

高含水 后期裂缝性油藏 的开发与评价

GAOHANSHUIHOUI
LIEFENGXINGYOU CANG
DEKAIFAYUPINGJIA

主编 王再山

黑龙江科学技术出版社

高含水后期裂缝性油藏的开发与评价

主 编 王再山

黑龙江科学技术出版社
中国·哈尔滨

图书在版编目 (CIP) 数据

高含水后期裂缝性油藏的开发与评价/主编王再山.
哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2007.1
ISBN 978-7-5388-5292-9

I. 高... II. 王... III. ①裂隙油气藏-油田开发-研究 IV. TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 004335 号

责任编辑 关士军

封面设计 洪 冰

高含水后期裂缝性油藏的开发与评价

GAOHANSHUI HOUQI LIEFENGXING YOU CANG DE KAIFA YU PINGJIA

主 编 王再山

出 版 黑龙江科学技术出版社

(150001 哈尔滨市南岗区建设街 41 号)

电话 (0451) 53642106 电传 53642143 (发行部)

印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂

发 行 黑龙江科学技术出版社

开 本 787×1092 1/16

印 张 12

字 数 263 000

版 次 2007 年 1 月第 1 版·2007 年 1 月第 1 次印刷

印 数 1-1 000

书 号 ISBN 978-7-5388-5292-9/TE·94

定 价 28.00 元

《高含水后期裂缝性油藏的开发与评价》

编 委 会

主 编	王再山		
主 审	马世忠		
副主编	刘维国	姜洪福	
编 委	任 玲	崔明钦	王业贤

前 言

随着油气田（藏）勘探难度的增加，可采石油储量的减少，人们不得不把剩余储量的开发放在重要地位来研究。特别是在油田开发后期的注水开发中，裂缝性油田的开发已经得到了人们的关注。为了配合我国目前裂缝性油气田（藏）的开采和提高采收率，我们编写了这本书，希望能为从事和研究裂缝性油气田（藏）开发规律的广大科技工作者提供参考。

本书通过对国内外文献的调研和现场实验的研究，广泛收集和研究了关于裂缝性油气田（藏）的分布规律、研究方法、采油机制、测井方法、储层评价、数模理论及应用，全面总结了裂缝性油气田（藏）的开发和实例，阐明了裂缝性油气田（藏）的增产措施和开采策略。

全书共分六章。第一章为储层中裂缝分布规律及研究方法；第二章为裂缝油藏的采油机制；第三章为裂缝性油田的开发措施及开采实例；第四章为裂缝性油藏的数值模拟理论及应用；第五章为裂缝性油气（藏）储量的计算；第六章为裂缝油藏的测井方法与裂缝性储层评价。

本书可供从事油田开发、测井、数值模型、石油地质等领域的科技人员和高校师生阅读参考。

由于水平有限，难免有这样或那样的缺点，希望读者给予批评指正。

编 者
2006年10月

目 录

第一章 储层中裂缝分布规律及研究方法	(1)
第一节 实验室研究地下裂缝	(1)
第二节 岩心裂缝调查	(3)
第三节 地面裂缝调查法	(6)
第四节 利用曲率评价构造裂缝	(7)
第五节 利用地应力资料评价地下裂缝	(12)
第六节 断裂系统研究	(14)
第二章 裂缝油藏的采油机制	(18)
第一节 概述	(18)
第二节 衰竭期间的油藏描述	(19)
第三节 油藏分带与采油机制的关系	(24)
第四节 裂缝油藏的特定情况	(39)
第三章 裂缝性油田的开发措施及开采实例	(45)
第一节 裂缝性油田的增产方法	(45)
第二节 裂缝性碳酸盐岩油气藏的保护方法	(56)
第三节 裂缝孔隙型灰岩油田的开发	(59)
第四节 柴达木盆地裂缝油藏的开采方法	(63)
第五节 裂缝性灰岩油田开采方法	(68)
第六节 天然裂缝油田的特征及开采方法	(72)
第七节 石油沟油田沿裂缝注水开发	(75)
第八节 低渗透及裂缝储层的开发问题	(82)
第四章 裂缝性油藏的数值模拟理论及应用	(92)
第一节 相流动模拟	(92)
第二节 组分模型	(99)
第三节 裂缝孔隙介质两相流的细网格模拟	(102)
第四节 裂缝—溶洞碳酸盐岩储层结构特征模型	(109)
第五节 多条垂直裂缝的水平井渗流及压降曲线	(114)
第六节 纯裂缝油层的注水开发模拟实验	(120)
第七节 预测天然裂缝性碳酸盐岩储层酸化模型	(125)
第五章 裂缝性油气藏储量的计算	(129)
第一节 裂缝性储集层的储集类型	(129)
第二节 裂缝性油气藏容积法储量计算	(131)
第三节 物质平衡法	(135)
第四节 用压力平衡原理计算天然气储量	(145)

