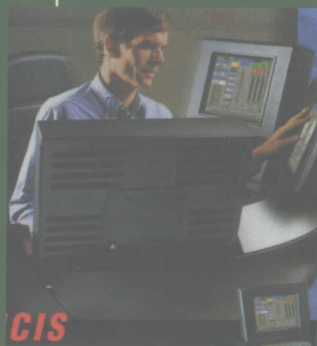
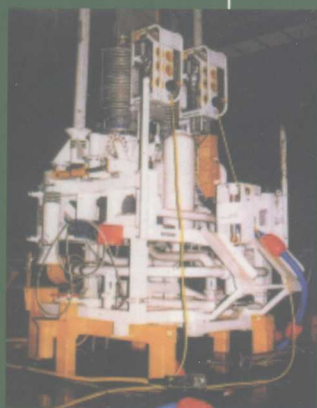
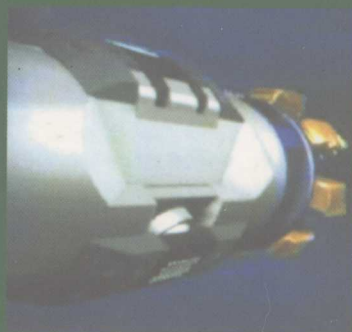


# 钻井技术新进展

王同良 孙清德 张丽东 编著



中国石化出版社

# 钻井技术新进展

王同良 孙清德 张丽东 编著

中国石化出版社

## 内 容 提 要

90年代以来,随钻测井技术、导向钻具实时控制和钻井过程的智能化,为钻井技术和作业带来巨大的变化,适应不同环境和条件的大位移井钻井技术、多分支水平钻井技术、欠平衡钻井技术和连续管钻井技术的成熟和应用更丰富了这一变化。预计21世纪初钻井作业技术将完全进入科学钻井时代。本书是作者在调研和工作过程中所积累的经验 and 体会。全书论述深入浅出,资料翔实,充分展示了该领域的技术新进展。

本书可供从事油气勘探开发的管理人员、技术人员以及有关高等院校的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

钻井技术新进展/王同良 孙清德等编著.

—北京:中国石化出版社,2001

ISBN 7-80164-132-9

I. 钻… II. 王… III. 油气钻井-技术-进展-国外

IV. TE242-11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 061114 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010) 84271859

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: [press@sinopec.com.cn](mailto:press@sinopec.com.cn)

廊坊市测绘院印刷厂排版

廊坊市测绘院印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销



\*

787×1092 毫米 16 开本 9 印张 230 千字 印 1-1500

2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

定价: 30 元

# 目 录

|                                          |       |
|------------------------------------------|-------|
| 绪论 .....                                 | ( 1 ) |
| 水平井钻井技术 .....                            | (15)  |
| 概述 .....                                 | (15)  |
| 技术关键 .....                               | (15)  |
| 水平井钻头 .....                              | (15)  |
| 井下动力钻具 .....                             | (15)  |
| 导向钻井及轨迹实时控制 .....                        | (15)  |
| 水平井钻井技术实例 .....                          | (15)  |
| 实例 1  休斯公司的牙轮钻头 .....                    | (15)  |
| 实例 2  Security 公司的 PDC 钻头 .....          | (16)  |
| 实例 3  Slinkrill 公司的钻井液马达 .....           | (16)  |
| 实例 4  大功率的串联马达和加长马达 .....                | (16)  |
| 实例 5  铰接式钻井马达 .....                      | (17)  |
| 实例 6  水平井开发低渗油田 .....                    | (17)  |
| 实例 7  Chuchupa 气田的水平井 .....              | (21)  |
| 分支井钻井技术 .....                            | (26)  |
| 概述 .....                                 | (26)  |
| 技术关键 .....                               | (26)  |
| 开窗侧钻 .....                               | (26)  |
| 预设窗口 .....                               | (26)  |
| 裸眼侧钻 .....                               | (26)  |
| 井下分支系统 (Down Hole Splitter System) ..... | (27)  |
| 分支井钻井技术实例 .....                          | (27)  |
| 实例 1  Wytch Farm 油田 .....                | (27)  |
| 实例 2  Troll Olje 气田的分支井 .....            | (27)  |
| 实例 3  割缝衬管完井 .....                       | (29)  |
| 实例 4  双侧向水平井的衬管完井 .....                  | (30)  |
| 大位移井钻井技术 .....                           | (34)  |
| 概述 .....                                 | (34)  |
| 技术关键 .....                               | (34)  |
| 测量和定向控制 .....                            | (34)  |
| 扭矩与阻力 .....                              | (34)  |
| 最优的井身剖面 .....                            | (34)  |
| 钻井液性能 .....                              | (34)  |
| 钻柱设计 .....                               | (35)  |

|                                           |      |
|-------------------------------------------|------|
| 井眼稳定 .....                                | (35) |
| 井眼净化 .....                                | (35) |
| 套管需要考虑的问题 .....                           | (35) |
| 大位移井钻井技术实例 .....                          | (36) |
| 实例 1 大位移井在 Wytch Farm 油田的应用 .....         | (36) |
| 实例 2 钻柱模拟器 .....                          | (38) |
| 实例 3 在 Wytch Farm 油田设计的造斜率 .....          | (39) |
| 实例 4 钻井液 .....                            | (39) |
| 实例 5 大位移井在挪威 Gullfaks 油田的应用 .....         | (39) |
| 实例 6 挪威 Statfjord 油田 C2 大位移井 .....        | (42) |
| 实例 7 挪威 Oseberg 油田 C-26A 大位移井 .....       | (44) |
| 大位移井完井技术 .....                            | (45) |
| <b>地质导向钻井技术</b> .....                     | (48) |
| 概述 .....                                  | (48) |
| 技术关键 .....                                | (48) |
| 随钻测量/测井技术 .....                           | (48) |
| MWD 简介 .....                              | (49) |
| LWD 简介 .....                              | (49) |
| 旋转导向系统 .....                              | (51) |
| 地质导向钻井技术实例 .....                          | (52) |
| 实例 1 旋转导向系统 .....                         | (52) |
| 实例 2 挪威 Statfjord 油田 C-23 井引入闭环钻井系统 ..... | (52) |
| <b>欠平衡钻井技术</b> .....                      | (56) |
| 概述 .....                                  | (56) |
| 技术关键 .....                                | (56) |
| 欠平衡钻井技术实例 .....                           | (57) |
| 实例 1 欠平衡钻井井控 .....                        | (57) |
| 实例 2 微泡型钻井液 .....                         | (58) |
| 实例 3 模型和井下模拟技术 .....                      | (58) |
| 实例 4 特殊工具 .....                           | (60) |
| 实例 5 加拿大的 3W5M 井 .....                    | (61) |
| 实例 6 冲击钻井、可转向井下钻具和欠平衡三种钻井技术的综合应用 .....    | (62) |
| 实例 7 彩虹 13-4 井的欠平衡钻井技术应用 .....            | (63) |
| 实例 8 扎马 16-13 井的欠平衡钻井技术应用 .....           | (63) |
| 实例 9 Harmattan11-18 井的欠平衡钻井技术应用 .....     | (63) |
| <b>小井眼钻井技术</b> .....                      | (67) |
| 概述 .....                                  | (67) |
| 技术关键 .....                                | (67) |
| 小井眼钻井技术实例 .....                           | (68) |
| 实例 1 小井眼钻头及马达 .....                       | (68) |

