

91B5190101

国外砾岩油田开发历程调研



新疆石油管理局勘探开发研究院

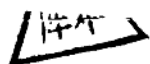
1992年10月

石油大学(北京)





063815



编写单位：情报档案室

编写人：吴 蛇

参加人：王章进 刘文华

室技术负责人：吴 蛇

副院长：王宜林

院长：刘振武

局项目领导小组组长：赵立春



200419564



摘 要

美国阿拉斯加州库克湾盆地麦克阿瑟河油田第三系赫姆洛克组砾岩油藏是一个具有 $2.9 \times 10^8 \text{m}^3$ 探明地质储量的、低饱和的陆相整装大油藏。1965 年勘探发现,1967 年投入开发,1969 年全面投注(水),至今已有 25 年开采历史。累计采出地质储量的 26%,可采采出程度达 75%。

本研究报告根据截至 1991 年公开发表的国内外文献资料,经过详细的整理和综合分析,对该油藏的地质特点进行了描述;并通过人工拟合和预测,对油藏的开发历程进行了“复原”;对油藏的开发阶段按含水率进行了划分。总的看来,赫姆洛克砾岩油藏低—中含水阶段的主要开发指标比我国克拉玛依砾岩油田一类油藏的开发指标一般较好,而高含水开发阶段,由于天灾及油井事故等影响,其主要开发指标则不如克拉玛依砾岩油田三类油藏的开发指标。

报告还对该油藏在整个开发过程中所采取的旨在不断认识油藏的计算机“跟踪模拟”、“水线前缘跟踪模拟”以及旨在改善水驱效果、提高原油采收率的各项措施进行了简述。对该油藏可供我国克拉玛依砾岩油田注水开发借鉴的做法,报告的作者提出了自己的见解供参考。

报告还对调研的辅助典型——阿根廷门多萨油田顶部红色砾岩油藏的地质开发简况进行了介绍。

本报告虽然不是最终成果,但截至目前,它仍不失为一份在国内研究和介绍国外砾岩油藏注水开发特征的最新和最全的成果。

主题词: 砾岩油藏 开发历程 调研 国外

前 言

为了提高我国各种类型油气藏的整体开发水平,增强决策上的主动性、预见性和工艺技术上的可行性及针对性,提高油田开发效果及总的经济效益,1990年8月下旬,中国石油天然气总公司原开发生产部、科技发展部和总公司情报所通过昌平会议联合下达了总公司“八五”期间重点科研项目之一,即开展《国外不同类型油田开发历程及工艺技术系列研究》。

《国外典型砾岩油藏开发历程及工艺技术系列研究》是我局承担的该项目中的一个子课题。根据我局该项目领导小组及局科技处的安排[新油科(1990)19号文件],该课题应于1993年5月向总公司汇报研究成果,1993年9月提交正式研究报告。

砾岩油藏在全世界为数很少,主要分布在美国洛杉矶盆地(如加利福尼亚州的上新世约巴琳达砾岩稠油油藏)、库克湾盆地(如阿拉斯加州的麦克阿瑟河油田始新统赫姆洛克组砾岩油藏)、阿根廷的库约盆地(如门多萨油田侏罗—白垩系巴伦卡斯组顶部红色砾岩油藏),以及加拿大西部盆地帕宾那油田上白垩统卡狄姆油藏和巴西的塞尔希培—阿戈斯盆地卡莫普利斯油田下白垩统卡莫普利斯油藏等^[20]。

但从我国准噶尔盆地西北缘克拉玛依油田砾岩油藏考虑,世界上可进行类比及在一定程度上可以借鉴的砾岩油藏却只有两个,即美国麦克阿瑟河油田赫姆洛克砾岩油藏和阿根廷门多萨油田顶部红色砾岩油藏。形成这种概念的依据是:

1. 这两个油藏的储集层均由山麓河流冲积相陆源沉积物组成,和克拉玛依油田砾岩油藏的山麓冲积—洪积相陆源沉积环境比较接近,
2. 两个油藏储集层的岩性均为砾岩,局部为砂质砾岩。具复模态结构。和克拉玛依油田砾岩油藏储集层的岩石结构类似;
3. 两个油藏的原油均为稀油,和克拉玛依油田大部分砾岩油藏的原油性质同属一个范畴;
4. 两个油藏的开发方式均为注水开发,并且都已进入到了高含水阶段,有较长的开采历史,和克拉玛依油田砾岩油藏的开发方式基本相同。

