

中国石油勘探开发研究院 五十年理论技术文集

(1958 — 2008)

开发篇 • 工程篇

中国石油勘探开发研究院 编



石油工业出版社

中国石油勘探开发研究院 五十年理论技术文集

(1958—2008)

开发篇·工程篇

中国石油勘探开发研究院 编

石油工业出版社

目 录

开 发 篇

导论 (3)

中国陆相油田开发理论体系

油气藏开发地质与测井

碳酸盐岩裂缝性油气藏测井资料处理方法的探讨 廖明书(13)

沉积方式与碎屑岩储层的层内非均质性 裘怿楠 许仕策 肖敬修(24)

砂岩油藏原始流体饱和度的变化规律 李淑贞(31)

早期识别油(气)藏规模的若干技术 张志松(37)

储层地质模型 裘怿楠(45)

声波和密度测井资料的井径校正 刘国强 谭廷栋(51)

建立定量储层地质模型的新方法 穆龙新 贾文瑞 贾爱林(59)

裂缝储层地质模型的建立 穆龙新(64)

油气藏流体类型判别方法 孙志道(71)

点坝相储层模式——半连通体 薛培华(80)

碎屑岩储层井间砂体预测方法研究 黄石岩 刘明新 叶良苗等(92)

水驱前后油层物性参数变化 褚人杰 张广敏(100)

注水开发油田储层测井评价方法 王绍民 姜文达 杨元军(105)

储层地质模型 10 年 裘怿楠 贾爱林(112)

The Integrated Characterization Techniques on

Reservoir Fractures Xinmin Song Pingping Shen Shiyi Yuan et al. (116)

扇三角洲储层露头精细研究方法 贾爱林 穆龙新 陈亮等(126)

地球物理测井的裂缝评价方法 朱怡翔 廖明书 刘明高等(131)

储集层物性下限值确定方法及其补充 郭睿(136)

我国低效气藏的地质特征及其成因特点 田昌炳 于兴河 徐安娜等(142)

苏丹六区复杂断块油气田勘探开发经验与探索 黄先雄 汪望泉 聂昌谋等(146)

海外油气田开发新项目评价方法研究 郭睿 原瑞娥 张兴等(151)

低渗透油藏储集层流动单元研究 张爱卿 程红卫(157)

苏丹 Main Unity 区块剩余油分布规律及挖潜策略 刘洋 沈平平 刘春泽等(165)

哈萨克斯坦盐下油藏双重介质三维地质建模 陈焯菲 蔡冬梅 范子菲等(170)

准噶尔盆地西北缘中段石炭系火山岩油藏储层特征

及其控制因素 李军 薛培华 张爱卿等(178)

油气藏工程

天然水驱和人工注水油藏的统计规律探讨 童宪章(186)

提高注水油田开发效果的探讨	林志芳 程希荣 张 锐(213)
试论陆相砂岩大油田的开发模式	金毓菽 袁庆峰 罗昌燕等(222)
油藏天然驱动能力的早期评价	方宏长 武若霞(231)
对克拉玛依油田开发的几点意见	秦同洛(233)
砂岩油田注水开发合理井网研究中的几个理论问题	齐与峰(238)
水驱油田产量递减规律	俞启泰(245)
四点法和三角形井网水平井产能公式研究	范子菲 方宏长(253)
变井储试井分析	张义堂(260)
石油天然气“资源量—储量—产量”的控制预测与评价系统	万吉业(266)
油田开发总体设计最优控制法	齐与峰 李 力(273)
广义增长与递减曲线预测油田开发指标通用公式	俞启泰(282)
气井产能测试新方法——回压等时试井	唐俊伟 马新华 焦创赞等(288)
水驱油藏含水率及采出程度相似理论研究	闫存章 秦积舜 郭文敏等(294)
确定气锥和水锥油藏油井临界产量的方法	陈元千(302)

油层物理与渗流力学

双重孔隙介质渗流方程组的精确解	陈钟祥 姜礼尚(316)
Porous Flow with Physico-chemical Processes—Microscopic Study	Guo Shangping Huang Yanzhang Hu Yaren et al. (330)
岩心润湿性对相对渗透率的影响	江义容(339)
考虑毛管压力时计算油水相对渗透率的新方法	李克文 沈平平 秦同洛(345)
地层矿物与速敏性	朱 斌(349)
砂岩孔隙结构对水驱采收率的影响及其分类	沈平平 李秉智 涂富华(353)
微观模拟和测试技术及其应用	郭尚平(364)
砂岩孔隙结构的分形特征及应用研究	贾芬淑 沈平平 李克文(374)
聚合物驱后进一步提高采收率的四次采油问题	郭尚平 田根林 王 芳等(381)
幂律非牛顿流体平面流动的数值计算	刘明新 沈平平 袁江如(386)

油藏数值模拟

非均质亲油砂岩油层层内油水运动规律的数值模拟研究	韩大匡 桓冠仁 谢兴礼(394)
注气提高扫油厚度系数的数学模型	桓冠仁(407)
二氧化碳—烃—水系统相平衡闪蒸计算方法研究	施 文 桓冠仁 郭尚平(420)
POSC 规范——石油勘探开发应用软件的发展方向	张宏伟 李晓明(428)
多功能模型——一个可视化、集成化的油藏数值模拟器	桓冠仁(431)
注烃类气体多次接触混相过程的数值模拟研究	施 文 桓冠仁 郭尚平(439)
油藏数值模拟中自适应隐式方法的研究	彭力田 韩大匡 刘明新等(445)
计算机辅助自动历史拟合在油藏数值模拟中的应用	邓宝荣 袁士义 李建芳等(452)
窗口技术在油藏数值模拟中的应用	李建芳 韩大匡 邓宝荣等(457)
油藏数值模拟并行计算技术	宋 杰 袁士义 邓宝荣(461)

油气田开发规划与经济评价

油田中后期稳产规划方法	齐与峰 张辉军 赵成民(469)
交互式油藏经营决策的理论与方法研究	潘志坚 宋艳波(477)