|                                         |             |
|-----------------------------------------|-------------|
| 实例 2 小井眼取心的双体钻头 .....                   | (69)        |
| 实例 3 小井眼钻机 .....                        | (70)        |
| 实例 4 井控专家系统 .....                       | (71)        |
| 实例 5 小井眼井控实验及其结果 .....                  | (71)        |
| 实例 6 Brent 油田小井眼钻井 .....                | (71)        |
| 实例 7 Yibal 油田小井眼钻井 .....                | (72)        |
| <b>深井超深井钻井技术 .....</b>                  | <b>(76)</b> |
| 概述 .....                                | (76)        |
| 技术关键 .....                              | (76)        |
| 深井超深井钻井技术实例 .....                       | (76)        |
| 实例 1 用于深井的 T160 钻机设备 .....              | (76)        |
| 实例 2 用于深井的钻头 .....                      | (77)        |
| 实例 3 用于深井的旋转导向钻井系统 .....                | (77)        |
| 实例 4 用于深井的旋转式闭合回路钻井系统 .....             | (79)        |
| 实例 5 用于深井的自动垂直钻井工具 .....                | (79)        |
| 实例 6 适合于复杂深井的复合抑制钻井泥浆 .....             | (81)        |
| <b>连续管钻井技术 .....</b>                    | <b>(84)</b> |
| 概述 .....                                | (84)        |
| 技术关键 .....                              | (84)        |
| 连续管钻井技术实例 .....                         | (85)        |
| 实例 1 复合材料连续管 .....                      | (85)        |
| 实例 2 连续管口径尺寸 .....                      | (85)        |
| 实例 3 连续管的地面设备 .....                     | (85)        |
| 实例 4 连续管的井下工具 .....                     | (87)        |
| 实例 5 连续管钻井用钻机 .....                     | (89)        |
| 实例 6 连续管钻井在阿曼的应用 .....                  | (89)        |
| 实例 7 阿科公司的连续管钻井应用 .....                 | (90)        |
| 实例 8 BP 阿莫科公司的连续管钻井应用 .....             | (91)        |
| 实例 9 彩虹 13-4 井的连续油管钻井技术应用 .....         | (91)        |
| 实例 10 扎马 16-13 井的连续油管钻井技术应用 .....       | (92)        |
| 实例 11 Harmattan11-18 井的连续油管钻井技术应用 ..... | (92)        |
| 实例 12 Shell 公司实施的世界上最大的连续管钻井项目 .....    | (92)        |
| 实例 13 壳牌在北海 CN30 井的连续管钻井技术应用 .....      | (93)        |
| 实例 14 壳牌在加拿大用连续管欠平衡钻井技术侧钻水平井 .....      | (94)        |
| <b>套管钻井技术 .....</b>                     | <b>(97)</b> |
| 概述 .....                                | (97)        |
| 技术关键 .....                              | (97)        |
| 套管钻井技术实例 .....                          | (98)        |
| 实例 1 套管钻井专用钻机 .....                     | (98)        |
| 实例 2 套管用混合钻机 .....                      | (98)        |

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 实例 3 钻井方式 .....                       | (99)  |
| 实例 4 泥浆泵驱动装置 .....                    | (103) |
| 实例 5 美国 4 口井的套管钻井技术应用 .....           | (103) |
| 实例 6 在深水区用直径 406.4mm 衬管钻井 .....       | (103) |
| <b>保护油气层技术</b> .....                  | (107) |
| 地层损害机理研究 .....                        | (107) |
| 地层损害测试方法的研究 .....                     | (107) |
| 保护油气层技术实例 .....                       | (108) |
| 实例 1 新的评价方法 .....                     | (108) |
| 实例 2 颗粒封堵 .....                       | (109) |
| 实例 3 盐粉悬浮钻井液 .....                    | (110) |
| 实例 4 新型过油管地层封堵系统——PatchFlex 系统 .....  | (111) |
| 实例 5 在北海 Forties 平台等井的实施 .....        | (111) |
| <b>固井技术</b> .....                     | (115) |
| 概述 .....                              | (115) |
| 技术关键 .....                            | (115) |
| 固井技术实例 .....                          | (115) |
| 实例 1 固井用新型结构套管及应用 .....               | (115) |
| 实例 2 固井中应用的防气窜水泥及凝固油基泥浆 .....         | (116) |
| 实例 3 改善深气井固井效果的水泥浆体系 .....            | (117) |
| 实例 4 解决常规固井用的混液态水泥 .....              | (118) |
| 实例 5 北海 Graben 中部地区极高温/高压井固井 .....    | (118) |
| <b>完井技术</b> .....                     | (122) |
| 概述 .....                              | (122) |
| 技术关键 .....                            | (122) |
| 完井技术实例 .....                          | (123) |
| 实例 1 挪威 Osberg 油田 C-26A 大位移完井作业 ..... | (123) |
| 实例 2 挪威 Statford 油田 C2 井 .....        | (123) |
| 实例 3 美国 Santa Clara 油田 .....          | (124) |
| 实例 4 欠平衡完井工艺 .....                    | (124) |
| <b>总结</b> .....                       | (126) |
| <b>建议</b> .....                       | (130) |
| <b>致谢</b> .....                       | (137) |
| <b>参考文献</b> .....                     | (138) |

