

沁水盆地南部山西组 致密砂岩裂缝发育特征及控制因素

张学敏¹, 尹帅², 史长林¹

1 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司; 2 西安石油大学地球科学与工程学院

摘要 通过对山西沁水盆地南部二叠统山西组野外露头、钻井岩心和薄片不同尺度裂缝的研究,系统分析了致密砂岩储层裂缝发育特征及主控因素。统计结果表明,研究区构造裂缝占90%以上,其中以张性缝为主,其次为剪切缝和挤压缝。裂缝发育程度的主控因素包括构造部位及断裂、岩石脆性、单砂体厚度、地层各向异性及成岩作用。对于构造应力值变化梯度较大的区域及断裂发育部位,以及具有高脆性的致密砂岩,裂缝发育程度较高,裂缝线密度与单砂体厚度之间具有较好的幂指数负相关关系。裂缝发育程度对岩石各向异性的影响要强于地应力,裂缝是山西组煤系地层各向异性的主导因素。化学性质不稳定的矿物(如碳酸盐及长石胶结物)为溶蚀缝的形成及发育提供了有利条件。

关键词 沁水盆地; 山西组; 致密砂岩; 裂缝; 主控因素

中图分类号: TE122.2 **文献标识码**: A

煤系地层中发育多种类型的烃源岩,同时,其自身也可以作为储层并储集大量的天然气,因此成为当前非常规天然气勘探的一个热点和难点^[1]。煤系作为一个整体的含气系统,其中的天然气具有大面积分布但富集程度极为不均的特点,这与煤系地层的海陆过渡相沉积体系有关,它具有复杂的岩性组合,同时储层具有强非均质性及强各向异性的特点^[2]。山西沁水盆地南部上古生界发育海陆过渡相煤系地层,该地区煤层气已经获得商业开发,但致密砂岩气尚处于勘探阶段^[3]。致密砂岩储层物性较差,因而裂缝发育程度是决定储层能否获得商业开发的关键。目前,针对海陆过渡相煤系致密砂岩的储层裂缝发育主控因素的研究相对较少,而明确主控因素对致密砂岩储层甜点预测来说至关重要。因此,本文以山西沁水盆地南部地区二叠统山西组致密砂岩为例,基于该地区丰富的钻井、岩心、录井、测井、地震及测试等方面资料,对海陆过渡相致密砂岩储层裂缝发育特征及主控因素进行了系统研究,所取得的认识对于指导煤系地层致密油气勘探开发具有理论和现实意义。

