

深井油气勘探水文地质研究工艺

深井油气勘探 水文地质研究工艺

В.И.伊利琴科

(苏) В.И.阿库林切夫 等

Ю.Г.格林

学(北京)

14

15

石油工业出版社

序 言

目前寻找新的油、气田通常都与深层、复式圈闭、严格的温压矿藏条件和腐蚀性介质有关。只有利用全部的地质知识和现代新工艺才能提高碳氢化合物矿藏的勘探效果。在这方面，优质试井、录取充分而有代表性的资料（特别是对含硫化氢油藏）是一个尤其突出的问题。

作者的多年经验和在北高加索、滨里海盆地进行的工作实践为深层油气水文地质试井工艺奠定了基础。作者参考了该知识领域以前的方法性著作：Г. В. 巴格马洛夫，Е. А. 巴尔斯，М. И. 苏波达，1961年；А. А. 卡尔采夫，А. М. 尼卡纳洛夫，1983年；Г. Г. 瓦希托夫等，1984年；В. Н. 卡尔采恩什捷因，1984年；Ю. П. 加特坚别尔盖尔，1987年；М. И. 苏波达等，1990年。考虑到近年来对于高温、高压、腐蚀性介质的水文地质资料，作者对已知的工艺、操作方法和规程进行了处理和补充。

为了便于对比，书中给出了统一的水文地质资料测取和解释通用标准方法。

作者对 Е. В. 斯塔德尼克教授在本书编写时给予的帮助、意见和建议表示诚挚的感谢。

目 录

1. 进行水文地质试井的准备	(1)
2. 深井和井口地层水、水溶性气体取样工艺	(6)
2.1. 井下取样器下入设备	(6)
2.2. 取样器	(7)
2.3. 取深井水样和溶解气样	(13)
2.4. 取井口水样和溶解气样	(24)
2.5. 对容器的要求	(30)
2.6. 取样量	(30)
2.7. 水溶性气体饱和压力(张力)的确定	(31)
3. 水动力学研究工艺	(48)
3.1. 测定地层(井底)压力的方法	(48)
3.2. 水动力研究结果的整理方法	(66)
4. 地热研究工艺	(78)
4.1. 基本地热参数	(78)
4.2. 地温测量	(79)
4.3. 综合水文地质研究中的温度测试	(86)
4.4. 井筒温度计算	(87)
4.5. 井温测量是检查井技术状况的方法	(87)
4.6. 地层温度(井底温度)测定误差的评价	(88)
4.7. 实测资料整理和地温制图	(88)
5. 含硫化氢地层水文地质研究工艺	(93)
5.1. 地层水、冷凝水和水溶性气体的井下取样和井口 取样工艺	(93)
5.2. 分析研究	(99)
5.3. 进行研究的安全技术措施	(104)

5.4. 含硫化氢储层井下水文地质研究资料的解释	(107)
6. 天然水化学分析工艺	(129)
6.1. 氢离子浓度 (pH) 的测定	(129)
6.2. 天然水密度的测定	(131)
6.3. 碳酸根、碳酸氢根和氢氧离子总碱度的测定	(133)
6.4. 铵离子浓度测定	(137)
6.5. 天然水中固体残余物的测定	(140)
6.6. 硫酸根离子浓度的测定	(141)
6.7. 钙和镁离子浓度和总硬度的测定	(145)
6.8. 氯化物浓度的测定	(150)
6.9. 溴离子浓度的测定	(154)
6.10. 碘离子浓度的测定	(160)
6.11. 硼浓度的测定	(163)
6.12. 用计算方法确定钾和钠	(168)
6.13. 分析结果综合表格	(168)
6.14. 分析结果检查	(168)
6.15. 硫化氢和氢硫化物离子浓度的测定	(172)
7. 井的水文地质研究工作实例、结果整理和制表 ...	(179)
7.1. 非转注地层水流井的研究	(179)
7.2. 有转注地层水流入井的研究	(182)
7.3. 具有两相流 (水+气) 井的研究	(190)
7.4. 拉帕诺斯目的层研究	(194)
7.5. 硫化氢含量高井的研究	(200)
结论	(204)
参考文献	(205)