# 绪 论

中国石油钻井工作量已位居世界第三，仅次于美国和俄罗斯。中国石油天然气集团公司 (CNPC) 非常重视石油钻井科技研究工作，自 70 年代后期以来，CNPC 先后制定了 5 个五年石油科技 (包括钻井科技) 发展规划并付诸实施。钻井技术方面着重研究了喷射钻井、聚合物钻井液、定向井、丛式井、保护油层技术、优选参数钻井、平衡压力钻井技术、水平井、深井、特殊水平井、小井眼钻井和欠平衡钻井技术等，钻井科技水平有了很大发展，同时各项钻井技术经济指标有了很大提高，大大缩短了我国石油钻井技术水平与先进国家的差距，取得了很大成绩。

尽管如此，根据对中国、美国和世界的钻井技术经济指标及其它相关资料的分析研究，中国的石油钻井科技水平与美国及世界的水平还有相当大的差距。

差距主要表现在：

## 1. 井数

CNPC 的年钻井数，1997 年是 9048 口，比 1980 年增长了 226.2%，1996 年曾突破 1 万口大关，其中定向井数已占总井数的 33%。但 1986~1997 年间 CNPC 的年钻井数量大约只占世界钻井总数的 11%~14%，只相当于美国陆上钻井数量的 19%~37%；而美国总计钻井数占了世界的 40%~62% (1986 年是 61.9%)。但 CNPC 的钻井数几乎是呈直线增加的趋势，1980~1997 年年均增长 7.2%，而美国陆上钻井数量 1984~1997 年年均减少 8.2%。美国钻井数量在世界中的比重呈下降趋势，而 CNPC 呈略微增长的趋势 (图 1)。

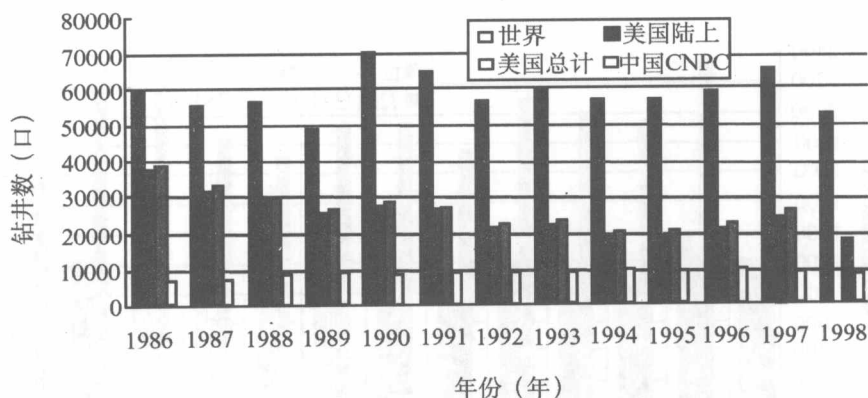


图 1 1986~1998 年 CNPC、美国陆上、美国总计和世界钻井数

注：1991 年以前的世界年井数不包括东欧和前苏联数据

## 2. 进尺

CNPC 的年钻井进尺，1997 年是  $1749.9 \times 10^4 \text{m}$ ，比 1979 年增长了 176.2%。但 1986~1997 年间 CNPC 的钻井进尺大约只占世界钻井总进尺的 11%~17%，只相当于美国陆上钻

井进尺的 24%~42%；而美国总计钻井进尺占了世界的 35%~61%（1986 年是 60.9%）。但 CNPC 的钻井进尺呈快速增加的趋势，1979~1997 年年均增长 5.8%，而美国陆上钻井进尺 1984~1997 年年均减少 6.6%。美国钻井进尺在世界中的比重呈下降趋势，而 CNPC 呈略微增长的趋势（图 2）。

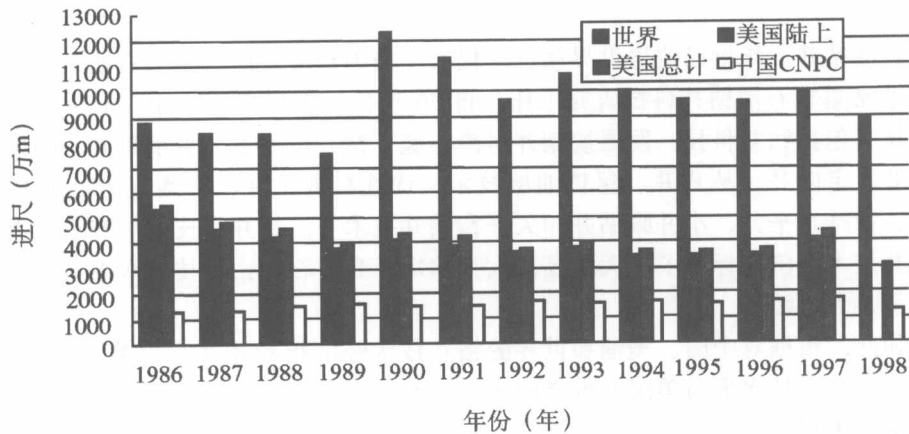


图 2 1986~1998 年 CNPC、美国陆上、美国总计和世界钻井进尺对比图

注：1991 年以前的世界年进尺不包括东欧和前苏联数据

### 3. 动用钻机数

1986~1997 年间 CNPC 动用钻机数大约占世界动用钻机数的 30%~53%，相当于美国陆上动用钻机数的 81%~136%；而美国总计动用钻机数占了世界的 43%~45%。中美两国动用钻机合计大约占了世界动用钻机数的 75% 以上（图 3）。