1 地质背景

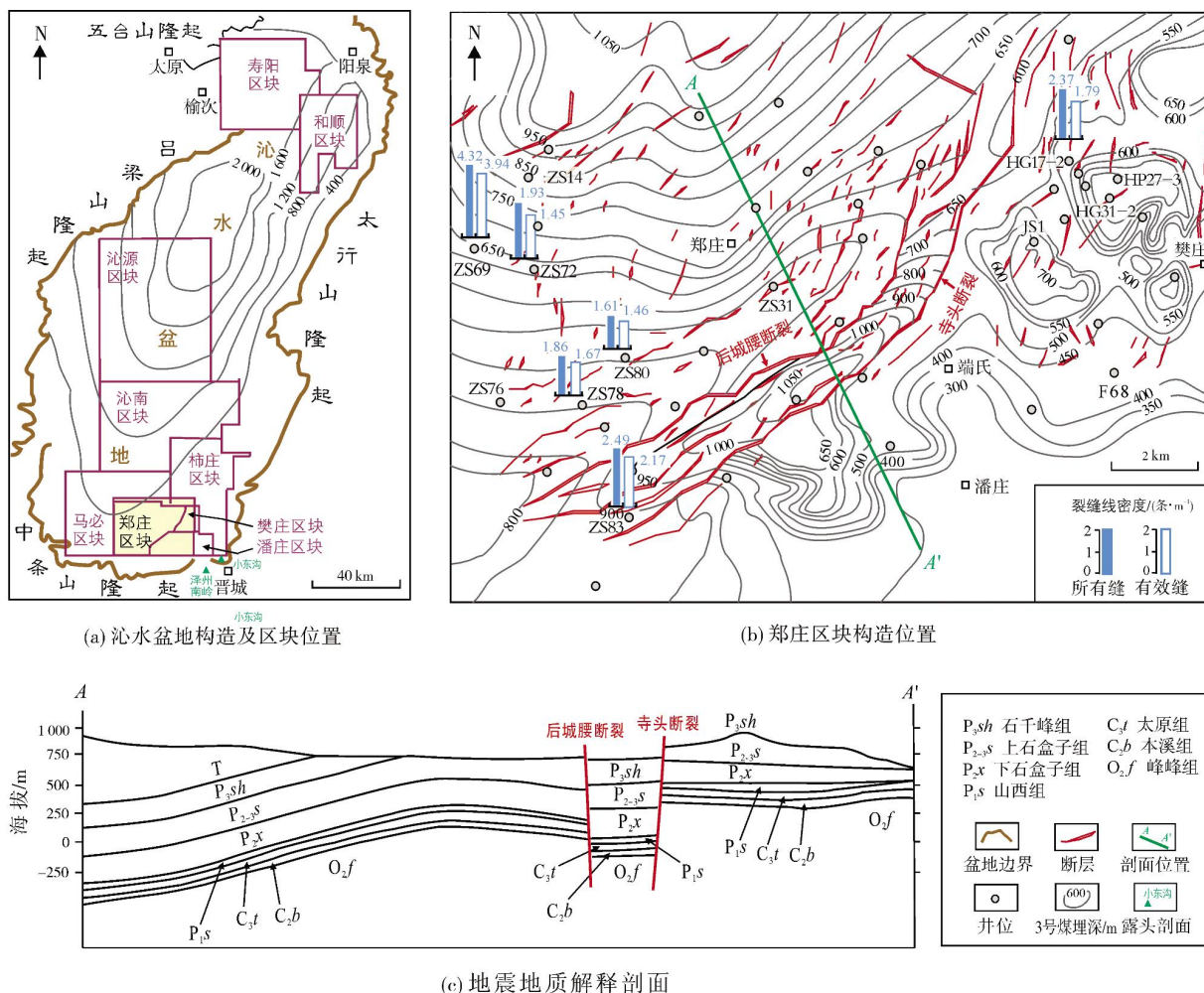
1.1 区域位置及构造

沁水盆地是一个南北走向的大型复式向斜,其四周被隆起环绕(图1a),东部为太行山隆起,西部为吕梁山隆起,南部为中条山隆起,北部为五台山隆起。研究区位于沁水盆地南部的一个煤层气开发区域,包括郑庄区块及樊庄区块(图1a,1b),地势整体表现为东南高、西北低。根据最新的地震解释结果,该地区主要发育高角度近垂直走滑断裂(图1c)。这些断裂的走向主要为NE向及NNE向,少量为SN向及NNW向。断裂多发育于地堑的核部,断裂带内的地层变形严重,通常表现出阶状下掉的特征。研究区断裂的垂向断距与断裂延伸距离之间具有较好的正相关性,这表明延伸距离大的断裂,活动性更强。该地区最大的两条边界断裂为寺头断裂和后城腰断裂(二级断裂)(图1b,1c),均为基底走滑断裂,活动期为燕山期,其他断裂主要为一些规模相对较小的三级及四级断裂(图1b)。

收稿日期: 2017-06-07; 改回日期: 2018-03-15

本文受山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室开放基金“复杂构造区海陆过渡相煤系致密砂岩储层裂缝综合定量表征及分布预测研究”(DMSM2017081)资助

张学敏: 1972年生,工程师,1997年中国石油大学(华东)油气田开发地质专业大学本科毕业,主要从事油气藏精细描述和油气田开发评价研究。通信地址:300452 天津市塘沽区滨海新村合作楼708室; E-mail: cindy168520@163.com

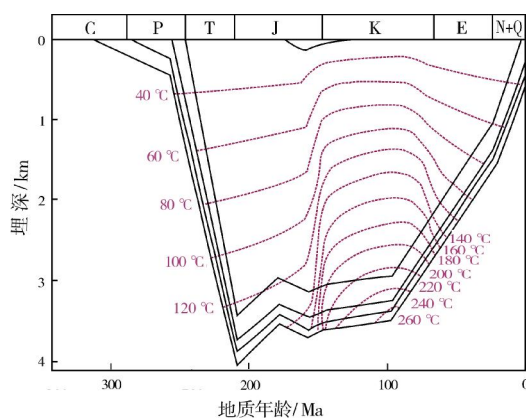


沁水盆地整体处于挤压构造应力环境下,局部构造则受挤压、拉张及走滑等复杂构造应力环境的综合影响^[5]。研究区上古生界经历了复杂的构造演化过程,该地区JS1井(位置见图1b)埋藏史^[4](图2)表明,上古生界在三叠纪末期的埋深达到最大,之后在多个构造演化阶段经历了强烈的剥蚀隆升。多期次构造运动、快速埋藏、强烈后期改造(隆升剥蚀)及复杂成岩作用等因素共同作用于二叠系山西组,导致山西组的裂缝发育特征具有复杂性和特殊性^[4]。

1.2 沉积体系

沁水盆地南部地区的沉积地层包括前寒武系、寒武系、奥陶系峰峰组,石炭系本溪组及太原组,二叠系山西组、下石盒子组、上石盒子组及石千峰组,三叠系及第四系。主要的含煤地层为上石

炭统太原组及下二叠统山西组。山西组是本文所研究的目的层。



研究区山西组属于一套陆表海浅水三角洲沉积体系,主要发育三角洲平原相,而三角洲前缘相和前三角洲相则相对欠发育。主要的沉积微相包括分流河道、分流间湾及沼泽。分流河道的岩性主要为中—粗粒岩屑砂岩及长石石英砂岩。分流间湾为透镜体砂岩与黑色页岩互层的沉积,可见少量植物化石。沼泽微相的岩性主要为灰色—黑色粉砂质页岩、页岩及泥炭,沼泽是成煤的主要沉积环境^[6]。

1.3 储层特征

研究区山西组致密砂岩储层的岩性主要为细—中粒长石石英砂岩及石英长石砂岩,其次为岩屑砂岩及少量砾岩。山西组单砂体厚度较薄,主要分布在1~20m范围。目的层经历了强烈压实及复杂成岩演化过程,致密砂岩的储集空间主要为次生孔隙、粒内溶孔、粒间溶孔及微裂缝,属低孔—低渗储层,其覆压孔隙度分布在1%~14.5%之间,主值分布在1%~5%范围,覆压渗透率分布在 $(0.1\sim 35)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,主值分布在 $(0.1\sim 1.5)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 范围。山西组致密砂岩的物性在研究区二叠系各地层中是最好的,因而勘探潜力大。

2 裂缝发育特征

研究区山西组中不同级序裂缝均十分发育,本文从露头裂缝、岩心裂缝及薄片微裂缝三个尺度来研究。

2.1 露头裂缝

裂缝实际上为一个大面积分布的三维实体,因此,露头裂缝研究相比于岩心裂缝研究而言具有一定优势,体现在可以对裂缝的空间展布情况进行定量描述。常规钻井岩心仅为“一孔之见”,通常无法钻遇大尺度裂缝,也无法对裂缝的组合规律或方向性进行有效判定。本文通过对研究区山西组露头裂缝进行观察描述(图3),认为裂缝类型主要包括区域构造裂缝、褶皱相关裂缝及断层相关裂缝等3类。

