

塔里木油田录井技术

TALIMU YOUTIAN LUJING JISHU

王清华 主编



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

塔里木油田录井技术

王清华 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对塔里木油田的综合录井简史、塔里木油田目前录井状况及综合录井技术取得的成果进行了介绍,阐述了塔里木油田应用综合录井仪及录井新技术,以及在钻井工程服务和油气层定量解释评价方面所取得的成果及实例分析。

本书适用于油田录井科研人员和从事现场综合录井技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

塔里木油田录井技术/王清华主编.

北京:石油工业出版社,2006.7

ISBN 7-5021-5616-X

I. 塔…

II. 王…

III. 录井

IV. TE242.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第079046号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址: www.petropub.cn

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京华正印刷有限公司

2006年7月第1版 2006年7月第1次印刷

787×1092毫米 开本: 1/16 印张: 10

字数: 254千字 印数: 1—1000册

定价: 30.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《塔里木油田录井技术》

编 委 会

主 编：王清华

副主编：李进兴 郭清滨

编 委：田 军 赵元良 黄新林 王国瓦 雷 军 侯向辉
吕 君 彭一斌 张士荣 周长民 刘长新 王晓芸
陈 慧 王朝晖 丁建军 苟柱明 赵伟东 郝祥保
罗秀羽 李文华 陈 军 王庆东 彭安华 杨启华
崔美花 龙维华

前 言

综合录井技术是与现代钻井技术同步配套发展起来的新型钻井录井技术，是在地质录井基础上发展起来的一项集随钻地质观察分析、气体检测、钻井液参数测量、地层压力预测和钻井工程参数测量等为一体的综合性的现场录井技术。20 世纪 80 年代以来，我国各大油田从欧美发达国家引进了数十套综合录井仪，与此同时国内也相继研制开发了一批综合录井仪。它们广泛应用于油气钻井勘探，取得了显著的经济效益，对取全取准各项地质和工程信息，保证钻井安全，降低钻井成本，提高钻井效率，获得更好的钻井成功率，具有十分重要的作用。

一、塔里木油田综合录井简史

塔里木会战伊始，就非常重视对综合录井技术的应用，综合录井在塔里木油田的应用可分如下几个阶段。

(1) 在 20 世纪 80 年代末和 90 年代初，首次在中国陆上油田采用甲、乙方管理体制，从各大油田、石油院校、原中国海洋石油总公司抽调在当时较为先进的 Vigilance 等综合录井仪来塔里木盆地进行会战。各兄弟单位大力协作，选派了有丰富现场生产经验、技术水平高的地质和钻井等方面的专家和人才组成现场监督队伍，使塔里木油田的录井设备和录井技术水平从开始起步就处于当时国内较先进的水平。

(2) 在 20 世纪 90 年代，随着国内外录井技术的发展和勘探任务的加重，勘探领域扩大至地质条件极其复杂的山前地区，Vigilance 等落后的录井仪器已远远不能满足现场录井的需要。为了满足勘探的需要，通过和技术力量很强的中国石油大学等石油院校共同进行录井技术攻关，同时积极引进国外处于领先的综合录井仪来探区进行服务，从而刺激国内录井技术的发展。在此基础上，充分利用国内成功的且处于领先地位的录井技术，率先完成了对 Vigilance 等老设备的改型工作。

(3) 进入 21 世纪，塔里木油田采取工作量倾斜、调高录井日费等多种措施鼓励各录井公司引进具有国际先进水平的录井新设备、新技术，SDL9000、DLS、DRILLBYTE、ADVANTAGE、ALS-NET、ALS2.2 等国际先进录井设备陆续投入塔里木市场。同时，三维定量荧光录井、核磁共振录井、地化录井及快速定量气测录井等录井配套技术、录井新技术在塔里木油田得到广泛推广和应用，取得了良好的应用效果。塔里木油田成为国内采用录井新技术、新设备种类最多、所占比重最大的油田之一。

二、塔里木油田目前录井状况

截至 2005 年底，在塔里木探区服务的录井公司共有 15 家，总共有 65 台综合录井仪，其中进口综合录井仪 48 台，国产综合录井仪 17 台（表 1），在塔里木探区服务的气测仪或录井老仪器已全部改型或淘汰，新引进的或改型的先进仪器占整个探区的 73.8%。

