

层理缝在致密油成藏富集中的意义、 研究进展及其趋势

罗 群¹, 魏浩元², 刘冬冬¹, 张 晨¹, 朱德宇¹, 张云钊¹, 王 健¹

(1. 中国石油大学(非常)规天然气研究院, 北京 102200; 2. 中国石油玉门油田 勘探开发研究院, 甘肃 酒泉 735019)

摘要: 目前裂缝对油气成藏与富集的研究均局限于构造裂缝, 且主要针对常规油气(包括低渗透油气)领域。致密油藏中裂缝对石油成藏富集的影响和作用研究也主要局限于构造裂缝。调研与实际考察表明, 层理缝在致密油储层中普遍发育, 且对致密油的成藏富集有明显的贡献, 是最为重要的裂缝类型。层理缝的启闭与石油充注的时空匹配耦合关系是致密油成藏富集的关键。然而裂缝对致密油成藏富集的影响和控制作用研究十分薄弱, 尤其是层理缝与致密油成藏富集的关系、层理缝对致密油成藏富集的贡献, 几乎没有相关成果发表。使得层理缝的启闭机制及石油充注富集效应成为致密油成藏富集研究中的重大科学问题。因此, 加强“致密油储层层理缝启闭主控地质因素与启闭机制、致密油储层层理缝启闭与石油充注耦合关系、致密油储层层理缝石油充注下限的确定”的研究, 将成为致密油成藏富集、落实有利甜点理论研究与技术研发的主要趋势。

关键词: 成藏富集; 研究进展; 层理缝; 致密油

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

Research significance, advances and trends on the role of bedding fracture in tight oil accumulation

Luo Qun¹, Wei Haoyuan², Liu Dongdong¹, Zhang Chen¹, Zu Deyu¹, Zhang Yunzhao¹, Wang Jian¹

(1. Unconventional Natural Gas Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Exploration and Development Institute of Yumen Oil Field, PetroChina, Jiuquan, Gansu 735019, China)

Abstract: At present, the research on fractures in petroleum accumulation are limited to tectonic fractures, and mainly deal with conventional petroleum accumulation (including low permeability petroleum accumulation). For tight reservoirs, the studies are also limited to tectonic fractures. Previous investigations revealed that bedding fracture was the most important type because of its common growth and obvious contribution to tight oil accumulation. The time-space matching relationship between bedding fracture opening or closing and petroleum charge is the key of tight oil accumulation. However, research on the effect and role of fractures in tight oil accumulations were very limited, especially on the relationship between bedding fractures and tight oil accumulations as well as the contribution of bedding fractures to tight oil accumulations. This makes bedding fracture opening and closing mechanism and petroleum charge effect an important science question. So, the main geological reasons and the opening and closing mechanism of bedding fractures, the coupling relationship between bedding fracture opening and closing and petroleum charge, and the lower limit of bedding fractures for petroleum charge in tight reservoirs are research trends on tight oil accumulations in the future.

Key words: accumulation; research advance; bedding fracture; tight oil

1 层理缝与致密油关系及其研究意义

1.1 致密油及其特征

致密油是致密储层油的简称^[1], 是一种非常重要的、也是最现实的非常规油气资源。全球致密油资源丰富, 资源量达 $4\ 495 \times 10^8$ t, 已经成为未来

油气资源的重要接替领域^[2-6]。我国致密油勘探已经在鄂尔多斯、准噶尔、四川、松辽、渤海湾、柴达木等盆地取得突破, 初步评价致密油资源量超过 100×10^8 t^[1,7]。

致密油储层为超低孔超低渗储层, 致密油是一种低丰度油气资源, 勘探开发实践与研究表明, 要

获得致密油的商业产量,致密油储层必须发育天然裂缝,裂缝富集与高产是致密油的一个重要特征^[2-3,5-7]。没有天然裂缝的发育,很难形成致密油的甜点富集,致密油的压裂开发措施也难以奏效^[7-9]。

1.2 层理缝是致密油富集的主要空间

致密储层中可发育构造缝、成岩缝、层理缝、收缩缝、异常高压缝以及微裂缝等多种天然裂缝类型^[8-15],目前普遍认为构造缝是致密油富集的最重要的因素^[8-24]。其实除了构造缝外,层理缝也是致密油富集的主要裂缝类型和储集、渗透空间^[8,25-27]。层理缝是指地层受到各种地质作用而沿着沉积层理裂开的裂缝^[10,26],层理缝不仅能大大改善储层的渗透性(层理缝发育的储层渗透率常常是层理缝不发育储层的 3~18 倍甚至更高^[7,9,12]),而且自身更是良好的储集空间。

