

利用岩矿记忆信息恢复基岩潜山 裂缝储层形成的机制

傅强 王家林 周祖翼

(同济大学海洋地质与地球物理系, 上海, 200092)

内容提要 基岩储层具有当今油气储层研究的两大难题, 即特殊且致密的基质岩性和储集空间。变质岩作为基岩岩性之一, 其储集空间——裂缝的形成与动力作用密切相关。构造动力是致密基岩产生裂缝的主要因素, 岩石矿物将记忆其在地质历史过程中所经历的动力特征。在准确采取定向岩心的基础上, 利用声发射技术(AE)和岩组学方法可以恢复基岩储层在地质历史过程中所受应力期次和应力方向, 从而了解储层的动力机制。应用上述原理恢复辽河大民屯凹陷曹台变质岩潜山受到三期应力作用, 潜山南北两端受近EW向挤压应力, 而潜山中部受NE向压剪应力。储层裂缝发育和分布与潜山所受动力机制一致。

关键词 变质岩 裂缝 声发射 岩组学 动力机制

传统的油气勘探总是将眼光盯在由沉积岩构成的圈闭储层中, 使得以变质岩、岩浆岩为储层的盆地基底基岩油气藏的发现具有偶然性。目前世界上已发现近百个盆地基底基岩油气藏, 我国在渤海湾盆地的下辽河凹陷、东营凹陷也发现了一批以太古宇变质岩、花岗片麻岩为储集岩的油气藏。这些发现开拓了石油地质工作者的眼界, 即在盆地褶皱基底基岩中寻找油气藏。

Landes 早在 1960 年就指出基岩油气藏储集空间以裂缝为主, 油气来自上覆年轻沉积盖层。构造运动和风化作用是基岩产生裂缝的两大动力, 基岩体内裂缝与构造动力有关^[1]。尽管石油地质与工程地质专家对储层裂缝成因^[2,3]、裂缝物性计算^[4,5]、裂缝在岩石中的分布^[6]等研究进行了不懈的努力, 但针对基岩裂缝的研究却很少触及。本文以具有特殊且致密的基质岩性和裂缝空间的变质岩储层的形成有着其特殊的动力学特征为依据, 以辽河大民屯凹陷曹台变质岩潜山为例, 应用岩石声发射技术(AE)和岩组学(石英光轴测定)方法, 研究潜山变质岩裂缝形成的动力机制。

1 地质概况

曹台潜山位于辽河大民屯凹陷东北部, 为一北北东向延伸、四周为断层所封闭的后期受挤压向上抬升的地垒式潜山。储集岩为太古宇变质岩, 是典型的基岩潜山油藏。据区域地质分析, 曹台潜山与大民屯凹陷中其他基底潜山一样, 是太古宇结晶基底在燕山运动作用下, 经历了拉张、挤压等长期的地质动力作用后, 基岩块体被断层分割成 10 个小断块, 造成基岩裂缝发育形成储层, 在下第三纪沙四期整体下陷, 开始接受沉积, 上覆生油岩生成的油气向下运移至潜山形成油气藏。

注: 本文为石油大学(北京)盆地与油藏研究中心博士研究基金(K9702)资助。

本文 1998 年 2 月收到, 1999 年 3 月改回, 周健编辑。

裂缝是岩石受应力作用产生的各种裂隙和碎裂缝^[7]。曹台潜山变质岩储层的形成主要是西侧高角度逆断层的结晶基底向西逆冲,导致变质岩体受力发生强烈破碎作用。岩心观察表明,裂隙成组出现,相互切割,纵向上分布和发育程度不同,部分井段岩心破碎十分强烈。薄片可见显微裂缝。按岩心裂缝产出状态分为高角度缝、斜交缝、水平缝、网状缝和不规则微裂缝。在该类油藏的开发过程中,要解决裂缝分布和发育方向问题,而岩体受力期次和受力方向等动力机制是首先需要解决的问题。

