

压裂液伤害的计算机断层扫描技术

刘玉婷^{1,2}, 崔 丽³, 程 芳⁴, 管保山^{1,2}, 梁 利^{1,2}

(1. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油 油气藏改造重点实验室, 廊坊 065007;
3. 中国石油 大庆油田采油二厂, 大庆 163461; 4. 中国石油 长庆化工集团有限公司, 西安 710018)

摘 要: 使用 CT(计算机断层扫描)技术可以在不破坏岩心的前提下进行无损检测, 有利于对压裂液储层伤害的位置和程度进行效果对比、定量分析和直观观察。采用微米-纳米级 CT 扫描系统对压裂液伤害前后的岩心进行了微观分析, 结果表明: 致密储层岩心的物理性质差是引起储层伤害的根本原因, 压裂液与储层的相互作用是伤害的引发因素。CT 技术定性、定量、可视化的分析能力可以更直观地反映上述伤害产生的位置和程度, 可以有效印证其他分析手段得到的数据, 为压裂液伤害的研究提供试验手段和理论依据。

关键词: 压裂液伤害; 孔-喉结构; 计算机断层扫描; 定量; 可视

中图分类号: TE357.2; TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6656(2019)01-0018-05

Computed Tomography Technology for Fracturing Fluid Damage

LIU Yuting^{1,2}, CUI Li³, CHENG Fang⁴, GUAN Baoshan^{1,2}, LIANG Li^{1,2}

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, China National Petroleum Corporation, Beijing 100083, China;
2. Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Stimulation, China National Petroleum Corporation, Langfang 065007, China;
3. Daqing Oilfield the Second Production Plant, China National Petroleum Corporation, Daqing 163461, China;
4. Changqing Chemical Group Co., Ltd., China National Petroleum Corporation, Xi'an 710018, China)

Abstract: The use of CT (Computed Tomography) technology can perform non-destructive testing without destroying the core, which is beneficial to the comparison of effects, quantitative analysis and visual observation of the location and extent of fracturing fluid reservoir damage. The experimental results show that the poor physical properties of tight reservoirs are the root cause of reservoir damage, and the interaction between fracturing fluid and reservoir is the damage triggering factor. The qualitative, quantitative and visual analysis ability of CT technology can more directly reflect the position and extent of the above-mentioned damage, which can effectively testify the data obtained by other analytical methods, and provide experimental means and theoretical basis for fracturing fluid damage research.

Key words: fracturing fluid damage; pore-throat structure; CT; quantitative; visible

压裂液是压裂施工的作用液体, 其能够在地层形成具有一定几何形状的高导流裂缝。压裂液在改善油气通道时, 因为液体与储层的相互作用会给储层带来伤害^[1], 影响压裂施工的效果, 所以分析致密

储层的特点与压裂液伤害的关系, 对减少压裂液伤害, 提高压裂效果有极大意义。目前, 用于测试压裂储层伤害的试验方法主要有: 恒速压汞、岩心基质渗透率损害测定、敏感性、表面和界面张力、膨胀测试^[2-6]等。上述方法通过模拟压裂液及其破胶液在储层中的作用过程, 得到试验数据, 反映压裂液性能对储层伤害的影响程度。虽然上述方法能够定性定量分析不同类型伤害的程度, 但由于试验对岩心的破坏性, 所以不能对比分析伤害前后的岩心数据; 由于可视化能力的限制, 不能直观表现伤害发生的位

收稿日期: 2018-05-02

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2017ZX05023003)

作者简介: 刘玉婷(1983—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事压裂液酸液的研发和评价

通信作者: 刘玉婷, liuyuting69@petrochina.com.cn

置和程度,进而难以分析伤害产生的具体原因。

CT(计算机断层扫描)技术可以在不破坏岩心的前提下进行无损检测^[7-8],分析岩心结构、流体分布状态、黏土矿物形态改变等参数。在石油工业的许多领域尤其是地质勘探领域,采用CT技术对储层和岩心性质的研究已经有很大发展^[9],如使用CT技术建立储层岩心结构模型^[10-13],将CT技术与岩心压敏试验结合分析储层应力敏感性^[14],将CT技术与核磁共振试验结合分析岩心水驱油过程^[15-16]等。