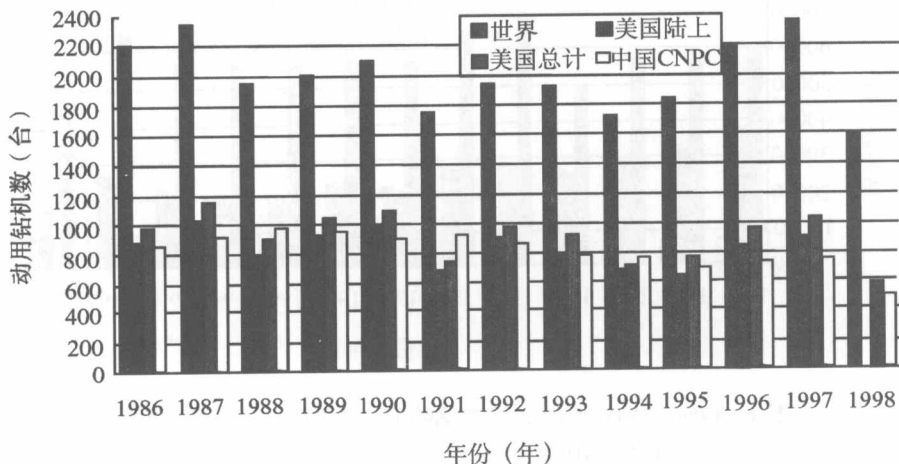


图 3 1986~1998 年 CNPC、美国陆上、美国总计和世界动用钻机数对比图

注：世界钻机数不包括前苏联数据

CNPC 动用钻机数在 1988 年达到 975 台之前一直是随时间增长的, 此后, 由于技术的进步, 尽管钻井工作量 (井数和进尺) 在不断增加, 但动用钻机数则明显呈下降趋势 (1997 年减到 741 台), 即钻井工作量与动用钻机数成反比线性关系 (式 1~4、图 4~5)。

$$1980 \sim 1988 \text{ 年: } Y_{\text{钻机数}} = 505.9 + 0.052X_{\text{井数}} \quad (1)$$

$$1988 \sim 1996 \text{ 年: } Y_{\text{钻机数}} = 2116.8 - 0.134X_{\text{井数}} \quad (2)$$

$$1979 \sim 1988 \text{ 年: } Y_{\text{钻机数}} = 484.3 + 0.303X_{\text{进尺}} \quad (3)$$

$$1988 \sim 1997 \text{ 年: } Y_{\text{钻机数}} = 2518.2 - 1.05X_{\text{进尺}} \quad (4)$$

上 4 式中:  $Y_{\text{钻机数}}$ ——CNPC 年动用钻机数, 台;

$X_{\text{井数}}$ ——CNPC 年钻井数, 口;

$X_{\text{进尺}}$ ——CNPC 年进尺, 万 m。

在 1983~1997 年间, 美国的动用钻机数年均减少 5.5%, 但美国的动用钻机数与钻井井数和进尺有着很强的正比线性关系 (式 5~6, 图 6)。这说明在 80 年代末期中国的钻井

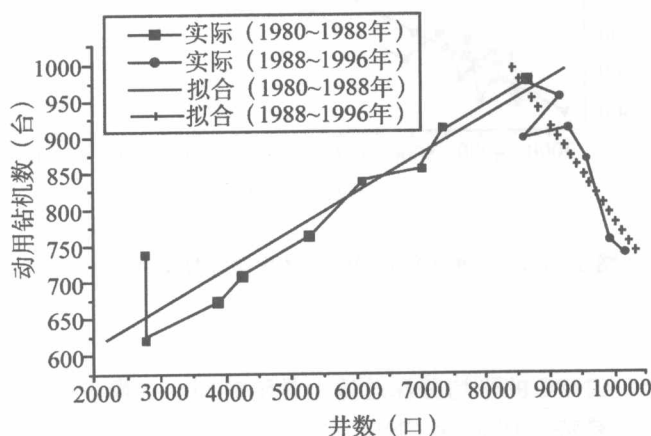


图 4 1980~1996 年 CNPC 动用钻机数与井数的关系

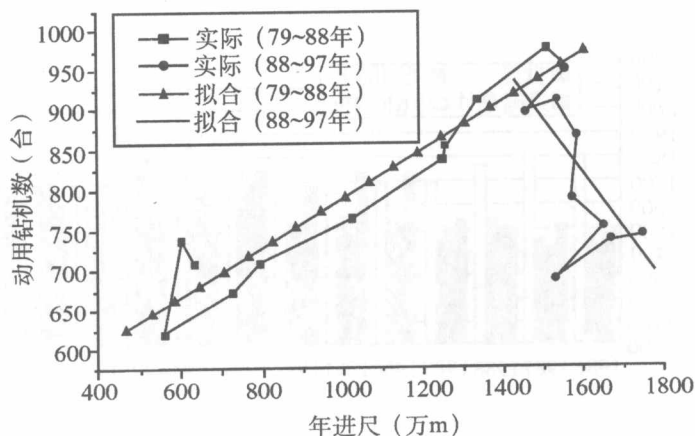


图 5 1979~1997 年 CNPC 年动用钻机数与进尺的关系

技术取得了突破性的进展，而美国没有发生这样的变化。

$$1983 \sim 1997 \text{ 年: } Y_{\text{美国钻机数}} = 204.4 + 0.025X_{\text{美国井数}} \quad (5)$$

$$1983 \sim 1997 \text{ 年: } Y_{\text{美国钻机数}} = 18.423 + 0.208X_{\text{美国进尺}} \quad (6)$$

上式中:  $Y_{\text{美国钻机数}}$ ——美国陆上动用钻机数, 台;

$X_{\text{美国井数}}$ ——美国陆上年钻井数, 口;