我国四川、鄂尔多斯、准噶尔等盆地的致密油产层均发育层理缝,如四川大邑构造须家河组油气藏的层理缝占裂缝总数的 45% 左右,是各类裂缝中最为发育的一类裂缝^[10];川东北元坝地区须家河组四段致密砂岩层理缝占总裂缝的 70%^[14];川西新场上沙溪庙组致密砂岩构造缝稀少,层理缝发育^[8];准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层的层理缝数量是构造缝的 2 倍以上^[21];鄂尔多斯盆地榆林—神木地区山西组二段中下部层理缝发育而构造缝不发育^[22],这些层理缝富集了比构造缝更丰富的致密油资源^[10,12,14,21-22]。美国鹰滩(Eagle Ford)致密油区位于德克萨斯州南部 Gulf Coast 盆地,鹰滩组产油气能力极高,至 2012 年,年产量为 29.3×10^6 t,岩心显示鹰滩致密储层发育大量顺层理微裂缝,偶见垂向和压力释放型构造裂缝^[26]。

在致密油发育的细粒、薄互层沉积背景下,层理缝密度远远大于构造缝密度,使得其对石油富集的贡献往往高于构造缝。图 1 是准噶尔盆地吉木萨尔凹陷吉 174 井 3 305.82 m 处裂缝发育及其含油性岩心照片,层理缝段(左段)与构造缝段(右段)

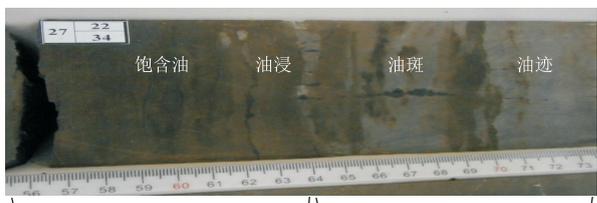


图 1 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷吉 174 井 3 305.82 m 处岩心照片

Fig.1 Core photos of Lucaogou Formation, well J174, 3 305.82 m, Jimusar Sag, Junggar Basin

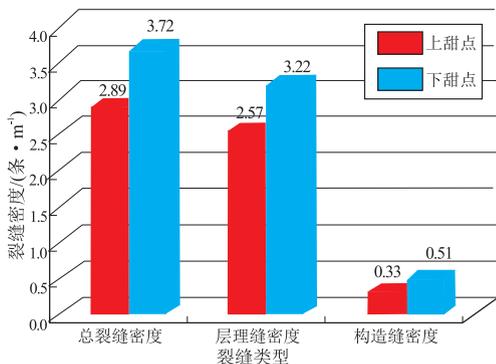


图 2 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系上、下甜点裂缝密度对比

Fig.2 Fracture density of upper and lower sweet spots of Permian Lucaogou Formation, Jimusar Sag, Junggar Basin

相比,无论是裂缝密度、规模还是含油性,层理缝段要明显高于构造缝段,整个岩心上的石油主要是层理缝贡献的。图 2 是准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系致密油上、下甜点裂缝密度对比图,无论是上甜点还是下甜点,层理缝远远比构造缝发育。

1.3 研究致密油储层层理缝的意义

目前对致密油储层层理缝及其富油规律的研究还十分薄弱,加强对致密油层理缝成缝与启闭机制、石油充注富集的定量、动态研究,对于致密油勘探开发具有重要的理论与现实意义。

目前,针对常规储层、低渗透储层裂缝研究成果很多^[11-24],但针对致密油储层裂缝研究的成果较少,且多以描述性定性研究为主^[8-10,12-14,22,28-29],而专门针对致密油储层层理缝及其成藏富集研究的报道就更少,尤其是层理缝启闭机制与石油充注富集的关系研究尚处于起步阶段^[25,27]。这是因为以往裂缝的研究主要集中在常规储层(包括低渗透、特低渗透储层)的构造缝上,对致密油储层(超低渗透储层)裂缝的研究没有引起重视,更没有关注到致密油储层中层理缝对石油富集规律的重要性。

综上所述,目前国内外对致密油储层层理缝充注富油机制的研究几乎尚未展开,而致密油储层层理缝往往聚集了比构造缝更丰富的致密油资源。因此,急需加强对致密油储层层理缝成因特征、启闭机制及其富油规律的研究,其成果将对致密油成藏理论形成与完善、致密油勘探开发实践具有重要的理论和现实意义。

