

070415

国外油气新科技丛书

深井钻井技术译文集

徐云英等译

石油工业出版社

编 者 的 话

当今是科技迅速发展的时代，信息至关重要。石油工业则是技术密集、资金密集和风险很大的产业。为了节约资金和减少风险，引用各种新的科学技术成果，就成为发展石油工业的必由之路。

十多年来，我国的石油科技工作者，在党的改革开放方针的指引下，在学习国外先进的石油科学技术方面，取得了很大的成绩，促进了我国石油科技的迅速发展，同时，也为发展我国的石油工业作出了应有的贡献。

但是，从信息传播的速度和广度来看，还不能适应广大石油科技工作者的需要。为了解决这个问题，我们推出这套丛书。

在内容方面，这套丛书按石油科技中不同的专业，如石油地质、石油储运、石油经济……分成单册。每个专业里又根据当前我国石油工业急需的科技课题，从国外最新发表的文章中进行挑选后，组织翻译。有的还是由若干文章进行编译的。

我们希望广大石油科技工作者喜爱这套丛书，并请不吝赐教，以便改进工作。

国外油气新科技丛书编委会

国外油气新科技丛书编委会

主 任：李昭仁

副主任：安作相 于秀琳 段云舫

委 员：（按姓氏笔划为序）

于秀琳 马家骥 孔秀兰 司徒丽丽

安作相 吕德本 牟永光 李昭仁

李希文 陈广田 张 炎 林素珍

段云舫 胡文海 徐云英 章兆淇

陶世楨

《深井钻井技术译文集》编委会

主 任：徐云英

委 员：王同良 郭建强 崔允安 段云舫

徐云英

目 录

一、国外深井钻井概况及先进技术·····	(1)
二、钻超深井以研究地壳·····	(53)
三、加利福尼亚最深井的钻井情况·····	(74)
四、中东地区深库夫井的钻井、完井和测试技术···	(95)
五、北Padre岛960-L1号井的深海钻进情况 ·····	(127)
六、一口26英寸井眼钻至12550英尺的钻井实例 ···	(175)
七、在俄克拉何马州西南部的阿纳达科盆地一口 24325英尺井眼的设计与钻进 ·····	(203)
八、路易斯安那州中北部一口深探井的设计、钻进 和评价·····	(219)
九、Bighorn1-5井：怀俄明州中部Wind河盆地 Madden背斜上一口25000英尺深的前寒武系探 井·····	(241)
十、西科罗拉多超深排污井的典型实例·····	(256)
十一、深井完井作业中生产套管的设计·····	(278)
十二、改进防喷器的密封系统是高温高压深探井 井控工作的当务之急·····	(297)
附录 本书所用常用许用单位与非许用单位换算表 ·····	(309)

一、国外深井钻井概况及先进技术

徐云英、张祖兴、王同良 编译
徐同台、赵忠举、杨金华

1. 概 况

随着油气勘探开发工作不断向深部地层扩展，深井钻井的规模日益扩大，目前已成为油气钻井的重要组成部分。

自从1938年美国钻成第一口4573米的深井以来，深井钻井技术已经有了很大的发展。1949年美国钻成6255米的超深井，1972年又把深井纪录提高到9583米。目前苏联科拉半岛上的SG-3井已经打破了这项纪录，井深达到了12200米，还在继续钻进。人类大约花了半个世纪把井深从4500米提高到12000米。

美国把井深超过4570米的井叫深井，把井深超过6100米的井叫超深井。现在世界各国基本沿用这种划分。从60年代以来，全世界能钻4500米深的井的国家有80多个，其中大约有20个国家能钻6000米以上的超深井。

美国是世界上钻深井历史最长和工作量最大的国家。表1-1列出了1938~1989年美国4570米以上深井钻井的技术经济指标。表1-2列出了美国1970~1986年6100米以上的超深井钻井技术经济指标。1938~1988年美国累计钻深井15040口，约占资本主义世界深井总数的90%。美国的深井、超深、