通过 1991 年 4 月在江汉油田召开的“落实国外油田选型汇报会”确定了阿根廷的门多萨油田顶部红色砾岩油藏为本课题调研的主要典型,美国麦克阿瑟河油田赫姆洛克砾岩油藏为辅助典型。

经过多次检索、查找文献资料的结果,发现这两个典型油藏的资料奇缺,已公开发表具有一定参考价值的文献总共只有 24 篇,不仅数量太少,而且问题阐述欠系统、深入。但两个油藏的资料相比较,麦克阿瑟河油田的资料相对多一些,有 14 篇;内容涉及的深度和广度也相对较大一些。因此,我们的调研工作只好将麦克阿瑟河油田赫姆洛克砾岩油藏作为主要典型。对门多萨油田顶部红色砾岩油藏只能给出简况介绍。

对国外砾岩油藏的研究,中国海洋石油总公司海洋石油勘探开发研究中心情报室汤珣同志 1986 年编写过《麦克阿瑟河油田》调研报告,概略介绍了该油田 1978 年以前地质开发情况(共约 7000 字);华北石油勘探开发研究院情报室的湛继红同志 1988 年曾编写过《国外砾岩油田(藏)开发特征》调研报告,约 1.5 万字,对国外几个砾岩油田(藏)包括我们选为典型的油藏作了地质特征和开发情况的概略介绍和分析;另外,早在 60 年代,总公司勘探开发科学研究院曾组织我局有关翻译人员编译过《帕宾那油田》,较系统介绍了该油田的地质与开发情况,从该报告中得知帕宾那油田上白垩统卡狄姆油藏的储集层主要是砂岩而不是砾岩,该油藏中的砾岩很薄,且为海相沉积,不是油田的主要目的层。除以上这些调研成果外,目前能检索到的只是一些零星的文献。

根据上述情况,目前我们只能提交阶段研究成果。待今后资料搜集基本齐全时,再按课题设计提纲的要求完成最终报告。

目 次

第一篇 美国阿拉斯加州库克湾盆地麦克阿瑟河油田赫姆洛克砾岩油藏开发历程

- 1 油田地质描述
 - 1.1 区域地理地质概况
 - 1.2 油藏描述
- 2 油藏开发历程
 - 2.1 油藏开发简史
 - 2.2 油藏开发全过程的历史拟合
 - 2.3 油藏开发各阶段的基本特征
 - 2.4 油藏开发过程中的增产措施
 - 2.5 油藏开发全过程的跟踪模拟

第二篇 阿根廷门多萨油田顶部红色砾岩油藏地质开发简述

- 1 油藏地质描述
 - 1.1 区域地理地质概况
 - 1.2 油藏描述
- 2 油藏开发简述
 - 2.1 油藏开发方式的确定
 - 2.2 油藏水驱动态特征
 - 2.3 三次采油提高采收率研究

第三篇 对国外典型砾岩油藏地质开发的认识

- 1 赫姆洛克砾岩油藏和顶部红色砾岩油藏都是注水开发的陆相整装大油藏
- 2 利用油藏数值模拟跟踪油田开发的全过程,研究成果已成功地运用于油田的开发调整预测,这是油藏数模技术的一大发展
- 3 努力提高低含水采油阶段的采出程度是砾岩油藏注水开发获得较高采收率的关键
- 4 井网部署比较合理,是用稀井网开发非均质砾岩大油藏的一个成功的范例
- 5 勘探效果显著,效益高