2 层理缝在致密油成藏富集中的作用

2.1 致密油储层层理缝的成因与启闭性

最早系统关注层理缝的国内学者是吴志均等^[27],他们在 2003 年就专门对川西新场上沙溪庙

组致密砂岩气藏的层理缝成因和启闭性进行探讨,指出在砂岩致密化和构造隆升之前,天然气已相对富集成藏,在储集层和烃源层内形成了有效的封闭体系;而当砂岩致密化和构造隆升达到一定程度后,当封闭体内压力梯度升高的值大于致密砂岩薄弱面(层理面)破裂成缝的值时,自然流体压裂作用很可能沿致密砂岩中的层理面发生,形成“层理裂缝系统”。这些层理缝改善了致密砂岩储集层的渗透性,层理缝发育区是气井高产能区。随后王发长等^[20]、张君峰等^[22]、贺振建与刘宝军(2011)、王志萍等^[8]、陈迎宾等^[10]、夏晓敏等^[12]等学者从不同的角度对层理缝的形成环境、成因特征、控制因素、启闭性等方面进行了研究,提出了沉积微相决定层理缝的基础—沉积层理的认识,认为层理缝形成、发育、展布受沉积、构造与应力、成岩、成藏(烃类充注)、下伏地层隐伏断裂、岩性非均质性等多种因素影响,总结出构造应力导致层理面剥离破裂成缝、酸或碱性流体沿层理溶蚀溶解成缝、异常高压沿层理释放造缝等多种层理缝的成因,揭示了超压流体支撑、充填物溶解、扩张(拉张)应力作用等多种层理缝开启主控因素以及压实压溶、沉淀充填、胶结(交代与重结晶)等多种层理缝闭合的主要因素。Chang 等^[24]研究表明,层理形成层理缝需要一定的临界条件,即层理裂开的临界强度(临界开启条件),只有当作用于层理界面的应力接近或达到这个临界强度时,层理界面才会剥离和开启,形成层理缝。

在层理缝的研究方法方面,一些学者提出了点(岩心薄片)、线(测井)、面(相似地表露头区)、体(地震资料)和时间(生产动态资料)组成的裂缝(包括层理缝)多维综合研究思路和野外观察、岩心描述、镜下识别及井间直接插值法、曲率法、能量法与岩石破裂法(二元法)、地震法、分形分维法、构造应力场数值模拟法和多参数判据法的裂缝(包括层理缝)预测方法系列^[19,30-31],在一定程度上解决了不同尺度下层理缝的识别与预测问题。总的来看,国内学者对致密油储层层理缝启闭特征的研究,也开始由启闭成因到主控因素向启闭机理方向进展,但仍处于定性描述阶段。

国外学者对层理缝形成与启闭控制因素、启闭机制的研究成果,多来自于对层理缝中矿脉的研究。2005年,Séjourné 等^[32]在研究 Appalachian 地区石炭系前陆冲断带时,发现层理缝中充填的矿脉是早期纹层弱面开裂后由充填物充填形成,多与层面平行,这些层理缝是沉积、构造、成岩共同作用的

结果,并可能因构造运动而重新开启。利用充填物中的 K/Ar 同位素值可以恢复层理缝中开启的时期。2007年,Swanson^[33]通过对 southern Wisconsin 地区三叠系硅质砂岩层理缝研究,提出了岩性、岩相特征决定层理面的粒度和胶结类型,它们与构造应力共同控制了层理缝的形成、启闭与分布。Cobbold 等^[34]通过对层理缝中方解石脉、石膏脉、石英脉研究,认为方解石层理缝脉主要赋存于富有机质的海相页岩环境的层理缝中,石膏主要赋存于蒸发性的湖相沉积的层理缝中,石英脉则主要赋存于湖相的浊积沉积的层理缝中,层理缝的形成受控于沉积微相。另外,岩浆活动也可能导致沉积层中层理缝的开启,Matthaei 等^[28]在研究澳大利亚北部 Cosmopolitan Howley 金矿成因时,发现 Cosmopolitan Howley 地层的层理缝开启是地应力和岩浆活动共同作用的结果,岩浆流体与变质流体混合进入开启的层理缝,为层理缝内含金矿脉的形成提供了物质来源。

至于层理缝启闭机制的研究,早在 2001 年,就有学者进行过模拟实验,Doolin 等^[29]通过模拟实验和数值模拟证实了层理缝的渗透性明显制约于层理缝的启闭性及其连通性,与层理缝的开度和间距有密切的关系;Laubach 等^[35]也研究了苏格兰西北部 Moine 冲断带寒武系 Eriboll 组砂岩层包括层理缝在内的各种裂缝形成、启闭史及其地质因素控制特征,他们利用充填物包裹体分析,结合构造演化史、古应力恢复以及裂缝之间的切割关系,恢复了包括层理缝在内的各种裂缝、微裂缝经历了多期次的张开、闭合演化过程,初步分析了裂缝的启闭机制与应力状态、充填物的性质、充填过程有关。构造挤压对层理破裂成缝以及层理缝的开启起着重要的诱导作用,当受到构造应力挤压时,作为薄弱面的层理面可能破裂形成层理缝,或原来已经闭合的层理缝会重新开启,这在挤压构造应力方向(最大压缩方向)最为明显^[36]。

