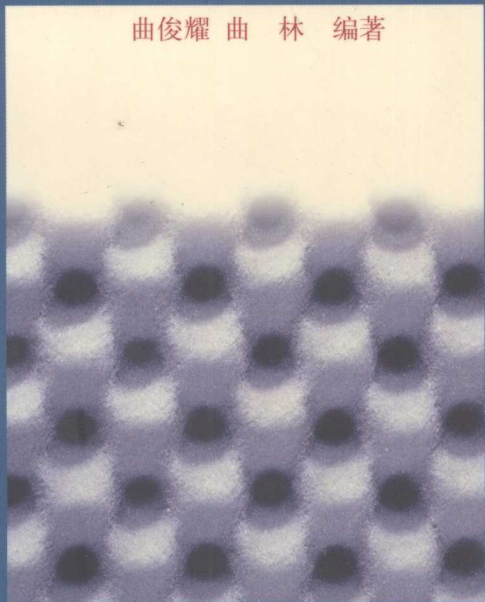


SI CHUAN LIE FENG-KONG XI XING
YOU SHUI QI CANG DE
SHUI FENG YU JIE FENG

四川裂缝—孔隙型 有水气藏的 水封与解封

曲俊耀 曲 林 编著



石油工业出版社

四川裂缝—孔隙型 有水气藏的水封与解封

曲俊耀 曲 林 编著

江苏工业学院图书馆
藏书章

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对四川非均质有水气藏水封与解封的地质机理进行了研究探讨,同时提出了应用气田地质试采资料预测水侵强度的方法,并对有水气藏水封的早期控制方法和管理措施进行了介绍,另外重点还介绍了气田排水采气提高采收率的实例,并总结了四川气田排水采气的工艺技术方法。

本书可供从事油气田开发现场工作的技术人员及有关院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

四川裂缝—孔隙型有水气藏的
水封与解封/曲俊耀,曲林编著.
北京:石油工业出版社,2001.12
ISBN 7-5021-3625-8
I. 四…
II. ①曲…②曲…
III. 含水性—裂隙油气藏—研究—四川省
IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 088538 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
北京乘设伟业科技排版中心排版
北京密云华都印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 5.125 印张 138 千字 印 1—1000
2001 年 12 月北京第 1 版 2001 年 12 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5021-3625-8/TE·2671

定价:12.00 元

序

进入 21 世纪,世界能源结构向低碳优质、清洁高效的天然气转化,世界天然气的发展进入了一个崭新的发展时期。我国是世界上最早开采和利用天然气的国家,早在公元 280 年,我们祖先就在四川自贡市自流井气田开采利用天然气熬卤制盐,积累了一套丰富的裂缝孔隙型有水气藏的开采方法和技术。目前,我国天然气正面临着大发展的机遇和形势,初步建成了勘探、开发、集输处理、输送和综合利用的完整天然气工业体系,天然气产量和储量得到了重大的发展,全国天然气长输管网系统正在规划、设计和建设之中,引进的国外天然气项目也有了实质性进展,我国天然气一片崭新的发展前景正展现在我们面前。因此,认真总结我国气田开发的实践经验,对发展天然气工业具有重要的现实意义。

《四川裂缝—孔隙型有水气藏的水封与解封》一书,以具有大量的实际气田开发资料数据为依据,分析和总结了裂缝—孔隙型有水气藏的开发方法和开采技术,特别是针对四川裂缝—孔隙型储层气水渗流特征、开采特征和管理方法和制度,进行了广泛的开发实践的经验总结,对我国同类气田的开发、开采和管理有实际的应用和指导作用,是一份资料丰富、论据充分、理论联系实际较好的著作。

全书共分三大部分,即有水气藏开发中的水封,气藏水封的早期控制和水侵气藏的解封。论文的第一部分,作者系统分析了裂缝—孔隙型气藏的水侵的因素、水侵的形式和其特征;气藏水封的地质和动态的机理;并论述了国内外对残余气饱和度、岩心水驱气的实验研究结果。作者应用了大量的实际资料,论述了气藏水侵强度的早期预报的方法,如气藏水侵强度的分类、地质对比及动态分析方法和经验(单井压降储量累计法、系统单井分析法、水侵体积分系数法等)都是现场有效的实用分析方法,有较强的实用性和可