附图

- 图 1 阿拉斯加州中新世沉积盆地分布图
- 图 2 阿拉斯加州库克湾盆地地层层序图
- 图 3 库克湾盆地油气田分布位置图
- 图 4 库克湾盆地原油密度与生产层段深度关系图
- 图 5 库克湾原油对比指数曲线
- 图 6 库克湾原油 C_7 饱和烃三角形对比图
- 图 7 通过 FID 热分析和燃烧有机碳确定下库克湾四口井有机物类型与深度的关系
- 图 8 沿 CC' 剖面中新世末形成的石油地层圈闭图
- 图 9 沿 CC' 剖面中侏罗统生油源岩与第三系储集岩接触关系图
- 图 10 赫姆洛克组按测井资料细分层图
- 图 11 克拉玛依油田七区 T_2 层组划分示意图
- 图 12 赫姆洛克油藏孔隙度与渗透率关系图
- 图 13 麦克阿瑟河油田赫姆洛克砾岩油藏构造及含油面积图
- 图 14 赫姆洛克油藏动态分区图
- 图 15 麦克阿瑟河油田赫姆洛克砾岩油藏开采曲线
- 图 16 赫姆洛克砾岩油藏产油量递减曲线
- 图 17 麦克阿瑟河油田赫姆洛克砾岩油藏含水率变化曲线
- 图 18 麦克阿瑟河油田赫姆洛克砾岩油藏水驱特征曲线
- 图 19 麦克阿瑟河油田赫姆洛克砾岩油藏含水率与采出程度关系曲线
- 图 20 赫姆洛克砾岩油藏开采综合曲线
- 图 21 赫姆洛克砾岩油藏无因次对比速度与工业采出程度关系图
- 图 22 赫姆洛克组储集层岩心用 12% 的 HCl 及 10% 的 HF 酸化反应曲线
- 图 23 赫姆洛克砾岩油藏油井受单层水淹影响典型生产动态曲线
- 图 24 麦克阿瑟河油田赫姆洛克组第六段水淹面积图
- 图 25 阿根廷沉积盆地分布图
- 图 26 阿根廷库约盆地油田分布位置图
- 图 27 门多萨油区顶部红色砾岩油藏位置图
- 图 28 门多萨北部三叠纪盆地地层层序表
- 图 29 门多萨油区地层对比图

- 图 30 顶部红色砾岩层测井曲线
- 图 31 顶部红色砾岩冲积扇沉积模式图
- 图 32 顶部红色砾岩储集层毛管压力曲线
- 图 33 顶部红色砾岩油藏 PB—45 井自然电位测井响应与岩心渗透率关系图
- 图 34 顶部红色砾岩油藏自然电位测井曲线下的面积与取心井 KH 的关系图
- 图 35 北部研究地区的测井栅状图
- 图 36 南部研究地区的测井栅状图
- 图 37 顶部红色砾岩在沉积搬运方向的横剖面
- 图 38 顶部红色砾岩在横切冲积扇方向的横剖面
- 图 39 顶部红色砾岩的渗透率与孔隙度关系图
- 图 40 顶部红色砾岩层泥质含量与渗透率关系图
- 图 41 顶部红色砾岩油藏地层原油性质关系曲线
- 图 42 门多萨油区顶部红色砾岩油藏注水开发水线推进位置图
- 图 43 顶部红色砾岩油藏累计产油量分布图
- 图 44 顶部红色砾岩油藏含水率与采收率关系图
- 图 45 顶部红色砾岩油藏含水饱和度分布与离开注水井的距离的关系图
- 附件一 美国库克湾盆地麦克阿瑟河油田赫姆洛克砾岩油藏地质开发译文集
- 附件二 阿根廷门多萨油田巴兰卡组地质开发译文集

第一篇

美国阿拉斯加州库克湾盆地麦克阿瑟河油田赫姆洛克砾岩油藏开发历程

1 油田地质描述

1.1 区域地理地质概况

美国的阿拉斯加州有陆地面积 $152 \times 10^4 \text{km}^2$, 浅海大陆架面积 $82.4 \times 10^4 \text{km}^2$, 共有 11 个中新世沉积盆地。其中之一的库克湾盆地位于阿拉斯加州的南部, 麦克阿瑟河油田 (McArthur River Field) 就位于库克湾盆地的上库克湾地区西部浅海中, 距安克雷奇 (Anchorage) 城西南约 112km (图 1)。