油田开发综合含水经济极限研究	谢绪权(482)
油田开发规划科学预测的理论和实践	曲德斌 武若霞(487)
石油尾矿合理开发经营策略及宏观优惠政策研究	徐青 唐玮 张宏洋等(492)
注水开发油田高含水期开发技术经济政策研究	常毓文 袁士义 曲德斌(497)
油气开发产能建设项目的收益——风险两目标优化模型 及求解	李丰 常毓文 杨仕敏等(503)

油气开发特色技术

高含水油藏水驱开发技术

剩余油分布和运动特点及挖潜措施间的最佳协同	齐与峰(510)
深度开发高含水油田提高采收率问题的探讨	韩大匡(518)
高含水期油田开发的方法系统	林志芳 俞启泰(527)
周期注水可行性评价公式	俞启泰 谢绪权 罗洪等(533)
Reservoir Management in Maturing Oil Field	Zhijian Pan Longxin Mu Liu Hong et al. (538)
注水油田高含水后期开发技术方针的调整	胡永乐 王燕灵 杨思玉等(548)
可动凝胶调驱技术在断块油田中的应用	袁士义 韩冬 苗坤等(553)
准确预测剩余油相对富集区提高油田注水采收率研究	韩大匡(558)
比采油指数曲线的分析和应用	吴向红 何伶 方宏长(565)

低渗透油藏有效开发技术

关于低渗透油田的开发问题	秦同洛(572)
裂缝性低渗油藏的高效开发技术	宋新民(574)
丘陵油田混相驱研究	杨宝善 宋文杰(588)
低渗透储层改造中的油层保护技术	何秉兰(596)
水基凝胶压裂液的流变学全面表征	连胜江 向世琪 朱兆明(604)
安塞油田坪桥区注气可行性研究	李彦兰 章长杉 武若霞等(611)
低渗特低渗储集层损害机理探讨	樊世忠(614)
低渗透砂岩油藏注水见效时间与井距关系	李云鹞 胡永乐(624)
低渗透油藏小井距开发试验研究	闫存章 李秀生 常毓文等(628)
低速非达西渗流和压敏介质数值模拟软件开发	李凡华(633)
高效开发低渗透油藏的关键和核心	李道品(641)
低渗透油田富集区预测技术研究——以松辽盆地扶杨油层 为例	赵应成 王天琦 田光荣等(650)
“整体压裂”技术及其在低渗油藏开发中的应用	蒋阒 单文文 丁云宏等(657)

稠油油藏开发技术

关于我国稠油分类标准的初步研究	刘文章(673)
我国深井蒸汽吞吐采油试验	刘文章(680)
蒸汽驱最优方案设计新方法	岳清山 赵洪岩 马德胜(685)
火烧油层物理模拟的研究	李少池 沈燮泉 王艳辉(689)
热水添加氮气泡沫驱提高稠油采收率研究	袁士义 刘尚奇 张义堂等(697)
稀油油藏注蒸汽热采提高开采效果	张义堂 计秉玉 廖广志等(704)
火烧油层段塞+蒸汽驱组合式开采技术研究	张锐 朴晶明 邓明(708)

超稠油油藏直井与水平井组合 SAGD 技术研究 刘尚奇 王晓春 高永荣等(714)

天然气开发技术

建立我国天然气工业中注意的几个问题 秦同洛(722)

国内外天然气地下储气库建设与应用初探 华爱刚 王佩禹 丁向民等(727)

应用最优控制理论研究凝析气田循环注气开发决策 叶继根 齐与峰 方义生(733)

凝析气新的产能方程研究 谢兴礼 罗凯 宋文杰(738)

浅议中国石油企业信息化建设中的标准化工作 高雪(745)

中国天然气的开发特点与对策 马新华 陈建军 唐俊伟(748)

高含蜡凝析气相态特征研究 胡永乐 罗凯 郑希潭等(754)

克拉 2 气田产能预测方程的建立 李保柱 朱玉新 宋文杰等(758)

天然气开发技术现状、挑战及对策 袁士义 胡永乐 罗凯(762)

中国石油天然气股份有限公司勘探数据库的数据源

建设问题 皮声洪 张德忠 李锦姝等(769)

火山岩气藏高效开发策略研究 袁士义 冉启全 徐正顺等(776)

凝析气相态特征及开发方法 方义生 李保柱 胡永乐等(782)

工 程 篇

导论 (799)

采油工程

压裂酸化工艺在我国油气田开发中的发展及应用 朱兆明 蒋 闾(812)

TP—910 调剖技术研究 李宇乡(820)

油田堵水、调剖技术的进展与展望 刘翔鹤 白宝君(831)

体膨型颗粒类堵水调剖技术的研究 李宇乡 刘玉章 白宝君等(850)

深部地应力测试技术及其在钻井工程中的应用 高合明 刘建东 沈露禾(854)

梳形聚丙烯酰胺的特性及应用 罗建辉 卜若颖 朱怀江等(858)

Application and Development of Chemical-Based Conformance

Control Treatments in China Oil Fields Y. Liu B. Bai P. J. Shuler(864)

大力发展采气工程技术为中国石油天然气股份有限公司

天然气快速发展做贡献 熊春明 赵志宏 杨贤友等(879)

高含水油田深部液流转向技术研究 刘玉章 熊春明 罗健辉等(900)

新型聚合物溶液的微观结构研究 朱怀江 罗健辉 隋新光等(905)

Application and Study of Acid Fracture Technique Using Novel Temperature Control

Viscosity Acid in Carbonate Reservoir F. Zhou Y. Liu F. Zhang (910)

无筛管纤维复合防细粉砂理论与技术研究 周福建 刘玉章 熊春明等(917)

提高采收率

注化学剂驱油数值模拟(理论部分) 袁士义 VAN Quy N. (925)

表面活性剂吸附理论的最新进展 杨承志(933)

钻机生产能力的分析与计算 李秉志 刘开文(938)

聚丙烯酰胺与 Cr(Ⅲ)低聚物交联机理的研究 韩冬 徐稳杰 韦莉等(943)

