

综述与评述

低渗透油气资源勘探开发主要影响因素与特色技术

郑军卫^{1,2}, 庾凌³, 孙德强⁴

(1. 中国科学院资源环境科学信息中心/中国科学院国家科学图书馆兰州分馆, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国石油长庆油田采油一厂, 陕西 延安 716000;

4. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100190)

摘要:分析了低渗透油气资源的分布状况、勘探开发现状以及低渗透储层地质特征和形成机理,指出:油气藏不易识别、油气层判识困难、渗透率低、具启动压力梯度、弹性能量小、油井见注水效果缓慢、见水后产液指数大幅度下降、水窜和水淹严重等是当前制约低渗透油气田勘探开发的主要影响因素;多参数联合反演储层预测技术、压裂技术、井网优化技术、超前注水技术、水平井开采技术、CO₂混相驱技术、微生物采油技术等是低渗透油气勘探开发的特色技术。

关键词:低渗透油气资源;低渗透储层;地质特征;形成机理;勘探开发技术;影响因素

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1926(2009)05-0651-06

随着油气勘探程度的提高和人类对油气资源需求的不断增加,那些规模大、储量大、资源丰度高、易勘探、好开采的油气资源越来越少,已不足以满足人类的需求;而同时油气勘探开发科技的进步,促使低渗透油气资源在新增探明储量中所占的比例越来越大,已逐步成为全球油气勘探开发的热点。本文从低渗透油气资源的分布和勘探开发现状、低渗透储层地质特征和形成机理、影响低渗透油气资源勘探开发的主要因素、低渗透油气资源勘探开发特色技术等方面进行了总结,旨在对我国今后低渗透油气资源的勘探开发有所裨益。

1 低渗透油气资源的分布与勘探开发现状

低渗透油气田是世界上最重要的油气田类型之一。目前世界上低渗透油气资源十分丰富,分布范围非常广泛,其在北美、中亚、东亚和东南亚、北非、北欧等地区都有较大范围的分布。同时,随着油气勘探开发时间的延长,规模小而复杂的低渗透油田所占比例越来越大。例如,俄罗斯近几年来在西西伯利亚地区新发现的低渗透、薄层等低效储量已占

其油气探明储量的50%以上,低渗透油气藏已成为俄罗斯老油气开发区最主要的后备资源。

低渗透油气田也是我国重要的油气田类型,其广泛分布在我国的各个油气区^[1]。由于我国主要发育陆相沉积盆地和古老的海相沉积盆地,油气资源品位低,低渗透油气资源所占比例较大。我国低渗透石油资源主要分布在中生代、新生代陆相沉积盆地中;而低渗透天然气资源则主要分布在古生界及三叠系的海相地层中^[2]。我国低渗透石油远景资源量为 537×10^8 t,低渗透天然气远景资源量为 24×10^{12} m³,分别占全国石油和天然气远景资源总量的49%和42.8%^[3]。截至2008年底,我国全国累计探明石油地质储量为 287×10^8 t,其中低渗透石油地质储量为 141×10^8 t,占49.2%;全国累计探明天然气地质储量为 6.42×10^{12} m³,其中低渗透天然气储量为 4.1×10^{12} m³,占63.6%。2008年,全国低渗透原油产量为 0.71×10^8 t,占总产量的37.6%;低渗透天然气产量达 320×10^8 m³,占总产量的42.1%^[3]。

近年来,许多科研单位和油气田企业已将低渗透油气资源勘探开发技术的室内实验研究和野外实地研究列为重点攻关目标。目前我国长庆、大庆、胜

收稿日期:2009-06-08;修回日期:2009-08-10。

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向性项目(编号:KZCX2-YW-501);国家自然科学基金专项基金项目(编号:40841015)联合资助。

第一作者 E-mail: zhengjw@llas.ac.cn.