$X_{\text{美国进尺}}$ ——美国陆上年进尺, 万 m。

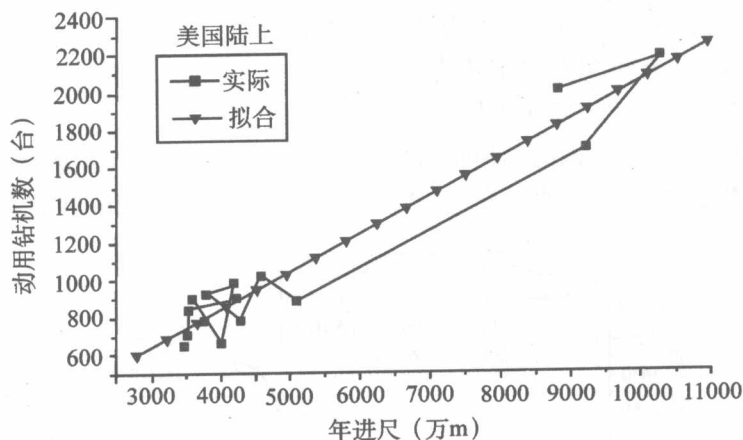


图 6 1983~1997 年美国陆上动用钻机数与进尺的关系

#### 4. 平均井深

由图 7 可以看出, CNPC 的平均井深总体上是随时间呈缓慢下降趋势, 而美国和世界平均井深则呈缓慢增长趋势。1986 年 CNPC 的平均井深是 1785.4m, 是同年美国陆上平均井深的 127.3%, 是世界的 121.5%; 1996 年, CNPC 的平均井深是 1643.9m (1997 年是 1934m, 比较异常), 是同年美国陆上平均井深的 96.5%, 是世界的 101.8%。美国总计平均井深与世界的平均井深基本差不多, 相差幅度在 6% 以内。

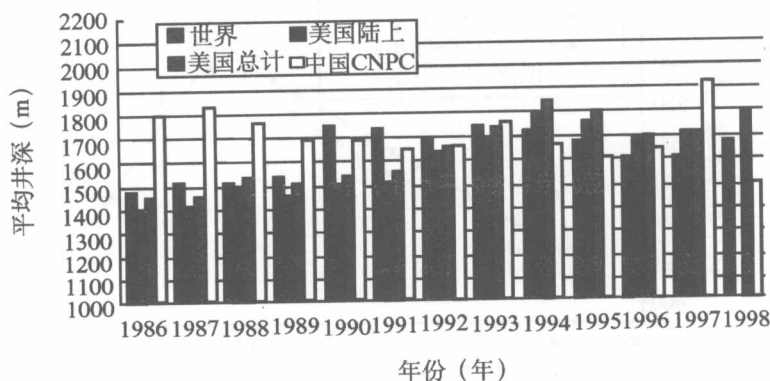


图 7 1986~1998 年 CNPC、美国陆上、美国总计和世界钻井平均井深对比图

注: 1991 年以前的世界平均井深不包括东欧和前苏联数据

从逻辑上来讲, 钻井进尺与平均井深应该存在正比关系。根据 1980~1998 年 CNPC 的相关数据进行回归计算, 得到式 (7) 线性回归方程和图 8, 可以看出 CNPC 的钻井进尺总体上与平均井深实际上是成反比关系的。这说明决定进尺多少的主要是井数而不是平均井深。这一点与美国的情况是非常一致的。

$$Y_{\text{进尺}} = 4507.9 - 1.77X_{\text{井深}} \quad (7)$$

式中:  $Y_{\text{进尺}}$ ——CNPC 年钻井进尺, 万 m;

$X_{\text{井深}}$ ——CNPC 平均井深, m。

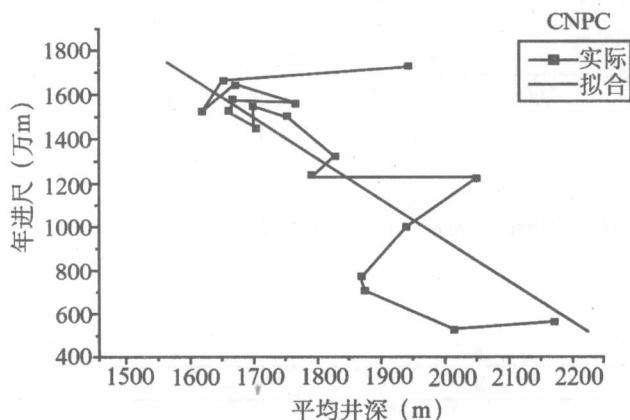


图 8 1980~1998 年 CNPC 进尺与平均井深的关系

平均钻机台年进尺与平均井深应该存在逻辑上的反比关系。根据 1980~1998 年 CNPC 的相关数据进行回归计算, 得到式 (8) 线性回归方程和图 9。可以看出, CNPC 的平均钻机台年进尺与平均井深总体上存在反比关系。从图 10 可以看出, 1983~1997 年美国陆上的平均钻机台年井数和平均台年进尺与平均井深总体上存在反比关系。这一点与 CNPC 的情况是一样的。

$$Y_{\text{台年进尺}} = 51341.5 - 19.45X_{\text{井深}} \quad (8)$$

式中:  $Y_{\text{台年进尺}}$ ——CNPC 平均动用钻机台年钻井进尺, m/台·年;

$X_{\text{井深}}$ ——CNPC 平均井深, m。

### 5. 钻机台年井数

由图 11 可以看出, CNPC 的平均动用钻机台年井数基本上是随时间呈增长趋势, 由 1986 年的 8.2 口/台·年增长到 1997 年的 12.2 口/台·年, 年均增长 3.68%。这主要是由于 CNPC 钻井技术进步的作用, 另一个原因是平均井深有所下降 (1986~1996 年平均井深年均下降 0.82%)。

由图 11 可以看出, 美国和世界的平均动用钻机台年井数是随时间呈下降的趋势。美国陆上的平均动用钻机台年井数由 1986 年的 40.4 口/台·年下降到 1997 年的 27 口/台·年, 年均增长 -3.6%。出现这种情况的一个重要原因可能是美国的平均井深在不断增加 (同期年均增加 1.83%)。

尽管在平均动用钻机台年井数的发展速度上中美两国是相反的, 但在 1986~1997 年间, CNPC 的平均动用钻机台年井数只是美国陆上的 20%~46%, 世界的 27%~44%; 美国陆

