

文章编号: 1000-0550(2013)01-0038-12

不同成岩期泥质岩非构造裂缝发育规律、形成机理及其地质意义^①

赵振宇¹ 郭彦如¹ 顾家裕¹ 张庆² 刘虹¹

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石油长庆油田分公司 西安 710018)

摘要 通过野外剖面踏勘、井下岩芯观测、镜下微区扫描等,初步探讨了泥质岩非构造裂缝(泥裂)的发育期次、空间展布形态、裂缝开裂模式及影响因素等。研究表明:(1)泥裂发育可以分为3个期次,依次为同生成岩期、埋藏成岩期(早成岩期和中—晚成岩期)和表生成岩期,各期泥裂发育数量与面孔率表现为 Σ 同生期 $>$ Σ 表生期 $>$ Σ 埋藏期;(2)泥裂开裂方式主要包括3大类7种模式;(3)现代泥裂发育通常经历四个阶段,其中砂—泥旋回地层中砂层的润滑作用有助于泥裂的形成,并为早期裂缝填充提供了物质保障,同时,此类地层也有利于异常高压缝的发育;(4)泥裂单边延展开裂后期通常产生分叉,分叉角度多为 120° ,其次为 90° ,主要与沉积物颗粒均质性和能量释放有关;(5)影响泥裂发育的因素有多个方面,其中粘土含量和盐度决定着泥裂的发育程度,地形坡度控制着泥裂的空间组合形态,沉积旋回影响着泥裂的开裂方式、位置及裂缝内填充模式等;(6)构造裂缝的存在对泥裂的发育与保存具有一定的积极作用,二者互相影响。

关键词 泥裂 空间形态 开裂规律 相似性 地质建模

第一作者简介 赵振宇 男 1980年出生 博士后 沉积学、盆地动力学 E-mail: zhaoyz01@petrochina.com.cn

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

早在1821年,美国就在阿巴拉契亚盆地泥盆系富含有机质页岩中进行了商业性天然气开采,截止至2010年,此类天然气产量已占全球天然气总产量的8%~10%,并呈指数上升趋势。虽然目前不同学者对于泥岩油气藏内涵的表述不尽相同^[1~4],但有两点基本达成共识:(1)烃源岩岩性以暗色泥页岩或泥质碳酸盐岩为主,富含有机质;(2)储运空间主要为裂缝。根据成因类型,许多学者将泥质岩裂缝分成两大类,即构造裂缝和非构造裂缝^[5~7]。前者主要受地应力影响,与构造事件紧密相关,包括张裂缝、剪切缝和压裂缝三种;后者则受多方面因素影响,包括异常高压缝、成岩缝(成岩收缩缝、层间缝、溶蚀缝)、垂向载荷缝以及变质收缩缝等^[8~10]。相对构造裂缝而言,非构造裂缝的研究却处于发展初期,主要体现在不同成因裂缝间的混淆、简单的定性描述以及思想上忽视其在地质流体运聚方面的作用等。近年来,周瑶琪、赵振宇等对现代泥质沉积物水下收缩裂缝进行了较为详尽的研究,提供了较为可靠的泥裂数据和地质模型^[11~14]。在上述工作基础上,本文结合野外露头踏

勘、室内岩芯观测及镜下微区扫描分析等,详细刻画了同生成岩期(现代泥质沉积物)、埋藏成岩期和表生成岩期泥质岩非构造裂缝(泥裂)的空间展布形态、发育规律、形成机理及相似性等,这些对于定量描述裂缝形态、结构、变化规律,预测区域性裂缝规模、



图1 野外工区位置分布示意图

Fig. 1 The map showing the field work area

^①国家重大科技专项(2011ZX05004),中石油科技创新资助(2010D-5006-0104),中国石油勘探开发研究院青年创新基金(2010-B-16-05),中国博士后特别基金共同资助
收稿日期:2011-12-10;收修稿日期:2012-03-01

分布范围 判别区域沉积环境等具有十分重要的理论现实意义。

1 同生期泥质沉积物脱水收缩裂缝 (泥裂)

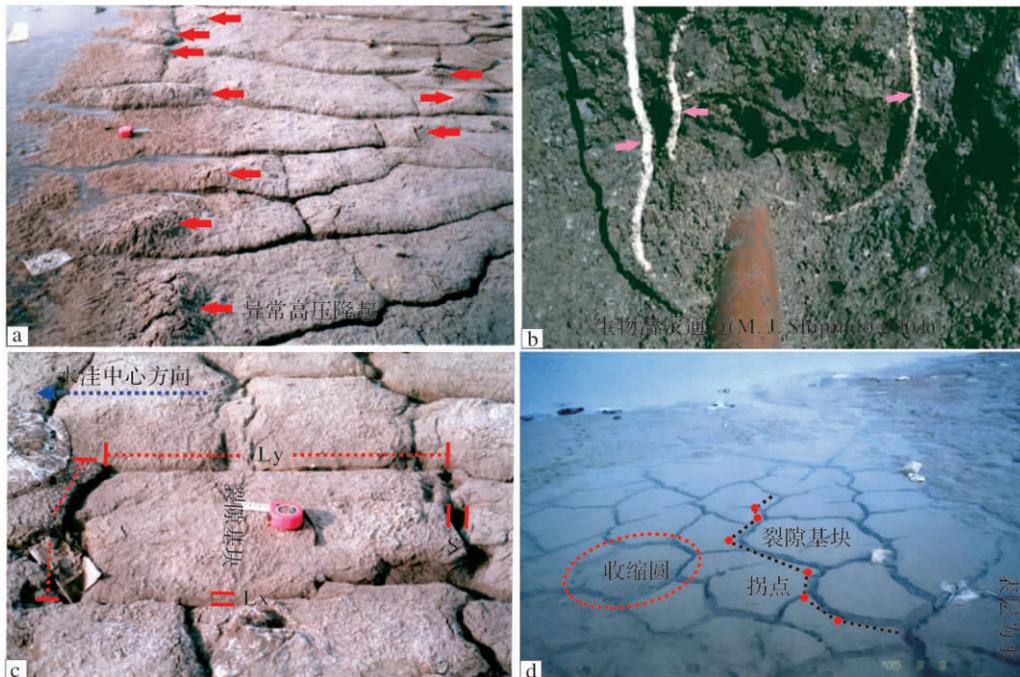
泥裂是泥质层脱水收缩或者含盐度增大而形成的沉积变形构造, 常见于潮间、泻湖等海、湖相泥质沉积物中。多年来, 笔者及其研究团队在野外多个地区进行了大量的观测与统计, 包括山东省东营市黄河三角洲分流间湾亚相 4 处、山东省青岛市滨岸障壁泻湖亚相 7 处, 具体位置分布如图 1。上述工区均为自然发育而成, 避免了人为干扰等因素对于实验结果的影响, 具体实验条件如文献周瑶琪、赵振宇所述^[11, 12], 此不再累述。