录井新仪器、录井新技术的广泛应用，极大地提高了塔里木油田的录井技术水平，主要体现在以下几方面：

(1) 改进了气测录井的数据采集处理手段，使随钻气测和及时评价油气显示得以实现。

①快速色谱技术在塔里木油田广泛推广应用，有近 50% 的综合录井仪采用分析周期小

于 1min 的快速色谱分析技术。

表 1 塔里木油田录井仪器统计

序号	录井公司	设备类型及数量											累计
		DLS	Advantage	GE06000	ALS-NT	ALS2.2	SDL9000	CMS	Drillbyte	SK2000	SLZ-2A	CPS2000	
1	中法			3		1	1						5
2	新疆	3											3
3	大港			3			2				1		6
4	辽河		1	4								2	7
5	华北	2					1				2		5
6	中源						3				2		5
7	大庆		2							1			3
8	神开							2	1	1			4
9	中油			1			1		1	1			4
10	吐哈			1	1		1			2			5
11	广陆	2											2
12	中海北方						2	1					3
13	四川						3	3		3			9
14	上海中油						2						2
15	西安新生代					2							2
	合计	7	3	12	1	3	16	6	2	8	5	2	65

②快速定量气体分析技术取得较好的应用效果。

③差分色谱分析技术取得较好的应用效果。

(2) 大量采用录井配套新技术，油气层的解释评价水平由定性、半定量化提高到定量化的水平。

(3) 工程异常预报技术水平大大提高，钻具震动分析等技术提高了井下钻具事故的预报率、及时率和准确率，有效避免了因井下钻具原因导致的钻井事故的发生。

(4) 建立了远程数据传输系统，实现了直接使用现场录井数据。

(5) 在计算机及其软件方面，使录井资料处理解释计算机系统由过去的机型专一、功能单一、速度偏低发展成为系统化、平台化、标准化数据库管理系统及软件开发平台。

(6) 使用了国内比较成功的汉字软件系统，统一上交光盘数据格式，建立了录井资料数据库，实现了与油田数字办公平台的互连互通，实现了完全的数据共享。

三、综合录井技术取得的成果

十几年来，综合录井在塔里木油田的应用取得了以下几方面的丰硕成果：

(1) 截至目前共完成 300 多口井的录井任务，其中近 200 口井发现油气显示，在塔里木盆地发现了 26 个油气田，这些油气田的发现，都是由综合录井仪首先监测到气测显示，然后提出测试建议而发现的。

(2) 在钻井工程方面，综合录井仪的使用为安全钻井、优化钻井、提高钻井效率，做出了很大的贡献。据 2005 年统计，在探井钻井过程中，通过综合录井仪提出各类工程异常预报 602 次，避免各种工程事故 20 余次。

①对起下钻作业的监测，以便监测井深、大钩负荷、钻井液体积的变化，实现对钻具遇阻、遇卡和井漏、井涌的实时监测。

②对循环和静止的监测，对钻井液体积为主的井涌、井漏进行监控。

③对钻井事故处理过程中的监测，指导事故处理作业。

④对钻进和划眼作业的监测，利用密度、扭矩、立压、大钩负荷、钻压、大钩高度、钻井液体积、出口流量、气体全量、转盘转速、硫化氢含量及钻时等参数和相关参数的处理，对钻头使用寿命终结、刺钻具、断钻具、井涌、井漏、溜钻、堵水眼、钻井设备故障、硫化氢毒气等钻井事故苗头进行早期控制，避免了多次钻井事故的发生和发展。

⑤对地层压力进行监测，选择恰当的钻井液密度，达到平衡钻井的目的。

⑥对钻头水马力计算，选择合适的水眼尺寸，达到优化钻井的效果。

(3) 实现了油气层定量解释评价。

传统的综合录井技术主要在于发现油气显示，对油气层的解释评价结论往往是定性的。近年来，三维定量荧光录井、核磁共振录井、地化录井和快速定量气测录井等新技术的逐步推广应用，使塔里木油田录井的油气层解释评价水平已由定性、半定量水平逐步提高到定量解释评价的新高度。

本书是塔里木油田勘探事业部主管录井生产的各级领导、相关部门的录井管理人员、各外协单位的录井科研人员和长期从事现场综合录井的录井技术人员共同劳动的结晶，主要阐述在塔里木油田应用综合录井仪及录井新技术 16 年来，为钻井工程服务和油气层定量解释评价所取得的成果及实例分析，共分四章。

第一章，安全钻井。主要介绍通过综合录井仪进行地层压力的检测、起下钻监测以及预报钻井工程事故，提高钻井安全性，确保井队安全作业所取得的成效。

第二章，优化钻井。主要介绍根据综合录井仪所录取的录井资料，选择合理的钻井液、套管下入深度、钻头类型、水马力报告、优选钻井参数，确定最优化钻进措施，从而达到降低钻井成本、提高钻井效率和特殊岩性利用钻井参数卡层等应用经验和实例分析。

第三章，录井配套技术的解释评价与应用。主要介绍三维定量荧光录井、核磁共振录井、地化录井和快速定量脱气等录井新技术在油气层发现中的作用及其对油气层的解释评价及应用。

第四章，油气层的定量解释及评价。主要介绍充分利用三维定量荧光录井、核磁共振录井、地化录井和快速定量脱气等新技术在油气层解释及评价中的优点和不足，扬长避短，对油气层进行定量解释和评价。