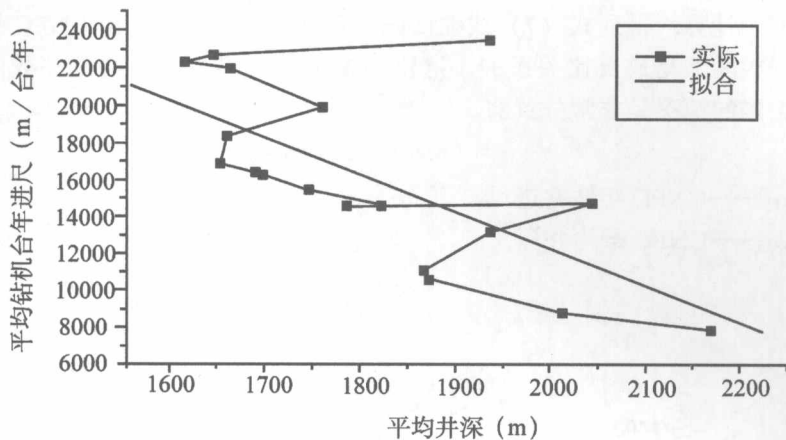


图 9 1980~1998 年 CNPC 平均井深与平均台年进尺的关系

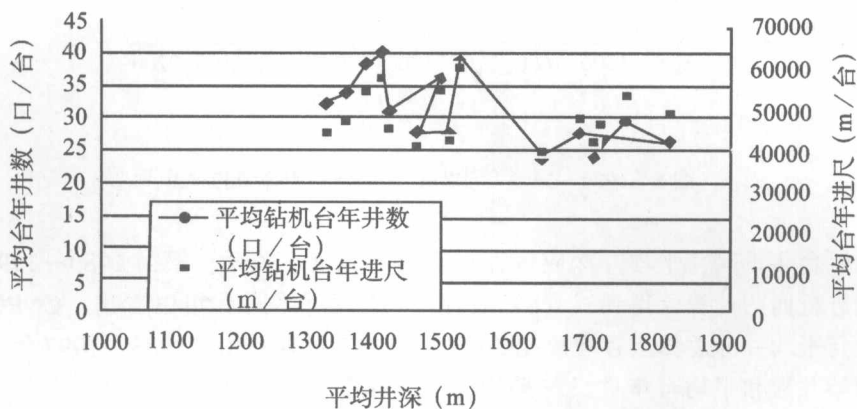


图 10 1983~1997 年美国陆上平均井深与钻机台年井数和台年进尺的关系

上的平均动用钻机台年井数是世界的 150%~97%，美国总计的平均动用钻机台年井数是世界的 140%~92%。这说明 CNPC 的钻井技术水平与美国和世界还有很大差距。

## 6. 钻机台年进尺

由图 12 可以看出，CNPC 的平均动用钻机台年进尺基本上是随时间呈增长趋势，由 1986 年的 14711m/台·年增长到 1997 年的 23613m/台·年，总增长 60.5%，年均增长 4.4%。这充分说明了 CNPC 钻井技术进步是比较明显的。

由图 12 可以看出，美国和世界的平均动用钻机台年进尺随时间呈下降的趋势，美国陆上的平均动用钻机台年进尺由 1986 年的 56706.4m/台·年下降到 1997 年的 46200.9m/台·年，年均增长 -1.85%。出现这种情况的重要原因可能是美国的钻机大量富余、闲置和美国的平均井深在不断增加（同期年均增加 1.83%）。

尽管在平均动用钻机台年进尺的发展速度上中美两国是相反的，但在 1986~1997 年间，CNPC 的平均动用钻机台年进尺只是美国陆上的 25%~52%，世界的 25%~53%；美国陆

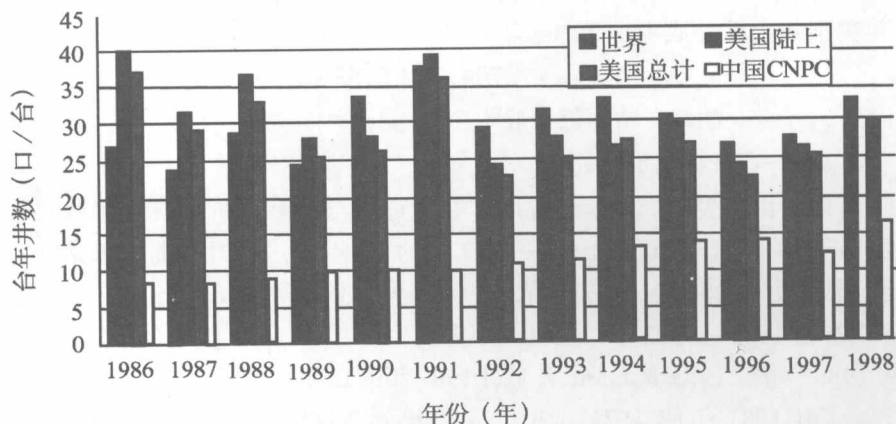


图 11 1986~1998 年 CNPC、美国陆上、美国总计和世界台年井数对比图

注：世界台年井数不包括东欧和前苏联数据

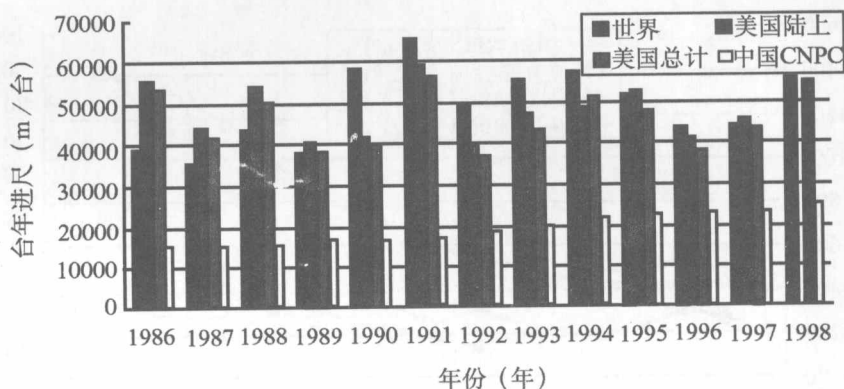


图 12 1986~1998 年 CNPC、美国陆上、美国总计和世界台年进尺对比图

注：世界台年进尺不包括东欧和前苏联数据

上的平均动用钻机台年进尺是世界的 142%~90%，美国总计的平均动用钻机台年进尺是世界的 137%~86%。美国陆上钻机台年进尺早在 1983 年就达到了 43302m，而 CNPC 的钻机台年进尺在 1998 年才达到 25073m（平均井深只有 1513.8m）。1996 年，CNPC 和美国陆上的平均井深分别为 1644m 和 1704m，CNPC 和美国陆上的平均钻机台年进尺分别为 22717m 和 41801m，在 CNPC 的平均井深比美国陆上还浅的情况下（相当于 96.5%），CNPC 的平均钻机台年进尺只有美国的 54%。这说明 CNPC 的钻井技术水平与美国和世界还有很大差距。

