

地壳构造与地壳应力文集

中国地震局地壳应力研究所 编



地震出版社



地壳构造与地壳应力文集

(19)

中国地震局地壳应力研究所 编

地震出版社

2007

图书在版编目 (CIP) 数据

地壳构造与地壳应力文集. 19/中国地震局地壳应力研究所编. —北京:地震出版社, 2007. 5
ISBN 978-7-5028-3080-9

I. 地… II. 中… III. ①地壳构造-文集②构造地应力-文集 IV. P313.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 064792 号

地震版 XT200600187

内 容 提 要

本书为中国地震局地壳应力研究所连续性学术论文集的第 19 集。全书包括地壳应力环境及其动力过程、地应力测量技术的新进展、地应力测量在工程中的应用、应力-应变观测与地震、地震预报、地震活动性、遥感地质与地质灾害预测等方面的内容。

本书可供地球动力学研究、地应力测量理论及应用、地震监测预报、工程地质等领域的人员及有关大专院校的师生阅读。

地壳构造与地壳应力文集 (19)

中国地震局地壳应力研究所 编

责任编辑: 张晓波

特邀编辑: 张宝红

责任校对: 张晓梅

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 86467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

版(印)次: 2007 年 5 月第 1 版 2007 年 5 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 327

印张: 12.75

印数: 001—500

书号: ISBN 978-7-5028-3080-9/P·1320 (3751)

定价: 20.00 元

版权所有, 翻印必究

(图书出版印装问题, 本社负责调换)

目 录

地壳动力学在石油开发中的应用

- (三) 构造应力场与石油储集 安 欧 (1)

地壳动力学在石油开发中的应用

- (四) 构造应力场与石油勘探 安 欧 (8)

- 地震动反应谱影响因素研究的若干进展 兰景岩 薄景山 吕悦军 齐文浩 (27)

- 大青山山前活动断裂的分段地震危险性概率评估 何仲太 (35)

延庆盆地北缘断裂带姚家营—张山营段活动特征探讨

- 刘德权 张国宏 赵国存 赵京轶 徐秀力 (42)

北京南口—孙河断裂北西段晚第四纪活动特征研究

- 王丹丹 张世民 刘旭东 张英礼 王 瑞 (50)

三峡库区巫山县滑坡地质灾害变形监测系统

- 魏学勇 欧阳祖熙 周 昊 周 晃 唐 宇 (60)

- 基于 TM 和 DEM 的茅山地区断裂构造解译 陈文凯 张景发 姜文亮 杨映红 (67)

重磁、遥感数据处理及其在山西断裂带解译中的应用

- 杨映红 张景发 姜文亮 龚丽霞 陈文凯 (76)

- 宇宙核素测年法的基本原理及应用 闫成国 (83)

- 活断层构造建模与可视化 刘玉娟 赵树贤 (93)

- 2006 年文安 5.1 级地震前的钻孔应变异常分析 易志刚 宋 莱 (102)

- 唐山地震前地震视应变场的时空演变 张 彬 杨选辉 易志刚 (112)

2006 年 3 月 31 日前郭地震的预测实践回顾与总结

- 刘冬英 焦 青 王若兰 张洪艳 (117)

六合(冶山)体应变观测质量评价和映震效能研究

- 杨建军 李 飞 郑海峰 汪立宇 刘 戎 (127)

南通台印度尼西亚苏门答腊 8.7 级、8.5 级地震、江西九江—瑞昌 5.7 级地震

钻孔应变观测报告	王一宽 (140)
昔阳台 2006 年体应变仪、水平摆倾斜仪地震观测报告	李素华 宋志英 王振江 吕永青 (144)
一种特殊形态的水压致裂记录曲线的形成机理及数据解释	王成虎 郭启良 赵仕广 王海忠 (149)
北天山西部地应力测量	张志国 王显军 (155)
水压致裂印模定向测量井下放水开关的研制与使用	王海忠 (162)
关于井下观测系统的风险讨论	吴立恒 范国胜 陈征 李涛 (166)
电源转换芯片 TPS5430 及其应用	马爱虹 李海亮 (172)
SZW-1A 型数字式温度计测试软件设计	何案华 赵刚 郭蕤西 郭柏林 王军 秦久刚 (177)
中国大陆地应力模拟网络计算平台的网络环境建设	郭文字 王建军 (186)
IPv6 中的无状态地址自动配置初探	邹妍 李玉萍 吴国强 刘亮 (193)

Contents

Application of crustal dynamics to petroleum exploitation

—— (三) Tectonic stress field and oil reservoir An Ou (1)

