

文章编号:1001-8166(2009)08-0854-11

低渗透油气资源勘探开发技术进展*

张志强¹, 郑军卫^{1,2}

(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)

摘要:通过对国内外低渗透油气资源的分类、资源量、分布状况、勘探开发技术研究现状的分析, 指出低渗透油气层的识别和改造技术、钻采工艺技术是当前国际低渗透油气勘探开发技术研究的热点。当前和未来国际低渗透油气资源研究将主要关注: 低渗透储集层优质储集体预测技术、压裂技术、水平井和多分支井技术、小井眼钻井技术、超前注水技术、层内爆炸增产技术、微生物采油技术等技术领域。我国今后需要进一步发展超深井钻井、沙漠山地等复杂地表条件高分辨率地震勘探和解释技术、复杂岩性油气层测井技术、低渗透含油区带优选技术、低渗透储层微观孔隙结构研究技术、低渗透储层裂缝先期预测技术、开发压裂优化注采系统技术、水平井、复杂结构井压裂技术、低渗透油藏注气提高原油采收率技术、小井眼钻井技术等。

关键词:低渗透油气资源; 超低渗透储层; 致密砂岩; 勘探开发技术; 储层改造; 提高采收率
中图分类号:P618.13; TE348 **文献标志码:**A

1 引言

随着世界油气工业的发展, 那些规模大、储量大、资源丰度高、易勘探、好开采的油气资源在整个剩余油气资源总量中所占的比重越来越小, 而一些以前不被重视的、未列入主要勘探目标的、开发效益相对较差、勘探开发技术要求高的油气资源将逐步成为全球油气勘探开发的热点。加拿大猎人勘探有限公司(Canadian Hunter Exploration Ltd.) Masters等^[1]在1979年对全球各类油气资源分布及其所需勘探开发技术研究的基础上指出, 可以用一个三角形图对全球油气资源进行描述。高、中品质容易开发的常规油气资源占据三角形上部面积较小区域, 对应的资源量也较小; 而低品质不容易开发的非常规油气资源占据三角形的中下部, 对应的资源量也较大。且从三角形顶端到底部, 油气资源开发所需

技术和成本逐步增高。2003年, 加拿大非常规天然气协会^[2](Canadian Society for Unconventional Gas)在Masters等的油气资源三角图基础上进行了补充(图1), 将低品味油气资源细分为低渗透石油、致密砂岩气、页岩气、重油、煤层甲烷、天然气水合物、油页岩等, 并根据资源量、开发成本、所需技术难度等分别标在三角图中的相应位置。随着高、中品质常规油气资源的减少和勘探开发技术的进步, 低渗透油气资源(低渗透石油、致密砂岩气)将成为常规油气资源的接替者和保障世界油气资源供应的主角。

由于低渗透油气资源全球分布范围广、储量大^[3], 用于对其进行勘探开发的工艺技术与用于常规油气资源的技术存在密切联系, 大部分用于常规油气资源勘探开发的工艺技术也可同样适用于低渗透油气资源, 开展低渗透油气资源研究的重要性日益凸显。

* 收稿日期:2009-04-20; 修回日期:2009-07-07.

* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目“资源与海洋、生态与环境创新基地战略研究与科学评价”(编号:KZCX2-YW-501); 国家自然科学基金项目“21世纪地球科学研究的十大科学问题”(编号:40841015)资助.

作者简介: 张志强(1964-), 男, 甘肃定西人, 博士, 研究员, 博导, 主要从事地球科学与资源环境科学学科发展战略研究、生态经济学与区域可持续发展研究. E-mail: zhangzq@lzb. ac. cn

本文通过对国内外低渗透油气资源的特征与分类、资源与分布状况、勘探开发技术研究现状的分析,归纳当前国际低渗透油气勘探开发技术研究的热点和需要关注的主要技术,以期对我国低渗透油气勘探开发研究有所裨益。

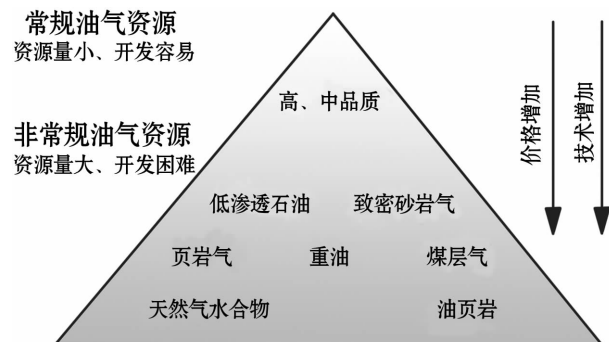


图1 油气资源三角图^[2]

Fig.1 Resource triangle for oil and gas

2 低渗透油气田特征及其资源概况

低渗透油气田(Low permeability reservoir/pool, Low permeable reservoir/ pool)是指油层孔隙度低、喉道小、流体渗透能力差、产能低,通常需要进行油藏改造才能维持正常生产的油气田^[3-9]。目前低渗透储层的岩石类型包括砂岩、粉砂岩、砂质碳酸岩、灰岩、白云岩以及白垩等^[7],但主要以致密砂岩储层为主。

根据低渗透储层的孔隙度和渗透率特征,可将其分为2类:第1类为高孔低渗储层,该类储层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%~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;第2类为低孔低渗储层,该类储层孔隙度(3%~12%)和空气渗透率都很低,毛管压力相对较高,束缚水饱和度一般在45%~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^[7]。

低渗透油气藏按成因分为原生低渗透油气藏和次生低渗透油气藏。一般原生低渗透油气藏主要是受沉积作用的影响,沉积物粒度细,泥质含量高,分选差,以原生孔为主,储层大多埋深较浅,未经历强烈的成岩作用改造,岩石脆性低,裂缝不发育,孔隙度较高,而渗透率较低,多数为中高孔低渗型。次生低渗透油气藏主要是各种成岩作用改造的结果,这类储层原是常规储层,但由于压实作用、胶结作用