库克湾盆地的北面、西北面以阿拉斯加山脉为界; 西面以阿留申山脉的布鲁恩湾大断裂为界; 东面以 Talkeetna 山的边界山大断裂 (Border Ranges Fault) 为界; 南面以巴林岛 (Barren Is.) 为界。盆地长 325km, 宽约 100km, 总面积 $3.9 \times 10^4 \text{km}^2$, 相当于地槽区的一个山间盆地。卡尔金岛 (Kalgin Is.) 以北称上库克湾, 以南称下库克湾 (图 3)。7 月份上库克湾地区的气温平均为 20°C , 1 月份为 -7.2°C ; 而下库克湾在相应时期的气温平均为 15.5°C 及 -2.2°C 。足见下库克湾地区的气候条件较上库克湾地区要好些, 具有“冬暖夏凉”的特点。全盆地的年降雨量平均为 304.8mm。潮汐涨落的落差达 9~10m。有适于农耕的土地和沼泽, 且无永冻层^[1]。

库克湾盆地在区域地质构造上属于北美地槽构造体系向西弯曲的延伸部分, 即科迪勒拉褶皱带 (Cordilleran geosyncline) 的西北部分, 并且是在其南部的新生代褶皱区的范围内。该盆地是一个呈东北走向的洼陷^[2], 大部分在水中。

库克湾盆地基底为中生界三叠系上三叠统的变质岩及火山喷发岩系。沉积岩的最大沉积厚度为 17766m, 包括基底在内的地层最大钻揭厚度为 18161m。地表出露的地层从上三叠统直到第三系。结合地下取岩心资料分析研究的结果, 自下而上各时代的地层的主要岩性及厚度变化简述如下 (图 2):

a. 上三叠统

由变质岩与玄武岩的熔岩流组成。变质岩属变质灰岩、变质凝灰岩、燧石、变质砂岩及页岩。出露于布鲁恩湾大断裂两侧,井下未钻达,变质灰岩含海相化石。出露的地层厚度达 395m。

b. 下侏罗统

又称 Talkeentna 组,出露于库克湾两侧,在盆地西北缘的露头带宽达 15km,局部地区被布鲁恩大断裂断开。岩性为一套由火山集块岩、火山凝灰岩、角砾岩等组成的火山碎屑岩与海相的砂岩、页岩及灰岩,此外还有熔岩流。与上三叠统呈不整合接触,地层总体向东南倾斜,在下库克湾地区曾有 4 口井钻达。厚 2575m。

c. 中侏罗统

又称 Tuxedni 组,出露于布鲁恩湾断裂两侧及下库克湾两侧。在卡尔金岛和英尼斯金半岛(Iniskin Peninsula)曾有 5 口井钻达。岩性主要是一套含化石的海相硬砂岩和粉砂岩的交互层,与下侏罗统呈不整合接触。厚 2960m。

d. 上侏罗统

包括下部的 Chinitna 组和上部的 Naknek 组。下部地层的岩性主要是含大的结核的暗灰色海相粉砂岩,厚 715m;上部地层则由含化石的海相砾岩、砂岩、粉砂岩组成,属边缘海至浅海沉积环境,厚 2185m。上侏罗统与中侏罗统呈不整合接触。

e. 下白垩统

缺失下部的尼奥克姆阶(Neoconion Stage),上部未定名。岩性为砂岩、粉砂岩、页岩和双壳类碎片,含有孔虫化石,属半深海中部到浅海内部环境。出露于 Kamishak 山,与上侏罗统呈不整合接触。厚 571m。

f. 上白垩统

下部地层缺失,只有上部森诺阶(Senonian Stage)的一部分,在下库克湾地区为 Kaguyak 组,在上库克湾地区为 Matanuska 组的上部。岩性为砂岩、粉砂岩互层,夹部分煤层,含孢粉及有孔虫化石,经分析属海陆过渡型沉积环境。与下白垩统呈不整合接触。厚 2600m。

g. 下第三系

出露于库克湾盆地西部,并可和井下资料对比。该套地层包括古新统上部的西福兰德组(West Foreland Fm.)、渐新统上部的赫姆洛克组(Hemlock Fm.),而始新统全部缺失。岩性为陆相的砾岩、砂岩及粉砂岩夹煤层,以砾岩为主要油

气储集层。与下伏地层呈角度不整合接触。厚 1450m。

h. 上第三系

包括中新统下—中部的 Tyonek 组、上部的 Beluga 组及上新统的 Sterling 组。地表无出露。据井下资料,除 Tyonek 组为油气储集层外,其余皆为非储集层。Tyonek 组岩性为砾岩、砂岩和粉砂岩互层,厚 2135m。整个上第三系沉积厚度最大可达 4710m^[4]。

