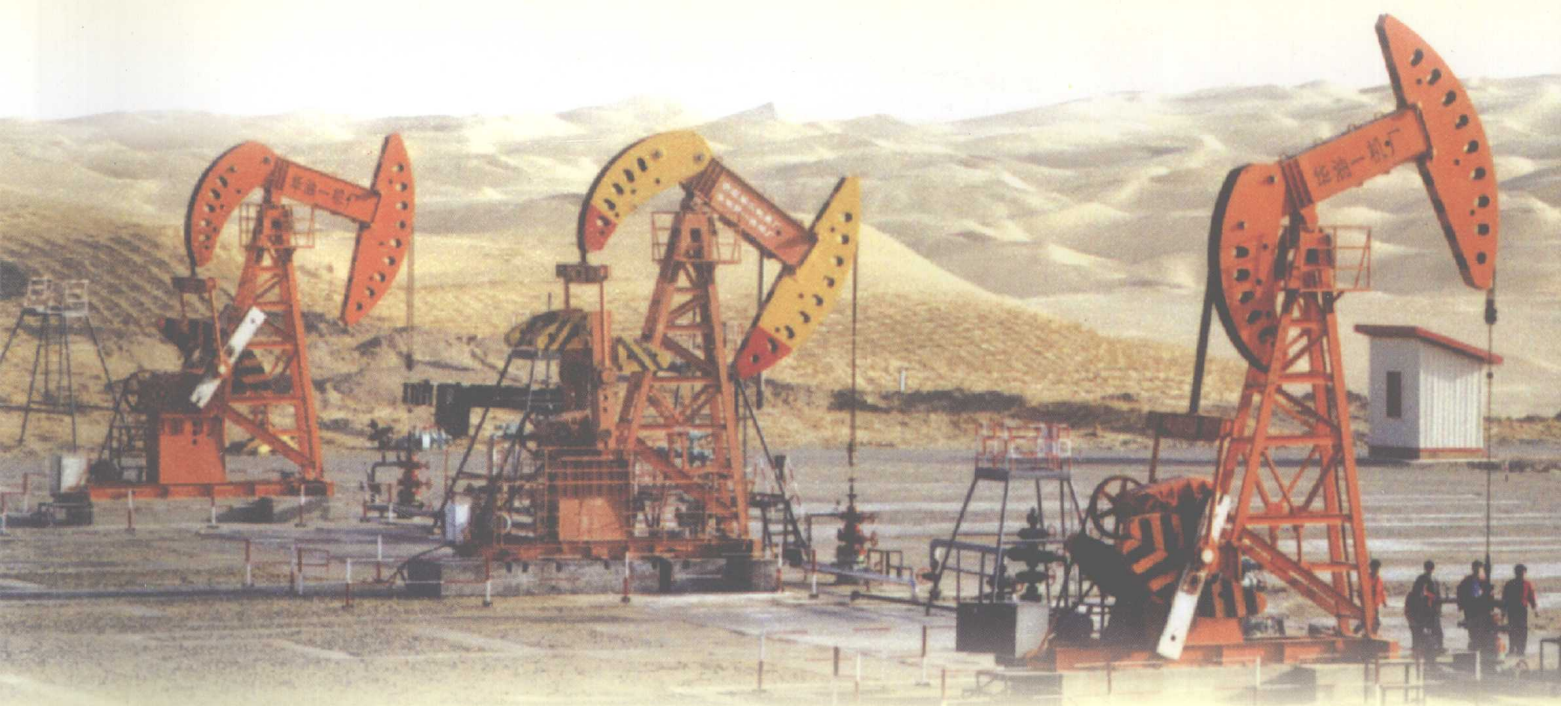


宋文杰◎主编 何君 刘建勋◎副主编

塔里木油田 会战20周年

[开发分册] 论文集

TALIMUYOUTIAN
HUIZHAN 20 ZHOUNIAN
LUNWENJI



石油工业出版社

塔里木油田会战 20 周年 论 文 集

(开发分册)

宋文杰 主编

何 君 刘建勋 副主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书精选了塔里木油田会战 20 周年以来涉及开发地质、油气藏工程、采油气工程、地面工程、综合管理等方面的理论创新和技术研究成果 85 篇,对今后进行相关技术研究具有很好的借鉴参考作用。

图书在版编目 (CIP) 数据

塔里木油田会战 20 周年论文集. 开发分册/宋文杰主编.
北京:石油工业出版社,2009.3
ISBN 978-7-5021-7031-8

- I. 塔…
- II. 宋…
- III. 塔里木盆地-油田开发-文集
- IV. TE-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 032020 号

出版发行:石油工业出版社
(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)
网 址: www.petropub.com.cn
发行部: (010) 64523620
经 销: 全国新华书店
印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷
889×1194 毫米 开本: 1/16 印张: 31.25
字数: 919 千字 印数: 1—800 册

定价: 128.00 元
(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)
版权所有,翻印必究

序 一

塔里木石油会战是我国石油发展史上的一次具有重大战略意义的会战，也是我国石油工作者在勘探面积最大、地质条件最复杂、地面条件最困难、气候最恶劣、工程技术要求最高、油气资源最丰富的含油气盆地进行的一次艰苦卓绝的、伟大的科学实践。