1.1 泥裂发育过程及特征

现代泥裂发育过程大致经历了四个阶段^[11-13]: (1) 泥水混合物进入低洼地带的初始混浊阶段; (2) 沉积压实稳定阶段; (3) 水位线下降, 盐度增大, 裂缝形成阶段; (4) 沉积裂缝充填阶段。其中泥裂发育阶段沉积物粒间水主要以两种方式排出, 且渗流渠道各不相同: (一) 异常高压爆发式, 主要发育于具有多期

旋回(砂—泥旋回地层) 充注的相对平坦区域, 随着沉积物的逐步压实, 表层泥质隔水层阻碍了下伏粒间水的有效渗出, 致使透水速率不断减小, 破坏了其与蒸发速率之间的平衡, 因此在隔水层以下便形成了异常高压(如图 2a)。裂缝产生瞬间, 隔水层内部及其下伏粒间水在异常高压作用下爆发式涌出。(二) 隙壁渗流式, 该模式渗流通道的形成主要源于两种机制, 分别为异常高压作用和生物扰动作用, 其中前者是主导, 适用于多数地区, 后者主要适用于水体较浅的潜穴生物繁育带。目前, 国际上有关生物潜穴通道有利于泥质沉积物内部流体运移的报道屡见不鲜, 一些学者还用亚甲蓝试剂和玻璃纤维树脂浇铸了 *Lumbricus terrestris* 的潜穴通道, 进而模拟出了生物潜穴的三维模型^[15], 如图 2b。这些通道的发育, 对于基块泄流具有积极作用, 同时也可以影响裂缝进一步开裂的位置和走向。随着裂缝基块次级裂缝的发育, 这些渗流通道也随之被破坏、遗弃。

在实验工区内, 主要发育两种裂缝组合形态, 分别为矩形裂缝(如图 2c) 和网状裂缝(如图 2d)。前者多发育于实验工区斜坡地带, 形状规则呈矩形, 包括两条相互平行的纵向裂缝(垂直岸边)、横向裂缝



(Ly: 纵裂缝长; Lx: 纵裂缝宽; Sx: 横裂缝长; Sy: 横裂缝宽; 收缩圆: 脱水收缩应力圆; 拐点: 裂缝生长过程中的转折点; 基块: 多条裂缝围成的泥质体)

图 2 现代泥裂野外发育特征

a. 异常高压野外发育特征; b. 生物潜穴野外空间结构; c. 野外暴露矩形裂隙结构; d. 野外水下网状裂隙结构

Fig. 2 Growth process and main features of modern mud cracks in fields

(平行岸边)以及二者共同围成的裂缝基块。后者多发育于相对平缓区域,表面形态类似网状,拐点多为泥裂转折或分叉而成。

1.2 泥裂开裂方式与地质建模分析

近四十年来,国内外许多学者在泥质沉积物开裂规律与建模方面做了大量的研究工作,包括量化裂缝参数^[16-19]、建立泥裂开裂模型^[18,20,21]以及探讨影响建模的诸多因素等^[22,23]。然而上述工作都未能建立一套较为完整、可靠的开裂模型,并且大部分数据来源于水槽实验,与实际相差甚远。至二十世纪,周瑶琪、赵振宇等^[11,12]在天然泻湖亚相、三角洲前缘分流间湾亚相完成了多处现代泥裂开裂规律与地质建模分析,并积累了大量的实验数据。本文结合前人研究成果,建立了一套较为完善的裂缝开裂模型体系,共分为3大类7种模式,具体如图3所示。

1.2.1 单边延展开裂式

(一) 直线生长模式: 泥裂沿直线生长通常需要两个条件: 一是泥质沉积物化学成分、粒度相对均匀; 二是地形具有一定的坡度。如图3, 实验工区斜坡地带纵向裂缝平面生长模型, 随着水位的逐渐下降, 裂缝前端由岸边向水中心一直延伸, 走向垂直于等水量线。换句话说, 裂隙的开裂方向与退水方向一致, 二者路径重合^[11-14]。

(二) 折线生长模式: 裂缝以单边形式开裂延伸时, 如果前方粘土成分、颗粒大小不均匀, 或者泥质体内部应力变化时, 就会导致裂缝生长方向发生转变, 偏离预定的“轨道”。如图3, 展示了泥裂野外折线生长特征及模式, 由照片可以看出, 裂缝沿折线生长, 区域内构成网状裂隙组合形态, 与直线生长模式相差较大, 其中两拐点间直线距离 ΔL 、两拐点间垂直距离 S_d 、延伸角度 $\delta\theta$ 等均能反映裂缝发育特征及其泥质体沉积环境等^[11-14]。

(三) 分叉生长模式: 分叉裂缝的产生, 与裂缝本身的物理生长过程有关^[11,24], 如图3。从统计数据得知, 分叉角度分布概率最大的是 120° , 多发育于沉积物粒度相对均匀地区, 主要形成于裂缝生长的初始阶段; 其次是 90° , 发育区沉积物粒度均质性相对较差, 主要形成于裂缝生长的晚期阶段, 且容易被后期裂缝所切割, 因此平面上多呈“Y”字型或“T”字型。大量研究表明, 两种分叉角度格局的形成与沉积物颗粒排列方式(颗粒不均匀, 分叉角度多为 90°)及泥质体能量释放(颗粒均匀条件下, 等角度三叉开裂满足能量最小化原则)有关^[19,25]。

1.2.2 多边交汇开裂式

(一) 交叉生长模式: 由图3可以看出, A、B两条起始裂缝顺着延伸方向裂缝宽度逐渐变窄, 中间交叉后继续生长的侧向裂缝C只是其中一条起始裂缝的延伸, 而另一条起始裂缝则在交叉点被截断。同时, 裂缝A多沿直线生长, 与裂缝B相距一定距离 L 时, 裂缝B开始发生弯曲, 其弯曲方向指向被二者切割的左、右两侧较大基块一侧。此种模式可以发育于平面, 也可以发育于剖面, 特别是泥页岩夹中一薄层砂岩地层, 分布较为广泛。