表1-1 1938~1988年美国超过

年份	井数	探井	共有 生产井	平均 钻头数/井	平均钻井液 成本 \$/井	平均单井 成本 \$
1938	1	1	1	—	—	—
1944	1	1	0	—	—	—
1945	3	3	0	222	—	—
1946	1	1	1	—	—	—
1947	8	8	1	181	24000	570000
1948	7	6	2	303	28000	551000
1949	11	8	5	199	64000	534000
1950	5	8	3	181	63000	557000
1951	12	5	6	116	54000	527000
1952	25	17	9	138	66000	549000
1953	25	14	20	159	75000	729000
1954	56	30	31	117	92000	651000
1955	80	63	43	87	116000	649000
1956	155	77	78	89	122000	683000
1957	185	114	89	89	121000	743000
1958	197	136	100	79	107000	692000
1959	228	142	119	71	83000	650000
1960	242	134	136	66	86000	675000
1961	243	84	153	63	81000	614000
1962	254	74	130	63	92000	654000
1963	271	96	128	52	97246	696000
1964	308	141	150	51	95507	653256
1965	330	117	156	59	90160	610784
1966	388	130	149	71	84007	727996
1967	402	142	192	67	96375	762676

4570米的深井钻井技术经济指标

平均成本 \$/m	总钻井进尺 m	平均井深 米/井	新 纪 录	
			最深井 m	最深生产井 m
—	4573	—	4573	4015
—	4657	—	4657	—
—	14400	4800	5076	—
—	4710	—	—	—
117	38749	4843	5372	4238
113	34238	4891	—	4345
107	55056	5005	6255	4733
121	23947	4789	—	—
110	57870	4823	—	—
114	120960	4838	—	4880
147	122815	4931	6548	5445
134	271888	4855	—	—
132	389095	4864	6876	—
138	765063	4873	—	6323
152	910694	4896	—	—
142	966753	4883	—	—
133	1115829	4894	7724	—
139	1176108	4860	—	—
125	1194305	4915	—	—
125	1345479	5182	—	—
141	1341535	4950	—	6526
129	1559338	5162	—	6643
120	1692414	5101	—	6736
139	2040265	5258	—	6853
140	2063304	5133	—	—

年份	井数	探井	共有 生产井	平均 钻头数/井	平均钻井液 成本 \$/井	平均单井 成本 \$
1968	406	150	194	65	100305	889991
1969	389	116	206	54	101529	866349
1970	381	168	189	54	117874	999343
1971	417	149	210	60	146049	949959
1972	509	230	290	44	103507	919484
1973	506	213	272	38	122067	1107059
1974	446	220	258	37	168426	1456522
1975	410	191	190	37	197279	1901917
1976	439	186	255	33	214276	2112509
1977	476	233	233	30	221490	2205954
1978	604	306	288	29	253082	2577216
1979	621	248	279	30	414000	3599000
1980	859	433	462	32	478906	4560090
1981	1066	530	598	35	526638	5467372
1982	1205	536	600	37	568954	6636988
1983	577	255	301	32	620000	6095000
1984	614	345	288	35	457000	5817000
1985	566	282	284	35	495000	5574000
1986	391	195	174	30	537000	5435000
1987	302	114	149	25	308699	3409067
1988	421	132	161	24	253000	4159000
1989	307	99	129	23	439000	4052000

续表

平均成本 \$/m	总钻井进尺 m	平均井深 米/井	新 纪 录	
			最深井 m	最深生产井 m
171	2112640	5204	—	6946
167	2017537	5187	—	—
190	2005544	5264	7802	—
180	2202925	5283	—	—
178	2616183	5170	9159	6873
209	2685568	5307	—	—
276	2354902	5280	9583	—
360	2163571	5277	—	—
400	2317407	5279	—	—
419	2508516	5270	—	8097
494	3155460	5224	—	—
685	3264299	5257	—	—
871	4497470	5236	—	—
1027	5560489	5216	—	—
1255	6373807	5289	—	—
1160	2985213	5173	—	—
1142	3130462	5098	—	—
1079	2925580	5169	—	—
1047	2031975	5197	—	—
643	1539385	5097	—	—
813	2150873	5109	—	—
771	1612111	5251	—	—

