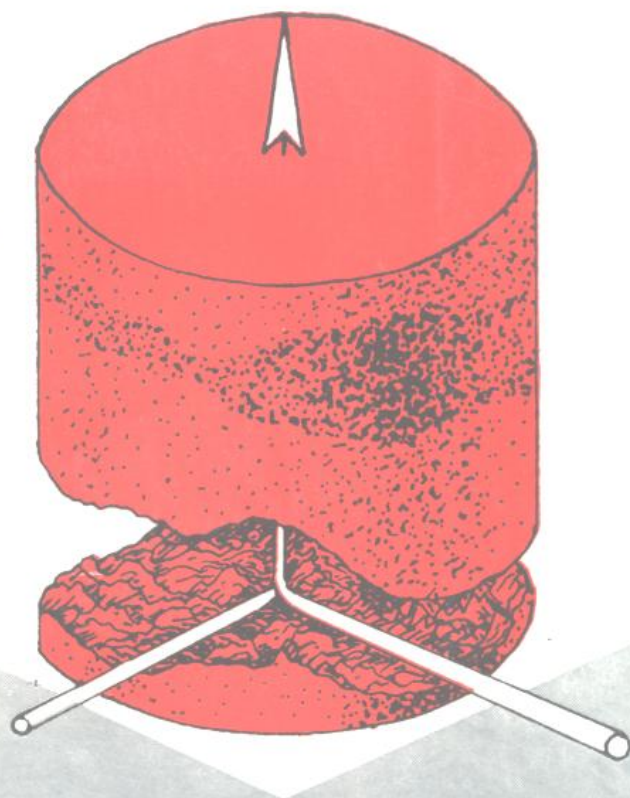


水平井开采技术

万仁溥 等编译 王鸿勋 审校



石油工业出版社

登录号	126799
分类号	TE243
种次号	012

水平井开采技术

万仁溥 等 编译

王鸿勋 审校



石油0122075

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是以 S.Joshi 著的“Horizootal Well Technology”和 R.Aguilera 等著“Horizontal Wells”为蓝本,针对我国水平井开发油气田的现状和急待解决的问题,结合世界上水平井技术的发展趋势,有选择地编译了这两本书的部分重要内容,并使之系统化。主要是为了在篇幅所限的情况下,包含更多的技术内容,达到适用性强和可读性强的目的。

本书首先综述了水平井技术的发展历史、现状和趋势;接着重点介绍了水平井的完井、测井和试井技术,分析比较了水平井与压裂垂直井的生产动态和技术特点,以及水平井与垂直井的气水锥进问题;最后专题性地讲述了水平井在开采气藏、稠油油藏和裂缝油藏中的具体应用。本书的特点是以大量的实例说明具体问题。书后附有水平井的压降计算方法和油藏工程基础这两个附录。

本书可供从事油气田钻井、测井和开采的工程技术人员以及大专院校师生阅读学习。

本书由万仁溥(序言、第一章)、谢朝阳(第二、三章)、郑俊德(第四章)、张书芹(第五章)、张继芬(第六章)、卿路(第七章)、阎熙照(第八章)、吕德本(第九章)、储昭来(第十章)、王鸿勋(第十一章)、张士诚(附录一)和叶敬东(附录二)编译,全书由王鸿勋审校。

水平井开采技术

万仁溥 等 编译

王鸿勋 审校

*

石油工业出版社出版发行
(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 $22\frac{5}{8}$ 印张 599 千字 印 1-2000

1995 年 3 月北京第 1 版 1995 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-1158-1 / TE · 1067

定价: 24.00 元

序 言

52/70/31

水平井技术从80年代起，配套技术已日趋完善，并相继在美国、加拿大、法国等国应用，特别是在陡峭油层，垂直裂缝、稠油和气顶、底水等油层中使用，均见到明显增产效果。因此到80年代末，1989年已钻水平井约1000口，并且每年以200口井的数量递增，采用水平井技术的国家也有所增加，如意大利近海，英国北海油田、丹麦近海、印尼近海等国家。我国于近两年也加入到采用水平井技术的行列之中。