(二) 汇合生长模式: 包括双边汇合开裂式和多边汇合开裂式两种, 其中前者主要为两条裂缝相向生长, 并最终交于中部形成核形区域的过程。图3展示了已成核部(早期)和暂未成核部(后期)的情况, 核部完整程度代表着泥裂发育的先后期次, 该模式主要发育于实验工区内的相对平坦区域^[12]。在自然界中, 多边汇合模式主要由三边或四边主干裂缝通过多次变化汇合而成, 根据裂缝边数不同、开裂方式不同而进行排列组合就有50余种。因此, 在没有完全掌握基础理论模型的前提下进行计算机模拟, 将会与实际相差甚远。

(三) 中心分散生长模式: 泥质沉积物脱水收缩过程中, 由于内部应力分布不均, 导致裂缝以某一应力集中点为中心, 呈发散状生长。产生应力集中的原因有很多, 包括地形起伏、内部异常高压、沉积物内部颗粒物等。其中前两者容易形成顶部中心开裂式, 如图2a, 即裂缝首先从沉积物表面发育。如果在沉积物底部存有大型颗粒物或者地形建隆, 裂缝就会首先从沉积物底部开始发育, 并逐渐向上、侧上方延伸, 并最终到达顶面。如图3, 整个泥裂剖面结构清晰, 包括羽轴、羽线、裂缝面三部分, 与大地构造应力下产生的羽状构造极其相似。因此, 通过上述研究可以使很容易判断出野外岩石剖面中羽状构造的力学机制、开裂方向及动力来源方位等。

1.2.3 混合生长模式

泥裂在自然界中的形态千奇百怪, 并能通过上述开裂模式任意组合, 因此, 在实验工区内, 无论是矩形裂缝还是网状裂缝, 都经历了若干组合过程而成。混合生长模式是泥裂发育后期的必然结果, 过程错综复杂(如图3, 由7条主干裂缝(①~⑦)经过分叉、折线、交叉、汇合等方式共同形成了照片中的裂缝组合形态), 因此, 不少学者避开了泥裂的发育过程, 直接进行泥裂空间展布形态的描绘, 并通过裂缝交叉点、

种类	模式	特征描述	主控因素与发育区域	野外照片/模型	国内外参考
单边 延伸 开裂式	直线生长模式 LGM	裂缝从基块一侧向另一侧沿直线延伸的过程	沉积物成分、结构不均具有一定的坡度 主要发育于斜坡地区		Donovan, 1975 Velde, 1999 周瑶琪, 2006
	折线生长模式 CGM	裂缝从基块一侧向另一侧沿曲线延伸的过程	沉积物成分、结构均匀 坡度较小 ($< 5^\circ$) 主要发育于平洼地区		吴泰然, 1998 Horgan, 2000 赵振宇, 2007
	分叉生长模式 BGM	裂缝生长过程中, 受应力变化或其它物质干扰时, 裂缝前端产生分叉并继续生长的过程	沉积物成分、结构不均 应力效应 发育多数地区		Vogel, 2005 赵振宇, 2007
多边 交汇 开裂式	交叉生长模式 IGM	两裂缝相向生长并在两起始点中间某部位发生交叉后, 其中一支夭折, 另一支继续侧向生长的过程	应力效应 发育多数地区		
	汇合生长模式 JGM	两裂缝相向生长, 并最终交于中间某部位形成核形区域的过程	应力效应 沉积物成分、结构不均 发育平洼地区		
	中心分散生长模式 DGM	以泥质体某应力集中点为中心, 呈发散状生长的过程	沉积物成分、粒度影响 应力效应 发育盆缘地区		Ram Weinberger, 1999
混合 生长 模式		上述开裂过程的混合	多数地区		

图 3 现代泥裂开裂模式及地质建模分析

Fig. 3 The growth patterns and mechanisms of modern mud cracks

裂缝数量、裂缝分割基块数量等来简化泥裂发育过程^[13, 18, 19, 21]。这样虽然有利于计算机模拟, 但是模拟结果与实际偏差较大, 因此, 进行全面细致的泥裂发育机理研究十分必要。

1.3 泥裂发育影响因素分析

1.3.1 粘土含量、盐度是泥裂发育的物质基础

大量实验表明, 泥质成分与沉积体盐度将对泥裂发育产生重要影响^[25, 26]。当在泥裂实验中使用纯非膨胀土(高岭石、伊利石、绿泥石)时, 裂缝形成只与盐度有关。在清水溶液中纯非膨胀土不产生裂缝, 但只要泥中含有 2% 膨胀土时, 周围水体盐度的小幅变化就会马上出现裂缝, 这种裂缝是黏土层对盐度变化的收缩反应。Vogel 2005 年将砂子与膨润土按照 1:1 和 5:1 的比例进行充分混合, 在相同时间内进行裂缝发育模拟试验, 结果前者无论从裂缝数量和裂缝宽度方面均高于后者^[25]。可以说, 沉积物内黏土含量、盐度是决定泥裂发育与否的物质基础。在现代黄河三角洲分流间湾亚相与唐岛湾沿岸以障壁潟湖相工区内, 随着黏土含量和水体盐度的增加, 泥裂发育时间

缩短, 发育程度、规模、连通性等明显增加^[11~13]。

1.3.2 砂—泥旋回地层裂缝发育特征

砂—泥旋回地层的开裂过程与单一性泥质地层略有差异, 大体分为三个阶段(如图 4): 第一阶段, 由于外界物源的多期充注, 沉积区内发育了砂—泥互层的多期正韵律旋回, 如图 4a, 沉积物粒度普遍偏小, 且以泥质沉积物为主(泥质含量 $> 75\%$)。第二阶段, 当泥质层开始脱水收缩时, 由于砂层的润滑作用, 发生了层间滑动, 大大减小了表层泥质体收缩时下伏泥质体发生形变而带来的阻力(如图 4b)。经过工区内大量的研究统计发现, 裂缝发育较好的区域, 泥/砂层厚度比通常为 3~4。第三阶段, 当泥质层裂缝宽度增大到一定程度时, 由于沙子自身的重力作用, 便会滑落到裂缝底部, 形成了最早期的无序状砂层堆积(如图 4c), 这与单一性泥质地层裂缝内的早期沉积明显不同。