利、吉林、大港、中原等油田公司都开展了低渗透油气资源勘探开发工作。例如,长庆油田公司在鄂尔多斯盆地特低渗、超低渗油气田的勘探开发方面获得了重要技术突破,已能成功开发渗透率为 $0.5 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的超低渗透油藏,且单井产油量达到 $3 \sim 4 \text{ t/d}$,使得鄂尔多斯盆地的石油资源量从此前的 $40 \times 10^8 \text{ t}$ 增加到 $85.88 \times 10^8 \text{ t}^{[4]}$,增加了 1 倍多。目前,以中国石油长庆油田公司、延长石油集团公司等为代表的企业正致力于渗透率为 $0.3 \times 10^{-3} \sim 0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的超低渗透油藏的勘探开发技术研究^[4]。

2 低渗透储层地质特征与形成机理

目前世界上已发现的低渗透储层的岩石类型包括砂岩、粉砂岩、砂质碳酸盐岩、灰岩、白云岩、白垩^[5]以及火山岩等,但主要以致密砂岩储层为主。低渗透储层的地质特征和形成机理对低渗透油气资源的勘探开发具有重要的影响。

2.1 低渗透储层地质特征

由于低渗透储层形成的沉积环境独特以及受沉积后成岩作用和构造作用的影响,使其具有典型的特征,主要表现为储层物性差、沉积物成熟度低、孔喉半径小、基质渗透率低、成岩差异大、应力敏感性

强、裂缝比较发育和非均质性强等特征。

(1)岩石学特征。陆相低渗透储层最显著特点是岩石矿物成分成熟度和结构成熟度都很低,主要表现为:长石和岩屑含量普遍较高,粘土和碳酸盐胶结物含量普遍较高,岩石类型多为长石砂岩、岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩和岩屑砂岩,石英砂岩少见(表 1);岩石颗粒粒度分布范围比较宽,颗粒大小混杂,分选和磨圆较差,颗粒之间多表现为线接触。由于这些特征,造成沉积物在成岩过程中容易发生机械压实作用,且压实强度较大,从而使储层变得致密、物性较差。

(2)孔隙结构特征。由于沉积以后的强烈成岩作用,造成低渗透砂岩储层孔隙类型通常表现为粒间孔发育(原生粒间孔和次生粒间孔),特低渗透和超低渗透储层则表现为以次生孔隙为主^[6]。但储层渗透率除受岩石孔隙大小的影响外,更主要是受孔隙连通情况即喉道半径大小、几何形态和结构系数的控制。低渗透储层的孔隙结构主要分为大孔细喉型和小孔细喉型 2 种,前者孔隙类型主要为残余原生粒间孔、粒间溶孔,喉道主要为细颈型和窄片型,孔喉比较大;后者孔隙类型以粒间溶孔和晶间微孔为主,喉道主要为管束状、细管状和窄片状,孔隙较小,喉道也较小,孔喉比较低。

表 1 我国部分油田低渗透砂岩储层物性参数(据文献[7-9]整理)

油田	碎屑成分(%)			填隙物(%)	孔隙度(%)	渗透率($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)
	石英	长石	岩屑			
大庆油田杏一区东部	30	34	36	18.1	21	10
老君庙油田 M 层	60	20	20	16~21	19.1	24
榆树林油田	25	31	30	8	19.65	3.67
濮城油田 $E_{s_3}^{5-10}$	75	15	10	8	15.6	16.4
安塞油田	25	60	15	10	12.4	1.4
卫城油田 E_{s_4}	65	20	15	8	14.2	2.8
三塘湖油田	16.8	70.2	13.0	—	17.2	13.04
新民油田	33	30	37	4.4	15.2	5.4
丘陵油田	30	24	46	1	13.7	31.9

(3)物性特征。根据低渗透储层的孔隙度和渗透率特征,可将其分为高孔低渗储层和低孔低渗储层 2 类。前者主要由沉积粒度比较细的粉砂岩、白垩等构成,该类储层的孔隙度相对较高(原始孔隙度可达到 $10\% \sim 40\%$),但是由于颗粒粒度细、粒内和粒间孔隙小且束缚水饱和度一般在 90% 左右,空气渗透率很低;后者的储层孔隙度($3\% \sim 12\%$)和空气渗透率都很低,毛细管压力相对较高,束缚水饱和度