操作性;第二部分气藏水封的早期控制,作者通过对四川威远、杨家山、孔滩、自流井、中坝和张家场等气田开发经验的分析,提出水封气藏早期控制方法,如控制气藏的采气速度与早期排水,整装气藏尽量延长气井的无水采气期等,对类似四川碳酸盐岩裂缝—孔隙型储层开发方案和方案调整设计、气田生产管理、提高气田最终的天然气采收率都具有实际的应用价值;最后,在水侵气藏的解封论述中,对水侵气藏如何提高采收率的有效措施“排水采气”工艺的机理分析、“排水采气”的五种模式、“排水采气”的选型和九个实例的分析,也都具有现场参考和指导意义。

总之,论文中应用了大量的国内外裂缝—孔隙型气藏的开采实例,特别是对我国四川具有长期开采历史的威远气田震旦系灯影组气藏和中坝气田开发实例,从气田地质储层、开发动态、水侵特征、排水采气工艺、开发阶段划分和开发的效果,开发经验和教训等作了详细的分析和总结,具有很大的参考意义。

本书适合于从事气田开发和开采的工程技术人员参阅,特别是从事实际气田开发、开采的经营管理和操作的工程技术干部借鉴。

作者曲俊耀同志具有扎实的气田地质和开发工程的专业知识,长期战斗在气田开发和开采的第一线,认真细致地总结了大量的开发实践、经验和教训,这本著作的本身就是他刻苦钻研、勇于实践、敢于创新、善于总结和扎扎实实工作态度的一个反映。

最后,预祝我国天然气工业突飞猛进!

方义生

2001年1月20日

目 录

前言	(1)
第一章 有水气藏开发中的水封	(3)
第一节 有水气藏水侵特征	(3)
一、底水气藏	(3)
二、边水气藏	(9)
三、多裂缝系统气藏	(12)
四、小结	(14)
第二节 水封的地质机理	(15)
一、气藏的水封	(16)
二、气井的水封(水淹)	(32)
三、有水气藏水侵后残余气饱和度和水封气的研究概述	(33)
四、四川有水气藏岩心水驱气试验研究	(36)
五、水侵气藏残余气分布及剩余储量的计算	(40)
第三节 非均质有水气藏水侵强度的早期预测	(44)
一、气藏根据水侵强度进行分类	(44)
二、根据气田地质资料早期预测水侵强度	(45)
三、根据试采资料预测水侵强度	(60)
第二章 气藏水封的早期控制	(73)
第一节 控制与气藏特征相适应的采气速度与早期排水	(74)
一、气藏的非均质程度	(76)
二、气藏储层类型	(77)
三、边水气藏与底水气藏	(78)
四、水体大小、分布与气藏的联系	(78)

五、多裂缝系统气藏气井的早期排水·····	(78)
第二节 整装有水气藏的气井把尽量延长无水采气期作为管理重点·····	(88)
第三节 控制气井的钻开程度·····	(92)
第四节 相对均匀布井及均衡开发,避免局部强化采气·····	(93)
第五节 堵水·····	(95)
第六节 其它·····	(96)
第三章 水侵气藏的解封·····	(97)
第一节 解封的地质机理·····	(97)
一、降低气藏压力·····	(102)
二、降低裂缝空间的压力·····	(103)
三、降低裂缝空间的水气比·····	(104)
四、降低气井的废弃压力·····	(104)
第二节 排水采气工艺是水侵气藏解封的主要手段·····	(104)
一、排水采气的地质基础·····	(105)
二、气藏排水采气的两种模式·····	(106)
三、气井排水采气的五种模式·····	(108)
第三节 气藏解封提高采收率的实例·····	(113)
一、威远气田灯影组底水气藏排水采气·····	(113)
二、中坝气田须二边水气藏强排水采气效果显著·····	(125)
三、川西南气区有水气藏和裂缝系统排水采气提高采收率效果显著·····	(135)
第四节 排水采气的工艺技术·····	(141)
一、工艺排水采气井的工艺选型·····	(143)
二、工艺排水采气井实例·····	(145)
后记·····	(156)