1. 进行水文地质试井的准备

高质量水文地质资料的测取与进行试井的准备有着密切关系，因为井的准备程度不够，既决定了所进行试井的水平，又决定了所作结论的可靠性。

在钻井过程中，由于钻井液的渗透和其它工艺因素，地层中地下水的原始物理-化学状况发生破坏。钻井液渗透后果的消除以及沿井筒向地层替入工业用水，在其组分稳定前由井抽（气化）水来解决。为此，需要周期地取水样，并测定其密度或其中氯的含量。如果水样的矿化度为最近井既定综合资料特征值的 90%~95%，或者其矿化度在最高抽水量情况下为定值，则可以认为是地层水。该抽水量由下式计算：

$$V_{\text{от}} \geq AV_{\text{вк}} \quad (1.1)$$

式中 $V_{\text{от}}$ ——必须的抽水量， m^3 ；

A ——系数，取决于钻井和诱喷时地层与外来水的相互作用程度，根据经验确定；

$V_{\text{вк}}$ ——压入地层的外来水量， m^3 。

在抽（气化）水量不少于 2~5 倍井筒容积（ $A=2\sim5$ ）时，该井可以认为已作好深井取样的准备。

M. M. 布雷切夫和 Г. П. 雅卡勃松推荐下列公式，根据该式可以计算用于确定含气饱和度的取样优质标准：

$$K = \frac{\pi R^2 h c m}{V_{\text{yp}}} \quad (1.2)$$

式中 K ——优质标准；

R ——井诱喷时压降漏斗的半径, m ;

h ——地层厚度, m ;

c ——与水中含气饱和度有关的系数;

m ——地层孔隙度;

V_{yp} ——在液面恢复时获得的地层水量, m^3 。

当 $K < 1$ 时, 能够从井底取得含气量不失真的样; 当 $K \geq 1$ 时, 井底地层水可能是部分脱气的, 在此情况下, 井中抽汲应当以较小压差 (小油嘴) 连续直达到 $K < 1$ 。

上述条件是必要的, 但对于获得可靠资料还不够。甚至在取出矿化度为常数且其数值接近于地层水的情况下, 当饱和和压力高于井底压力时, 水和其中溶解气体的组发均可能失真。在抽汲、诱喷过程中或者在样品传送至地面时, 地层流体与管柱和空气的相互作用, 通常是产生这些偏差的主要原因。

下面举例说明。例如, 在由留米那弗尔-1 井 (井段 1573 ~ 1466m, 古新世) 用空气气举情况下, 采出水量约为井筒容积的 15 倍。在井口和沿井身取得的样中水的矿化度不变, 并与早先位于 1.25km 距离的斯塔福罗波尔-2 井取得的样相似。但是, 正如由分析 (表 1) 所见, 在诱喷和抽汲时样中存在有通常在前高加索中新世代沉积地层水中没有的碳酸盐, 同时其含量随深度而降低。在井口计量容器中观察到有絮状沉淀物析出, 而在油管外表面可见盐层。此种水用抽汲法在等于井筒容积 2 倍的数量上由井内排出。在重新取得的样中没有发现碳酸盐, 而酸式碳酸盐、钙、镁, 特别是铁的含量增加。此后关井近 3 个月, 样中重新出现碳酸盐, 而酸式碳酸盐、钙和镁的含量下降。

