

文章编号:2095—0411(2015)03-0039-06

低渗透油藏储层特征及形成机理分析^{*}

李 雪

(常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213016)

摘要:随着勘探技术的不断提高,低渗透油藏已成为油气增储上产的重要领域之一,但由于地质现象及储层形成因素的复杂性,低渗透油藏的开发仍存在诸多难题。要解决这些难题并提高其勘探成效,就必须对低渗透油藏的储层特征进行深入全面的认识。总结了低渗透油藏储层特征,并从沉积作用、构造作用和成岩作用 3 方面分析了低渗透储层的形成原因,指出沉积作用控制着储层原生孔隙,成岩作用促使次生孔隙发育,构造作用对储层孔隙具有双重作用,最后对低渗透油藏今后研究趋势提出了一些展望。

关键词:低渗透;储层特征;形成机理;裂缝

中图分类号:TE 122

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095—0411.2015.03.008

Analysis on Reservoir Characteristics and Formation Mechanism of Low Permeability Reservoirs

LI Xue

(School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: With the continuous improvement of reservoir exploration, low permeability reservoirs have become one of the important fields of oil and gas increase in reserve and production. However, there are still many unresolved problems because of complicated geological phenomena and reservoir formation factors, thus, it is necessary to carry out comprehensive analysis on reservoir characteristics for low permeability reservoirs in order to solve those problems which influence reservoir development, and hereby improve the effectiveness of reservoir exploration. This paper summarizes reservoir characteristics of low permeability reservoirs, and make systematic analysis on formation mechanism of low permeability reservoir. The conclusion was drawn that sedimentary controls primary porosity, diagenesis produces secondary porosity, and structure has a dual influence on reservoir porosity. Finally, some expectation was made for future research on low permeability reservoirs.

Key words: low permeability; reservoir characteristic; formation mechanism; fracture

低渗透油藏作为我国陆相沉积盆地的一种重要类型,其储量占我国总探明储量的 23% 左右,其中有裂缝发育的低渗透油藏储量约占全国低渗透油藏总储量的 40%^[1],且随着勘探程度和开发技术的提

高,其所占的比例将会逐年增大。加强低渗透油田的勘探与开发是未来化石能源工业可持续发展的技术方向,这将对我国石油工业持续稳定的发展有着重要的现实意义。

收稿日期:2015-04-21。

基金项目:常州大学科技项目(ZMF14020073)。

作者简介:李雪(1987—),女,山东菏泽人,博士,主要从事石油地质、油气勘探与开发相关教学、科研工作。

1 低渗透油藏分类

低渗透储层只是一个较为模糊的相对概念^[2],因为世界各国的资源基础和技术经济水平不同,目前仍没有一个明确的统一的划分标准。1992 年,在西安国际会议上各位专家有了比较一致的认识,把低渗透油田的上限定为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,按照渗透率的大小及开采方式不同,将低渗透油藏的储层类型分为 3 种:低渗透储层、特低渗透储层和超低渗透储层^[3]。除渗透率是影响低渗透油藏开发的主要因素外,油藏原始压力和油藏埋藏深度也是影响低渗透油藏开发的关键因素,综合渗透率、油藏原始压力和油藏埋深,总结出了低渗透油藏精细划分方法(表 1)^[4]。

表 1 低渗透油藏精细划分方法

Table 1 The fine division for low permeability reservoirs

标准	级别	指标值
渗透率	低渗透储层	$(10 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$
	特低渗透储层	$(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$
	超低渗透储层	$(0.1 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$
油藏原始压力	低压	压力系数小于 0.8
	常压	压力系数 0.8~1.2
	高压	压力系数 1.2~1.8
油藏埋深	浅层	小于 2 000m
	中深层	2 000~3 000m
	深层	大于 3 000m

2 低渗透油藏储层特征

2.1 岩石学特征

低渗透储层是在独特的沉积背景和成岩作用下形成的,其岩石学特征主要表现为低成分成熟度和低结构成熟度,从我国部分砂岩低渗透储层参数表(表 2)^[5]看出,在岩石成分构成中,长石和岩屑含量较高,多为长石砂岩、岩屑长石砂岩、岩屑砂岩等,石英砂岩含量较少。由于岩石成分成熟度和结构成熟度较低,岩石颗粒大小混杂,分选性和磨圆度差,沉积物容易在成岩过程中发生压实作用,使得储层孔隙度大大降低,储层物性变差。