前言

四川气田开发五十多年来,人们逐渐认识到边底水对气田开发效果的影响不仅表现在对气井产能的递减,主要还是使气藏的采收率大大降低。水活跃的裂缝—孔隙(洞)型气藏在依靠自然能量开发阶段的采收率只有 10%~50%,水次活跃的气藏为 50%~80%,水不活跃或无水气藏的采收率可达 80% 以上。而四川盆地的大中型气田大部分为有水气田;有水气藏的储量占动用储量的 70% 以上;川西南、川南等气矿 80% 的天然气产自有水气藏。因此,提高有水气田的采收率便成为气田开发的重大课题。

四川对有水气藏的研究和实践,从威远气田开发算起已有三十多年的历史,从初期失败的教训和后期成功的实践中得出一个重要的认识:影响有水气藏采收率的地质、工程和经济因素很多,而最重要的主导因素是气藏开发过程中,水侵所形成的多种形式的天然气封隔。因此,提高有水气藏采收率实质上就是在研究水封气的形成机理的基础上,采取早期控制,中后期实施解封,尽可能多采出水封气的过程。

“解封”是已出现水封的气藏、区块、气井通过人为因素使水封气突破水封,由原来的“水驱气”向“气驱水”的转化过程。20 世纪 70 年代末四川气田开发发展并逐渐成熟的排水采气工艺技术,就是应用人工助排工艺,进行超水侵强度的强排达到水封气解封,这已成为四川有水气藏提高采收率的主要途径。也是气田稳产的基础。排水采气工艺措施增产气量逐年上升,目前威远气田排水采气采出的水封气占总产量的 95% 左右,川西南气矿年排水采气增产气量占总产气量的 59%,至 1999 年底止累计增产气量达 $57.8 \times 10^8 \text{m}^3$ 。四川各气矿 1999 年排水采气量增产气量为 $6.3 \times 10^8 \text{m}^3$,占年总产气量的 8.5%,历年累计增产气量达 $77.4 \times$

10^8m^3 。不仅合理的利用了地下资源,也创造了不小的经济效益。近十年来,排水采气工艺技术不仅在四川各气矿的气田开发中成为配套的工艺技术,而且已推广到大庆、中原等油田的气田开发中,随着新疆、长庆等西部气田的开发,有水气田开发的工艺技术必将发挥更大的作用,并得到深化和发展。

本文主要应用四川威远、中坝、张家场等重点边底水气藏及多裂缝系统气藏开发中现场实际资料。一是对裂缝—孔隙(洞)型非均质有水气藏选择性水侵所形成的水封地质机理进行探讨;二是提出了应用气田地质及试采资料对水侵强度的预测方法;三是介绍有水气藏水封的早期控制的方法和管理措施;四是以解封的地质机理为依据,重点介绍了气藏和气井排水采气的模式及水侵气藏解封提高采收率的实例;五是总结了四川排水采气工艺技术系列,通过各种工艺的效果、适应范围、管理和成本的评价,提出工艺选型的建议,并列举了主要排水采气工艺的实例,可供选型时参考。

作者多年从事气田开发现场技术和管理工作的,水平有限,错误之处难免,本书仅供从事气田开发现场工作的同行参考,并希望提出宝贵意见。

第一章 有水气藏开发中的水封

第一节 有水气藏水侵特征

非均质气藏在开发中的水侵特征除采气速度和井网等因素外,主要决定于三个因素:一是气藏压力的分布,气藏及气井在生产中形成的压降漏斗,与水体的压力产生压差,为了达到气藏内的动平衡,水向低(压)处流,造成水侵的不均匀推进。二是储层渗透率的分布,当基质孔隙渗透率低于水流动的下限值时,水侵主要沿渗透性好的部位或层段推进,而裂缝的渗透性大大高于基质孔隙,且气井的压降首先传递至裂缝,因而裂缝是水侵的最佳通道,气井大缝越发育(折算无阻流量大)出水压差越小(图 1—1)。三是水驱的能量(包括水体中溶解气、封隔气对水体的驱动能量),水驱的能量包括水源的势能或封闭性可动水体的储量大小。有时可动水体的储量并不大,但水异常活跃,这是水中溶解气及水体中基质孔隙中残余的封隔气对水驱动的结果。

