

裂缝性碳酸盐岩测井评价 译文集

〔美〕扎基·巴索尼 等 著



石油工业出版社

裂缝性碳酸盐岩测井评价译文集

〔美〕扎基·巴索尼 等著
吕学谦 朱桂清 等译

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本文集收集了近年来国外有关裂缝性碳酸盐岩测井评价的论文共 15 篇, 分别从仪器描述、识别技术、评价方法、储量计算等方面论述了碳酸盐岩储集层中测井资料的综合分析方法。本书对从事该方面工作的研究人员可起一个抛砖引玉的作用。

裂缝性碳酸盐岩测井评价译文集

〔美〕扎基·巴索尼 等著

吕学谦 朱桂清 等译

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16 开本 $12\frac{3}{4}$ 印张 317 千字 印 1—1,500

1992 年 1 月北京第 1 版 1992 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0637-5 / TE · 606

定价: 4.00 元

前 言

我国的石油勘探和开发工作，在“稳定东部、加快西部”的战略方针指导下，“七五”期间，在新疆塔里木盆地以及其它地区，取得了重大进展。

塔里木盆地中已发现的油气田，具有其独特的条件，如油气藏多储于海相的古生界地层中，地处沙漠腹地、埋藏深，有的储层为与古岩溶有关的碳酸盐岩层等。油气藏的条件与我们所熟悉的东部地区各油田有较大的差异。

为了贯彻“经济建设必须依靠科学技术，科学技术工作必须面向经济建设”的基本方针，使科技情报工作更好地为石油勘探和生产服务，借鉴国外深层海相油气田勘探开发经验，就可以使我们少走弯路，得到好处。

为了对我国石油勘探的重点地区塔里木等盆地作好服务工作，我们和石油工业出版社共同组织了所内外的有关科技人员，作了专题文献检索、专题译文、专题报告翻译编辑工作，并考虑到这些译文和报告，对我国其它地区也有参考价值，特将译文公开出版、发行，供有关同志参考。

这套文集包括：《古岩溶》、《碳酸盐岩油气藏地震勘探译文集》、《裂缝性碳酸盐岩测井评价译文集》、《超深井试井试油技术译文集》等。

随着塔里木盆地、吐哈盆地油气勘探开发工作的进展，我们将继续与石油工业出版社合作编译出版有参考价值的文献，并希望广大读者给我们提出批评和建议，以便我们能把工作做得更好。

中国石油天然气总公司情报研究所总工程师 胡文海

一九九一年一月



目 录

一、裂缝性储集层描述的新进展	(1)
二、碳酸盐岩的裂缝识别技术	(15)
三、一种在坚硬岩石中探测并分析裂缝的新仪器——微 Lambda 测井仪	(34)
四、用环形声波测井探测垂直裂缝系统并确定其走向/	(45)
五、利用声波仪器探测裂缝	(57)
六、用井眼电扫描及反射斯通利波计算的裂缝宽度的对比综合解释 ✓	(64)
七、利用斯通利波归一化能量差评价裂缝性储集层	(81)
八、中陆地区裂缝性碳酸盐岩的评价	(100)
九、危地马拉 Chapayal 盆地裂缝性碳酸盐岩中的石油探测	(116)
十、裂缝探测与评价 ✓	(131)
十一、用测井分析探测复杂储集层岩石中天然裂缝的 新方法—— $F-\phi-m$ 交会图 ✓	(138)
十二、应用测井资料估算孔隙度和含水饱和度 ✓ ——天然裂缝储集层系列之三	(151)
十三、用常规测井资料分析天然裂缝性储集层、	(160)
十四、Yellow Creek 油田 Twin Creek 裂缝性灰岩地层内流体的评价	(172)
十五、评价天然裂缝储集层中原始石油地质储量的不确定性	(186)

一、裂缝性储集层描述的新进展

David K. Norman,
Chris H. Garrett

陈益鹏 译
杨春胜 校

摘 要

随着人们对天然裂缝作用以及油气藏水力压裂作业重要性的认识不断深入,分析测试方法和设备得到了新的发展:1)电磁测向仪(EMG—200);2)根据速度的各向异性测量和表面荧光分析求得原位应力方位;3)计算机X—射线层析(CT)扫描仪。

电磁测向仪提供一种快速、独特的裂缝测量方法,这种方法比至今为止所用的任何一种岩心裂缝测量方法都要准确。

声波速度各向异性和表面荧光分析可以用来确定原地水平应力方位。当岩心脱离环境应力状态时,所形成的微裂缝会引起纵波速度发生变化。定向薄片的表面荧光分析可以测量微裂缝方位,并鉴别出岩心中可能引起声波速度各向异性的其它非均质性。可以利用环境水平应力方位来预测水力压裂造缝延伸的方向。

CT扫描仪提供一种评价裂缝性岩石的现代化方法,现在可以观察岩心来评价骨架和裂缝之间的三维关系。

引 言

近十年来,世界上裂缝性储集层的评价变得越来越重要。最近, Nelson⁽¹⁾ Aguilera⁽²⁾ 和 Van Golf—Racht⁽³⁾ 发表的文章说明了裂缝在油气储集层地质学中的重要性,并讨论了了解这些复杂储集层的不同方法。电磁测向仪是最近发展起来的一种裂缝测量技术,这是一种快速准确测量裂缝方位并记录描述裂缝数据的仪器。另一种新技术是声速各向异性测量,它与表面荧光薄片分析微裂缝方位的方法一起使用,是一种确定原位应力方位经济有效的方法。X—射线计算机层析(CT)扫描技术提供岩心切片图象,用于评价骨架和裂缝之间的三维关系。