一般在 $45\% \sim 70\%$ 之间,由于该类储层的孔隙主要是由分散的微孔洞构成,且孔洞之间的连通性差造成渗透率低^[5]。我国砂岩低渗透储层以低孔低渗型为主,从我国各油田的统计可以看出,孔隙度一般小于 20% ,渗透率一般小于 $30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表 1)。

(4)应力敏感性特征。由于储层形成过程中成岩作用强烈,因而造成低渗透储层具有强烈的应力敏感性。包括储层基质孔隙的压力敏感性和裂缝的

压力敏感性,相比而言,裂缝的压力敏感性更强。当围压增大时,储层的渗透性会急剧变差,一般要下降 $1/10\sim 1/2$ 。主要原因是致密储层中存在许多扁平或片状的喉道及毛细管,围压增大引起的片状喉道关闭必然会使渗透率大大降低(对孔隙度的影响要小得多)。储层岩石越致密、渗透率越低,由围压引起的渗透率下降幅度就越大,压力敏感特征也就越明显^[10]。

(5)裂缝特征。在低渗透储层中,随岩石致密程度增加,岩石的强度和脆性加大,在构造应力场的作用下,岩石会不同程度地产生裂缝,形成裂缝性低渗透储层。裂缝主要包括由构造活动引起的构造缝和由异常高的地层压力产生的微裂缝。在低渗透储层中,裂缝通常是主要的渗流通道,控制着低渗透油气藏的渗流系统,对低渗透油气藏的勘探开发具有重要的影响^[11]。从鄂尔多斯盆地塔巴庙地区的低渗透储层钻井资料来看,各生产井钻遇储层裂缝普遍发育,而且以高角度裂缝发育为主,裂缝视密度达到 $0.0197\sim 0.8668$ 条/m^[12]。

(6)非均质性特征。非均质性是造成储层渗透率在水平向和垂向发生变化的主要原因。储层的非均质性分为宏观非均质性和微观非均质性2类。宏观非均质性主要包括层内非均质性和层间非均质性。层内非均质性主要是由于沉积物形成时水动力条件、水流方向、沉积时的古地形等差异,使同一层内沉积物粒度分布不均,且大小混杂,从而孔隙度和渗透率大小也相差较大引起的。碎屑岩低渗透储层有时是由砂岩和泥岩薄互层组成,层间非均质性主要指形成低渗透储层的不同薄互层之间的变化。微观非均质性是指储层的微观孔隙、喉道的大小和分布特征等方面的变化。低渗透储层的宏观和微观非均质性都比较强。

(7)渗流特征。低渗透储层的基质渗透率低,孔隙连通性较差,孔隙小,喉道细,因而流体在孔隙中流动时,遇到的渗流阻力大,固、液界面之间的相互作用力明显,从而导致渗流过程中存在启动压力梯度,并使其渗流偏离达西渗流定律^[9]。启动压力梯度是反映这种渗流形态最主要的参数,其与渗透率成反比,渗透率越低,启动压力越高,对开发的影响越大。由于低渗透储层中裂缝比较发育,裂缝的高导流性和基质的低渗透性形成明显的矛盾,使得基质孔隙与裂缝之间流体的相互交换作用困难,从而造成低渗透储层的渗流系统复杂,开发难度大。

2.2 低渗透储层形成机理

低渗透储层的形成主要与沉积作用、成岩作用和构造作用有关。按照成因不同可以将低渗透储层分为原生低渗透储层、次生低渗透储层和裂缝性低渗透储层^[6]。

原生低渗透储层主要是受沉积作用的影响。岩石颗粒成分、大小和分选以及胶结物成分、含量和类型等沉积作用过程是影响储层渗透性的主要因素。该类储层大多埋深较浅,未经历强烈的压实和成岩作用的改造,岩石脆性低,裂缝不发育,孔隙度较高,但连通性差,因而渗透率较低。

次生低渗透储层主要是各种成岩作用改造的结果。机械压实、胶结、重结晶、交代和溶蚀等成岩作用都会造成原储层岩石孔隙度和渗透率的降低,形成次生低渗透储层。由各类成岩作用形成的低渗透储层多数具有低孔隙度和低渗透率的特征。我国的碎屑岩低渗透储层主要属于这类储层。