2.2 储层物性特征

岩石的孔隙性和渗透性统称为储油物性^[6],因此用孔隙度和渗透率两个参数来表征储层的物性特征。基质渗透率低是低渗透储层最显著的物性特征。低渗透储层(渗透率在 $(10 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)具有一定的工业性自然产能,特低渗透储层(渗透率在 $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的自然产能较低,达不到工业性标准,需要人工压裂才能实现其开发,超低渗透储层(渗透率在 $(0.1 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)需进行大型的压裂改造才能投产,经济效益不高。

表 2 我国部分低渗透砂岩储层参数表

Table 2 Reservoir parameters of some low permeability sandstone reservoirs in China

油田名称	碎屑含量/%			孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔喉中值半径/ μm	泥质含量/%	粒度中值/mm	储层 类型
	石英	长石	岩屑						
大庆油田 杏一区东部	30	34	35	21	10	0.06	18.1	0.067	原生
老君庙油田 M 层	60	20	20	19.1	24	0.7	16~21	0.14~0.18	低渗透
陇东地区 延长组	20~40	15~65	10~45	10.25	1.42	—	—	—	储层
阿南油田	15	20	65	18.6	33.8	2.0	10	0.1~0.5	次生低
安塞油田	25	60	15	12.4	1.4	0.25	10	0.18	渗透储层
丘陵油田	30	24	46	13.7	31.9	1.4	11	0.1~0.2	裂缝性低
新民油田	33	30	37	15.2	5.4	0.16	4.4	0.15	渗透储层

与常规油藏相比,低渗透油藏在储层结构和驱油机理方面都存在着本质区别^[7],这类油藏一般是由基质系统和裂缝系统组成。基质系统是由被裂缝切割的岩块组成,其储集空间是粒间孔及与之相连的微细裂缝^[8],属于低渗低产系统,其储层特点是高

孔低渗、低导压能力、低流动能力、高束缚水和残余油饱和度,地质储量所占比例大、可采储量所占比例小、驱油效率低;裂缝系统是由裂缝及与之相连的孔洞组成,属高渗高产系统,其储层特点是低孔高渗、高导压能力、高流动能力、高原始含油饱和度、低束

缚水和残余油饱和度,地质储量所占比例小、可采储量所占比例大、驱油效率高。油藏进入开发中后期,注水开发致使部分裂缝开启,从而造成方向性水窜,裂缝发育及其分布的复杂性导致油田的注水开发效果较差、驱油效率低、经济效益差^[9]。

低渗透油藏的原始孔隙度和渗透率经沉积作用、成岩作用或构造作用后大大降低,根据国内部分低渗透储层的物性参数看,孔隙度一般在 20% 以下,渗透率一般在 $30\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 以下(表 2)。

2.3 孔隙结构特征

孔隙大小影响着储层渗透率,孔隙连通情况(喉道半径大小、几何形态和结构系数)对储层渗

透率也有重要影响^[10],其中喉道半径大小是影响储层渗透率的主要因素。喉道的大小及形态主要取决于岩石颗粒的接触关系、胶结类型以及颗粒本身的形态和大小^[11]。低渗透油藏的喉道类型主要有缩颈型喉道、片状喉道和管束状喉道(图 1)^[11-12]。片状喉道主要是受压实作用或压溶作用形成的呈片状或弯曲片状相连通的狭窄喉道,缩颈型喉道是岩石受到压实而导致原生孔隙空间大大变窄而形成的收缩喉道,管束状喉道是原生粒间孔隙被杂基或胶结物堵塞而形成的微细孔隙,这些微细孔隙像毛细管形态交叉相连,分布在杂基和胶结物里。