区域构造裂缝是在早期构造运动或弱挤压应力的影响下,受水平挤压及走滑剪切等作用力的影响而产生的裂缝类型(图3a)。研究区山西组中的区域性裂缝较为发育,这类裂缝通常具有较强的方向性,同时呈组系产出,多为水平缝及垂直缝(图3b)。

褶皱相关裂缝是与褶皱变形作用相关的裂缝。图3c为一个露头观察到的褶皱,褶皱顶部附近张

性裂缝较为发育,核部及与核部相邻近的翼部附近剪切缝较为发育(图3d)。这些裂缝主要是由于地层受局部的剪切或伸展作用而派生出的一些裂缝。

断层相关裂缝是在强构造运动条件下,伴随着断裂的产生,局部地层受剪切及张扭作用力的影响,当达到岩石的抗剪或抗张强度极限时,岩石就会发生破裂并产生与此相关的裂缝(图3e,3f)。其中,受局部张扭作用力而形成的张性裂缝多分布于断层面附近或断裂带相交叉的部位,该部位又称“破碎带”(图3f)。这种类型的裂缝一般方向性较差,但也有大量张性裂缝具有较好的方向性,它们通常与断面大角度相交或垂直相交,具有开度大、延伸短的特点^[7]。

整体而言,研究区山西组中以发育构造裂缝为主。

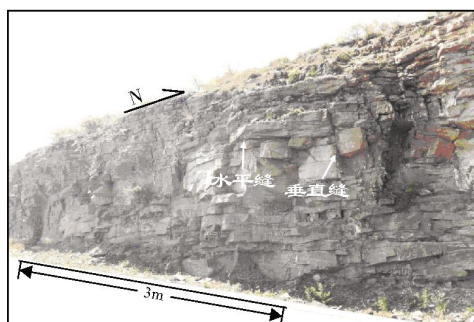
2.2 岩心裂缝

山西组致密砂岩的裂缝类型包含构造裂缝及多种非构造裂缝。构造裂缝主要包括张性裂缝(图4a,4b)、剪切裂缝(图4c)及一定数量的挤压裂缝(图4d)。张性裂缝通常具有较大的开度^[8],该类裂缝的产状包含水平、低角度、高角度及垂直等多种类型;充填方式包含未充填、半充填及全充填3种方式,这些特征表明不同张性裂缝的形成期次存在一定差异。

从图4b所示的全充填张性裂缝可以看出,第1期张性裂缝呈低角度破裂形态,该期裂缝具有较大的开度,并被全充填,表明这一期裂缝的形成时期较早。而第2期张性破裂是在第1期的基础上形成的,将第1期裂缝拉断并发生位移;第2期张性破裂缝的形态为高角度缝,由于该井为垂直井,因此,该期破裂形态相当于一个小型高角度断层。

山西组致密砂岩中还发育相当数量的挤压缝(图4d),该类裂缝形成于挤压构造作用下,同时兼具剪切及张性裂缝的特征,其裂缝开度整体较小;从裂缝形态上看,部分区域裂缝较为平直,具有剪切缝特征;也有部分区域的裂缝较为分散,无固定取向,具有张性缝的特征^[9]。这种类型裂缝的充填程度多为半充填及未充填,为有效缝,是研究区山西组中的一种重要裂缝类型。

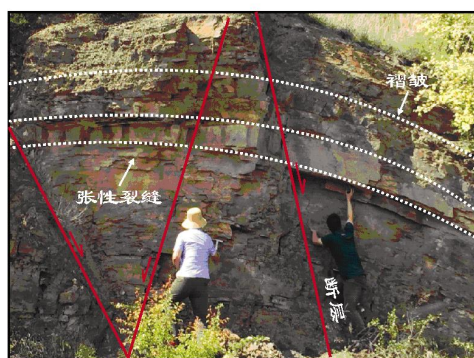
山西组致密砂岩中主要发育张性缝及剪切缝,同时发育少量挤压缝及溶蚀缝。经观察统计,张性缝、剪切缝、挤压缝及溶蚀缝在致密砂岩中所占的比重分别为58.5%、28.5%、7%及6%。整体而言,山西组致密砂岩中的构造裂缝的含量大于90%。



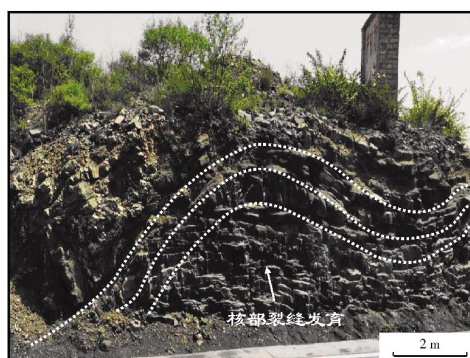
(a) 两组区域构造缝。分别为垂直缝和水平缝，垂直缝切割岩层。泽州南岭剖面



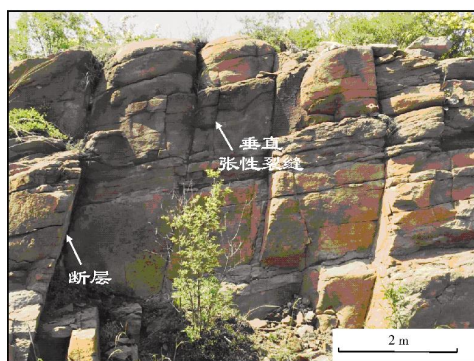
(b) 两组区域性垂直缝。走向分别为 20° 和 115° ，半充填，两组裂缝相交呈交错网格状。小东沟剖面