20年来塔里木人始终坚持“两新两高”（即新体制、新技术、高水平、高效益）的工作方针锐意进取，百折不挠，克服了一个又一个困难，逐步形成了一套应对流动沙漠和复杂高山地区的地震勘探技术和深井钻井技术，不断深化对盆地内部的地质认识，总结出一批成功的勘探开发经验和地质理论，有效地推进了塔里木盆地油气勘探开发的历史进程，在号称“死亡之海”的大沙漠和天山南麓建设起一个又一个油气田，初步形成了库车万亿立方米的大气区、塔北和塔中两个三级油气地质储量达 10×10^8 t 油当量的油气富集区。2008年塔里木油田油气产量超过了 2000×10^4 t 油当量，成为我国第四大油气田和西气东输的主要气源地。初步形成了南疆的现代化石油石化生产基地，为改善我国能源供应，特别是新疆维吾尔自治区的经济发展和人民生活的改善作出了贡献。

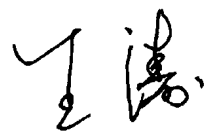
塔里木盆地勘探领域十分广阔，勘探尚处于初期阶段。很多地区、很多领域的勘探尚未进行，勘探工作的进一步发展期待着新技术和新理论的产生。今后塔里木盆地的勘探工作和地质综合研究的主题仍然是寻找大油气田，研究大油气田形成的地质条件和分布规律。围绕这一主题，中国石油塔里木油田分公司地质工作者和中国石油天然气集团公司有关单位科研人员已经做了大量工作，取得了较为丰富的科研成果，这些成果的主要部分都收录在本套论文集内。这些论文从不同角度展示了会战以来各个历史阶段的勘探开发、工程技术进步以及所获得的地质认识和技术成果，重现了塔里木石油科技工作者锲而不舍、孜孜以求的艰辛实践历程，描绘了指导塔里木油气勘探开发理论形成的曲折轨迹。

本套论文集收编的论文内容丰富，实践性强，代表了塔里木盆地的勘探开发现状与发展水平，颇具学术研究价值与实践指导意义，仔细研究这些论文，会使我们在理论创新方面受到启发，产生新的思想火花，升华已有认识，从而使塔里木盆地的油气勘探开发理论不断深化，指导油气勘探开发工作获得更佳成果。

塔里木盆地油气资源的勘探开发关系到中国石油工业的未来；在国家经济高速增长对能源需求不断扩大的情况下，塔里木承担着重要的经济、政治和社会责任，只有抓住机遇、顽强拼搏，使塔里木油气资源的勘探开发实现新的跨越，中国石油工业才

能与时俱进，向国家和全体人民交上一份合格的答卷。

书中所收集的论文，仅反映了现阶段的成果与认识水平，相信随着塔里木盆地油气勘探开发工作的深入，论文中的一些认识和理论观点会得到进一步的充实、完善和修正，有些甚至会受到否定，这些也是合乎实践论、认识论的。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely '王德' (Wang De).

2009 年 3 月

序 二

中国石油工业自发现大庆油田以后，一路高歌猛进，1978 年原油年产量突破 $1 \times 10^8 \text{t}$ ，“贫油国”一跃而成产油大国。这时塔里木作为我国最大的沉积盆地却贡献甚少。受技术条件的限制，浩瀚沙海覆盖的塔里木盆地只能在周边山前地带经历了几上几下，始终没有获得重大发现。

改革开放的春风为塔里木的发展提供了新的历史机遇，中美联合地震攻关初步搞清了塔里木盆地的整体结构；塔里木研究联队对塔里木盆地开展了第一轮油气资源评价，结果令人鼓舞；南疆勘探公司在轮南、英买力地区获重要油气发现，证实了盆地腹部的含油气性。这些工作奠定了塔里木石油会战的基础。

自 1989 年塔里木石油勘探开发指挥部成立以来，经过 20 年的奋斗，我们终于看到了这样一个前景，看到了在西部边陲有可能建起第二个大庆的前景。塔里木油气年产量从 1989 年的 $3.4 \times 10^4 \text{t}$ 到 2008 年突破 $2000 \times 10^4 \text{t}$ 油当量，形成了一批具有塔里木标志的重大成果：始于轮南止于上海的西气东输管线；横贯死亡之海的沙漠公路；发现三级储量规模超 $20 \times 10^8 \text{t}$ 的轮南—塔河海相碳酸盐岩大油气田。

岁月如歌，岁月难忘。

大漠树井架，平地起惊雷。20 年前，石油会战伊始，我们首选了位于塔克拉玛干沙漠腹地的塔中 1 号奥陶系潜山作为战略突破的目标，以 -4000m 勾画塔中 1 号潜山顶面圈闭，其面积达 6330km^2 ，幅度 1840m 。1989 年 5 月 5 日塔中 1 井开钻，10 月 18 日，在下奥陶统潜山顶部 $3566 \sim 3650\text{m}$ 井段中途测试， $\phi 22\text{mm}$ 油嘴，日产原油 365m^3 ，日产天然气 $56 \times 10^4 \text{m}^3$ ，首战告捷。