1 CT 试验方法

CT技术可以在岩心孔隙存在压裂液等液体的情况下进行试验,有利于对比伤害前后岩心的状态、且可以定量分析和直观观察压裂液储层伤害的位置和程度。已有学者使用CT技术对储层伤害进行分析,但仅仅局限于地质角度,未与压裂施工和压裂液作用相结合^[17-19]。笔者使用CT技术分析了压裂液破胶液浸泡前后的岩心结构、孔隙度和黏土体积等参数,将CT数据与压裂液伤害研究试验相结合,对压裂液伤害的原因进行深入剖析。

采用微米-纳米级CT扫描系统对压裂液伤害前后的岩心进行微观分析过程为:①建立伤害前后的孔-喉结构微观图像;②使用CT分析软件定量计算伤害前后的孔隙度、渗透率的变化;③通过定性和定量数据对比,结合恒速压汞、伤害等压裂液性能

评价试验结果,解释CT技术对伤害分析的补充作用;④通过CT图像直观分析伤害产生的位置、伤害程度和伤害原因。

2 实例分析

2.1 试验条件

压裂液浸泡后岩心碎屑会在孔-喉处产生膨胀和运移,进而使油气渗流通道发生变化,即“伤害”。采用CT技术分析使用3种压裂液破胶液浸泡同一储层岩心前后发生的结构改变和定量检测结果,结合同一储层岩心的恒速压汞、伤害试验等数据,分析CT数据对伤害分析的辅助作用。

CT试验选用Phoenix nanotom m CT系统分析储层岩心三维孔-喉结构和建立3D图像,利用VGStudio MAX软件定量计算岩心孔隙度和渗透率;岩心取自鄂尔多斯盆地的延长组7段储层,制成直径为0.3 cm,长度为1 cm的圆柱体。试验液体采用压裂液破胶液,破胶液配方和制得条件见表1。浸泡过程中,破胶液常温下浸泡72 h。采用ASPE730型恒速压汞仪对岩心样品进行孔-喉大小的定量分析;样品是长7组储层的近50个岩心样品。采用美国千德乐6100型伤害仪等仪器,参考石油天然气行业标准SY/T 5107—2015《水基压裂液性能试验方法》和SY/T 5971—2016《注水用黏土稳定剂性能评价方法》测试压裂液岩心基质渗透率伤害率、膨胀率等性能数据。岩心样品是同一储层的岩心。

表1 压裂液破胶液配方和制得条件

液体	配方	破胶条件	破胶液黏度/ ($\times 10^{-3}$ Pa·s)
瓜胶压裂液	0.35%瓜胶+0.3%BCL-81交联剂+ 0.02%过硫酸铵破胶剂		3.42
纤维素压裂液	0.30%纤维素+0.2%增黏剂+ 0.5%FAJ-305+0.04%过硫酸铵破胶剂	80℃水浴,反应4 h	3.88
低浓度改性瓜 胶压裂液	0.2%改性瓜胶+0.3%FAL-120交联剂+ 0.5% FAL-120+0.02%过硫酸铵破胶剂		2.79

2.2 试验结果

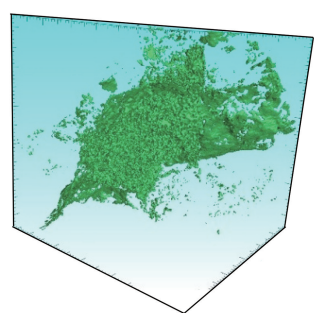
2.2.1 CT 试验结果

通过CT扫描得到的不同压裂液破胶液浸泡伤害前后的岩心孔-喉结构如图1~3所示。CT定量测试得到的储层参数包括伤害前后的孔隙百分比及体积减少率等(见表2)。孔隙度减少率=(伤害前孔隙度-伤害后孔隙度)/伤害前孔隙度 $\times 100\%$ 。

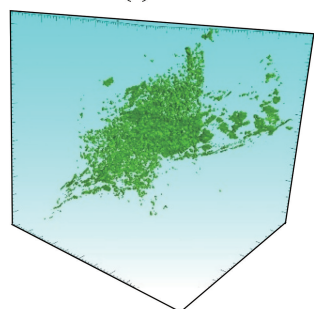
使用CT分析软件可建立孔-喉结构的球棍模

表2 CT 定量测试得到的储层参数

液体	伤害前孔 隙度/%	伤害后孔 隙度/%	孔隙度减 少率/%	黏土物质体 积增加/%
瓜胶压裂液	0.51	0.31	39.21	0.91
纤维素 压裂液	0.49	0.41	16.32	0.26
低浓度改性 瓜胶压裂液	0.61	0.49	19.67	0.59