总之，无论在发现和评价油气层，还是地层压力监测和钻井施工监测，乃至在优选参数方面，综合录井仪都充分发挥了积极的作用，是实现安全、快速、优化钻井的保障。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请领导和专家批评指正。

编 者
2006 年 4 月

目 录

第一章 安全钻井.....	(1)
第一节 地层压力监测.....	(1)
第二节 起下钻监测	(10)
第三节 工程异常预报和事故隐患预测	(11)
第二章 优化钻井	(23)
第一节 选择合理的钻井液密度	(24)
第二节 优化参数钻井	(29)
第三节 利用钻时、 d_c 指数等钻井参数地质卡层	(34)
第三章 录井配套技术的解释评价与应用	(41)
第一节 三维定量荧光录井技术	(41)
第二节 核磁共振录井技术	(87)
第三节 地化录井技术.....	(105)
第四节 快速定量气测技术.....	(120)
第四章 油气层的定量解释及评价.....	(134)
参考文献.....	(152)

第一章 安全钻井

塔里木探区的前陆盆地是寻找大型构造油气藏的有利勘探领域，但这一领域的勘探进程却非常缓慢，其原因除了地质条件复杂、地震技术攻关难度大外，钻井周期太长，钻井成本太高是最重要的原因之一。例如，从 2002 年库车前陆盆地 7 口超深探井来看，平均井深 5972.35m，平均钻井周期高达 436.77 天，钻井成本非常高。钻井周期长影响地质评价认识周期，而钻井成本高更是影响勘探效益和投资决策。

钻井难度大、周期长、成本高的特点，决定着井下安全是钻井技术人员最重要的考虑因素，因为一旦发生井下复杂或事故，处理难度很大，事故处理周期长，成本浪费极大，有时甚至导致钻井报废。俗话说“不怕慢，就怕站”，钻井速度对加快勘探进度，降低勘探成本固然非常重要，避免井下复杂或者井下事故，相当于节约可观的钻井周期和节约几百万元，甚至上千万元的钻井费用。

综合录井技术在随钻压力监测、实时钻井参数监测和起下钻过程监测等几个方面为钻井工程提供地层压力预测、工程异常预报和事故隐患预测等服务，在确保钻井安全方面发挥着越来越重要的作用。

第一节 地层压力监测

钻井施工的安全、油气层的保护均与地层压力有关。要实现安全钻井和油气层保护，关键在于合理的钻井液性能参数，其中最主要的参数是钻井液密度。钻井过程中钻井液密度的选择是由所钻遇的地层岩性及地层压力所决定的，也就是说，要实现安全钻井、油层不被污染和压死，就必须要实现钻井过程中的井筒液柱压力与地层孔隙压力的动态平衡。要实现这个目的，关键在于在施工过程中进行实时的地层压力监测，根据地层压力变化情况，及时调整钻井液性能。综合录井在勘探中的一个重要作用就是对随钻地层压力的监测。

随钻地层压力监测是根据地下高压油气层之上的盖层的特点，在钻进高压油气上部的压力过渡带时，即在打开油气层之前，通过对有关录井参数进行处理，及早分析预测其下的高压油气层的存在，并估算地层压力的大小，从而指导钻井工程人员及早采取相应措施，防止井涌、井喷事故的发生。而综合录井检测和及时预告的有效方法就是 d 指数法和 Sigma 指数法。

在地层压力的检测中，应尽可能多的采用实时的参数，绘制压力趋势线，通过综合分析，及时预测异常地层压力的存在，并求出压力数值。

在掌握了比较正确的地层压力资料和数据后，就可以正确地选用钻井液密度和适当的套管程序，使每口井或同一口井的逐个井段均能实现平衡钻井或欠平衡钻井，即所谓“压而不死，活而不喷”的钻进。这样既能防止油层污染，不致于破坏产层，保证第一次钻开产层的质量，又能大大提高钻井速度，而且还能控制气侵，防止井喷，压制失控井喷。同时，亦可避免井漏、卡钻等事故。

塔里木油田录井规范要求，探井在录井全程都要进行随钻压力录井，采用连续监测进、

出口钻井液密度、温度和电导率变化,起下钻井眼状况,地层岩性变化,气测异常,地层可钻性(即钻时、 d_c 指数、Sigma指数)等综合资料来预测地层异常压力。实时计算 d_c 指数及由此所计算的地层压力梯度和地层破裂压力梯度。数据经过计算机处理后,计算校正 d_{cs} 指数及压力参数,分析和预测是否存在高压异常带或欠压实地层,提出调整钻井液参数、水马力参数等优化钻井的建议,完钻后提交“综合录井完井压力报告”。