1.3.3 早期裂缝内充填物对后期裂缝发育的影响

在泥裂发育过程中, 早期裂缝充填物沉积模式对后期裂缝的形成产生了重要影响。如图 5a, 由于早

期裂缝内有机质泥的压实系数远小于裂缝基块的压实系数,致使后期泥质沉积物很容易挤入早期裂缝内,形成了沉积界面略显下凸的类火焰构造。同时,也正是多出来的这部分下凸体,导致该部分泥质体收缩应力圆半径远大于周边区域,因此,新裂缝的开裂位置通常位于收缩应力圆两侧(箭头所示),这样就形成了新、老裂缝在纵向上交错搭配的格局,在剖面上表现为矩形裂缝组合。但此种开裂模式不利于粒间水的有效排出,通常情况下,粒间水运移的首选途径为沉积间断面,然后通过新裂缝曲线上移。如图5b,二次沉积物内含砂量较大,并发育异常高压,因此,新裂缝的发育则是泥质体收缩力与水压上拱力的

合力,且新裂缝的开裂位置位于早期裂缝的正上方。同时,由于砂层的存在,也为地质流体初次运移提供了有利条件。

如果早期裂缝内充填物为砂质沉积(如图5c、5d),由于泥、砂压实系数不同,致使两期沉积物界面略显上凸,这样早期裂缝上覆地层内应力就会相对集中。如图5c,粒间水受上覆重力挤压,向上运移时可以产生上拱作用力,同时由于上覆泥质体收缩应力相对集中,因此新裂缝就会形成于老裂缝正上方。同样,图5d中新裂缝的形成也主要是水压上拱的结果,并且开裂位置也位于老裂缝的正上方。由此可知,裂缝内充填物类型对后期裂缝开裂位置的影响十分重要。