等,大大降低了孔隙度和渗透率,原生孔隙残留较少,形成致密层。我国已发现的低渗透储层主要是这类储层。

然而,由于目前对于低渗透储层概念的认识还不完全一致,因此还未形成统一的针对低渗透储层的分类和评价标准,因而,世界各国对低渗透油田和气田的划分标准也存在差异。前苏联学者^[10]将渗透率小于 $(50 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油田算作低渗透油田。美国联邦能源管理委员会(FERC)把渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层称为致密储层^[11]。李道品^[4]根据油层平均渗透率把低渗透油田分为3类,即一般低渗透油田(油层平均渗透率为 $50 \times 10^{-3} \sim 10.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、特低渗透油田(油层平均渗透率为 $10.0 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、超低渗透油田(油层平均渗透率为 $1.0 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。唐曾熊^[5]建议按照数量级的差异作为划分各类渗透率的标准,即对于油田,特低渗透率定为 $< 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,低渗透率定为 $(10 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,中渗透率定为 $(100 \sim 1\,000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,高渗透率定为 $> 1\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。另外,还有一些地域性的分类,如赵靖舟等^[12]通过对鄂尔多斯盆地三叠系砂岩储层的研究,将低渗透砂岩储集层分为低渗透层(I类)、特低渗透层(II类)、超低渗透层(III类)、致密层(IV类)4个亚类。我国石油天然气行业标准SY/T6168—1995^[13]规定,气藏储层有效渗透率 $> 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为高渗储层,有效渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 属中渗储层,有效渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 属低渗储层,有效渗透率 $\leq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为致密储层。1998年开始实施的我国石油天然气行业标准《油气储层评价方法》(SY/T6285—1997)^[14]将低渗透层的渗透率上限定为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,并分别确定了含油储层与含气储层的孔隙度、渗透率评价分类标准。该标准将低渗透含油砂岩储层分为低渗透(渗透率为 $50 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、特低渗透(渗透率 $10 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、超低渗透(渗透率为 $1 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、非渗透(渗透率 $< 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)储层;将低渗透含气砂岩储层分为低渗透(渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)和特低渗透(渗透率 $< 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)储层。

低渗透油气田是世界上最重要的油气田类型之一。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、北欧等地区都有广泛的分布。同时,随着油气勘探开发时间的延长,小而复杂的低渗透油田所占的比例越

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到其当年油气探明储量的 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。

同样,低渗透油气田也是我国重要的油气田类型,其广泛分布在我国各个油气区。据第二次全国油气资源评价结果,低渗透油层资源量为 210.7 亿 t,占全国石油总资源量(940 亿 t)的 22.4%。根据中国石油天然气集团公司第三次油气资源评价结果,我国陆上主要盆地可探明的重稠油、低渗透、特低渗透石油资源量约 215.9×10^8 t,占可探明石油资源量的 49.8%,其中重油 31.1×10^8 t,低渗透和特低渗透石油 184.8×10^8 t^[12]。

截至 2005 年,我国低渗透油田探明储量为 63 亿 t,约占探明总储量的 28%。近 5 年新增探明储量中低渗透油储量的比重已增至 50% ~ 60%,剩余石油资源中低渗透油田储量也占到 76.5%。在低渗透石油资源中,探明储量大于 2 亿 t 的油区有大庆、吉林、辽河、大港、新疆、长庆、吐哈、胜利、中原等 9 个油区。全国陆上天然气资源量为 30.23 万亿 m³,低渗透气层资源量约为 12 万亿 m³,占总资源量的 40%,目前我国天然气产量近 1/3 产自低渗透气层。鄂尔多斯、松辽、柴达木、准噶尔四大盆地低渗透天然气储量比例均在 85% 以上。截止 2008 年底^[15],全国累计探明低渗透石油地质储量 141 亿 t,低渗透天然气地质储量 4.1 万亿 m³,分别占全国石油和天然气储量的 49.2% 和 63.6%。2008 年,全国低渗透原油产量为 0.71 亿 t,占总产量的 37.6%;低渗透天然气产量达 320 亿 m³,占总产量的 42.1%^[15]。

3 国内外低渗透油气资源研发现状

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重要的研究内容,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应的研究,取得了一定的成效。如:国外在高分辨率地震技术、多分量地震勘探技术、四维地震勘探技术、裂缝识别、压裂新技术、装备和软件、水平井和复杂结构井井下随钻测量和控制技术、小井眼钻井工艺、蛇形钻井工艺、注气驱油气工艺等技术方面取得突破;我国则在油藏精细描述、储层微观孔隙结构研究、富集区优选、超前注水、开发压裂和集成组合技术等方面形成优势。目前,国际上已经实现了对渗透率大于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低

渗透油气田的有效开发,但渗透率小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低渗透油气资源量仍然很大,需要通过科技进步来不断拓展低渗透油气田有效勘探开发的下限。

3.1 国外低渗透油气资源研发现状

虽然国外低渗透油藏开发时间长,美国 1871 年^[16]即发现了著名的布拉德福德油田(Bradford Oil Field),但由于开发难度大、经济效益差,国外在特、超低渗透油气田勘探开发的研究力度和应用规模上都比较小。然而在一些单项技术上,与我国相比国外一些跨国石油公司仍具有很大优势。

3.1.1 低渗透油气资源勘探技术研发现状

迄今在国外低渗透油气资源仍不是油气勘探的主要目标,因而对低渗透油气资源勘探技术的研究与常规油气勘探技术的研发是结合在一起的,绝大多数技术都是通用的。近年来,国外在油气资源勘探方面的技术进步主要表现为:①在油气勘探理论方面,国外提出的盆地动态模拟与油气系统分析技术^[17,18]、高精度层序地层学^[19]和资源目标一体化技术等对油气勘探技术都具有重要的引领作用;②在非地震勘探技术方面,对地表化探、卫星遥感、重磁电法勘探以及微电磁等低成本的综合应用对盆地早期评价具有重要作用;③在地震勘探方面,高分辨率地震技术、多分量地震勘探技术、四维地震勘探技术、三维地震可视化解释技术^[20]、叠前深度偏移技术、油藏地震描述技术、裂缝预测与裂缝建模技术、时移地震检测技术等迅速发展,极大地提高了新区油气勘探的成功率和老区剩余油气的描述水平;④在测井技术方面,成像测井、核磁共振成像测井、井间电磁成像测量和随钻测井技术等的进步,大大提高了油气层识别的成功率。此外一些综合地球物理勘探技术也得到了很大的发展,如近年来在地震资料和测井资料综合解释方面取得了重大突破,利用各种测井曲线合成的地震记录不仅保留了原测井曲线在垂向上的高分辨率,同时也吸收了地震记录在水平方向覆盖面大的优点,达到了提高勘探成功率的目的。

3.1.2 低渗透油气资源开发技术研发现状

国外在低渗透油气资源开发方面的技术进步首先体现在先进的钻井和完井技术,主要包括:水平井、老井重钻、复杂结构井钻井完井技术,深井、超深井钻井技术,大位移井钻井完井技术,空气钻井、膨胀管钻井、连续套管及套管钻井技术,蛇形钻井^[21]、小井眼钻井及欠平衡钻井技术等。美国能源部提出