- 非牛顿流体在非均质油藏渗流压力场实验 王家禄 沈平平 刘玉章等(947)
- 大幅度提高石油采油率的基本研究 沈平平(953)
- 油水乳化转相黏度预测实验研究 秦积舜 张 星 耿宏章等(958)
- 复合驱段塞设计对驱油效率的影响 王红庄 翁 蕊 杨普华(964)
- 二元混合表面活性剂在孔隙介质中流动时色谱分离的
预测模型 杨普华 翁 蕊 张禹负等(968)
- ASP 复合驱用烷基苯磺酸盐表面活性剂的合成 朱友益 沈平平 王 哲等(975)

油田化学

- 国外油田化学剂的现状与发展动态 陈立滇(981)
- 铬交联部分水解聚丙烯酰胺堵水剂及其应用的研究 于连成 田洪昆(994)
- RI-01 原油破乳剂的研制及其应用 张宗愚 张雅琴 向国兵(1000)
- BJ 系列清蜡剂及其现场应用 王 彪 张怀斌 柏尚华等(1006)
- 阳离子聚合物钻井液的研究和应用 刘雨晴(1012)
- 降滤失剂 JT888 与抑制性聚合物盐水重泥浆的研究及应用 牛亚斌 张达明 杨振杰等(1020)
- 油田化学品在中国油田勘探开发中的应用 刘继德 牛亚斌(1025)
- 阳离子聚合物正电胶泥浆研究与应用 孙金声 刘雨晴 王书琪等(1035)
- TS 系列新型耐温抗盐聚合物的研究 欧阳坚 朱卓岩 王贵江等(1039)
- 以大庆减压渣油为原料的高效、廉价驱油表面活性剂 OCS 的
制备与性能研究 郭东红 辛浩川 崔晓东等(1043)
- 稠油污水回用锅炉化学除硅技术的研究 赵振兴 韩桂华 李芮丽等(1049)
- 三元复合驱和聚合物驱采出原油组成和破乳脱水的关系 张付生 张雅琴 程杰成等(1053)

采油采气装备

- 钻机液力变矩器传动的分析及改进 马家骥(1058)
- CAD/CAM 技术在石油机械领域中的应用 黄志潜(1068)
- 链条抽油机轨迹链条的工作特点 赵 众 于博生 陈 健(1074)
- 玻璃钢抽油杆的发展及应用 吴则中 田 丰 李 策等(1080)
- 中半径水平井并眼轨道控制方案设计 葛云华 苏义脑(1090)
- 盘式刹车与带刹车性能对比分析 高向前(1097)
- J10APS25 型通井机盘式刹车的设计与研制 高向前 齐明侠 张作龙等(1103)
- 机械驱动钻机和电驱动钻机的比较 侯 郁 郑晓峰(1108)
- 单螺杆马达的普遍线型 谢竹庄(1112)
- 极限曲率法及其应用 苏义脑(1118)
- 水平井中钻柱与井壁之间的摩阻计算 陈祖锡(1123)
- 2000 米钻机液控盘式刹车的设计 高向前 齐明侠 李继志(1127)
- 石油厂矿旋转机械监测诊断系统的研究开发 陈荣振 殷兆新 展恩强等(1132)
- 中石油深井钻井技术现状与面临的挑战 汪海阁 郑新权(1137)
- 空气钻井工作特性分析与工艺参数的选择研究 苏义脑 周 川 窦修荣(1143)
- 地质导向钻井技术概况及其在我国的研究进展 苏义脑(1150)
- DQ70BS 交流变频顶部驱动钻井装置 沈泽俊 白光利 邹连阳等(1154)
- 盐下复杂地层井身结构优化及突破盐丘钻井技术 卞德智 董本京 孙振纯(1158)
- 降低膨胀管技术中膨胀压力的方法 高向前 张立新 李益良等(1162)

石油工业化

- 用己烷作为岩屑荧光录井替代试剂的探讨 赵菊英(1166)
- 石油企业贯彻实施标准有效性研究 郭 军(1171)
- “采标”实践中几个问题的探讨 张及良 马志雄(1175)
- 加速石油工业化与国际接轨的进程 张振军(1178)
- PetroChina's Strategic Planning Focused on Quality Shengping Gao Timothy Li(1184)
- 2006 年国外钻井液体系和处理剂分类 张克勤 王 欣 何 纶等(1189)

工程监督

- PDC 钻头井底水力问题的计算机模拟 高振果 董 杰(1202)
- 新型钻直井的钻具组合及油田试验结果分析 季细星 苏义脑(1207)
- 英科 1 井超高压地层压力预测技术研究 王胜启 董 杰(1211)
- 阳离子钻井液用膨润土的改性研究 刘 盈 沈丹青(1216)
- 我国在海外油田的地面建设工艺技术 易成高(1223)
- 石油勘探与生产工程监督发展现状与对策 高志强(1227)

开
发
篇

导 论

中国石油勘探开发研究院(以下简称研究院)建院以来已走过了50年的发展历程。作为中国石油工业上游最主要的综合性科研机构,研究院定位:一是瞄准中国石油工业和中国石油天然气集团公司的重大需求,紧紧为上游勘探开发主营业务发展服务;二是瞄准超前共性和特色的理论技术,进行理论技术研发,为国家和中国石油可持续发展保驾护航;三是肩负推动学科综合发展、加强软硬件环境建设、构建决策支持体系、培养高层次人才等任务;四是承担为国家和中国石油提供油气战略规划和决策支持的任务。

建院50年来,研究院科技人员直接参与了我国陆上大多数大中型油气田的开发实践,建立和发展了中国油气田开发理论体系,是中国石油油气开发理论的主要创立者之一;研发了中国石油开发领域的重大配套技术和专项特色技术,培养和造就了一批以院士为代表的国内外知名专家,形成了一支既有高水平理论基础和丰富的实践经验,又有良好敬业与合作精神的科研队伍,是国内油气开发技术创新的重要领军团队,成为我国石油工业上游主要的智力中心。