综观层理缝形成与启闭性国内外研究现状与进展,虽然在层理缝形成与启闭成因、控制与影响地质因素、研究思路与方法取得一定的进展与成果,明确了致密油层理缝的形成与启闭(即开启与封闭)受控于沉积作用、构造应力、成岩方式、高压流体、有机酸或烃类流体甚至岩浆活动等因素的作用,但在致密油储层层理缝启闭机制(启闭动力特征、启闭临界条件、启闭方式等)研究尚很薄弱,仍处于定性描述向机理研究方向转化阶段,亟待加强致密油储层层理缝启闭机制的本质研究。

2.2 致密油层理缝的启闭与石油充注成藏关系及充注下限

目前国内对致密储层裂缝与油气关系的研究多集中在构造裂缝对开发效果的控制作用方面^[10-13,21,23,30],有关致密油储层层理缝与石油充注成藏与富集的研究成果国内尚未见到报道。只见到有关非致密储层(常规储层和低渗透储层)构造缝与石油成藏和富集的研究,如曾联波^[18]通过研究准噶尔盆地火烧山油田上二叠统平地泉组低渗透储层裂缝(构造缝)与石油流体关系,指出裂缝沟通了基质孔隙,提高了低渗透储层的渗透性,增加了流体中可动油的可流动性和含量,使可动油饱和度提高;王瑞飞等^[12]的研究表明,鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组石油运移与该地区的区域(构造)裂缝发育具有一致性,与裂缝的距离越近,石油运移路径越短,NE、NW 2 组共轭剪切裂缝是石油运移的主要通道,油藏具有储层先期致密、油藏多点充注、补丁式拼接、无重力分异的成藏特点;成藏模式为高压源岩—裂缝通道—致密储层—活塞式注入—无分异石油成藏;提出了高渗透砂体与裂缝、微裂缝在空间的配置是油气富集成藏的有利场所,也是勘探开发的直接目标,但没有涉及层理缝的情况。

由此可知,层理缝对致密油成藏与富集的贡献尚未引起国内学者的重视,因此也缺少相关研究成果。

国外学者有关致密油储层层理缝与油气运聚关系的文章也没有检索到,但在非致密油储层(常规储层、低渗透储层)层理缝与油气运聚关系研究方面做了一些工作;Laubach 等^[35]通过利用充填物包裹体分析,结合构造演化史、古应力恢复、裂缝之间的切割关系,研究了苏格兰西北地区 Moine 冲断带寒武系 Eriboll 组砂岩裂缝开合与油气流动聚集关系,认识到包括层理缝在内的各种裂缝经历了多个期次开启、闭合过程,与应力状态、裂缝充填物的性质、充填过程有关,裂缝的开启、闭合与石油的生排和运移有较好的对应关系,导致了油气的局部富集。但论文没有对石油的充注机理及其与裂缝的启闭耦合关系进行深入的探讨。Cobbold 等^[34]利用研究世界范围内层理缝脉的成因机会,分析了层理缝中流体超压与油气生成、运移、聚集的关系,认为含烃方解石层理缝脉是很好的石油聚集系统的指示性标志,裂缝中的矿物晶体的生长、渗流压力流体、异常高压三者共同作用是层理缝形成与开启的基本机制,而开启的裂缝成为超压驱动油气运移聚集的空间。但文章没有说明所研究的储层是否是致

密油储层,也没有进一步展开对裂缝启闭与油气运聚之间的匹配关系研究。尽管国外在层理缝与油气运移聚集关系研究领域做了些工作,并趋向于动态分析,但基本上仍限于定性、现象的简单描述。

开启的裂缝有利于石油的充注成藏,但并非开启的裂缝都能注入石油。因为石油分子(团)是有大小的,裂缝开度太小,石油将不能注入其中聚集成藏,更谈不上富集,因此,研究裂缝能够允许石油充注的开度下限对致密油储层层理缝成藏有重要意义。有关致密油充注下限的研究,只出现在国内学者的报道中,均为针对致密油储层孔喉的下限^[37-39],多大开度的层理缝可以让石油充注进去形成油藏,即石油充注进入层理缝成藏的最小开度(层理缝开度下限),则未见到相关的报道。

