

用钻孔崩落推断四川盆地的水平主应力方向

高阿甲 许忠淮 陈家庚
(国家地震局地球物理研究所)

摘要

利用法国斯仑贝谢公司在我国四川油气井服务时所作的四臂井径测井曲线, 分析了四川盆地中井位附近的地壳水平主应力方向。共分析了 12 口井的井径测量曲线, 测量深度从地表下约 2,000 m 至 4,700 m, 各井的测量段从 50 m 左右至 1,300 m 不等。编制了对测量曲线采样、插值并作简单统计处理, 从而获得崩落孔孔径平面投影图的计算机程序。处理结果表明, 大多数孔显示了 NNW-SSE 或近 N-S 向的优势崩落方向, 说明四川盆地最小水平主应力即为此方向。此结果与由平均震源机制结果得出的四川附近地壳区域应力场图象大体协调一致。

关键词 崩塌; 应力; 四川盆地

一、引言

分析地震的震源机制解资料是当前获得地壳深处应力场信息的主要方法之一。不少作者^[1,2]曾用该方法研究过四川及邻近地区地壳应力场的方向特征。文献 [3] 利用统一方法处理了大量离散分布的小地震的初动方向资料, 进一步揭示出该区区域构造应力场明确的方向图象。

上述结果是通过地震资料反演推断得到的。为进一步确认这些结果的真实性, 最好要有其它的独立观测结果, 并能导致相同的结论。本文试图从另一独立观测——深井孔孔壁在地应力作用下的崩落状况——来分析四川盆地的地壳应力场的方向特征。

近年来, 利用钻孔崩落分析地壳应力场的方法受到国内外研究者的日益重视^[4,5,6]。由于许多油田已积累了大量的井孔孔径测量资料, 而油井一般较深, 遂使该法能提供地下较深处应力状态的信息。地震方法只能适用于地震区, 为了完整地分析区域应力场连续变化的情况, 钻孔崩落法又可与地震方法互为补充, 填补许多非地震区的空缺。

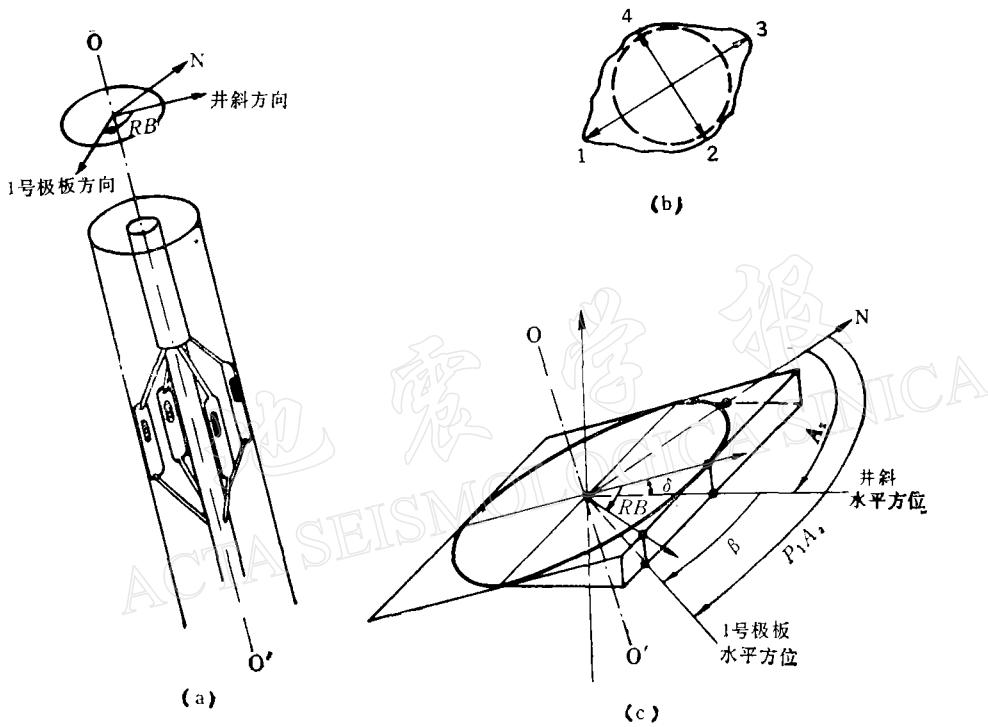
法国斯仑贝谢公司曾在四川油气田作过测井服务, 利用该公司的地层倾角测井仪观测的四臂井径测井曲线, 可分析油气井的井孔崩落状况。文献 [5] 已利用这种曲线分析过河南中原油田的主应力方向, 得出了有意义的结果。但他们尚未对这些曲线实现计算机处理, 直接给出井孔的统计性的崩落孔形图。本文将给出由计算机处理得出的崩落孔形