第六章 裂缝测井方法与裂缝性储层的评价	(153)
第一节 裂缝性储层测井技术发展现状	(153)
第二节 裂缝油气藏的综合分析系统	(156)
第三节 灰色综合评判法	(162)
第四节 裂缝综合概率法	(166)
第五节 裂缝性碳酸盐岩油藏剩余油分布的测井方法	(171)
参考文献	(178)

第一章 储层中裂缝分布规律及研究方法

第一节 实验室研究地下裂缝

一、镜下观察

用显微镜对岩石裂缝的观察是裂缝研究中最直接的方法之一。主要有普通的薄片观察、电镜扫描观察等。其主要特点是能对岩石中存在的微裂纹进行描述和统计。但这样的观察随机性大,局限于裂缝的微观情况。镜下观察主要观察以下内容:

- (1) 裂缝的形态、宽度、长度。
- (2) 缝面情况、溶蚀及充填情况(包括充填物成分、晶形、充填程度、分期性和分布)。
- (3) 裂缝参数、成因类型以及分期配套关系。
- (4) 裂缝与岩石颗粒及孔隙的关系,对于定向薄片,应估计裂缝的产状。

二、岩石破裂的三种相关实验

岩石破裂实验的内容相当广泛,不仅包括岩石的各种破裂力学参数的确定,还包括模拟实验等内容。

(一) 岩石应变实验

利用岩石样品,通过加载机加载,测量在不同应力作用下,样品的应变过程,直至样品破裂。从而得出岩石样品的应力—应变曲线。岩石应变实验,它给出了不同岩石的受力变形及破裂的全过程。利用应力—应变曲线可以确定岩石的变形极限、破裂强度等力学参数。

该实验可以做单轴应力状态的,也可以做三轴应力状态的。三轴应力状态的应力—应变实验更接近于地下地质条件。

实验证明,不同类型的岩石,其延性不同,强度值不同,断裂前的永久应变值也不同。

(二) 光弹模拟实验

模拟岩石变形应力场变化及分布的光弹实验在岩石力学及构造力学中已广泛被采用。其优点是能根据实际地质变形特点和初始变形条件,模拟出变形中应力场分布情况,并通过显微镜照像直观地反映出各处应力分布情况及应力集中带,用以预测不同地

质变形体与应力集中有关的裂缝发育带。

(三) 岩石声发射实验

声发射技术最早主要用于工业材料中的探伤。近些年来才引入对岩石中微裂纹的扩展研究。它是一门具有潜力的实验方法。

地质岩体声发射的不可逆性是作为研究岩石微观破裂的基础。岩石中普遍存在 Griffith 微裂纹, 在加载实验过程中, 载荷量在不超过前次加载时观察不到 (或很少) 声发射讯号, 一旦加载量增加, 微裂纹尖端应力集中并失稳扩展, 造成能量释放, 这时可以接收到一部分因能量释放而转变成的弹性波声发射讯号。微裂纹的失稳扩展是不可逆的, 这一不可逆特征称为 Kaise 效应。