21世纪钻井技术发展的方向是钻得更快(钻进速度更快,钻井周期更短,钻井效率更高)、更深(所钻井的井深更深,以及海上钻井的水深更深)、更廉价(吨油成本中钻井的成本更低)、更清洁(钻井过程中对油层的保护更好,对环境的污染更小)。国外在小井眼钻井先进技术研究和发展方面的趋势为:带顶部驱动的小井眼钻机、小尺寸大功率井下动力钻具、采用高灵敏度井控专家系统控制和预防井喷、采用连续取芯钻机进行小井眼取芯作业、采用高强度固定齿的新型钻头等。并且朝着更小尺寸配套的方向发展,目前国外已有可用于76.2 mm井眼的全套钻井和井下配套工具,以及多种连续取芯钻机和混合型钻机^[22]。国外在低渗透油气资源开发方面的技术进步,还体现在裂缝识别、压裂新技术、注气技术、数字油田技术、聪明油田技术(smart oil field)^[21]、以及相关装备和软件等方面。如国外在低渗透油气田天然裂缝识别方面已发展了配套的系列技术,包括定向取心、岩心地应力测试、微电阻率扫描成像测井、地应力场数值模拟、人工裂缝识别、压裂过程中微地震信息对人工裂缝进行三维监测等技术。

3.1.3 低渗透油气资源勘探开发现状

通常,得到优先勘探和开发的是那些规模大、易于发现、易于开采、经济效益高的中高渗透油气资源,而将那些品位低、规模小、开发难度大、开发效益低的油气资源作为后备资源,只有在油气资源短缺或技术、经济条件允许的条件下才进行探明和开采。目前总体来看,由于开发难度大、技术水平要求高,国外对低渗透油气资源开发的规模还不是很大^[23],多数产油国的油气勘探开发的主要目标仍是中高渗透层。美国、加拿大、俄罗斯、澳大利亚等是除中国以外世界上为数不多的几个开发低渗透油气藏的国家,目前这些国家开发的低渗透储层的渗透率下限基本在 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上。如美国就在二叠盆地(Permian Basin)开采渗透率在 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右的油藏,单井平均产油量约为0.5~1.0 t/d。在低渗透油气藏开发方面,典型的有加拿大阿尔伯达盆地(Alberta Basin),在盆地西部最深拗陷的深盆区,发现了20多个低渗透产气层段,主要储层为白垩系致密砂岩层系,总含气面积达62 160 km²,孔渗最低处孔隙度小于10%,渗透率低于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。美国落基山地区也是低渗透油气藏开发较多的地区,该地区西侧以逆掩断层带开始,向北与加拿大阿尔伯达盆地西侧逆掩带对应,向东、向南依次散布着20

多个盆地,储气层段以透镜状致密砂岩为特征,一般为多层同时饱含天然气,埋藏深度一般在1 500 m以深。气藏储层的孔隙度一般介于7%~15%之间,渗透率通常为 $(0.13 \sim 1.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,以低孔、低渗的透镜状砂岩体为基本特征。俄罗斯则在西伯利亚地区的贝斯特林油田、西苏尔古特油田、东苏尔古特油田、罗斯金油田和费德罗夫油田等的低渗透油气资源开发中积累了丰富的经验。

3.2 我国低渗透油气资源研发现状

虽然我国发现低渗透油气田的历史也较早(1907年安塞低渗透油田开始开发),但由于受技术条件等的限制,规模性勘探开发的时间却不长。

3.2.1 低渗透油气资源勘探技术研发现状

我国低渗透油气资源勘探技术的发展也是与常规油气勘探技术结合在一起的。虽然我国在技术原创性方面与国外还存在明显差距,但在引进、吸收、消化国外技术的基础上结合自身复杂的地质、地貌特征,形成了一些特色技术。如在油气藏评价方面,在引入国外海相层序地层学评价技术的基础上,结合我国陆相盆地的特点,在陆相层序地层系统研究方面做了很多工作,已初步建立了三角洲、扇三角洲、冲积扇、曲流河、辫状河沉积模式^[22],目前正在尝试构建陆相层序地层学系统。在油气藏精细描述方面,我国针对陆相油气藏特点发展了一系列储层表征技术和方法,如精细沉积微相研究技术、微构造研究技术、储层综合预测技术、相控地质建模技术、薄互层解释技术等。此外,我国在复杂地表条件下高分辨率地震资料采集、地震资料校正处理、地震信息解译、储层反演、含油性检测等方面^[23],已经形成了独具特色的复杂山地、丘陵、沙漠、黄土塬等地表条件地震资料的采集、处理方法。

3.2.2 低渗透油气资源开发技术研发现状

近年来,我国适用于低渗透油气资源开发的钻井和完井技术得到了快速发展,如在定向丛式钻井、油气层保护、钻井泥浆研制等技术方面取得重大进展,在超深井钻探方面也有很大进步,目前除在塔里木盆地完成了井深8 408 m的塔深1井的钻探外,宝鸡石油机械厂已研制成功并可工业生产钻深达12 000 m的超深钻用石油钻机^[24],所有这些都为我国低渗透油气资源的开发提供了重要保障。但与世界上钻井技术领先的美国相比,我国的差距主要表现在钻井周期较长、钻井技术整体较落后、钻井新技术推广应用较慢。

虽然在单项技术方面我国与国外存在很大差

距,但在集成组合技术方面处于领先地位。“九五”期间,长庆、大庆、华北、新疆等油区经过反复试验,不断创新,发展应用了一套适应低渗、低产油田特点的新型简化油气集输流程,包括简化油井计量和联合站处理工艺及简化配套公用工程的实用新技术,在降低油田开发生产建设投资和减少生产操作费用上发挥了显著作用。在油田开发方面,近年来重点在微观孔隙结构定量表征、渗流理论、裂缝识别与压裂开发等学科方面取得较大进展。通过地震、测井综合研究裂缝识别技术,对油田的高效开发布井起到了重要作用;采用真实砂岩微观模型直接观察和描述油水驱替过程中的油水两相运动规律和剩余油分布规律,指导油田开发,取得了显著成效;应用核磁共振理论与技术解释低渗透储层可动油的定量分析,并成功地应用于多个低渗油田;在启动压力梯度、吸渗驱油、油水相对渗透率特征及储层伤害机理等问题上,取得了新的认识;在压裂整体开发理论特别是矩形井网与人工裂缝的合理配置的研究与应用上也取得了进展^[8,9,25-30]。