水平井技术的发展，解决了一些直井所不能解决的问题，对提高动用现有一些特殊和难以应用的地质储量，确实是一项技术上的突破。对油田开发是一大贡献。水平井技术的使用是有一定条件的，不可能代替现有的直井技术，而是对现有直井开采技术的补充和发展。因此应该因地制宜地选用。

当今的水平井技术（再不是早期局限于水平井钻井技术）应当包括石油地质、油藏工程、油田开发、钻井、完井、测井、射孔、测试、试井、采油及井下作业等技术，应该在油藏工程研究的基础上，搞好水平井的油田开发方案，根据这个方案去代选钻井和完井方式。从而提高水平井整体开发水平，以便动用更多的地质储量和提高油田的最终采收率。

这次编译此书的目的，就是让更多的技术人员全面系统地了解和掌握水平井技术，以便更好地利用此技术，并能在油田开发和发展中发挥作用。

目 录

第一章 水平井技术回顾	1
第一节 引言	1
第二节 水平井的界限	3
第三节 水平井的应用	15
第四节 钻井技术	16
第五节 基于钻井技术与泄油面积确定水平井的长度	20
第六节 完井技术	23
第七节 总结	29
第二章 完井	34
第一节 完井计划	34
第二节 水平井装备	41
第三节 水平井筒内作业	46
第四节 射孔	51
第五节 下套管井测井	58
第六节 水平井的增产措施	61
第三章 测井	85
第一节 管柱输送式测井系统	85
第二节 连续油管输送电缆测井系统	90
第三节 随钻测井技术	93
第四节 测井解释	94
第五节 电阻率特性模拟	100
第六节 孔隙度和含水饱和度	105
第七节 实例	105
第八节 水平井测井技术展望	113
第四章 产能计算	115

第一节	引言	115
第二节	水平井稳态的产能	116
第三节	水平井的有效井筒半径	136
第四节	斜井的产能	141
第五节	斜井和水平井的产能比较	150
第六节	水平井的地层污染	152
第七节	矿物实例	158
第五章	水平井和压裂垂直井的比较	161
第一节	垂直井压裂	161
第二节	裂缝类型	165
第三节	水平井和有限导流裂缝的比较	175
第四节	裂缝性油藏中的水平井	181
第五节	水平井压裂	182
第六章	不稳定试井	198
第一节	引言	198
第二节	数学解及其实用性结论	201
第三节	一般的流动状态	206
第四节	压力响应	207
第五节	各流动状态的详细试井	209
第六节	压力导数	226
第七节	井筒储存效应	228
第八节	实际考虑的问题	232
第七章	拟稳态流	244
第一节	垂直井的拟稳态通用公式	246
第二节	垂直井的形状因子	247
第三节	压裂垂直井的形状因子	252
第四节	水平井的形状因子	260
第五节	水平井拟稳态的产能计算	264
第六节	部分射开的水平井流入动态	286
第七节	溶解气驱油藏中水平井的流入动态 (IPR) 关系式	293

第八节 预测溶解气驱油藏中的水平井动态	298
第八章 直井和水平井的气水锥进	307
第一节 引言	307
第二节 临界产量定义	309
第三节 直井的临界产量关系式	309
第四节 生产试井计算临界产量	319
第五节 递减曲线分析	322
第六节 直井见水	325
第七节 直井见水后的状态	334
第八节 含水率与采收率关系图特征	344
第九节 水平井的气水锥进	346
第十节 底水驱油藏中水平井水突破时间	358
第十一节 气顶油藏或底水油藏中水突破时间	364
第十二节 有气顶的底水油藏中水平井的气水突破时间	368
第十三节 边水驱油藏中水平井的临界产量	373
第十四节 实际问题的考虑	377
第十五节 实例	378
第九章 天然气藏中的水平井	393
第一节 天然气储量评估	393
第二节 天然气在多孔介质中的流动	401
第三节 水平井的应用	412
第四节 生产样板曲线	431
第五节 实例	437
第十章 稠油的热采和一次开采	444
第一节 引言	444
第二节 综述	445
第三节 研究稠油开采方法的基础	447
第四节 热采方法	449
第五节 蒸汽辅助重力泄油 (SAGD) 方法	472
第六节 驱替法和重力泄油法的结合	550