一、 d_c 指数法

正常压实地层在上覆岩层的作用下,随埋藏深度的增加,压实程度相应增加,岩石密度相对增大,孔隙度减小,钻进时机械钻速降低,钻时增大;当钻遇处于压力过渡带的泥岩地层时,由于泥岩欠压实存在,钻进时机械钻速相对正常压实泥岩增大,钻时降低。为了能够较为准确地反映出钻时与异常高压层之间的关系,就必须消除其它因素对钻时的影响。 d_c 指数就是在消除钻压、钻头直径、转盘转速、钻井液密度等影响因素的情况下,反映地层可钻性的一个综合指标。它实现了把所有钻遇地层的可钻性放在同等钻井条件下进行比较,研究发掘异常段,发现异常高压过渡带,最终做出预测。

在正常压实情况下, d_c 指数是随井深的增加而增大。当钻遇异常高压地层过渡带时, d_c 指数向着减小的方向偏离正常压实趋势线。据此可预测过渡带的顶部位置和预报异常高压。

(一) d_c 指数的计算

(1) 宾汉(M. C. Bingham)在1965年首先提出了 d 指数的概念。

$$v = KN^e(W/D)^d$$

式中 v ——机械钻速, ft/h;

K ——岩石可钻性系数或骨架强度系数;

N ——转速, 转/分;

e ——转速指数;

W ——钻压, 磅;

D ——钻头直径, in;

d ——钻压指数或地层“可钻性”指数, 无因次。

(2) 1965年, Jorden和Shirley在宾汉公式的基础上提出了以下经验公式, 发现了 d 指数和压差之间的相关性。

$$d = \lg(v/60N)/\lg(12W/10^6D)$$

N 、 W 、 D 保持一致或稳定, 正常情况下, d 指数随井深增加而增加; 钻遇高压地层, 由于 v 增大, d 指数下降, 偏离正常趋势线, 从而可以检测异常地层压力。

(3) Rehm和Mc Clendon在1971年为消除钻井液密度的影响, 引入了一个修正值, 即,

$$d_c = d \times (G_H/ECD)$$

式中 d_c ——经过钻井液密度校正的 d 指数, 无因次;

G_H ——静水压力梯度, g/cm³;

ECD ——钻井液循环当量密度, p/gal。

Galle和Woods推导出一个考虑到钻头磨损而校正机械钻速的关系式, 即,

$$v = K \cdot (N/B) \cdot (W/D)^d$$

式中 B ——钻头磨损校正因子, 无因次。(它是钻头进尺和最终磨损程度的函数, 可以写

成 $B = \alpha^p$, α 、 p 的计算略。)

(4) 法国地质服务公司把以上公式综合成为计算“ d_{cs} ”的公式, 这就是对 d 指数的第二次修正。

$$d_{cs} = \lg(B \cdot v/60N)/\lg(12W/10^6 D) \cdot G_H/ECD$$

(二) 正常趋势线 d_{cn} 的建立

正常趋势线是正常地层压力的粘土岩层中 d_c 指数与深度的关系曲线, 是解释异常压力的基础。它的精度和地层压力的计算精度密切相关, 曲线方程为:

$$\lg(d_{cn}) = a \cdot H + b$$

式中 a ——斜率;

b ——趋势线的截距;

H ——垂直井深, m。

1. a 和 b 的确定

对于从井口开始录井的探井, 上部软的、未压实的沉积层可不设置趋势线; 在正常压实段, 选择具备一定厚度的纯泥(页)岩 d_{cs} 值点来确定正常趋势线, 要求正常趋势线要通过大多数可信度较高的粘土岩层的 d_{cs} 值点, 并在后续录井过程中对其进行校验, 确保趋势线的准确合理, 能正确解释出异常地层压力。正常趋势线一经确定, 一般情况下斜率应保持不变。

2. 右限、左限、砂岩线

在实时钻进过程中, 录井技术人员人为设定的, 与趋势线相平行的界限。

右限、左限、砂岩线的值都是相对于趋势线而言的, 也就是距趋势线的距离。右限值一般取 0.16, 左限取 0.05, 砂岩线取 0.5。如正常趋势线某点值为 1.25, 左限为 0.05, 那么左限的绝对值是 1.20。

3. 不能采用的数据

浅层软的、未压实的沉积层, 钻头后期磨损严重和新钻头磨合的进尺, 磨鞋进尺, 取心井段, 水力参数突变的局部井段, 不整合破碎带的数据, 个别粘土岩层的 d_c 指数突变漂移点。

4. 移动正常趋势线的原则

正常趋势线一经确定, 一般情况下斜率应保持不变。在正常录井过程中因钻头尺寸、类型的改变、地层存在大的不整合现象等, 必要时可对正常趋势线进行平移。

(三) 用 d_c 指数计算地层压力梯度和破裂压力

1. 计算地层压力梯度

当 d_c 指数曲线逐渐向左偏离正常趋势线, 且超过左限时, 说明地层压力升高, 其大小与 d_c 指数偏离 d_{cn} 的程度密切相关。计算方法、公式较多, 在此选用伊顿指数法加以说明。

$$G_f = G_0 - (G_0 - G_H) \cdot (d_{cs}/d_{cn})^{1.2}$$

式中 G_f ——地层压力梯度, g/cm³;