Application of crustal dynamics to petroleum exploitation

—— (四) Application of tectonic stress field to petroleum exploration An Ou (8)

Some progress of study on the influential factors on the ground motion

and response spectrum Lan Jingyan Bo Jingshan Lu Yuejun Qi Wenhao (27)

Occurrence probability of characteristic earthquakes on the segments of daqingshan

piedmont fault He Zhongtai (35)

A study on the characteristics of Yaojiaying - Zhangshanying segment of Yanqing

Basin North Margin Fault

..... Liu Dequan Zhang Guohong Zhao Guocun Zhao Jingtie Xu Xiuli (42)

A study on the character of late quaternary activity of the Nankou - Sunhe fault

..... Wang Dandan Zhang Shimin Liu Xudong Zhang Yingli Wang Rui (50)

The deformation monitoring system of landslide hazards in WuShan area of Three Gorge

Reservoir Wei Xue yong Ou Yang Zu xi Zhou Hao Zhou Huang Tang Yu (60)

Active fault interpretation of Mao Mountain Area based on the TM image and DEM data

..... Chen Wenkai Zhang Jingfa Jiang Wenliang Yang Yinghong (67)

Gravitational, aeromagnetic and remote sensing data processing and the application

of their results to interpreting faults in Shanxi province

..... Yang Yinghong Zhang Jingfa Jiang Wenliang Gong Lixia Chen Wenkai (76)

The basic principle and application of cosmogenic nuclides dating Yan Chengguo (83)

Structure Modeling and 3D Visualization of Active Fault

..... LIU Yu - juan ZHAO Shu - xian (93)

An analysis of the borehole strain anomaly before the Wenan *M* 5.1 earthquake

..... Yi Zhigang Song Mo (102)

The space - time evolution of the seismic apparent strain field before Tangshan

earthquake Zhangbin Yang Xuanhui Yi Zhigang (112)

A review and summary of prediction practice of the Qianguo earthquake

on March 31, 2006

..... Liu Dongying Jiao Qing Wang Ruolan Zhang Hongyan (117)

An evaluation of data quality and earthquake sensitivity of Liuhe (Yeshan)

volumetric strain observation station

..... Yang Jianjun Li Fei Zhen Haifeng Wan Liyu Liu Rong (127)

Borehole strainmeter observation at Nantong station for the Sumatra *M* 8.7 and

M 8.5 and Jiujiang - Ruichang *M* 5.7 earthquakes Wang Yikuan (140)

Observation report of volumetric strainmeter and horizontal pendulum tiltmeter of Xiyang station in 2006	Li Suhua Song Zhiying Wang Zhenjiang Lu Yongqing (144)
Formation mechanism and data processing of a special kind of hydrofracturing ecored	Wang Chenghu Guo Qiliang Zhao Shiguang Wang Haizhong (149)
In - situ stress measurement in western North Tianshan	Zhang Zhiguo Wang Xianjun (155)
Design and application of downhole discharge valve for hydro - fracture impresser orientation measurement	Wang Haizhong (162)
A discussion of the risk of borehole observation system	Wu Liheng Fan Guosheng Chen Zheng Li Tao (166)
The DC/DC converter TPS5430 and its application	Ma Aihong Li Hailiang (172)
The design of the SZW - 1A digital thermometer testing software	He Anhua Zhao Gang Guo Miaoxi Guo Bailin Wang Jun (177)
Configuration of the network computing platform for stress field simulation of the Chinese continent	GUO Wen - yu WANG Jian - jun (186)
Preliminary study of stateless address auto configuration protocol for IPv6	Zou Yan Li Yuping Wu Guoqiang Liu Liang (193)

地壳动力学在石油开发中的应用

—— (三) 构造应力场与石油储集

安 欧

(中国地震局地壳应力研究所 北京 100085)

摘要 石油储集层的储集体积、孔隙率和渗透率, 决定其对石油的储集性能。本文用理论研究和测量, 证明了构造应力场是影响石油储集层孔隙率和渗透率的主要因素。

序 言

储集层对石油的储集性能取决于其孔隙率、渗透率和储集体积。本文用理论研究和实际测量证明, 储集层的孔隙率和渗透率受岩体内构造应力场中球应力的重要影响。球应力场空间分布的变化和随时间的改变, 都将影响储集层的可储量和可采度。因此, 在了解岩体对石油的可储量和可采度以寻求好的储集层时, 研究区域球应力场的水平和铅直空间分布状态, 是必须的基础性工作, 也是指导下一步勘探和开采工作的重要依据。