一、底水气藏

非均质底水气藏水侵的基本特征是非连续面的纵窜横侵复合式的模式(图 1—2),也就是基本不存在气水界面纵横向的整体推进。威远气田灯影组气藏是最典型的实例。

威远气田位于四川省威远县和荣县境内,威远构造是川中隆起带西南部的一个巨型穹隆背斜,震旦系顶面构造闭合面积 890km^2 , 闭合度 488m , 长轴 46km , 轴向北东东, 短轴 26km , 两翼不对称, 南翼倾角 $\pm 4^\circ$, 北翼倾角 $2^\circ \sim 3^\circ$ 。主高点在威 28 井附近, 次高点在威 88~94 井之间。

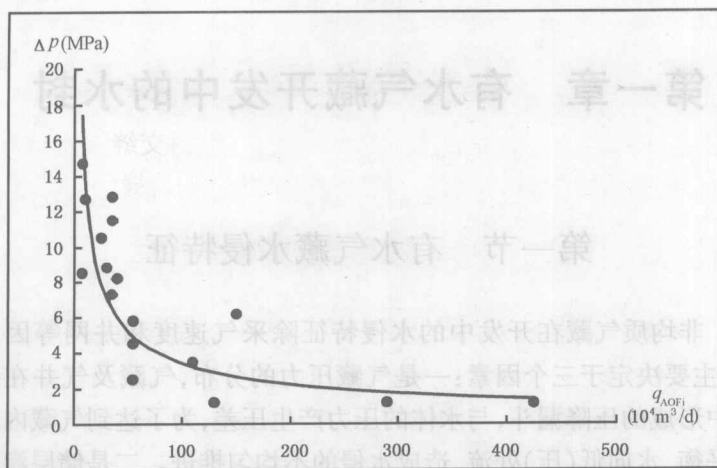


图 1—1 威远气田出水气井折算无阻流量与出水压差关系图

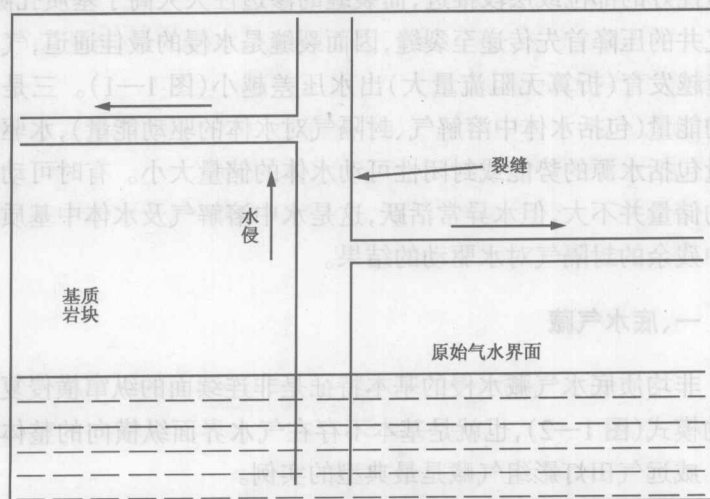


图 1—2 底水气藏水侵模式

震旦系灯影组岩性单一,以藻白云岩为主,厚约 650m。分为 Z_{2dn4} — Z_{2dn1} 四个小层。储层具有低孔低渗非均质性强的裂缝—孔洞型储层特征,平均基质孔隙度约 2%,岩心平均基质渗透率