电磁测向仪 EMG—200

电磁测向仪 EMG—200 是一个与 PC 工作站相接的三维数字化仪,PC 起到数据存储和数据处理的作用(Garrett 等人⁽⁴⁾)。EMG—200 主要由 Polhemus 导航系统公司设计的三维空间数字仪组成(Raab⁽⁵⁾)。数字化仪由一个电磁源、一个传感器和电子线路组件组成。电磁源和传感器各自含有三个正交定向的线圈。电磁源安装在放置所要研究岩心样品的工作台面以下几英寸处,传感器装在手动测笔内。通过电磁源线圈的电流感应出磁场,该磁场又在传感器内产生较小的、但可探测到的感应电流。电子线路组件对这个信号进行解释从而给出测笔的位置和方位。确定测笔位置的精度达 0.032 英寸均方根(RMS),分辨率为 0.016 英寸 RMS。数字化仪能够连续收集数据,或带有一个脚踏开关传输离散数据给主机。

正好在电磁源的上方放置岩心夹持器，这个岩心夹持器可容纳直径为 5~15 厘米和长达 75 厘米的岩心。岩心水平放置在两个直径为 5 厘米的滚轮之间，分析家转动把柄就可以检查岩心的任何一部分。可以看到岩心的两端，但不需要对其进行修整。轴转动编码器记录岩心在滚轮中旋转的转数。轴转动编码器安装在离数字化仪表面以下几英尺的地方，这样可以避免电磁源所产生电磁场的干扰。用一个滑轮和定时皮带把轴转动编码器啮合在滚轮上，模制聚氨酯涂盖在滚轮上，可以避免岩心旋转测量期间岩心的滑动。电磁测向仪可以对定向岩心的平面或线性特征进行数字化（比如裂缝、擦痕面或层理）。岩心必须是标称的圆柱体形状。逻辑坐标系的 Z 轴即为岩心轴，其它坐标轴与 Z 轴垂直。测出相对于岩心水平面内的矢量的方位，即从岩心轴到划线（或称为 X 轴的参考线）绘制。图 1 说明了岩心的 X、Y 和 Z 轴的相互关系。当岩心在滚轮上旋转时，X 轴和 Y 轴绕着 Z 轴旋转。

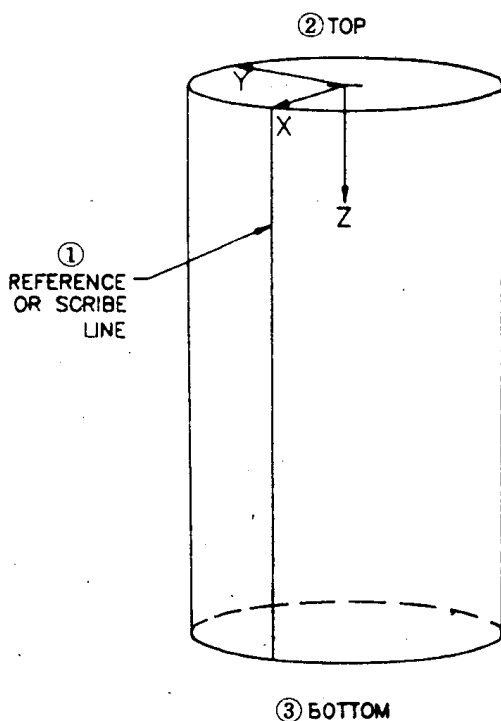


图 1 岩心圆柱体形状

① 参考线或划线；② 顶部；③ 底部

系统计算出岩心接近于平面特征的视方位，实际上这些平面特征与理想的平面相差较大。应用最小平方拟合数据的方法获得最佳整合平面方程 (Bevington⁽⁶⁾)，在直角坐标系中平面方程的一般形式是：

$$ax+by+cz+d=0$$

用多元线性回归求得系数 a 、 b 、 c 和 d 。这个平面的法线方程为 $ai+bj+ck$ ，其中 i 、 j 和 k 分别是 X、Y 和 Z 轴的单位矢量。这个单位矢量和法线与水平面之间的夹角为倾角。倾角的方位是 X 轴与法线矢量在水平面上投影之间的夹角。EMG—200 测出的数据精度和可重复度达 $\pm 2^\circ$ 。

记录的数据文件与 CORFITTM（岩心实验室公司的报告生成软件）相容，因此不需要人工记录或抄录裂缝数据，并可迅速生成反映裂缝的图表。数据显示在立体图、玫瑰图和直方图上 (Garrett⁽⁷⁾) (图 2, 3 和 4)。在描述每个岩心之前确定常规系统的初始条件，要求用户在滚轮各端给出数字化点数据，因此可提供两个滚轮轴的方程。在测量任一方位之前，必须根据各个岩心块来标定该系统，其方法是对岩心参考线或沿北线的位置进行数字化并确定各岩心块的深度。

分析家转动岩心，观察所感兴趣的构造和沉积特征。测量平面特征就是用测笔追踪平面特征，同时按下脚踏开关记录离散数据点信号。EMG—200 利用 5~50 个数据点计算平面或线性方位。初步显示裂缝面的结果 (表 1)，允许操作员在通过一系列定性描述窗之前可以检查方位数据 (表 2)。根据数字化的数据点数，把裂缝定义成可测量的和不可测量的。正好以直线形式出现在岩心一侧上的裂缝是不能定向的，这种裂缝是不可测量的裂缝。只要对裂缝顶部和底部深度的数据点进行数字化，就可以记录裂缝的位置。对于可测量的裂缝要

表 1 初步的裂缝数据

顶部深度: 11768.44 ft^①

离中心距离: 1.99 in^②

底部深度: 11767.60 ft

平均偏差: 0.017 in

垂直长度: 1.80 in

倾角: 25°

倾角方位: 292°

走向: 22°

<F10> / (R) 接受 <Enter> / (M) 重复 <ALT-Q> / (LM) 取消

① 1ft = 0.3048m; ② 1in = 0.0254m.