如长庆油田公司在安塞油田开发中,应用特低渗透储层微观孔隙结构和渗流机理理论,以沉积微相描述、平面及纵向非均质性以及开发流动单元为基础,提出分类型、分层位、分流动单元的“三分法”注采调控模式^[31]。大庆油田公司在外围“三低”油藏(低渗、低产、低丰度)开发实践中,发展了油藏综合描述技术、优化井网设计、注水开发综合调整技术和多种开采方式新技术,提高了储量动用程度和油田采收率^[30]。延长油田公司在低渗透油藏开发中,针对低渗、低产特征,广泛采用了一系列有效的新技术(如丛式井、压裂、注水等技术),提高了单井产量,压缩了钻井投资^[32]。

3.2.3 低渗透油气资源勘探开发现状

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,近年来许多科研单位和油气田企业已将低渗透油气资源的勘探开发技术室内实验研究和野外实地研究列为攻关目标。目前我国长庆、大庆、塔里木、吉林、大港、浙江等油田公司都开展了低渗透油气资源勘探开发。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 $0.5 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低渗透油藏,且单井产油量达到 $3 \sim 4 \text{ t/d}$ 。由于这一技术的进步,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 $85.88 \times 10^8 \text{ t}$,

翻了一番多。吉林油田则在裂缝性砂岩低渗透油藏开发方面取得了技术突破,积累了丰富的经验。目前,以长庆油田公司、延长石油公司等企业正致力于渗透率 $0.3 \times 10^{-3} \sim 0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低渗透油藏的勘探开发技术研究。

4 国际低渗透油气资源勘探开发技术发展趋势

4.1 低渗透储集层优质储集体预测技术

低渗透储层基质孔隙度和渗透率都很低,如果存在裂缝就可大大提高流体的渗流能力,对油气井的产能有直接的影响,决定了基质的泄油能力和油井的供油面积。同时,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。因而,对低渗透储集层优质储集体的预测主要是对低渗透储集层中天然裂缝的识别和预测。

低渗透储层裂缝定量分布预测研究及评价处于油气地质学研究的前沿领域,已经形成很多富有特色的研究方法。如 20 世纪 60 年代,Price^[33]就提出裂缝的发育程度与岩石中的弹性应变能成正比;1984 年,Narr 等^[34]提出在一定层厚范围内,单组裂缝的平均间距与裂缝发育的岩层厚度比值成线性函数关系;我国学者王仁^[35]、曾锦光等^[36]从构造应力场入手,根据岩石破裂准则开展了定量预测裂缝分布规律的数值模拟方法的探讨等。

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裂缝进行识别及预测有了很大进展。在测井方面,传统的“三低两高一”的测井识别及评价方法已远不能满足油气勘探开发迅猛发展的需要。近年来各种成像测井技术的应用使人们对裂缝及裂缝性油气藏有了更直观的认识,利用成像测井不但可以识别裂缝,也能更直观地对裂缝面的倾斜角度、方位、开度和密度等进行解释。在地震方面,主要有横波地震勘探检测裂缝、转换横波探测裂缝、VSP 法、纵波地震勘探、多波多地震勘探等识别裂缝技术^[26,37],尤其是纵波地震勘探识别及定量预测裂缝发育的方位及密度方面有了很大进展。由于储层裂缝的存在,会造成多种属性(振幅、层速度、时差、方位、方位 AVO 梯度、方位层频率、层频率差、叠加振幅及振幅方位差等)的变化,测量这些变化可以识别及预测裂缝。另外,多波多分量勘探地震对裂缝在地下造成的强烈非均质性

有很好的敏感性,但这项技术目前还处于探索性阶段。基于天然裂缝发育的主要控制因素,探索地质数理统计关系,在地质认识指导下定性(或半定量)地研究预测裂缝分布,是当今研究裂缝的主要方法和手段。

4.2 微观孔隙结构分析技术

低渗透油气储集层的性质在很大程度上取决于其微观孔隙结构(包括孔隙大小及其分布,孔隙空间的几何形态,孔隙间的连通性等),要实现低渗透油气资源的有效开发就必须加强对储层微观孔隙结构的研究。目前进行油气储层微观孔隙结构分析的技术主要有:真实砂岩微观模型驱替实验技术、核磁共振可动流体分析技术、恒速压汞孔喉分析技术和 CT 扫描技术等^[38~40]。

在低渗透油藏注水开发中,驱替程度是影响实际开发效果的重要因素。真实砂岩微观模型驱替实验是近年来发展起来的一项新的研究方法,其主要利用真实砂岩的微观模型研究水驱油过程中注入水在喉道和裂缝中的微观水驱油机理、残余油形成机理和裂缝对驱油效率的影响。

核磁共振成像可以对岩心进行三维观察,得到不同角度、不同转向、任意切片方向、任意切片厚度的图像。通过图像可以观察到裂缝、小孔洞、溶洞在岩心内部的分布特征,测量缝隙、微裂缝宽度及小孔洞、溶洞直径的大小,直观地观察裂缝、小孔洞、溶洞之间的连通性,判断连通性的好坏。三维图像可以分别绕 X 轴、Y 轴、Z 轴旋转,可在各轴向动态观察岩心内部缝洞的分布特征和连通性,并可随时截取任意时刻的三维图像进行观察、处理、计算。

恒速压汞能够将岩样内部的喉道与孔隙区分开,分别给出每个岩样内的有效喉道体积、有效喉道个数、有效喉道半径分布、有效孔隙体积、有效孔隙个数、有效孔隙半径分布及有效孔喉半径比分布等,并由此对岩样的孔喉发育特征(喉道、孔隙、孔喉半径比)进行细致分析。

与以往的岩心分析技术相比,CT 扫描技术可以在不改变岩心的外部形态和内部结构的条件下,在几秒钟内就观测到整块岩心的内部结构、矿物分布以及液流状况等。CT 装置的这些突出优点使其已经成为油层物理和油藏工程研究的有力武器。

4.3 压裂技术

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。水力压裂处理的目的是建立能提供很大大面积的长而窄的裂缝。裂缝的半长可以

在 30.5 ~ 305 m 这一数量级,开度在 0.25 cm 这一数量级。成功压裂处理的真正度量标准是是否增加了产量或注入能力。水力压裂的首要目的是改善储层与井眼之间的流体连通。近年来取得的进展包括:粘弹性表面活性剂压裂液、限流压裂完井等^[22]。

粘弹性表面活性剂压裂液的优点是易于准备、没有地层损害和支撑剂充填体仍有很高的传导性。这种压裂液通过在盐水中混合足够量的粘弹性表面活性剂来制备。由于不需要聚合物水化,因此进入盐水中的表面活性剂浓缩物就可以连续地计量。不需要交联剂、破胶剂或其他化学添加剂。