2 声发射实验研究岩石裂缝形成期次

地下岩层中普遍发育有微观的或隐蔽的格里菲斯微裂纹(Griffith microfracture),这种微裂纹可以是多期应力场作用形成的。实验时,样品在加载过程中因微裂纹失稳扩展(破裂)而构成不可逆的 Kaiser 效应。理论上,当施加的应力达到古应力场的强度时,微裂纹才会开始扩展,并由此而造成发射次数和强度急剧增加,因而施加在该点上的应力值可相当古应力场强度。如果单方面连续施加载荷力,由不同期次的构造应力所形成的微裂纹会相继发生扩展而形成多个强度不一的 Kaiser 效应点。因而,利用声发射实验 AE 曲线上出现的 Kaiser 效应点的个数,可以判断岩层所经受过最少应力作用期次,以及实验各应力分量的大小^[8]。

限于岩心条件,仅在曹6井岩心中取到5块可供实验用的两组样品。经实验得出特征声发射曲线(图1)。图中的横坐标为连续加载时间,加载速率为3~10 kN/min。纵坐标为声发射特征参数累计频数,它的大小直接反映声发射的强度。AE 曲线中 Kaiser 效应出现的位置对应于阶梯状骤然递增的部位,但前后出现的阶梯并不代表 Kaiser 效应的先后次序。从图1可以看出,具明显特征的 Kaiser 效应点多为一期,仅在 $C_{6-5}XY$ 上出现两期,或在 $C_{6-5}X$ 上隐约显示出3期。根据每一个明显的 Kaiser 效应点对应岩石在地质过程中的一次应力场作用结果的原理,经历构造事件越多的古老地层岩石,记忆的应力场期次就越多。因此可以得出,曹台潜山主要受某一期应力作用,而这一期应力可能对应曹台潜山形成时的主要应力时期,即燕山运动期,而后期应力则是曹台潜山后期发育中岩石所受应力的记忆。即至少有1~2期应力叠加于燕山运动期主应力之上。而变质岩潜山受力方向则需要对岩石矿物记忆信息进行研究才能得出。

3 石英光轴测量

石英光轴测量是通过费氏台测定岩石定向薄片石英颗粒的光轴 c 轴的方向,统计分析

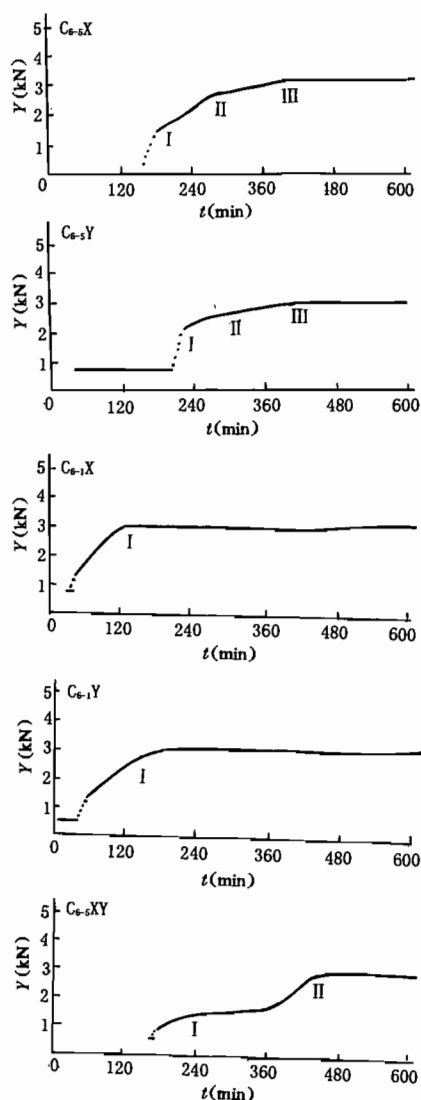


图1 曹6井样品声发射 AE 曲线
Fig. 1 The acoustic emission curve of samples from well Cao 6

石英晶体在动力环境中光轴发生偏转的角度和方向,研究岩石形变条件、机制及历史^[9]。

根据地层倾角测井及岩心归位从曹台变质岩潜山4口井(曹19井1795.0m,曹21井1409.5m,曹22井1195.5m,曹20井1484.5m)取得4块定向标本,岩性均为混合花岗岩和碎裂岩。经定向切片和费氏台测定统计,石英 c 轴定向排列方向不明,镜下可见的构造形迹(如变