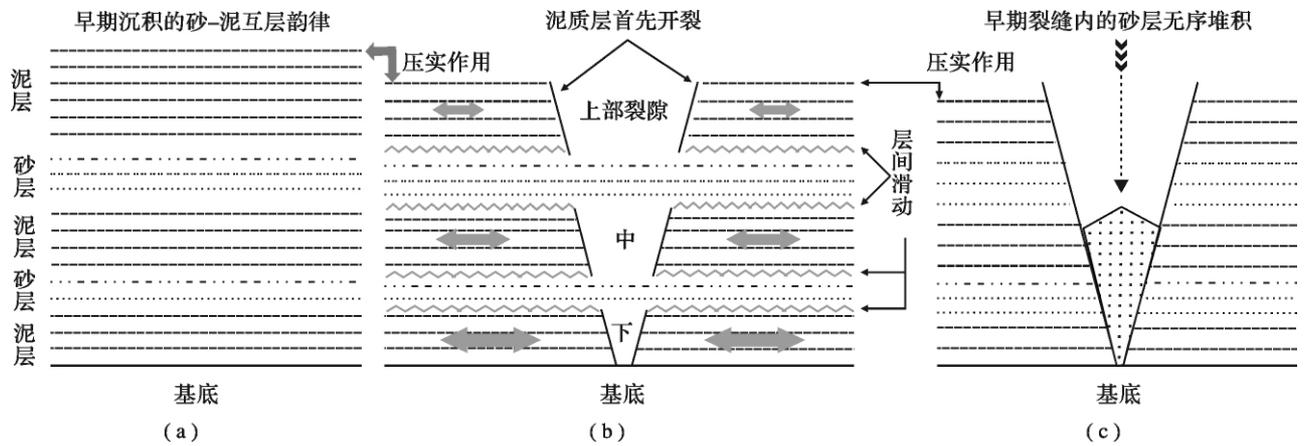


图4 砂-泥互层地层裂缝发育过程示意图

Fig. 4 Geological model of crack growth process in sand-mud interbedded strata

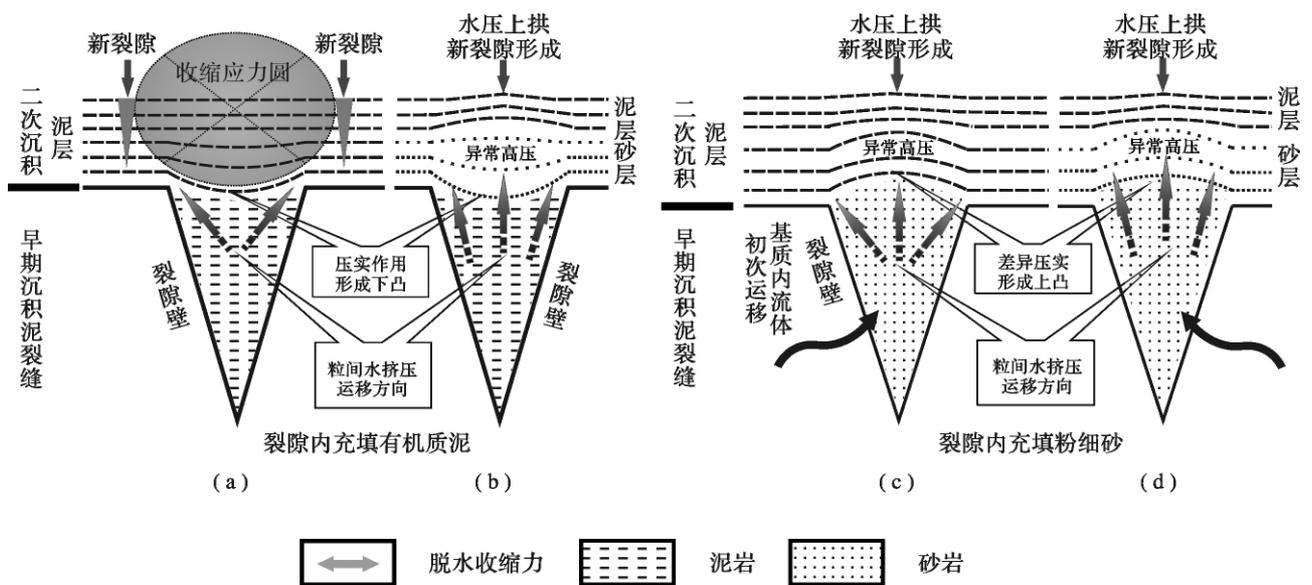


图5 早期裂缝充填模式对后期裂缝发育的影响

Fig. 5 Effect of early crack filling patterns on late crack growth

1.3.4 其它外界因素对泥裂发育的影响

除上述影响泥裂发育的主要因素之外,还包括地形变化、颗粒物粗细、流水沟槽、生物扰动、冰晶痕等。通常认为泥裂主要发育于表面水平或近于水平的地区,但是 MacCarthy、Hastenrath 发现了 38° 陡坡上的多边形干裂^[27]。Donovan 和 Archer 认为大于 5° 斜坡上的均质沉积物可以形成矩形干燥裂缝,且主裂缝平行于斜坡走向^[28]。赵振宇等也发现了地形坡度与裂缝形态的关系,并认为斜坡之上多发育矩形裂缝,平坦地区多发育网状裂缝,其中矩形裂缝的主裂缝方向与水退方向一致,即主裂缝垂直于斜坡走向^[12],这一点与 Donovan 和 Archer 的观点相悖^[28],分析原因可能有两个:一是 Donovan 和 Archer 的观测时机稍晚,未能有效分辨主裂缝(纵向裂缝)和次裂缝(横向裂缝),因为二者参数类同;二是研究区坡度过大,导致重力沿斜坡走向的分量大于脱水收缩应力而过早的产生了沿斜坡走向的裂缝(横裂缝),但这已然超出了泥裂的范畴,因此,现代泥裂观测区坡度不宜过大,最好小于 15°。

当地形较高、沉积物较薄、沉积物底部有颗粒物时,通常会在该处首先出现裂缝。在流水冲刷沟槽内,裂缝会沿沟槽首先发育。同时,生物爬行迹、觅食迹、冰晶痕以及暴露情况下裂缝内生物的发育程度等都会对裂缝产生重要影响^[11, 12]。由此可知,泥质沉积物在临界状态下只要给予很小的扰动,裂缝就可以按一定的规律分布。因此,当地下泥质岩在形成裂缝的临界状态下,如果受到一定规律的扰动,裂缝的分布特征同样会受到扰动因素的控制。

2 埋藏成岩期泥裂发育特征

探讨成岩期泥裂的发育过程比较复杂,其中不同成岩期地化环境的多样性、构造演化的多期性、构造样式与构造应力的复杂性等都会对泥裂的发育产生直接影响。截至目前,仍没有一种技术方法能有效识别该尺度范围内泥裂的空间展布形态^[5, 7, 17, 19, 25, 27],因此,现阶段只能依靠较为系统的现代泥裂研究和借助有限的成岩期裂缝定性、半定量描述,来尽量模拟地下泥裂的空间展布形态、开裂期次及其对地下流体排—运—聚的影响。

2.1 早成岩期泥裂发育特征

早成岩期泥裂往往与同生期泥裂相伴生,且二者发育时间相近、特征类似,要想有效区分,关键在于沉积期次的划分。安徽巢湖凤凰山石炭系高骊山组泥

裂主要发育于该层中段顶部的杂色泥页岩内,野外照片如图 6a、b。泥裂发育大致经历两期,首先是暴露泥裂—填充期(如图 6a,同生期泥裂),其次是地下埋藏开裂—填充期(图 6b,早成岩期)。

暴露泥裂—填充期:下部褐紫色泥岩在暴露—浅水氧化环境下首先发育了同生期泥裂(现代泥裂研究表明,泥裂下切深度最快可达 80 cm/月),由于后期快速海侵并在裂缝内填充了灰绿色泥岩,因而保留了早期的裂缝形态,呈“V”字型,底部弯曲,长度 20~50 cm(如图 6a)。同样,在井下岩芯样品中也可观测到这种现象,如图 6c,泥岩岩芯横切面可见泥裂呈罗分布,有矩形裂缝、三角裂缝及网状裂缝,裂缝宽度最大可达 5 mm,其余主要为 1~3 mm,部分裂缝不可见(显影技术较差),裂缝内充填物为砂质沉积(直接印证了现代泥裂沉积模型 5c、5d 的正确性)。此种沉积构造类似于层面生物扰动,但裂缝壁曲率变化有别,如果后期遭受抬升、风化剥蚀,就会形成大家所熟知的“龟背石”。

地下埋藏开裂—填充期:褐紫色泥质层进入早成岩阶段后开始发育二期泥裂,上覆灰绿色泥质层受地层水淋滤后填充了下部的次级裂缝,因此裂缝较窄,平面上规律性较差,时断时续,但从图 6b 可以看出,泥裂在空间形态表现为网状,连通性较好,与现代泥裂十分相似。

