

储层裂缝研究的新方法——声发射实验

郑荣才

(“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 成都理工学院沉积地质研究所, 四川成都 610059)

声发射活动对地质体载荷历史中的应力场期次和破裂强度记忆力特征, 即 Kaiser 效应是声发射实验的基本原理, 它是建立在测试岩芯或露头样品上的[1] 种研究储层裂缝的新方法。以辽河古潜山油藏为例, 此方法不仅能有效的划分潜山裂缝期次, 亦能判别潜山储层破裂强度及性质等复杂地质问题, 颇具应用前景。

关键词 声发射实验 格里菲思微裂纹 Kaiser 效应 应力场 储层裂缝

作者简介 郑荣才 男 46 岁 教授 层序地层学和储层沉积学

声发射(Acoustic Emission, 简称 AE) 其定义为“材料内部的应变能量快速释放时产生的一种瞬态弹性波现象”[1]。作者利用这一技术相继研究了辽河油田西部凹陷中-上元古界古潜山储层和四川盆地地下侏罗统大安寨段灰岩储层裂缝[2], 取得较为令人满意的结果。现将以辽河油田为例的研究作一简要介绍, 以期完善和推广这一新技术方法在储层裂缝研究和油气勘探中的应用。

1 原理

地下岩层因遭受地史中的构造应力场作用, 普遍发育有微观或隐蔽的格里菲思微裂纹(Griffith Microfracture)。在进行声发射实验时, 样品在模拟古应力场的加载过程中, 当应力值达到和大于微裂纹形成时的应力强度, 微裂纹就会失稳扩展而形成不可逆的声发射效应, 即“Kaiser 效应”, 其中微裂纹初始扩展点的应力值可代表其形成时的古应力强度, 即所谓 Kaiser 效应对古应力场强度的记忆[1]。如连续施加载荷力, 不同期次的微裂纹就会相继扩展而形成多个 Kaiser 效应点, 并由 Kaiser 效应点的个数和应力分量反映岩石所经历过的应力场期次和强度。须指出的是, 岩石如遭受某一期次的应力场强度高于该期之前的应力, 不仅形成新的微裂纹, 同时前期的应力记忆随微裂纹扩展会被抹掉。因此, Kaiser 效应点只能有限地记忆某个最高应力场强度及其之后的各应力场期次。又由于 Kaiser 效应点对古应力强度由高到低的期次有更好的记忆力, 实验是在载荷逐渐加大的过程中进行, 因而在实验曲线(AE 曲线)上相继出现的 Kaiser 效应点, 与其所代表的应力场期次在顺序上恰好相反。

实验表明, Kaiser 效应点具有方向上的独立性, 最高声发射次数(或频率)和应力分量值应出现在最大古应力方位上。因此, 只须测出某点 3 个或 3 个以上方位的同期应力分量值, 即可

利用应力计算公式求得该点在三维空间上的最大古应力方位及强度。这一具方位概念的实验,样品必须取自定向岩芯或露头,无方位概念的样品,仅反映应力场期次及应力强度的相对高低和变化范围。

2 样品和实验

实验样品必须无肉眼可见的裂缝,以保证实验参数的可靠性。规格为圆柱状或长方形,长度为直径或对角线的2倍,不小于4.5 cm。以钻井岩芯为例,非定向样品在垂直岩芯轴的方向上任意钻取1件或相正交的2件。定向样品以岩芯轴为 z 轴,根据定向方位确定 x 轴和 y 轴形成三维坐标,再按岩芯大小确定样品规格和样品数,如岩芯不够大时以作平面分析为主,沿 $x, y, x\ 45^\circ y(-x\ 45^\circ y)$ 的方位钻取3件或4件样品备用。如岩芯足够大,可在 $x\ 45^\circ z, y\ 45^\circ z$ 等方位增补数件样品,以满足三维空间分析的需要。样品必须在同一岩芯上连续钻取,以保证各样品的岩性结构基本一致和完整。样品的端面须磨平,与轴线正交。

本文的声发射实验在成都理工学院“工程地质国家专业实验室”美制“MTS815 Teststar 程控伺服岩石力学试验系统”中进行,由“AE-400 B 声发射测试与定位仪”采集特征参数。实验过程和结果由 AE 曲线图和声发射参数统计表给出,定向样品的最大和最小应力值及方位由配套的程序处理和给出结果。AE 曲线图的横坐标为连续加载速度(5~10 kN/min)。纵坐标为声发射频率,频率的大小反映声发射强度,累积频率曲线即为 AE 曲线。在 AE 曲线中声发射频率呈阶梯状突变的拐点位置即为 Kaiser 效应点,按其出现的顺序标以 ① ②…… n ,对应的应力分量由连续加载过程中的仪器采集。