形纹、博姆纹、扭折带等)也不明显。通过测定石英晶体 c 轴的偏转角度,可以估测应力方向和岩石受力状态(图2)。

曹19井1795.0m样品岩组方位极密图为点极密型。图形由一个极密部和周围隐约可见的环带组成,极密部极密值较高(10.47%~7.68%),反映石英光轴在较强应力作用下,随着岩石的塑性变形而具有优选取向。该岩组方位极密图为三斜对称,表明该组构缺乏对称面,其运动学解释认为组构的形成可以由同一时期不同方向的应力联合作用形成,也可以是不同时期不同方向应力复合作用的结果。总之是在多方向、多性质的应力作用下形成,反映在复杂应力状态下的非共轴应变。

曹21井1409.5m样品的岩组方位极密图呈星

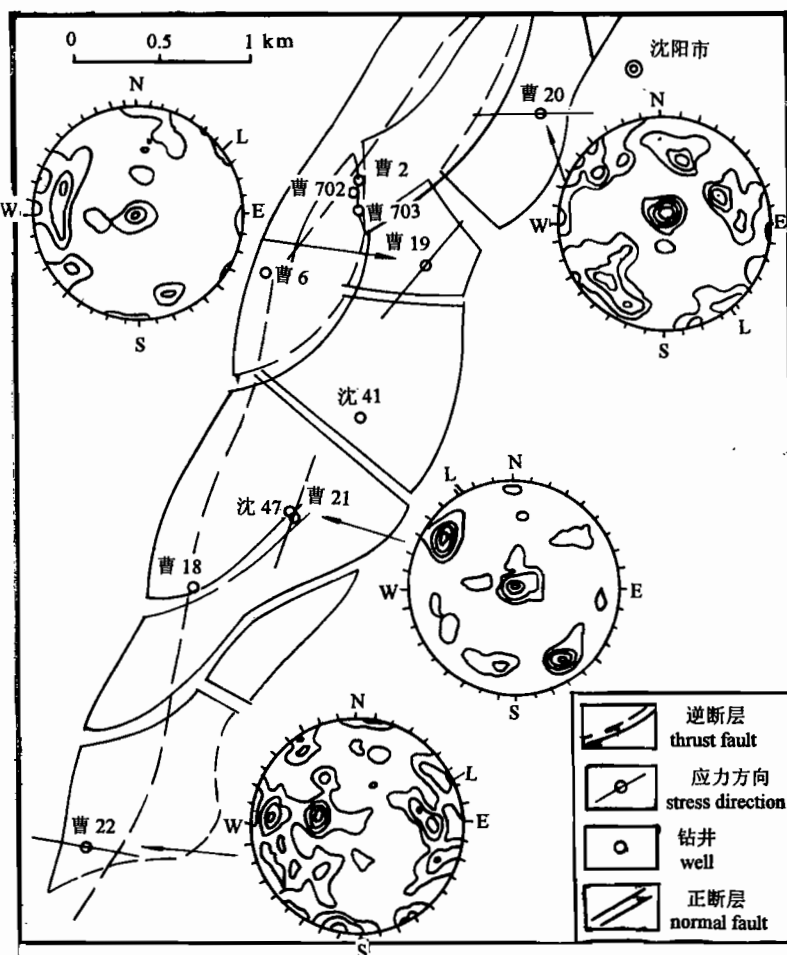


图2 曹台变质岩潜山主应力方向与岩组分析匹配图

Fig. 2 The couple map of stress direction and petrofabric analysis on Caotai buried hill