1987 年 6 月 17 日收到本文初稿, 1988 年 6 月 14 日决定采用。

图,以明确表示出推断应力方向的直接观测基础。

二、井径测量原理

图 1 给出利用地层倾角测井仪作四臂井径测量的简要原理。端部装着极板的四臂由液压控制紧贴井壁[图 1(a)], 极板 1—3 和 2—4 间的距离[图 1(b)]通过控制电阻的大



δ —井斜角; RB —1号极板相对方位角; A_z —井斜方位角;
 P_1A_z —1号极板方位角(图 1(a) 参考文献 [7])

图 1 地层倾角测井仪测量井径原理图

小被转换成电信号记录下来。仪器自下而上的拉升过程中, 因电缆的扭曲会发生旋转。当井壁出现非各向同性的崩落时, 某一对极板常会固定在崩塌槽的方向上。仪器在井下的方位可由一精密罗盘测出, 1号极板相对于地磁北极的方位角 P_1A_z [图 1(c)] 可由下式算得:

$$P_1A_z = A_z + \beta = A_z + \tan^{-1} \left(\frac{\tan(RB)}{\cos \delta} \right).$$

式中井斜角 δ 、井斜方位角 A_z 和 1号极板相对方位角 RB 均可从测井曲线上量得。当井斜不大,一般 $\delta < 10^\circ$ 时,用

$$P_1A_z \approx A_z + RB$$

代替上式计算 1号极板的方位角,误差不超过 1° 。

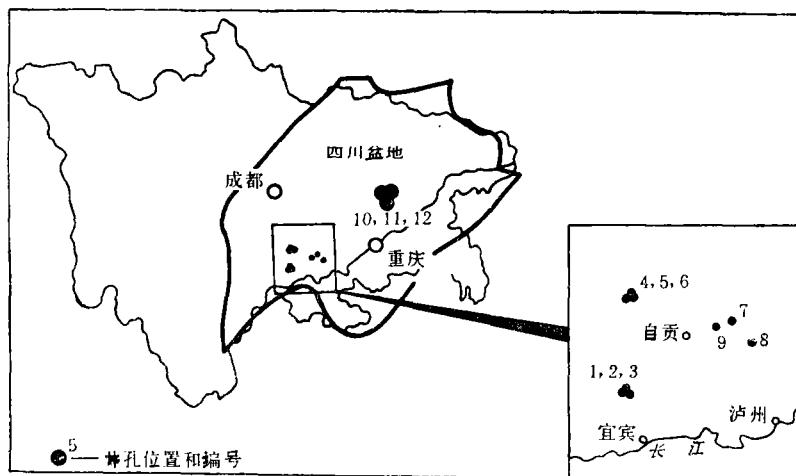


图 2 井孔位置图

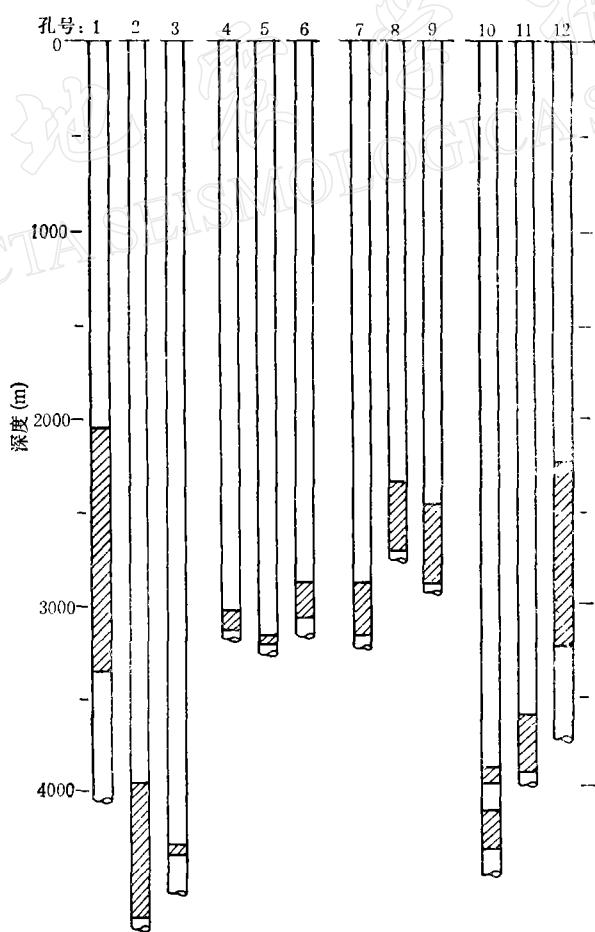


图 3 井径测量孔段深度图(带阴影部分表示本文分析的孔段)

三、资料及处理

本文共分析了 12 口井的双井径测量曲线（井孔位置见图 2）。其中有 9 口井分布在四川盆地西南部的不同油气田区，另有三口井位于川东一油气田。本文所分析的各井孔的井径测量段示于图 3，最浅的测井段在 2,000 米多一点的深度，最深的达 4,700 m。1 号孔的整个井径测量段长度达到 1,300 m。

每份测量曲线包含 c_1 （指示 1—3 臂长度）、 c_2 （2—4 臂长度）、 A_z （井斜方位角）、 RB （1 号极板相对于井斜方向的角度）及 δ （井斜角）等五条曲线。由于 12 口井的 δ 皆小于