3 科学问题与研究趋势

3.1 科学问题

通过调研与总结可知,由于层理缝富集致密油的重要性没有得到重视,导致目前致密油储层层理缝及其控油富油规律的研究尚没有开展,但随着层理缝对致密油富集与开发的重要性不断被人们所认识,层理缝的启闭及其充注富油效应将成为致密油理论与勘探开发的重大科学问题,而逐渐受到大家的重视并实施研究。围绕这个重大科学问题,拟解决的具体关键科学问题是:①致密油储层层理缝启闭主控因素与启闭机制;②致密油储层层理缝启闭与石油充注时空耦合关系;③致密油储层层理缝石油充注下限。

3.2 研究趋势及内容

针对层理缝对致密油成藏富集重要意义、研究现状和存在的问题,上述 3 个方面内容将成为致密油成藏富集研究趋势。

3.2.1 致密油储层层理缝启闭主控地质因素与启闭机制

(1)致密油储层层理缝启闭主控地质因素。层理缝要聚集石油成藏并富集,需要开启,因此,研究层理缝的开启与闭合成为层理缝研究的第一步。首先是要弄清控制层理缝启闭的地质因素,包括沉积因素(如沉积微相、岩性(矿物成分与含量)等);岩石结构(层理结构、储层粒度、分选性等);构造因素(如古今构造应力性质、大小、方向,构造部位,构造运动与断裂活动(性质、规模、次数、强度等)等);成岩因素(压实与压溶,溶蚀与沉淀,重结晶与交代,欠压实与超压等);成藏因素(烃类充注强度,充注时间,充注时期等)等。

(2)致密油储层层理缝启闭机制。弄清了控制层理缝启闭的地质因素后,接下来需要进行的工作是从机理上揭示层理缝的开启与闭合。层理缝的开启与闭合机制包括启闭动力(如构造应力,异常高压,烃类充注力、矿物结晶力,溶蚀作用力等);启闭方式(如应力作用下的剥离开裂、流体的溶解或沉淀,充填物的充填,压实与压溶,重结晶与交代,超压导致应力转换、烃类充注等);启闭过程(启闭临界条件—裂缝开启临界动力及其影响因素、启闭转化条件与方式、启闭的连续性与间断性等);启闭模式(静态模式、动态模式)等。

3.2.2 致密油储层层理缝启闭与石油充注耦合关系

(1)时间耦合关系。层理缝要赋存和富集石油,必须在石油大量生成、排出或运移时期保持开启的状态,这样石油才能在烃源岩与裂缝之间的压力差作用下充注进入裂缝空间。层理缝开启和闭合与烃源岩大量生、排油及充注在时间上的对应关系,就是层理缝启闭与石油充注的时间耦合关系,两者对应得越好(即耦合得越好),层理缝的含油性就越好。本项目拟通过典型致密油藏(非油藏)层理缝充填物 K/Ar 同位素测年,结合构造(应力)演化史的恢复,来研究层理缝启闭史(依据应力方向与裂缝产状关系分析裂缝开启与闭合,裂缝产状可依据成像测井等方法来确定),通过层理缝充填物包裹体分析来研究烃源岩生、排油及充注史,最后进行两者(层理缝开启与石油充注)的时间对应关系来进行耦合分析,并建立两者的时间耦合关系与层理缝含油性关系模式(即开启时期与充注时期耦合程度与层理缝含油程度对应关系模型)。

(2)空间耦合关系。观察与研究表明,富油的层理缝除了其启闭与烃源岩中石油充注在时间上有好的耦合关系外,在空间上也要有好的配置(耦合)关系,即含油性好的层理缝要位于优质烃源岩内或临近优质烃源岩(并与优质烃源岩要有良好的沟通关系)。这里暂将层理缝与优质烃源岩的空间配置关系叫源缝组合关系,常见的源缝空间关系有源内(层理缝位于烃源岩内部)和近源(层理缝位于烃源岩附近)2种,而近源空间关系可进一步分为源上、源下、源边3种情况。与源缝空间关系相对应,源内空间关系对应的源缝组合叫源内组合,近源空间关系对应的源缝组合叫近源组合(可进一步分为源上、源下、源边3种次级组合)。源内组合层理缝的成藏表现为石油直接充注(源缝空间耦合关系最有利);近源组合层理缝的成藏表现为石油通过其他途径(如断裂、构造裂缝、渗透

性岩性等)间接充注。源缝空间耦合关系的有利程度与源、缝的空间位置关系、距离、源缝间的输导体系(如断裂、构造裂缝、渗透性岩性等)的畅通程度及源缝的压差有关。

通过剖析不同富油程度典型致密油储层层理缝与其源缝组合类型的关系,研究不同类型源缝组合的层理缝的富油性特征,建立不同类型源缝组合的层理缝含油性与其源缝组合类型的对应关系模式,并用这种模式来预测未知含油性的致密油储层层理缝的含油性。