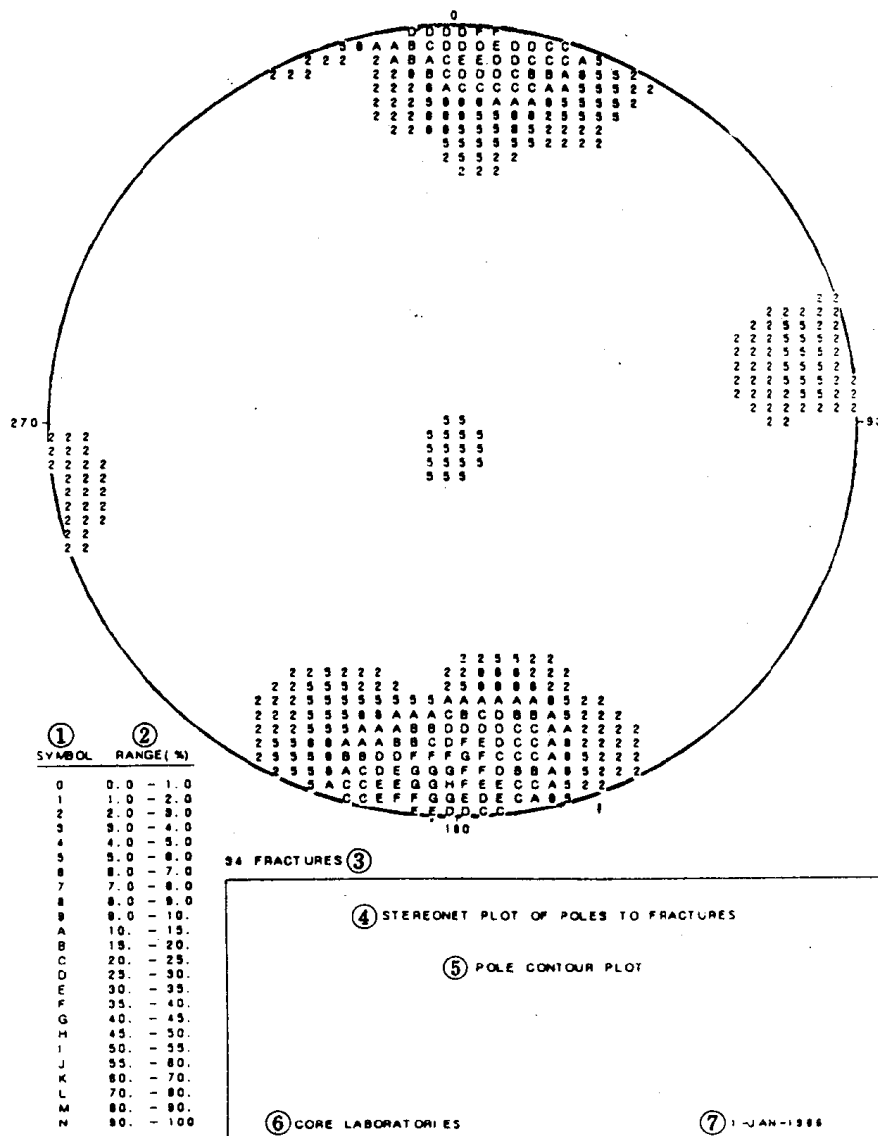


图 2 裂缝顶端数据的立体图

①符号; ②范围; ③34条裂缝; ④裂缝顶端的立体图; ⑤等极端点图; ⑥岩心实验室公司; ⑦1986年1月1日

表 2 裂缝定性数据——岩性

粘结灰岩
 燧石
 砾岩
 结晶质石灰岩
 白云岩
 白云岩-石灰岩
 粒状灰岩
 火成岩

石灰岩
 泥岩
 变质岩
 泥粒灰岩
 砂岩
 页岩
 粉砂岩
 粒泥状灰岩 (没有)