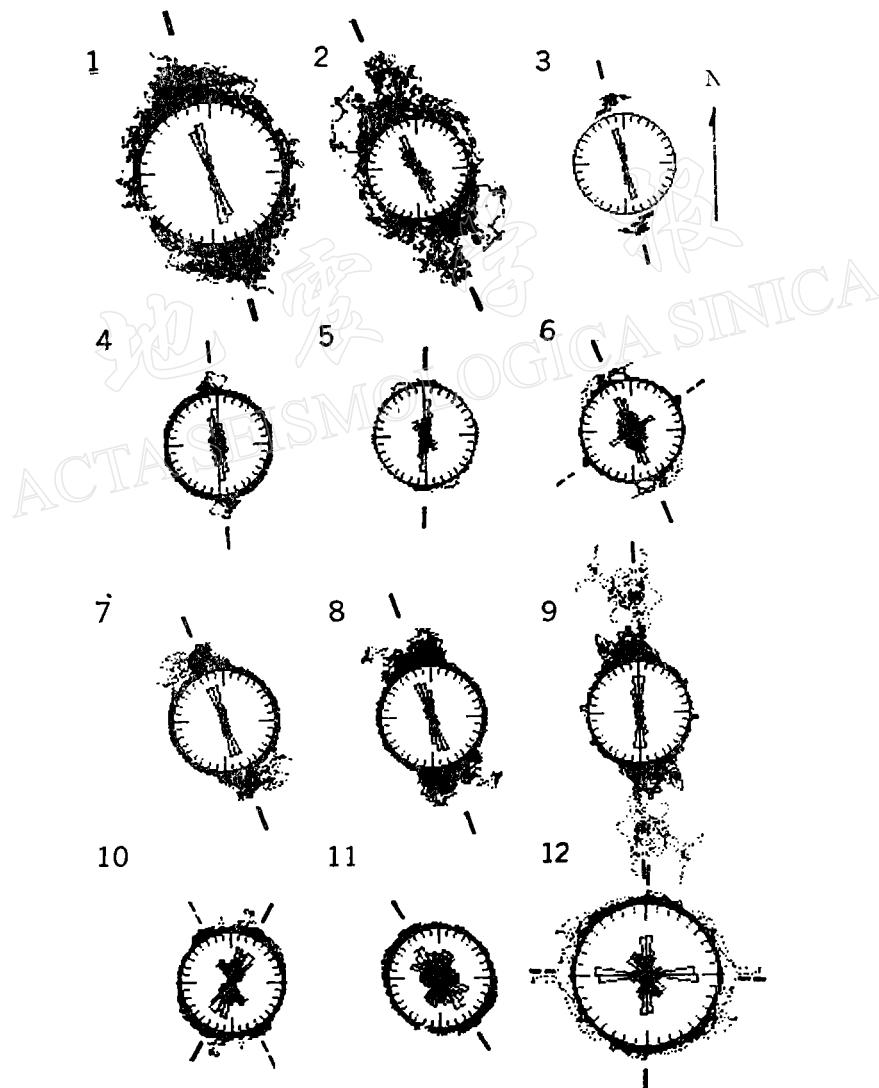


图 4 钻孔崩落平面投影图（小短线指示各孔的优势崩落方位，虚短线指示次优势崩落方位。其余说明见正文）

10°，我们遂置其于不顾，只对前四条曲线用数字化仪采样后，再作等距离插值，得出 c_1 和 c_2 随相应臂方位角变化的数据。曲线上有间断点处，采样和插值时需在程序控制中作些细节处理。本文涉及的 12 口井的测井时间是 1982 至 1983 年。根据最近的 1980 年代中国磁偏角图，该地区的磁偏角约为 -2° ^[8]。在考虑优势崩落方向时，我们计及了这一校正，以获得相对于地理北的方向。

准备好上述数据后，用计算机绘出了钻孔崩落平面投影图，见图 4。该图的绘法是：取钻头直径为圆圈的直径，大圆对应的钻头直径是 8.5 吋，小圆对应的是 6 吋；将整个测井段孔径测量结果绘在一个平面截面图上，使圆外点至圆周的长度为 $|c_1 - c_2|$ 。若 $c_1 > c_2$ ，将点标在 c_1 方位上，反之标在 c_2 方位上。中心部分的玫瑰瓣长度表示落入间隔为 10° 的各角度范围内采样点的百分数。统计时看 c_1 和 c_2 哪个臂长就将点计入哪个臂所在方位的间隔。

四、结 果 分 析

由图 4 可见，一般说来，井孔均在某个方向上崩落最厉害。显然，由于各个孔具体条件的差异，每个孔崩落最甚的方向不可能完全雷同。然而，总体的优势方位还是存在的，即大多数孔是在北稍偏西或近南北的方向上崩落最甚。按目前通常使用的解释方法^[4,6]，井孔崩落最甚的方向指示了当地最小水平主应力的方向。由此推断，井孔所在地区构造应力场的最小水平主应力即在北稍偏西或近南北的方向。