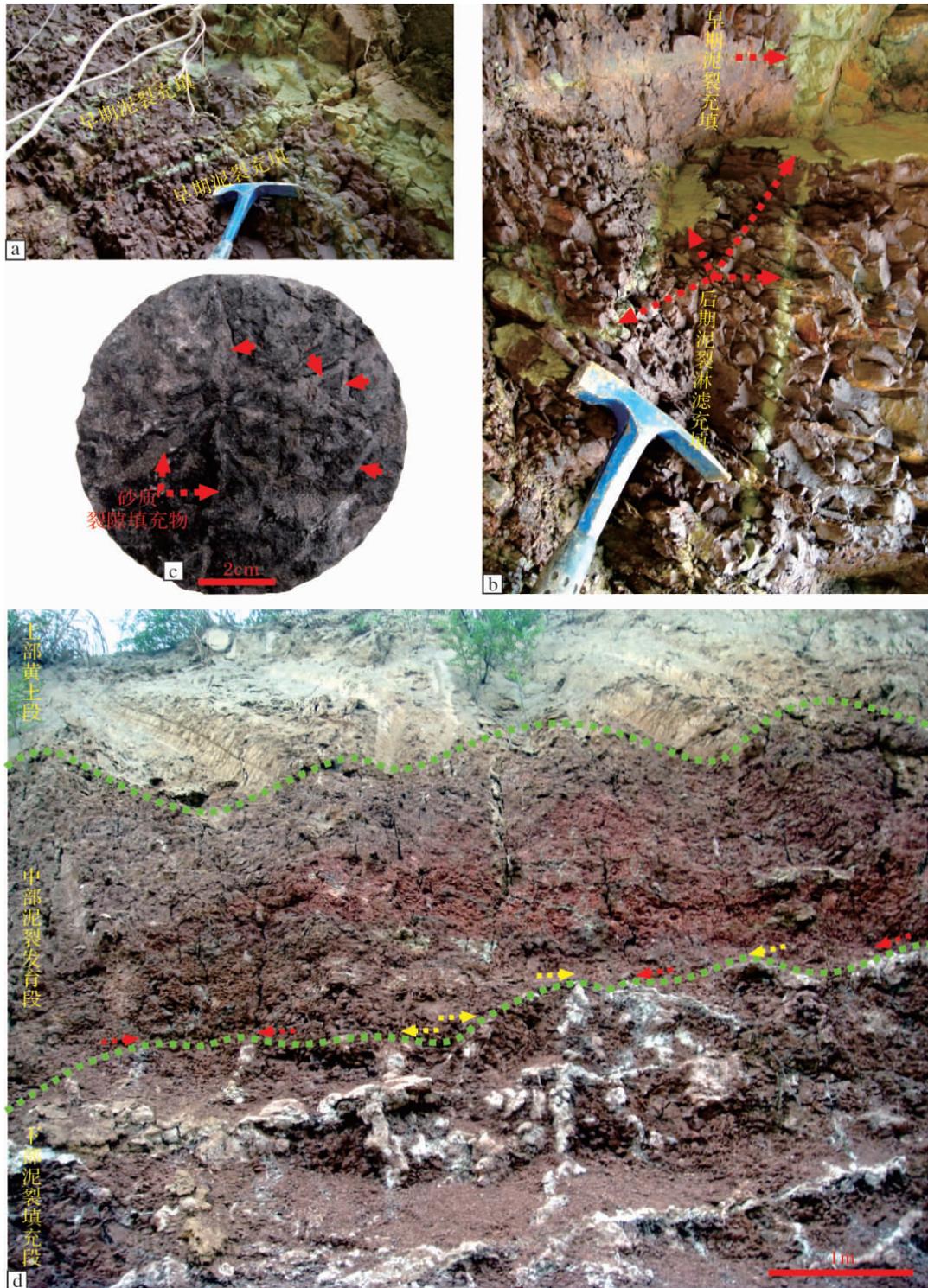
同样,早成岩期裂缝内填充物类型也会对后期裂缝的开裂位置产生影响,与现代泥裂类似(如图 5)。河北邯郸太行山第四系红土属洪泛平原相,如图 6d,由下至上可以分成三部分:下部为红土层,早期裂缝被灰白色砂泥质沉积物填充,剖面上裂缝组合呈矩形、三角形或网状,裂缝宽度 3~15 cm,裂缝前端有逐渐向上延伸的趋势,由于沉积间断影响,停止于绿线处;中部为纵向裂缝发育区,半充填或者未充填,裂缝长 30~200 cm,裂缝宽 3~5 cm,横向裂缝不明显,但局部仍可见;上部为第四系黄土覆盖,沉积松散,不发育裂缝。由于早期裂缝(下部裂缝)内充填了砂泥质沉积,因此后期裂缝(中部裂缝)多是在早期裂缝方向上的延伸,如现代泥裂模型 5c 和 5d,图中红色箭头指示早—晚两期泥裂对接处,黄色箭头指示早—晚两期裂缝即将对接处,此种模式的出现,可以用现代泥裂模式进行很好的解释。

2.2 中—晚成岩期泥裂发育特征

当成岩作用进入到中—晚成岩阶段后,泥质岩在地下高温、高压条件下处于塑性状态,因此泥裂发育

规模和数量均有所降低,主要表现为地下流体对早期裂缝的改造,包括溶蚀和填充,因此,建设性作用与破坏性作用并存。

如图 7a 泥质碳酸盐岩芯样品纵剖面发育泥裂,裂缝内有机质充填,对后期流体运移较为不利,但在完全填充之前,仍然具有疏导功能。裂缝开裂方式主



(图 d 中红色箭头: 上下裂缝对接处; 黄色箭头: 上下裂缝即将对接处)