一、石油储集条件

能储存和渗流油水混合流体的岩层为储集层。构成储集层的主要岩石有碎屑岩, 如砾岩、砂岩、火山碎屑岩、泥岩和页岩; 碳酸盐岩, 如石灰岩, 白云岩和礁灰岩; 火成岩, 如花岗岩、玄武岩、安山岩和凝灰岩; 变质岩, 如变粒岩、蛇纹岩、石英岩、片麻岩、千枚岩、片岩和板岩。

储集层之上要有能对石油起封隔圈闭作用的盖层, 以保存储集的石油而不逸散。构成这种盖层的岩石主要有页岩、泥岩、盐岩、膏岩、泥灰岩、石灰岩、粘土岩、粉砂岩和火山岩, 这些岩石可与储集层连续沉积, 可为不整合地层、可以封闭断裂。盖层的封圈性能, 由其封隔能力和圈闭空间的大小来决定。封隔能力, 取决于盖层的致密程度、全层厚度、裂隙程度和排替压力。圈闭空间, 取决于圈闭高度、圈闭面积和圈闭形态。在封圈空间内有储渗能力并与生油层相通的储体, 都可成为储集层使石油聚集而成藏。储集层以距生油层越近越好, 若生油层产油充足相距远些也可形成好油藏。生油层、储集层和盖层在组合形式上有几种类型, 可从下而上为生油层、储集层和盖层; 生油层和储集层横向接触, 盖层在上; 生油层和盖层为同一层, 储集层在下; 生、储、盖为同一层, 如石灰岩中的裂隙段储油、泥岩中的砂岩透镜体储油。在组合结构上, 有构造封圈, 如背斜、压性断层圈闭; 地层封圈, 如地层尖灭、不整合圈闭; 岩性封圈, 如泥岩中砂岩包体式圈闭。在组合时代上, 有古生新储、新生古储、自生自储。在储漏能力上, 油从储体向外渗漏动力

大于盖层封隔阻力, 则石油渗漏, 此时要求生油层的供油量大于渗漏量才能成藏; 渗漏动力等于封隔阻力, 则储漏平衡, 可成藏; 渗漏动力小于封隔阻力, 则存储石油。在形成次序上, 石油生运前形成盖层, 封油时间长, 存油丰盛; 石油生运后期形成盖层, 封油时间短, 油不丰盛; 石油生运结束后形成盖层, 则不成藏。

储集层的储集性能, 由储集质量和储集体积表征。两者可互相补充, 须综合考虑。储集质量, 取决于储集层的孔隙率和渗透率。孔隙率和储集体积, 决定储油的多少, 即开采价值。渗透率和储集体积, 决定石油的产能, 即可采程度。这要求其孔隙连通并有足够大小的孔径。与外界不连通的储集层孔隙不储油或封闭油, 而孔径太小的储集层孔隙则即使储油也采不出来。可见, 对有足够储集体积的储集层来说, 孔隙率和渗透率便成为决定其中各部分对石油储集性能的主要指标了。

二、构造应力场对储集层孔隙率的影响

假设岩石体积为 V , 所含孔隙体积为 v , 则其孔隙率可表示为

$$\phi = \frac{v}{V} \quad (1)$$

岩石孔隙, 主要有屑间粒隙、水蚀溶隙和构造裂隙三大类。粒隙和溶隙又可合称为洞隙, 其横截面长短径相差较小, 裂隙横截面的长短径相差较大。它们分别或共同构成岩石的储集空间。岩石洞隙体积为 v_c , 裂隙体积为 v_d , 则其洞隙孔隙率和裂隙孔隙率分别为

$$\left. \begin{aligned} \phi_c &= \frac{v_c}{V} \\ \phi_d &= \frac{v_d}{V} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

若岩石既有洞隙又有裂隙, 则总孔隙体积

$$v = v_c + v_d$$

于是总孔隙率

$$\phi = \frac{v_c + v_d}{V} = \phi_c + \phi_d$$

岩石固体格架的体积为 V_s , 总体积

$$V = V_s + v$$

则总体积的改变

$$\Delta V = \Delta V_s + \Delta v$$

岩体中的构造主应力 $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$, 可分成由其固体格架承受的有效应力部分 σ'_i 和由孔隙流体承受的孔隙压力 p 的有效部分 αp , 则

$$\sigma_i = \sigma'_i + \alpha p$$

α 是标特系数。取压性应力为正, 代入球压应力表示式

$$\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma' + \alpha p \quad (3)$$

