

岩石热开裂及其在工程学上的意义

韩学辉¹, 楚泽涵¹, 张元中²

(1. 石油大学 信息科学与地球物理系, 北京 102249; 2. 大庆测井公司, 黑龙江 大庆 163412)

摘要: 沉积岩及火成岩在高温环境下会发生热开裂现象, 热开裂能够在一定程度上改造岩石的孔、裂隙结构, 进而对岩石中的流体运移特性产生影响。该文在回顾岩石热开裂研究进展的基础上, 着重讨论了其在石油开采、核废料存储等工程应用方面的意义。

关键词: 岩石热开裂; 流体运移; 石油开采; 核废料存储

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

沉积岩及火成岩在高温环境下, 会由于造岩矿物颗粒组分热膨胀(收缩)率的差异, 导致内部裂缝的扩展及诱导裂缝的产生、传播, 进而相互连通形成裂缝网络对岩石的孔隙度、渗透率等物理性质产生影响, 这是岩石的热开裂(thermal induced crack)^[1]现象。

由于岩石的热开裂具有从微观上改变岩石的孔、裂隙结构, 进而对岩石中流体运移产生影响的特性, 因此引发了相关领域工程技术研究人员的极大兴趣。对于石油开采工程来说, 岩石的热开裂会使产层孔渗性质, 特别是渗透性得到很大程度的改善(最大可以达到两个数量级), 是一种有利的因素, 与热采结合可能成为一种提高产能和采收率的新措施; 而对于核废料存储工程, 由于核废料衰变引发的热开裂会降低储罐及其附近岩石的强度, 存在核废料通过热开裂形成的微裂纹网络外泻造成放射性污染的风险, 是一个应极力避免的不利因素。本文在回顾岩石热开裂研究进展的基础上, 讨论有关热开裂研究成果在石油开采、核废料存储等工程方面的应用前景。

1 热开裂实验研究进展

岩石热开裂的研究, 国内外尚处在起步阶段, 目前以模拟各种温度条件下花岗岩、碳酸岩、砂岩等不同岩性热开裂状态的实验研究为主, 大部分现象和认识是在实验研究的基础上获得的, 理论研究开展得还很少。以下简要介绍实验研究方法以及实验研

究获得的一些认识。

1.1 实验研究方法

按对岩石热开裂检测方法的不同, 可以将岩石热开裂的实验研究方法分为物性参数对比和声学检测两种。其中, 物性参数对比法主要基于温度对岩石热开裂的作用具有不可逆性的特点, 通过对岩样在加热前后的孔、渗参数测量定量给出热开裂对岩石孔渗特性的改造作用, 具体检测技术包括常规孔渗测量、电镜扫描技术(SEM)和核磁共振(NMR)技术; 声学检测法是较早采用的一种评价方法, 早先主要通过声发射(AE)计数率来作为岩石热开裂的指示, 近年又发展了利用纵波速度的变化来评价热开裂程度的技术^[2]。

在以上检测技术中, 核磁共振方法的灵敏度最高, 尤其表现在对温度较低的情况下, 尽管岩石的宏观物性参数没有发生可察觉的变化, 仅微观孔隙结构发生微小变化, 利用核磁共振方法还是可以检测得到; 常规孔渗测量和电镜扫描也能较好地定量评价热开裂的程度; 声发射计数率和纵波速度均可以作为岩石热开裂的有效指示^[2]。

1.2 研究成果

陈颀(1980)用美国 Westerly 花岗岩进行热开裂实验, 当温度加热到高于 60~ 70℃时, 岩石发生热开裂, 并伴随有热致声发射现象, 这些研究成果已被用于核废料存储的安全性检测^[3]; 对沉积岩, 特别是油气储集层岩石的热开裂现象, 陈颀、吴晓东对若干山东东营碳酸盐岩样进行加热实验, 在给定温度下对岩心进行加热然后冷却到室温, 对岩心的渗

透率测试结果表明, 渗透率的变化是温度的函数, 当温度加热到 110~120℃ 时, 碳酸岩的渗透率增加 8~10 倍^[4]。周克群、楚泽涵等人对岩石热开裂及检测方法进行了实验研究^[2], 率先采用纵波速度和核磁共振技术来检测岩石热开裂的程度, 并对研究的对象扩展到凝灰岩、花岗岩、花岗片麻岩、碳酸盐岩和砂岩等。实验发现, 对于碳酸盐岩, 在温度低于阈值温度(100~120℃) 时, 碳酸盐岩的渗透率几乎不发生变化, 温度进一步升高时, 其渗透率有随温度升高而上升的趋势; 凝灰岩、花岗岩、花岗片麻岩和砂岩的渗透率几乎不随温度的变化而变化; 对大多数的沉积岩而言, 阈值温度的范围较高, 在 400℃ 以上; 大多数砂岩的热开裂阈值温度在 600℃ 左右; 对多数岩石, 若温度能够达到 800℃, 则渗透率可以增加 8~100 倍。