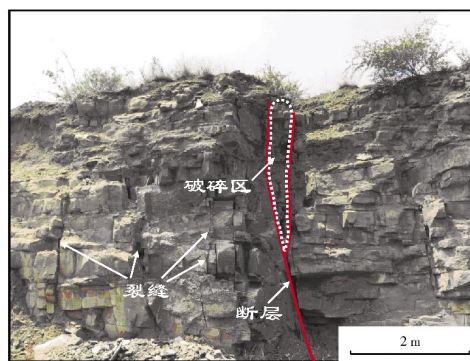
(c) 断层相关褶皱。褶皱内部层间发育张性裂缝，泽州南岭剖面



(d) 褶皱核部裂缝发育。小东沟剖面



(e) 发育一组雁列式高角度断裂，断裂间裂缝发育。泽州南岭剖面



(f) “Y”形垂直断裂附近裂缝发育。小东沟剖面

图 3 沁水盆地山西组露头裂缝照片

2.3 薄片微裂缝

岩心尺度的裂缝发育程度决定了储层能否高产，而微裂缝的发育程度则决定了储层能否稳产^[10]。微裂缝是在岩石破裂初期形成的，随着应力的不断增加，微裂缝相互嵌合，形成稍大一点的小尺度裂缝，随着应力的持续增加，最终形成宏观断裂。即使对于表观完整的岩样，即从岩心层面未见明显裂缝

的致密砂岩岩样，通过显微镜也往往可以观察到微裂缝的存在。随着裂缝研究尺度的变小，裂缝的数量呈指数级趋势增长。因此，钻井过程中未必能探测到大型裂缝，但却很容易探测到微裂缝^[11]。

研究区山西组致密砂岩经历了强压实及强胶结作用，岩石极为致密，微裂缝的分布受到了细颗粒的排列方式、储层物性及地应力等因素的综合影响。显微镜观察结果显示，研究区山西组致密砂岩微裂缝

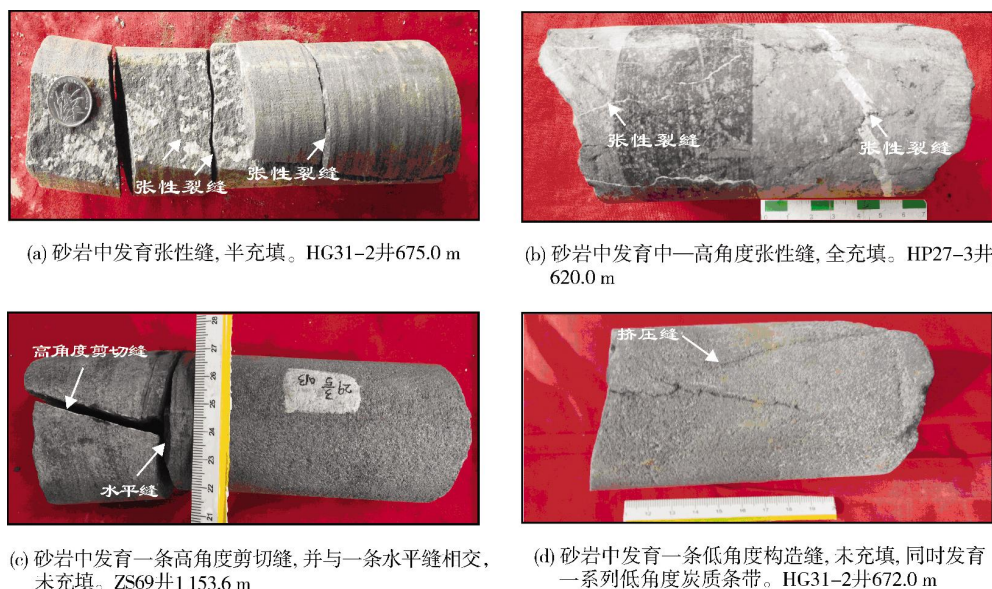


图4 沁水盆地南部山西组致密砂岩岩心裂缝照片

的分布与岩石物性具有较好的相关性, 这是由于物性好的部位, 孔隙团较为发育, 这些部位往往应力比较集中, 从而容易发生破裂(图5)。

山西组致密砂岩中的微裂缝主要包括粒缘微裂缝和穿粒微裂缝, 按成因分类可划分为张性微裂缝

(图5a)及剪切微裂缝(图5b)。微裂缝的分布通常具有一定方向性, 表明其形成及分布受局部地应力的影响。微裂缝作为长期的渗流通道可以使储层保持稳定产, 微裂缝较为发育的致密砂岩储层通常具有更长的生产周期, 且采出程度更高^[12]。

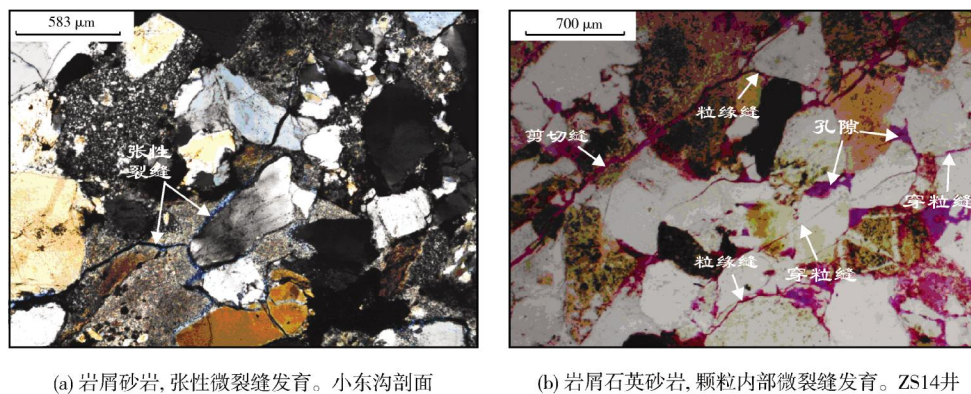


图5 沁水盆地南部山西组致密砂岩薄片微裂缝照片

2.4 裂缝倾角及充填程度

对于山西组致密砂岩的裂缝倾角, 近水平缝和近垂直缝均非常发育, 同时倾角介于 40° ~ 60° 的斜交缝也较为发育; 裂缝充填类型以未充填及半充填为主, 同时发育少量全充填缝。