岩体在球压应力 σ 作用下发生的体积应变

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\sigma}{K} \quad (4)$$

K 为岩体体积压缩模量。孔隙流体在有效孔隙压力 αp 作用下发生的体积应变

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\alpha p}{K_t} \quad (5)$$

考虑到式 (1)，而改写为

$$\frac{\Delta v}{\phi V} = \frac{\alpha p}{K_t}$$

K_t 是孔隙流体体积压缩模量。将式 (5) 代入式 (4)，并考虑到式 (3)，得

$$\phi = \frac{\Delta v}{\Delta V} \frac{K_t}{K} \frac{1}{1 - \frac{\sigma'}{\sigma}} \quad (6)$$

即岩体孔隙率是 σ'/σ 的函数。饱和孔隙时，随球压应力 σ 的增大， K 不断增大，由于水的可压缩性极小，而使 Δv 改变极小，但 αp 增大较快，从式 (3) 可知 σ' 则增大相对较慢，故由上式知 ϕ 则相应减小。湿润孔隙时，岩体体积改变近似等于孔隙体积改变，

$$\Delta V \approx \Delta v$$

代入式 (6)，得

$$\phi \approx \frac{K_t}{K} \frac{1}{1 - \frac{\sigma'}{\sigma}}$$

随球压应力的增加，由于此时 K_t 为湿润孔隙中流体的体积压缩模量而为极小值，但 K 则增大，又由于固体格架向近乎空孔隙的变形阻力小而使得 σ' 增加较慢，故由上式得知 ϕ 随之急剧减小。

实验结果也表明，岩体孔隙率随球压应力上升而减少^[1~2,7]，实测结果则表明在铅直方向随深度增加球压应力增大而减小^[3~7]，在水平方向随进入挤压带球压应力增大而减小^[7]。

三、构造应力场对储集层渗透率的影响

在此，将储集层按孔隙形态，分为洞隙岩和裂隙岩两大类论述之。

1. 洞隙岩体

砂岩为洞隙岩，其渗透率 k_c ，与孔隙率 ϕ_c 、孔隙半径 r 、流体的容重 δ 和粘度 η 有关系

$$k_c = \frac{\delta r^2 \phi_c}{8\eta} \quad (7)$$

k_c 对有效球压应力的偏导数为

$$\frac{\partial k_c}{\partial \sigma'} = \frac{\delta r^2}{8\eta} \frac{\partial \phi_c}{\partial \sigma'} + \frac{\delta r \phi_c}{4\eta} \frac{\partial r}{\partial \sigma'} \quad (8)$$

由于孔隙流体体积压缩系数，考虑到式 (2)，而为

$$\beta = \frac{1}{v_c} \frac{dv_c}{dp} = \frac{1}{v_c} \frac{d\left(\frac{v_c}{V}\right)}{dp} = \frac{1}{\phi_c} \frac{d\phi_c}{dp} \quad (9)$$

有效球应力

$$\sigma' = \sigma - \alpha p$$

由于砂岩洞隙的闭合球压应力约达 10^{11} MPa, 在一般球压应力作用下几乎不变, 故可近似认为与球压应力无关, 则由上式得

$$\frac{\partial \phi_c}{\partial \sigma'} = -\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \phi_c}{\partial p}$$

将式 (9) 代入, 得

$$\frac{\partial \phi_c}{\partial \sigma'} = -\frac{\beta \phi_c}{\alpha} \quad (10)$$

又岩石固体格架的体应变

$$e' = \frac{3(1-2\gamma_s)}{E_s} \sigma' \quad (11)$$

E_s 、 γ_s 是岩石固体格架的弹性模量和泊松比。再由弹性关系得

$$\frac{\partial r}{\partial \sigma'} = r \frac{\partial e'}{\partial \sigma'} \quad (12)$$

将式 (10)、(11)、(12) 代入式 (8), 并引用式 (7), 得

$$\frac{\partial k_c}{\partial \sigma'} = k_c \left[\frac{6(1-2\gamma_s)}{E_s} - \frac{\beta}{\alpha} \right] \quad (13)$$

积分, 则有

$$\ln k_{c1} - \ln k_{c2} = \left[\frac{6(1-2\gamma_s)}{E_s} - \frac{\beta}{\alpha} \right] (\sigma'_1 - \sigma'_2)$$

取

$$\frac{6(1-2\gamma_s)}{E_s} - \frac{\beta}{\alpha} = \omega$$

则前式变为

$$\ln k_{c1} - \ln k_{c2} = \omega (\sigma'_1 - \sigma'_2)$$

代入

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - \alpha p$$

$$\sigma'_2 = \sigma_2 - \alpha p$$

得

$$\ln k_{c1} - \ln k_{c2} = \omega (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (14)$$

式中, σ_1 、 σ_1 、 σ'_1 、 σ'_2 是渗透率为 k_{c1} 、 k_{c2} 状态的球压应力和有效球压应力。由于系数 ω 小于零, 故由上式得知, 洞隙岩体渗透率的对数与球压应力的增量成负相关, 球压应力增大, 洞隙渗透率对数减小。

