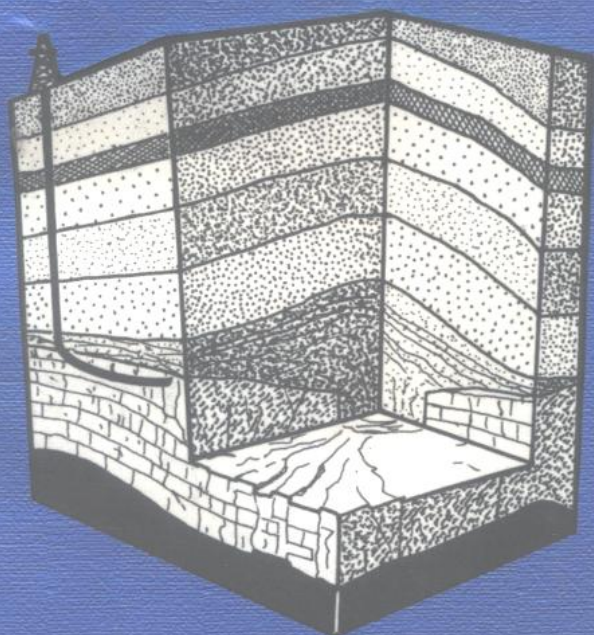


S.D.Joshi, Ph.D. 著

班景昌 等译

水平井工艺技术

HORIZONTAL WELL TECHNOLOGY



石油工业出版社

水平井工艺技术

S. D. Joshi, Ph. D. 著

班景昌等 译

石油工业出版社

Horizontal Well Technology

S. D. Joshi

Copyright ©1991 by Penn Well Publishing Company, 1421 South Sheridan/P. O. Box 1260, Tulsa, Oklahoma 74101

All rights reserved.

本书中文版由美国 Penn Well 出版公司授权石油工业出版社出版，1998 年

版权所有，翻印必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

水平井工艺技术 / (美) 乔希斯 (Joshi, S. D) 著; 班景昌等译.

北京: 石油工业出版社, 1998. 11

书名原文: Horizontal Well Technology

ISBN 7-5021-2484-5

I. 水…

II. ①乔… ②班…

III. 油气钻井-定向钻进

IV. TE243

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 35612 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云红光印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 15.5 印张 400 千字 印 1-1000 册

1998 年 11 月北京第 1 版 1998 年 11 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2484-5/TE · 2041

定价: 24.00 元

水平井工艺技术

翻译与审校人员

翻译：	班景昌	梁振民	蔡秀丽
	曲同慈	吴智勇	赵海燕
译校：	关志忠	赵 燕	
审定：	曹里民	赵政超	

前 言

5270/27

世界科学技术的发展及对石油需求量的日益增加,对石油勘探开发技术的要求越来越高,进而促进了水平井工艺技术的发展。水平井技术产生于20世纪50年代,复兴于70年代,发展于80年代。特别是进入90年代以来的深入研究及广泛的实际应用,使其日臻完善和系统化,并成为前沿技术之一。《水平井工艺技术》一书系美国Joshi博士1991年出版的专著。该专著从理论和实践上全面系统地论述了水平井工艺技术,填补了水平井工艺技术领域的空白。水平井技术不仅适用于陆上油气田,更适用于海上、沼泽地、沙漠、冰川、河流及建筑物等恶劣条件下的油气田开发;不仅适用于常规油气田,更适用于高凝油、稠油、裂缝及薄层等特殊油气田开发。译著此书的主要目的是引入世界先进的水平井工艺技术为我们从事水平井工程技术的研究人员,特别是从事水平井工程计算及决策的专业技术人员参考,也可作为石油院校或油田培训水平井工程技术人员的教学用书或参考书。并深信水平井工艺技术的引入及其广泛应用必将对石油工业的发展起到重要推动作用。

本书由班景昌、梁振民主译,关志忠、赵燕主校。蔡秀丽对第八章和第九章进行了初译,曲同慈翻译了本书附录A、B、C并对书中部分章节进行了译校,吴智勇翻译了本书附录D、E、F,赵海燕参加了本书的译校工作。本书由曹里民、赵政超负责主审。