散极密型,中心极密部极密值较高,达8.07%,光轴方位明显优选,略显单斜对称。其运动学解释认为该图形反映非共轴应变,为单剪变形作用的结果。变形以韧性变形为主。其形成可能有两个过程:一是早先为均匀组构的混合花岗岩,叠加剪切变形造成的单斜对称组构,由于叠加的单斜对称组构在一定程度上迁就了既存的均匀组构图案而未能形成典型的三斜对称组构图案;二是早先为单斜组构,后来混合岩化过程使组构向均匀化方向转变,即剪切变形在先,混合岩化在后。从该潜山构造发育史看,前者可能性较大。

曹22井1195.5m样品的岩组方位极密图呈点极密—裂开环带过渡,极密值中等,图案对称更接近于三斜,反映较弱的单斜变形、韧性滑动造成光轴定向,镜下见一组“X”共轭微裂缝,

其局部压应力作用方向为 $100^{\circ}\sim 125^{\circ}$ 。

曹20井1484.3 m样品岩组方位极密图显示点极密加极微弱的环带趋势。分散的极密部极密值中等(5.25%),近于单斜对称,方位优选不强,组构均匀,镜下见不规则网状裂隙发育,张裂隙为曲折状,延伸方向 100° ,解释认为该岩石处于相对拉张应力环境,且存在局部较弱的挤压,挤压方向为 $100^{\circ}\sim 95^{\circ}$ 。

从岩组学分析可以得出,位于潜山南北两端的曹22井和曹20井所受应力方向清晰,都近于东西向,而潜山中部的曹19井和曹21井受力方向较复杂,叠加有剪切应力。

辽河油田钻采工艺研究院采用测井计算的方法,对曹19井、曹20井、曹21井、曹22井的部分井段测量,得出4口井的最大主应力方向(表1),潜山南北两端的曹20井、曹22井所受主应力方向大致EW向,而潜山中部的曹19井和曹21井岩石所受主应力方向大致相似,即NE向,与岩组学方法测得的应力方向一致。表明利用岩矿记忆信息可以恢复岩体所受地应力方向。

表1 变质岩潜山主应力方向测试成果表

Table 1 The testing table of main stress direction of Caotai buried hill

井号	测量井段 (m)	最大主应力方向	平均	石英光轴测定 应力方向	岩石抗压强度 (MPa)
曹19井	1440~1800	$35^{\circ}\sim 45^{\circ}$	40°	复杂多方向	131.5
曹20井	1451~1946	$85^{\circ}\sim 90^{\circ}$	90°	$100^{\circ}\sim 95^{\circ}$	154.3
曹21井	710~1800	$15^{\circ}\sim 25^{\circ}$	20°	剪应力	140.9
曹22井	700~1750	$95^{\circ}\sim 105^{\circ}$	100°	$100^{\circ}\sim 125^{\circ}$	120.4

对岩心描述统计,网状裂缝在曹703井岩心中占71.4%;曹21井中占61.5%;曹19井中占55.6%;而在曹20井中仅占20%;曹22井中占36.4%。而斜裂缝和水平裂缝却在曹20井和曹22井中分别占80%和63.7%。这与潜山南北和中部所受应力机制不同也相符,证明声发射技术和岩组学方法在恢复潜山储层受力机制上是有效的。

4 讨论

应用岩矿记忆信息恢复曹台潜山变质岩储层裂缝形成的动力机制以及区域构造运动得出,在燕山运动主区域构造地质动力背景下,变质岩潜山受到3期应力作用影响,并相应形成了3期性质不同的裂缝。①燕山运动是本区最强烈的褶皱断块运动,在挤压应力背景下,曹台潜山基底开始抬升,形成了控制潜山形态的具有挤压应力背景西侧逆断层和东侧正断层。南北两端受到右旋的压扭应力作用,而潜山中中部各断块则主要受压剪应力的影响,潜山中中部形成了具有剪切性质的正断层雏形。各种派生的应力场(压、张、扭)联合作用使得潜山基岩岩体形成了大量的网状缝,具体表现为裂缝中充填有破裂的细碎屑及外来的碎屑颗粒。②下第三系沙三期末的区域强烈抬升作用使得在挤压应力背景下所派生的扭应力活跃,在潜山整体进一步抬升的基础上,潜山中中部正断层进一步发育并定型。形成的裂缝具有剪切性质,它们多被方解石充填并切割早期网状缝。③下第三系东营期末的强烈抬升是影响本潜山最晚的一次构造运动。它使得潜山顶部沉积的沙二段—东营组遭到剥蚀而并没有进一步加大潜山中中部断层的断距。在这次构造运动影响下形成的新裂缝多未充填,明显切割前期裂缝或追踪前期裂缝分布,成为主要储集油气空间。