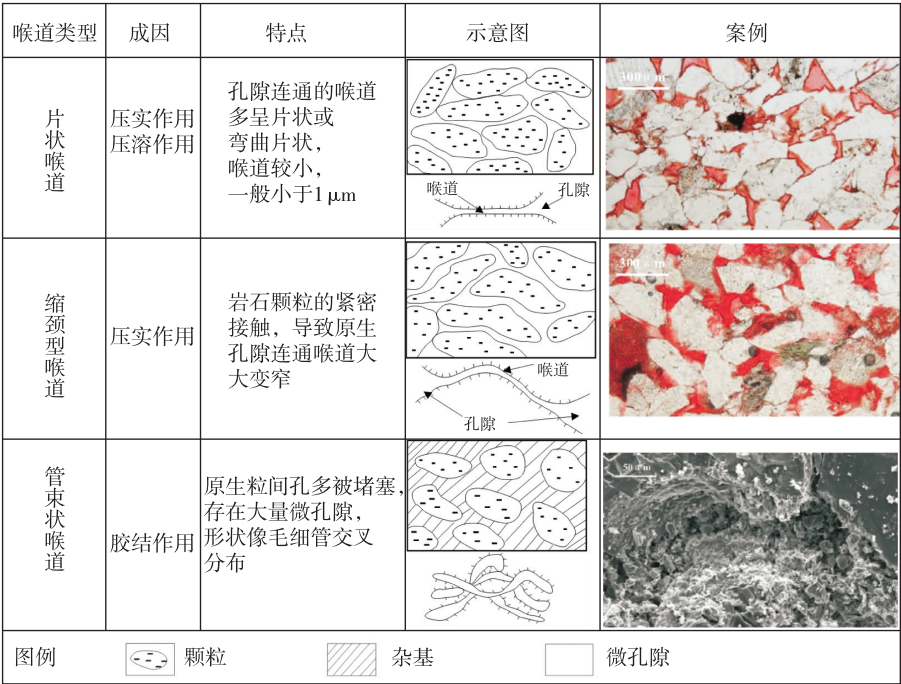


图 1 低渗透油藏主要喉道类型
Fig.1 The main throat types of low permeability reservoirs

2.4 储层裂缝特征

低渗透储层受上覆岩石或围岩压力较强,岩石脆性大,极易发育裂缝。裂缝类型主要包括构造作用产生的构造缝和异常高压产生的微裂缝。裂缝对低渗透储层开发有双重作用,低渗透油田之所以能开发,在很大程度上是因为裂缝的存在,当生产井钻遇裂缝发育层时,会出现短期的相对高产,由于裂缝的存在,一方面提高了储层渗透性,在局部范围内提高了油藏水驱程度^[13],但另一方面又增加了储层开

发难度,油藏注水开发时,注入水沿裂缝方向容易发生水窜,造成油藏暴性水淹,大大缩短了油藏稳产期。

川西北地区受大型构造运动的影响,储层裂缝非常发育,主要有构造缝、溶蚀缝和缝合线(表 3)^[14-15],充填缝较为常见,充填物多为方解石和泥质,张开缝相对不发育。川西前陆盆地平落坝油田属于裂缝—孔隙性储层,裂缝多以溶蚀缝为主,裂缝发育程度对油气井的产能有较强的控制作用,表现为裂缝的发育程度与储层产气量成正比。

表 3 部分低渗透油田取心井岩心裂缝统计表
Table 3 The fracture parameters from coring wells in some low permeability reservoirs

地区	井名	岩心/m	裂缝数/条	裂缝密度/(条/m)	张开缝		充填缝		主要充填物	裂缝性质
					条数	缝宽	条数	缝宽		
川西北 地区	河 2	4.32	153	35.4	1	8	152	0.1~5	方解石、泥质	以构造缝为主,溶蚀缝次之
	河 11	7.68	43	5.6	23	0.5~2	20	0.5~7	方解石	以构造缝为主,溶蚀缝次之
	射 1	36.35	88	2.4	6	0.5~25	82	0.5~20	方解石	以溶蚀缝为主
	扁 1	38.62	41	1.1	6	0.5~7	35	1~5	方解石	以构造缝为主,缝合线次之
川西	平落 3	2.02	4	1.9	2	2	1	2	泥质、方解石	以溶蚀缝为主
前陆	平落 9	3.74	8	2.1	—	—	1	0.5	方解石	溶蚀缝为主
盆地	平落 1	97.84	377	3.86	—	—	—	—	—	溶蚀缝为主