利用 Kaise 效应可以研究岩石的受力史和裂纹产生大规模失稳扩展的历史时期。根据声发射实验研究表明: ①裂纹失稳扩展符合 Griffith 破裂理论。②不同的 Kaise 效应点分别对应不同的受荷历史, 实际上反映了地层的多期受力过程。③根据实验曲线分析, 认为宏观岩体的裂缝产生符合前人研究的“黄金分割”数 (黄润秋, 1989) 关系, 即

$$T_1 / (T_1 + T_2) = 0.618 \quad (1-1)$$

式中, T_1 ——系统线性平稳阶段历时;

T_2 ——系统非线性平稳阶段历时。

根据这一结论, 我们一旦确立了岩体的变形历史, 得出平稳阶段历时, 就可以预测裂缝形成的历史时期。

三、裂缝充填物的稳定同位素及包裹体研究

该项研究对于确定裂缝形成期、古物化环境及对裂缝作出成因解释, 是很有意义的。

(一) 裂缝充填物的稳定同位素研究

测量裂缝中充填物的同位素成分主要是 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB 标准)。不同期的裂缝充填物 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 是有变化的。越早形成的裂缝充填物其同位素值应越接近围岩的值。当然影响同位素值变化因素很多, 应考虑实际地质条件。

根据所测同位素数据得到: 围岩形成的古水温度 26°C 左右, 早期胶结物形成的古水温度范围在 $21\sim 28^\circ\text{C}$ 之间, 两者相差不大; 晚期胶结物形成时古水温度在 42°C 左右, 明显高于围岩形成时的温度。

以上结果说明该盆地的古地温可能是表现为升温过程的历史。

(二) 裂缝充填物的包裹体研究

裂缝充填物中通常存在一些水质或烃类流体包裹体。通过对这些包裹体的均一温度测定, 可以得知充填物形成的古地温及充填期和帮助推断裂缝的成因。当存在三相包裹体时, 还可以求出其形成时的古压力, 这对于研究裂缝成因及其与油气生、聚期关系是十分有意义的。

流体包裹体被封闭在晶体内部的小洞中, 它们是在晶体正在生长或者裂缝正在充填

愈合的时期被包裹的。包裹体被俘获当时，一般都是呈均一相态，只是由于后期温度（压力是次要因素）改变后才变为两相或多种相态，通常见到的是液相加气相。测定液体—气体包裹体充填温度的方法通常有两种，其基本原理简述如下：

(1) 冷热台分析资料。在显微镜冷热台上把含有包裹体的样品加热（或降温），当包裹体中两相流体变为均一相态时的温度称为均一温度（ T_H ），这一温度即是包体被俘获时的最低温度，这一温度解释的前提假设条件是：①包裹体中的流体在被俘获时是呈均一相态；②流体的密度和成分自被圈闭之时起不再变化；③晶体内包裹空间的体积也不变；④压力对其的影响是可知的。

水和烃类包体都有一个均一温度范围，前者在 102~126℃ 之间，后者在 90~106℃ 之间。位于上述范围之外的均一温度都是假温度。如果包体被俘获时流体压力大于平衡蒸气压力，那么所测的均一温度就低于俘获温度。这时必须根据包体的体积参数进行压力校正。

水质包体：成分是确定流体的体积参数的主要因素，由于包体体积很小（最大一般不超过 10^{-7} cm^3 ），不能进行采样和化学分析。水质包体的体积参数受可溶盐类浓度控制，可溶盐浓度可以根据包体在低温下的熔化温度来计算。

烃类包裹体：对于烃类包体，应做出如下假设：包体中的烃类 P-V-T 参数应和实际油气田烃类的 P-V-T 参数相同或十分接近。因此，应首先作出研究区油气田烃类的 P-V-T 图，再将均一温度标定在古起泡线上沿等体积线移动到流体压力—地热梯度线或到一个计算压力、温度点，就可得到俘获温度值。