在长时间关井情况下, 由于与空气和管柱的相互作用, 不

表 1 留米那弗尔-1 井水样化学组分

mg/dm³

取样日期 和条件	Na ⁺ + K ⁺	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Br ⁻	离子 总数	B	H ₂ S + HS ⁻	Fe ²⁺ + Fe ³⁺	酚 苯
90.2.28 气举 诱喷时在井 口	3619	12	5	22	4733	393	830	22	97563.1731.90	—	—	0.46	—
90.3.6 气举 抽汲后于 535m 液面	4041	20	2	21	5449	498	647	24	108103.6029.00	未测	未测	未测	未测
90.3.6 气举 抽汲后于 1400m 深(油 管底部)	3654	20	6	31	5021	397	671	28	98522.32	未测	0.28	痕迹	0.35 未测
90.3.20 抽汲 2 倍井筒容积 后自井底	3630	26	9	25	4839	380	1013	17	99482.7534.80	2.30	44.68	0.500.30	—
90.5.24 保持 静止后于 538m 液面	3803	12	5	14	5447	214	342	19	99523.1718.48	未测	未测	未测	未测
自 1375m 深 (油管)	4811	9	1	16	6731	352	610	10	126362.7522.4	4.33	72.61	0.380.29	—
自 1566m 深 射孔以下	3665	10	4	31	5042	345	598	21	97882.5423.76	未测	未测	未测	未测

表 2 卡雅苏林-3 井水溶性气体组分

取样条件	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀				C ₅ H ₁₂				C ₆ H ₁₄			H ₂	N ₂	CO	He	pH	水温 C
				i—	n—	i—	n—	i—	n—	i—	n—	i—	n—	n—						
井口, 环空	20.99	1.23	0.30	0.05	0.07	0.02	0.02	0.01	—	—	—	—	—	—	0.62	6.81	69.75	0.13	6.35	142
575m, 油管	15.95	7.70	0.74	0.13	0.24	0.12	0.13	0.06	0.07	17.86	6.40	5053	0.09	6.15	37					
1500m, 油管	19.47	7.75	0.43	0.04	0.13	0.06	0.08	0.01	0.03	14.31	6.73	50.89	0.07	5.75	74.5					
2500m, 油管	21.56	5.50	0.74	0.09	0.08	0.04	0.06	0.03	0.03	11.17	6.65	53.85	0.10	5.80	118.5					
4200m, 油管	15.19	2.37	0.13	0.01	0.06	0.04	0.05	0.04	0.02	7.20	5.58	69.22	0.09	5.70	167.5					

%

仅是地层水，而且水溶性气体的成分均发生变化，特别是氢气浓度偏差甚大(表2)。卡亚苏林-3井的环形空间被采空，样品在用作压力计的油管柱中取得，得到的资料明显与氢气的技术成因有关。

在井中进行抽汲时，必须保持地层水在数量上足够用于充满容器和在由取样器往容器转移溶解气样时充满季斯装置(不少于50L)。

如果井筒为具有静止液面或剩余压力的地层水所充满，对于测量井的地层压力可认为是准备好了的。在长时间恢复液面的情况下，对于弱胶结地层，如果具有用于按B. П. 雅柯弗列夫方法确定其液面的足够资料，允许其不完全恢复。在溢流井中，在表压长时间恢复的情况下，允许按霍尔涅尔法大致地估算地层压力。

为了优质测量井筒和井底温度，必须关井数天，建立与地层自然的温度平衡。只有在此种情况下，测得的温度接近或与地层温度相一致。

在溢流井中，对于确定地层的水动力学参数、分离后的产水量和产气量，井的稳定取样法以水文地质方式进行。

2. 深井和井口地层水、水溶性气体取样工艺

2.1. 井下取样器下入设备

对于井下取样器的起下操作，需要一定的配套设备，其中包括绞车、防喷盒和钢丝（绳）等主要部件。在井口压力异常高的情况下，为了保证仪器正常下入，还需要利用各种类型的加重物。

任何能保证深井测试时起下操作安全进行的工程设备，均可作为机械传动绞车的安装基座。对于深井测试最常用的装置是 АЗИНМАШ-8А, ЛСГ1-66, 它利用 ГАЗ-66 卡车的底盘作为安装基座。该装置的全部设备和仪器装置在专门的厢式车身上，车身侧（后）壁上设置有利于引出工作钢丝的孔（门），钢丝借助于井口滑轮对准井。操作者在车上操纵绞车（啮合传动轴齿轮，控制摩擦离合器和刹车）。