光标移至标志符
 按 <Enter> / (M) 触发选择
 <F10> / (R) 接受窗口

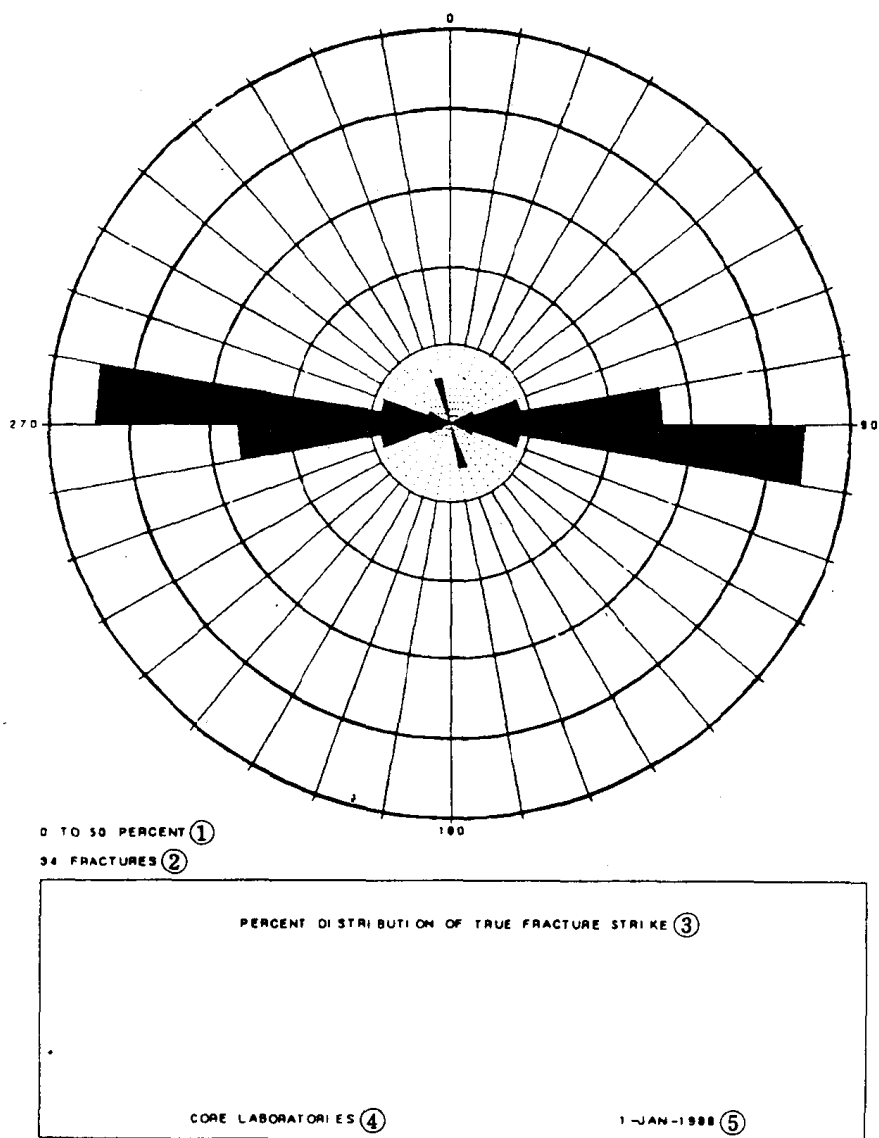
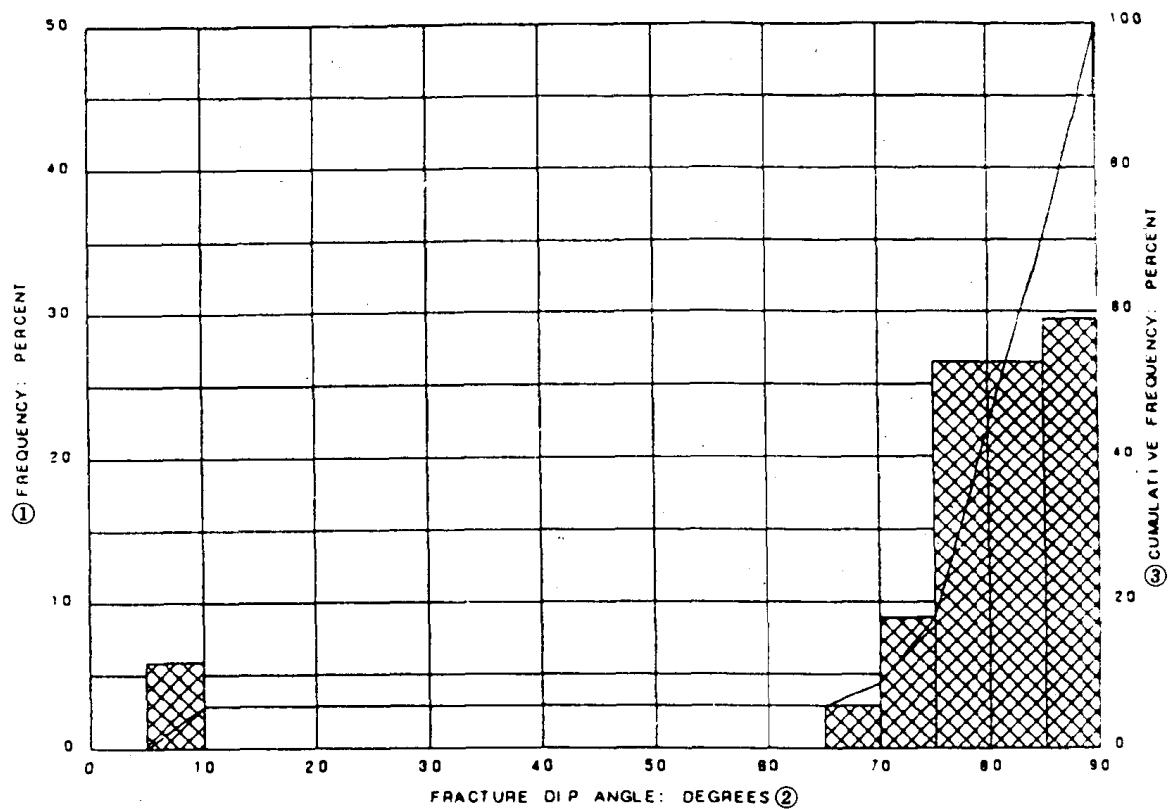


图 3 裂缝数据的玫瑰图

① 0 到 50%; ② 34 条裂缝; ③ 裂缝真走向分布百分比; ④ 岩心实验室公司; ⑤ 1988 年 1 月 1 日



34 FRACTURES ④

FRACTURE DIP ANGLE HISTOGRAM ⑤

图4 裂缝倾角直方图

①频率:百分数;②裂缝倾角:度;③累计频率:百分比;④34条裂缝;

CORE ⑤裂缝倾角直方图 ⑥岩心实验室公司;⑦1988年1月1日 ⑦

测出5个或更多的数据点。

各块岩心的完整描述累积在主菜单下面的主数据表中,如表3所示。采用同样的步骤来测量层理面和缝合面的方位。

在裂缝菜单中擦痕面选择自动确定伏角和走向。分析家分析裂缝并注意到在裂缝面上有擦痕面之后,对擦痕面进行数字化。操作者选择一特定擦痕,并采集沿着这条线的数据点。

表 3 电磁测向仪

裂缝序号	裂缝顶部 (ft)	长度 (in)	倾角方位	裂缝走向	倾角	离中心距离 (in)	宽 度	
							测量的 (mm)	有效的 (mm)
1	11767.00	2.1	11	101	86	2.0	0.010	0.010
2	11767.04	1.9	341	71	78	2.0	0.010	0.010
3	11767.08	1.8	—	不可测量的	裂缝	—	0.010	0.010
4	11767.19	2.1	—	不可测量的	裂缝	—	0.010	0.010
5	11767.22	2.2	—	不可测量的	裂缝	—	0.010	0.010
6	11767.27	1.3	31	121	81	2.00	0.010	0.010
7	11767.23	5.3	—	63	90	2.00	0.010	0.010
8	11767.33	1.4	—	不可测量的	裂缝	—	0.010	0.010
9	11767.32	4.2	333	63	61	2.00	0.010	0.010
10	11767.23	1.4	—	不可测量的	裂缝	—	0.010	0.010

新裂缝宽度 / 附注, 手工删除擦痕面的定性描述, 返回, 输入 / 编辑裂缝的宽度和附注;