裂缝性低渗透储层主要受构造作用的影响。一些比较致密的岩石脆性较大,成岩后期构造作用产生的外力可以使一些比较致密的脆性较大的岩石发生破裂,形成一定的构造裂缝,从而提高了储层渗透率,形成裂缝性低渗透储层。裂缝既是这类储层的有效储集空间,也是主要的渗流通道^[11]。

3 低渗透油气资源勘探开发主要影响因素

(1)油气藏不易识别。低渗透油气藏的形成主要与地层岩性有关,与由背斜、断层等形成的构造油气藏有很大区别,一般不受构造控制,油气藏的边界主要通过岩性的变化体现,属于隐蔽性的岩性油气藏,常规的勘探方法不易对其进行识别。

(2)油气层判识困难。低渗透储层普遍具有低孔隙度、低渗透率、低含油气饱和度的特性,油气层与水层、有效储层与非储层的岩性与电性响应特征小,因而对有效储层识别难度大^[13]。此外,在低渗透油气田勘探中还存在薄油气层不易识别等问题。

(3)油层孔喉细小,比表面积大,渗透率低。相对于高、中渗透油藏,低渗透油藏岩石的结构和表面特征对油藏的开发特征的影响尤其巨大,甚至是制约性的。由于大部分低渗透储层为近源沉积,碎屑物质分选程度差,而少部分为远源沉积,岩石颗粒细,再加之成岩压实和胶结作用,造成油层孔隙小、喉道细、比表面积大、渗透率低。低渗透油层以小一

微孔隙和细—微细喉道为主,平均孔隙直径一般为26~43 m,喉道半径中值只有约2.0 m^[6]。储层孔隙细小和比表面积大,不仅是渗透率低的主要原因,也是导致低渗透油层一系列开采特征的本质所在。

(4)具有启动压力梯度,符合非达西渗流规律。低渗透油藏储层由于孔隙细小、比表面积和原油边界层厚度大、贾敏效应和表面分子力作用强烈,其渗流规律不遵循线性的达西定律,而具有非达西型渗流特征,在孔隙中存在边界层流体。边界层流体具有边界层厚度越大,非达西现象越明显;渗透率越低,边界层对渗流规律影响越明显的特征。低渗透储层流体流动特征曲线分为2部分,在低压力梯度范围内渗流量与压力梯度呈非线性;在高压力梯度范围内呈拟线性,渗流直线段的延长线不通过坐标原点(达西型渗流通过坐标原点),而与压力梯度轴相交,其交点即为拟启动压力梯度,渗透率越低,启动压力梯度越大。

(5)弹性能量小,利用天然能量方式开采时压力和产量下降快。低渗透油田由于储层连通性差、渗流阻力大,一般底水都不活跃,弹性能量很小。除少数异常高压油田一次采油的采收率可以达到8%~15%以外,大多数低渗透油田弹性阶段采收率只有2%左右,溶解气驱采收率也不高。在消耗天然能量方式开采条件下,地层压力大幅度下降,油田产量急剧递减。

(6)产油能力和吸水能力很低,油井见注水效果缓慢。低渗透油层自然生产能力很低,甚至没有自然产能,一般都要经过压裂改造后才能正式投产。即使经压裂改造,其生产能力也都很低,相当于中、高渗透油层的几十分之一。由于低渗透油层渗流阻力大,大部分能量都消耗在注水井周围,油井见注水效果程度差。在250~300 m井距条件下,一般注水半年至一年后油井才能见到注水效果,见效后油井压力、产量相对保持稳定,上升现象很不明显。

(7)见水后产液(油)指数大幅度下降。一般而言油井见水后随着含水率的不断提高,产油量逐渐递减。对于中、高渗透油藏见水后产液指数上升,可以通过不断提高油井产液量的措施,以保证产油量的稳定或降低递减速度。但由于油水粘度比和岩石润湿性等多种因素的影响,低渗透油井见水后产液(油)指数大幅度下降。当含水率达到50%~60%时,无因次采油指数更低,只有0.15。加之地层压力水平低,产液量很难提高,这样就造成了低渗透油井见水后产油量加剧递减的严重被动局面。低渗透