(2) 爆裂法分析资料。爆裂法可以确定岩石中较大体积的包裹体的充填温度。其试验过程为：将样品研磨后并在 10—35 目筛孔筛选，最后保持干燥（25℃）12 h。然后将颗粒放在炉子里爆裂，以 20℃/min 的速率加热，用听筒听爆裂声，温度每隔 10℃ 计数。将数字整理成矩图，就可以进行分析。

爆裂法的前提是在紧接两相包体均一温度之上，由于内压力的增加而急剧变化，含有包体的矿物碎屑开始爆裂。因此在温度上升的情况下，根据爆裂率的变化可以估计包体的充填温度。即利用爆裂矩图中爆裂普遍增加作为均一温度来解释，但最终的爆裂作用反常不能作为均一温度来解释。原因是深部颗粒内大量的小包体的爆炸，一直到超过他们的充填温度才不再爆炸（Simth, 1963）。

第二节 岩心裂缝调查

一、裂缝宽度

岩心上所量取的裂缝宽度为视宽度，要根据测量面与缝面的夹角进行换算，得到真实裂缝宽度。

$$\epsilon = \epsilon' \times \cos \theta \quad (1-2)$$

式中， ϵ ——裂缝面真实宽度，cm；

ϵ' ——裂缝面视宽度，cm；

θ ——测量面与裂缝面的夹角, ($^{\circ}$)。

通过对裂缝宽度的统计, 作出其分布图。这个参数是定量描述裂缝的重要参数。

二、裂缝的间距

岩心上对于同一组系的裂缝应对其间距进行测量。同一组系裂缝是指具有成因联系的、产状相近的多条裂缝的组合。裂缝间距是指两条裂缝之间的距离 (e)。裂缝间距的大小决定裂缝孔隙度的高低。其裂缝的间距变化也较大, 由几毫米可变化到几十米不等。

三、裂缝密度

裂缝密度反映了裂缝的多少。通常可按某一参照系而划分为 3 种密度类型, 即:

(一) 体积裂缝密度 (V_D)

定义: 裂缝总表面积 (S) 与基质总体积 (V_B) 的比值。

$$V_D = S/V_B \quad (1-3)$$

(二) 面积裂缝密度 (A_D)

定义: 指裂缝累计长度 $L = n_f \times l$ 和流动横截面上基质总面积 (S_B) 的比值。

$$A_D = \frac{n_f \times l}{S_B} \quad (1-4)$$

式中, n_f ——裂缝总条数;

l ——平均裂缝长度。也可以将单位面积上的裂缝条数称为视面积裂缝密度。

(三) 线性裂缝密度

定义: 指与一条直线 (垂直于流动方向或指岩心的中线) 相交的裂缝条数和此直线的长度的比值。

$$L_D = \frac{n_f}{L_B} \quad (1-5)$$

式中, L_B ——所作直线的长度。

四、裂缝的产状

对于非定向取心, 在描述岩心裂缝时, 也要测量裂缝产状, 包括倾角、倾向、延伸方向以及与层面的关系等。通常描述中按下列标准将裂缝分为 4 个类别。即考虑裂缝与岩心中线的垂直面的夹角。水平缝: $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$, 低角度斜交缝: $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$, 高角度斜交缝: $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$, 垂直缝 $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。

五、裂缝的充填情况

通常裂缝中都具有充填物, 因此, 对其进行描述是判断裂缝成因及其有效性的重要环节。根据充填物多少和充填矿物晶形可以作如下划分 (表 1-1)。

表 1-1 裂缝类型、充填情况、晶形及有效性评价表

名 称	充填物情况	晶 形	缝 宽	有效性评价
张开缝	基本无充填物	自形、半自形 它形	较大	有效
闭合缝	基本无充填物		基本闭合	较有效
半充填缝	有部分充填物		未被完全充填	有效
全充填缝	缝被充填		有效宽度近于零	无效

六、裂缝的溶蚀改造

对于大多数碳酸盐地层中的裂缝，其缝面被地下水溶蚀的现象是常见的，这一现象在某些砂泥岩或火山岩、变质岩裂缝中也可看到。因此，在岩心裂缝观察中也应对其作出描述。主要描述以下几方面：