仅 $0.0456 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔洞是主要的储集空间, 裂缝是主要的气水渗流通道。孔隙层多为透镜状, 横向互不连通, 对比性差。裂缝发育极不均匀, 受构造控制, 背斜顶部、轴部裂缝较发育, 密度大, 翼端部较差, 以微细缝、平缝为主。高角度的立缝、斜交缝在轴部相对较发育, 以区域裂缝(北东东与北西西两组)和构造缝(北北东与南北向两组)为主。

灯影组气藏是一个弱弹性水驱的块状底水高含硫气藏, 气藏含气面积 210km^2 , 含气高度 240m , 经三次干扰试验证明全气藏为连通性较弱统一的水动力系统, 原始地层压力 29.532MPa 。

灯影组气藏的储量经国家储委批准的压降法储量为 $400 \times 10^8\text{m}^3$ 。1997 年用数模法复核储量为 $387 \times 10^8\text{m}^3$ 。

气藏底水水体是封闭的, 水体储量为 $3.8 \times 10^8\text{m}^3$ (容积法) $\sim 4.2 \times 10^8\text{m}^3$ (数值模拟法)。

灯影组气藏的原始气水界面有两个, 一是缝洞系统的气水界面(海拔 -2434m), 一个是孔隙系统的气水界面(海拔 -2489m)。根据已穿过原始气水界面的威 117、威 86 等井的测井资料和完钻测试结果证明, 在缝洞系统气水界面以下, 裂缝、洞穴空间已被水充满, 而孔隙中仍有被水封闭的残余气。在孔隙系统的气水界面以下, 含水饱和度基本为 100% , 但仍有含气孔隙层段存在, 测试中产少量气。在气藏开发中, 随着气藏压力的下降, 除水体弹性膨胀产生水侵外, 水体中的溶解气和被水体封闭的残余气也随着水体压力的下降而膨胀, 驱动底水向气藏侵入, 成为气藏有限水体而底水活跃的主要因素。

威远气田灯影组气藏底水纵窜横侵的水侵特征主要表现在以下几个方面。

(1) 含气面积基本不变, 轴部气井最早出水。该气藏投产已 33 年, 顶部区块的地层压力由 29.5MPa 降至 12.0MPa 左右, 而边部基本保持原始地层压力, 加之渗透性极低裂缝不发育, 因而平面上地层水无推进迹象, 而气藏 1970 年有气井开始出地层水, 先出水的气井都位于裂缝发育的构造轴部底主产区, 说明水不是从气水边界以外来的(图 1—3)。

即(3)威水2井和威70井钻至原始气水界面以下,而只产气不产水,说明原始气水界面以下裂缝不发育,基质孔隙中水渗流能力很差。

(4)1984年气藏水侵已非常严重,所有主产气井均已出水,而低渗区当年完钻的威79井及以后完钻的威92井只产气不产水,说明纵向上水侵的不均一性。

(5)大量的生产测井资料证明,气井主产层段出水后,下面仍有产气层段未被水侵,说明水沿主裂缝窜至井筒,为选择性水侵。

(6)气井水侵的三种类型

威远气田灯影组气藏纵窜横侵的水侵模式表现在气井的出水特征有三种类型。即大缝型(快型)、小缝型(慢型)和横向型。

裂缝作为水侵的主要通道,其性质及产状决定了气井出水的特征。用折算原始无阻流量(q_{AOFi})表示气井裂缝的发育程度,用单位生产压差底水上窜高度($h/\Delta p$)表示垂直裂缝的发育程度, h 为原始气水界面距井底的高度(m), Δp 为出水时的生产压差 $p_R - p_{wi}$ (kg/cm²),做 $h/\Delta p$ 与 $\lg q_{AOFi}$ 关系图(图1—5)。