对于井口有剩余压力的井，下入深井取样器时必须采用防喷盒，防喷盒的尺寸和结构应根据井口压力选择。

钢丝应该保证起下深井仪器的最大安全性，其直径根据下入深度、仪器和钢丝本身重量确定，材质取决于要求的强度、腐蚀介质和上顶力。一般情况下，采用直径 1.6~2.5mm 的 B-180 或不锈钢发亮钢丝。在使用过程中，必须注意观察其状况以防止断裂。钢丝应经常涂油，这一工作以卷绕在绞车滚筒上时做为好。钢丝不应有的折皱、裂痕、砂眼和其它损伤。

果,大大减少低质样数目,改善和提高样品转移速度,用于研究的时间可减少20%~30%,并使密封元件的完好性得到改善。

2.2.2. “卡斯捷尔”公司取样器

“卡斯捷尔”井下取样器用于在深度100m以上的情况下取流体样。仪器在地面密封,经过由时钟机构控制的规定时间将取样室打开。该取样器的壳体及其全部组件均由含铜镍合金的不锈钢制造,因而允许利用它采取含腐蚀组分(硫化氢、二氧化碳等)的流体样。仪器能保持自身工作性能的最高压力和温度分别为70MPa和300℃。当取样室容积为500cm³时,取样器参数如下:长度1780mm,直径32mm,重量6.2kg。

此种取样器(图2)的主要部件有:进气阀8,双联单向阀7,机械(球形)闭锁机构2,程控时钟机构1。

在取样器取样室底部,拉杆9上有两个单向阀7,其下方为封闭取样室进入孔的进口阀8。取样室4上方装置有机械式球形闭锁机构2,该机构控制着具有挡板5的拉杆9,它们同进口阀8一起呈关闭状态。

在为位于拉杆9上的密封环3所封隔的仪器顶部,有一个上一次发条可使用60或150分钟的时钟机构1。该机构的缸体在一定时间瞬间沿闭锁机构的打捞筒碰撞、释放拉杆,拉杆与进气阀一起向上位移,打开那些最大的进入孔。流体经单流阀进入取样室4,当取样室内部压力加上单流阀弹簧6建立的压力与外部压力平衡时,单流阀关闭使取样器密闭。

取样器起至地面并将时钟卸下后,在壳体上安装抽提器,此时必须使抽提器上的标记与壳体上的标记相吻合。抽提器经过阀门与季斯装置相结合,该装置内有用于收集由取样器

取样室转移的溶解气样的容器（玻璃瓶）。

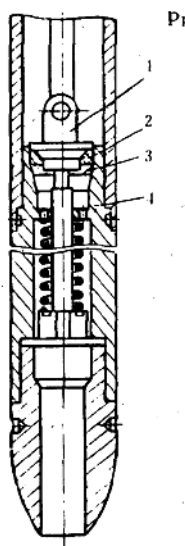


图1 取样器阀装置

1—阀头；2—密封环；3—支承垫
圈；4—阀座

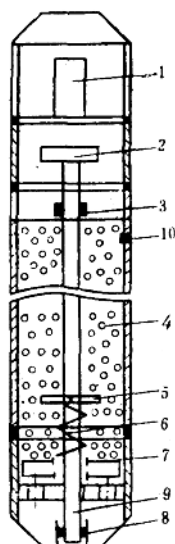


图2 卡斯捷尔公司取样器

1—时钟机构；2—闭锁机构；
3—密封环；4—取样室；5—挡
板；6—弹簧；7—单向阀；8—
进口阀；9—拉杆；10—隔板

借助于抽提器，取样器的隔板10被穿透，平稳地打开阀门，气体即经过季斯装置转移到容器中。

取气以后必须将堵塞物与隔板10分离，流体经过孔眼转移至用于收集液体（水）的容器，此时应将仪器翻转底朝上。

2.2. 取样器

对于取深井水样和溶解气样，允许利用可保证取得有代表性样品，并且在变化的温压条件下提升至地面而不破坏密封性的任何类型取样器。在提升和运送取样器时，允许将仪器内的气体排放到自由相中去。最好采用具有最小“死”体积的流通型取样器。