油层的这种特性,对油井见水后的提液和稳产造成极大的困难。

(8)裂缝性低渗透砂岩油田沿裂缝方向油井水窜、水淹严重。我国的裂缝性低渗透油田主要为裂缝性砂岩低渗透油田。低渗透砂岩油藏往往有天然裂缝,同时由于需压裂增产,还存在人工压裂裂缝^[9]。这类油藏注水井吸水能力高,一旦注水压力超过破裂压力或裂缝开启压力,裂缝即处于开启状态,导致注水井的吸水能力急剧增大。当井网与裂缝分布规律及方向不相适应时,沿注入水主流线方向的油井水窜、水淹严重,有的油田在注水井投注几天甚至几小时后,相邻的油井即遭到暴性水淹。但裂缝具有双重作用,如果调整、控制得当,也可取得较好的开发效果。

4 低渗透油气资源勘探开发特色技术

低渗透油气勘探开发工业的发展,带动和促进了世界低渗透油气勘探开发技术的发展。近年来对低渗透油气田的有效勘探和经济开发问题已成为国际油气科技领域最重要的研究内容之一,国内外油田公司和科研单位在低渗透油气田的勘探开发方面都开展了相关的研究,取得了一定的实效。目前,国际上已经实现了对渗透率 $>0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的超低渗透油田的有效开发。除了一些可以用于低渗透油气资源勘探开发的常规技术外,目前,国际上使用较多的低渗透油气资源勘探开发特色技术主要有以下几种:

(1)多参数联合反演储层预测技术。近年来,随着测井和地震技术的飞速发展,国内外利用测井和地震等地球物理资料对储层识别及预测有了很大进展。多参数联合反演方法就是这些方法中的一种,其充分利用对地层变化比较敏感的自然伽玛、电阻率等非声波测井曲线来进行反演,能够提供准确的储层参数,精细刻画储层的空间分布,并预测储集性能,较好地克服了多解性及分辨率低等问题。在对低渗透含油气层识别过程中,首先通过对地层岩性敏感的自然伽玛曲线来区分砂岩、泥岩;其次利用孔隙度反演剔除致密砂岩,划分出有利储层;最后进行含气特征曲线重构反演,达到有效地识别低渗透含油气砂岩储层的目的^[14]。

(2)压裂技术。低渗透油田的生产井不经过压裂改造措施,一般都无法进行生产。水力压裂是低渗透油藏开发中最早使用也是目前最常使用的技术,其目的是建立能提供很大接触面积的长而窄的裂缝。水力压裂技术在许多低渗透油气田开发中起

到了很好的储层改造效果,但是对于水敏、强水锁等低渗透储层不适合采用水力压裂。近年来国外发展起来了CO₂压裂技术、液态CO₂井下配置加砂压裂技术和超长水平井技术取代压裂缝技术^[15],解决了许多低渗透储层水敏、强水锁的难题。此外,连续油管分层压裂技术、相渗调节压裂液(RPM)增产工艺技术、多裂缝压裂技术、重复压裂技术、水平井压裂技术等也取得了重要进展。

(3)井网优化技术。完善的注采井网是提高低渗透油田采收率的一个必要因素。合理的生产制度对采收率的提高也有重要的作用。从提高采收率的角度出发,在高孔渗区域,采用大井距、小井网密度,而在低渗透致密砂岩区块,采用小井距、大井网密度。目前大多数低渗透油田都采用面积注水方式。面积注水方式多种多样,其中正方形井网、菱形反九点井网注水方式灵活机动^[16]。利用优化井网的方式来提高低渗透油气藏采收率是目前一种比较成熟的致密砂岩开发方式。一些油气田正致力于小排距、大井距开发攻关试验。