表1-2 美国1970—1986年超过

年 份	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
井数, 口	53	57	49	73	65	46	59	50
其中: 探井数, 口	21	20	26	37	34	25	31	34
开发井数, 口	32	37	23	37	31	21	28	16
平均井深, m	6585	6647	6656	6680	6578	6512	6646	6594
平均单井成本, $\times 10^3 \$$	1622	1547	1850	2000	2609	3270	3602	3959
平均每米成本, \$	246.0	232.68	277.85	299.33	396.5	502.07	541.86	600.21
平均每井钻井液 费, $\times 10^3 \$$	197	235	236	219	294	350	369	377
平均每米钻井液 费, \$	29.8	35.29	35.39	32.77	44.8	53.79	55.53	57.17
每井用钻头数, 只	92	106.1	79.3	52.0	54.2	50.5	53.4	46.6
每只钻头平均进 尺, m	71.6	62.79	83.82	128.32	121.3	128.93	124.36	141.43
每井用金刚石钻头 数, 只	3.7	1.5	2.4	1.8	—	2.6	2.6	—
每井耗用管材, t	—	—	—	—	—	—	—	—
每井管材费用, $\times 10^3 \$$	—	—	—	—	—	—	—	—
成功率, %	66.0	70.2	60.3	62.2	67.7	47.8	67.5	48.0
探井成功率, %	33.3	25.0	50.0	45.9	50.0	28.0	67.7	29.4
开发井成功率, %	87.5	94.6	78.3	78.4	87.1	71.4	67.9	87.5
总费用, $\times 10^3 \$$								
钻井液	—	13378	11542	16196	19111	16112	21782	18853
钻井	—	68105	69757	98675	101003	10645	176419	155739
完井	—	—	—	—	—	—	—	—
总费用	—	88178	90639	148,019	169615	150440	212516	197930
总进尺, $\times 10^4 m$	34.9	37.9	32.6	49.4	42.8	30.0	39.2	23.0

6100米的超深井技术经济指标

1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
59	64	81	81	132	37	28	33	33	5
30	33	50	57	82	16	14	10	28	
29	31	31	24	50	21	14	23	5	
6450	6573	6597	6567	6589	6606	6811	6818	6653	
4303	6932	8361	9957	11242	9967	11332	12608	12452	
666.89	1054.22	1266.97	1515	1706	1512	1663	1850	1870	
434	872	999	1041	1068	820	906	1302	1057	
67.21	132.58	151.34	157	161	125	134	190	157.5	
43.0	47.0	45.5	47	60	49	51	63	47	
149.96	139.90	145.08	144	170	168	134	108	141.4	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	
—	—	—	—	—	964	1084	1119	985	
—	—	—	—	—	2376	2822	2726	1825	
44.1	31.3	51.9	60.5	41.7	62.2	536	66.7	33.3	
23.3	24.2	50.0	54.4	29.3	43.7	28.6	60.0	32.2	
65.5	38.7	54.8	75.0	62.0	76.2	64.3	69.6	40	
25589	57793	80887	84284	140939	30354	24468	42969	34884	
194872	338821	548703	674994	1316263	333044	241198	336272	323476	
—	73048	115981	129065	166926	27111	49764	60327	44328	
253855	443627	677231	806537	1483931	368764	298868	416088	410919	
38.0	42.1	53.4	53.2	87	24.4	19.1	22.5	22	

井主要集中在得克萨斯、路易斯安那、俄克拉荷马和密西西比等四个州，这些地区的深井数占美国深井总数的80%以上。

美国深井钻井投资大，数量多。1982年钻井高峰期，深井钻井和完井的年投资达80亿美元，当年钻深井1205口。80年代中、后期因油价下降深井钻井和完井投资减少，1989年深井钻井和完井投资降为12.4亿美元，当年钻深井307口。

重视深井钻井设计。在设计前认真进行调查研究，收集邻井有关的一切资料，仔细分析研究。对设计井的地质和地层情况与邻井作对比分析，再根据本井的钻井目的做出完整的设计方案，以保证实现深井优质、安全和快速钻进。