根据崩落的程度，参考玫瑰瓣的统计结果，由图 4 读得各井孔的优势崩落方位列于表 1。有些孔，如 6, 10 和 12 号，出现两个以上崩落较重的方位，表中将次一个优势方位列在括号里。事实上，当一个孔出现不只一个优势崩落方位时，不同的优势方位多对应于不同的孔段。例如，10 号孔的测井段分为上下两段（图 3），上段的优势崩落方位为 N25°W，而下段的则为 N28°E；又如 12 号孔测井段上部为近东西向崩落（参见图 5）。而下部分优势崩落在近南北方向，中间还夹着一段方位变化较大的段落。

表 1 各井孔优势崩落方位

孔号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
方位	N15°W	N25°W	N15°W	N5°W	N5°E	N20°W (N55°E)	N20°W	N20°W	N-S	N28°E (N25°W)	N30°W	N2°E (E-W)

由图 4 所表达的基本结果中还有几点值得注意之处：(1) 有些孔的某些孔段出现大崩落，如 9 号孔有一段，一个方向的井径相当于另一方向的三倍以上；(2) 根据一些孔壁频繁发生崩落形态（表现为图 4 中最黑的部分）看，孔壁崩落的形状构成两个对顶的尖角形，例如 1, 2, 4, 7, 8 和 9 号等孔皆有显示。这一形状与文献 [9] 报导的在围压下钻孔崩落实验的结果一致。我们还曾直接将测得的 c_1 和 c_2 值作平面投影图（而不是如图 4 那样用 $|c_1 - c_2|$ 作图），结果也显示出尖角形的典型崩落形态。