50年来,研究院科技人员直接参与了我国每一个大油田的会战,如克拉玛依油田、大庆油田、胜利油田、辽河油田等,以编制重大开发方案为纽带,开展了开发理论技术研究,编制完成了一批重大和复杂油气田开发方案,如萨尔图油田开发方案(国内第一个大型油田自主编制开发方案)、任丘油田开发方案(国内第一个碳酸盐岩油藏开发方案)、塔中4油藏开发方案(国内第一个水平井整体开发设计)、克拉2气藏开发方案(国内第一个大型异常高压气藏稀井、高产开发设计)、牙哈凝析气田开发方案(国内第一个大型整装凝析气藏循环注气开发设计)、苏里格气藏开发方案(国内最大的特低渗透、低丰度复杂气藏开发设计)、大庆徐家围子气田开发方案(国内第一个火山岩气藏开发设计)等,是我国油气增储上产的重要贡献者。近年来,研究院还积极参与中国石油的海外扩展业务,编制了苏丹1/2/4区第一个开发方案、苏丹3/7区开发方案、哈萨克斯坦等33个油田的开发方案,有力推动了中国石油海外油气业务的快速发展。

经过几代石油科技工作者的勤奋工作、积极探索和亲身实践,创立了系统的陆相油田开发理论体系,包括陆相油气储层开发地质理论、油气藏工程、油层物理及渗流力学理论、油藏数值模拟、油气田开发规划与经济评价等。在陆相油气储层开发地质理论方面,建立了陆相碎屑岩储层各类沉积各级尺度层次的“沉积相—非均质性”模式,提出了以认识“油砂体”为目标的沉积微相概念和相应的相分析技术,发展了水驱开发油藏的开发地质学。在油气藏工程理论方面,创立了油田开发总体最优设计控制法和砂岩油田注水开发合理井网理论,建立了童氏图版、翁氏预测模型、HCZ等各种水驱油田开发指标、采收率和储量预测模型。在油层物理及渗流力学方面建立了孔隙介质油气水多相渗流微观机理的测试、多层砂岩油藏渗流特征和开发特征的描述方法,提出了砂岩孔隙结构的分形特征,并从微观角度揭示了油田开发的物理化学渗流规律,建立了碳酸盐岩渗流理论。在油藏数值模拟理论方面,自主研发了多功能油藏数值模拟器,改进了油藏数值模拟的自适应模型、并行技术油藏数值模拟器及相关应用模块。在油气田开发规划与经济评价方面,建立了油田开发多目标优化、交互式规划方法模型和油田开发规划预测理论,提出了注水开发油田高含水期开发技术政策界限、石油尾矿及宏观优惠政策。以上理论成果成功地指导了我国东部老油田稳产和西部油田上产的开发工作。

研发形成了一批重要的开发配套技术和专项特色技术系列。包括不同类型油藏水驱开发、低渗透油藏有效开发、复杂凝析气藏开发等重大配套技术。在不同类型油藏水驱开发技术方面,创出了砂体规模尺度的油层细分对比与单砂体复原技术,建立了国内第一个陆相储层精细描述的露头原型模型,首创常规测井识别和评价裂缝孔隙度技术,形成了构造裂缝识别和预测技术,形成了高含水老油田二次开发的新理念和技术路线,引领推动油藏描述和剩余油分布的研究向精细化和量化发展;提出油田开发早期建模技术流程,研究了高含水期油田开发方法和调整技术,形成了堵水调剖和深部调驱技术,通过强凝胶TP-910系列近井封堵、活化稠油选择性堵水、可动凝胶和体膨颗粒调剖技术系列,实现了低投入

高产出。在低渗透油气藏有效开发技术方面,配套形成了低效油气藏“甜点”预测技术、沉积微相精细刻画技术、分层压裂与水平井提高单井产量技术、整体压裂与井网优化技术、高效井部署技术,使长庆油田、苏里格气田新钻井中高产井的比例提高了 10% 以上,有力地促进了苏里格等低渗透油气田的规模效益开发。在复杂凝析气藏开发方面,发现注气过程中液固析出规律,提出凝析气藏控液固析出的温度、压力开发参数,配套形成了超深(>5000m)、超高压(>56MPa)凝析气藏循环注气开采技术,实现了牙哈凝析气田高效开发,为年产凝析油 50×10^4 t 以上稳产至今提供了有力的技术保障。

总之,在研究院“技术立院、人才立院”的战略方针指导下,油气开发理论和特色技术在不断创新,取得了长足进步,为中国石油实现原油产量稳中有升、天然气业务快速发展提供了更强有力的技术支撑。

1 中国陆相油田开发理论体系

1.1 油气藏开发地质和测井

主要在储层地质模型的概念认识上,在构建储层实体地质模型的综合方法上,在油藏开发测井评价和裂缝识别技术上,在油藏开发综合评价方法上的诸方面取得进展,为我国储层沉积相的普及推广,推动河流相储层的深度研究与快速发展,进而促进储层沉积学的形成和油藏地质学的进步做出了贡献。

(1) 陆相盆地河流—三角洲相主体沉积的理论。

我国中、新生代陆相沉积盆地,河流广布、砂体发育,河流—三角洲相砂体占据了陆相盆地的主体地位。据研究统计,我国已探明石油储量绝大部分(约 86.3%)分布在河流—三角洲相沉积中。因此,深度研究河流相储层自然而然成为主要研究对象,其中关键是认识河流相标志,划分曲流河、辫状河等不同河型,搞清砂体规模和展布规律,最终建立起相应的地质模型。研究院在曲流河储层模式研究方面,建立了“半连通体”的地质模型,形成了点坝砂体里的侧积层、侧积体的新概念,以及曲流段划分、曲流带识别(包括废弃河道等)、曲流河相砂体的展布规律等认识,为有效开发此类油藏提供了科学依据;在辫状河相砂体储层模式研究方面,建立了“泛连通体”的地质模型,首次发现了落淤层,得到了辫状河系多河道河流,而且迁徙频繁,摆动大,展布宽,并且有活动性河道与非活动性河道之分,存在主河道与次河道的差别等规律性的认识,这些认识对刻画砂体规模、岩性、物性和非均质性意义重大。在河流沉积控制因素认识方面,揭示了曲流河以侧向加积作用为主,辫状河以垂向加积作用为主,并受控于气候、降水、植被、构造、地貌、坡降、水动力因素等的作用影响。在三角洲平原分流河道砂体和三角洲前缘水下河道砂体的研究方面也有新进展,可以区分水下河道与水上河道,同时,也开展了废弃河道的研究。近年来,大庆、胜利等油田在这些砂体沉积理论基础上,发展到了运用水平井研究曲流河相砂体、构造和油层分布的实用阶段。