严格深井的组织管理。美国各大石油公司设有勘探部、开发部、油藏工程部和钻井部等机构，下设地区作业经理负责管理钻井工作。深井钻井设计确定后，石油公司就要选择一家合适的钻井公司来实施设计和承包钻井工程，同时选定一个执行工程设计方案的钻井总监和一名地质总监。石油公司通过地区作业经理、钻井总监来实现对钻井工作的管理。另一方面，钻井公司在接受工程承包合同后，就派出钻井队去完成任务。石油公司除选择钻井公司承包钻井工程外，还要选择录井公司、钻井液公司、测井公司、固井公司等来承包各个专项作业，以保证全井优质安全施工。

由于这种完善的设计和严密的管理，使得美国深井的钻井速度快、事故少。目前，美国钻一口5000米左右的井约需90天，钻5500米左右的井约需110天，钻6000米的井约需140天，钻7000米的井约需7~10个月。井下复杂情况所占时间

约为5~15%左右。

目前美国的最深井纪录仍保持为9583米。

苏联自70年代开始投入大量的资金和人力进行深部油气资源的勘探和开发。

苏联石油部于1971~1975年共钻成4500米以上的深井582口，其中5000米以上的200口，6000米以上的10口，7000米以上的3口。1976~1980年钻成深井338口，其中探井225口，开发井113口。到1980年为止，苏联共钻深井大约1200口左右。

苏联通过深部勘探发现了一系列的油气资源。东西伯利亚的最深井位于维柳伊河天然气区，设计井深6500米。

乌克兰的深气井已钻达6000米，天然气产量为538万立方米。

克拉斯诺达尔边区在4500米以下的地层中发现了油气藏。

科米地区的乌克第尔凝析气田从5500米处获得天然气流。

阿塞拜疆海上气田已开采5500~6000米深处的天然气。

里海海上发现了许多大气田，井深都超过了4500米。

东臣一印古什正在开采4500~5000米深处的油藏。

由于新区钻井工作量增加和老区的深层投入钻探开发，苏联平均井深不断增加，预计1990年北高加索地区的平均钻井深度将增加到5000米，下伏尔加地区将增加到4300米，乌克兰地区将增加到4000米。西西伯利亚的钻井深度也将急剧增加。因此，苏联整个深井的钻井工作量也会大大增加。

除油气勘探开发外，苏联还于1962年决定制定全苏超深井钻探计划，于60年代开始认真着手超深钻探的准备工作。计划将全苏划分出22个地区准备钻7000~12000米的超深井。其中11个地区供综合研究地下资源，以便确定苏联主要地区的含油量和含矿量。目前已定了约20口7000~12000米深的探井井位，分布在乌克兰、高加索、乌拉尔山脉、科米共和国和里海北部盆地。

苏联已在科拉半岛上钻一口超深井，SG-3井，设计井深15000米。该井于1970年5月开钻，原计划1990年之前钻达15000米，但目前只钻达12200米左右，创造了世界最深井纪录，该井尚在继续钻进，但进度很慢。

另一口超深井SG-1井在阿塞拜疆的萨特雷，设计井深11000米，该井于1977年7月开钻，1982年8月钻达8180米，由于出现许多问题，又无法钻达设计深度。根据钻井所获得的资料证明克拉河盆地周围的古生代地层中有烃类存在。

通过超深钻井的研究和实践，苏联在超深井钻机制造、超深井钻井工艺、井身设计、深井涡轮钻具、钻头、取心工具、热稳定钻井液和铝合金钻杆等方面取得了一系列成就。

欧洲大陆的第二口超深井是1984年3月由奥地利钻成的，井深8551米。

根据1989年的报道，西德正计划钻一口近14000米的超深井，钻这口世界最深井的计划将于1989年末开始实施，这项工程是属联邦德国大陆超深钻井计划(KTB)，由联邦德国研究和技术发展部提供经费，下萨克森州的地质调查局负责管理。预计需要花2.5亿美元，到1996年整个计划完成需

要8年时间。该井位于windsche schenbach村的西面5公里处，选择此地是根据区域地质成因的基础，此处最古老的地层形成于6亿年之前，后来这个区域处于巨大的大陆板块的应力场中，地层广泛褶皱。这项计划主要用于基础地质、地球物理和地球演进过程的研究。预计对地震和火山的研究有重要意义，对于弄清矿藏、地下水和碳氢化合物的形成和分布也极为重要。