几度兴奋，几度困惑。然而，接下来的勘探并不是一帆风顺。针对奥陶系海相碳酸盐岩潜山的勘探没有很快发现大场面；石炭系东河砂岩也只找到一些“金豆豆”；志留系更是出现了大面积含油显示却出不了油的局面。塔里木遇到的地质难题、开发和工程技术难题都是我们过去没有遇到的，但塔里木人没有气馁、没有裹足不前，而是坚信“只有荒凉的沙漠，没有荒凉的人生”，努力攻关，不断创新。正是有了这种塔里木精神，才有了随后的克拉 2 大气田、轮南—塔河大油田、哈德逊大油田等一系列重大发现。

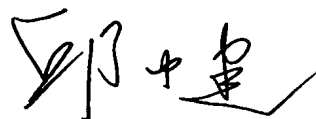
坚持科学发展，建设大油气田。石油会战以来，塔里木油田充分发挥“两新两高”新体制的优势，积极实施科技兴油战略，组织国内外多个行业的专家进行科技攻关，坚持理论技术创新促发现、低成本高效益促发展。塔里木油田从无到有、从小到大的发展史就是一部科技攻关史。塔里木油田的发展壮大不仅为我国国民经济发展作出了

重大贡献，而且为民族团结、边疆稳定也作出了重大贡献。

展望未来，任重道远。

力争 2020 年前后使塔里木年产油气达到 5000×10^4 t 油当量，真正成为我国油气生产的战略接替区。为了实现这一宏伟目标，塔里木的油气勘探仍然是工作中的重中之重，要尽快探明和控制克拉苏地区的大气田，要用新的做法尽快建成轮南—英买力、塔中地区碳酸盐岩大型油气田，要解放思想，大胆探索，争取尽快实现新区、新领域油气勘探的重大突破。

塔里木人战沙海、斗戈壁、闯山地，为国家的繁荣富强无私奉献的精神可歌可泣。但大型国有企业承担的政治责任、经济责任和社会责任不允许我们有丝毫的自满和懈怠！希望塔里木人坚持科学发展、和谐发展，勇于超越自我，胜不骄败不馁，延续沙漠变绿洲的传奇，开创我国石油工业发展史上的新篇章。希望塔里木油田实现更大发展，为全面建设小康社会和新疆经济的发展作出更大贡献！

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王建' (Wang Jian), with a stylized flourish at the end.

2009 年 2 月

前 言

为庆祝塔里木油田会战 20 周年，全面总结会战以来的勘探开发成果，充分展示塔里木油田的科技创新水平和科技攻关实力，中国石油塔里木油田分公司组织开发系统科技战线的广大技术人员共同编撰了《塔里木油田会战 20 周年论文集》（开发分册），本分册从科技创新和技术进步的角度记录和反映了开发建设的创业历程和油田开发成果，展示了油气开发技术人员勇于探索、勤于钻研的科技风貌和攻关精神。

塔里木盆地是我国最大的含油气盆地，地面环境极其恶劣，油气成藏地质条件极端复杂，特殊的地面和地下条件，给油气田开发带来了一系列的世界级难题。20 年来，油气开发工作在塔里木油田公司的正确领导和大力支持下，按照“边勘探边开发、以油养油、滚动发展”的原则，从塔里木特殊的地质条件出发，在艰苦中创业，在探索中前进，在发展中壮大，成为我国重要油气生产基地。建成投产了我国第一个超深多层砂岩油田轮南油田、第一个超深层海相砂岩油田东河油田、第一个流动沙漠腹地油田塔中油田、第一个亿吨级海相砂岩油田哈得油田、第一个整装高压循环注气部分保压开采的凝析气田牙哈凝析气田以及第一个特高压、特高产优质整装气田克拉 2 气田。形成了深层、超深层油藏描述及开发动态分析技术，深层、超深层油田采油工艺技术，高压凝析气藏循环注气配套技术，沙漠油田建设综合配套技术等技术系列，较好地解决了塔里木超深超薄、特殊油气藏的高效开发难题，实现了稀井高产的目标。油气产量从 1989 年 $3.39 \times 10^4 \text{t}$ 到 2008 年油气当量突破 $2000 \times 10^4 \text{t}$ ，跨入我国大油田的行列。目前塔里木油田已投入开发油田 10 个，投入开发气田 9 个，形成了 8 个油气生产基地，截至 2008 年年底，累计生产原油 $7573 \times 10^4 \text{t}$ ，天然气 $765 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

作为我国石油工业发展的战略接替地区，塔里木油田完成了西部大开发标志性工程——西气东输工程主力气区的建设，快速建成投产了克拉 2 气田、牙哈凝析气田、英买力气田群等，确保了西气东输年输气 $120 \times 10^8 \text{m}^3$ 供气能力，累计向西气东输供气 $389 \times 10^8 \text{m}^3$ ，把资源优势转化为经济优势，促进了边疆的稳定与发展。

本分册从 173 篇优秀成果论文中精选出 85 篇，内容涉及油气藏工程、采油气工程、地面工程、综合管理等方面的理论创新和技术研究成果。我们相信，本书的出版发行，在记载历史的同时，必将进一步激励和鼓舞更多的开发员工，发扬“爱国、创业、求实、奉献”的精神，团结一心，顽强拼搏，为塔里木油气开发事业的发展作出更大的贡献。