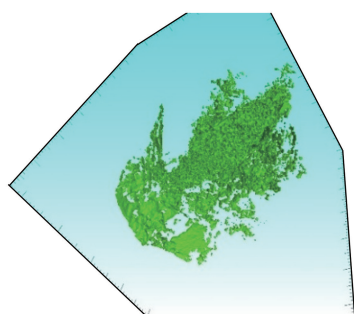


(a) 浸泡前

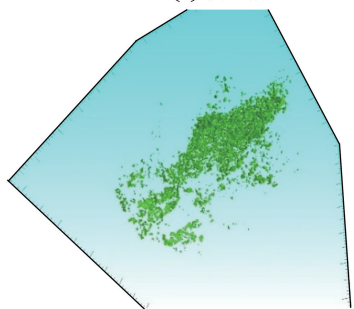


(b) 浸泡后

图1 瓜胶压裂液破胶液浸泡前后的岩心孔-喉 CT 图像



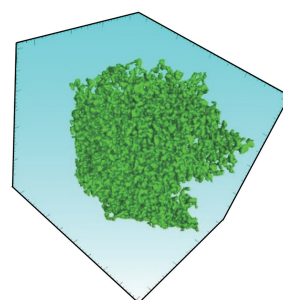
(a) 浸泡前



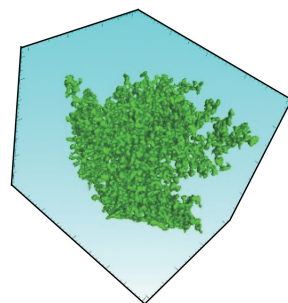
(b) 浸泡后

图2 纤维素压裂液破胶液浸泡前后的岩心孔-喉 CT 图像
模型:在试验中设定直径大于 $5\ \mu\text{m}$ 的孔隙在图中表现为“球”,直径小于 $5\ \mu\text{m}$ 的孔隙在图中表现为“棍”,球棍模型可以更明显地表达浸泡后孔隙和喉道数量的变化和伤害产生的位置,以利于伤害因素的分析。以纤维素压裂液为例,其孔-喉变化的球棍模型如图4所示。

由 CT 图像分析可知,储层喉道多呈束状、片状

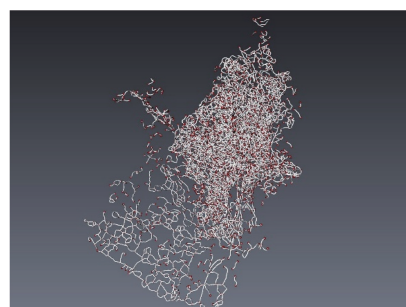


(a) 浸泡前

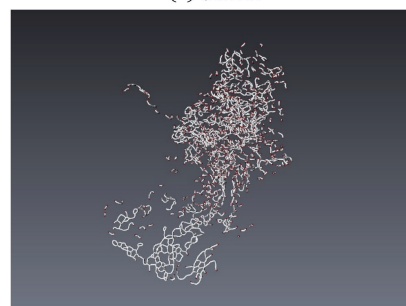


(b) 浸泡后

图3 低浓度瓜胶压裂液破胶液浸泡前后的岩心孔-喉 CT 图像



(a) 浸泡前



(b) 浸泡后

图4 纤维素压裂液破胶液浸泡前后的岩心孔-喉球棍模型等,孔-喉结构不利于液体的运输。由 CT 定量分析软件分析可知,长7组致密油储层孔隙和喉道都是微-纳米级别,物性较好的储层(渗透率 $>0.1\ \text{mD}$, $1\ \text{mD}=0.987\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$)存在 20%~30%连通性较好的大喉道,喉道半径大于 $4\ \mu\text{m}$,而物性较差储层(渗透率 $<0.1\ \text{mD}$)喉道细小,半径小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的喉道约占 60%,且连通性差。有效储集空间渗流

能力差是伤害产生的根本原因。

2.2.2 恒速压汞数据

使用恒速压汞试验进行孔隙、喉道及孔-喉连通性研究,数据见表3,由数据可知,主体喉道半径为 $0.3\ \mu\text{m}$ 左右,主体孔隙半径为 $160\ \mu\text{m}$ 左右,喉道细小,不利于储层中的流体流动,储层物理性质差,容易产生伤害。分析其中5块岩心样品储层孔-喉半径比(见表4),试验数据显示,渗透率低的样品(Y2,