图 6 早成岩期泥裂发育期次与特征

a. 早期泥裂充填; b. c. . 早成岩期泥裂充填; c. 早成岩期泥裂充填; d. 早成岩期泥裂发育期次结构示意图

Fig.6 Mud crack characteristics at early diagenetic stage in fields

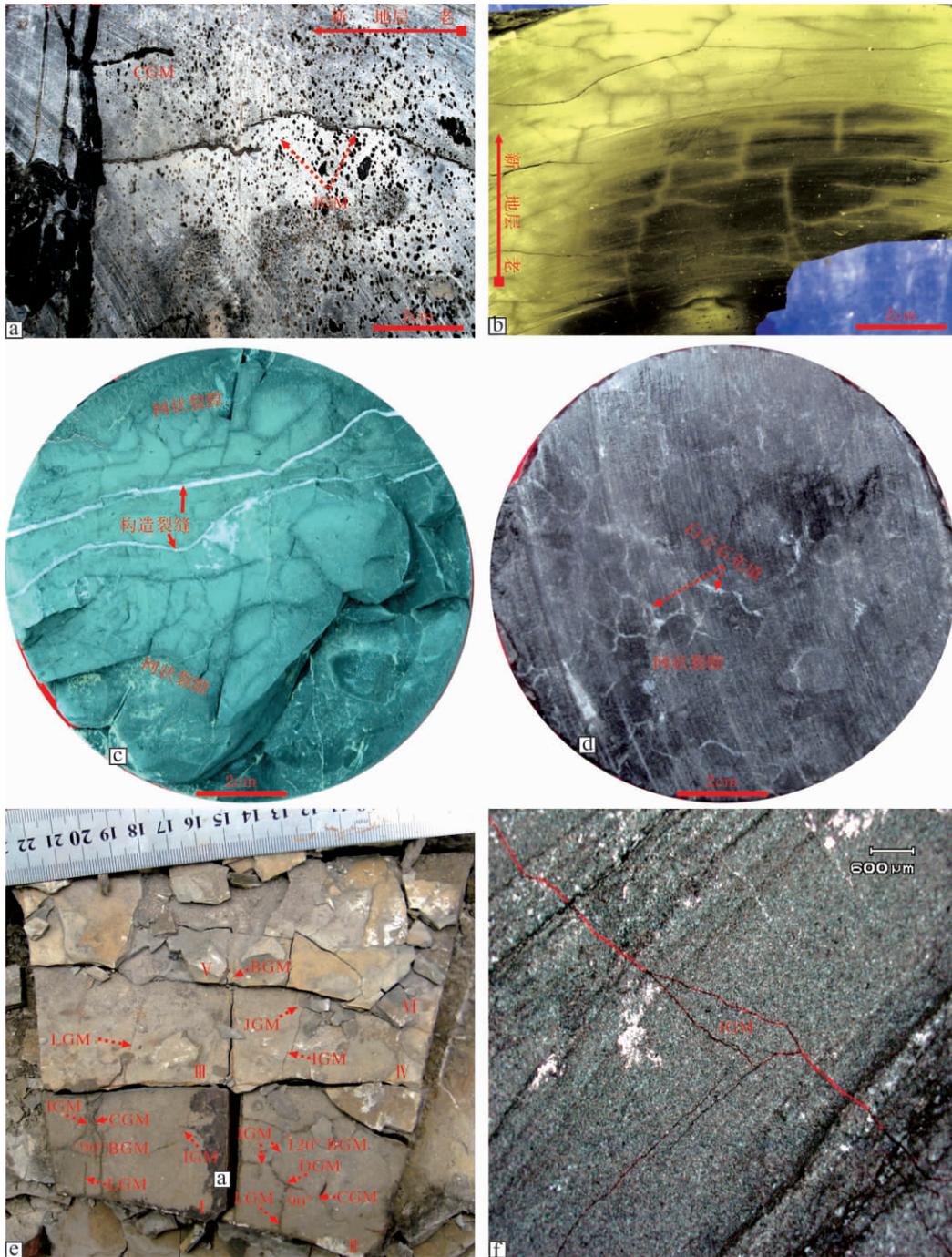


图 7 中—晚成岩期泥裂发育特征

- a. 泥质碳酸盐纵剖面泥残裂汇合开裂式; b. 泥质碳酸盐纵剖面矩形裂隙发育; c/泥质碳酸盐平面未充填网状裂隙发育;
- d. 泥质碳酸盐平面充填网状裂隙发育; e. 泥页岩平面未充填泥裂发育特征; f. 泥页岩铸体薄片内汇合式开裂模式

Fig. 7 Growth patterns and characteristics of mud cracks at the middle-late diagenetic stages

要有两种,分别为汇合开裂式(JGM)和折线开裂式(CG M),发育部位起始于岩芯层位上部的层间溶蚀缝(裂缝内残留有机质)。如图 7b,泥质碳酸盐岩芯样品纵剖面泥裂处于半充填或者未充填状态,显影效果较差,这也是常被忽略其存在的主要原因。从整个

图片来看,裂缝组合形态表现为矩形,与现代泥质剖面开裂模式无异,但它给我们的启发还远不在此,而是在中—晚成岩期也能发育规模性泥裂,并能为地下流体运移和储集发挥积极作用。从剖面上看,裂缝发育起始位置也有构造裂缝发育。同样,在泥质碳酸盐

岩岩芯层面上,同样可见网状泥裂发育(如图7c、7d)形状不如现代泥裂规则。从图7c可以看出,裂缝半充填,与构造裂缝伴生,开裂模式包含了现代泥裂的所有种类,较为齐全。从7d可以看出,区域内无构造裂缝,泥裂方解石亮晶充填,显影较好,表现为网状,裂缝基块大小相对均一。

泥岩地层中,中一晚成岩期裂缝发育特征不明显。在野外剖面上,该期泥裂形态与表生期泥裂容易混淆;在室内岩芯样品上,由于压力释放容易形成叶状层间缝或者破碎颗粒;在地球物理测井响应上,成像测井虽然能检测到裂缝的存在,但是不能有效区分裂缝的种类和空间形态。鉴于上述条件限制,为甄别和描述中一晚成岩期泥裂带来了很大困难。鄂尔多斯盆地西缘甘肃平凉太统山下古生界奥陶系平凉组发育大规模半深水海相泥页岩(区域位置如图1),富含笔石,发育叶—薄状层理,单层厚2~10 cm。纵剖面上,个别穿层裂缝长度大于50 cm,隙壁平直,为构造裂缝,而泥裂长度通常小于其所发育层位的单层厚度,开裂方式多为交汇开裂式和单边延展开裂式(如现代泥裂开裂模型图3),这些裂缝的发育,为泥质岩流体运—聚提供了有利的通道和空间。如图7e,可见六块矩形裂缝,依次编号I~VI,该级别裂缝可能发育于早一中成岩期,裂缝半充填或未充填,形状较为规则,矩形裂缝长边方向代表了泥裂发育时所处斜坡的倾向。在矩形基块内可见大量次级、晚期裂缝(主要为中晚成岩期泥裂),各基块内数量不等,可能与矩形裂缝的发育宽度有关,平面组合形态以网状为主,代表开裂前构造运动可能致使该区地形变缓。矩形基块内泥裂的开裂模式与现代泥裂无异,种类如图7e所示。图7f为泥岩铸体薄片下的显微特征,在微米级尺度内展现了泥裂的汇合开裂模式,为我们深入认识不同尺度内泥裂的发育特征提供了有效途径与借鉴。

通过对图7的分析可以得出两点结论:一是成岩期泥裂与现代泥裂具有很高的相似性,包括裂缝形态、开裂模式等;二是进一步明确了泥质岩构造裂缝与泥裂的关系,前者为泥裂广泛发育提供了必要的动力条件(靠近构造裂缝泥裂相对发育),并疏导了地层内滞留的流体(与构造裂缝相伴生的泥裂,通常未充填或者半充填),后者为构造裂缝提供了区域微观理、影响因素、地质意义等相关议题也逐渐被人们所重视。本文通过野外剖面踏勘、岩芯观测、微区扫描等手段,采用系统的理论研究方法,以现代泥裂为基

连通作用,同时提高了地质体内的存储空间和有效渗透率。

3 表生成岩期泥裂发育特征

对于多数沉积盆地而言,大都经历了沉积—埋藏—抬升的演化过程,因此也都经历了表生成岩期泥裂发育阶段。根据地层后期抬升幅度大小,表生期泥裂的发育规模和程度不尽相同,但有一点可以肯定,由于地层抬升而导致的压力释放能够有效增大地层中早期泥裂的孔隙度和渗透率,同时也可以产生一些新的应力释放裂缝。虽然二者在力学性质上明显不同,表现为收缩与拉张两种状态,但在区域范围内,就泥质基质而言,效果类同。