为查明崩落方向是否随深度变化，我们选择测井段最长的 1 号孔和 12 号孔，每 50 米作一崩落投影平面图，并选取其优势崩落方位，然后作出优势崩落方位随深度变化图（见

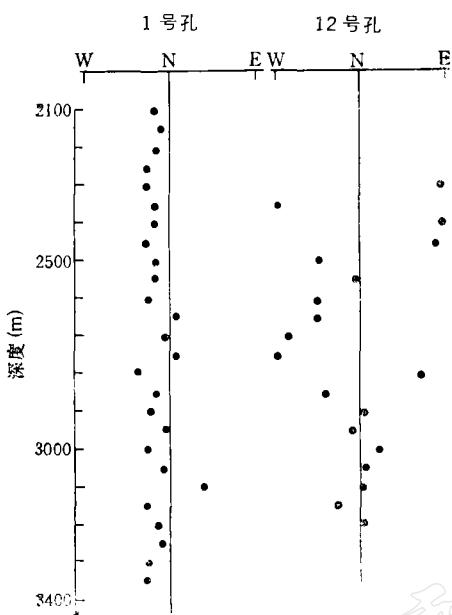


图 5 优势崩落方位随深度的变化

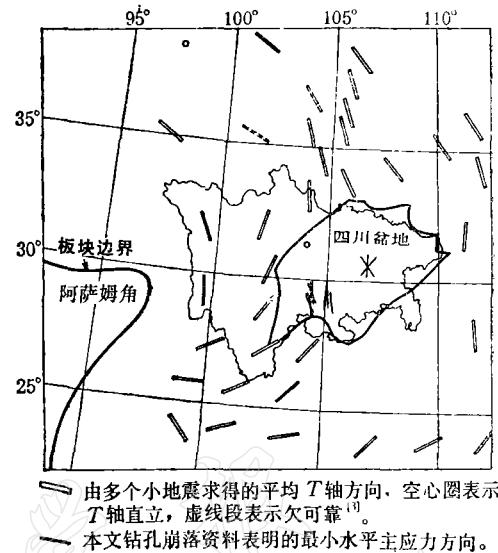


图 6 四川盆地及其周围最小水平主应力方向图

图 5). 由图显见, 1 号孔优势崩落方位比较稳定, 而 12 号孔的优势崩落方位随深度变化较大。

图 6 中, 在四川盆地内各井孔所在位置处标出了它们的优势崩落方位, 并将文献 [3] 所得到的周围若干分区的平均 T 轴也标了出来, 由该图可看出, 从钻孔崩落推断的最小水平主应力方向, 与由平均震源机制结果得出的周围地区构造应力方向的总体图象大体是协调一致的, 即四川盆地的中、南部水平最小主应力方向大致为近南北向。

五、讨 论

1. 一个地区若有一个以上的井孔的钻孔崩落结果时, 可将各井孔的崩落方向特征划分为两部分: 一为一般的共同趋势; 一为各个井孔或各个井段的具体崩落方向对共同趋势的偏离。本文假定前者是受区域应力场控制的, 而后者则反映了局部构造或岩层结构的影响。不分析出“共同趋势”, 也就无法分析对共同趋势的“偏离”。因本文重点是通过钻孔崩落探讨区域应力场特征, 故在结果解释方面只做了前者。但从图 4 可见, 各种局部的“偏离”是明显存在的, 受现有资料所限, 本文未作详细分析。

2. 位于川东地区的 10, 11 和 12 三口井与其它 9 口井相比, 有以下明显特征: 崩落程度轻, 优势方向不突出。差别最明显的是 1 号孔和 12 号孔。两孔测井段的深度相近, 测井段都较长(图 3), 但 1 号孔显示出较重的典型崩落形态, 而 12 号孔则崩落很不明显。根据钻孔完井报告, 二孔测井段岩性看不出明显差异, 都为夹有白云岩成分的灰岩。造成上述差异的可能原因有二: (1) 10, 11 和 12 三口井所在地区构造应力场的水平差应力不大; (2) 该地区岩层内的孔隙压力远比其它地区要高。根据斯伦贝谢公司测井记录记载,