G_0 ——上覆岩层压力梯度, g/cm³;

G_H ——静水压力梯度, g/cm³;

d_{cs} ——计算深度处异常趋势线上的 d_{cs} 值;

d_{cn} ——计算深度处正常趋势线上的 d_c 三读值。

2. 计算孔隙度

由 d_c 指数可以计算地层孔隙度的近似值 ϕ ，公式为：

d_c 指数曲线在砂岩线左边：

$$\phi = (G_0 - 0.98 G_f - 0.02 G_H) / (G_0 - G_H) - 0.98 (d_{cs} / d_{cn})^{1.2}$$

d_c 指数曲线在砂岩线右边：

$$\phi = 1 - \rho_b / \rho_{ma}$$

式中 d_{cn} ——正常趋势线上的 d_{cs} 读值；

ρ_b ——粘土岩体积密度， g/cm^3 ；

ρ_{ma} ——岩石骨架密度， g/cm^3 。

3. 地层破裂压力梯度（计算法）

$$G_{ff} = G_f + (G_0 - G_f) \cdot \mu / (1 - \mu)$$

式中 G_{ff} ——地层破裂压力梯度， g/cm^3 ；

μ ——岩层泊松比。它是岩性、深度、围压的函数，可查表获得。

例如，YM××井从 1401.00m 至 2337.00m， d_{cn} 趋势基本是和正常压力一致，个别井段虽然地层压力梯度达到 1.87，但地层破裂压力是在正常增加， d_{cn} 还是基本正常；但是，从 2337.00m 至 3001.00m 为高压过渡带，地层压力梯度 1.13～1.96；从 3002.00m 至 3325.00m 进入高压层，地层压力梯度 1.40～1.87， d_{cn} 与 d_c 指数明显的不相符，判断为高压地层；3326.00 以后进入高压地层，而且钻遇高压盐水层，地层压力梯度 1.66～1.80。录井队及时建议，将钻井液密度由 1.2 调高至 1.65。

在该井的钻井过程中，虽补充、配备、倒换钻井液频繁，其温度变化总趋势仍然正常，电导率稳定，连续性比较好，无明显异常变化。在钻进、扩划眼钻进及起下钻过程中有多次遇阻、卡现象，其原因部分是由于地层异常造成，盐层段是由于异常高压造成的。地层岩性主要为泥岩、泥质粉砂岩、细砂岩、中砂岩、白云岩、石膏、膏泥岩、泥膏岩、盐岩。在膏盐层段的泥岩大部分欠压实的异常高压地层，表现为可钻性好、易缩径、易垮。

二、Sigma 指数法

Sigma 指数法用于地层压力检测，由意大利 AGIP 公司提出，应用于不能应用 d_c 指数的碳酸盐岩等非碎屑岩地层。

Sigma 指数法是根据对钻井参数的处理，计算地层压力梯度来检测异常高压的一种方法。计算的 Sigma 值实际上是一种岩石骨架强度参数。地层在正常压实情况下，岩石强度随深度增加而增大。若钻遇异常压力地层，岩石强度随孔隙压力增大而减小。

Sigma 录井与 d_c 指数方法不同点在于，只有综合录井可测得的钻井参数才用于 Sigma 录井，而诸如钻头磨损之类的系数被忽略不计。

1. Sigma 指数计算公式

$$S_i 0.5 = W 0.5 \times N 0.25 / D \times v 0.25 + 0.028(7 - 0.001 H)$$

式中 W ——钻压, t;
 N ——转速, 转/分;
 D ——井径, ft;
 v ——机械钻速, m/h;
 H ——垂直井深, m。

考虑到压差的影响, 把上式修正为:

$$S_{0.5} = F \times S_i 0.5$$

式中 $F = 1 + [1 - (1 + n2\Delta p2)] / (n \times \Delta p)$;
 $S_{0.5}$ ——Sigma 录井 (绘图) 值, 岩石骨架强度参数;
 Δp ——钻井液柱和地层之间的压差, $\Delta p = 0.1 (\rho_m - G_f) \times H$;
 ρ_m ——钻井液密度, g/cm³;
 G_f ——地层孔隙压力梯度, 当计算 Sigma 录井 (绘图) 值为 $S_{0.5}$ 时, 假定原始 $G_f = 1.03 \text{ g/cm}^3$;
 n ——平衡钻井液和钻入深度的地层之间压差所需时间的函数。
 如果 $S_i 0.5 < 1$, 则 $n = 3.25 / (640 S_i 0.5)$;
 如果 $S_i 0.5 > 1$, 则 $n = (4 - 0.75 / S_i 0.5) / 640$ 。