译者虽已尽心工作,并力求做到精确和专业化,但由于外语修养和专业知识有限,对此技术的理解难免有不确切之处,敬请专家及广大读者批评指正。

译 者

1997年3月

序 言

编写本书的主要目的在于总结水平井工艺目前的技术水平。钻井完井的最新进步带来了全世界每年所钻水平井数迅速增加。在某种程度上，水平井与直井不同，因为水平井需要各种专业技术人员之间的跨学科相互协作。比如，地质师、油藏工程师、钻井工程师、采油工程师和完井工程师的密切协作。由于大量的文献来自不同学科，所以我决定把这本书分成两部分。这里包含的是第一部分。第一部分主要涉及油藏工程和采油工程。

在此书中，我收集了截止1990年6月能得到的出版文献。此外，还收集了详细说明各种理论方法的应用实例。只要有可能，我不仅讨论在应用理论方法时会遇到的实际困难，而且还包括一些失败的教训。

在某种程度上，由于水平井工艺技术的多学科性，编写此书是困难的。本书主要是针对从事工程计算和水平井应用决策方面的专业技术人员，亦可作为学生教课书。对管理人员来说，本书有助于回顾目前技术现状。我还概括地介绍了当今工艺技术方面存在的差距，这些差距将有助于从事研究工作的工程师和专业技术人员确定将来的研究领域。

所提供的许多方法都源于我本人在有关世界范围内的各种直井和水平井现场工作方面的经验。我感谢许多公司及为我现场工作提供方便的人们，还感谢接受过我的水平井班培训的所有人。班上的讨论及其建议，对于从事实际工作的工程师是极有价值的。

本书的第一章是水平井工艺技术回顾以及从油藏、钻井和完井的观点出发对水平井工艺技术进行的概括性介绍。

第二章重点是着眼于水平井的油藏工程理论及其应用，还包括水平井井距方面的讨论。

第三章包括稳定态解及其应用，还包括有关水平井地层损害问

题的讨论。除水平井外，还包括斜井的讨论，有些斜井的实例比直井更有价值。

第四章涉及油井偏心率对油井产能的影响。油井偏心率代表水平井位置与产层中部之间的距离。尽管油井偏心率对油井产能的影响很小，但对气顶和底水油藏内水平井的最终储量将有重大影响。

第五章包括水平井和压裂直井。本章讨论了直井水力压裂的实用理论及其优点和局限性，还讨论了措施水平井和压裂水平井的产能计算。

第六章的焦点集中在不稳定试井上。简单地说，不稳定试井是一个复杂的数学课题。目前，它是认识已知油藏的油井动态的最重要和最有用的课题之一。为使本章完整，我收集了所有必要的数学方法及解释水平井动态必不可少的许多理论。

第七章涉及拟稳定态解。在本章中，我列出了有关直井、压裂直井和水平井的解。我还收集了部分射孔或部分裸眼完井的水平井的有用解。本章还描述了在溶解气藏完成的水平井的动态。

第八章探讨了直井和水平井的水锥和气锥。本章概述了计算水平井和直井内水锥和气锥动态的许多有用解。此外，还包括有用的油田应用实例的讨论。这些油田实例不仅展示了水平井在减少水锥和气锥方面的成功经验，也反映了失败的教训。本章还概述了有关直井生产试井的利益和风险，以确定水平井的潜在能力。

第九章着重叙述水平井在气藏中的应用。按我的看法，水平井极适用于低渗透及高渗透气藏。

第十章涉及经过水平井的压降及其在确定水平井动态方面的重要性。

为使本书完整，我编入了一些附录，附录 A 汇总了有关流体性质；附录 B 包括气体可压缩系数的数据；附录 C 包括各种换算系数（我汇总附录 C 的原因是本书是按美国油田通用单位写的，而附录 C 将有助于把实例中的单位换算成不同实用单位）；附录 D 包括有关各种拟表皮因子及其定义的讨论；附录 E 包括各种采收率表，人们可以用这些表，按不同油藏类型和不同驱动机理来预测其采收率；附

录 F 是本书中所使用的技术术语汇编，我确信这个汇编对不熟悉油藏工程和采油工程术语的人是非常重要的。

各位读者，我诚望对本书内容提出批评、建议和疑问。请随时与我联系。

Sadanand D. Joshi, Ph. D.
Joshi Technologies International, Inc.
5801E. 41st St., Suite 603
Tulsa, OK. 74135
(918) 665—6419