2.5 储层非均质性和各向异性强

受沉积作用、成岩后生作用以及构造作用的影响,岩石矿物组成、基质含量、胶结物含量的空间分布存在一定的差异性和不均一性,从而影响油气储层在空间分布以及内部各种属性都存在不均匀的变化,主要表现在岩石物质组成的非均质性和孔隙空间的非均质性。储层非均质性强是低渗透油藏的重要特点之一,天然裂缝或人工裂缝的存在加强了储层的非均质性和各向异性^[16],只有全面提高对低渗透油藏非均质性和各向异性的认识,才能实现对低渗透油藏的合理开发,对提高油藏采收率和延长油

藏稳产期都有重要的意义。

按照石油地质学家裘弈楠的分类(1987),储层非均质性包括层间非均质性、层内非均质性、平面非均质性和孔隙非均质性(表 4)。层内非均质性是针对单砂层,研究其垂向上的储层性质变化,层间非均质性是研究多个油层间的纵向差异性,平面非均质性是对一个储层砂体的几何形态、砂体的连通性及其规模、砂体内孔隙度、渗透率的平面变化进行的表征与评价,孔隙非均质性是为了分析水驱油效果以及储层剩余流体的空间分布而进行的对微观孔道内影响流体流动的地质因素的分析。

表 4 低渗透储层非均质性评价指标
Table 4 The index for heterogeneity evaluation of low permeability reservoirs

指标	研究对象	研究内容	研究目的
层内 非均质性	单砂层	①层内垂向上粒度韵律性; ②层内垂向上渗透率差异程度; ③层内垂向上最高渗透段位置; ④层内不连续泥质薄夹层的分布; ⑤渗透率韵律及渗透率的非均质程度(水平、垂直); ⑥层理构造序列	分析单砂层垂向上的储层性质变化
层间 非均质性	一套砂泥 岩间互的 含油层系	①沉积旋回性; ②砂层间渗透率非均质程度; ③主力油层与非主力油层的识别及垂向配置关系	分析纵向上多个油层间的差异性
平面 非均质性	一个储层砂体	①砂体几何形态;砂体规模及各向连续性; ②砂体的连通性; ③砂体内孔隙度、渗透率的平面变化及方向性	分析储层砂体的几何形态、规模、连续性,以及砂体内孔隙度、渗透率的平面变化
孔隙 非均质性	微观孔道	①孔隙、喉道的大小与分布; ②孔隙类型、孔隙结构特征、微裂缝; ③岩石组分、颗粒排列方式、基质含量及胶结物类型	分析微观孔道内影响流体流动的地质因素

3 低渗透储层形成机理

低渗透储层形成主要受沉积作用和成岩后生作

用,沉积作用是主控因素,成岩作用中的压实作用主导储层低渗,溶蚀作用改善储层低渗、胶结作用强化储层低渗特点^[17]。

3.1 沉积作用

沉积作用是指被机械搬运、化学搬运或生物搬运的物质到达适宜场所后,由于外界环境条件改变而发生的沉淀、堆积过程。沉积产物受沉积环境的影响而形成不同的沉积物质带,即沉积相带。沉积作用决定着储层原始物性,同时也影响着储层埋藏过程中的物性演化和成岩作用,不同沉积相带砂体规模、砂体厚度、砂体连通性、矿物粒度、分选性、杂基含量等都有差异,即使在同一相带内,由于受局部水动力条件和物源供给的不同而有所不同,导致储层渗透率也会有局部差异性^[18]。