本文定义水平缝的倾角介于 0° ~ 5° 之间; 低角度缝的倾角介于 5° ~ 45° 之间; 高角度缝的倾角介于 45°

~ 85° 之间; 垂直缝的倾角介于 85° ~ 90° 之间。对于致密砂岩, 无论何种成因类型的裂缝, 未充填缝所占的比例均为最大(图6a)。其中, 张性缝多为未充填及半充填缝, 一般来说, 早期形成的裂缝会在热液流体作用下发生水-岩反应而在缝面形成一些充填物, 因此, 未充填裂缝的形成时期通常较晚^[13-14]。半充填缝和全充填缝在致密砂岩剪切缝中所占的比例最大(图6a), 全充填缝的形成时期通常较早, 为“先期裂缝”。

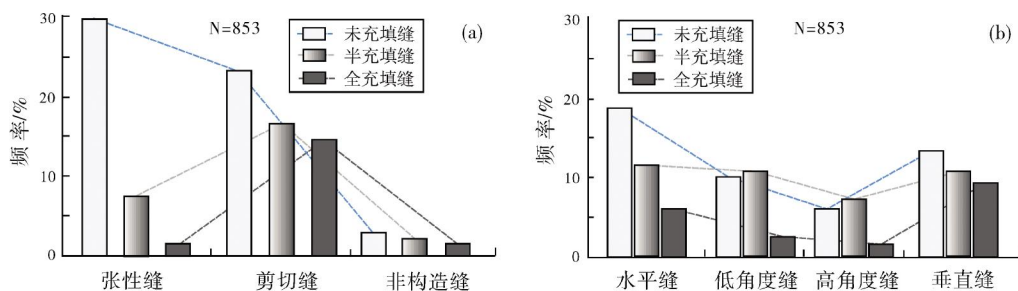


图 6 沁水盆地南部山西组致密砂岩不同类型(a)及产状(b)的裂缝充填程度统计频率直方图

由图6b还可以看出,低角度缝和高角度缝中,半充填缝所占比例最大,其次为未充填缝及全充填缝,全充填缝的形成时期较早。不同的充填程度(充填率)在一定程度上可以反映裂缝的形成期次,推断研究区山西组致密砂岩的裂缝形成期次可能有3期或3期以上。

3 裂缝发育主控因素

研究认为影响致密砂岩储层裂缝发育程度的因素包括构造因素(外因)及非构造因素(内因),构造因素为最主要的因素。

3.1 构造部位及断裂

沁水盆地南部地区经历了多期次构造运动,区内断裂极为发育,构造特征复杂。通过对研究区内部各单井的山西组岩心裂缝进行观察、统计(井的位置见图1b),结果表明,在构造复杂的部位,主要指背斜的顶端及翼部较陡部位、洼陷的底部及斜坡部位,构造应力值变化梯度通常较大,相应地,裂缝发育的几率也较大。如图1b中,ZS69井处于洼陷的斜坡部位,同时,该井东北方向附近有一条规模较大的断裂,统计结果表明,ZS69井山西组中裂缝密度较大,总缝密度达4.32条/m,有效缝密度为3.94条/m。

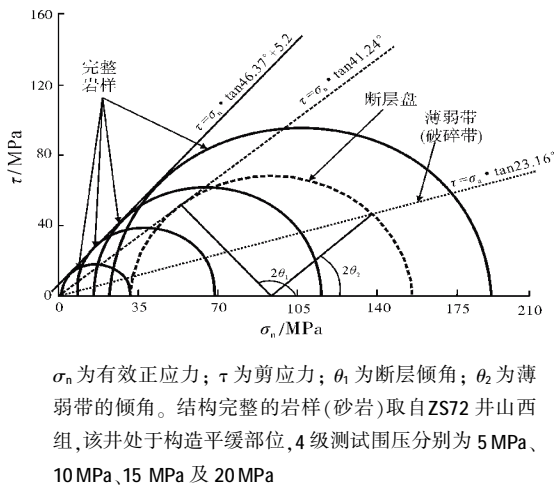
在断裂附近或断裂带的交切部位、两侧及末端等位置,由于应力集中,导致岩体被切割成多个块体,而块体内部应力复杂,使得裂缝通常较为发育。如图1b中,ZS83井位于该地区最大一条二级断裂(寺头断裂)的北部及后城腰断裂的南部,同时周边还发育多条北东向、近平行展布的断裂,统计结果表明,该井山西组中总缝密度达2.49条/m,有效缝密度为2.17条/m,裂缝较为发育。又如HG17-2井位于研究区的东北部,该井也靠近寺头断裂,同时周边还发

育了多条近北北东向展布的断裂(图1b),统计结果显示,该井山西组中总缝密度达2.37条/m,有效缝密度为1.79条/m,裂缝也较为发育。

ZS83井、HG17-2井及ZS69井这三口井周边均有相对大型的断裂分布,统计结果表明这三口井中裂缝较为发育,有效缝密度均大于1.79条/m,距离断裂越近,裂缝越发育;而ZS72井、ZS78井及ZS80井这三口井所处的构造部位较为平缓,周边断裂相对欠发育,裂缝发育程度相对要低一些,有效缝密度均小于1.67条/m(图1b)。此外,有些断层的规模虽然不大,但其附近裂缝的发育程度却很高,这可能与断层的活动性有关,长期活动或活动性强的断层,其周边岩体的裂缝发育程度要更高一些^[5]。

研究区内褶皱的形态在燕山期强挤压应力下就已基本形成,在喜马拉雅期强剥蚀条件下构造形态被进一步改造。研究发现,背斜轴部多处于引张状态,张性裂缝的发育密度最大;而向斜轴部多处于挤压状态,主要发育张性缝和剪切缝两种类型。研究区发育高角度走滑断裂,断层和褶皱形态多发生形变,并在平面上呈“S形”或“反S形”展布。受这些断裂的影响,山西组致密砂岩中裂缝极为发育。