2. 正常趋势线 $S_i 0.5$ 的建立

在正常压实环境下, 穿过这些点构成的直线叫做岩石强度参照趋势线。确定正常趋势线的公式是:

$$S_i 0.5 = aH/1000 + b$$

式中 a ——直线的斜率, 大致上可认为是一个常数, 等于 0.088;
 b ——直线的截距, 即地面上 ($H=0$) 的 $S_i 0.5$ 值;
 H ——深度, m。

3. 解释

作为总的趋势, $S_i 0.5$ 值总是随着钻穿的粘土岩深度增加而增大, 表明存在着正常压力和压实的地层。当 Sigma 录井曲线随着深度增加, 偏向右边, 是粘土岩或泥灰岩等组成的不渗透地层; 反之, 偏向左边, 远离正常趋势线, 则可能是多孔的或者裂缝性地层, 存在一个超压带。

不可预测的钻井情况的各项指标, 如水力学参数、井底净化程度、钻头磨损等未考虑其中, 故最终解释应予以全面考虑。

4. 计算地层压力梯度和破裂压力

(1) 计算地层压力梯度。当 Sigma 录井曲线在正常趋势线右边时, 地层压力梯度等于静水压力梯度: $G_f = G_H$

当曲线在正常趋势线左边, 并随着深度增加, $S_{0.5}$ 值连续减小时, 意味着超压层的存在。只要确定了截距 b 的大小, 对于任何井深的孔隙压力梯度就可采用压差法按下式进行计算:

$$G_t = \rho_m - 20(1 - Y)/[n \cdot Y \cdot (2 - Y) \cdot H]$$

式中 $Y = S_r 0.5 / S_i 0.5$ 。

(2) 计算孔隙度。

$$\phi = 1/[1.4 + 9(A + K - b)]$$

式中 ϕ ——碎屑岩地层总孔隙度的近似值, %;

b ——随深度而定, 是后来的趋势线在地面上的截距值;

K ——第一条参照正常趋势线在地面上的截距值;

A ——有两种可能情况: 当 $S_0 0.5 \geq S_r 0.5$, $A = S_r 0.5$; $S_0 0.5 \leq S_r 0.5$, $A = S_0 0.5$ 。

(3) 地层破裂压力梯度。利用 Sigma 值计算地层破裂压力梯度的公式和用 d_e 指数计算相同。

(三) 泥 (页) 岩密度法

正常情况下, 由于上覆岩层压力的增大, 泥 (页) 岩密度随井深增加。钻井过程中, 在异常高压过渡带地层, 因欠压实的缘故, 岩层孔隙度增大, 泥 (页) 岩岩屑密度将急剧变小而偏离正常压实的密度趋势线。

利用泥 (页) 岩密度变化曲线预测异常高压, 方法简便, 精度高, 但对于深井而言时效较差。

1. 测量方法

测量泥 (页) 岩密度的方法有泥岩密度计、钻井液密度称法、烧杯法、流体密度法、变密度液柱法、水银泵测量法等多种方法, 但塔里木油田常用的仅有泥岩密度计 (浮力法)。

2. 泥岩密度计

这种仪器是根据阿基米德定律设计的仪器, 可到所在井录井队对仪器作进一步了解。

首先是在空气中称重 (L_1), 然后再在水中称重 (L_2), 二者之差等于被测物体体积的数值。据此, 泥 (页) 岩密度 ρ_b 由下式表示:

$$\rho_b = L_1 / (L_1 - L_2)$$

3. 测量要求

①岩屑须真实, 具有代表性;

②湿样要用滤纸吸去表面水分后进行测定;

③一个深度样至少做三次, 求平均值。

4. 绘制泥 (页) 岩密度 - 井深关系曲线

①整理测量结果, 去除极端数据点, 计算每个深度点泥 (页) 岩密度平均密度值;

②采用线性坐标作图;

③建立正常趋势线。

5. 由测量的泥 (页) 岩密度计算地层压力

在异常高地层压力过渡带及异常高压地层中, 泥 (页) 岩密度低于正常值, 地层压力是偏离正常趋势线的函数。

(1) 正常趋势线方程的一般形式。

$$\rho_n = a \lg H + b$$

式中 ρ_n ——正常泥（页）岩密度，g/cm³；

a 、 b ——回归系数；

H ——深度，m。

(2) 计算地层压力梯度。

如果 $\rho_b > \rho_n$ ，则，

$$G_f = G_H。$$

式中 ρ_b ——测量的泥（页）岩密度，g/cm³；

G_f ——地层压力梯度，g/cm³；

G_H ——静水压力梯度，g/cm³。

如果 $\rho_b < \rho_n$ ，则，

$$G_f = G_0 - (G_0 - G_H)[1 - (\rho_n - \rho_b)/a]$$

式中 G_0 ——上覆岩层压力梯度，g/cm³。

泥（页）岩密度法在理论上是一种很好的方法，利用泥（页）岩密度变化曲线预测异常高压，方法简便，精度高，但影响岩屑密度的因素很多，且对于塔里木油田大量的深井钻探而言时效较差，因此在现场应用的实际意义受到影响。