岩心序号: 847 从 11767.00~11767.68 英尺, 总裂缝 10 个。

初步显示裂缝数据, 允许用户先观察最终的走向。可接受的擦痕面方位显示在临近适当本源裂缝的裂缝数据表中。

测量的裂缝参数

1) 裂缝密度

对所有的天然裂缝都测出裂缝密度, 不管这些裂缝是可测量的还是不可测量的。一个裂缝从一个 1/10 米层段延伸到下一个 1/10 米层段, 则在这两个层段中都可计算到这个裂缝, 如图 5 所示。计算在每 1/10 米层段内出现的裂缝总数, 就可以比较在不同岩心段内的相对裂缝密度。垂直裂缝分布变换成岩心裂缝测井图, 这种测井图说明天然裂缝、矿化的天然裂缝、油气斑以及取心所产生裂缝的深度和分布, 见图 6。

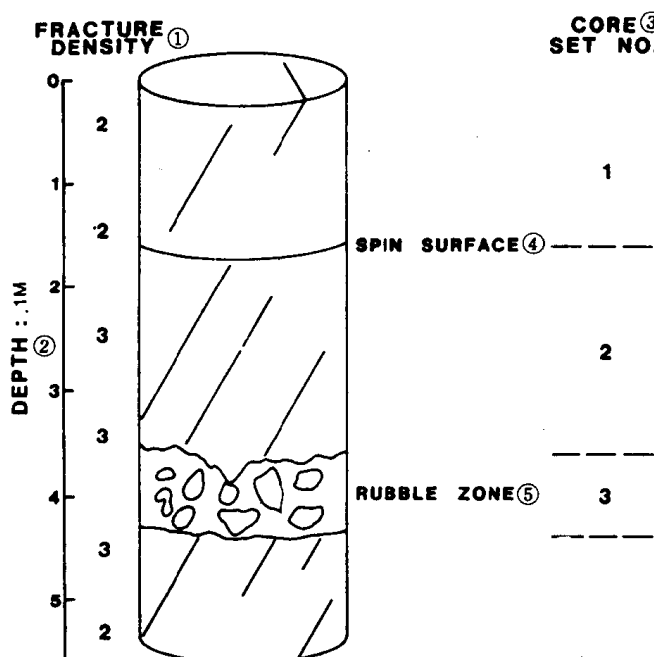


图 5 计算的裂缝密度

①裂缝密度; ②深度: 0.1 米; ③岩心序号; ④旋转面; ⑤碎石带

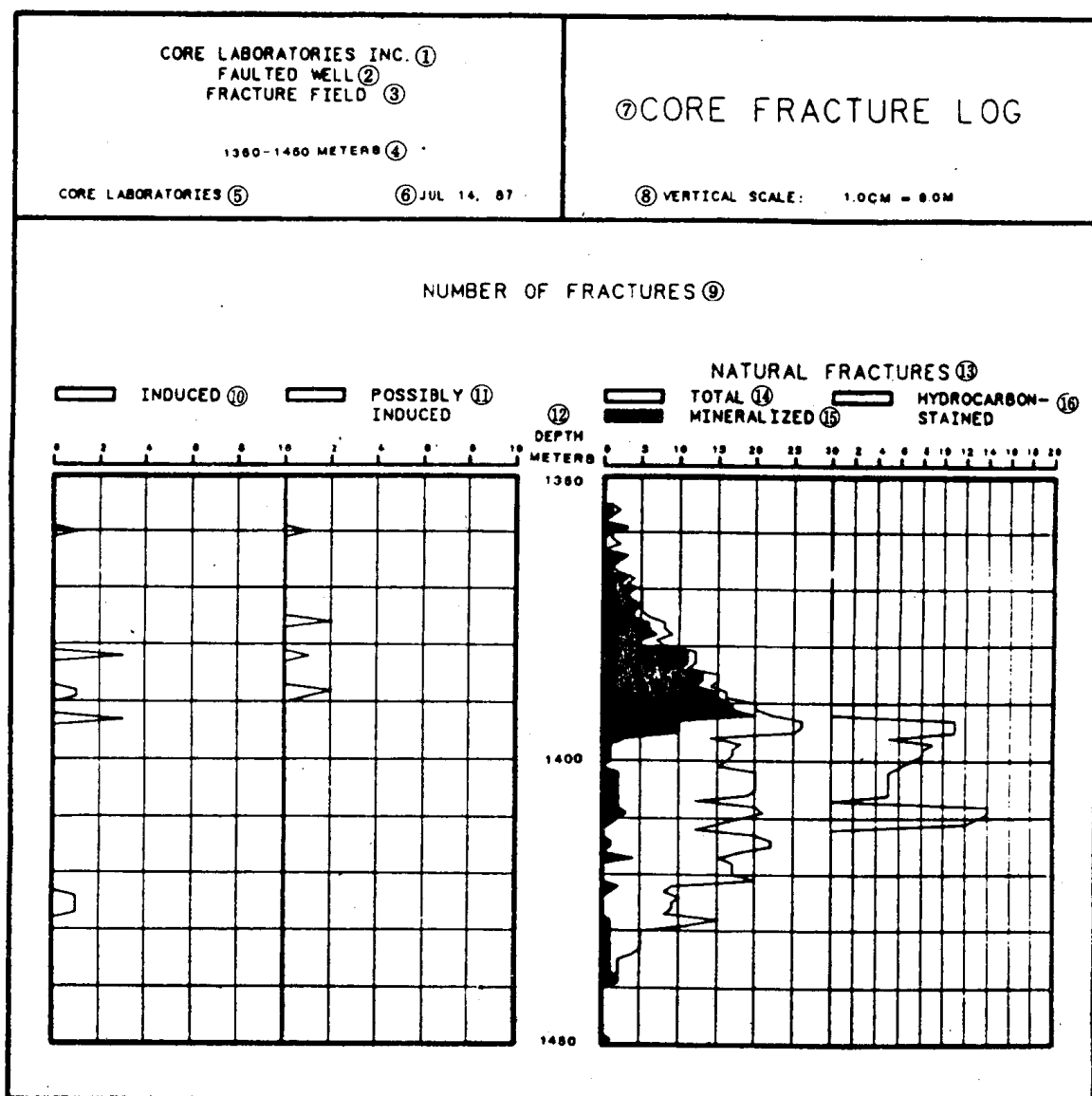


图6 岩心裂缝测井图

①岩心实验室公司;②有断层的井;③裂缝性油田;④1350~1450米;⑤岩心实验室公司;
⑥1987年7月14日;⑦岩心裂缝测井图;⑧垂直深度比例:1.0厘米=8.0米;⑨裂缝数;
⑩次生的裂缝;⑪可能次生的裂缝;⑫深度,米;⑬天然裂缝;⑭总的;⑮矿化的;⑯油气斑裂缝