- (1) 溶段的基块成分、结构和构造特征。
- (2) 溶蚀部位分布的特点。
- (3) 溶蚀加宽的平均宽度。

七、观察结果的解释

根据岩心裂缝观察结果可以对裂缝的分布、有效性等众多方面进行评价。

(一) 确定岩石的裂缝孔隙度和渗透率

根据统计得到的裂缝宽度、间距和密度值，可以用来确定岩心裂缝孔隙度和渗透率。

- (1) 裂缝孔隙度的确定。裂缝孔隙度 (Φ_f) 是裂缝宽度 (ϵ) 和间距 (l) 的函数。

$$\Phi_f = \frac{\epsilon}{l + \epsilon} \times 100\% \quad (1-6)$$

$$\Phi_f = V_D \times \epsilon \quad (1-7)$$

- (2) 裂缝渗透率的确定。裂缝渗透率 (K_f) 与宽度 (ϵ) 和间距 (l) 的关系

$$K_f = \frac{\epsilon^3}{12 \cdot l} \quad (1-8)$$

(3) 利用岩心确定 (Φ_f) 预测裂缝发育带。通过对一个构造 (或区域) 中各取心井的岩心裂缝调查，当取心井有一定密度时，一旦求出各井点某层的裂缝孔隙度值则可以编绘出该构造的 (Φ_f) 分布等值线图，用以定性了解该区裂缝的相对发育程度及分布情况。

(二) 预测裂缝发育带

利用岩心调查资料预测裂缝发育带的前提是：① 构造上有一定数量的取心井；② 不考虑裂缝规模的相关性。

通常根据岩心裂缝密度 (L_D) 编制等密度图来反映构造裂缝的发育情况。

(三) 预测裂缝走向

根据岩心测定的裂缝产状，将走向 (或倾向) 按井点统计成玫瑰花图或水平投影网

图。根据每个井点的优势裂缝走向就可以判断出构造的裂缝方向。

八、岩心裂缝调查法的规模相关性讨论

岩心裂缝调查法在研究裂缝分布中存在许多问题,其主要表现为下述两方面:①通常对于裂缝发育井段,由于地层破碎,取心收获率不高,地下具裂缝的样品不易取出;②取心所揭示的地层很薄,所反映出的裂缝发育程度随机性很大。即岩心中裂缝能否存在不仅决定于裂缝的发育与否,还决定于裂缝的密度,这就是规模相关性。

九、利用岩心裂缝资料预测地下裂缝密度

由于岩心揭示地层中裂缝发育的局限性,使其对地层中实际裂缝的分布情况了解也处于局部的范围。如何利用有限的岩心裂缝资料来估计实际地下裂缝的密度是近年来石油部门及民用工程部门关心的一个问题。

W. Narr 等(1986, 1987)提出了一个利用岩心裂缝资料估算地下裂缝密度的概率方法。该方法使用的前提是:

- (1) 在具有相同岩性特征的测量单元内,层厚与地下裂缝间距之间存在线性关系。
- (2) 岩心上每组裂缝都必须单独确定裂缝密度,且这些裂缝必须是与层面垂直的。

第三节 地面裂缝调查法

通过对地面岩层露头的裂缝调查,研究在不同地质条件下裂缝的发育规律以利于对地下构造的裂缝进行类比,判断其分布规律。

用于对地下裂缝进行类比的地面调查其前提必须是具有与地下地质条件相近(相似)的特征和地质历史过程。

地面裂缝调查的内容相当广泛,作为石油地质人员所关心的主要是以下几方面:

一、地面裂缝的各种参数

地面裂缝的各种参数主要包括:裂缝宽度、长度、组系、密度、裂缝孔隙度、渗透率、产状等。

二、裂缝的成因及其形成的地质条件

裂缝的成因及其与地质条件(如断层、构造变形及部位)的关系,是类比地下地质情况不可少的重要内容。裂缝的形成期推断则是地面裂缝调查中的关键问题。

三、裂缝的有效性

裂缝的有效性是指裂缝的张开程度及充填情况、充填物成分、充填期和分布特征。

四、应力场的恢复

利用地面裂缝调查资料,采用水平投影作图,恢复古应力场方向。研究应力场分布

是该调查法必做的工作之一。这不仅对构造裂缝分布的分析是必需的，而且对区域构造运动的分析也具有十分重要的意义。

第四节 利用曲率评价构造裂缝

一、曲率法的基本理论

曲率是反映某一线、面弯曲程度的数学参数。曲率值被引入研究地下岩石的破裂，首先见到的是 Murray (1968) 对美国北达科他州 Sanish 油田的成功应用。这一方法从 20 世纪 70 年代初被引入到国内而进行对裂缝的预测后（戴弹申、徐中英等，1980，1981），经过近 20 年的不断探索，该方法得到了进一步的完善。曲率法用于研究裂缝分布的前提是：

(1) 研究的地层必须是变形弯曲的岩层，而不是非变形弯曲岩层。即岩层弯曲是受力的结果时（如横弯或纵弯褶皱），才能应用该方法。

(2) 曲率值只能反映变曲岩层面上由于弯曲派生的拉张应力而形成的张性裂缝的多少（相对值）。

(3) 该方法假设与弯曲有关的裂缝将产生于曲率值最大处，但未考虑岩层的塑性变形，即将岩层看作一个完全的弹性体。

对于一维的变形情况，图 1-1 是岩层沿某一方向的变形弯曲（初始情况是无弯曲的岩层）。岩层受力弯曲后，中性面以上部位承受拉张应力，岩石可以形成张裂缝；中性面以下则承受挤压力，不能形成裂缝，只可能有一些岩溶构造（如缝合线等）；中性面即是岩层中受力前后长度不变的那个面。

设岩层中性面以上厚度为 T ，根据变形前后面积变化，得到

$$\Phi_f = \frac{T}{2R + T} \quad (1-9)$$

式中， Φ_f ——张裂缝的孔隙度，小数；

R ——岩层弯曲的曲率半径，m；

T ——中性面上厚度，m。

由于 $R \gg T$ ，则可将分母中的 T 忽略，得到

$$\Phi_f \approx \Phi_f \frac{T}{2R} \quad (1-10)$$

将曲率半径用曲率表示，有

$$R = \frac{1}{d^2 z / dx^2} \quad (1-11)$$

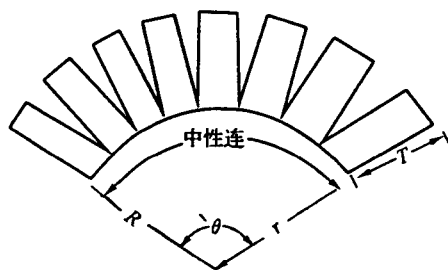


图 1-1 岩层弯曲后的断裂单元
(据 Murray, 1968)

则

$$\Phi_f = \frac{1}{2} T(d^2 z/dx^2) \quad (1-12)$$

上式即为 Murray (1968) 推出的公式。上式表明, 裂缝孔隙度与曲率值呈正比。因此可以用曲率来反映裂缝的相对发育程度。

实际上在许多情况下, 地层并非受单一应力而产生一维变形, 可以存在几个方向的变形。在这样的变形特征下, 裂缝的发育程度应由多个单向变形的曲率叠加来描述。这一叠加可以近似于代数和。如在双向 (相互垂直) 变形条件下的裂缝孔隙度公式应变为

$$\Phi_f = \Phi_{fx} + \Phi_{fy} \approx \frac{1}{2} T(d^2 z/dx^2 + d^2 z/dy^2) \quad (1-13)$$

式中, Φ_{fx} —— x 方向的裂缝率;

Φ_{fy} —— y 方向的裂缝率;

$d^2 z/dx^2$ —— x 方向地层曲率 ($1/m$);