(2) 成因砂体理论。

成因对砂体的几何形态和内部组构等方面影响很大,尤其是河流相砂体,不同河型的成因砂体完全不同。由于它们是影响注水油田开发的重要地质因素,因此在 20 世纪 80 年代,研究院科技工作者针对单砂体较难准确识别和划分出边界的生产问题,开展了广泛的河流砂体特征研究。通过大量的油田取心资料,结合现代沉积研究和测井技术的进步,对储层的认识逐渐由油组—砂组—小层,走向了精细描述的方向和程度,进入到单砂层/单砂体的研究阶段,不仅研究出厚度、产状、岩性、物性、含油性、非均质性等的规律,而且细化了层内的三维非均质性变化,如砂体内的夹层分布、砂层的连续性、连通性变化等。关于两类河流相砂体研究的新进展是:① 曲流河点坝相砂体。从时间、空间的观点看,曲流河虽然主要是单河道,有时也见局部的多河道。但曲流河点坝砂体是一个叠加复砂体,而非“单砂体”。从成因看,侧积体是曲流河周期性洪泛事件作用的沉积砂体,是点坝砂体中的等时间单元,也是点坝砂体的基本沉积建造单元,在平面上呈新月形,在剖面上呈楔状,在空间上为规则的叠瓦状复砂体(即点坝砂体)中的一个基本单元。② 辫状河心滩坝/河道砂体。辫状河最大特点是多河道,在岩性、厚度、分布范围、物性、非均质性等方面差异较大,主要是心滩坝砂体、河道砂体和河道间砂体,多以复砂体形式出现。

其中活动性河道砂体/心滩坝砂体大部分是多旋回垂向加积作用的复合体,是多次洪泛事件的继承性生长和演化的结果。由于水动力强,故岩性较粗、砂体规模较大,一般形成较好的储层,其非均质性主要是落淤层的发育所形成的岩性薄夹层;非活动性河道砂体由于水动力弱、河道规模较小,相应砂体规模亦较小,一般岩性较细,物性较差,难以形成较好的储层。

(3)层内岩性薄夹层研究。

不同成因砂体内的岩性薄夹层分布产状特征一般是不同的。目前对于陆相盆地的河流沉积,创出了曲流河砂体中的“侧积层”和辫状河砂体中的“落淤层”新概念。这两类砂体有各自的特点:①侧积层。侧积层为曲流河点坝砂体中的泥质薄夹层,其特点:一是岩性主要为悬移质细颗粒物,多数为泥质、粉砂质,个别细砂质;二是厚度产状多数为薄层,侧向稳定性很差;三是几何形态在剖面上呈楔状,像个楔子,在平面上呈弧形,夹于砂体之中;四是单砂体内呈非均质性,砂体内的岩性薄夹层是主要的非渗透性遮挡层,形成一种明显的侧向遮挡;五是侧积层原始产状具倾角,多在 20° 左右;六是侧积层形态类型可分为五类,即斜切式、横切式、复切式、直切式、隐切式。②落淤层。落淤层是辫状河在洪泛事件中洪峰震荡过程中悬移质落淤过程的垂向加积产物,其特点为岩性细、厚度小、分布广,大范围分布,可形成垂向上的非渗透性遮挡。

由于侧积层、落淤层是层内非渗透遮挡夹层,因此这些研究对油田改善注水开发效果有着重要的实际意义。

(4)小层对比方法。

“旋回对比、分级控制”方法近年来不断有新的发展。一是基于采用相对值判断油气水层,以重力平衡原理为指导,进行区域性流体系统分析,形成多信息地层对比方法和微差分析法,经过大量实践检验,大大提高了对油气水层识别的能力;二是基于河流相储层缺乏明显对比标志的特点,探索了利用侧积层、落淤层进行河流相小层对比的可能性。这些研究对解决河流相储层缺乏明显的标志层对比问题具有重要的意义与作用。

(5)精细地质建模方法。

通过大量现代沉积和露头研究,建立了地质知识库,形成了应用沉积微相精细解剖与地质统计学、分形几何学相结合的井间砂体预测方法,经过密井网、小井距、多信息井资料研究,提出了以地质知识库为基础、以沉积学为指导的定量储层随机建模新方法,为老油田精细研究、挖潜提供了有效途径。

(6)裂缝性储层研究方法。

裂缝性储层的孔隙结构一般是由裂缝—溶洞系统和岩石基块孔隙组成,不仅这两类孔隙的成因、几何形状、分布情况都不相同,而且不同构造区域、构造部位和构造活动,以及地层岩性、厚度组合都因不同而各异,尤其是裂缝大小、产状、分布有所不同。这是构造裂缝性储层岩石孔隙结构系统的主要特征。

研究院裂缝性储层研究已经走过了从均匀孔隙介质模型到双重孔隙介质模型的认识过程和实践检验。裂缝系统的研究目前已从早期的裂缝性碳酸盐岩地质研究,发展到裂缝性碎屑岩储层和裂缝性变质岩、火山岩、泥岩储层的岩石裂缝系统研究,提出了区分天然裂缝和人工裂缝的方法和建立岩—电—缝思路的解释模型,加深了对储层岩心、薄片的岩性分析,岩性与裂缝、物性的关系研究,不断扩大裂缝发育的岩石学研究范围。测井作为识别裂缝的工具或方法,也取得比较好的成效:成像测井大大提高了裂缝解释的精度,使地下裂缝变得非常直观、真实;利用测井、地震、地质相结合,进行数据重构,初步探索出裂缝性储层的井间裂缝分布。为复杂性油藏的有效开发提供了技术支持。