(3)层理缝启闭与石油充注耦合关系综合模式。要形成富含石油的层理缝,不仅需要层理缝的开启时期要与其烃源岩大量排烃充注时期有很好的耦合关系,同时也需要层理缝要与其烃源岩在空间上有利的配置(即要有好的源缝空间组合类型)。综合前面层理缝与其烃源岩时间耦合与空间耦合的成果,建立层理缝启闭与石油充注耦合关系综合模式。

3.2.3 致密油储层层理缝石油充注下限

层理缝的成藏并不是无条件的,必须要有一定的开度,当层理缝的开度小到一定程度时,石油就不能充注其中而成藏。因为石油分子(团)是有大小的物质(直径几个纳米以上),开启的层理缝不一定都能充注进石油,理论上,当开启的层理缝的宽度小于石油分子(团)的直径时,石油分子就不能自由进入层理缝,即使在有充注压力的作用下,石油(分子或分子团)也不可能无限地进入开启的任何尺度的层理缝。在最大充注压力下多宽的(开启)层理缝才能注入石油,即石油充注层理缝的下限(相当于石油充注的层理缝最小耦合开度),是进行致密油含油性评价与开发方案制定的重要参数。

4 结论

(1)发育的裂缝是致密油成藏富集和高产的基本特征,层理缝是最重要的致密油储层裂缝类型,也是最利于富集石油的裂缝类型。研究层理缝对石油充注成藏和富集的作用和规律,对致密油的勘探开发有重要理论与现实意义。

(2)目前,对致密油储层层理缝与石油充注成藏和富集关系与规律的研究几乎还是空白,这是因为对裂缝与油气关系的研究均集中在常规储层中构造裂缝对油气成藏与富集的控制规律上,致密油储层中的层理缝没有受到关注。

(3)要想弄清层理缝聚集石油并使之富集的

原因和机制,首先要明确致密油成藏富集的科学问题——“层理缝的启闭及其充注富油效应”,并从以下 3 个方面开展深入地研究,即:致密油层理缝启闭主控地质因素与启闭机制,致密油储层层理缝启闭与石油充注耦合关系,致密油储层层理缝石油充注下限。

参考文献:

- [1] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望:以中国致密油和致密气为例[J].石油学报,2012,33(2):173-187.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations; Taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2):173-187.
- [2] 林森虎,邹才能,袁选俊,等.美国致密油开发现状及启示[J].岩性油气藏,2011,23(4):25-30.
Lin Senhu, Zou Caineng, Yuan Xuanjun, et al. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4):25-30.
- [3] 景东升,丁锋,袁际华.美国致密油勘探开发现状、经验及启示[J].国土资源情报,2012(1):18-19.
Jing Dongsheng, Ding Feng, Yuan Jihua. The present situation, experience and enlightenment of the exploration and development of tight oil in the United States[J]. Land and Resources Information, 2012(1):18-19.
- [4] 张威,刘新,张玉玮.世界致密油及其勘探开发现状[J].石油科技论坛,2013,32(1):41-44.
Zhang Wei, Liu Xin, Zhang Yuwei. World tight oil and its exploration and development status[J]. Oil Forum, 2013, 32(1):41-44.
- [5] 邹才能,朱如凯,白斌,等.致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战[J].矿物岩石地球化学通报,2015,34(1):3-17.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. Significance, geologic characteristics, resource potential and future challenges of tight oil and shale oil[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1):3-17.
- [6] 贾承造,邹才能,李建忠,等.中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J].石油学报,2012,33(3):343-350.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3):343-350.
- [7] 宋晓威,齐亚东,于荣泽,等.裂缝发育的特低渗透砂岩储层特征[J].科技导报,2015,33(7):20-24.
Song Xiaowei, Qi Yadong, Yu Rongze, et al. Characterization of fractured ultra-low permeability sandstone reservoirs[J]. Science & Technology View, 2015, 33(7):20-24.
- [8] 王志萍,秦启荣,王保全,等.川西 DY 构造须家河组致密砂岩储层裂缝分布控制因素[J].断块油气田,2011,18(1):22-25.
Wang Zhiping, Qin Qirong, Wang Baoquan, et al. Controlling factors of fracture distribution in tight sandstone reservoir of Xujiahe Formation in DY structure, western Sichuan[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(1):22-25.
- [9] 王秀娟,杨学保,迟博,等.大庆外围低渗透储层裂缝与地应力研究[J].大庆石油地质与开发,2004,23(5):88-90.
Wang Xiujuan, Yang Xuebao, Chi Bo, et al. Fractures and ground stress of peripheral low permeability reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(5):88-90.
- [10] 陈迎宾,郑冰,袁东山,等.大邑构造须家河组气藏裂缝发育特征及主控因素[J].石油实验地质,2013,35(1):29-35.
Chen Yingbin, Zheng Bing, Yuan Dongshan, et al. Characteristics and main controlling factors of fractures in gas reservoir of Xujiahe Formation, Dayi structure[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(1):29-35.
- [11] 曾联波,高春宇,漆家福,等.鄂尔多斯盆地陇东地区特低渗透砂岩储层裂缝分布规律及其渗流作用[J].中国科学(D辑 地球科学),2008,38(S1):41-47.
Zeng Lianbo, Gao Chunyu, Qi Jiafu, et al. The distribution rule and seepage effect of the fractures in the ultra-low permeability sandstone reservoir in east Gansu Province, Ordos Basin[J]. Science in China(Series D Earth Sciences), 2008, 51(S2):44-52.
- [12] 王瑞飞,孙卫.鄂尔多斯盆地姬塬油田上三叠统延长组长超特低渗透砂岩储层微裂缝研究[J].地质论评,2009,55(3):444-448.
Wang Ruifei, Sun Wei. A Study on micro cracks in super-low permeability sandstone reservoir of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Geological Review, 2009, 55(3):444-448.
- [13] 南珺祥,王素荣,姚卫华,等.鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长 6-8 特低渗透储层微裂缝研究[J].岩性油气藏,2007,19(4):40-44.
Nan Junxiang, Wang Surong, Yao Weihua, et al. Micro-fractures in extra-low permeability reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(4):40-44.
- [14] 王景,凌升阶,南中虎.特低渗透砂岩微裂缝分布研究方法探索[J].石油勘探与开发,2003,30(2):51-53.
Wang Jing, Ling Shengjie, Nan Zhonghu. Micro-fractures distribution in extremely lower permeable sandstone reservoirs of Yanchang Formation and its geologic significance, Ordos Basin, Northwest China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(2):51-53.
- [15] 郝明强,刘先贵,胡永乐,等.微裂缝性特低渗透油藏储层特征研究[J].石油学报,2007,28(5):93-98.
Hao Mingqiang, Liu Xiangui, Hu Yongle, et al. Reservoir characteristics of micro-fractured ultra-low permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5):93-98.
- [16] 高平,杨云祥,姜红艳.下寺湾油田柳洛峪区长 8 储集砂岩的微裂缝特征[J].辽宁化工,2012,41(10):1037-1038.
Gao Ping, Yang Yunxiang, Jiang Hongyan. Microcrack characteristics of Chang8 reservoir sandstones in Liuluoyu area of Xiasiwan Oil Field[J]. Liaoning Chemical Industry, 2012, 41(10):1037-1038.
- [17] 曾联波,漆家福,王永秀.低渗透储层构造裂缝的成因类型及其形成地质条件[J].石油学报,2007,28(4):52-56.
Zeng Lianbo, Qi Jiafu, Wang Yongxiu. Origin type of tectonic fractures and geological conditions in low-permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4):52-56.