$d^2 z/dy^2$ —— y 方向地层曲率 ($1/m$)。

图 1-2 是通常条件下的几类岩体变形的理想情况。变形 I, III 适用于公式 1-12; 变形 II, IV 适用于公式 1-13。

根据上述叠加原理, 我们可以根据地层变形情况将公式 1-13 加以扩展。

二、曲率值的确定方法

曲率值的求取主要在已作归位的地震剖面图上或地震构造图上进行, 可以分为两大类。

(一) 计算方法

(1) 倾角变化率法。根据地震剖面图或地震构造图, 测定相距为 ΔS 两点的倾角变化率 $\Delta\Phi/\Delta S$, 作为两点曲率近似值 (图 1-2)。

$$R = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta S} \approx \frac{\Delta\Phi}{\Delta S} \quad (1-14)$$

式中, $\Delta S = \sqrt{(H_1 - H_2)^2 + \Delta X^2}$

该方法要求所取两点间距应尽可能小, 保证一定的精确度。

(2) 三点圆弧法。沿某构造剖面取等距三点的深度构成一个圆弧。根据点距及深度计算弓高或圆心坐标, 进而求出三点的平均曲率 R 。曲率符号由 $\left(\frac{H_1 + H_2}{2} - H_3\right)$ 的符号确定 (图 1-3)。利用弓高计算曲率的公式为:

$$R = \frac{8d}{4d^2 + L^2} \quad (1-15)$$

式中, $d = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{(L_1 + L_2)^2 - L^2}{L^2 - (L_1 - L_2)^2}}$

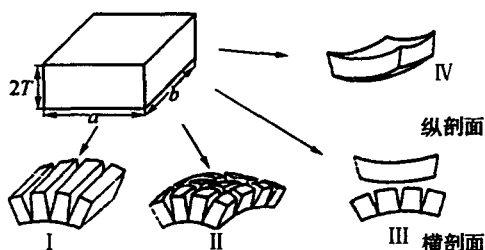


图 1-2 岩层单元变形类型示意图

I. 长轴背斜型; II. 短轴 (穹隆) 背斜型;
III. 鞍部的凹型; IV. 向斜型

$$L^2 = (H_1 - H_3)^2 + 4X^2$$

$$L_1^2 = (H_1 - H_2)^2 + X^2$$

$$L_2^2 = (H_2 - H_3)^2 + X^2$$

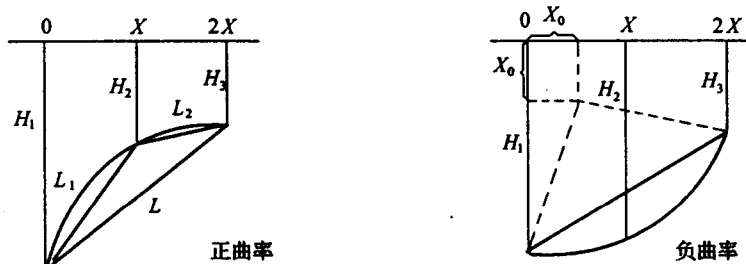


图 1-3 三点圆弧法

利用圆心坐标计算曲率的公式为

$$R = \pm \frac{1}{\sqrt{X_0^2 + Y_0^2}} \quad (1-16)$$

$$\text{式中, } X_0 = \frac{\Delta H_1^2 (2Y_0 - \Delta H_3) - X^2}{2X}$$

$$Y_0 = \frac{\Delta H_1^2 + \Delta H_3^2 + 2X^2}{2(\Delta H_1 + \Delta H_3)}$$

$$\Delta H_1 = |H_1 - H_2| \quad \Delta H_3 = |H_2 - H_3|$$

(3) 曲线拟合法 (五点法)。在地震剖面图上, 沿剖面线取等距五点的深度按抛物线方程拟合地层弧线

$$H = Ax^2 + Bx + C \quad (1-17)$$

用最小方差求出方程系数即可算出中点的曲率值。

$$R = \frac{2A}{[1 + (2Ax_3 + B)]^{\frac{3}{2}}} \quad (1-18)$$

式中, x_3 为 X_1 到 X_3 的距离。

计算时逐点移动, 逐点计算。

(4) 极值主曲率法。将利用钻井资料校正后的地震构造图, 置于 200 m 间距的网格中。遇断层则分块计算。按 200 m 间距纵横扫描。每 5×5 点作趋势拟合分析 (通常作到三次趋势拟合度一般达 85% 以上), 得到曲面趋势方程。

$$f = Ax^3 + By^3 + Cx^2y + Dxy^2 + Exy + Fx^2 + Gy^2 + Hx + Iy + J \quad (1-19)$$