编 者

2009 年 3 月

目 录

油气藏工程

边水驱油藏水平井产能公式研究	范子菲 林志芳 (3)
底水驱动油藏水平井见水以后含水率变化规律研究	范子菲 傅秀娟 方宏光 (8)
底水驱动油藏水平井井网产能公式	范子菲 林志芳 (15)
油藏渗透率纵向非均质分布对水驱采收率的影响	周煦迪 俞启泰 林志芳 (22)
高含水期油田开发的方法系统	林志芳 俞启泰 彭鹏商等 (27)
渗透率间断与变产量的拟表皮系数的研究	王新海 周国隆 (33)
新疆柯克亚凝析气田循环注气调整措施与开发效果	李玉冠 张兴林 王新裕等 (37)
提高砂岩底水油藏原油采收率的新方法	朱忠谦 宋文杰 (40)
凝析气藏相态恢复理论研究	郭 平 孙 雷 宋文杰等 (44)
反凝析污染对凝析气井伤害的实验评价研究	刘建仪 郭平 李士伦等 (49)
塔里木盆地轮南油田 TⅢ油组底水块状油藏夹层分布规律研究	孙 磊 孙龙德 江同文等 (54)
塔里木油田大深度、低幅度油藏高效滚动勘探开发技术与应用	朱卫红 牛玉杰 伍轶鸣等 (60)
异常高压气藏开发特征的解析研究	邓远忠 王家宏 郭尚平等 (70)
水平井技术在牙哈凝析气田开发中的应用	李保柱 朱玉新 宋文杰等 (76)
同位素示踪在油田注水调整中的应用	吴 迪 韩易龙 范颂文等 (78)
水平井水平段压力分布研究	李保柱 宋文杰 纪淑红等 (81)
水平井生产测井技术应用	韩易龙 吴 迪 王 海等 (87)
超深超薄油藏水平井开采技术	朱卫红 牛玉杰 昌伦杰等 (93)
克拉 2 气田产能预测方程的建立	李保柱 朱玉新 宋文杰等 (101)
新疆柯克亚西 ₄ ² —西 ₅ ² 凝析气藏单井注气吞吐解堵技术	王新裕 魏云峰 丁国发等 (105)
克拉 2 气田储层应力敏感性及对产能影响的实验研究	孙龙德 宋文杰 江同文 (108)
加强科技攻关, 促进哈得 4 油田滚动勘探开发	孙龙德 宋文杰 朱卫红等 (115)
超压凝析气藏的流体相态和物理性质	郜国喜 袁士义 宋文杰等 (125)
大型整装异常高压气田开采技术研究——以克拉 2 气田为例	宋文杰 王振彪 李汝勇等 (130)
Test of the Relative Permeability Curve of a Gas and Oil Condensate System and its Effect on the Recovery of Oil and Gas	Guo Ping Li Haiping Song Wenjie et al. (137)
剩余油量化分布软件的开发及应用	卞万江 练章贵 昌伦杰等 (145)
利用图版判别凝析气藏气窜的方法探讨	朱玉新 李保柱 宋文杰等 (151)

轮南古潜山碳酸盐岩储集层裂缝分布分形特征	王自明	宋文杰	杨新华 等	(154)
克拉 205 井岩石变形对产能的影响	朱玉新	谢兴礼	宋文杰 等	(159)
轮南古潜山碳酸盐岩油藏长岩心驱替实验成果	王自明	宋文杰	刘建仪 等	(164)
牙哈凝析气田测试地层压力异常的校正	王洪峰	周理志	唐明龙 等	(168)
塔里木盆地牙哈凝析气田循环注气开发研究	宋文杰	江同文	唐明龙 等	(172)
哈得 4 油田低幅度薄油层水平井开发技术	宋文杰	朱卫红	江同文 等	(178)
高压凝析气藏试井技术研究——以塔里木盆地牙哈凝析气田为例	王天祥	朱忠谦	李汝勇 等	(190)
大型整装异常高压气田开发初期开采技术研究——以克拉 2 气田为例	王天祥	朱忠谦	李汝勇 等	(199)
双台阶水平井在塔里木哈得油田的应用及效果评价	荣 宁	吴 迪	韩易龙 等	(208)
超深、超薄砂岩油藏双台阶水平井开发技术	王 陶	董志刚	钟世成 等	(211)
塔里木油田水平井高效开发技术			相建民	(214)
双孔介质复合封闭储层压力分布的求解分析	李汝勇	孙文涛	李顺初 等	(223)
几种天然气偏差因子计算方法的适用性评价	阳建平	肖香姣	张大鹏 等	(229)
轮南古隆起奥陶系潜山油气成藏机理	何 君	韩剑发	潘文庆	(233)
裂缝性应力敏感气藏的数值试井研究	唐明龙	肖香姣	孙贺东 等	(239)
高产气井井口压力动态 Laplace 空间解	朱忠谦	李顺初	黄炳光 等	(246)
塔里木盆地迪那 2 气田特低渗砂岩储层应力敏感性研究	江同文	唐明龙	肖香姣 等	(250)
轮南奥陶系碳酸盐岩油藏产能影响因素及产能评价方法研究	练章贵	刘 勇	秦 可 等	(255)
异常高压、特高产气井井口压力资料处理方法	阳建平	肖香姣	唐明龙 等	(261)
轮南油田以水平井挖潜为主的调整研究与应用	练章贵	朱卫红	昌伦杰 等	(267)
塔里木油田东河 1CIII 油组精细油藏描述研究与应用	练章贵	江同文	朱卫红 等	(273)
轮南油田 2 井区三叠系储层精细描述技术及应用	韩 涛	朱卫红	昌伦杰 等	(281)
塔中 4 油田 CIII 油组精细剩余油量化及开发调整对策研究	刘 勇	卞万江	刘国威 等	(287)
塔里木油田典型油气藏水平井开发效果评价	朱卫红	周代余	冯积累 等	(294)
克拉 2 气田稀井网条件下储层精细三维地质建模	江同文	唐明龙	王洪峰	(301)
倾斜油水界面成因分析与非稳态成藏理论探索	江同文	徐汉林	练章贵 等	(308)
塔里木盆地牙哈循环注气凝析气田延缓气窜的方法研究	朱卫红	张芬娥	唐明龙 等	(314)
超深油（气）藏的特殊性与开发技术对策			王家宏	(318)