1.2 油气藏工程

我国已开发油田主要为陆相沉积油田,其特点是储层连续性较差,非均质性严重,原油黏度较高;同时由于沉积砂体和油藏外围水体体积较小,因而天然水驱能量供给受到限制。因此,绝大多数油田都采用人工注水保持压力的开发方式。数十年来,通过我国广大石油工作者的不懈努力,原油产量从1949的 $12 \times 10^4 \text{t}$ 增长到年产 $1.8 \times 10^8 \text{t}$ 以上,并且与此相应产生了我国独创的众多油气藏工程理论和方法,其中包括陆相油田开发决策和调控理论;勘探开发一体化战略决策模式;油田开发设计新的理论和方

法;开发生态分析和预测新方法以及试井分析和解释新方法等。

陆相油田开发决策和调控理论是油气藏工程理论体系的重要组成部分。通过对玉门、大庆、新疆等陆相大油田的开发实践总结,提出了陆上多层砂岩油藏开发模式、陆相砂岩大油田的开发模式,确立了我国陆相沉积油田注水开发的指导思想、开发原则和一系列战略战术决策措施;有关加密井网和水平井开发以适应不同地质特点要求、提高注水油田开发效果的强化开采调控决策等,对大庆、克拉玛依、玉门等陆相大油田的长时期持续高产稳产起到了重要的指导作用,奠定了我国陆相油田开发的理论基础。

勘探开发一体化战略决策是在勘探取得突破后开发提早介入而提出的一种新型的开发程序模式,可以经济有效地加快勘探开发的进程。研究院先后研发了油藏天然驱动能力的早期评价方法、石油天然气资源量—储量—产量的控制预测反馈评价方法等,为一体化模式提供了手段,在实现勘探开发一体化战略决策方面起到了重要的作用。

油田开发设计新理论新方法的研究取得了重要突破。通过将最优控制法引入到油田开发总体设计中,使油气田开发设计水平跃上了一个新的台阶。与此同时,砂岩油田注水开发合理井网、四点法和三角形井网水平井、复杂油藏等开发理论问题研究取得进展,提出了井网对水驱采收率影响的理论表达式,导出了气顶底水油藏四点法井网及封闭边界油藏三角形井网水平井产能方程式,建立了气顶底水(水锥和气锥)油藏临界产量及合理打开程度的确定方法,为复杂油藏的合理开采、已开发油田的调整和利用水平井注水开发复杂边界油藏提供了理论依据和技术支持。

开发生态分析和预测新方法的研究也在多个方面取得了重要进展。一是从生产实际出发,通过我国大量的天然水驱和人工注水油藏的统计研究,得到若干带普遍性的水驱油藏动态规律,利用这些规律可以比较准确地预测出油藏地质储量和最终采收率等重要开发指标。二是通过相似分析,建立了水驱油藏含水率与采出程度的经验关系,使室内物理模拟试验结果直接推广应用于油田实际,从而开辟了油田注水开发效果分析和预测的新途径。三是提出了广义增长与递减曲线预测油田开发指标通用公式和水驱油田产量递减、水驱规律,可以适应油田产量的不同变化特征,比较准确地预测油田有关开发指标。

研究院在试井领域的研究也同样取得了长足的进步,其中包括变井储试井分析、回压等时气井试井以及其他试井分析新方法等,已成为认识油气藏地质和生产特征的重要手段。

1.3 油层物理与渗流力学

油层物理是石油天然气工程特别是油气藏工程的应用基础学科。50年来,从生产需要出发,研究院油层物理在储层岩石和流体性质以及各类渗流机理和提高采收率的实验研究上,进行大量的工作,取得了突出的成绩。

在渗流微观研究中,研制成功了仿真微观物理模型,并利用该模型进行了二次和三次采油的驱替机理试验研究,直接观察了真实储层复杂孔隙系统中驱油的过程,残余油的形成及分布特征,并且更确切地描述了驱油机理及其控制因素。仿真微观物理模型的研制成功及其在水驱、混气水驱、碱水驱和胶束—微乳液驱等一系列试验研究上所取得的重要成果,标志着油层物理物模模拟试验研究进入了一个新时期。

在提高原油采收率关系研究方面取得了长足的进展。系统开展了砂岩孔隙结构对水驱采收率的影响及其分类研究和砂岩孔隙结构的分形特征及应用研究,分别用经典参数及分形维数对砂岩孔隙结构进行表征,建立了水驱采收率与孔隙结构特征的定量化规律,为评价各类砂岩油藏水驱采收率提供了有力工具。

在研究储层岩石渗流特征方面也取得了良好进展。在对岩心润湿性对相对渗透率的影响实验研究过程中,形成了在地层条件下直接使用地层流体测定油水相对渗透率的实验方法;在地层矿物与速敏性机理研究中,研究了国内油田40个地区所取岩心的速敏性,指出了速敏性不仅与流体流速有关,还与流动状态、岩石矿物类型以及流体的盐度等因素密切相关,为确定准确反映油层实际渗流特征的参数做出了重要贡献。

渗流力学是油气藏工程的理论基础,从石油天然气工业的长远发展着眼,投入一定的力量进行渗流

力学研究是完全必要的,特别是随着各类复杂油气藏的相继开发和三次采油的需要,更显出渗流力学研究的强大生命力。研究院渗流力学研究主要体现在三个方面:一是求渗流方程的解析解;二是求渗流方程的数值解;三是渗流力学应用研究。

20世纪70年代末,研究院科研人员针对我国裂缝—孔隙油藏的注水开发问题,建立了正确的双孔介质油水两相渗流基本方程,从而改进了已有的数学模型,并用特征线方法进行了全面的研究,揭示了裂缝—孔隙油藏水驱过程的基本特征,为合理开发这类油藏提供了理论指导。80年代初,针对我国双重介质油藏的生产试井问题,通过对未经任何简化的双孔数学模型求解,提出了双重孔隙介质渗流方程组的精确解,指明了在有界地层的普遍情况下双重介质模型解的结构,从而奠定了应用渗流力学方法确定裂缝—孔隙储层地质储量的理论基础,为该类油气藏不稳定试井提供了理论工具。在常规油气藏多相渗流问题以及各类复杂油气藏和三次采油的渗流问题研究方面,改进了一种对非牛顿流体在微观孔道中流动进行数值计算的算法,探索了利用网络模型求解非牛顿流体的渗流问题的数值途径,具有重要的实用意义。在渗流力学应用的研究方面,提出了一种新的考虑毛细管压力的油水相对渗透率非稳态驱替实验数据的计算方法,为渗流力学在物理模拟实验方面的应用提供了理论工具。