目前对实验现象的分析认为, 岩石热开裂主要有热膨胀的不均匀性(单相矿物颗粒的情况)、热膨胀的各向异性(多相矿物颗粒的情况)以及热膨胀使孔隙中的流体压力升高 3 种机制, 均与温度关系极为密切。一般的, 岩石在受热后内部会出现应力的集中, 当温度达到岩石热开裂的阈值温度(实际上难以精确测定, 常用一个比较小的温度区间表示)时, 岩石内部就会以粒间开裂和粒内开裂两种模式同时进行已有裂纹的传播及新裂纹的形成、扩张和传播等几个过程, 并且伴有热传导率、电导率的变化以及声发射现象^[5]。不同岩性、同种岩性不同孔渗特性的岩石, 由于其矿物组分基本物理性质的差异, 其阈值不同, 如花岗岩的阈值温度为 75℃ 左右, 碳酸盐岩的阈值温度为 120℃ 左右, 储集层砂岩的阈值温度多在 400℃ 以上。超过岩石热开裂的阈值后, 随温度的进一步增高, 尽管孔隙度的变化相对比较微小, 但总体上都有渗透率显著提高、声发射的强度和频率明显增强的趋势, 并且具有温度的不可逆性。由于岩石在发生热开裂时, 内部会同时发生裂纹的闭合以及裂纹网络连通性的增强的过程, 其最终趋势是对岩石的力学性质和流体传输性质如弹性模量、超声波速度、品质因子、裂缝粗糙度、孔隙度和渗透率产生影响; 对于渗透率, 实验研究结果表明最多可以增加两个数量级。

2 岩石热开裂在工程应用上的意义

2.1 提高采收率

油田的最终采收率在很大程度上取决于储集层的均质性。目前全世界及中国的主要大油气田已逐

步进入中后期开发阶段, 低渗透、低产能、复杂孔隙结构储油层的储量在可采储量中的比例上升, 用现有的开采方法难以达到较高的采收率, 因此提高采收率是备受关注的问题。

现有的增产措施(EOR) 主要有维持地层压力(注水、注气等)、改变孔隙流体性质(注聚合物、注蒸汽等)及改变孔隙结构的导流能力(酸化、压裂、酸压等)3 种方法。这 3 种方法提高采收率有限, 增加了储集层的非均质性, 给后期的增产措施带来困难。由于岩石热开裂能使储集层岩石的孔隙度、渗透率相当均匀地增加, 不会产生层次生的非均质性, 如能与热采有机结合, 在提高渗透率的同时降低原油粘度, 必将在一定程度上提高产能和采收率, 成为一种比较有潜力的增产措施。现有的石油热采方法, 其主要的出发点在于降低原油粘度, 未考虑加热过程对储集层岩石物理性质的贡献。

将岩石热开裂用于石油开采, 在国内外都还处于实验阶段, 要想真正成为一种方法和技术发挥作用, 必须解决以下问题: 1) 不同层段产层岩石热开裂阈值温度的确定; 2) 温度场下产层物理性质的变化规律; 3) 产层内部裂缝网络扩展模式与渗透率、孔隙度变化的内在联系; 4) 孔渗参数变化对提高原油采收率的贡献; 和与在井筒环境中进行热开裂的作业方法及效果检测等。

2.2 核废料存储

20 世纪 80 年代, 美国学者在研究中发现, 当将核废料存储在地下 50~1000 m 的致密花岗岩中时, 由于核废料衰变放热, 积聚的热能可使储罐和花岗岩的温度达到 200~300℃ 左右, 使储罐和花岗岩发生热开裂作用, 导致其内部微裂缝的连通性增加, 流体渗滤能力加强^[6,7], 发生核泄露, 同时观察到明显的声发射现象。

因此, 在核废料存储地址的选择上, 应对储罐附近岩层的岩性以及地下水的渗流特性进行细致的勘探测量, 实验确定储罐及附近岩石发生热开裂的阈值温度, 结合对核废料衰变能力的理论计算结果, 判定该区域是否适宜于做核废料存储的地下“仓库”, 避免核泄露进入地下水对生态环境产生灾难性的破坏, 同时对核废料存储场所应进行远端监测。

3 结束语

关于岩石热开裂与流体运移的研究与应用, 在国内外还处于起步阶段。本文简要介绍了目前有关岩石热开裂的研究方法和成果, 并从正反两个方

面讨论了岩石热开裂在石油开采、核废料处理工程两个方面的应用前景。此外,岩石热开裂在地热能的开发、超深钻井以及煤矿的火区探测方面都有一定的研究和应用价值。

参考文献:

1 张元中, 楚泽涵, 陈 颢. 岩石热开裂研究现状及其应用前景 [J]. 特种油气藏, 1999, 16(2): 1~ 5

2 周克群, 楚泽涵, 张元中等. 岩石热开裂与检测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 412~ 416

3 Chen Yong, Chiyuan Wang. Thermally induced acoustic

emission in Westerly Granite[J]. Geophysical Research Letters, 1980, 7(12): 1 089~ 1 092

4 陈 颢, 吴晓东, 张祖勤. 岩石热开裂的实验研究[J]. 科学通报, 1999, 44(8): 880~ 883

5 Wang H F, Bonner B P, Carlson S R, et al. Thermal stress cracking in granite[J]. J Geophys Res, 1989, 94: 1 745~ 1 758

6 Palciauski V V, Domenico P A. Characterization of drained and undrained responded of thermally loaded repository rocks [J]. Water Resource Res, 1982, 18: 281~ 290

7 Ivars N. Diffusion in the rock matrix: an important factor in radionuclide retardation [J]. J Geophys Res, 1980, 85 (B8): 4 379~ 4 397

THERMAL-INDUCED ROCK CRACKING AND ITS SIGNIFICANCE IN ENGINEERING

Han Xuehui¹, Chu Zehan¹, Zhang Yuanzhong²

(1. Department of Information Technology & Geophysics, Petroleum University, Beijing 102249, China;
2. Daqing Well-logging Company, Daqing, Heilongjiang 163412, China)

Abstract: Thermal-induced rock cracking is a common phenomenon when sedimentary and igneous rocks are in high temperature environments. It can impact on flow transportation features in rocks through the reconstruction of pore and fissure structure. Based on the review of its study status, this paper emphasized its significance in the fields of oil exploitation and nuclear waste storage.

Key words: thermal-induced rock cracking; fluid transportation; oil exploitation; nuclear waste storage