第七节	热力采油的驱替	564
第八节	蒸汽沿水平注入井的分布	587
第九节	稠油的一次开采	588
第十一章	天然裂缝油藏的开采	594
第一节	地质情况	594
第二节	钻井与完井	600
第三节	试井分析	602
第四节	裂缝性页岩	622
附录 A	水平井筒内的压力降	628
第一节	引言	628
第二节	高压力降的影响	629
第三节	降低井筒内高压力降的方法	630
第四节	水平井筒内的压力降	640
第五节	对完全稳定流动摩擦系数的说明	645
第六节	井筒弯曲部分的压力降	649
第七节	井筒尺寸和衬管尺寸	650
第八节	水平井内单相流压力降	650
第九节	水平井内多相流压力降	665
第十节	实际考虑的问题	672
附录 B	油藏工程基础	675
第一节	引言	675
第二节	表皮效应	677
第三节	有效井筒半径	684
第四节	采油指数	688
第五节	流动区域	689
第六节	平面非均质的影响	699

第一章 水平井技术回顾

第一节 引言

水平井技术早在 1928 年就已经提出，40 至 70 年代，美国、苏联等国钻了一批水平井试验井，因当时受技术水平所限，各项技术不配套，虽然能钻成水平井，但难以用于生产，同时，钻井费用高，因此限制其发展。70 年代后，随着新技术发展，加上一些特殊油藏用直井的方法已无法开发，或者效益很低，因而，水平井技术又提到议事日程上来。美国、加拿大、法国等国开展了用水平井开发油气藏的研究，在水平井油藏工程、钻井、完井、测井、射孔，增产措施、井下工具以及井下作业等方面均有重大突破，进入 80 年代，水平井开采技术已逐步配套，截止到 1990 年底，全世界已钻水平井 1200 多口，大多数水平井在生产中都见到明显的效益，特别是在一些垂直裂缝井、陡峭的成油层和稠油层更是如此。我国于 1965 年在四川钻了两口水平井，近两年来，大庆、胜利、辽河、华北、新疆、中原等油田，和南海及渤海海上油田也相继钻了一批水平井，说明中国也进入水平井开采技术行列之中。

钻水平井的目的就是尽可能多钻穿油层，从而提高油井单井产量和提高注入量（注水、注汽等），从而获得更高的采收率。一般来说，水平井是平行于油藏层面，但对陡峭成层的油层和垂直裂缝的油层来说，水平井则是横穿这些油层（见图 1—1 及图 1—2），因此，制定水平井方案时，要认真做好油藏工程的研究，搞清油藏成层状况，再选择钻井技术和完井方式。

制定水平井的方案与直井方案有所不同，因为水平井要尽可能钻进多套油层或在油层中钻进更长的长度（见表 1—1），这取

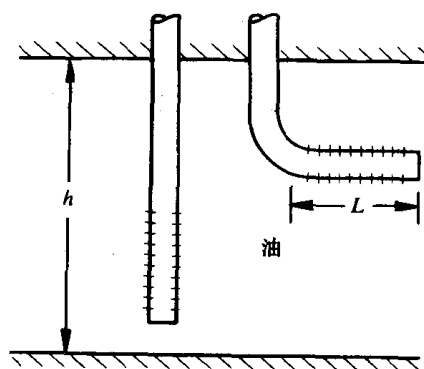


图 1—1 垂直层面直井与平行层面水平井示意图

表 1—1 水平井长度

类型	井径 in	半径 ft	实录 ft	设计 ft
超短 ^①		1~2		100~200
短 ^②	4 ³ / ₄	30	425	250~350
(转盘)	6	35	889	350~450
短 ^②	4 ³ / ₄	40	—	—
(泥浆马达)	3 ³ / ₄	40	—	—
中长曲率	4 ¹ / ₂	300	1300	500~1000
	6	300	2200	1000~2000
	8 ¹ / ₂	400~800	3350	1000~3000
	9 ⁷ / ₈	300	—	—
长	8 ¹ / ₂	1000	4000	1000~3000
	12 ¹ / ₄	1000~2500	1000	—