在部分断裂附近,岩心中可观察到分布的一些“破碎带”或“薄弱带”,这些破碎带呈中低角度或近水平成层分布,倾角通常小于30°,带宽小于50 cm。破碎带即为裂缝发育带,受剪张作用的综合影响而形成,岩石破裂具有一定方向性,裂缝密度非常大^[15]。从岩石应力—应变加载曲线图中也可以对这些薄弱带进行定量表征,如图7所示。与结构完整的岩石应力—应变曲线相比,对于破碎带,随着 σ_n 的增加, τ 急剧降低,地层岩石抗剪切破裂的能力非常低,此时岩石 θ_2 角度值较低,与岩心观察结果一致。这些破碎带系受局部复杂构造应力的影响而形成。



σ_n 为有效正应力; τ 为剪应力; θ_1 为断层倾角; θ_2 为薄弱带的倾角。结构完整的岩样(砂岩)取自ZS72井山西组,该井处于构造平缓部位,4级测试围压分别为5 MPa、10 MPa、15 MPa及20 MPa

图7 沁水盆地南部不同构造部位岩石有效正应力与剪应力关系分析图解

3.2 岩石脆性

对于致密砂岩储层,主要脆性矿物组分有石

英、长石和碳酸盐矿物,这些脆性矿物含量越高,岩石脆性就越大,也越容易在构造应力作用下发生破裂,从而形成不同尺度的天然裂缝。而黏土组分含量的增高,却能在一定程度上提高岩石的抗张剪破裂的能力,因此在高黏土组分含量的致密砂岩中,裂缝则相对欠发育^[16]。

本次研究发现,在山西组具有高脆性的致密砂岩层段,裂缝通常较为发育,表现为具有较高的裂缝线密度值,特别是对于具有极高脆性值(>70%)的致密砂岩井段,天然裂缝最为发育。研究中,还对部分观察井的裂缝发育段参数及脆性指数进行了提取(表1),这些单砂体(表中有2个页岩层作为对比)均为裂缝发育段。各层段的脆性指数分布在62.82%~80.73%,平均值为70.96%,脆性值较高。研究区山西组煤系地层的纵向非均质性比较强,岩性变化比较快,单层厚度变化范围也较大。

表1 沁水盆地南部山西组裂缝发育段参数及脆性指数提取结果

井名	井段/ m	岩性	单层厚度/ m	裂缝线密度/ (条·m ⁻¹)	脆性指数/ %
ZS72	1060.00~1062.32	石英砂岩	2.32	2.27	68.15
ZS72	1065.38~1072.70	石英砂岩	7.32	2.86	79.41
ZS72	1079.70~1080.26	岩屑砂岩	0.56	5.00	69.71
ZS72	1087.04~1092.34	石英砂岩	5.30	2.67	74.83
ZS72	1096.92~1097.98	石英砂岩	1.06	4.50	65.69
ZS72	1100.60~1103.70	石英砂岩	3.10	3.67	71.61
ZS72	1063.46~1065.38	页岩	1.92	3.33	67.90
ZS69	1152.40~1154.52	岩屑砂岩	2.12	7.40	63.42
ZS69	1163.12~1163.62	石英砂岩	0.50	6.25	62.82
ZS69	1166.94~1169.26	石英砂岩	2.32	7.00	71.86
ZS69	1172.24~1172.79	页岩	0.55	10.38	64.03
ZS69	1174.64~1176.20	石英砂岩	1.56	3.75	78.01
ZS78	633.93~636.99	石英砂岩	3.06	4.25	80.73
ZS78	691.74~698.94	岩屑砂岩	7.20	2.92	72.42
ZS80	708.10~712.39	石英砂岩	4.29	4.65	76.27
ZS80	741.28~742.04	石英砂岩	0.76	6.67	68.93
ZS83	916.89~923.39	石英砂岩	6.50	1.82	70.61

从裂缝线密度与脆性指数间的关系图(图8)可以看出,随着裂缝线密度的增加,岩石脆性指数值会发生一定程度的降低。

对于不含裂缝(或裂缝不发育)的地层井段,岩

石的脆性值相对较小,岩性主要为高泥质含量砂岩及泥岩,由于高泥质含量增强了岩石的塑性,使得岩石不易发生破裂或发生了裂缝愈合。

根据单轴岩石力学实验测试结果,山西组砂岩

和页岩的平均岩石强度参数值分别为:(1)砂岩抗压强度 103.21 MPa、抗剪强度 12.87 MPa、抗张强度 5.32 MPa;(2)页岩抗压强度 79.26 MPa、抗剪强度 8.21 MPa、抗张强度 4.19 MPa(图9)。山西组岩石强度关系均满足抗压强度>抗剪强度>抗张强度,同时,岩石抗张强度和抗剪强度差别不大,表明地层岩石破裂的次序通常为首先发生张破裂,或者首先发生剪-张破裂。

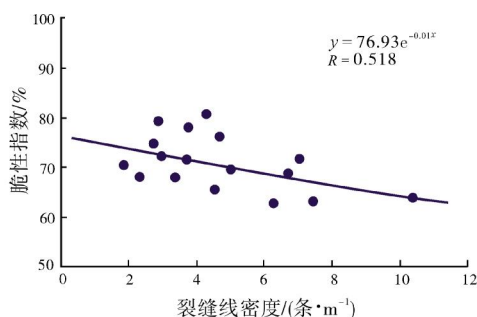


图8 沁水盆地南部山西组裂缝线密度与脆性指数关系图

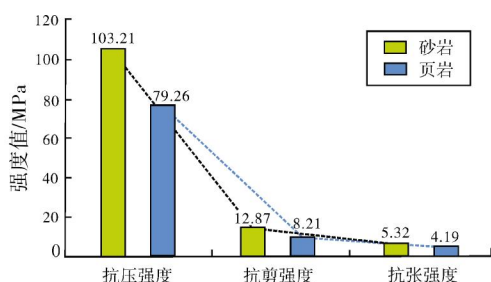


图9 沁水盆地南部山西组不同岩性的平均岩石强度参数值直方图

3.3 单砂体厚度

前人研究表明,致密砂岩储层中裂缝发育程度随着单砂体厚度的增加而减小^[9]。因此,在具有较小单层厚度的砂体中,裂缝更为发育,而厚层砂体内部裂缝发育程度要相对低一些。