采油气工程

塔里木东河塘油田超深层压裂酸化增注工艺技术	杨长祐	(325)
世界连续油管机组应用日趋广泛（翻译稿）	杨长祐	(336)
LN209 井油管沉积物下方腐蚀行为	张学元 邸 超 陈卓元 等	(339)
纤维对玻璃钢管性能的影响研究	邸 超 张玉芳 邓永容	(343)

腐蚀落井油管的打捞方法探讨	陈 竹 宋中华 钟家维 等 (348)
挤水泥堵水技术在 LN2 - 25 - 15 井的应用	刘建勋 陈 竹 钟家维 等 (352)
N80 钢的 CO ₂ 腐蚀行为试验研究	赵国仙 严密林 白真权 等 (356)
7in 可取式双封采油管柱技术的应用与完善	何 钧 罗海全 陈 竹 等 (359)
高压高产气田完井采气工艺技术研究——以克拉 2 气田开采配套工艺技术的推荐方案为例	刘明球 周天鹏 敬祖佑 等 (362)
管道内腐蚀检测新技术和新方法	钟家维 沈建新 贺志刚 等 (368)
超深高压凝析气井酸化增注及效果评价	陈文龙 吴年宏 艾国生 (373)
轮南油田注水井污染评价方法探讨	周理志 马红英 方 珂 等 (376)
轮南油田油套管腐蚀机理研究及控制方案初探	高运宗 董训长 陈 薇 等 (381)
双台阶水平井注水工艺技术在塔里木哈得薄砂层油藏的应用	高运宗 陈 薇 蒋余巍 等 (391)
水平深井砂埋油管的连续套铣结合尾部打捞技术	黄民战 张 毅 金作军 (400)
克拉 2 气田 CO ₂ 腐蚀防护对策研究	晁宏洲 王赤字 任妮军 等 (402)
轮南油田气举优化技术应用	孙 军 高运宗 潘昭才 (409)
迪那 2 超高压气田完井网络酸化技术研究及应用	袁学芳 刘 举 黄世财 等 (416)
化学暂堵酸化技术在 TZ16 - 10 水平井的应用及效果分析	冯觉勇 杨之照 卢 宇 等 (424)
轮南油田深井注水工艺配套技术研究	王益清 (430)

地 面 工 程

新型输送管材在塔里木油田的应用	胡 峻 董训长 杨建文 等 (437)
自动化工业控制系统在塔里木油田开发生产过程中的研究与应用	伍文峰 董志君 靳呈松 (440)
天然气预处理和液化工艺技术的研究进展	付道明 孙 军 贺志刚 等 (448)
浅谈吉拉克凝析气田集输工艺技术	尹显林 伍文锋 张永灵 等 (455)
牙哈凝析气集中处理系统运行分析	伍藏原 张明益 邹应勇 等 (457)
变频调速技术在油田中的应用	晁宏洲 祁顺仁 周明基 等 (461)
PB 数据管道功能在油田开发数据库中的应用	王 钊 陈晓右 哈撒古丽 (465)
塔里木油田地面工艺防腐技术	蒋余巍 赵 顶 陈 薇 等 (469)

综 合 管 理

塔里木油田开发生产经济运行辅助决策系统的研制及应用	江同文 孙龙德 练章贵 等 (475)
双赢战略联盟在勘探开发中的实践	何 钧 姜渊明 (482)

油气藏工程

边水驱油藏水平井产能公式研究

范子菲 林志芳

(北京石油勘探开发科学研究院)

摘要:在边水驱油藏水平井产能公式推导过程中,考虑了油层顶部和底部封闭边界、油层两边的恒压边界、水平井在油层中的位置、油层各向异性因素对水平井势分布的影响,同时研究了影响边水驱油藏水平井产能的参数:油层各向异性比值、水平井位置、油水界面到水平井的距离、水平井长度。