我自认为在水平井工艺技术方面是一名学生，在我编写此书以后，随着阅读大量出版物以及参与各种现场工程，我感到受益很大，并掌握了许多有关知识。

1990 年 9 月 6 日
于俄克拉荷马州塔尔萨

目 录

序言

第 1 章 水平井技术回顾..... (1)

- 1.1 概述 (1)
- 1.2 水平井的局限性 (3)
- 1.3 水平井的应用..... (13)
- 1.4 钻井技术..... (14)
- 1.5 水平井长度取决于钻井技术和泄油面积范围..... (18)
- 1.6 完井技术..... (21)
- 1.7 小结..... (27)
- 1.8 参考文献..... (27)

第 2 章 油藏工程理论 (35)

- 2.1 概述..... (35)
- 2.2 表皮因子..... (37)
- 2.3 水平井的井壁损害..... (42)
- 2.4 井眼的有效半径 r_w' (44)
- 2.5 采油指数 J (47)
- 2.6 流动状态..... (48)
- 2.7 区域各向异性的影响..... (56)
- 2.8 参考文献..... (67)

第 3 章 稳定态解 (70)

3.1	概述	(70)
3.2	水平井的稳定态产能	(71)
3.3	水平井的井眼有效半径	(85)
3.4	斜井产能	(88)
3.5	斜井和水平井的产能对比	(95)
3.6	水平井的地层损害	(96)
3.7	油田开发史	(100)
3.8	参考文献	(103)

第4章 油井偏心距的影响 (106)

4.1	概述	(106)
4.2	井偏心距的影响	(107)
4.3	钻多口水平井	(114)
4.4	位于不同高度的水平井	(115)
4.5	参考文献	(118)

第5章 水平井与压裂直井的对比 (120)

5.1	概述	(120)
5.2	直井增产措施	(120)
5.3	裂缝类型	(124)
5.4	水平井和有限导流能力裂缝的对比	(132)
5.5	裂缝性油藏内的水平井	(138)
5.6	压裂水平井	(138)
5.7	小结	(150)
5.8	参考文献	(150)

第6章 不稳定试井 (155)

6.1	概述	(155)
6.2	数学解及其实际含义	(157)
6.3	流态总结	(161)
6.4	压力响应	(161)
6.5	试井流态详述	(164)
6.6	压力导数	(176)
6.7	井筒储存效应	(177)
6.8	实践中的注意事项	(181)
6.9	小结	(187)
6.10	参考文献	(188)

第7章 拟稳态流..... (191)

7.1	概述	(191)
7.2	直井拟稳态方程总结	(192)
7.3	直井的流形系数	(193)
7.4	压裂直井的流形系数	(196)
7.5	水平井拟稳态产能计算	(207)
7.6	部分裸眼水平井的井底流入动态	(221)
7.7	溶解气驱油藏内水平井井底流入动态关系	(225)
7.8	预测溶解气驱油藏中的水平井动态	(228)
7.9	参考文献	(235)

第8章 直井与水平井中的水锥和气锥问题..... (238)

8.1	概述	(238)
8.2	临界流速的定义	(240)
8.3	直井临界流速关系问题	(240)
8.4	试油的临界流速	(247)
8.5	递减曲线分析	(250)

8.6	直井的水突破	(252)
8.7	直井水突破后的动态	(259)
8.8	含水率—采收率曲线特征	(266)
8.9	水平井中的水锥和气锥	(267)
8.10	在底水驱油藏内水平井的水突破时间.....	(276)
8.11	在气顶油藏或底水油藏内水平井 的水突破时间.....	(282)
8.12	在兼有气顶和底水的油藏内水平井 的锥进突破时间.....	(284)
8.13	边水驱油藏内水平井的临界流速.....	(288)
8.14	实践中的注意事项.....	(292)
8.15	油田开发史.....	(292)
8.16	参考文献.....	(303)

第9章 气藏中的水平井..... (308)

9.1	概述	(308)
9.2	天然气储量计算	(308)
9.3	经过孔隙介质的天然气流	(313)
9.4	水平井应用	(322)
9.5	生产典型曲线	(337)
9.6	油田开发史	(346)
9.7	小结	(351)
9.8	参考文献	(352)

第10章 经过水平井的压降

10.1	概述.....	(355)
10.2	高压降的影响.....	(356)
10.3	降低井眼高压降的补救方法.....	(357)