众所周知，深层地层水往往具有较高的矿化度，且本身的成分有腐蚀性，因而导致油管腐蚀和液体中存在机械杂质和砂子。在含气量较高的情况下，在上提的取样器中压降甚大。

所以，广泛应用于矿场试井实践中的系列流通型取样器（ПД-3М，德国雷捷尔特公司的 573788 (1) -0）在这些条件下不能保证取得可靠的样。试验成功率（优质样数与总样数之比）降低到 65%~40%。这是因为落入阀座与阀板之间的岩屑和砂子使得取样室密封性破坏，而采用较细的净化过滤器使仪器的冲洗性大大恶化。此外，在压降和温降作用下环形密封圈发生残余变形，使其在样品转往地面时脱落。阀门开启压力高于取样室内压力 1~2 倍，使用于收尾准备操作的时间大增。

2.2.1. 新式 ПД-3М 取样器

对于取样，取样器 ПД-3М 是最宜采用的。在水文地质试井时，此种取样器的冲洗性完全可以满足，但其缺点是阀、橡皮密封圈以及阀控制机构的结构不够完善。

北高加索天然气研究所（Б. П. 阿库林切夫，1982 年）设计了一种用于深井试井的取样器，它用于将含溶解气的液样从井底压力 100MPa、温度 200℃ 以下的井中取出并提升到地

面。为此目的,改变了取样器阀装置的结构(图1)。其中含有锥形支承垫圈3和密封环2,锥形支承垫圈3自由地套在阀杆槽上并刚性地装置到阀座4上,密封环2上弹性地支承着具有圆柱形支承台肩的阀头1,台肩进入支承垫圈3的环形槽。在阀装置呈关闭状态时,弹簧保证阀头1、密封环2和支承垫圈3压紧圆筒形阀座4,阀座4顶部阀头台肩下方有圆柱形槽。

该取样器如下工作。在下井时,阀装置保持开启状态,同时弹簧压缩,液体经取样器自由通过。在预定深度上,控制机构释放装置的拉杆,在弹簧压力作用下阀装置关闭,此时拉杆将阀头1、密封环2和支承垫圈3拉到圆筒形阀座4上。在最初瞬间(开始提升取样器前)在弹簧作用下,而在提升仪器时密封环2依靠压降在阀头1和支承垫圈3之间总是被挤住,刚性地顶在阀座4上;甚至在井被泥砂污染的条件下亦保证样品可靠的密闭性。

取样器提升到地面后,将样品往容器中转移,以便于以后进行测定。对此,在阀装置上装上专用异径接头。在按压拉杆时,阀头1相对于支承垫圈3作轴向位移,从密封环2推出,保证阀装置自封作用的预解除。阀头1位移到确保圆柱形支承台肩由支承垫圈3的槽离开后,在压降作用下密封环2脱离圆锥形阀座4,阀装置即行解封。因此,对于阀装置的解封,将阀头1压出约1mm就够了,此时主要密封元件(密封环和支承垫圈)仍是不动的。

样品压缩体积数值不大,由于这个缘故,在取样器内压力为5~10MPa情况下阀的开启压力仅比取样器取样室内压力高0.6~1.6MPa,此时密封元件处于完好状态。

利用上述结构的取样器可以提高深井水文地质研究的效

卸下进气阀的堵头，以防止形成内部真空。

必须指出，取样器下井前必须检查其主要部件的性能，其中包括闭锁和时钟机构，进口阀的密封环。

闭锁机构按以下步骤进行检查：

(1) 将闭锁装置芯子往下放，同时将打捞筒稍微上提；芯子应该象此后将要用手松开打捞筒那样始终向下（1.5cm）；

(2) 向下放打捞筒。

时钟机构的工作如上检验：

(1) 将时间缸体上推至时钟机构方向；

(2) 将时钟上几圈发条；

(3) 用耳听检查时钟走动；

(4) 检查时间缸体在一定时间是否恢复到初始状态。

国外仪器除“卡斯捷尔”公司取样器外，对于取深井流体样还使用了德国“雷捷尔特”公司的取样器。该公司 573788

(1) -0 型仪器结构及其工作原理大致与国产 ПД -3М 型取样器相似。此种取样器的缺点与 ПД -3М 仪器相同，主要缺点是必须采用较细的防护滤网，使仪器的可冲洗性大为恶化，导致取样质量不高。如不用滤网，则会使各种悬浮物和软泥进入取样室腔体和闭锁阀门，导致腔室密封性破坏。ПД -3М 和 573788 (1) -0 取样器阀上的密封环在砂泥、机杂稍微进入阀座的情况下不能保证取样室完全密封，尽管其中采用了与阀座接触面积较大并按自封原理工作的锥形密封环。在利用这样的取样器时，试验效果下降到 40%~65%。