3 实例

辽河油田西部凹陷中-上元古界古潜山油藏,储层以网状裂缝和溶蚀孔洞极其发育的碳酸盐岩和砂岩为主,盖层主要为古新统玄武岩。已有研究成果表明,古潜山基岩和玄武岩中的裂缝,为沙河街组油源岩向古潜山油藏供油的重要运移通道和储集空间之一,然而有关裂缝的发育期次及其对储层和油气成藏的贡献,始终未能得到合理解释。针对这一问题,作者开展了非定向样品的声发射实验、岩石力学和次生石英 ESR 测年等配套综合研究,较好地解决了上述问题。

3.1 划分潜山裂缝期次

所分析的样品中(表1,图1),Kaiser 效应点出现率在岩溶角砾岩和玄武岩为1或2期,古潜山基岩为4期。根据玄武岩的古新世年代,可确定 ①和 ②Kaiser 效应点代表玄武岩喷发后的两期新构造运动应力场事件。中生代的岩溶角砾岩仅发育最晚期的 ①Kaiser 效应点,与其岩性结构松散难以保存该点之前的应力记忆有关。以玄武岩为参照系,可判断古潜山基岩中出现的 ③和 ④Kaiser 效应点,应是对玄武岩喷发前的两期古老构造应力场事件的记忆。显而易见,此4个 Kaiser 效应点显示了古潜山储层至少遭受了前中生代至新生代的4期构造破裂作用。结合充填裂缝的次生石英 ESR 测年数据(表1)及区域构造演化史分析,可确定相当 Kaiser 效应点 ④的第一期裂缝为海西-印支期构造运动产物,由于充填强烈,对改善储层的孔渗性贡献不大;相当 ③的第二期裂缝为强烈隆升和断裂活动的燕山期构造运动产物,该期断裂构造和裂缝的发育及其古表生期大气水对古地貌高地上的地层强烈溶蚀作用,在碳酸盐岩和石英砂岩中形成大量沿裂缝发育的溶蚀孔洞缝,乃至大型洞穴,然而因外来溶蚀碎屑物对孔

洞,特别是裂缝的充填较强,孔隙度虽然有所提高,但渗透率仍较低,对储层的可渗性改造仍有

表 1 辽河油田西部凹陷潜山储层及盖层声发射特征参数、岩石力学及裂缝充填物特征简表

岩 性		层位	样品数	储、盖层组合	对应 Kaiser 效应点的应力分量/MPa				抗剪强度/MPa	抗压强度/MPa
					①	②	③	④		
玄武岩		E ₁	3	盖层	5. 28	13. 86	—	—	10. 83	24. 9
白云质岩溶角砾岩		M _z	1	储层	8. 28	—	—	—	< 10	< 20
粉晶白云质灰岩		P _t	2		5. 36	8. 49	15. 43	32. 67	36. 52	84. 64
粉晶灰质白云岩			2		9. 11	12. 75	25. 88	32. 26	34. 63	84. 25
石英砂岩			1		6. 86	15. 47	20. 25	33. 13	38. 02	38. 81
石英岩状砂岩			1		—	10. 77	17. 6	20. 7		
裂缝期次划分及石英充填物特征	裂缝期次划分				第四期	第三期	第二期	第一期		
	次生石英	ESR 年龄/Ma		(29~ 35) *	40~ 45	135	300~ 400			
		成因特征		未发现	含油棕色细~微晶,自形	铁红色巨晶,它形	乳白色粗~巨晶,它形			

* 据构造演化史推测的地质年龄

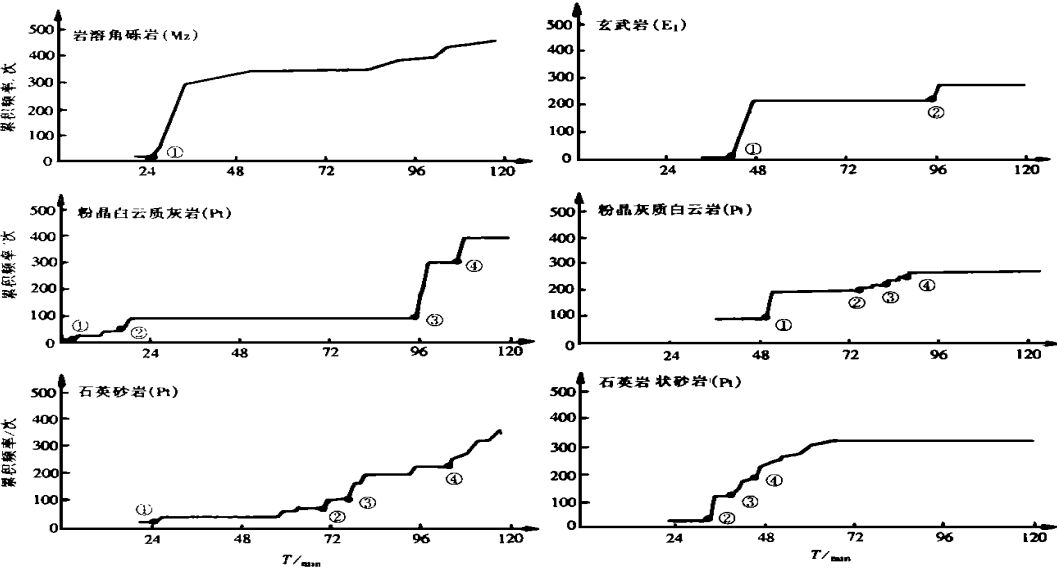


图 1 辽河油田西部凹陷古潜山油藏的部分储层和盖层样品的声发射实验 AE 曲线图
(AE 曲线中的 ①~ ④Kaiser 效应点与表 1 相对应)