关键词:产能计算 水平井 产能 边水 驱油机理

有关边水油藏的水平井产能文献,国外曾有 Chaperon 导出过边水驱油藏水平井产能公式。他在推导过程中,假设水平井位于油层顶部,通过考虑油水界面和水平井井底之间的势差来考虑油水界面对水平井产能的影响。Giger 用速端曲线法也导出了边水驱油藏水平井产能公式,他考虑的是水平井位于油层顶部和油层在水平方向上无限大的情况。本文首先应用镜像反映法和势函数叠加原理得出边水驱油藏水平井势函数表达式及其产能公式,在推导过程中,考虑了油层顶部和底部封闭边界、油层两侧的恒压边界、水平井在油层中位置、油层各向异性因素对水平井势分布的影响;其次研究了影响边水驱油藏水平井产能的参数,这些参数是油层各向异性比值、水平井位置、油水界面到水平井的距离和水平井长度。

1. 边水驱动油藏水平井产能公式的导出

一口水平井位于边水驱动油藏中,边水驱动油藏厚度为 h_o ,水平井到油层底部封闭边界的距离为 z_w ,在水平方向上水平井位于油层中央,水平井到油层两侧油水界面的距离为 b (图1)。这种边水驱动情况就和水平生产井和水平注水井交替排列的无穷井列情况一样。

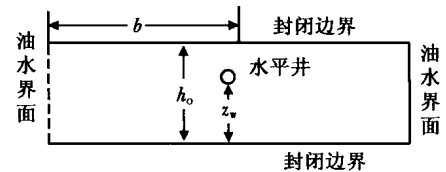


图1 边水驱动油藏水平井剖面图

图1中,流体流动的势函数满足 Laplace 方程:

$$K_h \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + K_v \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$z = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$z = h_o, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$x = r_w, \quad \Phi = \Phi_w; \quad x = \pm b, \quad \Phi = \Phi_r \quad (4)$$

势函数为:

$$\Phi = p + \rho_o g z$$

式中 p ——压力;

ρ_o ——地下原油密度;

g ——重力加速度;

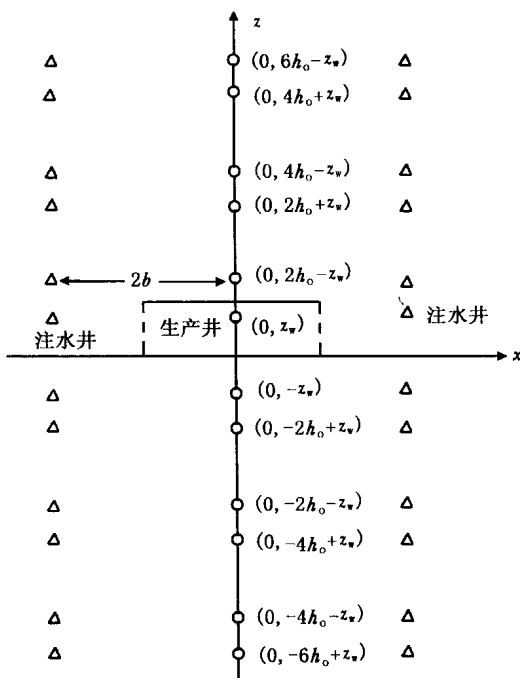


图2 边水驱动油藏中水平井映射图

横坐标为 $x = -2b$ ，右边注水井横坐标为 $x = 2b$ 。设图2中生产井产量符号为正，注水井注入量符号为负，即生产井产量为 Q_o ，注水井注入量为 $-Q_o/2$ ，由势函数叠加原理可得：

$$\begin{aligned} \Phi(x, z) = & \frac{Q_o \mu_o B_o}{4\pi KL} \left\{ \sum_{-\infty}^{+\infty} \ln [x^2 + (z - z_w - 2nh_o)^2] [x^2 + (z + z_w - 2nh_o)^2] \right. \\ & - \frac{1}{2} \sum_{-\infty}^{+\infty} \ln [(x - 2b)^2 + (z - z_w - 2nh_o)^2] [(x - 2b)^2 + (z + z_w - 2nh_o)^2] \\ & \left. - \frac{1}{2} \sum_{-\infty}^{+\infty} \ln [(x + 2b)^2 + (z - z_w - 2nh_o)^2] [(x + 2b)^2 + (z + z_w - 2nh_o)^2] \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

式中 Q_o ——水平井地面产量；

μ_o ——原油黏度；

B_o ——原油体积系数；

K ——油层平均渗透率；

L ——水平井长度。

利用有关参考文献中求和的基本公式：

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} \ln [(x - c)^2 + (z - na)^2] = \ln \left[\text{ch} \frac{2\pi(x - c)}{a} - \cos \frac{2\pi z}{a} \right] + c_1 \quad (6)$$

式中 a, c ——参数。

式(6)中， c_1 为常数； $\text{ch}x = \frac{1}{2} (e^x + e^{-x})$ ，双曲余弦函数。利用式(6)进一步将式(5)

简化为：

K_h ——油层水平渗透率；

K_v ——油层垂直渗透率；

r_w ——水平井井径；

h_o ——油层含油高度；

b ——从恒压边界到水平井的距离；

Φ_w ——水平井井底势函数；

Φ_r ——恒压边界势函数。

由于求解在边界条件式(2)、式(3)、式(4)下的 Laplace 式(1)较困难，在这里应用势函数叠加原理求解。在图1中分别以油层顶部、底部封闭边界及油层两端的恒压边界为镜面，应用镜像反映法把该问题变为便于求解的无穷大平面(图2)。