(四) 地温梯度及出口钻井液温度

1. 地温梯度的概念

地温梯度指地下埋藏深度每增加 100m 时，地层温度增高的度数。

$$G_T = 100(T - t)/(H - h)$$

式中 G_T ——地温梯度，℃/100m；

T ——测温点温度，℃；

t ——恒温带或当地年平均温度，℃；

H ——测温点的深度，m；

h ——恒温带的深度，m。

地层温度随地层埋藏深度的增大而不断增高，呈有规律的线性关系。由于地球热力场的非均质性，地温梯度在各地不一，全球平均地温梯度 3℃/100m。

2. 影响地温梯度的因素

不同地区，或者同一地区的不同部位，其地层温度分布的差异主要受这些地区或这些部位的地质条件或地质因素的制约，主要有以下几方面的因素。

(1) 基底起伏。在基底隆起的地方，由于地壳厚度减薄，热源丰富，地幔烘烤作用增强，因而地层温度增高，地温梯度高；反之，在基底凹陷处，地层温度与地温梯度变低。在一定范围内，基底起伏和特定深度的地温高低有同步或一致的关系，也就是说，特定深度的地温能反映基底的起伏。

(2) 岩石的热导率。指岩石所具有的传导热的能力的大小。岩石的热导率大，说明地幔的热量传导到地壳岩层中的能力强；如岩石的热导率小，则情况相反。

火成岩和碎屑岩的热导率比碳酸盐岩高，碳酸盐岩地区的地温梯度就比碎屑岩地区的小。

(3) 构造条件。因热流传导的各向异性，地层具有非均质的热导率，顺层面热流比垂直层面更易于传播。当地层倾斜时，沿层面和垂直层面二者之合热流将偏向地层上倾方向，造成背斜使热流聚敛，向斜使热流分散。背斜构造顶部所通过的热流比向斜与背斜两翼所通过的热流多，在离地面同一深度的地方，构造顶部的温度比翼部高。

(4) 油气分布。有机物质在生油门限温度下生成油或气，而有机质裂解为烃类的过程是一个放热的过程，油气藏内压力的增加，更加促进热异常的形成。因此，地层温度与油气的生成是相辅相成的，表现为有油气分布的地层，地温梯度高。

(5) 异常高地层压力分布。地层压力异常时呈现高的异常地温梯度。

(6) 地下水循环。水是良好的载热体，区域性的不太活跃的地下水缓慢的循环活动能将深部向斜的热量携带到埋藏较浅的背斜部分，从而使背斜部分的温度增高，地温梯度变大。

除上述因素，火成岩的侵入、地壳内放射性元素的蜕变等均能放出一定热量而使地层温度升高，但这些因素影响所涉及的范围较小。

综上所述，影响地温梯度的因素很多，应该根据本区或本油田的地质条件进行具体分析。

3. 异常高压引起地温梯度异常

油、气、水三种流体的热导率以气体最小，其次是油，然后是水，它们比大多数岩石骨架的热导率低。当地层孔隙度高时，含水（或油、气）量就高，而水的热导率只有大多数岩石骨架的 $1/3 \sim 1/6$ ，阻止了热流传播，同时，作为很好的载热体，又不断吸收热量。

在异常高压过渡带的粘土岩层中，地层欠压实，含水（或油、气）量增多，热导率降低，表现为异常高压过渡带顶部地温梯度急剧增大。

在高热导率的砂岩和某些石灰岩地层中，则出现与上述相反的情形。

4. 地温梯度资料的获得

(1) 关井实测地层温度。要获得真实的地温资料，必须在未受后来采油和注水影响的地温保持原始状态的打开油层的探井测量。在测井温前，将井关闭一段时间，使井筒内某一测量深度流体温度与围岩的原始温度达到平衡一致后，才能下入温度测量设备到指定深度，直接获取地温数据。

显然，在塔里木油田钻井普遍较深、井下情况又复杂的条件下，几乎不可能实现长期关井。同时，作为综合录井内容之一的地温研究的主要目的是检测异常地温，服务于顺利钻井，而不仅仅是为了获取资料。所以，采用测井先后两次（或多次）测得的井底温度计算地温梯度的方法是滞后的，达不到实时检测异常地温和为钻井安全服务的目的。