库克湾盆地的油气地质勘探工作始于上个世纪。即远在 1867 年美国从沙皇俄国买到阿拉斯加这片土地之前已经开始。但总的看来,20 世纪以前,勘探规模很小,只是进行了一些地面地质调查。结果在 1853 年发现了库克湾西岸的油苗,而且油苗多分布在下库克湾地区。因此,从 20 世纪初直到 30 年代末,美国的一些石油公司都把勘探工作部署在下库克湾地区。围绕油苗打井是这一时期勘探工作的特点。所钻探井由于井浅(一般只有 300m)、高压盐水层的坍塌等原因,大部分未达目的即已报废。个别较深的井(井深 2676.4m),三年才钻完,产气不产油。所以,这一阶段没有重大发现。

进入 40 年代以后,整个阿拉斯加州的石油勘探工作,主要是在北极海岸和普鲁德霍湾(Prudhoe Bay)地区进行。这也许是由于第二次世界大战的缘故,因为普鲁德霍湾的含油气远景要比库克湾大得多。故对库克湾地区的勘探投入就相应减少,结果在这一地区仍然没有重大突破。而算时间,已经过了近一百年!

1955 年,在库克湾盆地开始地震勘探及钻探工作,并且把勘探目标逐渐向上库克湾地区转移。1957 年首先在库克湾东岸发现了斯万孙河油田(Swanson Field),产层为下第三系渐新统赫姆洛克组砾岩储集层,发现井日产油 143m³,取得了历史性的重大突破,揭开了库克湾盆地石油天然气工业发展的序幕。

至 1965 年在库克湾全盆地共钻探井 90 口。从 1957 年至 1968 年共发现 21 个油气田,全部集中分布在上库克湾地区。其中,有 7 个油田,14 个气田(表 1)。共探明石油可采储量约 2×10^8 t、天然气储量 1410×10^6 m³。在 21 个油气田中,有 13 个在陆地,8 个在海上。油田除斯万孙河油田位于陆地上以外,其余 6 个油田均在浅海水中,平均水深 30m^[3]。圈闭类型多为断层发育的背斜或穹隆。麦克阿瑟河油田是截至目前在库克湾盆地已发现的最大的一个油田,原始地质储量 2.9×10^8 m³,可采储量 1.01×10^8 m³,主要储集层为渐新统赫姆洛克组砾岩层。库克湾盆地油气田的分布见图 3。

表 1 库克湾盆地油、气田名称表^[3]

序号	油田名称	序号	气田名称	序号	气田名称
1	麦克阿瑟河 (McArthur River)	1	海狸湾 (Beaver Creek)	8	拜努加河 (Beluga River)
2	斯万孙河 (Swanson River)	2	西岔口 (West Fork)	9	莫夸克 (Moguawxie)
3	中地滩 (Middle Ground Shoal)	3	斯特林 (Sterling)	10	阿尔伯达卡罗阿 (Albert Kaloa)
4	特拉丁湾 (Trading Bay)	4	基奈 (Kenai)	11	尼古拉湾 (Nicolai Creek)
5	北特拉丁湾 (Trading Bay—North)	5	瀑布河 (Falls Creek)	12	西福兰德 (West Foreland)
6	花岗岩岬 (Granite Point)	6	北岔口 (North Fork)	13	桦树山 (Birch Hill)
7	瑞道布特滩 (Redoubt Shoal)	7	伊万河 (Ivan River)	14	北库克湾 (North Cook Inlet)

自 1968 年以后在库克湾盆地再没有新的发现。

1.2 油藏描述

1.2.1 油藏成因分析

1.2.1.1 油气生成

根据库克湾盆地原油性质的分析对比及侏罗系、白垩系和第三系岩石地球化学指标的分析鉴定结果认为,无论是产自中侏罗统的原油,或是产自第三系赫姆洛克组的原油,在原油性质上有 4 个很相似之处,即 API 密度的变化趋势、高沸点非烃组分中硫化物的含量、汽油烃的组成及 C_{12+} 饱和烃的分布等。此外,所有第三系的原油馏分对比指数的变化趋势也很相似(图 4、5、6),并含有较丰富的石蜡烃。在库克湾的所有原油中,稳定碳同位素比值($^{13}C/^{12}C$)都在-32‰~-30‰ 的范围内,而且相差只在 2‰ 以内。从岩石的生油地化指标上看,具有以下