3.2 成岩作用

3.2.1 压实作用

压实作用使得储集层岩石颗粒变得致密,导致部分岩石颗粒由点接触变成线接触或凹凸接触,大大降低了储层原始物性。

3.2.2 胶结作用

胶结物充填孔隙,堵塞喉道,造成储层孔隙度和渗透率的进一步降低。胶结作用常见的有碳酸盐胶结、粘土胶结、石英、长石次生加大。碳酸盐胶结主要是方解石、铁方解石,粘土矿物胶结一般包括伊利石、绿泥石、伊/蒙间层,石英的次生加大改变了储层的孔隙结构,使储层喉道变成片状或弯曲片状喉道,改变了流体的渗流通道,使储层物性变差,长石的次生加大改变了储层颗粒之间的接触方式,使不接触的颗粒变为点接触甚至线接触,降低了储层的渗透性^[19]。

3.2.3 溶蚀作用

溶蚀作用促使次生孔隙发育。砂岩中的石英、长石、基质、胶结物等受到溶蚀作用后产生一系列次生孔隙。不同岩性受溶蚀作用强度不同,细砂岩受溶蚀作用较强,产生的次生孔隙较多,而泥质砂岩、粉砂岩、砂砾岩受溶蚀作用影响稍弱,次生孔隙含量少,对储集层孔渗性能影响有限。

3.3 构造作用

构造运动产生褶皱和断裂,使岩石发生挤压或拉张运动。一方面构造挤压增加了压实作用的强度,另一方面构造运动可使脆性较大的岩石发生破裂,形成一系列构造裂缝^[7, 16],另外,在挤压作用和伸展作用下,剪切应力作用可产生平行层面的滑脱裂缝^[10]。按照构造序次,构造裂缝分为伴生裂缝和

诱导裂缝,前者与构造形成具有统一应力场,具有区域性、透入性和多期次性的特点,后者是在构造变形过程中诱导出的局部变形而形成的裂缝^[20]。褶皱的翼部和端部以及断裂带两侧是应力释放区,也是裂缝较为发育区。在岩石脆性较差的储层中,裂缝发育强度不大,一般发育小型裂缝,延伸范围狭小且张开度不大。低渗透储层中的宏观裂缝大都具有一定的组系和方向性,这些裂缝大部分是由构造作用产生的。裂缝提高了低渗透储层的渗透性,但裂缝增强了低渗透储层的非均质性和各向异性^[21]。

4 展望

综合分析低渗透储层特点以及形成因素,针对低渗透储层裂缝研究的难点,认为低渗透储层今后研究方向主要是加强对储层裂缝的形成机制和空间扩展规律的研究,具体包括以下几个方面:

4.1 加强低渗透油藏精细描述

综合地质、物探、钻井、油藏工程等多学科研究技术,对油藏构造特征、沉积特征、储层特征、流体渗流特征等方面做出合理的认识与评价,建立符合实际地质情况的精细三维地质模型,通过油藏工程分析和水驱历史拟合量化储集层流体空间分布特征,为油田开发综合调整,增加可采储量,进一步提高采收率提供地质依据。

4.2 多技术、多手段、多资料相结合

综合微电阻率扫描、井下声波电视、岩心 CT 扫描等技术,提高岩石裂缝的识别能力。首先应用地质和测井资料,获取对裂缝的直观性认识,结合地震资料,提取大尺度的裂缝系统信息,然后以生产井动态资料作为校正手段,采取动态关联分析法,优化裂缝描述结果。各种资料都与实际地质情况存在着一定的误差,再加上裂缝成因及地质因素的复杂性,在研究过程中尽量克服资料可靠程度和研究方法局限性的限制。做到地质资料、地震资料、测井资料、生产资料等动静态资料的紧密结合。

4.3 加强储层裂缝研究

加强应力分析,强化断裂与构造裂缝的甄别,深入研究构造裂缝的形成机制,加强地质学成因的研究,精细刻画裂缝的空间网络几何形态、空间扩展规律及其表面构造,提高低渗透储层裂缝识别与预测精度。

尽管国内地质学者在低渗透储层研究方面做了大量研究工作并取得了丰硕成果,但储层裂缝研究仍处于探索阶段,裂缝的空间分布规律和参数的定量表征研究仍是石油地质学的前缘性课题,需要多学科、多领域、多技术、多手段相结合。