2) 裂缝倾角方位和倾角大小

裂缝倾角方位是裂缝倾角的方向,如图7所示。裂缝倾角是裂缝与水平面之间的夹角,如图8所示。

3) 裂缝的顶部深度和垂直长度

这些参数确定了岩心内裂缝的位置,图9说明了垂直裂缝长度。

4) 裂缝状况

通常观察到下列裂缝状况。

开启裂缝——一个单独的裂缝有一个可测量的开口;

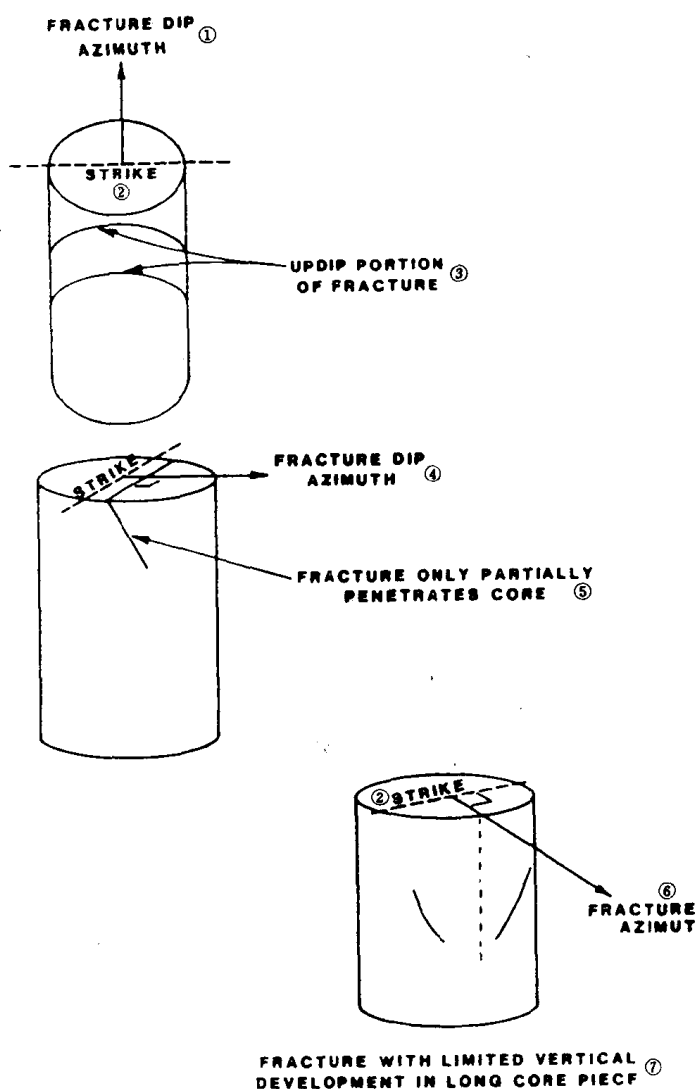


图7 岩心样品上的裂缝示意图

① 裂缝倾角方位；② 走向；③ 裂缝的上倾部分；④ 裂缝倾角方位；⑤ 裂缝只部分延伸穿入岩心；⑥ 裂缝方位；⑦ 在较长的岩心样品内的裂缝在垂向上的发育相当有限

闭合裂缝——非矿化裂缝没有一个可测量的分开口，在地下闭合裂缝可能是开启的；

矿化的裂缝——这种裂缝部分或完全被次生矿化物或粘土所充填。对于这种矿化裂缝，总应估计和记录矿物充填的百分数；

孔洞——裂缝溶解产生孔洞空间。

5) 总的裂缝宽度和裂缝开口度

总的裂缝宽度是包括矿物充填部分的裂缝开口度。裂缝开口度是油气存储或流动的有效裂缝或裂缝开口的宽度。对于开启裂缝，有效裂缝宽度和总裂缝宽度是一样的；但是对于矿化的裂缝，裂缝开口度远远小于裂缝的总宽度。

利用光学比较器测量裂缝开口度，测得的裂缝开口度代表在地面条件下岩心边缘上裂缝的开口宽度。岩心中其它部位的裂缝开口度可能不同，而且裂缝原先在地下时的宽度可能也不同。