实验结果也证明, 洞隙岩石渗透率随孔隙压力^[1,8]或球压应力^[9]升高而减小。实测结

果也表明, 洞隙岩体渗透率随深度增大球压应力上升而减小^[10,11]。

2. 裂隙岩体

设岩体中, 一水平长度为 b , 水平厚度为 c , 高为 h 的块体, 被平行 (b, c) 面的开度为 a 、间距为 d 的等距铅直裂缝切成 n 个平行岩片, 则块体的水平厚度

$$c = n(d + a) \quad (15)$$

此块体的孔隙率

$$\phi_d = \frac{nhba}{hbc} = \frac{na}{n(d + a)} \approx \frac{a}{d} \quad (16)$$

裂缝中充满容重为 δ 、粘度为 η 的流体, 在面积为 hb 的单个微流层内以速度 v 流动的内摩擦力

$$f = \eta hb \frac{dv}{dx} \quad (17)$$

而此流体流动的动力

$$F = \delta hx \Delta p$$

若流体流动无加速度, 则

$$F + f = 0$$

将此二式代入式 (17), 并积分之, 由于流速在与岩面接触处为零, 得

$$v = \frac{\delta a^2 \Delta p}{8\eta b} - \frac{\delta x^2 \Delta p}{2\eta b}$$

代入 dx 薄层内的流量式

$$dq = h dx \cdot v$$

得

$$q = \frac{\delta ha^3 \Delta p}{12\eta b} \quad (18)$$

又由于块体中裂缝开度极小, 流体在其中的流动可用达西定律表示, 则单缝中的流量又可表示为

$$q = k_{a0} ha \frac{\Delta p}{b} \quad (19)$$

k_{a0} 为单缝使容重为 δ 、粘度为 η 的流体在其中流过的渗透率。对比式 (18) 和 (19), 得

$$k_{a0} = \frac{\delta a^2}{12\eta}$$

于是, 由式 (19) 得通过含 n 条裂缝块体的总流量

$$\theta = nq = nk_{a0} ha \frac{\Delta p}{b} = n \frac{\delta a^2}{12\eta} ha \frac{\Delta p}{b}$$

块体中, 裂缝开度与基质的共同渗流面积之和为块体渗流横截面积 hc , 通过此横截面的流量可表示为

$$\theta = k_d hc \frac{\Delta p}{b}$$

k_d 为含裂缝块体的渗透率。对比此二流量式, 得裂缝块体的渗透率

$$k_d = \frac{n\delta a^3}{12\eta c}$$

将式 (15)、(16) 代入, 得

$$k_d = \frac{\delta a^3}{12\eta d} = \frac{nd^2\phi_d^3}{12\eta} \quad (20)$$

取 k_d 对 σ' 的偏导数,

$$\frac{\partial k_d}{\partial \sigma'} = \frac{2\delta d\phi_d^3}{12\eta} \frac{\partial d}{\partial \sigma'} + \frac{3\delta d^2\phi_d^2}{12\eta} \frac{\partial \phi_d}{\partial \sigma'} \quad (21)$$

又由弹性关系得

$$\frac{\partial d}{\partial \sigma'} = d \frac{\partial e'}{\partial \sigma'} \quad (22)$$

将式 (10)、(11)、(20)、(22) 代入式 (21), 得

$$\frac{\partial k_d}{\partial \sigma'} = k_d \left[\frac{6(1-2\gamma_s)}{E_s} - \frac{3\beta}{\alpha} \right]$$

积分之, 得

$$\ln k_{d1} - \ln k_{d2} = \left[\frac{6(1-2\gamma_s)}{E_s} - \frac{3\beta}{\alpha} \right] (\sigma'_1 - \sigma'_2)$$

取

$$\frac{6(1-2\gamma_s)}{E_s} - \frac{3\beta}{\alpha} = \varepsilon$$

则前式变成

$$\ln k_{d1} - \ln k_{d2} = \varepsilon (\sigma'_1 - \sigma'_2)$$

代入

$$\begin{aligned} \sigma'_1 &= \sigma_1 - \alpha p \\ \sigma'_2 &= \sigma_2 - \alpha p \end{aligned}$$

得

$$\ln k_{d1} - \ln k_{d2} = \varepsilon (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (23)$$

式中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma'_1, \sigma'_2$ 是块体渗透率为 k_{d1}, k_{d2} 状态的球压应力和有效球压应力。由于系数 ε 小于零, 故由此式可知, 裂隙岩体渗透率的对数与球压应力的增量成负相关, 球压应力增大, 裂隙渗透率的对数减小。