Z143,N52)的孔-喉半径比大,即大孔隙被小喉道所控制,连通性差。通过标准方法测试得到的与压裂液伤害分析有关的参数见表5。

表3 孔-喉定量分析数据

孔隙半径 范围/ μm	孔隙平均值 范围/ μm	喉道半径 范围/ μm	喉道平均值/ μm
80~300	150.0~160.0	0.29~0.42	0.33

表4 致密油储层定量评价综合对比

参数	井号				
	Y1	X233	Y2	Z143	N52
气体测试渗透率/mD	0.38	0.12	0.06	0.04	0.03
有效喉道半径加权平均值/ μm	0.42	0.38	0.29	0.28	0.29
有效孔隙半径加权平均值/ μm	162.74	161.61	163.09	153.80	162.46
有效孔-喉半径比加权平均值	492.90	532.58	661.21	602.90	657.51

表5 压裂液伤害性能评价参数

液体	参数				
	膨胀率/%	破胶液表面张力/ ($\times 10^{-3}\ \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	破胶液界面张力/ ($\times 10^{-3}\ \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	残渣/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	岩心基质渗透率 伤害率/%
瓜胶压裂液	68.15	31.88	4.78	186	23.37
纤维素压裂液	77.05	21.46	3.22	无残渣	18.21
低浓度改性瓜胶压裂液	75.83	19.61	3.01	75	7.59

3 试验数据分析

由CT扫描得到的不同压裂液破胶液浸泡伤害前后的岩心孔-喉结构图可知,浸泡后孔-喉明显减少,分布变稀。结合CT定量分析数据、恒速压汞数据和压裂液岩心基质渗透率伤害性能评价数据可知,压裂液储层伤害主要是储层和压裂液双方相互作用的结果。

(1) 致密储层岩心物性差是引起储层伤害的根本原因。储层喉道多呈束状、孔隙缩小型、片状等;主体喉道半径为 $0.3\ \mu\text{m}$ 左右,主体孔隙半径为 $160\ \mu\text{m}$ 左右,喉道细小,不利于储层中流体的流动;喉道半径小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的喉道约占60%,细小喉道是形成伤害的主要位置;主要孔隙和喉道都是微-纳米级别,有效储集空间渗流能力差是伤害产生的根本原因。

(2) 压裂液与储层的相互作用是伤害的引发因素:压裂液膨胀率数据说明,自身防膨胀效果较好的纤维素压裂液在CT定量分析中,黏土物质体积增加^[20]最少,其作用原理为:黏土物质膨胀对孔-喉的

挤占少,对应的孔隙率减小最少,黏土物质体积增加也最少。压裂液破胶液表面和界面张力数据说明了压裂液的返排能力,易于返排的低浓度改性瓜胶压裂液表面和界面张力数值低,其破胶液滞留在孔-喉中引起水锁伤害^[21-22]的可能性降低,其直观表现为CT分析时,残留液体占据的孔隙体积小。残渣数据反映压裂液产生堵塞孔-喉物质^[23-24]的多少,无残渣的纤维素压裂液在CT定量分析中对应的孔隙度的减少率最小。因此,改善压裂液膨胀、表面、界面和残渣等各方面性能可以有效改变压裂液破胶液对储层的破坏程度。

(3) 岩心基质渗透率伤害率是压裂液伤害导致储层渗透率改变的宏观表示,是膨胀、运移、水锁等伤害因素共同作用的结果。CT定性、定量、可视化分析的结果与岩心基质渗透率伤害试验结果一致。岩心基质渗透率伤害率低的低浓度改性压裂液和纤维素压裂液,其黏土物质的增加和孔隙的减少都相对较低。CT定性、定量、可视化的分析能力更能直观反映上述伤害产生的原因和位置,为压裂液伤害分析提供有效支持。

4 结语

(1) CT 技术可以定量并直观分析压裂液储层伤害的程度、位置和原因。通过 CT 技术在压裂液伤害分析上的应用可知,储层喉道细小时不利于储层中的流体流动。储层结构、不规则的孔隙结构都是伤害的因素。