图2中，横坐标 x 轴选在油层底部封闭边界上， x 轴通过水平井。在映射图中，存在两类不同位置的生产井，第一类生产井的位置为： $x=0$ ； $z=z_w, z_w + 2h_o, z_w + 4h_o \cdots z_w + 2nh_o$ ，第二类生产井位置为： $x=0$ ； $z=-z_w, -z_w + 2h_o, -z_w + 4h_o \cdots -z_w + 2nh_o$ ， $n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \cdots$ 与生产井相对应，注水井的纵坐标和生产井纵坐标相同，只是 z 轴左边注水井

纵坐标和生产井纵坐标相同，只是 z 轴左边注水井

$$\Phi(x, z) = \frac{Q_o \mu_o B_o}{8\pi KL} \left\{ \ln \frac{[\operatorname{ch} \frac{\pi x}{h_o} - \cos \frac{\pi(z-z_w)}{h_o}]^2}{[\operatorname{ch} \frac{\pi(x-2b)}{h_o} - \cos \frac{\pi(z-z_w)}{h_o}][\operatorname{ch} \frac{\pi(x-2b)}{h_o} - \cos \frac{\pi(z+z_w)}{h_o}]} + \ln \frac{[\operatorname{ch} \frac{\pi x}{h_o} - \cos \frac{\pi(z+z_w)}{h_o}]^2}{[\operatorname{ch} \frac{\pi(x+2b)}{h_o} - \cos \frac{\pi(z-z_w)}{h_o}][\operatorname{ch} \frac{\pi(x+2b)}{h_o} - \cos \frac{\pi(z+z_w)}{h_o}]} \right\} \quad (7)$$

在注水井井底, $x=2b+r_w$, $z=z_w$, 同时考虑到在实际油藏中 $r_w \ll b$, $r_w \ll h_o$, 因而有: $\operatorname{ch} \frac{\pi r_w}{h_o} \approx 1 + \frac{\pi^2 r_w^2}{2h_o^2} \approx 1$, 于是得到注水井井底势函数以极高精度的简化式:

$$\Phi(2b+r_w, z_w) = \frac{Q_o \mu_o B_o}{8\pi KL} \ln \frac{(\operatorname{ch} \frac{2\pi b}{h_o} - 1)^2 (\operatorname{ch} \frac{2\pi b}{h_o} - \cos \frac{2\pi z_w}{h_o})^2}{\frac{\pi^2 r_w^2}{2h_o^2} (1 - \cos \frac{2\pi z_w}{h_o}) (\operatorname{ch} \frac{4\pi b}{h_o} - 1) (\operatorname{ch} \frac{4\pi b}{h_o} - \cos \frac{2\pi z_w}{h_o})} \quad (8)$$

在生产井井底, $x=r_w$, $z=z_w$, 就可以得到生产井井底势函数:

$$\Phi(r_w, z_w) = \frac{Q_o \mu_o B_o}{8\pi KL} \ln \frac{(\frac{\pi^2 r_w^2}{2h_o^2})^2 (1 - \cos \frac{2\pi z_w}{h_o})^2}{(\operatorname{ch} \frac{2\pi b}{h_o} - 1)^2 (\operatorname{ch} \frac{2\pi b}{h_o} - \cos \frac{2\pi z_w}{h_o})^2} \quad (9)$$

注水井和生产井之间的势差为:

$$\Delta\Phi = \frac{Q_o \mu_o B_o}{8\pi KL} \ln \frac{(\operatorname{ch} \frac{2\pi b}{h_o} - 1)^4 (\operatorname{ch} \frac{2\pi b}{h_o} - \cos \frac{2\pi z_w}{h_o})^4}{(\frac{\pi^2 r_w^2}{2h_o^2})^3 (1 - \cos \frac{2\pi z_w}{h_o})^3 (\operatorname{ch} \frac{4\pi b}{h_o} - 1) (\operatorname{ch} \frac{4\pi b}{h_o} - \cos \frac{2\pi z_w}{h_o})} \quad (10)$$

在边水驱动油藏中, 恒压边界和水平井之间的势差为水平注水井和水平生产井之间势差的一半, 由此就可得到边水驱油藏水平井产能公式:

$$Q_o = \frac{16\pi KL \Delta\Phi / (\mu_o B_o)}{\ln \frac{\operatorname{sh}^8 \frac{\pi b}{h_o} (\operatorname{ch} \frac{2\pi b}{h_o} - \cos \frac{2\pi z_w}{h_o})^4}{(\frac{\pi^2 r_w^2}{2h_o^2})^3 \sin^6 \frac{\pi z_w}{h_o} \operatorname{sh}^2 \frac{2\pi b}{h_o} (\operatorname{ch} \frac{4\pi b}{h_o} - \cos \frac{2\pi z_w}{h_o})}} \quad (11)$$