该区测井时孔中液体的密度为 $1.16\text{--}1.36 \text{ g/cm}^3$, 并不比其它地区孔中液体的密度明显偏高, 说明孔内液体对孔壁的压强不一定比其它孔的高。因此, 原因(1)的可能性尚不能排除。对这一问题的最后结论还需积累更多证据才能获得。

3. 有些孔, 如 2 号和 9 号孔, 在某些孔段(多为几十米)发生大崩落。这些大崩落仍表现出明显的方向性, 并大致与总体优势崩落方向一致(图 4), 说明它们的崩落方向仍是受区域构造应力场控制的。至于它们的崩落程度为何如此之大, 可能与特定岩层的岩性有关。因为从完整岩石在高的差应力作用下发生的崩落区形态看^[9], 仍应维持尖角形, 并未出现崩落区延伸很远的例子。

作者衷心感谢谭廷栋总工程师对本项工作的指导和大力帮助, 感谢陈英豪、赵良孝和李香江同志对本工作的热情帮助。作者还感谢联邦德国 P. Blümling 博士, 与他的学术交流对本项工作起了促进作用。

本研究系地震科学联合基金会资助项目。

参 考 文 献

- [1] 阙荣举、张四昌、晏凤桐、俞林胜, 1977. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨. 地球物理学报, **20**, 96—108.
- [2] 成尔林, 1981. 四川及其邻区现代构造应力场和现代构造运动特征. 地震学报, **3**, 231—241.
- [3] 许忠淮、汪秦云、黄雨蕊、高阿甲、金小峰、常向东, 1987. 由多个小震推断的青甘和川滇地区地壳应力场的方向特征. 地球物理学报, **30**, 476—486.
- [4] Gough, D.I. and Bell, J. S., 1982. Stress orientation from borehole wall fractures with example from Colorado, east Texas and northern Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **19**, 7, 1358—1370.
- [5] 丁健民、梁国平、郭启良、高建理、曹守月、贾振先、景朝晖、杨继林, 1987. 根据钻孔崩落椭圆确定地壳应力方向. 地震学报, **9**, 143—153.
- [6] Plumb, R. A. and Cox, J. W., 1987. Stress directions in eastern north America determined to 4.5 km from borehole elongation. *J. Geophys. Res.*, **92**, B6, 4805—4816.
- [7] 谭廷栋, 1986. 地层倾角测井在隐蔽油气藏勘探中的应用. 石油物探, **25**, 3, 87—98.
- [8] 夏国辉、郑双良、吴莉兰、张凤玉、魏 宏, 1988. 1980 年代中国地磁正常场图及其数学模式. 地球物理学报, **31**, 82—89.
- [9] Haimson, B. C. and Herrick, C. G., In situ stress evaluation from borehole breakouts experimental studies, in *Proceedings of the 26th US Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, South Dakota, 26—28, June 1985*, 1207—1218.

HORIZONTAL PRINCIPAL STRESS AXES IN SICHUAN BASIN DEDUCED FROM OIL-WELL BREAKOUTS

GAO AJIA, XU ZHONGHUAI and CHEN JIAGENG

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

Abstract

Schlumberger company conducted well logging service in China's Sichuan oil field. Four-arm caliper logging records at 12 wells are available to us for the purpose of crustal stress study. The logging depths are generally from 2,000 down to 4,500 meters beneath the ground surface, with different logging intervals. The longest interval is more than 1,300 meters.

The logging records are digitized, and plotted to get plane projections of the measured well-diameter for the whole logged intervals. Most projections show prominent elongation of the well bores in the NNW-SSE or nearly N-S direction. Following the common explanation that in the direction of elongation lies the minimum horizontal principal stress axis, we get the feature of the stress axis orientations in the Sichuan basin which generally agrees with the pattern of regional tectonic stress in Sichuan and the surrounding regions obtained from composite focal mechanism analysis.