实验结果也表明, 裂隙岩石渗透率随球压应力增大而减小。^[2]

若岩体中既有洞隙又有裂隙, 取式 (14) 与式 (23) 之和, 得

$$\ln(k_{c1}k_{d1}) - \ln(k_{c2}k_{d2}) = (\omega + \varepsilon)(\sigma_1 - \sigma_2)$$

由于系数 $(\omega + \varepsilon)$ 小于零, 故此种岩体的渗透率仍随构造应力场中球压应力的增大而减小。

上述说明, 构造应力场的改变将影响岩体的渗透率。含油区构造应力中球压应力的不均匀分布和随时间的变化, 以及油田在开采过程中不断注入和采出流体, 工艺上的压裂和热采, 也都会引起岩体中球压应力的不断变化, 因而岩体渗透率将随之改变, 而改变着储

油层的产能，并将直接影响到开发效果。

参考文献

- [1] 李国平等，天然气封盖层研究与评价，北京：石油工业出版社，1996。
- [2] 柏松章等，碳酸盐岩潜山油田开发，北京：石油工业出版社，1996。
- [3] K. Magara, Geological model predicting optimum sandstone percent for oil accumulation, Bull. Can. Pet. Geol., Vol. 26, No. 3, 1978。
- [4] L. C. Bonham, Migration of hydrocarbon in compacting basin, AAPG studies in geology, No. 10, 1980。
- [5] J. W. Schmoker, R. B. Hally, Carbonate porosity versus depth: A predictable relation for South Florida, AAPG Bull., Vol. 66, No. 12, 1982。
- [6] 李明诚，石油与天然气运移，北京：石油工业出版社，1994。
- [7] Н. Б. Дортман, Физические Свойства Горных ПороД Пеленых Ископаемых, Москва, Недра, 1976。
- [8] P. Ungerer et al, Basin evaluation by integrater two - dimensional modeling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation and migration, AAPG Bull., Vol. 74, No. 3, 1990。
- [9] В. Д. Викторин, Влияние Особейностей КарБонатных Колекторов на Эффективность Разра- Ботки Нефтяных ЭалеЖей, 57 ~ 65, Москва, Недра, 1988。
- [10] K. Magara, Mechanisms of natural fracturing in a sedimentary basin, AAPG Bull., Vol. 65, No. 1, 1981。
- [11] H. D. Hedburg, Petroleum prospects of the deep offshore, Bull., AAPG, Vol. 63, No. 3, 1979。

Application of crustal dynamics to petroleum exploitation

—— (三) Tectonic stress field and oil reservoir

An Ou

(Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085)

The reservoir volume, porosity and permeability of petroleum reservoir strata decide the performance of reservoir strata for oil production. This treatise proved that tectonic stress field is the principal factor to affect the porosity and permeability of petroleum reservoir strata by theoretical research and measurement.

地壳动力学在石油开发中的应用

—— (四) 构造应力场与石油勘探

安 欧

(中国地震局地壳应力研究所 北京 100085)

摘要 本文综述了构造应力场在石油勘探中的应用, 包括油田应力测算、成藏构造分析、裂缝分布估测、有利应力区划等, 这些正是分析形成油藏的诸因素, 用地壳动力学的理论对认识石油生、运、储系统以及油藏的形成帮助我们找到更多的高产油田。

一、油田应力测算

1. 构造应力场测量

(1) 古构造应力测量

要分析测区石油在地质时期的生成、运移、储集规律, 须测量该时期的古构造应力场。裂面擦痕法可用来测量古构造应力场中主应力大小和方向。若地区的地形高差小, 剪裂面上的擦痕产状受后来构造运动的影响不大, 则由区内露头 and 定向岩心上同一地质时期形成的剪裂面上擦痕方向的统计, 可求得裂面形成时期构造应力主分量的方向和大小。

把地理坐标系 $O-XYZ$ 的原点 O 取在剪裂面上, X 轴向东, Y 轴向北, Z 轴铅直向上 (图 1)。剪裂面的方位用单位法向矢量 n 表示, n 在水平面上投影的指向为倾向, 用与 X 轴的夹角 θ_n 表示,