限流压裂完井技术就是选择压裂所需的射孔直径和射孔数量,以使预期的注入速率产生足够的流速,在井眼与水力裂缝之间建立数十万 Pa 的压差。这种做法可以保证流体流入所有炮眼,即使裂缝内各个炮眼之间的压力变化很大。即使在地层应力变化范围为几十万 Pa 的情况下,这项技术也能保证每个炮眼都将压裂液传送到水力裂缝中。大部分专业人员都假设所有炮眼的大小和形状是均匀的并以相同的速率接受流体。多年来,在低渗透油田的开发中已增加了大斜度或水平井眼的钻井以获得长生产井段。但在大斜度井或水平井的应用中要有效了解次生水力裂缝面^[22,41~43]。

除水力压裂技术外,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是近期压裂工艺技术发展的重要方向。

4.4 水平井和多分支井技术

20 世纪 40 ~ 70 年代,美国和前苏联等钻了一批水平井试验井。70 年代后,美国、加拿大、法国等相继开展了水平井开发油气藏的研究,进入 80 年代,该项技术开始大规模工业化推广应用。水平井作为开发低渗透油气田的一项成熟技术已在各国油田中得到广泛应用^[41,44]。从低渗透油田开发的角度来讲,水平井水平段在油层中的位置、延伸长度和延伸方向是决定水平井产能的关键因素,因此在水平井的建井过程中必须应用能保证水平井以最佳井身轨迹钻进的新工艺。俄罗斯利用地震声学 X 射线层析成像法以高精度确定产层在不同方位上产层的深度和含油厚度,作为最佳井身轨迹设计的依据;美国则研制出地质导向工具,可测得离钻头 1 ~ 2 m 范围内的方位、地层电阻率、伽玛射线、转速和井斜等,并把这些钻头附近的数据传到随钻测量系统,以便更好地引导钻头穿过薄层和复杂地层。

多分支井钻井技术是利用单一井眼(主井筒)钻出若干个支井的钻井新技术。20世纪50年代,前苏联率先开展了多分支井技术研究和实践。20世纪多分支井钻井技术在俄罗斯、英国、荷兰、美国、加拿大等得到广泛应用,并逐步推广到中东、南美、欧洲与亚洲。目前,国外常用的多分支系统主要有非重入多分支系统、双管柱多分支系统、分支重入系统和分支回接系统等^[45]。分支井的连接技术是分支井所特有的,支井眼与主井眼的密封连接问题是目前分支井完井作业技术难度最大的,因此分支井研究的主要方面集中在分支井完井中的主、支井眼连接技术。近年来国外一些公司已在这一方面取得一些进展,如Sperry公司研制的可回收分支井系统和分支回接器、Baker公司研制的根部系统、Sperry-San公司研制的多管柱完井系统。

4.5 小井眼钻井技术

低渗透油藏的油井产量都很低,日产液量只有几立方米到几十立方米,从作业上能否做到低成本是决定能否开发这类油藏的关键。使用小井眼钻井技术可以大幅度降低钻井投资,提高低渗透油田的经济效益。小井眼钻井技术采用的抽油机、油管、抽油杆、抽油泵和简易防盗采油树都比常规的采油设备小,因此称为“五小”采油技术^[22,23]。

钻井系统对小井眼钻井成本影响最大,运用先进的钻井系统可显著降低小井眼钻井成本;一些研究机构估计,成本节约可高达40%~60%。小尺寸钻头和井下马达是小井眼钻井系统的重要组成部分,Hughes Christensen公司对小尺寸钻头做了大量改进,提高了小井眼钻井效率。运用小井眼钻井技术时,如何选择小尺寸钻杆,使这项技术的成本效益不致于因为小尺寸钻杆钻压效率低、钻杆机械损坏可能性大等缺点而被抵消,也是一项关键技术。与常规井环空相比,小井眼环空几何尺寸小,显著增大了钻井液当量循环密度。在法国研究院、Forasol及DBS公司共同实施的欧洲小井眼计划中,深入研究了小井眼环空水力学特性,专门建立了一套模型,运用该模型可以调整流动参数和流体流变学特性,以此来优化环空水力流动,降低当量循环密度,改善环空内的流速分布。

国外小井眼钻井研究发展的先进技术研究和发展趋势有:带顶部驱动的小井眼钻机、小尺寸大功率井下动力钻具、采用高灵敏度井控专家系统控制和预防井喷、采用连续取心钻机进行小井眼取心作业、采用高强度固定齿的新型钻头等,并朝着更小尺寸

配套的方向发展。目前国外已有可用于76.2 mm井眼的全套钻井和井下配套工具,以及多种连续取心和混合型钻机^[22]。近几年来我国在大庆、吉林等油田钻了一小批小井眼井,统计的钻井费用较常规井降低了15%。

除小眼井技术之外,无油管采油技术、车载抽油技术等也是近年来发展起来的节约钻采成本的技术。

4.6 超前注水技术

超前注水(advanced water injection)是指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^[22,46,47]。

超前注水技术开发有如下特点:①可建立有效的压力驱替系统,单井获得较高的产量;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超前注水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、不稳定注水、同步或超前注水、沿裂缝注水、高含水区提高采液指数、改变渗流场、加密调整、调整注水剖面、调整产液剖面等技术,从而提高了单井产能及最终采收率,提高了整体开发效益。同步或超前注水能使地层避免或少受伤害,超前注水能尽快建立起压力驱替系统。

2001年在安塞油田开展了12个超前注水井组(王窑7个,杏河5个),对应油井47口,动用含油面积3.87 km²。12个井组先后于5~8月份投注。王窑西南7口注水井平均日注量41 m³,注水强度达到2.0 m³/(d·m);杏河西南5口注水井平均日注水量39 m³,注水强度2.74 m³/(d·m),尽快建立起有效的压力驱替系统。通过超前注水技术的实施,单井产能得到一定程度的提高,有效地减缓了油田递减,最终采收率得到提高^[22]。

此外,吉林油田分公司松辽盆地木头油田、吐哈油田分公司吐哈盆地牛圈湖油田低渗透油藏开发中也应用了此项开发技术^[47]。

4.7 层内爆炸增产技术

爆炸技术引入石油行业已有100多年的历史,大规模的工业应用也有二三十年的历史,在低渗透油藏的增产方面,已发展的技术很多,如层内爆炸技术、核爆炸技术、高能气体压裂、爆炸松动等,但目前应用前景较广的为层内爆炸增产技术^[48,49]。