将式 (11) 改为适用于各向异性油藏且以油藏工程实用单位表示的形式:

$$Q_o = \frac{4.343 KL \Delta\Phi / (\mu_o B_o)}{\ln \frac{\operatorname{sh}^8 \frac{\pi b}{\beta h_o} (\operatorname{ch} \frac{2\pi b}{\beta h_o} - \cos \frac{2\pi z_w}{h_o})^4}{(\frac{\pi^2 r_w^2}{2\beta^2 h_o^2})^3 \sin^6 \frac{\pi z_w}{h_o} \operatorname{sh}^2 \frac{2\pi b}{\beta h_o} (\operatorname{ch} \frac{4\pi b}{\beta h_o} - \cos \frac{2\pi z_w}{h_o})}} \quad (12)$$

由于在实际油藏中, 一般有 $b > h_o$, 因而有 $\operatorname{ch} \frac{2\pi b}{\beta h_o} \gg 1$, $\operatorname{ch} \frac{4\pi b}{\beta h_o} \gg 1$, 而式 (14) 中余弦项取值

范围在 $[-1, 1]$ ，因而式 (12) 中的余弦项可以忽略，即：

$$Q_o = \frac{4.343KL\Delta\Phi / (\mu_o B_o)}{6 \ln \frac{\sqrt{2}\beta h_o}{\pi r_w} + \ln \frac{\text{sh}^8 \frac{\pi b}{\beta h_o} \text{ch}^4 \frac{2\pi b}{\beta h_o}}{\sin^6 \frac{\pi z_w}{h_o} \text{sh}^2 \frac{2\pi b}{\beta h_o} \text{ch} \frac{4\pi b}{\beta h_o}}} \quad (13)$$

当 $x > \pi$ 时，有如下表达式成立：

$$\text{sh}(x) = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x}) \approx \frac{1}{2}e^x$$

$$\text{ch}(x) = \frac{1}{2}(e^x + e^{-x}) \approx \frac{1}{2}e^x$$

应用上面的表达式进一步简化式 (13)，有如下方程成立：

$$Q_o = \frac{0.7238KL\Delta\Phi / (\mu_o B_o)}{\ln \frac{\beta h_o}{2\pi r_w} + \frac{1.333\pi b}{\beta h_o} - \ln \sin \frac{\pi z_w}{h_o}} \quad (14)$$

$$K = \sqrt{K_h K_v} \quad \beta = \sqrt{K_h / K_v}$$

式中 β ——油层各向异性比值。

变量的单位说明如下： Q_o 的单位为 m^3/d ， K 的单位为 mD ； K_h 的单位为 mD ； K_v 的单位为 mD ； L 的单位为 m ； $\Delta\Phi$ 的单位为 MPa ； μ_o 的单位为 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ； r_w 的单位为 m ； b 的单位为 m ； h_o 的单位为 m 。

2. 影响边水驱油藏水平井产能参数研究

为了研究影响边水驱油藏水平井产能的参数，应用式 (14) 进行计算，就可绘出图 3 至图 6 所示的曲线。计算图 3 所用的参数除了垂直渗透率变化以外，其他各参数见表 1。其他各图的参数除了横坐标以外，其他参数均和表 1 相同。

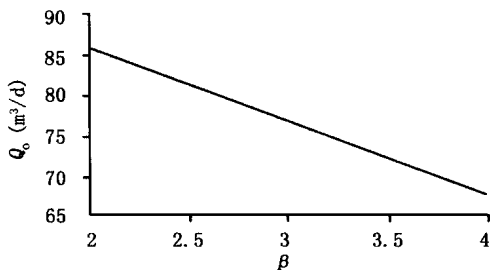


图3 边水驱动油藏中水平井产量和油层各向异性比值关系曲线

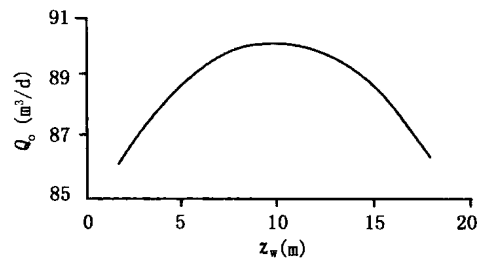


图4 边水驱动油藏中水平井产量和水平井位置关系曲线

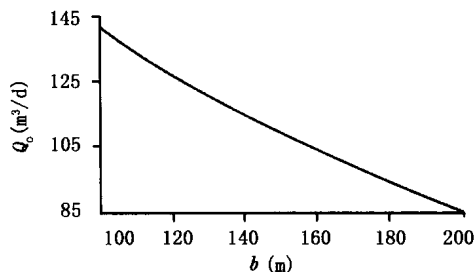


图5 边水驱动油藏中水平井产量和油水界面到水平井距离关系曲线

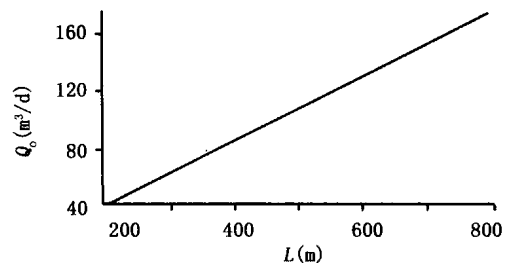


图6 边水驱动油藏中水平井产量和水平井长度关系曲线