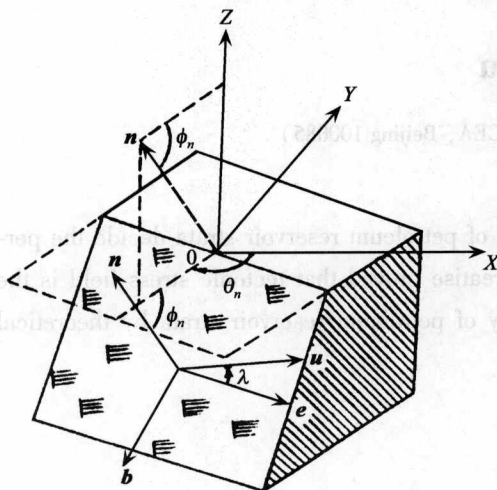


图 1 岩体剪裂面上盘单位滑动矢量方向在下盘裂面上的几何表示

从 X 轴到此投影以逆时针方向为正; n 与水平面的夹角 ϕ_n 为倾角, 剪裂面上擦痕方向用指示上盘滑动方向的单位矢量 u 表示, 其倾向和倾角为 θ_u 、 ϕ_u 。 u 在剪裂面上与水平矢量 e 的夹角 λ 为滑动角, 从 e 到 u 以逆时针方向为正。裂面上与 n 、 u 成左旋垂直的单位矢量 b 的倾向和倾角为 θ_b 、 ϕ_b 。 n 、 u 、 b 的方位, 都从剪裂面上量得。

如图 2 所示, 主应力坐标系 $O-123$ 中, 主轴 3 一般不与地理坐标系的 Z 轴平行。令 $O-12$ 面与 $O-XY$ 面的交线为 OL , α 为 1 轴与 OL 的夹角, β 为 3 轴与 Z 轴的夹角, γ 为 X 轴与 OL 的夹角。于是, 求得 α 、 β 、 γ , 便可知主应力坐标系在地理坐标系中的方位, 即三个主应力的方向。主应力在地理坐标系中的方向余弦示于表 1。则用主应力分量表示的地理坐标系中的应力分量

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= l_1^2 \sigma_1 + l_2^2 \sigma_2 + l_3^2 \sigma_3 \\ \sigma_y &= m_1^2 \sigma_1 + m_2^2 \sigma_2 + m_3^2 \sigma_3 \\ \sigma_z &= n_1^2 \sigma_1 + n_2^2 \sigma_2 + n_3^2 \sigma_3 \\ \tau_{xy} &= l_1 m_1 \sigma_1 + l_2 m_2 \sigma_2 + l_3 m_3 \sigma_3 \\ \tau_{yz} &= m_1 n_1 \sigma_1 + m_2 n_2 \sigma_2 + m_3 n_3 \sigma_3 \\ \tau_{zx} &= n_1 l_1 \sigma_1 + n_2 l_2 \sigma_2 + n_3 l_3 \sigma_3 \end{aligned} \right\} (1)$$

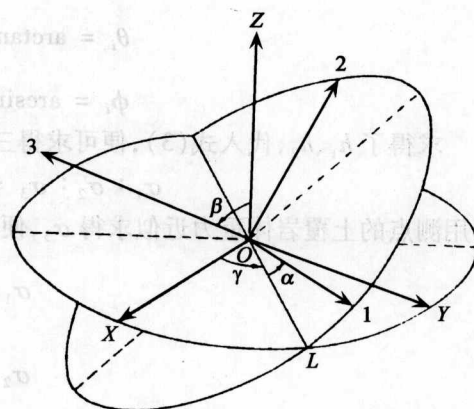


图2 主应力坐标系与地理坐标之间的欧拉关系图示

从露头 and 岩芯裂面上量得的 b 的组数为 n ，则问题转为求

$$\theta = \sum_{k=1}^n |\tau \cdot b_k| \quad (2)$$

的最小值。式中

$$\begin{aligned} \tau \cdot b_k &= [(\sigma_x \cos \theta_{nk} \cos \phi_{nk} + \tau_{xy} \sin \theta_{nk} \cos \phi_{nk} + \tau_{xz} \sin \phi_{nk})i + (\tau_{yx} \cos \theta_{nk} \cos \phi_{nk} + \\ &\quad \sigma_y \sin \theta_{nk} \cos \phi_{nk} + \tau_{yz} \sin \phi_{nk})j + (\tau_{zx} \cos \theta_{nk} \cos \phi_{nk} + \tau_{zy} \sin \theta_{nk} \cos \phi_{nk} + \\ &\quad \sigma_z \sin \theta_{nk})k] \cdot [\cos \theta_{bk} \cos \phi_{bk}i + \sin \theta_{bk} \cos \phi_{bk}j + \sin \phi_{bk}k] \end{aligned}$$

式中的 θ_{nk} 、 ϕ_{nk} ； θ_{bk} 、 ϕ_{bk} 均从裂面上量得。取测点的 τ 与 u_k 重合，则 $\tau \cdot b_k = 0$ 。地理坐标系中的应力分量，取用方程组 (1)。再设量