层内爆炸增产技术就是利用水力压裂技术将适当的炸药压入岩石裂缝,点燃那里的炸药,从而在主裂缝周围产生大量裂缝,达到提高地层渗透率的目的。炸药释放能量有3种形式:爆轰、爆燃(二者统称为爆炸)和燃烧。深部地层造缝的特征是压力高、能量大、加载空间狭窄,同时,根据力学原理可知静水压力再大也不能压裂岩石,只有偏应力足够大才能压裂岩石。水力压裂技术满足这些特征,爆破工程经验表明,炸药爆炸也能满足这些基本特征。

研究认为地层深部水力压裂形成的缝宽约2~3 mm,裂缝容积约2~3 L/m²,可注入约2~3 kg炸药。爆破工程中爆轰破碎单位体积岩石的耗药量约1 kg/m³,按此估计,“层内爆炸”在爆轰时可破碎约2~3 m³岩石,耗药量显著低于核爆法。由于爆轰压力上升太快且远大于岩石强度,可能使岩石产生密实圈(即应力笼),而爆燃压力即大于岩石强度,压力上升快慢又适度,因此选择爆燃作为“层内爆炸”炸药释放能量的主要形式较为合适。用爆燃形式进行层内爆炸,只会在岩石中造成多条分支裂缝,且分支裂缝向主裂缝两侧延伸的长度大于2 m,如果岩石破碎新增表面耗能大体为常数,则岩层开裂体积至少会大于2 m³。

“层内爆炸”压裂的实验研究表明,井筒内瞬态压力不超过100 MPa时不会损毁井筒;同时,造成的剪切裂缝两侧岩石有不可恢复的错动,压裂缝内因存在岩屑而有自支撑效应。根据这些经验,“层内爆炸”要把井筒内瞬态压力控制在100 MPa量级,并且可以依靠自支撑效应维持油气层的渗透能力。

目前,小规模模拟实验已取得了成功。实验结果表明,层内爆炸通过热传导实现点火并传爆,爆燃的过程缓慢。通过模拟实验,至少找到了一组层内爆炸用特种火药基本配方:在200 mm和1 000 mm尺度上实现了特种火药的挤注、点火和爆燃的基本过程,其峰值压力在100 MPa左右。该特种火药的经济、安全可达到生产要求,从而证实层内爆炸原理基本可行。产出液后处理安全性问题也得到了解决^[48,49]。

4.8 微生物采油技术

微生物采油技术(Microbial enhanced oil recovery)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。这些

方法可以单独使用,也可以与其他方法结合应用^[50~52]。

微生物采油技术特别适合于低渗透油田。目前,美国、俄罗斯、英国、加拿大和挪威等国非常重视微生物采油技术的研究,研究的投入也在不断增加。近20年来,美国能源部(DOE)共支持了47个微生物采油研究项目,其中有8个项目正在进行之中。2009年4月,在尼日利亚召开的“世界石油微生物技术大会”,讨论了微生物采油技术的发展^[53]。

近十多年来,我国微生物采油技术得到了快速发展,目前已在吉林、大港、大庆、新疆、胜利、辽河等油田都进行了现场工业化应用并见到了较好的初步效果^[51,52]。

5 结 语

低渗透油气资源日益成为一种重要的油气资源类型,其在全球分布非常广泛,几乎在所有发现油气的国家或地区都存在低渗透油气资源,我国低渗透油气资源也很丰富,开展低渗透油气勘探开发是我国油气能源工业进一步发展的必由之路。但在低渗透油气资源勘探开发中还存在油气藏识别难、油气层判别难、油层孔喉小、比表面积大、渗透率低、具启动压力梯度、利用天然能量开采压力和产量下降快、油井注水效果缓慢、见水后产液指数下降快、沿裂缝方向水窜和水淹严重等制约因素,因而低渗透油气资源的开发主要依赖于勘探开发技术的进步。

国外在高分辨率地震技术、多分量地震勘探技术、四维地震勘探技术、裂缝识别、压裂新技术、装备和软件、水平井和复杂结构井井下随钻测量和控制技术、小井眼钻采工艺、蛇形钻井工艺、注气等技术方面取得突破;我国则在油藏精细描述、微观孔隙结构研究、富集区优选、超前注水、开发压裂等一些特色领域以及勘探开发技术的集成应用方面形成了自己的优势。国际上已经实现了对渗透率大于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低渗透油气田的有效开发,但渗透率小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低渗透油气资源量仍然很大,需要通过科技进步来不断拓展低渗透油气田有效勘探开发的下限。

低渗透储集层优质储集体预测技术、压裂技术、水平井和多分支井技术、小井眼钻井技术、超前注水技术、层内爆炸增产技术、微生物采油技术等将是国际低渗透油气资源勘探开发技术的主要发展方向。

低渗透油气资源勘探开发涉及多学科联合研究和高精尖技术的综合应用,我国今后需要进一步发

展低渗透含油区带优选技术、低渗透储层裂缝先期预测技术、开发压裂优化注采系统技术、水平井、复杂结构井压裂技术、低渗透油藏注气提高原油采收率技术、小井眼钻井技术等。

致谢:西北大学地质学系孙卫教授、中国地质科学院地质力学研究所周新桂研究员、中国石化石油勘探开发研究院刘全有高级工程师、中国石油勘探开发研究院郝明强博士、孙德强博士、位云生博士等审阅本文并提出修改建议,谨致谢忱!

参考文献(References):

