除方法[J]. 天然气工业, 2002, 22(6): 87-89.
Liao Ruiquan, Xu Yonggao, Hu Xuebin. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(6): 87-89.
- [12] Bennion D B, Thomas F B, Bietz R F, et al. Remediation of water and hydrocarbon phase trapping problems in low permeability gas reservoirs [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1999, 38(8): 99-08-01.
- [13] 赵春鹏, 李文华, 张益, 等. 低渗气藏水锁伤害机理与防治措施分析 [J]. 断块油气田, 2004, 11(3): 45-46.
Zhao Chunpeng, Li Wenhua, Zhang Yi, et al. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 11(3): 45-46.
- [14] 李天太, 徐自强, 康有新, 等. 英南 2 井预防水锁水敏的钻井液配方室内试验研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2005, 20(4): 46-49.
Li Tiantai, Xu Ziqiang, Kang Youxin, et al. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2005, 20(4): 46-49.

(责任编辑 刘志远)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。