1.4 油藏数值模拟

自20世纪70年代后期以来,为适应数字化油气藏开发的需要,随着黑油模型、多组分模型等数值模拟软件的引进,研究院开展了油藏数值模拟的研究工作,陆续自主研发了油藏数值模拟模型算法及多功能模型等的商业化模拟软件,为我国油藏数值模拟的长足发展做出了贡献。

(1) 油藏数值模拟算法。

研究院在油水两相渗流问题的数值模拟最早开始于20世纪50年代末。通过提出“分段线性化”方法,将毛细管压力曲线分解为若干区间,用折线代替曲线来处理方程的非线性,改进了非线性方程组计算方法,使得数值模拟算法收敛快、稳定性好、精度高。

在油气多相态数值模拟方面,修正两相闪蒸算法,提出混相算法,通过结合使用逐次替换法与Newton-Raphson法,逐次替换法对Newton-Raphson法的初值进行预处理,Newton-Raphson法对逐次替换法进行加速,使得计算结果既能满足数值模拟相态计算的收敛性要求,且计算速度快,解决了二氧化碳驱模型方程中未知数过多、解法困难,以及注烃类气体多次接触的混相数值模拟问题。在针对自适应隐式方法存在的问题方面,提出了Berteger自适应隐式模型改进算法,将自适应隐式模型的物质平衡精度提高了一个数量级。

(2) 商业化油藏数值模拟软件研制。

为满足我国高含水老油田大规模油藏数值模拟的需要,研究院在“七五”、“八五”和“九五”启动了可视集成化的油藏数值模拟器和并行油藏数值模拟软件研究(1994),研制出适合我国油气藏特点的、具有自主知识产权的多功能油藏数值模拟器,研发了适合不同机型的并行数值模拟软件系列,推动了我国油藏数值模拟软件的发展。目前,计算的网格节点规模已达到百万量级,并行计算的效率达到60%以上,实现了化学驱数值模拟的并行计算,其性能指标、计算精度和稳定性达到了实际应用的要求。

(3) 油藏数值模拟应用技术。

鉴于我国大庆等油田的储层为亲油的润湿性,而且随着厚油层层内的韵律性的不同,水淹特征有很大的差别,用数值模拟方法定量研究了水驱的几个作用影响因素,得到了非均质亲油砂岩油层层内的油水运动规律。针对自动历史拟合构造历史拟合目标函数,采用Levenberg-Marquardt优化算法和牛顿法、最速下降法等方法,进行灵活的算法切换,最后通过协方差矩阵和均方根梯度进行参数的不确定性和敏感性分析,研究了自动历史拟合在油藏数值模拟中的应用。在窗口技术的应用方面,通过把快速自适应网格方法(简称FAC)用于局部网格加密中,在实用全隐式油藏数值模拟器MURS上实现了窗口技术,实现局部加密区域可以像窗口一样,随实际问题需要灵活地开启和关闭,或改变大小,无需在整个模拟阶段都采用局部加密网格,大大节省了油藏数值模拟时间。

1.5 油气田开发规划和经济评价

油气勘探开发中长期战略规划决策支持体系是中国石油天然气集团公司的重要组成部分,也是研

究院发展的重要领域。我国油气勘探开发中长期战略规划决策研究正日益成为国家和中国石油天然气集团公司的重点研究和发展的关键技术之一。

首先针对“八五”、“九五”期间石油工业实现油气产量最大化的工作目标,重点研究了在油气储、产量增长规律、油田开发措施成效规律,通过多步递阶物理结构分析,建立了动态系统辨识的最优控制模型,形成了挖潜技术规范和方法技术体系。

“九五”末期,中国石油工业由计划经济体制向市场经济体制转变,对石油企业进行了重组改革和成立境外上市的股份公司,生产经营策略调整为统筹资金与资源的合理配置,增强企业在市场中的竞争力,在实现企业经济效益目标的同时,最大限度地满足国民经济发展的需要。为应对这种新形势,研究院及时研究出在市场经济条件下的规划编制新方法,包括优化不同产量构成达到利润最大化、产量最大化、成本最小化优化模型。在此基础上,针对中国石油和各油区多层次、多目标的实际规划问题,提出了改进的可行目标规划(SGP问题)、边际替代率等交互式算法,把决策者的人工经验及愿望因素引入到规划优化过程中,首次实现了数值求解和专家经验的有机结合,提高了中国石油天然气股份有限公司(以下简称中国石油)、各油气田分公司的产量构成和投资的动态优化的可操作性。此外,近来在油气产能建设投资目标优化方面,又引入了收益—风险两目标优化的混合遗传算法,使规划决策方法更具实用性。

目前,研究院围绕建设中国石油和国家层面的油气开发战略决策与规划研究支持中心,形成了五个层次的规划决策和经济评价方法:① 油田开发评价分析和指标预测。包括建立全国油气田开发数据库、定期开展公司油田开发分析;② 油区产量、产量构成优化配置多目标规划方法;③ 油气开发项目投资优化评价,主要进行项目综合评价与优选排队分析;④ 油气开发和工程经济评价,主要进行油田开发概念设计与开发方案投资估算、经济评价分析;⑤ 油气开发价值评估,包括现金流动分析、投资回报率、净现值和敏感性分析。建立了规划计划编制的信息软件系统,基本满足了上市公司上游业务发展规划方案编制的需要,为中国石油油气开发中长期战略与规划的基础建设、技术积累和人才队伍建设发挥了重大影响和参谋作用。