限,总体以裂缝和古表生期溶蚀作用奠定了古潜山地貌和古岩溶型及裂缝型等非常规储层的发育基础为特征;相当 ②的第三期裂缝为有强烈断块运动的喜山初期构造运动产物,由深~浅双侧向曲线的电阻率差值,求得新增有效裂缝孔隙度 0.01%~ 0.2%,为进入再埋藏环境的储层遭受深部热水溶蚀而改善其孔渗性,以及为自上而下倒灌运移的油气初次聚集成藏,提供了重要的渗流通道条件;相当 ①的第四期裂缝为断块活动结束后发生短暂区域隆升的喜山早~中期构造运动产物,虽未取得次生石英的 ESR 测年数据,但据裂缝产状和阴极发光研究,该期裂缝穿插切割了前 3 期裂缝,发育范围仅限于始新统沙河街组与渐新统东营组之间的区域不整合面之下,其年龄上限对应不整合面的 29~ 35 Ma,由于该期裂缝的成因与区域构造隆升剥蚀引起的地层舒张反弹和内应力松弛释放引起的张裂有关,并往往以追踪和叠加前 3 期次裂缝

的形式产出, 开启性好, 由深-浅双侧向曲线的电阻率差值得得新增有效裂缝孔隙可达0.2%~0.53%, 不仅大大改善了储层的孔渗性, 同时亦为油气二次运移和聚集成藏提供了最重要的渗流通道和部分储集空间, 因而该期裂缝的发育期, 也是古潜山油藏的主要成藏期。

3.2 判别潜山储层破裂强度及性质

如以各 Kaiser 效应点的应力分量值代表古潜山储层各期次构造破裂强度的下限值, 则第一期为 20.7~33.13 MPa, 第二期为 15.43~25.88 MPa, 第三期为 8.49~15.47 MPa, 第四期为 5.36~9.11 MPa(表 1)。这一由老到新应力强度逐渐递减的变化趋势, 与各时期构造活动方式相关的应力场强度变化和破裂作用性质是相适应的。又如代表古潜山基岩遭受最高应力场作用强度的 ④Kaiser 效应点和盖层玄武层 ②Kaiser 效应点的应力分量, 分别与各自的抗剪强度相接近, 低于抗压强度(表 1), 说明引起基岩和盖层最初大规模破裂的作用为剪切应力。由该点之后的各 Kaiser 效应点应力分量逐级递减的变化趋势, 说明岩石一旦发生初期大规模破裂后的再破裂活动, 所需的应力强度明显降低, 无疑与前期裂缝的发育导致岩石抗破裂强度下降有关。上述特征与岩芯中所见到的早期裂缝以剪切缝为主, 而较晚期的裂缝以追踪和叠加前期裂缝的继承性发育特征相拟合。

4 结语

上述研究实例表明, 声发射实验能够较为有效地解决非常规储层裂缝的成因、期次划分、破裂强度及性质等复杂地质问题, 是一种既经济又易于操作的储层裂缝研究新技术方法, 在油气勘探中具有广阔的应用前景。

致谢: 本文研究实例中, 声发射实验和部分岩石力学实验由成都理工学院“工程地质国家专业实验室”徐进高级工程师完成, 在此致以谢意。

参 考 文 献

- 1 张大伦. 声发射技术在国外岩石工程中的应用. 岩石力学与工程学报, 1985, 4(1): 77~83
- 2 郑荣才. 四川盆地大安寨段储层裂缝的声发射实验. 成都理工学院学报, 1997, 24(4): 1~8

A NEW METHOD OF STUDYING RESERVOIR FRACTURES: ACOUSTIC EMISSION EXPERIMENT

Zheng Rongcai

(State Laboratory of Oil/Gas Reservoir Geology and Exploration,
Chengdu College of Technology, Chengdu, Sichuan)

Abstract

Applying Kaiser effect as the basic principle of acoustic emission experiment to test core or outcrop samples is a new method of studying reservoir fractures. This method was used in the study of the buried hill oil pools in Liaohe Oilfields. It could not only distinguish effectively the fracture terms of the buried hill, but also could determine the fracture intensity of the reservoirs in the buried hill and their feature. The method is proved to be valuable in application.