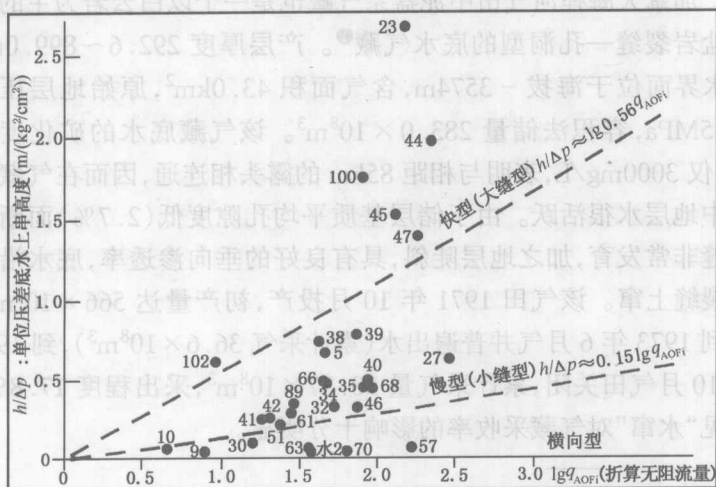


图1—5 威远气田灯影组气藏出水气井分类图(1982年)

通过综合分析发现 $h/\Delta p = 0.56 \lg q_{AOFi}$ 线以上的气井具有明显的大缝型出水气井特征,此线与 $h/\Delta p = 0.15 \lg q_{AOFi}$ 线之间的气井具小缝型出水气井特征,而 $h/\Delta p = 0.15 \lg q_{AOFi}$ 线以下的气井则为典型的横向型出水气井特征(图 1—6)。

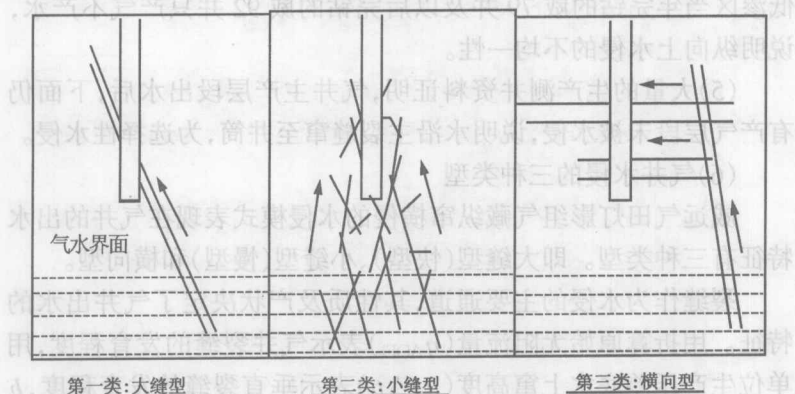


图 1—6 气井出水的三种类型模式图

加拿大海狸河气田中泥盆系气藏也是一个以白云岩为主的碳酸盐岩裂缝—孔洞型的底水气藏^①。产层厚度 292.6~899.0m, 气水界面位于海拔 -3574m, 含气面积 43.0km², 原始地层压力 40.5MPa, 容积法储量 $283.0 \times 10^8 \text{m}^3$ 。该气藏底水的矿化度很低, 仅 3000mg/L, 表明与相距 85km 的露头相连通, 因而在气藏开发中地层水很活跃。由于储层基质平均孔隙度低(2.7%)而断层裂缝非常发育, 加之地层陡斜, 具有良好的垂向渗透率, 底水沿断层裂缝上窜。该气田 1971 年 10 月投产, 初产量达 $566 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$, 到 1973 年 6 月气井普遍出水(累计采气 $36.6 \times 10^8 \text{m}^3$), 到 1976 年 10 月气田关闭, 累计采气量 $50.37 \times 10^8 \text{m}^3$, 采出程度 17.8%。可见“水窜”对气藏采收率的影响十分明显。