2 油气开发特色技术

2.1 高含水油藏水驱开发技术

我国已开发油田大多为陆相沉积,储层非均质性严重,原油黏度较高,这类油田的特点决定了大部分储量要在中高含水阶段开采出来。进入“八五”以来,随着我国中、高渗油藏水驱开发逐渐进入中后期阶段,地下油水关系日益复杂,剩余油分布更加分散,既有以储层薄互层为背景的非均质性与水淹状况的复杂性,又有在水驱油过程中多相流体在层间和层内的错叠、交互分布。为了指导老油田深度开发挖潜,研究院科研人员从中国陆相油藏的具体情况出发,在总结“八五”、“九五”以来高含水油田开发的基础上,首次提出了在高含水后期和特高含水期,油藏内剩余油分布呈“总体上高度分散,局部相对富集”的格局,概括出八种类型的剩余油分布规律,以及提高剩余油富集区预测精度的多学科集成、发展开发地震、高精度确定性地质建模、精细油藏描述和精细数值模拟等技术发展方向,并探索了剩余油分布与挖潜措施的协同方式,形成了高含水期油田开发的方法系统,有效地指导了我国东部油田“八五”以来的开发调整工作。

1990—1996年在东部老油田进行精细单元开发调整研究过程中,针对挖掘层内剩余油的工作特点,开展了基于单砂体内部流动单元划分、相控 Metropolis - Hastings 优化算法、模拟退火后处理的定量化统计地质建模、精细油藏数值模拟等现代油藏精细研究,刻画了单砂体内部的流动单元油水运动、剩余油分布和开发调整定量化规律,初步形成特高含水油藏现代研究模式,目前对单砂体的刻画已成为中国石油油田开发的重点工作内容。

近年来,针对我国老油田二次开发战略工程,完成老油田二次开发的内涵界定和潜力评价,形成了二次开发的技术路线,倡导并参与推进了老油田二次开发提高采收率工作,在生产中取得成效;在围绕

高效的二次采油方式的调整方面,还系统探索了可动凝胶调驱、周期注水、水平井新技术新方法等,逐步形成了至今仍适用的注水油田高含水后期开发技术系列,成为我国目前老油田稳产的重要手段之一。

2.2 低渗透油藏有效开发技术

近年来,中国石油新增探明石油储量中低渗透储量比例一直保持在60%~70%,预计今后新增探明石油储量仍将以低渗透储量为主,低渗透油藏已经成为增储上产的主要对象。制约低渗透油藏有效开发的主要因素是单井产量低、采油速度低、采收率低、开发成本高、经济效益差等。为此,研究院开发一路通过攻关研究,在储层裂缝的综合表征、低阻油层的有效识别,优质油层的综合预测、整体高效压裂、井网优化和超前注水等开发技术研究方面取得了重要进展,为低渗透和裂缝性低渗透油田的有效开发做出了积极贡献。

(1) 储层裂缝综合表征技术。

储层天然裂缝表征是低渗透油藏勘探开发研究的重点。研究院科研人员很早就开始重视低渗透油藏的裂缝状态和分布研究,指出低渗透油田的有效开发与油藏中存在的天然裂缝系统有关,同时提出要重视塑性地层在开发中裂缝的不可逆变形特性,把握合适的注水时机,避免油藏中微裂缝的降压闭合,导致注水能力急剧降低的现象。

由于天然裂缝发育的随机性强、分布规律非常复杂,所以该领域一直处于探索性的研究阶段。研究院根据多数油田公司普遍拥有的大量的常规测井和纵波地震资料,以地质规律为指导,结合生产测试和动态资料进行天然裂缝的综合表征,如野外露头天然裂缝的表征、岩心裂缝描述与表征、成像测井裂缝表征、基于地震资料的裂缝表征等,有效地指导了油气开发井网部署和钻井。

(2) 高效压裂提高油井产量技术。

压裂改造是有效开发低渗透油藏的一项关键技术。绝大多数低渗透油藏自然产能很低,甚至没有自然生产能力,不进行压裂改造,不可能正常投入开发。研究院科研人员通过室内研究评价和深入分析长庆、吉林、大庆等油田特低—超低渗透油层现场试验,指出大规模压裂增加油层改造深度仍有很大的发展空间,需要深入开展合理加大压裂规模,提高支撑剂强度,采用优质压裂液,改进工艺技术等研究攻关实验,以进一步延长超低渗透油层压裂的有效期限,提高总增产油量;创出了整体压裂及与井网结合的优化开发技术。交联压裂液具有优良的造缝和携砂能力,是现场广泛应用的一种压裂液。针对常规硼压裂液体系一般在几秒内形成冻胶,应用于现场压裂施工时常出现上水率底和抽空现象、在管路和孔眼处高剪切作用下硼冻胶机械降解严重等问题,通过分析硼冻胶压裂交联机理和影响硼延迟作用的主要因素,配置出了硼延迟交联新体系,能定量确定延迟交联时间,很好地解决了现场出现的问题,为低渗透油藏高效压裂做出了贡献。

(3) 井网优化及调整技术。

一是确定了裂缝性砂岩油藏开发井网优化部署原则。油层裂缝在油田开发中具有双重性质作用。如何发挥和利用裂缝的有利作用,减轻和避免裂缝的不利影响,是科学合理布置开发井网的关键。在大量研究实验的基础上,我们认为低渗透油藏合理井网密度部署的关键是在油藏内部建立“有效的驱动体系”,总结出裂缝性砂岩油藏开发井网布置的基本原则是“大井距、小排距的线状注水方式”,并提出了油田开发井网部署方案建议参考表,对油田有效开发具有重要的指导作用。二是形成了低渗透油藏小井距优化开发调整研究方法。针对克拉玛依油田八区下乌尔禾组厚层块状特低渗透油藏开发中存在的问题,采用数值模拟方法开展了小井距开发层系划分与组合优化研究及井网和裂缝合理配置研究,确定了最佳层系组合方式和开发方式。小井距试验方案实施后,开发效果明显改善,预计可提高采收率11.78%。

(4) 渗流机理和动态预测技术。

一是开展了低渗透油藏渗流机理和动态预测技术研究,提出了低渗透非达西渗流的基本公式,建立了单重和双重介质非达西渗流的数学模型,并据此开发了油藏数值模拟软件的相应功能模块,为研究低渗透油藏开发决策提供了技术手段。二是开展了低渗透油藏注水见效时间与井距的关系研究。低渗透