10.4	经过水平井的压降·····	(367)
10.5	对已完全形成的摩擦系数的解释·····	(371)
10.6	弯曲井段的压降·····	(375)
10.7	所钻井眼大小及衬管尺寸·····	(375)
10.8	经过水平井的单相流压降·····	(376)
10.9	经过水平井的多相流压降·····	(387)
10.10	实例结果总结 ·····	(393)
10.11	实际注意事项 ·····	(394)
10.12	参考文献 ·····	(394)

附录 A	石油流体的性质 ·····	(397)
附录 B	气体压缩系数 ·····	(433)
附录 C	换算系数 ·····	(441)
附录 D	拟表皮因子的计算·····	(449)
附录 E	采收率 ·····	(464)
附录 F	术语汇编 ·····	(466)

方程索引·····	(472)
-----------	-------

第 1 章 水平井技术回顾

1.1 概述

近年来，在世界范围^[1-27]内已钻了许多水平井。钻水平井的目的是增加与储层的接触面积，借此提高井的生产能力。用长水平井作注入井，可提供较大的接触面积，提高注入能力，从而满足大幅度提高原油采收率的需要。

简言之，水平井是平行油层层理面钻进的，而直井是正交油层层理面钻进的。换言之，直井是以 90° 角钻入油层层理面的（图 1-1）。如果油层层理面是垂向的，那么常规直井将平行于油层层理面钻进。但是，从理论上讲，这种井应是水平井，如图 1-2 所示。即便油层层理面是垂向的，仍可向下直钻，然后侧钻。目的是穿过多个产层（比如，从钻井的观点看，它容易停在某一层，从而有效地控制井眼轨迹）。在美洲大陆中部及其沿岸地区，一些油层层理面几乎

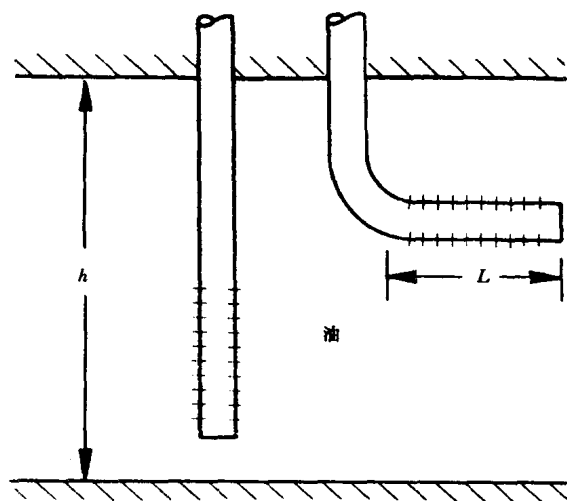


图 1-1 垂直于层理面所钻的直井和平行于层理面所钻的水平井井身结构示意图

都是垂向的。同样，在加利福尼亚，一些油层普遍变深。因此，在分析水平井性能时，应考虑到油层层理面的几何形状。

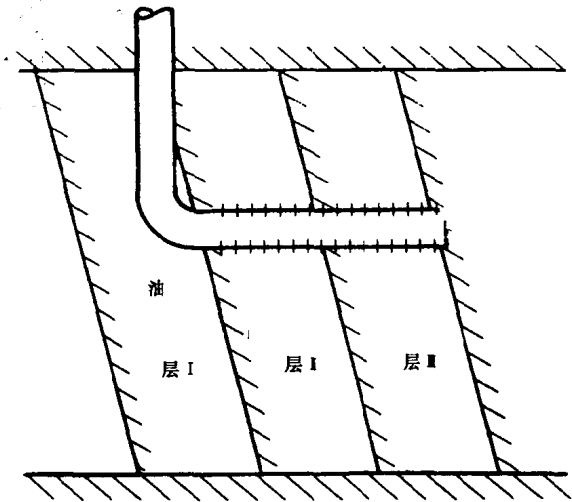


图 1-2 在垂直层理面的油藏中钻的水平井

水平井典型工程不同于垂直井项目，因为井的生产能力取决于井长度，而且，井的长度取决于所采用的技术（表 1-1）^[6]，因此，关键是油藏工程师、钻井工程师通力合作，选择适当的能获得所需水平井长度的钻井技术。

表 1-1 水平井长度^[6]