(2) CT 技术可以有效印证其他分析手段得到的数据。CT 定量分析数据与压裂液伤害评价数据有较好的印证。黏土膨胀、表界面张力等作用效果都可以通过 CT 图像直观地反映。

(3) CT 技术能建立球棍模型等直观分析模型,能定量计算孔隙体积等孔-喉数据,有利于进一步分析产生伤害的储层结构特点和伤害产生的程度与位置。

参考文献:

- [1] SHIRAYAMA K, KITA S I, WATABE H. Effects of branching on some properties of ethylene/ α -olefin copolymers[J]. Die Makromolekulare Chemie, 1972, 151(1): 97-120.
- [2] 付美龙, 胡泽文, 黄倩, 等. 建南致密砂岩气藏压裂液伤害主控因素[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(6): 116-120.
- [3] 张华丽, 周继东, 杲春, 等. 胍胶压裂液伤害性研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(23): 6866-6871.
- [4] 陈馥, 李钦. 压裂液伤害性研究[J]. 天然气工业, 2006(1): 109-111, 168.
- [5] 刘平礼, 张璐, 邢希金, 等. 瓜胶压裂液对储层的伤害特性[J]. 油田化学, 2014, 31(3): 334-338.
- [6] 曹彦超, 曲占庆, 许华儒, 等. 水基压裂液对储层液相伤害的实验研究[J]. 断块油气田, 2016, 23(5): 676-680.
- [7] 丁厚本, 杜平安. 工业 CT 在无损检测中的应用[J]. 无损检测, 1991, 13(7): 191-192.
- [8] 郭智敏, 齐子诚, 乔日东, 等. 工业 CT 系统密度分辨率的影响因素[J]. 无损检测, 2010, 32(11): 898-902.
- [9] 查明, 尹向烟, 姜林, 等. CT 扫描技术在石油勘探开发中的应用[J]. 地质科技情报, 2017, 36(4): 228-235.
- [10] 冯周, 刘瑞林, 应海玲, 等. 岩心 CT 扫描图像分割计算缝洞孔隙度与测井资料处理结果对比研究[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(4): 100-104, 118.
- [11] 王代刚, 胡永乐. 基于微焦点 CT 的三维数字岩心分析研究进展[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(6): 62-70.
- [12] 林承焰, 王杨, 杨山, 等. 基于 CT 的数字岩心三维建模[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(1): 307-317.
- [13] 白斌, 朱如凯, 吴松涛, 等. 利用多尺度 CT 成像表征致密砂岩微观孔喉结构[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 329-333.
- [14] 李荣强, 高莹, 杨永飞, 等. 基于 CT 扫描的岩心压敏效应实验研究[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(5): 37-43.
- [15] 吕伟峰, 冷振鹏, 张祖波, 等. 应用 CT 扫描技术研究低渗透岩心水驱油机理[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(2): 87-90, 117.
- [16] 赵碧华. 用 CT 扫描技术观测岩心中液流特性[J]. 石油学报, 1992(1): 91-97.
- [17] 王新建. CT 扫描在碳酸盐岩储集层伤害因素地质分析中的应用[J]. 天然气工业, 1995(2): 97.
- [18] 吴洁. 显微 CT 技术在油层伤害机理研究中的应用初探[D]. 上海: 东华理工大学, 2013.
- [19] 赵碧华. 用 CT 扫描技术研究岩心伤害情况[J]. 石油钻采工艺, 1992(5): 57-60, 65.
- [20] 廖纪佳, 唐洪明, 朱筱敏, 等. 特低渗透砂岩储层水敏实验及损害机理研究——以鄂尔多斯盆地西峰油田延长组第 8 油层为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 321-323.
- [21] 庞振宇, 孙卫, 李进步, 等. 低渗透致密气藏微观孔隙结构及渗流特征研究: 以苏里格气田苏 48 和苏 120 区块储层为例[J]. 地质科技情报, 2013, 32(7): 133-138.
- [22] 张荣军, 蒲春生, 赵春鹏. 板桥凝析油气藏水锁伤害实验研究[J]. 钻采工艺, 2006, 29(3): 79-81.
- [23] 庄照锋, 赵贤, 李荆, 等. HPG 压裂液水不溶物和残渣来源分析[J]. 油田化学, 2009, 26(2): 139-141.
- [24] 何勤功. 高分子聚合物在储集层孔隙介质中的滞留机理[J]. 石油勘探与开发, 1981(3): 49-60.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告