## 7. 每米钻井成本

由图 13 可以看出，CNPC 的平均每米钻井成本一直是随时间呈快速增长趋势，与中国原油价格存在比较密切的正比关系（式 9）。CNPC 的平均每米钻井成本由 1980 年的 400.4 元/m 增长到 1997 年的 1428.1 元/m，总增长 256.7%，年均增长 8.3%，大大高于同期美

国陆上每米钻井成本的 0.7% 的增长速度。1996 年 CNPC 钻井成本相当于 172 美元/m, 仍然比 1996 年美国陆上钻井成本少 30%。

$$Y_{\text{每米成本}} = 704.22 + 0.83X_{\text{油价}} \quad (9)$$

式中:  $Y_{\text{每米成本}}$ ——CNPC 钻井每米成本, 元/m;

$X_{\text{油价}}$ ——CNPC 油价, 元/t。

从图 13 可以看出, 美国的每米钻井成本变化趋势与国际油价的变化趋势比较一致, 存在一定程度的正比关系 (式 10)。1980~1997 年的 17 年间, 美国陆上每米钻井成本相对来讲比较稳定, 总体上在 200 美元/m 左右, 绝大部分时候是在 150~250 美元/m 之间。美国陆上的钻井成本在 1980~1987 年间一直是下降的, 自 1987 年后有升有降。美国陆上的每米钻井成本从 1980 年的 219.3 美元/m 增加到 1997 年的 266.0 美元/m, 总增长为 21.3%, 年均增长 0.7%; 由 1987 年的 157.2 美元/m 增长到 1997 年的 266.0 美元/m, 总增长为 69.2%, 年均增长 5.4%。

$$Y_{\text{美国每米成本}} = 155.8 + 2.68X_{\text{油价}} \quad (10)$$

式中:  $Y_{\text{美国每米成本}}$ ——美国陆上每米钻井成本, 美元/m;

$X_{\text{油价}}$ ——国际油价, 美元/bbl。

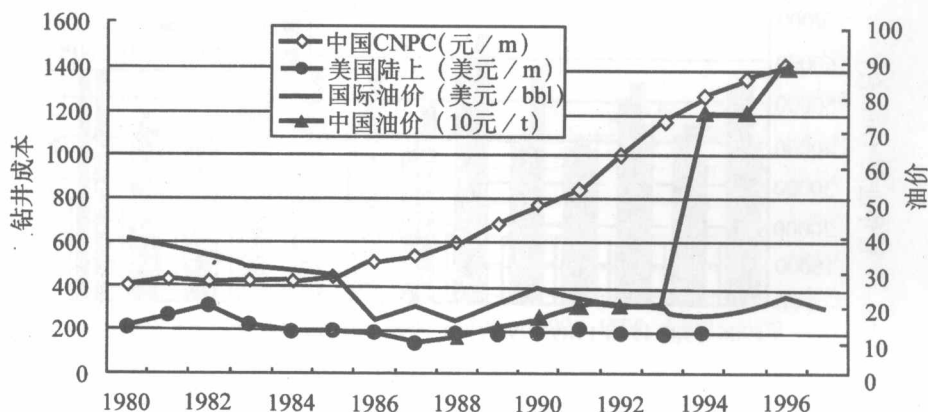


图 13 中国、美国历年每米钻井成本及油价

注: 中国油价 1988~1993 年取的是大庆平价油价, 1994~1996 年取的是 1 档大庆油价, 国际油价是 WTI 油价 (资料来源: 美国《石油基础数据手册》1996 年 9 月、中国《石油工业统计提要》和英国《BP 世界能源统计》1998 年 6 月)。

平均每米钻井成本与平均井深应该存在逻辑上的正比关系, 即平均井深越深, 每米钻井成本越大。根据 1980~1998 年 CNPC 的相关数据进行回归计算, 得到式 (11) 线性回归方程和图 14, 可以看出, CNPC 的平均每米钻井成本与平均井深总体上存在反比关系, 即平均井深越深, 每米钻井成本越小。之所以出现这种反比关系, 主要是因为在过去的十几年中, CNPC 的平均井深越来越浅, 而平均每米钻井成本越来越高, 而且每米钻井成本增加的速度高于平均井深变浅的速度。从图 15 上看, 虽然美国陆上平均每米钻井成本与平均井深关系的规律性不是很强, 但总体上是存在正比关系, 即平均井深越深, 每米钻井成本越大。这一点与 CNPC 的情况相反。

$$Y_{\text{每米成本}} = 3838.3 - 1.71X_{\text{井深}}$$

式中:  $Y_{\text{每米成本}}$ ——CNPC 平均每米成本, RMB 元/m;