①一口直井钻多方位水平井。

②直井不同井深多个泄油孔。

③1990年初,中、长曲率水平井的进尺在4500ft以上。

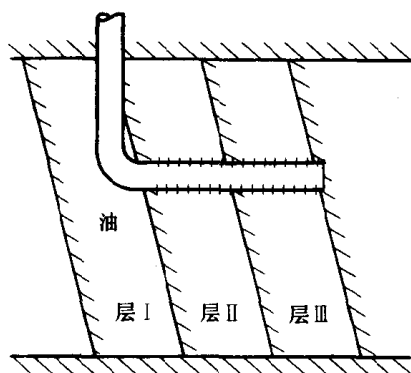


图 1—2 垂直油藏层面的水平井

决于对油藏工程的研究和钻井技术，因此，关键的是油藏工程师与钻井工程师合作和共同工作，选择适合于水平井的油藏和水平井布井方式及水平段长度。

水平井完井方式及程序：完井方式是水平井技术重要的一环，可采用裸眼完井、割缝衬管或割缝衬管加管外封隔器，或下套管注水泥射孔完成。上述方式主要取决于油藏物性和该地区的实际经验。完井方式对于水平井今后能否正常生产或者进行多种作业是非常重要的。某种钻井方式只能适应于某种完井方式。因此，油藏工程师非常重要的一点，就是懂得不同方式钻井技术和完井方法的适应性的其他优缺点，同样，钻井工程师、完井工程师、采油工程师和地质师也必须懂得相互的关系，以及对水平井开采的影响，因此，不同专业的合作和协同工作对保证完成水平井方案是至关重要的。一个水平井方案的制定和实施是需要多专业方面的知识，这样才能达到经济上的成功。

第二节 水平井的界限

前面所述，水平井的主要优点是钻穿油层长度长和油藏接触面积大，当前，可以钻达 3000~4000ft 长度的水平段。因此比

直井与油藏接触面明显增大。但其主要的缺点是一个油层只能钻一口水平井。然而，最近水平井已可用于钻多油层，这可以用两种方法：1) 钻阶梯式井，用长水平井段钻穿一个以上的油层；2) 在水平井中，水泥固井射孔，加砂压裂形成垂直于水平井段的垂直裂缝与多油层相交随之多层出油，但应该强调的是，在某些情况下，每个油层或夹层具有不同的强度，所形成的裂缝可能沟通不到不同高度的油层。

水平井另一个缺点就是成本高。总的来说，钻井和完井的费用要比直井高 1.4~3 倍。水平井成本高于直井的状况近十年有明显地降低。一些早期的水平井方案已列于表 1—2 和表 1—3，这些都是 70 年代和 80 年代早期的情况，那时成本高于直井 6~8 倍，到了 80 年代中期和后期，水平井成本仅高于直井的 2~3 倍。

根据一些油田，水平井现场实践和发表的资料来看，如加拿大冷湖、美国普鲁德霍湾和阿拉斯加、印尼近海、丹麦近海、美国奥斯汀白垩系地层，以及美国北 Dakota 的 Bakken 地层钻水平井其成本在过去一段时间都明显地降低。在这些地区，第一口水平井的成本比直井高 2~4 倍，但钻了几口井以后，成本降至 1.4 倍，在这种情况下，若总结以往的经验，水平井的成本将会进一步降低到接近或低于直井的成本，这就告诉我们为了获得经济上的成功，优选选择的方案应该是多个水平井而不是钻一口水平井。