实际上，利用北高加索天然气研究所设计并在改进的 ПД -3М 取样器中，采用的游动型自锁作用阀完全可以避免上述结构性缺点。在“雷捷尔特公司仪器中采用类似的阀大大扩大了其应用范围。

应当指出, 573788 (1) -0 型仪器比 ПД -3М 取样器性能好得多, 该仪器中装置的接触式时钟机构实际上可以排除由于钟停引起的仪器工作故障。在该公司后一种 1200 型取样器中采用了可使液力阀驱动机构起作用的磁力装置, 此种装置的优点在于时钟和释放机构之间不存在机构联系。

卡斯捷尔公司取样器属于不流通型。在下入井中时, 取样室被空气充满, 后者的压力随温度和腔室容积的变化而变化。充满取样室的地层液体压缩其中的空气到井底压力。在井底条件下, 样品体积与井口条件下取样室的容积不同, 可按下式计算:

$$V_{np} = DV_{np} \quad (2.1)$$

式中 V_{np} ——井底条件下样品体积, m^3 ;

D ——考虑到样品体积变化的系数;

V_{np} ——正常条件下取样器容积, m^3 。

对于清洗过的取样器, 系数 D 仅与取样室壳体材料的体积温度系数和温差有关:

$$D = 1 + L\Delta t \quad (2.2)$$

式中 L ——体积温度系数, $^{\circ}C^{-1}$;

Δt ——取样点与测量取样空间的温差。

对于保持有空气垫的非流通仪器 (卡斯捷尔公司型), 该关系式呈下列形式:

$$D = 1 + L\Delta t - \frac{Z_0 B T_0 \times 10^{-4}}{T_0 p_0} \quad (2.3)$$

式中 Z_0 ——井底条件下空气的压缩系数;

B ——仪器充气情况下的大气压力, hPa ;

T_0, T_0 ——井底和仪器充气情况下的温度, K ;

p_0 ——取样深度处压力, MPa 。

根据用卡斯捷尔公司型取样器含溶解气地层水取样结果计算水的含气量按式 (2.14) 进行。

2.3. 取深井水样和溶解气样

在非溢流井中, 取深井样在静液面稳定情况下进行。在不稳定井底压力情况下允许取样, 但井底压力应高于水溶性气体的饱和压力。

为了避免粘附在油管柱内表面的气泡和空气进入样中, 深井溶解气样仅在测井或其它形式的起下操作之后才取。

在溢流井中, 取样在井底压力等于地层压力或至少高于饱和压力的情况下进行。如果井在井底压力低于饱和压力情况下工作, 则取样前必须换为最低限度可能小的油嘴, 并工作到脱气水完全排出为止, 其数量按下式计算:

$$Q = \pi h m \eta (R_n^2 - R_c^2) + \frac{\pi d^2 H}{4} \quad (2.4)$$

式中 Q ——脱气水量, m^3 ;

m ——地层孔隙度;

h ——地层厚度, m ;

η ——用经验法求得的地层采水率;

R_n, R_c ——分别为供给半径和井半径, m ;

d ——油管内径, m ;

H ——井深, m 。

任何结构取样器工作时都必须严格遵守在相应规程中规定的工作和下井准备准则。改进的 ПД-3М 取样器如下进入工作状态 (图 3): 在地面打开阀并用“捞爪”杆和球形锁扣固定, 阀杆借助于铜锁栓顶住上阀于打开状态用专用打捞头将取样器固定到钢丝端部, 同时应保证仪器在钢丝上可自