几个特点:

- a. 侏罗系岩样抽提物中的 C_{12+} 饱和烃的分布与库克湾的原油相似;
- b. 中侏罗统和第三系的岩样在 $C_{25} \sim C_{32}$ 正构石蜡烃范围都显示出奇碳优势;
- c. 有机碳含量分析表明,除晚白垩世非海相岩石中的有机碳含量达到 1.44%、中侏罗统海相岩石有机碳含量达到 1.1% 以外,其它层的有机碳含量均小于 0.4%;
- d. 除侏罗系岩样外,其它层岩样中的所有热解烃 (PHC) 和有机碳含量 (OC) 的比值均在 0~30% 以内;
- e. 侏罗系的镜质体反射率最大,平均达到 0.65%;

以上特点参见图 7。

综合上述,初步认为库克湾盆地产自第三系赫姆洛克组砾岩储集层的石油有一个共同的油源;而来自中侏罗统的石油与赫姆洛克组砾岩储集层的石油,是同一个十分相似的石油“家族”;从热成熟度来看,白垩系和第三系陆相沉积中的有机质都是非热成熟的,只有海相的中侏罗统是热成熟的。因此,推测中侏罗统是库克湾盆地包括麦克阿瑟河油田在内的各油田的第三系油气储集层的生油源岩^[4]。

1.2.1.2 油气运移和聚集

根据现有的资料,库克湾盆地油气运移和聚集的方式可概括为以下三点^[4]:

- a. 上库克湾地区中侏罗统生油岩遭到孔隙度和渗透率都比较高(孔隙度 14%~21%、渗透率 $189 \times 10^{-3} \mu m^2$) 的西福兰德组储集层的削蚀;
- b. 在上新世和更新世期间储集岩发生了形变;
- c. 断层是封闭的,不是油气运移的通道。油气是通过逐层超覆的不整合面从下伏生油岩运移到上覆各储集层中的。

基于上述论点,可作出如下推论,即:渐新世前,呈向东倾斜的侏罗系,包括中侏罗统生油源岩被第三系古新统储集层西福兰德组削蚀并超覆,后者与侏罗系之间的不整合面成为石油从生油源岩储集层运移的良好通道。继而渐新统赫姆洛克组又超覆沉积在西福兰德组之上,其上又沉积了中新统的 Tyonek 组。这些储集层都呈向西延伸的趋势,由于埋藏方式相似,原油的 API 度和孔隙度的变化范围小,所以到中新世末,当石油垂向运移到这些地层的储集层中以后,在盆地西侧形成了大型的地层油田(图 8)。以后由于上新世和更新世期间的地壳运动,即卡斯卡底运动(Cascadian revolution)使地层发生变形,并使已形成的地层圈闭中的石油发生再次运移,进入到现在的圈闭中,同时关闭了原先从生油岩开始的石油运移通道(图 9)。麦克阿瑟河油田第三系赫姆洛克组砾岩油藏,就

是按照库克湾盆地第三系油藏形成的这个模式而形成的。

1.2.2 砾岩储集层特征

a. 沉积特征

麦克阿瑟河油田赫姆洛克组砾岩储集层是一套陆相粗颗粒、低湾度的曲流河沉积。由下向上颗粒由粗变细,由中—小砾岩、砾状砂岩、粗砂岩、中砂岩及少量粉砂岩和煤层组成,具正旋回沉积特征。颜色呈褐绿、黑绿及暗褐色。沉积总厚度达 152m,可分出 6 个段,相当于 6 个砾岩组,自上而下称为第 1 段、第 2 段……第 6 段等。第一段代表一个正韵律,但大多为不完整的正韵律(图 10)。在整个油田内,赫姆洛克组的各段之间均有不渗透的粉砂岩隔层。下部 3 个段主要是砾岩,上部 3 个段砂岩比例增大^[6]。这种韵律组合特点与新疆准噶尔盆地西北缘克拉玛依油田中三叠统克拉玛依组砾岩储集层的韵律组合在宏观上比较相似(图 11),反映出两者在沉积环境方面的某些共性特征^[16]。