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_3} \\ h_2 &= \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

则，待求变量为 α 、 β 、 γ 、 h_1 、 h_2 。设定若干组 α 、 β 、 γ 、 h_1 、 h_2 值，依次代入式 (2) 试算，使 θ 值最小的一组值，便是问题的近似解。

表1 主应力分量在地理坐标系中的方向余弦

地理坐标	主应力坐标		
	1	2	3
X	$l_1 = -\sin \alpha \cos \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma$	$l_2 = -\cos \alpha \cos \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma$	$l_3 = \sin \beta \sin \gamma$
Y	$m_1 = -\sin \alpha \cos \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma$	$m_2 = -\cos \alpha \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma$	$m_3 = -\sin \beta \cos \gamma$
Z	$n_1 = -\sin \alpha \sin \beta$	$n_2 = -\cos \alpha \sin \beta$	$l_3 = -\cos \beta$

求得了 α 、 β 、 γ ，便可用表1求得 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 在地理坐标系中的方向余弦 (l_1 、 m_1 、 n_1)、(l_2 、 m_2 、 n_2)、(l_3 、 m_3 、 n_3)。于是，可求得三个主应力在地理坐标系中的倾向 θ_i 和倾角 ϕ_i ：

$$\left. \begin{aligned} \theta_i &= \arctan\left(\frac{l_i}{m_i}\right) \\ \phi_i &= \arcsin n_i \end{aligned} \right\} \quad i = 1, 2, 3$$

求得了 h_1, h_2 , 代入式(3), 便可求得三个主应力之比

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = h_1 h_2 : h_1 : (h_2 + 1)$$

再用测点的上覆岩体重力求得 σ_3 , 便可代入(3) 式求得 σ_1, σ_2 的绝对值

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{h_1 h_2 \sigma_3}{h_2 + 1} \\ \sigma_2 &= \frac{h_1 \sigma_3}{h_2 + 1} \end{aligned} \right\}$$

球应力

$$\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

若主轴3在铅直方向, $\beta = 0$, 则表1中的方向余弦只剩一个待定角 γ , 此时是 σ_1 与 X 轴的夹角。而 σ_1, σ_2 在水平方向, 故由求得的 γ 可得 σ_1, σ_2 的水平方位。

(2) 古构造残余应力测量

古构造残余应力场, 是古构造应力场残留至今的残余场, 也是现代构造运动的动力之一, 其测量有 X 射线法^[1]。

从露头上的测点采下定向岩块, 或从已有的岩心上采下一块后再用钻孔周围小构造法或大区岩石组构法或古地磁法给此岩块定向, 或钻取钻孔定向岩心, 由于其上的现今构造应力作用已消除, 故只剩下残余应力。将定向岩块沿水平方向切开, 从切开的下半部表层中切出直径5 cm、厚3 mm的圆板形水平测件, 再将岩块被切去的上半部铅直切开, 制成高宽各5 cm、厚3 mm的铅直测件。选测测件中力学性质成高级轴对称的矿物, 如石英、方解石^[2]。当其力学性质对称轴平行应力主轴3时, 其六角晶系底面即为应力主平面(1, 2), 此面上的弹性模量 $E_1 = E_2 = E$, 泊松比 $\nu_{12} = \nu_{21} = \nu$, 此面方向与对称轴之间的泊松比 $\nu_{13} = \nu_{23} = \nu'$ 。先用 X 射线法测得选测矿物的这些力学参量, 在一个测区只须测几个测件中的这些参量而取其平均值即可, 用晶体结构分析用的 X 射线衍射测角仪, 测量测件中选测矿物力学性质对称轴方向的晶面间距

$$d = \frac{n\lambda}{2\sin\theta}$$

当 $n = 1$ 时, λ 为所用 X 射线的波长, d 为选测矿物中垂直此对称轴方向的(001)晶面系的晶面间距, θ 为测量 d 时所得到的掠身角。

照此, 用水平测件, 测量选测矿物对称轴分布在此测件表面法向的晶粒中的此种晶面间距 d_{90° , 再测量选测矿物对称轴与水平测件表面法向成 30° 斜交三个方向晶粒中的 d_{a30° 、 d_{b30° 、 d_{c30° , 这三个方向在水平测件表面上投影, 从正南开始, 逆时针依次相间 60° 。再用铅直测件, 在其铅直表面上测得选测矿物对称轴分布在表面法向晶粒中的 $d_{90''}$, 以及对称轴分布在与此测件表面垂直的铅直面上与此测件表面法向成 30° 交角方向的晶粒中的 $d_{a30''}$ 。