根据下式计算

$$R_{1,2} = \left(\frac{1}{r_x} + \frac{1}{r_y} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{1}{r_x} - \frac{1}{r_y} \right)^2 + \frac{1}{r_{xy}}} \quad (1-20)$$

最大主曲率方向

$$a = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left[-\frac{1}{r_{xy}} / \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_x} - \frac{1}{r_y} \right) \right] \quad (1-21)$$

式中, $\frac{1}{r_x} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}$, $\frac{1}{r_y} = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$, $\frac{1}{r_{xy}} = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}$ 。

最小主曲率方向与大主曲率方向垂直。

(5) 重直二次微商法 (面曲率法)。以归位后的地震构造图为基础资料, 确定构造面的二次微商, 求取面曲率值。当然是在求出构造面趋势方程以后, 才能用下式求取

$$R = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} / \left[1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 \right]^{3/2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} / \left[1 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{3/2} \quad (1-22)$$

上式可以简化为

$$R \approx \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (1-23)$$

也可以用平均曲率表示岩层面上某一点的曲率值。即

$$\bar{R} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) \quad (1-24)$$

(二) 作图法

作图法确定岩层变形曲率的基础资料是经钻井资料校正后的构造图。图解法编制岩层曲率图的方法简单、准确。该方法求曲率是按剖面进行的。图 1-4 其步骤如下: ①按构造等高线绘制横剖面图。纵横比例尺最好选取同一值。如不同时, 计算出的曲率应乘以比例系数。②将剖面按一定的等间距划分, 作每一点的切线, 如 a 点的切线 $\overline{1'2'}$ 。过 $(-1, 0)$ 点作切线 $\overline{1'2'}$ 的平行线 $\overline{1'2'}$, 过该线与 Z 轴的交点作平行线到与 a 点相同的位置 b 点。逐点作出后得 dz/dx 图 (即斜率曲线图)。③在 dz/dx 图中过测点 b 作切线 $\overline{3'4'}$ 。过 $(-1, 0)$ 点作其平行线 $\overline{3'4'}$ 与 Z 轴得到交点, 作 X 轴的平行线找到与 b 点对应

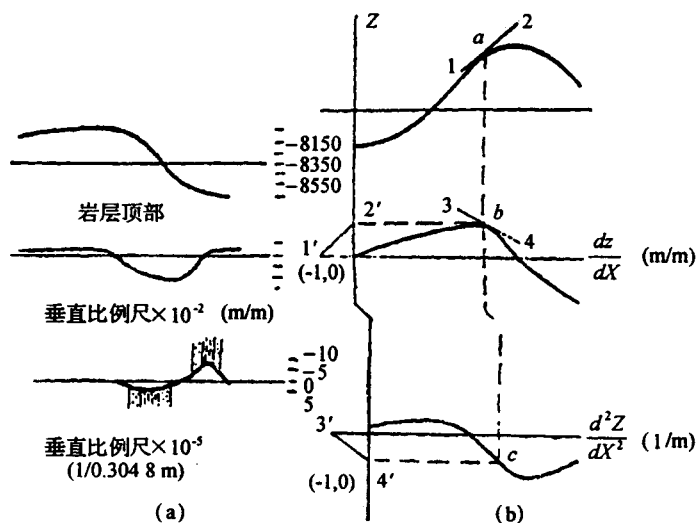


图 1-4 图解法求剖面曲率示意图

(a) Sanish 油田实例; (b) 作图步骤 (据王允诚, 1984)