$X_{\text{井深}}$ ——CNPC 平均井深, m。

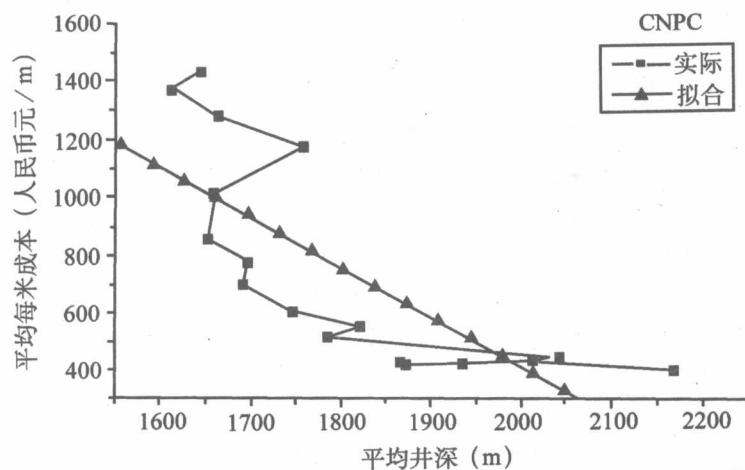


图 14 1980~1998 年 CNPC 平均井深与每米钻井成本的关系

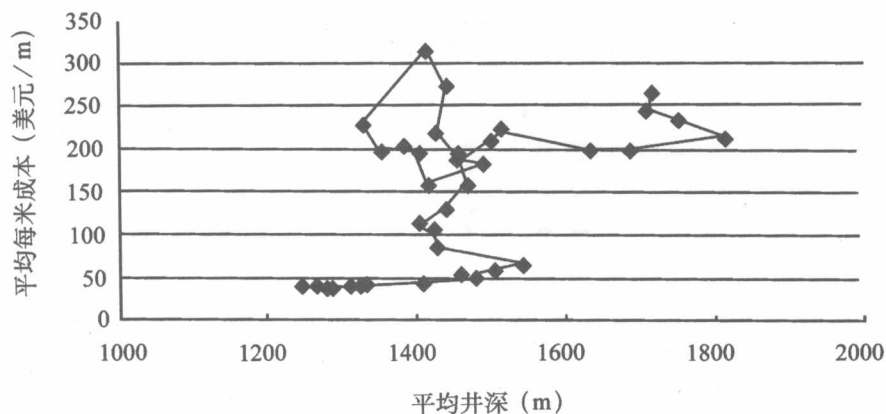


图 15 1959~1997 年美国陆上平均井深与每米钻井成本的关系

## 8. 先进钻井技术

通过几个五年计划的科技攻关和不断引进大量先进技术装备和生产线,从而大大缩短了我国钻井装备和技术与先进国家的差距(表 1 和 2)。但是,由于基础落后,长期以来,我国石油钻井科研工作一直处于学习追赶国外先进技术并努力实现先进技术的国产化状态。总体来看,我国石油钻井技术水平与国外先进水平有 5~10 年的差距(表 2)。

由以上分析可以看出,我国与美国等国外先进国家相比,钻井技术水平还存在相当大的差距。为迎头赶上他们,首先必须了解清楚他们目前的发展水平及技术优势所在。为此,进行了该调研。

表 1 国内外主要钻井技术及发展阶段对比

|    | 60 年代    |                                 | 70 年代                             |    | 80 年代                           |                             |                                                       | 90 年代                   |    | 21 世纪展望           |
|----|----------|---------------------------------|-----------------------------------|----|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------|----|-------------------|
|    |          |                                 |                                   | 五五 | 六五                              | 七五                          | 八五                                                    |                         | 九五 |                   |
| 国外 | 研究<br>试验 | ◆ 优选参数钻井                        |                                   |    | △ 水平井<br>△ 大位移井<br>○ 小井眼        |                             | △ 分支井、短半径水平井<br>★ 连续管钻井<br>△ 自动化钻井                    |                         |    |                   |
|    | 应用       | ◆ 平衡压力钻井<br>◆ 喷射钻井<br>△ 定向井、丛式井 | ◆ 优选参数<br>钻井<br>◇ 深井              |    | △ 水平井                           |                             | △ 大位移井<br>○ 小井眼<br>△ 分支井、短半径水平井<br>★ 连续管钻井<br>★ 欠平衡钻井 |                         |    | △ 自动化 (闭<br>环) 钻井 |
| 中国 | 研究<br>试验 | ◆ 喷射钻井<br>△ 定向井<br>△ 水平井        | △ 定向井<br>◆ 喷射钻井                   |    | ◆ 优选参数钻井<br>◆ 平衡压力钻井            | △ 定向井、丛式井                   | △ 水平井<br>◇ 深井                                         | △ 老井侧钻水平井<br>○ 小井眼 ◇ 深井 |    |                   |
|    | 应用       |                                 |                                   |    | ◆ 喷射钻井                          | ◆ 优选参数钻井<br>◆ 平衡压力钻井        | △ 定向井、丛式井<br>△ 水平井<br>◇ 深井                            |                         |    |                   |
| 国外 | 研究<br>试验 |                                 | △ 随钻测量<br>☆ PDC 钻头                |    |                                 | ★ 顶部驱动                      | △ 随钻测井                                                | △ 地质导向仪                 |    |                   |
|    | 应用       | ● API 水泥规范<br>□ 低固相不分散聚合物泥浆     | □ 保护油层<br>☆ 镶齿密封轴承牙轮钻头<br>★ 电驱动钻机 |    | ▲ 实时钻井数据库<br>☆ PDC 钻头           | △ 随钻测量<br>△ 导向钻井<br>□ 正电胶泥浆 | △ 随钻测井<br>★ 顶部驱动                                      | △ 地质导向仪                 |    |                   |
| 中国 | 研究<br>试验 |                                 | 聚合物泥浆<br>★ 电驱动钻<br>机              |    | □ 保护油层<br>☆ PDC 钻头<br>▲ 实时钻井数据库 |                             | □ 正电胶泥浆<br>★ 电驱动钻机                                    |                         |    |                   |
|    | 应用       |                                 | ☆ 镶齿密封<br>轴承牙轮钻<br>头              |    | ● API 水泥<br>□ 聚合物泥浆             |                             | □ 保护油层 ☆ PDC 钻头<br>△ 随钻测量 △ 导向钻井<br>▲ 钻井数据库 (非实时)     | □ 正电胶泥浆                 |    |                   |

注: ◆ 优选参数钻井类, ◇ 深井钻井类, ▲ 钻井数据库类, △ 水平井钻井类, ★ 钻井装备类, ☆ 钻头类, ● 固井类, ○ 小井眼类, □ 泥浆类。