具体从山西组单砂体厚度与裂缝线密度间的相关图(图10)来看,反映出这两者之间具有较好的幂指数负相关关系,且相关系数值较高,即随着单砂体厚度的增加,岩石裂缝线密度逐渐发生降低。当单砂体厚度从约0.50 m增加到2 m的过程中,裂缝线密度降低程度较大,约从10条/m降低到了4.2条/m;当单

砂体厚度从约2 m增加到7.5 m过程中,裂缝线密度降低程度较小,约从4.2条/m降低到了2条/m。整体来看,当单砂体厚度小于3 m时,裂缝线密度基本高于4条/m;当单砂体厚度大于6 m时,裂缝线密度出现明显降低。

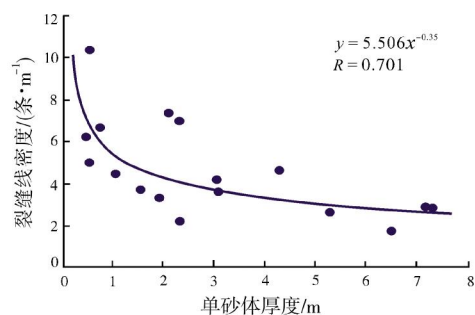


图10 沁水盆地南部山西组裂缝线密度与单砂体厚度关系图

3.4 地层各向异性

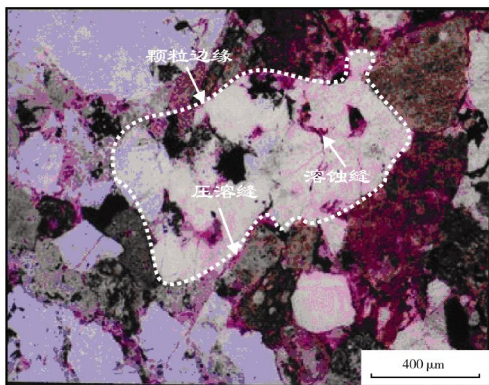
煤系具有强各向异性,各向异性是致密储层的固有属性。利用阵列声波测井资料分析致密储层各向异性是目前较为常用的一种方法^[17]。本次研究利用阵列声波测井资料对研究区部分单井进行了各向异性分析,分析结果显示煤层段具有较强的各向异性,其平均各向异性可以达到15%。致密砂岩段的平均各向异性主要分布在3%~9%,也具有一定的各向异性,但要明显小于煤层段。如果裂缝发育程度高或水平方向地应力差值较大,那么地层的各向异性就会增强。页岩地层的平均各向异性主要分布在3%~10%,这与岩石中发育一些微裂缝及复杂的应力环境有关。研究还发现,有些井段的各向异性值为0,表现为各向同性特征,这些井段往往裂缝不发育,但水平主应力差值较大。以上这些表明,裂缝发育程度对岩石各向异性的影响要强于地应力,裂缝是煤系地层各向异性的主导因素。

3.5 成岩作用

研究区山西组致密砂岩中还发育一定数量的非构造缝,主要为溶蚀缝,这类非构造裂缝是岩石在成岩作用过程中形成的,其形成不受构造运动或构造应力的影响。非构造缝的分布规模较小,空间上无固定取向性,角度多为低角度或近水平,在纵

向深度域内扩展范围有限,通常无穿层现象,主要分布在层内^[18]。

山西组致密砂岩储层的碎屑颗粒中含有一些化学性质不稳定的矿物,如碳酸盐及长石胶结物。这些矿物的存在为酸性介质的运移及溶蚀缝的形成及发育提供了有利条件。山西组溶蚀缝多沿着早期压实压塌的颗粒表面扩展,缝面不平整,为流体运移的有效路径,在显微镜下也可以清楚地观察到(图11)。部分闭合裂缝或全充填缝由于溶蚀作用的影响,缝面受侵蚀而无法完全嵌合,或逐渐转变为半充填缝,裂缝有效性得以改善。强溶蚀作用还可以导致岩石颗粒间承受外界应力的作用减弱,进而导致部分颗粒边缘或内部发生应力集中,诱发产生新的裂缝(破裂)。



砂岩。颗粒之间压实作用强,未见石英次生加大边,可见压实孔缝,同时分布有剪切缝,溶蚀缝分布在颗粒内部及边缘,所溶蚀颗粒未被压塌。ZS31井596.0 m

图 11 沁水盆地南部山西组溶蚀缝显微照片

通过以上研究可以看出,沁水盆地南部强改造区海陆过渡相煤系致密砂岩储层裂缝发育程度受控于多方面的构造及非构造因素。加强各方面因素的研究对于提高致密储层甜点的勘探成功率具有重要的指导意义。

4 结 论

(1)通过分析不同尺度的裂缝(露头裂缝、岩心裂缝及薄片微裂缝)特征,表明沁水盆地南部山西组煤系致密砂岩发育构造缝为主(比例大于 90%),构造裂缝主要包括张性缝、剪切缝及挤压缝,其平均比例分别为 58.5%、28.5%及 7%;非构造裂缝主要为溶蚀缝,其平均比例约为 6%。山西组致密砂岩裂缝

的分布通常具有一定方向性,表明其形成受局部地应力的影响。

(2)分析了海陆过渡相煤系致密砂岩储层裂缝发育程度的主控因素,包括构造部位及断裂、岩石脆性、单砂体厚度、地层各向异性及成岩作用。构造应力值变化梯度较大的区域及断裂发育部位,裂缝发育程度较高;而构造平缓部位,裂缝发育程度相对较低。褶皱形态对裂缝发育程度也具有重要影响。