赫姆洛克组的物源来自盆地西侧的阿留申山脉(Aleutian Ranges)。河流相的沉积环境导致砾岩储集层在空间的非均质性分布。纵向上,砾岩厚度占该组总沉积厚度的 35%以上;横向上,在麦克阿瑟河油田的西部、西北部、东部边缘和东南部是砾岩的富集区,砾岩厚度百分数均在 35%以上;而油田中部砾岩厚度百分数只有 15%~25%^[3]。砾岩储集层的这种分布特点是曲流河沉积环境的反映,同时也说明这种沉积环境中的砾岩沉积物和洪积相砾岩沉积一样地具有“成窝堆积”的特点。

b. 岩石学特征

赫姆洛克组砾岩储集层的砾石成分主要为石英、少量长石(10%~30%)及变质岩、深成岩、粘土岩及火山碎屑岩岩块;砾石间的充填物为粉砂及粘土,含量在 16%左右。主要胶结物有高岭石、蒙脱石及少量伊利石、绿泥石和方解石,胶结物含量一般均小于 15%^{[3][5][7]}。由此看来,赫姆洛克组的砾岩也具有复模态的结构,这种岩石结构必然对该种储集层的物性非均质性造成深刻的影响^{[17][18]}。

赫姆洛克组内的砂岩,颗粒成分与砾岩相同,粒间粘土充填物含量占 20%以上,成分有自生高岭石、少量伊利石、绿泥石和蒙脱石^[6]。

c. 物性特征

根据岩心分析资料,赫姆洛克组砾岩储集层经过校正的有效孔隙度为 8%~12%,平均为 10.5%。当小砾岩和中砾岩的砾石之间被疏松的物质如砂粒所充填时,孔隙度可超过 14%。孔隙类型以次生的溶蚀孔为主,主要是由于黑云母的蚀变及斜长石的溶解而造成。水平空气渗透率在全油田为 $70 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $90 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在构造的高部位,水平空气渗透率为 125×10^{-3}

$\sim 135 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 在构造的低部位, 水平空气渗透率为 $20 \times 10^{-3} \sim 25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。相对渗透率为 0.6。原始含油饱和度为 60%~65%, 原始含水饱和度为 40%~35%^{[1][3][5]}。

如果用克拉玛依油田砾岩储集层的特性分类标准(表 2)来评价, 则麦克阿瑟河油田赫姆洛克油藏的砾岩属于中—小容量、中等渗透性的一般储集层。

表 2 储集层孔隙度及渗透率分级标准^[8]

有效孔隙度 (%)		水平空气渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)		评价
>25	大 容 量	>1000	特高渗透性	特 好
25~>20	大—中容量	1000~>100	高渗透性	好
20~>15	中等容量	100~>10	中渗透性	一 般
15~>10	中—小容量	10~1	低渗透性	较 差
10~>5	小 容 量	<1	特低渗透性	差

除砾岩外, 在赫姆洛克组中的砂岩, 有效孔隙度为 8%~18%, 平均为 12.5%, 但水平空气渗透率变化较大, 在 $2.8 \times 10^{-3} \sim 240 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间。而且方解石胶结的砂岩渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 说明砂岩的渗滤性能不及砾岩。

图 12 表明, 岩心分析的有效孔隙度与测井渗透率之间的线性关系较差。尤其是砾岩, 孔隙度与渗透率之间基本没有线性关系。这个特点和克拉玛依中三叠统的砾岩油藏也是相似的, 反映了砾岩储集层的物性非均质性较砂岩储集层要严重得多。

d. 流体性质

麦克阿瑟河油田赫姆洛克组砾岩油藏的原油性质的最主要的特点是低含硫, 含硫量不足 1%, 而含氮量比含硫量高, 达到 0.142%, 储集层流体的具体性质见表 3^{[1][9]}。

表 3 麦克阿瑟河油田赫姆洛克组砾岩油藏流体性质表

地面原油密度 (g/cm ³)	38℃	0.854~0.862	原油含硫量 (%)	0.09
	15℃	0.85	原油含氮量 (%)	0.142
地层原油粘度 (mPa·s)		1.19	原油含碳量 (%)	4.8
原始溶解油气比 (m ³ /m ³)		55	原油压缩系数 (MPa ⁻¹)	5.72×10^{-8}
地层原油体积系数		1.186	地层水粘度 (mPa·s)	0.35
原油凝固点 (℃)		-15	地层水矿化度 (ppm)	24000