^① 德维逊 D. A, 斯诺顿 D. M, 丁传柏译, 海狸河气田中泥盆统碳酸盐岩裂缝性气藏水侵的动态分析 1981 年。

二、边水气藏

非均质边水气藏,水侵的基本特征是非连续面河道状的横侵纵窜复合式的模式(图 1—7)。四川中坝气田须二气藏是最典型实例。

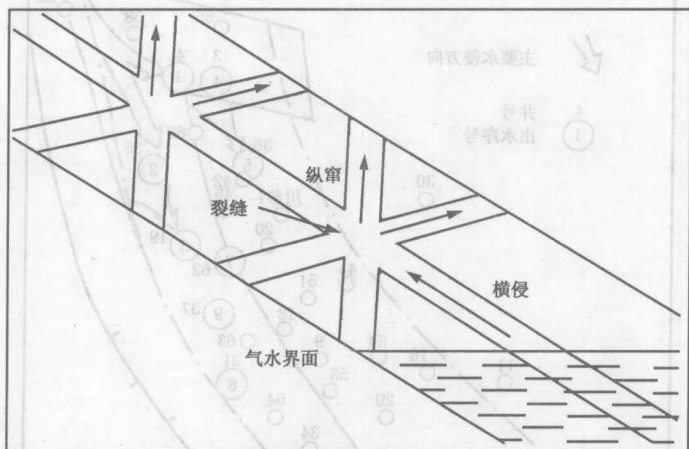


图 1—7 边水气藏水侵模式示意图

该气藏是一个背斜控制的裂缝—孔隙型砂岩边水气藏^①。储层为浅灰—灰白色中—细粒石英砂岩,总厚度 340~400m,主产层为须二的上亚段厚 150~200m。储层物性差为低孔低渗的致密砂岩储层,孔隙度一般 3%~10%,渗透率一般小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。须二气藏裂缝发育不均一,裂缝发育带主要分布在东南翼的中 19—37—31—34 井区及鞍部中 3—4 井区(图 1—8),也就是该气藏的高产区和边水水侵的主要通道。气藏气水界面平均在 -2200m,含气高度 543m,含气面积 24.5km²,折算原始地层压力 27.0MPa。

^①詹廷选等 中坝气田须二气藏边水水侵规律研究及排水采气方案论证,1997 年。

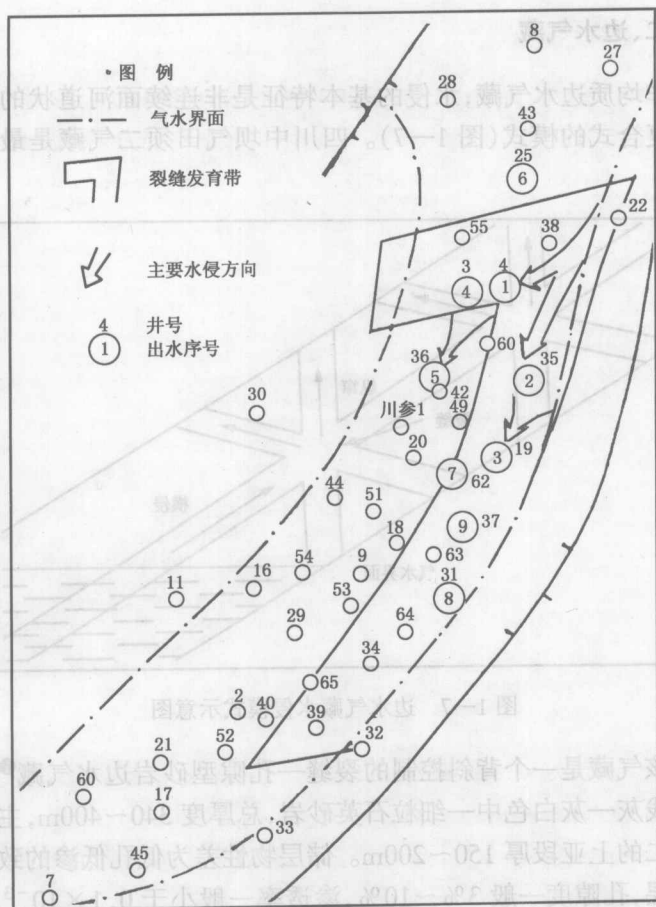


图1—8 中坝气田须二气藏边水水侵示意图

1. 边水的横侵

1978年4月~1988年10月先后有9口井出水,这些出水井大都在裂缝发育带内。说明边水的横向水侵主要沿裂缝发育带,由北向南侵入的。

最早出水的井并不是靠近气水界面的井,而是鞍部最早投产的中4井,说明在裂缝发育带内边水也不是均匀推进的,而且首先