(3)具有高脆性的致密砂岩,裂缝通常较为发育,特别是具有极高脆性值(>70%)的致密砂岩井段,天然裂缝最为发育。裂缝线密度与单砂体厚度间具有较好的幂指数负相关关系。当单砂体厚度小于 3m 时,裂缝线密度基本高于 4 条/m。当单砂体厚度大于 6m 时,裂缝线密度明显降低。裂缝发育程度对岩石各向异性的影响要强于地应力,裂缝是山西组煤系地层各向异性的主导因素。化学性质不稳定的矿物,如碳酸盐及长石胶结物为溶蚀缝的形成及发育提供了有利条件。

参 考 文 献

- [1] 戴金星,倪云燕,黄士鹏,等. 煤成气研究对中国天然气工业发展的重要意义[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(1): 1-22.
- [2] YIN Shuai, DING Wenlong, ZHOU Wen, et al. Logging assessment of tight clastic rock reservoir fractures via the extraction of effective pore aspect ratios: a case study of lower Permian strata in the southern Qinshui Basin of eastern China [J]. Journal of natural gas science and engineering, 2016, 36(12): 597-616.
- [3] 秦勇,梁建设,申建,等. 沁水盆地南部致密砂岩和页岩的气测显示与气藏类型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1559-1565.
- [4] 尹帅,丁文龙,刘建军,等. 沁水盆地南部地区山西组煤系地层裂缝发育特征及其与含气性关系[J]. 天然气地球科学 2016, 27(10): 1855-1868.
- [5] NENNA F, AYDIN A. The role of pressure solution seam and joint assemblages in the formation of strike-slip and thrust faults in a compressive tectonic setting: the Variscan of south-western Ireland [J]. Journal of structural geology, 2011, 33 (11), 1595-1610.
- [6] SU Xianbo, LIN Xiaoying, ZHAO Mengjun, et al. The upper Paleozoic coalbed methane system in the Qinshui Basin, China [J]. AAPG bulletin, 2005, 89(1): 81-100.
- [7] 梁建设,王存武,柳迎红,等. 沁水盆地致密气成藏条件与勘探潜力研究[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1509-1519.
- [8] 尹帅,丁文龙,孙雅雄,等. 泥页岩单轴抗压破裂特征及 UCS 影响因素[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 75-95.

- [9] NELSON R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs [M]. Houston: Gulf Publishing, 1985: 320-321.
- [10] MILLIKEN K L, CURTIS M E. Imaging pores in sedimentary rocks: foundation of porosity prediction[J]. *Marine and petroleum geology*, 2016, 73(2): 590-608.
- [11] 尹帅, 丁文龙, 单钰铭, 等. 基于声学数据反演定量评价致密砂岩储层微裂隙应力敏感性新方法[J]. *岩土力学*, 2017, 38(2): 409-418.
- [12] PRICE N J. Fault and joint development in brittle and semi-brittle rock[M]. Oxford: Pergamon Press, 1966.
- [13] 牛小兵, 侯贵廷, 张居增, 等. 鄂尔多斯盆地长6—长7段致密砂岩岩心裂缝评价标准及应用[J]. *大地构造与成矿学*, 2014, 38(3): 571-579.
- [14] 尹帅, 丁文龙, 王凤琴, 等. 沁水盆地南部构造负反转、应力机制及油气意义[J]. *成都理工大学学报*, 2017, 44(6): 1-15.
- [15] 邱登峰, 周雁, 袁玉松, 等. 鄂西渝东地区构造裂缝发育特征及力学机制[J]. *海相油气地质*, 2016, 21(4): 51-59.
- [16] 曾联波, 朱如凯, 高志勇, 等. 构造成岩作用及其油气地质意义[J]. *石油科学通报*, 2016, 1(2): 191-197.
- [17] 魏周拓, 范宜仁, 陈雪莲, 等. 横波各向异性分析方法及其在复杂储层中的应用[J]. *石油物探*, 2011, 50(3): 275-280.
- [18] OLSON J E, LAUBACH S E, LANDER R H. Natural fracture characterization in tight gas sandstones: integrating mechanics and diagenesis[J]. *AAPG bulletin*, 2009, 93(11): 1535-1549.

编辑: 黄革萍

Developmental characteristics and controlling factors of fractures in tight sandstone of Shanxi Formation, southern Qinshui Basin

ZHANG Xuemin, YIN Shuai, SHI Changlin

Abstract: Based on the analysis of different scales of fractures in rock outcrops, drilling cores and thin slices of the Lower Permian Shanxi Formation in southern Qinshui Basin, the developmental characteristics and dominant factors of fractures in tight sandstone were systematically studied. The statistical results show that the structural fractures account for more than 90%, which mainly contain tensile fractures, and followed by shear fractures and extrusion fractures. The main controlling factors of fracture development include structural location, faults, rock brittleness, single sand body thickness, anisotropy and diagenesis of rocks. For the regions with large gradient change of structural stress, and fracture development, as well as high brittleness, the degree of fracture development is higher. There is a good exponential negative correlation between the fracture linear density and the single sand body thickness. As for the influence on the degree of fracture development, the rock anisotropy is a stronger factor than geostress. The fracture is a dominant factor of the anisotropy of coal measure strata in Shanxi Formation. The minerals with unstable chemical properties, such as carbonate and feldspar cements, provide the favorable conditions for the formation and development of corroded fracture.

Key words: tight sandstone; fracture; controlling factor; Shanxi Formation; Qinshui Basin

ZHANG Xuemin: Engineer. Major in fine reservoir description and oilfield development and evaluation. Add: Room 708, Hezuo Building, Binhai New Village, Tanggu District, Tianjin 300452, China