1.2.3 油藏类型

a. 圈闭类型

麦克阿瑟河油田赫姆洛克组砾岩油藏的构造形态为两个背斜夹一个向斜。西北以一条呈东北—西南走向的特拉丁湾逆断层为界,断面倾向西北。其余边界根据该油藏的油水边界圈定。主要背斜构造的长轴走向为 N10°E,长短轴之比为 2.3:1;构造翼部的倾角从东部的 6~8°向西增大到 20°,在构造的西南部,还有一组走向北西的小型正断层^{[5][15]}。整个圈闭属于断层遮挡的短轴背斜构造圈闭,闭合度为 308.4m(图 13)。

b. 驱动类型

赫姆洛克组砾岩油藏的埋藏深度为 2856~3309m,平均 3082m;有边水,油水界面海拔-2974m;油水界面以上的油藏高度为 274m;油层温度 82.2℃;原始地层压力为 28.9MPa;原始溶解气油比 55m³/m³,饱和压力 12.1MPa^[1],饱和程度 41.9%。经分析认为,该油藏属于中深—深层的低饱和油藏,压力系数较小(0.94),自喷能力弱,溶解气驱能量不足,属于弹性驱—边水驱的复合驱动类型。

c. 地质储量

赫姆洛克组砾岩油藏共有含油面积 48.6km^2 , 其中, 主要背斜构造的含油面积为 38.4km^2 (图 13); 油层有效厚度 $91.4\sim 144.8$ 米^[6], 平均 118m , 原始石油地质储量为 $2.9\times 10^8\text{m}^3$, 可采储量 $1.01\times 10^8\text{m}^3$ ^[1], 地质储量丰度为 $599\times 10^4\text{m}^3/\text{km}^2$, 说明该油藏属于高丰度的油藏类型。

2 油藏开发历程

2.1 油藏开发简史

麦克阿瑟河油田赫姆洛克组砾岩油藏于 1965 年 9 月由加利福尼亚联邦石油公司 (Union Oil Company of California) 所钻的 1—A 井最先发现, 以后又通过钻 10 口探井圈定了油藏的含油面积。

1967 年, 油田的主要经营者加利福尼亚联邦石油公司在发现井 1—A 井附近安装了永久性钻井采油平台, 即 Grayling 平台, 并于该年 10 月正式采油。作为油田的经营伙伴, 大西洋富田石油公司 (Atlantic Richfield Company) 安装了 King Salmon 平台, 马拉松石油公司 (Marathon Oil Company) 安装了 Dolly Varden 平台。1967 年下半年, 利用这三个平台, 赫姆洛克砾岩油藏正式投入开发。与此同时, 成立了油田工程规划小组, 设计了油藏的开发方案, 该方案要求首先利用天然能量 (弹性—边水驱动能量) 开采。第一轮开发井都钻在油藏的高部位, 这个部位的产层厚度大、渗透率高、原油粘度小, 因此单井产量达到 $1272\text{m}^3/\text{d}$, 名列库克湾各油田之榜首, 大大出乎经营者的预料。

但油藏投产 3 个月后, 主体部位的油层压力已下降 1.36MPa , 加上在开发钻井之前的探井试采阶段油田已出现了地下亏空以及库克湾其它油田反映出的开采特征都说明这种低饱和油藏单纯依靠水体膨胀的能量不足以弥补地下亏空。如果不采取人工补充能量保持压力开采, 则产量将很快下降, 石油采收率会很低, 油田生产将拖延很长时间。为此, 工程规划小组提供了一系列保持压力和油井产能的开发方案, 其中之一就是气举采油。但测算的天然气用量超过当时所具有的供气能力, 故只有注水才是唯一可行的办法。注水的水源, 经过分析认为库克湾的海水及冰碛粉砂岩中的地层水经过处理后可以注入油藏而对油层无损害作用。

1968 年上半年, 工程规划小组选择了一口位于油水边界附近的井, 即 K—6 井进行了注水试验。在井口压力 $20.4\sim 23.8\text{MPa}$ 下, 日注水量达到 4770m^3 。注