(4)超前注水技术。注水井在采油井投产前投注,油井投产时其泄油面积内含油饱和度不低于原始含油饱和度,地层压力高于原始地层压力并建立起有效驱替系统的一种注采方式。早注水可以使地层压力保持在较高的水平,相应可使油田在一个较高的水平上稳产^[17]。超前注水技术具有4大优点:①可建立有效的压力驱替系统,获得较高的单井产量;②降低因地层压力下降造成的渗透率伤害;③有利于提高油相相对渗透率;④有利于提高最终采收率。长庆油田公司在安塞、西峰等油田注水开发中实施早期强化注水,提高了单井产能及最终采收率。同步或超前注水能使地层避免或少受伤害,尽快建立起压力驱替系统。

(5)水平井开采技术。由于水平井具有很强的泄油能力,特别是水平井加分段压裂,能够成倍地提高采油速度。一般来讲,水平井产能是直井产能的2~3倍,其在世界范围的油藏开发中已经得到了广泛的应用,并且取得了很好的开发效果和经济效益。水平井在低渗透油气藏的开采方面具有很大的优势,弥补了在复杂低渗透油气藏中,传统直井有时无法达到预期开采效果的遗憾。在我国的大庆油田、长庆油田和吉林油田等一些低渗透砂岩油藏开发中已经开展了水平井开发试验,结果表明,水平井加上压裂改造,可以取得比直井好得多的效果^[18]。水平井压裂改造技术是目前低渗透油气藏开发技术攻关

的热点。

(6)CO₂混相驱技术。CO₂单井吞吐是一种提高油气采收率技术的有效方法,其在低渗透油气田开采方面具有明显的优势^[19]。现场应用实践证明,CO₂单井吞吐技术具有明显的增油效果,具有很好的推广应用价值。CO₂溶解气使原油体积膨胀,降低原油的粘度,具有气驱及解堵能力,对油层具有一定的酸化解堵作用,CO₂可使原油中的轻质烃萃取和气化,注入CO₂改善了原油和水的流度比。此外,CO₂与原油混相后,不仅能萃取和气化原油中轻质烃,而且还能形成CO₂和轻质烃混合的油带。油带移动是最有效的驱油过程,可显著提高油气的采收率。我国在榆树林油田、宋芳屯油田、新立油田、富民油田等进行了CO₂混相驱先导试验,取得了较好的增油效果。

(7)微生物采油技术。微生物采油技术是指利用微生物(主要是细菌)或其代谢产物提高原油产量和采收率的技术。微生物采油方法包括:微生物单井吞吐、微生物驱替、微生物调剖堵水、微生物除蜡以及利用生物工程生产生物表面活性剂和生物聚合物,作为化学驱的注入剂的方法^[20-21]。1992年在我国低渗透油田扶余油田进行了2口井的现场吞吐实验,结果证明微生物具有明显的降水、降粘及增加产油量的作用。增产效果比较好,经济效益也比较好。

此外,提高低渗透油气藏采收率的技术还有层内爆炸增产技术、气层保护技术、优化射孔技术、气藏描述技术、多期压裂技术、井筒举升技术等^[13]。

5 结语

低渗透油气资源已经成为一种重要的油气资源类型,在世界各油气区分布广泛,在我国也很丰富。多种岩石均可以形成低渗透储层,但目前发现的低渗透储层以碎屑岩为主。低渗透储层普遍具有储层物性差、沉积物成熟度低、孔喉半径小、基质渗透率低、成岩差异大、应力敏感性强、裂缝比较发育和非均质性强等地质特征。沉积作用、成岩作用和构造作用是影响低渗透储层的主要因素。而油气藏不易识别、油气层判识困难、渗透率低、具启动压力梯度、弹性能量小、油井见注水效果缓慢、见水后产液指数大幅度下降、水窜和水淹严重等是当前制约低渗透油气田勘探开发的主要影响因素。多参数联合反演储层预测技术、压裂技术、井网优化技术、超前注水技术、水平井开采技术、CO₂混相驱技术、微生物采油技术等是低渗透油气勘探开发的针对性技术。