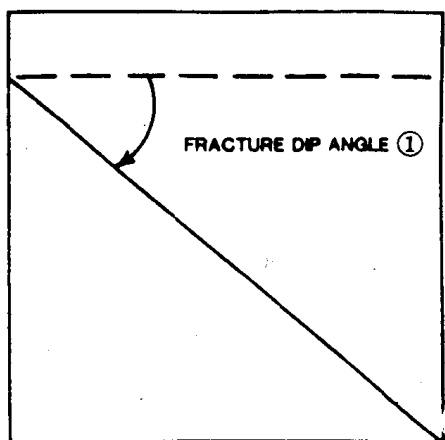


图 8 裂缝倾角分析图

①裂缝倾角

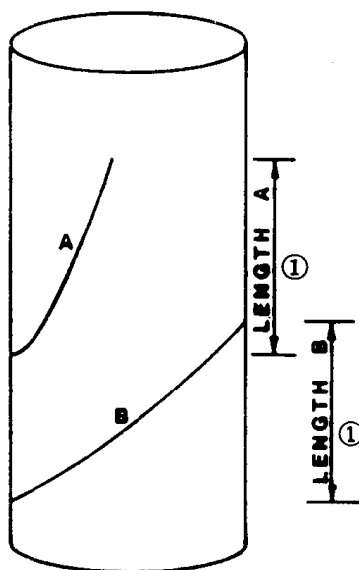


图 9 岩心样品上的垂直裂缝长度

①长度

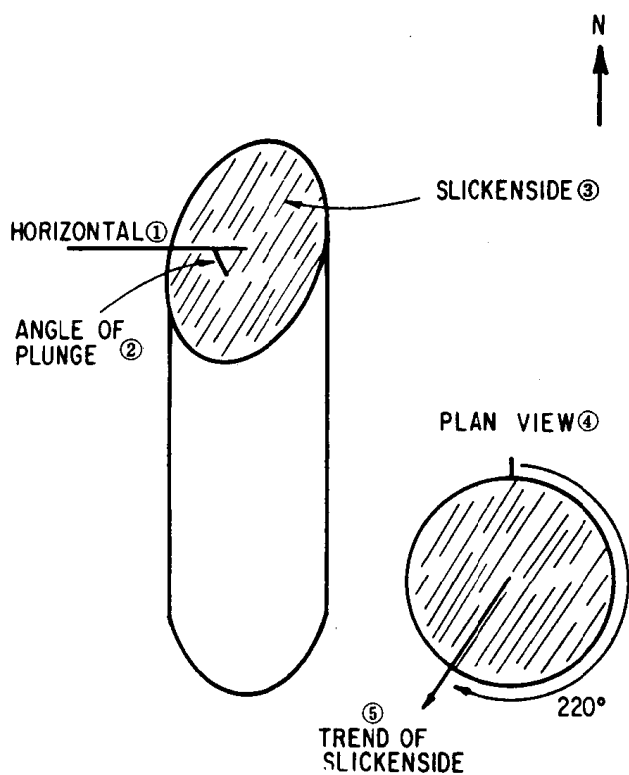


图 10 在裂缝面上观察到的伏角倾向和角度

①水平面; ②伏角; ③擦痕面; ④俯视图; ⑤擦痕面走向

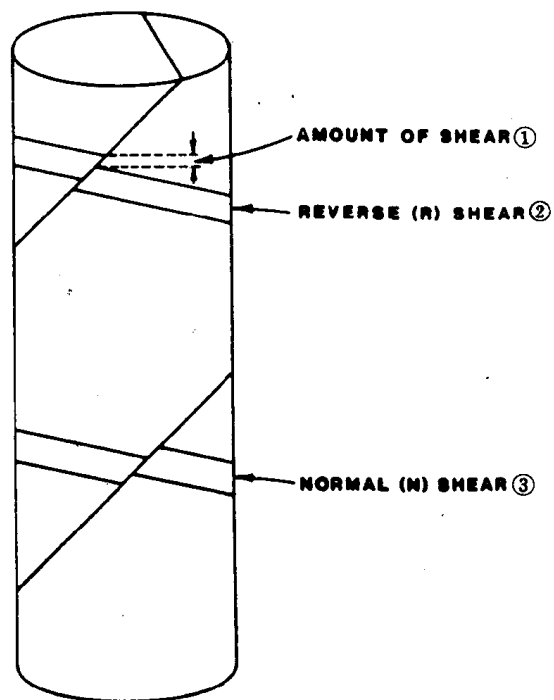


图 11 裂缝正剪切和逆剪切示意图

①剪切量; ②逆剪切; ③正剪切

6) 裂缝中的矿化物

如果裂缝是矿化的裂缝, 那么应记录并确定胶结裂缝的矿化物的类型。

7) 擦痕面

在某些破裂裂缝面上可观察到这种擦痕, 可以记录伏角的倾向和角度 (图 10)。

8) 剪切作用

在裂缝面上纹层的位移表明裂缝是剪切裂缝, 而且可能指示较小的剪切或断裂。图 11 说明了正剪切和逆剪切的情况。

9) 裂缝的成因

识别出取心和岩心处理过程中产生的裂缝, 从而在任何地下储集层模拟中排除这种裂缝。而且, 分析次生裂缝方位有时可以指示原地最大水平挤压压力的方位 (Finley 等人^[8])。

从速度的各向异性测量和表面荧光 分析结果求得原位应力方位

当岩心脱离原位或环境应力状态时, 岩心沿着平行于最大原地水平挤压应力的方向延伸。大部分岩心从井筒中取出几天后, 至少都会呈微小的椭圆形状。Teufel^[9]认为, 岩心的这种延伸是由张弛的地层微裂缝造成的, 微裂缝与最大水平原地挤压应力的方向垂直, 见图 12。

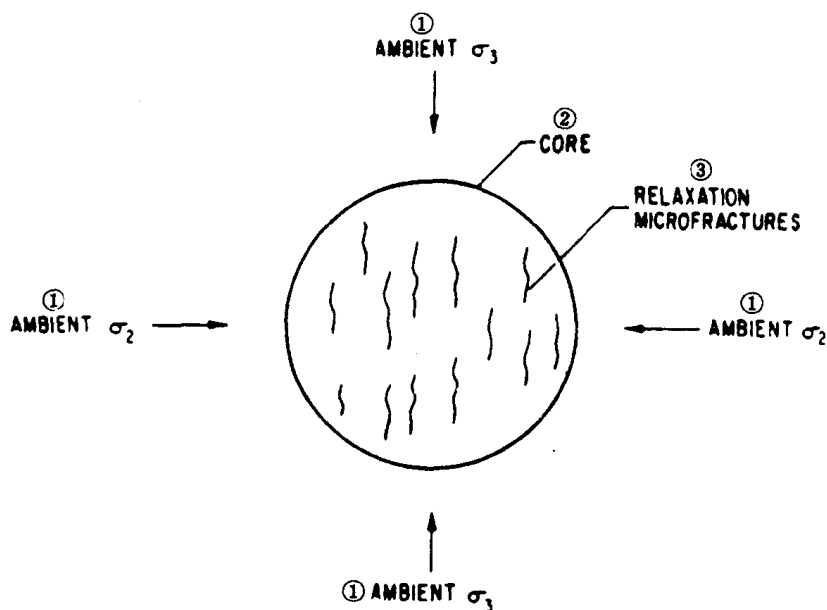


图 12 微裂缝与环境应力关系图

①环境应力; ②岩心; ③张弛的微裂缝; ④注意: 环境应力 σ_1 是垂直方向的

环境应力系由目前作用在地壳上的大地构造力组成。在任一位置的环境应力系均可由 δ_1 、 δ_2 和 δ_3 等三项来描述。 δ_1 是最大主应力; δ_2 是中值主应力; δ_3 是最小的主应力。 δ_1 应