5 结 论

1)随着勘探技术的不断提高,我国发现低渗透油田的数量及规模在不断扩大,在今后相当长的一个时期内,低渗透油气田将是国家增储上产的主要资源基础,加强低渗透油田的勘探与开发是未来化石能源工业可持续发展的技术方向。

2)低渗透储层具有储层物性差,基质渗透率低,沉积物成熟度低,喉道半径小,储层流体流动受阻大,束缚水饱和度高,储层非均质性和各向异性强的特点。

3)低渗透储层形成主要受沉积作用、成岩后生作用以及构造作用。沉积作用控制着储层原始孔隙,成岩作用改变了储层原始孔隙,促使次生孔隙发育,构造作用对低渗透储层的形成有双重作用。

4)低渗透储层裂缝对油藏开发具有重要影响,加强储层裂缝形成机制和空间分布规律研究是提高低渗透储层开发成效的关键。

参考文献:

- [1]王越之,田红.常规测井与FMI测井资料相结合研究储层裂缝[J].断块油气田,2001,8(5):30-32.
- [2]谢力.国外低渗透油藏开发概述[J].国外石油动态,2003,148(14):1-19.
- [3]张连春,李道品.我国低渗透油田开发当前之新进展[J].低渗透油气田,2004,9(1):1-9.
- [4]王光付,廖荣凤,李江龙,等.中国石化低渗透油藏开发状况及前景[J].油气地质与采收率,2007,14(3):84-89.
- [5]曾大乾,李淑贞.中国低渗透砂岩储层类型及地质特征[J].石油学报,1994,15(1):38-46.
- [6]谢然红,肖立志,张建民,等.低渗透储层特征与测井评价方法

- [J].中国石油大学学报(自然科学版),2006,30(1):47-51.
- [7]DEZAYES C, GENTER A, VALLEY B. Structure of the low permeable naturally fractured geothermal reservoir at Soultz[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2010,342(7-8):517-530.
- [8]RENU V, SURESH K G. Numerical modeling and spatial moment analysis of solute mobility and spreading in a coupled fracture-skin-matrix system[J]. Geotechnical Geological Engineering, 2012,6(30):1289-1302.
- [9]SURESH K G, SEKHAR M. Spatial moment analysis for transport of nonreactive solutes in fracture-matrix system[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2005, 10(3):192-199.
- [10]蒋凌志,顾家裕,郭彬程.中国含油气盆地碎屑岩低渗透储层的特征及形成机理[J].沉积学报,2004,22(1):13-18.
- [11]冉新权,吴胜和,付晶,等.鄂尔多斯盆地陇东地区延长组低渗透储层孔隙结构分类研究[J].地学前缘,2013,20(2):77-85.
- [12]熊伟,刘华勋,高树生,等.薛惠低渗透储层特征研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(5):89-92.
- [13]卢强,何岩峰,徐伟彬,等.体积压裂裂缝网络对导流能力的影响[J].常州大学学报(自然科学版),2014,26(2):70-74.
- [14]周存俭,徐国盛,周连德,等.平落坝气田中、上侏罗统致密碎屑岩储集层特征[J].断块油气田,2008,15(5):5-9.
- [15]罗静.川西北地区下二叠统茅口组储层特征[J].海相油气地质,2013,18(3):39-47.
- [16]TONG K J, ZHAO C M, LU Z B, et al. Reservoir evaluation and fracture characterization of the metamorphic buried hill reservoir in Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1):62-69.
- [17]操应长,远光辉,王艳忠,等.准噶尔盆地北三台地区清水河组低渗透储层成因机制[J].石油学报,2012,33(5):758-771.
- [18]高辉,孙卫,宋广寿,等.鄂尔多斯盆地合水地区长8储层特低渗透成因分析与评价[J].地质科技情报,2008,27(5):71-76.
- [19]HOUSEKNECHT D W. Assessing the relative importance of compaction process sand cementation to reduction of porosity in sand-stones[J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(6):633-642.
- [20]孙焕泉,王加滢.地下构造裂缝分布规律及其预测[J].大庆石油学院学报,2000,24(3):83-85.
- [21]NELSON R. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs [M]. Huston, Texas: Gulf Publishing Company, 1985.

(责任编辑:殷丽莉)