致谢:中国科学院资源环境科学信息中心张志强研究员和中国石油勘探开发研究院郝明强博士等审阅了本文并提出了修改建议,谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京:石油工业出版社, 1997.
- [2] 胡文瑞. 中国低渗透油气的现状与未来[J]. 中国石油企业, 2009, (6): 56-58.
- [3] 董云龙. 低渗透资源将是中国未来油气发展的主流[EB/OL]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2009/03/26/001230359.shtml>. 2009-03-31.
- [4] 王道富,付金华,雷启鸿,等. 鄂尔多斯盆地低渗透油气田勘探开发技术与展望[J]. 岩性油气藏,2007,19(3):126-130.
- [5] Spencer C W. Review of characteristics of low-permeability gas reservoirs in Western United States[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(5):613-629.
- [6] 曾联波. 低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [7] 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.
- [8] 周永炳. 榆树林油田扶杨油层成岩作用特征[J]. 石油天然气学报,2005,27(1):5-9.
- [9] 杨希濮,孙卫,高辉,等. 三塘湖油田牛圈湖区块低渗透储层评价[J]. 断块油气田,2009,16(2):5-8.
- [10] 连承波,李汉林. 地应对煤储层渗透性影响的机理研究[J]. 煤田地质与勘探,2005,33(2):30-32.
- [11] 秦同洛. 关于低渗透油田的开发问题[J]. 断块油气田,1994,1(3):21-23.
- [12] 周新桂,张林炎. 塔巴庙地区上古生界低渗透储层构造裂缝及其分布定量预测[J]. 天然气地球科学,2005,16(5):575-580.
- [13] 魏一鸣,方朝亮,李景明,等. 中国石油天然气工业上游技术政策研究报告[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [14] 张静,王彦春,赵凡,等. 多参数联合反演预测致密含气砂岩[J]. 天然气地球科学,2008,19(6):864-869.
- [15] 张强德,王培义,杨东兰. 储层无伤害压裂技术——液态 CO₂ 压裂[J]. 石油钻采工艺,2002,24(4):47-50.
- [16] 曹仁义,程林松,薛永超,等. 低渗透油藏井网优化调整研究[J]. 西南石油大学学报,2007,29(4):67-69.
- [17] 王建华. 低渗透油田超前注水研究[J]. 断块油气田,2005,12(3):53-54.
- [18] 张吉,陈凤喜,卢涛,等. 靖边气田水平井地质导向方法与应用[J]. 天然气地球科学,2008,19(1):137-140.
- [19] 李孟涛,张英芝,杨志宏,等. 低渗透油藏 CO₂ 混相驱提高采收率试验[J]. 石油钻采工艺,2005,27(6):43-46.
- [20] Van Hamme J D, Singh A, Ward O P. Recent advances in petroleum microbiology[J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews,2003,67(4):503-549.
- [21] 窦启龙,陈践发,王杰,等. 微生物采油技术的研究进展及展望[J]. 天然气地球科学,2004,15(5):559-563.

Main Affecting Factors and Special Technologies for Exploration and Exploitation of Low-permeability Oil and Gas Resources

ZHENG Jun-wei^{1,2}, YU Ling³, SUN De-qiang⁴

- (1. *Scientific Information Center for Resources and Environment / Lanzhou Branch of National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*
 2. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;*
 3. *No. 1 Oil Production Plant of Changqing Oilfield, PetroChina, Yan'an 716000, China;*
 4. *Institute of Policy and Management, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: The distribution, the status of exploration and exploitation as well as the reservoir geological characteristics and formation mechanism of low-permeability oil and gas resources were systematically investigated. The main affecting factors of the low-permeability oil and gas resources are as follows: not easy to identify oil and gas reservoirs, difficult identification of oil and gas layer, low permeability, starting pressure gradient, small elastic energy, slow effectiveness of water injection wells, significant decrease in liquid water production index after water breakthrough, serious water channeling and flooding. Multi-parameter joint inversion of reservoir prediction technology, fracturing technology, well optimization technologies, advanced water technology, horizontal wells technology, CO₂ miscible flooding techniques, microbial enhanced oil recovery technology are special technologies for exploration and exploitation of low-permeability oil and gas resources.

Key words: Low-permeability oil and gas resource; Low permeability reservoir; Geologic characteristic; Formation mechanism; Exploration and exploitation technology; Affecting factor.