通过岩石声发射技术和岩石中石英光轴的岩组学分析可以得出,对于变质岩潜山岩体受

力期次和受力方向的细微描述,利用上述两种方法均十分有效。关键在于岩心的定向问题。实际上,若采到定向岩心,声发射技术也可以恢复岩石的受力方向;利用测井曲线进行岩心归位,倾角测井曲线确定岩石倾角及方向,是目前情况下切实可行并且有效的方法。这种方法在以碎屑岩或碳酸盐岩为储集层的油气藏的微观应力方向的确定应用上具有广阔的前景。

参 考 文 献

- 1 中国石油学会石油地质委员会编. 基岩油气藏. 北京:石油工业出版社,1987. 1~65.
- 2 秦四清等. 非线性工程地质学导引. 成都:西南交通大学出版社,1993. 5~15.
- 3 王允诚等. 裂缝性致密油气储集层. 北京:地质出版社,1992. 85~100.
- 4 Warren J E, Root P J. The behavior of naturally fractured reservoir. S. P. E. J., 1963, (11):98~78.
- 5 Murray G H. Quantitative fracture study, Sanish Pool, fracture-controlled production. AAPG. Bulletin Reprint Series 21, 1977, 159~179.
- 6 Howard J H. Description of natural fracture systems for quantitative use in petroleum geology. AAPG. Bull., 1990, 74(2): 1253~1265.
- 7 Perrodon A. 石油地质动力学. 冯增模, 邬立言, 王殿凯译. 北京:石油工业出版社,1994. 1~10.
- 8 陈宏德. 利用岩石发射活动性的应力履历效应估计地壳应力. 地震,1984,(3):25~30.
- 9 吴香尧. 岩组学导论. 重庆出版社,1986. 24~60.

The Use of Rock and Mineral Remember Information to Recall the Dynamics of Buried Basement Rock Hill Fracture Reservoirs

Fu Qiang, Wang Jialin and Zhou Zuyi

(Department of Marine Geology and Geophysics, Tongji University, Shanghai, 200092)

Abstract

There are two difficult problems in basement rock reservoir research today; they are special tight lithology and fracture reservoir spaces. The reservoir spaces—fractures—in metamorphic rocks as a kind of basement rocks are closely related to dynamics. Tectonic dynamics is the main factor of forming fractures in tight basement rocks. The rock and mineral will remember the dynamics in the geological history. Based on the oriented core, the episodes and directions of dynamics in basement rock reservoirs may be recalled by the acoustic emission (AE) and petrofabric analysis. As is reconstructed using the above-stated principle, the Caotai metamorphic buried hill in the Damintun depression, Liaohhe, was subjected to stresses of three episodes. The south and north ends of the buried hill were chiefly affected by nearly E-W compression, while the central part of the buried hill was chiefly affected by NE compression-shear. The development and directions of the fractures were in agreement with dynamics.

Key words: metamorphic rock; fracture; acoustic emission; petrofabric; dynamics

作 者 简 介

傅强,男,1964年生。博士,副教授。1986年毕业于成都地质学院石油系,1997年获煤田、油气地质专业博士学位,主要从事石油地质学、储层地质学及油气成藏机理的教学和科研工作。现在同济大学海洋地质与地球物理系作博士后研究工作。通讯地址:200092,上海四平路1239号同济大学海洋地质与地球物理系。