- [18] 曾联波. 低渗透砂岩油气储层裂缝及其渗流特征[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 11-17.
Zeng Lianbo. Fissure and its seepage characteristics in low-permeable sandstone reservoir[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1): 11-17.
- [19] 王珂, 张荣虎, 戴俊生, 等. 低渗透储层裂缝研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(2): 44-58.
Wang Ke, Zhang Ronghu, Dai Junsheng, et al. Review on low-permeability reservoir fracture[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(2): 44-58.
- [20] 王发长, 穆龙新, 赵厚银. 吐哈盆地巴格油田特低渗砂岩油层裂缝分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 54-57.
Wang Fachang, Mu Longxin, Zhao Houyin. Distribution of the fracture within the low permeability sandstone reservoir of Baka oilfield, Tuha Basin, Northwest China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(2): 54-57.
- [21] 李红南, 毛新军, 胡广文, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层特征及产能预测研究[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(10): 40-44.
Li Hongnan, Mao Xinjun, Hu Guangwen, et al. Characteristics and productivity prediction of tight reservoirs in Lucaogou Formation of Jimusa'er Sag in Junggar Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(10): 40-44.
- [22] 张君峰, 兰朝利. 鄂尔多斯盆地榆林—神木地区上古生界裂缝和断层分布及其对天然气富集区的影响[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 172-177.
Zhang Junfeng, Lan Chaoli. Fractures and faults distribution and its effect on gas enrichment areas in Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(2): 172-177.
- [23] Gale J F W, Reed R M, Holder J. Natural fractures in the Barnett shale and their importance for hydraulic fracture treatments[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 603-622.
- [24] Chang Xu, Shan Yafei, Zhang Zhenhua, et al. Behavior of propagating fracture at bedding interface in layered rocks[J]. Engineering Geology, 2015, 197: 33-41.
- [25] 夏晓敏, 何柳, 吴俊. 川东北元坝地区须家河组四段致密砂岩气藏层理缝成因及成像测井识别[J]. 化工管理, 2014(5): 18.
Xia Xiaomin, He Liu, Wu Jun. Tight sandstone gas reservoir identification and imaging logging causes bedding fissure[J]. Chemical Enterprise Management, 2014(5): 18.
- [26] 赵俊龙, 张君峰, 许浩, 等. 北美典型致密油地质特征对比及分类[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(1): 44-50.
Zhao Junlong, Zhang Junfeng, Xu Hao, et al. Comparison of geological characteristics and types of typical tight oil in North America[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(1): 44-50.
- [27] 吴志均, 唐红君, 安凤山. 川西新场致密砂岩气藏层理缝成因探讨[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 109-111.
Wu Zhijun, Tang Hongjun, An Fengshan. Cause of bedding fractures of tight sand gas-reservoir in Xinchang, West Sichuan region[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(2): 109-111.
- [28] Matthaei S K, Henley R W, Heinrich C A. Gold precipitation by fluid mixing in bedding-parallel fractures near carbonaceous slates at the Cosmopolitan Howley Gold Deposit, northern Australia[J]. Economic Geology, 1995, 90(8): 2123-2142.
- [29] Doolin D M, Mauldon M. Fracture permeability normal to bedding in layered rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(2): 199-210.
- [30] 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.
Hao Mingqiang, Hu Yongle, Liu Xiangui. An overview on characteristics of low-permeability fractured reservoirs[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2007, 14(3): 12-15.
- [31] 盛达, 赵金玲, 李德宁, 等. 特殊测井在北塘坎凹致密储层裂缝识别中的应用[J]. 国外测井技术, 2014(3): 20-22.
Sheng Da, Zhao Jinling, Li Dening, et al. Applications of special well logging in fracture identification of tight reservoir in Beitang Subsag[J]. World Well Logging Technology, 2014(3): 20-22.
- [32] Séjourné S, Malo M, Savard M M, et al. Multiple origin and regional significance of bedding parallel veins in a fold and thrust belt: The example of a carbonate slice along the Appalachian structural front[J]. Tectonophysics, 2005, 407(3/4): 189-209.
- [33] Swanson S K. Lithostratigraphic controls on bedding-plane fractures and the potential for discrete groundwater flow through a siliciclastic sandstone aquifer, southern Wisconsin[J]. Sedimentary Geology, 2007, 197(1/2): 65-78.
- [34] Cobbold P R, Zanella A, Rodrigues N, et al. Bedding-parallel fibrous veins (beef and cone-in-cone): Worldwide occurrence and possible significance in terms of fluid overpressure, hydrocarbon generation and mineralization[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 43: 1-20.
- [35] Laubach S E, Diaz-Tushman K. Laurentian palaeostress trajectories and ephemeral fracture permeability, Cambrian Eriboll Formation sandstones west of the Moine Thrust Zone, NW Scotland[J]. Journal of the Geological Society, 2009, 166(2): 349-362.
- [36] Ismat Z. Evolution of fracture porosity and permeability during folding by cataclastic flow: Implications for syntectonic fluid flow[J]. Rocky Mountain Geology, 2012, 47(2): 133-155.
- [37] 蔡正旗, 郑永坚, 刘云鹤, 等. 确定碳酸盐岩油气层有效孔隙度下限值的新方法[J]. 西南石油学院学报, 1993, 15(1): 10-15.
Cai Zhengqi, Zheng Yongjian, Liu Yunhe, et al. A new method of determining lower limit of effective porosity in carbonate oil or gas reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1993, 15(1): 10-15.
- [38] 崔景伟, 朱如凯, 吴松涛, 等. 致密砂岩层内非均质性及含油下限: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段为例[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 877-882.
Cui Jingwei, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Heterogeneity and lower oily limits for tight sandstones: A case study on Chang-7 oil layers of the Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 877-882.
- [39] 公言杰, 柳少波, 方世虎, 等. 四川盆地侏罗系致密油聚集孔隙半径下限研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2014, 31(1): 103-110.
Gong Yanjie, Liu Shaobo, Fang Shihui, et al. Radius threshold of pore throat for tight oil accumulation[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2014, 31(1): 103-110.