- [1] Masters J A. Deep basin gas trap, western Canada[J]. *AAPG Bulletin*, 1979, 63(2): 152-181.
- [2] Anon. Resource triangle [EB/OL]. <http://www.centreforenergy.com/AboutEnergy/CanadianEnergy/Pricing/CrudeOil.asp?page=2>. 2009-01-12.
- [3] Shanley K W, Cluff R M, Robinson J W. Factors controlling prolific gas production from low-permeability sandstone reservoirs; Implications for resource assessment, prospect development, and risk analysis[J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(8): 1 083-1 121.
- [4] Li Daopin, Luo Diqiang, Liu Yufen, et al. Development Technology for Low-permeability Sandstone Reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997. [李道品, 罗迪强, 刘雨芬, 等. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.]
- [5] Tang Zengxiang. Exploration Description and Classification of Oil & Gas Reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994. [唐曾熊. 油气藏的开发分类及描述[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.]
- [6] Stephen A H. Tight gas sands[J]. *SPE Journal*, 2006, (1): 86-93.
- [7] Spencer C W. Review of characteristics of low-permeability gas reservoirs in Western United States[J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(5): 613-629.
- [8] Dong Xiaoxia, Mei Lianfu, Quan Yongwang. Types of tight sand gas accumulation and its exploration prospect[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(3): 351-355. [董晓霞, 梅廉夫, 全永旺. 致密砂岩气藏的类型和勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3): 351-355.]
- [9] Liu Jiyu, Ma Zhixin, Sun Shuyan. Present research situation and prospects of tight gas sands[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(3): 316-319. [刘吉余, 马志欣, 孙淑艳. 致密含气砂岩研究现状及发展展望[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(3): 316-319.]
- [10] Petro-Kazakhstan Corporation. North American Oil & Gas Conference Data[C]. Toronto: Petro-Kazakhstan Corporation, 2004.
- [11] Law B E. Geologic characterization of low-permeability gas reservoirs in selected wells, Greater Green River Basin, Wyoming, Colorado, and Utah[C]//AAPG Studies in Geology, 1986, 24: 253-269.
- [12] Zhao Jingzhou, Wu Shaobo, Wu Fuli. The classification and evaluation criterion of low permeability reservoir: An example from Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(3): 28-31. [赵靖舟, 吴少波, 武富礼. 论低渗透储层的分类与评价标准——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(3): 28-31.]
- [13] Tian Xinyi, Sun Zhidao. People's Republic of China Natural Gas Industry Standards: Gas Reservoir Classification (SY/T6168—1995) [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996. [田信义, 孙志道. 中华人民共和国天然气行业标准: 气藏分类 (SY/T6168—1995) [S]. 北京: 石油工业出版社, 1996.]
- [14] Zhao Chenglin, Hu Aimei, Chen Biyu, et al. People's Republic of China Natural Gas Industry Standards: Oil-Gas Reservoir Evaluation (SY/T6285—1997) [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998. [赵澄林, 胡爱梅, 陈碧钰, 等. 中华人民共和国石油天然气行业标准: 油气储层评价方法 (SY/T6285—1997) [S]. 北京: 石油工业出版社, 1998.]
- [15] Dong Yunlong. Resources in low-permeability oil and gas will be the mainstream of the development of future [EB/OL]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2009/03/26/001230359.shtml>. 2009-03-31. [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.]
- [16] Newby J B, Torrey P D, Fettke C R, et al. Bradford oil field, McKean county, Pennsylvania, and Cattaraugus county, New York [C]//AAPG. Structure of Typical American Oil Fields, Volume II, 1929.
- [17] USGS. The US Geological Survey Energy Resources Plan 5-Year Plan [R]. 2005.
- [18] DOE. Basic Research Needs for Geosciences: Facilitating 21st Century Energy Systems [R]. 2007.
- [19] Posamentier H W, Weimer P. Siliciclastic sequence stratigraphy and petroleum geology—Where to from here? [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77(5): 731-742.
- [20] Anon. Technology drives today's petroleum industry [J]. *Oil & Gas Journal*, 2006, 106(3): 4-6.
- [21] Shell. Shell Technology Report: The Power of Innovation [R]. 2007.
- [22] Wei Yiming, Fang Zhaoliang, Li Jingming, et al. Chinese Upstream Oil and Natural Gas Industry and Technology Policy Research Report [M]. Beijing: Science Press, 2006. [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.]
- [23] Zheng Junwei, Zhang Zhiqiang. Enhanced oil recovery: An effective way to saving oil resources from the source—Advance in high water-cut oil field, low-permeability oil field and heavy oil recovery technology at home and abroad [J]. *Science Newsletter*, 2007, (2): 34-36. [郑军卫, 张志强. 提高原油采收率: 从源头节约石油资源的有效途径——国内外高含水油田、低渗透油田以及稠油开采技术发展趋势 [J]. 科学新闻, 2007, (2): 34-36.]
- [24] Baoji Petroleum Machinery Co., Ltd. Introduce of products [EB/OL]. <http://top100.mei.gov.cn/2008baiqiang/bqqy/2bj/1>.