力轴一般在垂直方向，因为这个应力一般由静岩石负载产生。 δ_2 和 δ_3 是与区域构造有关的水平应力。

上覆的岩层压力一般为挤压力 δ_1 。当岩心脱离上覆岩层作用时，会产生可见的层面裂理和一些垂直于 δ_1 的张弛微裂缝。如果张弛微裂缝垂直于主水平挤应力 δ_2 的方向，则沿垂直于微裂缝的岩心直径方向的声速小于沿平行于微裂缝的岩心直径方向的声速，如图 13。因此，岩心上声速的各向异性通常指示张弛微裂缝的方位和地下最大水平挤应力的方位。

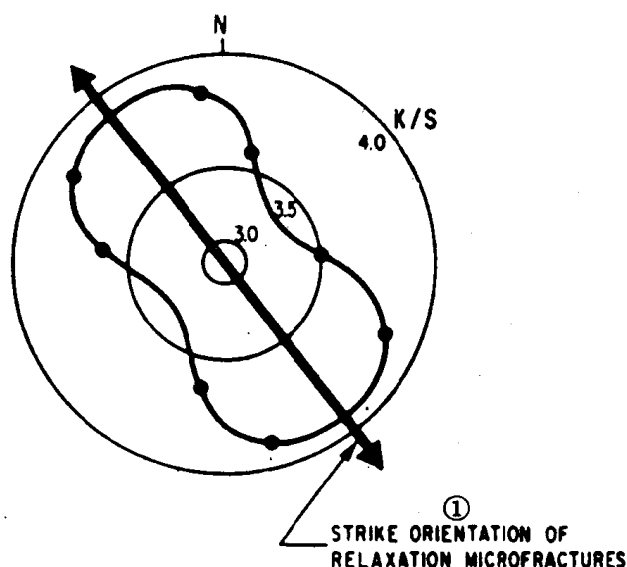


图 13 垂直于微裂缝的岩心直径方向的声速与平行于微裂缝的岩心直径方向的声速的关系

① 张弛微裂缝的走向方位

在岩心周围的位置上放置一个纵波发射传感器，而且在离发射器 180° 的位置放置一个纵波接收传感器，这样就可以进行测量了。然后，绕岩心周长每隔 22.5° 的位置上测出定向岩心的声速和直径。由下列公式计算声速：

$$v \text{ (km/s)} = \frac{\text{直径 (mm)}}{\text{传播时间 } (\mu\text{s})}$$

分析浸渍在荧光红染色液中的岩石薄片岩样可以证实微裂缝的存在，图 14 (Geis^[10])。从各个岩样上取下薄片这种方法保证能准确解释声速的结果。注意到张弛微裂缝的存在和方位，即可证实声速的各向异性不是由岩心中其它非均质性引起的。知道主水平应力的方位，可以获得最佳的水力压裂作业效果 (McLellan^[11], Teufel^[9])。

计算机 X-射线层析扫描技术

根据密度和原子组分不同的 X-射线 CT 成象技术在岩心分析中具有多种应用，如 Vinegar^[12]、Wellington^[13] 和 Sedgwick^[14] 等人的研究。其中的某些应用包括油藏工程



图 14 岩石薄片岩样中的微裂缝

研究，比如岩心注水实验、孔隙度、密度、岩石力学分析、电缆测井对比、探测岩心中的泥浆侵入、扰动岩心和裂缝等项研究。CT 扫描的主要应用之一是作为扫描仪。可以在“干燥”的室内条件下扫描岩心（在进行任何测试之前），以确定哪段岩心要进行更加详细的研究，如孔隙度和密度的研究等。本文只讨论 CT 技术在裂缝和矿物成分的探测和描述方面的应用。

CT 扫描仪可以观察整个岩心样品，并计算裂缝和基岩孔隙度。在 CT 图象中（图 15 和图 16），不同的灰度代表被扫描物体的不同密度。图 15 的 CT 图象是裂缝性、孔洞和白云岩化的岩心的 CT 成象。图上的黑色部分是遍及整个岩心的孔洞空间（P）；灰色部分（见箭头）是裂缝且交叉通过岩心。从 CT 扫描结果能够估算出裂缝孔隙度和基岩孔隙度。在图 15 中所见到的裂缝是矿化的裂缝，没有孔

隙。在图 16 中，再次用不同的灰度代表不同的密度。黑色区域是孔隙（P），灰色部分是白云岩（D），浅灰色部分是硬石膏（A）。当足够的密度差异使得数字化图象出现反差时，有时可以解释出矿物成分的差异。可以在室内或上覆岩层作用的条件下扫描岩心，也可以对凝固岩心或封闭在 PVC 管中的岩心进行扫描。图 15 和图 16 是在室内条件下扫描岩心的两个例子，说明了可以用 CT 扫描仪探测裂缝和矿物成分。本文给出的扫描岩心都是白云岩，实际上任何岩石都可以用 X 射线来扫描进行分析。

结 论

本文描述了三种不同的探测和测量裂缝的分析方法。电磁测向仪能够精确地测出定向岩心的裂缝方位，精度达 $\pm 2^\circ$ 。专门编写用于裂缝研究的软件有助于测量数据的解释和模