为了实现该计划，需要发展新的技术和专用的钻井设备，要求能钻到地下14000米的结晶岩中。计划从地面到总井深全部取心，并在地壳深部进行地球物理和地球化学测量。大约有300多位科学家将参加大约100个不同的与超深井钻井有关的项目，该井钻成后，这口井以及地面设备可能留作深井实验室。

实际上，从1987年9月开始在此处已经用一台普通常规钻机在进行钻井。这个预备井眼的目标井深是5000米，研究和技术发展部说1989年夏季可达到此深度。项目管理部门认为用普通钻机对开始的5000米进行钻进和取心是最经济的办法。因此主要的行动将于1989年末实施，用一台专门为此计划设计的钻机和设备进行钻井。

除美、苏、奥地利、西德外其他国家如意大利、法国、加拿大、委内瑞拉、挪威、西班牙、荷兰、澳大利亚、阿拉伯联合酋长国等都钻过井深超过4500米的井。

世界平均钻4500米以上深井的技术经济指标见表1-3。

表1-3 1982~1989年世界平均钻4500米以上深井的

技术经济指标

年份	井数 口	总进尺 m	平均井深 m	钻井成本		钻头数和进尺	
				单井 \$	每米成本 \$	耗用量 只/井	进尺 m/井
1982	72	7.12×10^5	5168	1.911×10^7	3968	53	96
1983	109	5.6×10^5	5138	1.591×10^7	3096	53	112
1984	93	4.69×10^5	5098	1.719×10^7		46	110
1985	133	6.64×10^5	4991	1.296×10^7		46	109
1986	124	6.20×10^5	5000	7.98×10^6	1597	40	123
1987	106	5.40×10^5	5090	9.41×10^6	1850	48	107
1988	156	6.92×10^5	5011	1.099×10^7	2194	32	157
1989	168	8.57×10^5	5098	9.80×10^6	1923	27	192

2. 深井优化设计

深井和超深井钻井是一项费用很高的工程，为保证安全、经济和快速钻成深井或超深井就要有一整套正确的设计方案。这包括：钻机和设备的选择、套管程序设计、钻头序列设计、钻井参数设计、钻井液设计、钻柱结构设计、测井和录井设计等。

在进行深井设计前，必须认真调查该地区的地质、地震资料、邻井的钻井、录井和测井资料，弄清地层岩性、可钻性、地层压力、油气水分布及各种可能遇到的复杂情况。在资料调查和分析的基础上，做好各项设计。

1) 钻机和设备的选择

要求选用先进的钻机和设备，要求设备功率大、基础稳固、配套齐全、自动化程度高。钻机及提升系统能满足提升

最重套管柱及钻柱载荷及钻进的需要。泥浆泵组要能提供喷射钻井和清洗井眼的水功率。井架负荷能力及立根盒容量要符合设计要求。底座高度要能装3~4套防喷器组,要有完善的井控系统,防喷器组、节流管汇、控制系统等都要符合深井地层压力要求。所有的设备、器材事先都要进行认真严格的检查,以保证安全。

2) 套管程序设计

套管程序设计是保证有效的、安全的和最优的完成钻井的关键。对一个新的勘探地区来说,没有一种唯一的、完美无缺的套管程序。对于每一口井来说,每一个套管程序都是暂定的、灵活的、要不断地根据实际情况来重新审定。因此,最优的套管程序,是靠不断分析以及积累补充资料 and 新的经验产生的,而不是简单决定的和一次完成的。

套管程序设计的主要原则和方法是:根据地层孔隙压力梯度和破裂压力梯度,并接近平衡压力钻井的要求,确定各井段的钻井液密度和各层套管下入深度。从井底向上设计每层套管,保证完钻时有合适的井眼尺寸。对于复杂地层和新探井应加大一级井眼尺寸,以便必要时能留有余地可多下一层套管。为了减少复杂情况,表层套管应尽量下深些。每层套管下深不得大于该地层压差卡钻的临界深度。同时应尽可能避免在同一裸眼井段内出现两个不同压力系统的地层。

表1-4为深井、超深井典型的井眼/套管尺寸的配合。

图1-1为美国几个不同沉积盆地中深井的典型套管程序。

图1-2和表1-5为美国几个具有异常压力的盆地所用的典型套管尾管程序。