- asp. 2008-10-28. [宝鸡石油机械有限责任公司. 企业产品 [EB/OL]. <http://top100.mei.gov.cn/2008baiqiang/bqqy/2bj/1.asp>. 2008-10-28.]
- [25] Dai Qiang, Duan Yonggang, Chen Wei, *et al.* Present state of low permeability reservoir percolation study [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2007, 14(1): 11-14. [戴强, 段永刚, 陈伟, 等. 低渗透油气藏渗流研究现状[J]. 特种油气藏, 2007, 14(1): 11-14.]
- [26] Hao Mingqiang, Hu Yongle, Liu Xiangui. An overview on characteristics of low-permeability fractured reservoirs [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2007, 14(3): 12-15. [郝明强, 胡永乐, 刘先贵. 裂缝性低渗透油藏特征综述[J]. 特种油气藏, 2007, 14(3): 12-15.]
- [27] He Yongming, Fan Zhonghai, Sun Shangru. Advance in low permeability reservoir percolation study [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2008, 22(3): 5-7. [何勇明, 樊中海, 孙尚如. 低渗透储层渗流机理研究现状与展望[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(3): 5-7.]
- [28] Wang Changcheng, Shi Zejin, Chang Jinghui. Method and application of compacted elastic rock reservoir prediction [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2008, 28(2): 184-187. [王长城, 施泽进, 常景慧. 致密碎屑岩储层预测方法及其应用[J]. 桂林工学院学报, 2008, 28(2): 184-187.]
- [29] Jiang Jinbao, Lin Yingsong, Ruan Xinfang, *et al.* Development of low permeability reservoir improvement [J]. *Drilling & Production Technology*, 2005, 28(5): 50-53. [蒋金宝, 林英松, 阮新芳, 等. 低渗透油藏改造技术的研究及发展[J]. 钻采工艺, 2005, 28(5): 50-53.]
- [30] Li Li, Han Dejin, Zhou Xisheng. Development technique of outlying low permeability pools of Daqing oilfield [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2004, 23(5): 85-87. [李莉, 韩德金, 周锡生. 大庆外围低渗透油田开发技术研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(5): 85-87.]
- [31] Wang Daofu, Fu Jinhua, Lei Qihong, *et al.* Exploration technology and prospect of low permeability oil-gas field in Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(3): 126-130. [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.]
- [32] Shen Hao. Across from the development of innovation in the reform: 30th anniversary of reform and opening up in Yanchang Oilfield [J]. *Modern Enterprise*, 2008, (11): 8-10. [沈浩. 发展于改革 跨越来自创新——延长石油改革开放 30 周年回顾与发展[J]. 现代企业, 2008, (11): 8-10.]
- [33] Price N J. Fault and Joint Development in Brittle and Semi-brittle Rock [M]. London: Pergamon Press, 1966.
- [34] Narr W, Lerch I A. Method for estimating fracture density in core [J]. *AAPG Bulletin*, 1984, 68(5): 637-648.
- [35] Wang Ren, Ding Zhongyi, Yin Youquan. The Basis of Solid Mechanics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979. [王仁, 丁中一, 殷有泉. 固体力学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1979.]
- [36] Zeng Jinguang, Luo Yuanhua, Chen Taiyuan. A method for the study of reservoir fracturing based on structural principal curvatures [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1982, 2(2): 202-206. [曾锦光, 罗元华, 陈太源. 应用构造面主曲率研究油气藏裂缝问题 [J]. 力学学报, 1982, 2(2): 202-206.]
- [37] Zhou Xingui, Zhang Linyan, Fan Kun. Methods for quantitative prediction of tectonic fractures in compact reservoirs in petroliferous basins and a case study [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(3): 328-333. [周新桂, 张林炎, 范昆. 含油气盆地低渗透储层构造裂缝定量预测方法和实例 [J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3): 328-333.]
- [38] Hao Mingqiang, Hu Yongle, Liu Xiangui. Research progress on microcosmic configuration and porous flow of fractured low permeability reservoirs [J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2007, 3(1): 8-13. [郝明强, 胡永乐, 刘先贵. 裂缝性低渗透油藏微观结构与渗流理论研究进展 [J]. 新疆石油天然气, 2007, 3(1): 8-13.]
- [39] Sun Wei. Research on formation mechanism of a microscopic residual oil [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2000, 9(1): 117-121.
- [40] Yang Zhengming, Jiang Hanqiao, Li Shutie, *et al.* Characteristic parameters of microscopic pore structures of low permeability gas reservoirs—By using Sulige and Dina low permeability gas reservoirs for example [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 29(6): 108-110. [杨正明, 姜汉桥, 李树铁, 等. 低渗透气藏微观孔隙结构特征参数研究——以苏里格和迪那低渗透气藏为例 [J]. 石油天然气学报, 2007, 29(6): 108-110.]
- [41] Bettam Y, Tiab D, Zerzar A. Interpretation of Multi-Hydraulically Fractured Horizontal Wells in Naturally Fractured Reservoirs [R]. SPE 95535, Kuala Lumpur, Malaysia, 2005.
- [42] EPRI. Enhanced Oil Recovery Scooping Study [R]. TR113836, 1999.
- [43] Yu Yongbo. Improvement method for the fracturing technique of the low permeable oilfields in the West of Daqing Placanticle [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2005, 24(1): 68-69. [于永波. 大庆长垣西部低渗透油田压裂工艺的改进方法 [J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(1): 68-69.]
- [44] Hao Mingqiang, Li Shutie, Yang Zhengming, *et al.* An overview of multi-lateral well technology [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2006, 13(3): 4-7. [郝明强, 李树铁, 杨正明, 等. 分支水平井技术发展综述 [J]. 特种油气藏, 2006, 13(3): 4-7.]
- [45] Wang Guangying. The multi-branch well drilling technical overview and latest progress [J]. *Offshore Oil*, 2006, 26(3): 100-104. [王光颖. 多分支钻井技术综述与最新进展 [J]. 海洋石油, 2006, 26(3): 100-104.]
- [46] Wang Jianhua. Low permeable oilfield to run before to note the research of water [J]. *Fault-block Oil & Gas Field*, 2005, 12(3): 53-54. [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.]
- [47] Che Qijun, Lei Jun'an, Ran Yuxia, *et al.* Effects of advanced waterflooding in extra-permeability oilfield development [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2003, 22(1): 20-22. [车起君, 雷均安, 冉玉霞, 等. 超前注水提高特低渗透油田开发效果 [J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(1): 20-22.]
- [48] Ding Yansheng, Zhang Shengzong, Xie Xie, *et al.* On the stimula-

- tion with “exploding in fractures” in low Permeability reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(2): 90-96. [丁雁生, 张盛宗, 谢燮, 等. 低渗透油气田“层内爆炸”增产技术研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 90-96.]
- [49] Chen Hong. A new technology for low Permeability reservoirs exploration with “exploding in fractures” [J]. *Chinese and Foreign Scientific and Technical Information*, 2003, (18): 284-287. [陈弘. 用“层内爆炸”方法开采低渗透油藏的新技术调研简介[J]. 中外科技情报, 2003, (18): 284-287.]
- [50] 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.
- [51] Ren Houyi, Wu Xiufang. Advances in microbial enhanced oil recovery [J]. *SINOPEC*, 2008, (10): 36-38. [任厚毅, 吴秀芳. 微生物采油技术发展综述 [J]. 中国石化, 2008, (10): 36-38.]
- [52] Dou Qilong, Chen Jianfa, Wang Jie, *et al.* Advances in researches and outlook for microbial enhanced oil recovery [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(5): 559-563. [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.]
- [53] International Conference, Workshop, and Exhibition on Biotechnologies for Improved Production of Oil and Gas in the Gulf of Guinea [EB/OL]. <http://www.goingtomeet.com/conventions/view/20090401>. 2009-04-10.

Advances in Exploration and Exploitation Technologies of Low-permeability Oil and Gas

ZHANG Zhiqiang¹, ZHENG Junwei^{1,2}

(1. *The Scientific Information Center for Resources and Environment / The Lanzhou Branch of the National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)*

Abstract: The classification, abundance, distribution, exploration and exploitation technologies of low-permeability oil and gas resources at home and abroad were systematically investigated. It has become an international hot research field for the technologies of low-permeability reservoir identification and adaptation, and the drilling technologies. The current and future focus of the low-permeability oil and gas resources will be concerned as follows: low permeability reservoir quality prediction, fracturing, horizontal well, multi-branch wells, slim hole, advanced injection, explosion layer production, microbial enhanced oil recovery, etc. It is necessary for China to further develop the ultra-deep drilling technique, high-resolution seismic exploration and interpretation techniques on complex surface conditions (*i. e.* desert mountain), complex lithologic logging layer technique, low-permeability oil-bearing zone optimization technique, micro-pore structure technique for low-permeability reservoir, pre-fissure prediction technique for low-permeability reservoirs, development and fracturing optimized injection-production system technique, horizontal wells, fracturing technique for complex structure well, gas injection enhanced oil recovery technique for low-permeability reservoirs, and slim hole technique.

Key words: Low-permeability oil and gas resources; Ultra-low permeability reservoir; Tight sand reservoir; Exploration and exploitation technologies; Reservoir reconstruction; Enhanced oil recovery.