对阿拉斯加、普鲁德霍湾的 16 口水平井和完井成本见图 1—3a 和 1—3b。如图所示，钻井成本从一开始即下降，过去两年中一直保持此水平，然而，完井成本在过去四年中一直维持此水平，图 1—4a 和 1—4b 所示，分别与加拿大和德克萨斯、奥斯汀白垩系地层的成本有相同的趋势。

如上所述，水平井较直井成本仅高 1.4~3 倍，为了获得经济上的效益，同时，水平井获得的可采储量不仅应按比例地增加，而且应比直井的开采时间要短。若假设水平井和直井的采收

率是一样的（即桶/英亩·尺是一样）那么，为了采出更多的可采储量，水平井要比直井采用更大的井网。

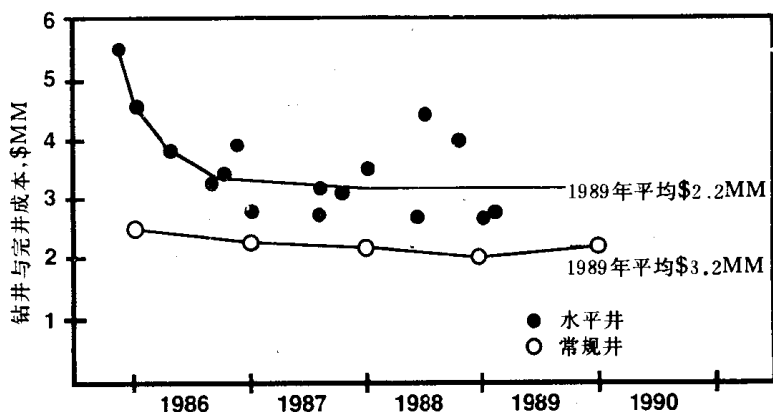


图 1—3a 普鲁德霍湾、阿拉斯加
水平井与垂直井成本对比

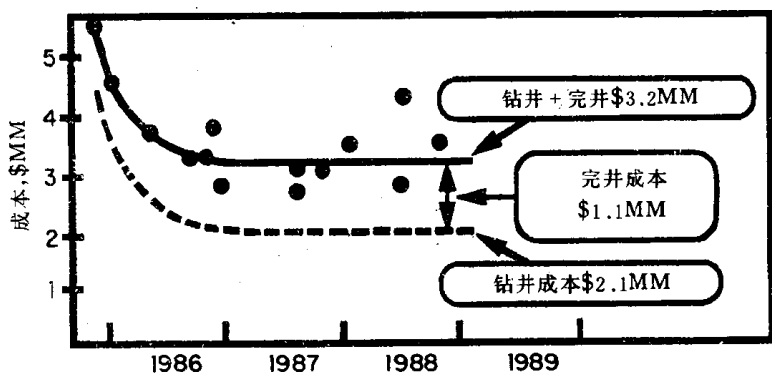


图 1—3b 普鲁德霍湾、阿拉斯加
水平井钻井与完井成本比较

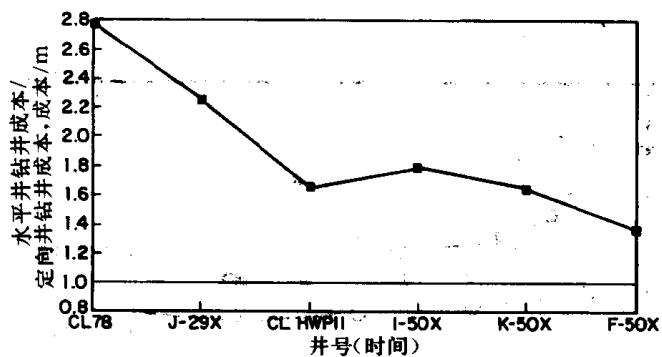


图 1—4a 加拿大 Norman Wells
水平井与定向井成本对比

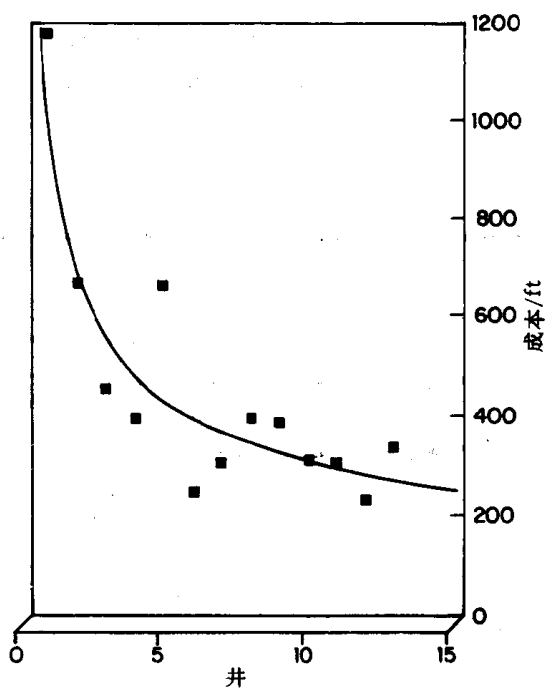


图 1—4b 德克萨斯奥斯汀上白垩统
地层水平井钻井成本

表 1—2 水平井钻井

年	公司	油田	井数	井深 (ft)	进入油藏长度 ft	水平井成本 直井成本	备注
1937	—	Yarega, USSR	许多		1000 (最大)	—	注汽, 日产油大约 10000bbl
1939~1941	LeoRanney.et al	McConnesville, Ohio	6	388	1000	—	坑道
1942		Franklin Henry Field	4	388	1000	非常高	坑道
		Venago County, Pennsylvania	4	1100	600	—	
1942(?)	—	Midway Sunset, San Joaquin Valley, California	2	1650	70	—	使用井下马达与柔性钻杆
		Round Mountain Field, Kern County, California	9	—	200	—	使用井下马达与柔性钻杆
1946				1200	50	—	坑道
						—	6个泄油孔
1946	New Tech Oil.		117			—	
	Malta, Ohio	—		3700	50	—	6个泄油孔