(2) 利用钻井液出口温度检测。Lesis 和 Ross 提出了由钻井液出口温度（或称流线温度）检测地层压力的方法。

钻井液出口温度能反映地温，总增量随井深增加。在正常压力的粘土层段，检测到的钻井液出口温度梯度应当不变。在具有异常高压力的粘土层段存在较大的地温梯度，会检测到大于正常梯度的钻井液出口温度，由钻井液出口温度随深度增加的速度较快来反映。尽管钻井液温度低于地层温度，但钻井液出口温度梯度中的增量是即将出现较高压力的很好预兆。在理论上可以预计，在压力梯度随深度增大的粘土岩井段，温度梯度将稳定地增大。在异常压力梯度不变的情况下，预计钻井液出口温度梯度可能不变，但大于正常梯度。在夹有砂层的粘土岩井段随厚度和其它因素，可以显示出增加或不变的温度梯度。在钻头接近高孔隙度，高含油、气、水饱和度的储层时，也可能具有较高的地温梯度，钻井液出口温度梯度增大。

Lesis 和 Ross 论述了在钻入压力和（或）孔隙型界面时，地温梯度会发生边界效应。当接近位于正常压力地层下的异常高压粘土岩层时，等温线变形，热流密度减小，地温梯度降低。因此，在钻入压力界面时，预计正常钻井液出口温度梯度先减小，后急剧增大。

钻井液出口温度梯度可以用下式求出：

$$G_t = 100(T_0 - t_0)/(H_0 - h_0)$$

式中 G_t ——钻井液出口温度梯度， $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ；

t_0 、 T_0 ——分别为第一、第二测点的出口温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

h 、 H ——分别为第一、第二测点的测温点的井深， m 。

D. J. Timko 在 1973 年提出了利用等效温度的方法定量计算地层压力，在此不作进一步介绍。

出口钻井液温度梯度技术是对推断和确定压力过渡带的实用方法的重要补充，可以在异常压力出现前预告较高压力存在，预测在大段粘土岩下存在的大段渗透性砂岩地层。

例如，库车坳陷的 DQ $\times\times$ 井，在井段 134~341m，钻井液出口温度由 23°C 上升到 70°C 左右，地温梯度明显异常，下伏地层可能存在较高压力，录井队及时建议将钻井液密度由 1.50 左右逐渐提高到 2.0 以上，而实钻证实该井 2860~4850m 存在多套膏盐岩为主，并夹有高压水层砂岩的异常高压地层。

（五）其他辅助方法

出口钻井液电导率测量的是不同含盐量的地层流体侵入井筒后引起的钻井液矿化度的变化而导致的导电能力的变化。如果在钻井液性能没有调整的情况下出现电导率异常，则预示着可能的异常高压。但由于异常高压层的流体性质的不确定性，电导率增大或减小的趋势对于判断预测异常高压意义不大。

出口钻井液温度、电导率和其他钻井液参数如出口密度、池体积、出口流量，以及气测显示或后效显示、岩屑形状、立管压力等都是检测判断异常高压的非常有意义的辅助标志，可作为辅助参数进行判断和解释，但不能作为判断依据，需要具体情况做具体分析。

后效的活跃程度有时可用于估算地层压力系数。例如，YY $\times\times$ 井，以密度 $1.53\text{g}/\text{cm}^3$ 的钻井液揭开目的层时发生溢流，关井观察，套压由 1.4MPa 上升到 48MPa，节流循环火焰最高 12~15m，火焰橘黄色，见少量烟。气测全烃：0.0300% 上升到 5.47%，组分齐全，油气显示很好。但是，该井后因卡钻，自井深 4800m 侧钻，以密度 $2.21\text{g}/\text{cm}^3$ 的钻井液再次揭开目的层时，却未见气测异常。猜测是因为地层压力远没有原先预测的那么高，钻井液密度过大，气层可能被压死。后密度降至 $2.16\text{g}/\text{cm}^3$ ，起下钻后效见微弱显示，全烃为 0.65%。钻进至 6041.87m 时密度降至 $2.02\text{g}/\text{cm}^3$ ，起下钻后效显示明显活跃，全烃达 6.36%，后效持续时间明显增加，当密度降至 $1.99\text{g}/\text{cm}^3$ 时，后效全烃达 27.92%，当密度降至 $1.91\text{g}/\text{cm}^3$ 左右时，后效全烃最高达 70%，且钻进中钻井液全烃基值多数在 5% 以上，有时高达 20%，静止时间越长，后效全烃值越高。分析其后效显示可以看出，当钻井液密度降至 $2.0\text{g}/\text{cm}^3$ 左右时，后效全烃明显升高，说明地层压力系数接近 2.0（完钻地层测试压力系数为 1.99）。

在塔里木盆地深井钻探中用的最普遍的是 d_c 指数法预测地层压力，我们曾在“八五”的“综合录井技术研究”课题中将地层压力预测作为子课题进行研究，并且取得了一定的成效。根据所研究的草湖凹陷和塔中隆起的钻井录井资料发现，同地区的井自上而下，正常压