类 型	井眼直径, in	曲率半径, ft	记录的长度 ^③ , ft	预计的长度, ft
超短半径 ^①	—	1~2		100~200
短半径 ^②	4¾	30	425	250~350
（转盘钻）	6	35	889	350~450
短半径	4 ¾	40	—	—
（井下马达）	3¾	40	—	—

续表

类 型	井眼直径, in	曲率半径, ft	记录的长度 ^③ , ft	预计的长 度, ft
中半径	4½	300	1300	500~1000
	6	300	2200	1000~2000
	8½	400~800	3350	1000~3000
	9⅞	300	—	—
长半径	8½	1000	4000	1000~3000
	12½	1000~2500	1000	—

① 由一口直井能钻的一些曲率半径；

② 由一口直井能在不同高度下钻的一些泄油井眼；

③ 1990 年以前钻的长度超过 1372m (4500ft) 的中曲率半径水平井。

另一个重要的注意事项是完井方式，即采用裸眼、下割缝衬管、下带套管外部封隔器的衬管或采取下套管和套管射孔方式完井。采用的完井方式取决于完井本身的需要和经验。完井方式影响水平井的性能，某些完井方式只适于采用某些钻井技术。因此，井眼长度、井眼在油层中的物理方位、钻井方位的误差及采取的完井方式主要取决于钻井方法。所以油藏工程师掌握各种钻井技术及其优缺点是非常重要的。同样，钻井工程师、完井工程师和地质师们也应掌握并懂得影响水平井性能的各种因素。要确保水平井方案的成功，关键是技术人员的合作与协作。

1.2 水平井的局限性

如前所述，水平井的主要优点是增加与油层接触面积。通常，人们可以钻 914~1219m (3000~4000ft) 长的井，以提供比直井大的接触面积，水平井的主要缺点是一口水平井只能采一层。但是，目前已能利用水平井进行多层开采了。实行多层开采有两种方法：1) 可以钻一口“台阶”式井，所钻的长水平井段比一层长；2) 可以用水泥固井并通过有效裂缝进行强化开采。与油层正交的垂直裂缝比

穿过单层的多，并以此开采多层。应特别注意，在某些情况下，由于各产层和中间隔层的强度不同，靠压裂水平井连通不同高度的产层是不可能的。

水平井的另一特点是费用高。一般说来，水平井费用约是直井的 1.4~3 倍。费用的高低取决于所采用的钻井方法和完井技术。近十年来，钻水平井比钻直井增加的费用明显下降。列于表 1-2 和表 1-3 的一些早期水平井工程表明，在 70 年代后期和 80 年代初期，水平井的费用是直井的 6~8 倍，到 80 年代中后期，水平井的费用只有直井的 2~3 倍。

决定费用高低的附加因素是在已知地区的钻井经验。通常第一口水平井的费用比第二口井要高得多，因此在已知地区钻的水平井越多，增加的费用就越少，这说明需要一个学习的过程。

现场经验和所公布的加拿大冷湖^[7]、阿拉斯加普鲁德霍湾^[8]、印尼近海^[9]、荷兰海上^[10]、美国奥斯汀白垩层^[11]和美国达科他北部的 Bakken 层^[12]的水平井费用表明：钻井费用有明显下降。总的说来，在上述工程中，第一口水平井的费用是直井的 2~4 倍，但钻 7 口井以后，水平井的费用一般只是直井的 1.4 倍。在某些情况下，掌握了多方面的钻井经验后，水平井的费用几乎与直井相同，乃至低于直井费用^[7]。这就告诉我们，从经济角度考虑，最佳的选择是着手多口而不是单口水平井的钻井方案。

阿拉斯加普鲁德霍湾^[8]地区的 16 口水平井钻井及完井费用如图 1-3 和图 1-4 所示，两图表明：最初钻井费用随时间推移开始下降了，并在近两年保持了稳定，但完井费用持续稳定了四年。如图 1-5 和图 1-6 所示，在加拿大和得克萨斯奥斯汀白垩层钻的井也分别见到了类似的费用趋势^[7,8a]。

如上所述，水平井的费用是直井的 1.4~3 倍多。为经济上的成功，水平井不仅应成比例地（相应地）提高可采储量，而且会比直井花费的时间短。假如原油初始采收率是相同的（每英亩英尺采出的原油桶数相同），那么，以大于直井的井距钻水平井，能获得较大的可采储量。