1952		San Joaquin Valley, California (Midway Sunset)	1	10000	10~50 (?)	—	降低气锥

续表

年	公司	油田	井数	井深 (ft)	进入油藏长度 ft	水平井成本 直井成本	备注
1952	Venezuelan Oil Concessions, Ltd.	La pas Field, Western Venezuela	?	3500	50	—	每井 6~8 个泄油孔, 一些 多油层并在一个深度上 钻多个泄油孔
1952	Long Beach Oil Development CO.	Los Angeles Basin Area (Wilmington Field)	8	至 4800 1000	300	—	生产井
1957		USSR	1				
1967		China	1	3600	1600	—	产液量比直井多 5~10 倍, 但几天后井塌
1968		Marcovo, East Siberia, USSR	1	7200	1800	—	
		Cold Lake, Alberta	1(?)	1558	1000	8~12	由地面钻入非胶结砂岩 层, 注汽

续表

1979	Conoco	Tisdale, Wyoming	6	—	1700(最大)	—	坑道
1979	Texaco	Fort McMurry, Alberta	3	415	1000	5~6	注气, 现在关井
1979	Esso, Canada	Normal wells under Mckenzie River	2	1603	1860	—	
		Alberta, Canada	1	2195	330	4.3	由地面开钻
1980~1981	Elf-Aquitaine	Lacq Field, Southwest France	1	4100	1214	3.5	由地面钻
			1	4500	1988	2.1	钻入裂缝石灰岩层, 产量是 直井的 15 倍, 降低了水锥
	Elf-Aquitaine	Lacq Field, Southwest France		9500	1300	2.1	既提高产量, 又降低了石灰 岩层的水锥
1981~1983	Elf-Aquitaine	Rospo Mare, Offshore Italy					
	Elf-Aquitaine	Casterla Lou, South France	1	6200	300~400	2	地面钻新井