从整个泥裂的发育阶段来看,表生期不仅扩大了早—中一晚成岩期泥裂的宽度,同时也是大量应力释放裂缝的发育期。如图8a河北太行山二叠系石千峰组紫红色泥岩矩形裂缝、图8b鄂尔多斯盆地西缘平凉三道沟组泥质碳酸盐矩形裂缝,二者均处于大气淡水淋滤带,因此裂缝未充填。图8c为鄂尔多斯盆地三叠系延长组油页岩岩芯样品,层面发育矩形裂缝,由于应力释放,裂缝未充填。上述矩形组合裂缝均发育于大地构造的缓斜坡部位。图8d为河北太行山二叠系石千峰组紫红色泥岩网状裂缝,发育于现今构造的平缓地带。由此可见,地形坡度变化不仅控制着现代泥裂的组合形态,同时也影响着表生期泥裂的发育特征,这对于定性判断区域泥裂空间展布形态具有积极意义。

同样,在野外剖面上,表生成岩期泥裂的开裂模式与现代泥裂也十分相似,如图8e、8f,包含了直线生长模式(LGM)、分叉生长模式(BGM)以及交叉生长模式(IGM)等,组合形态以矩形为主。同时,砂泥交互层更有利于泥裂的发育(图8f),与现代砂—泥互层泥裂发育特征也十分相似。

4 结论与讨论

泥裂作为自然界中的一种沉积构造,早已被人们所熟知,但多停留在简单的定性描述之上,缺乏深入的量化研究,同时,泥裂在地质演化中的作用也往往被大多数学者所忽略。随着近些年人们对泥质岩相关领域的深入研究,泥裂的空间展布形态、发育机理,详细分析了早成岩期、中一晚成岩期与表生成岩期泥裂的空间展布形态、发育机理、影响因素以及各期泥裂相似性与差异性等,对于全面了解泥裂发育过

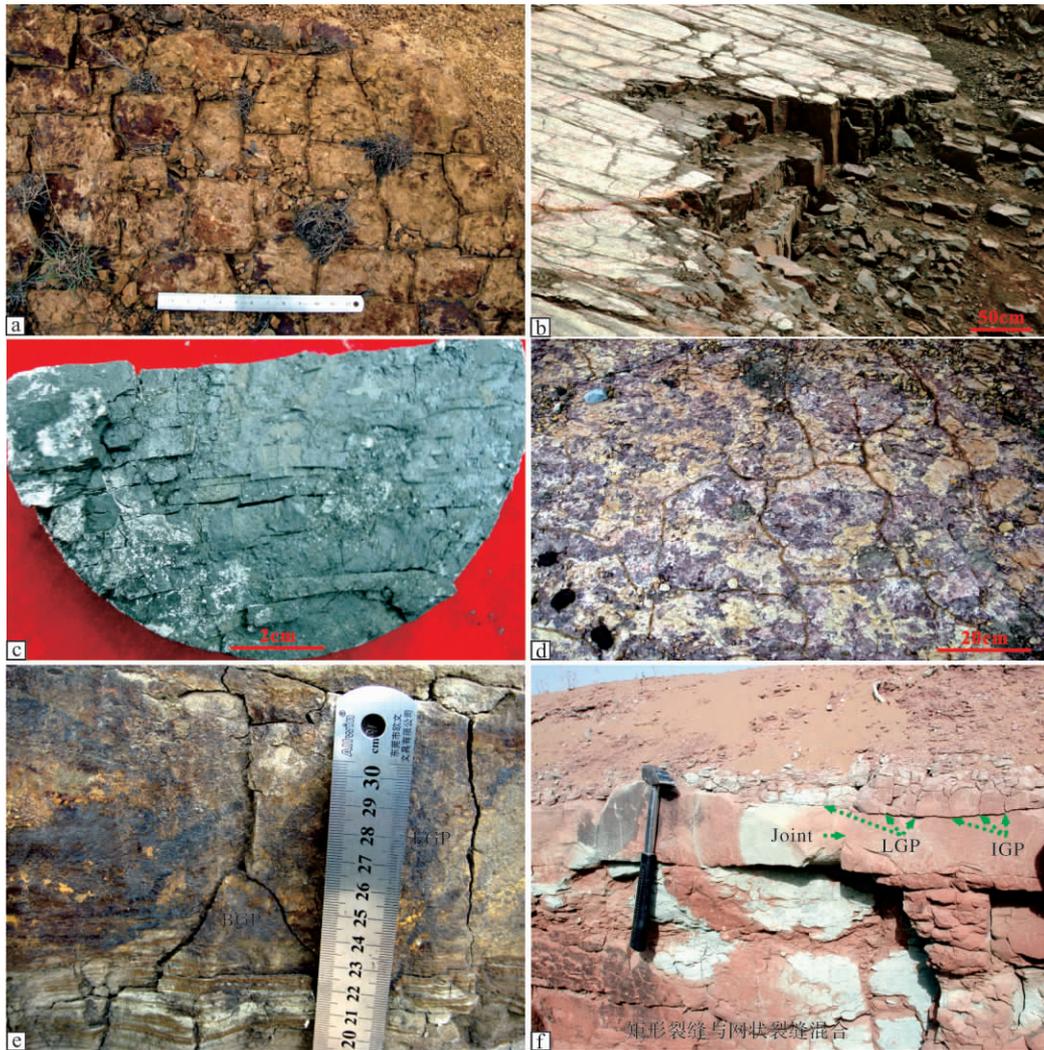


图 8 表生成岩期泥裂发育特征

a. 斜坡部位泥岩矩形裂隙; b. 斜坡部位泥质碳酸盐岩矩形裂隙; c. 岩芯横截面泥岩矩形裂隙; d. 平缓低洼处泥岩网状裂隙; e. 含粉砂泥岩纵剖面裂缝开裂模式; f. 砂-泥互层裂缝开裂模式

Fig. 8 Growth patterns and characteristics of mud cracks at epidiagenetic stage

程、区域分布规律,解析构造—沉积演化史,恢复沉积环境等具有积极意义。在泥裂研究过程中,有启发也有问题,列举如下:

(1) 泥裂存在于成岩演化的各个阶段,可以划分为同生成岩期、埋藏成岩期和表生成岩期,其中埋藏期又可进一步划分为早成岩期和中—晚成岩期。在野外剖面与井下岩芯描述中,表生期裂缝多是对前期裂缝的进一步改造和新应力释放裂缝的混合。

(2) 以现代泥裂为基础的定量化描述和地质建模分析,不仅为其它成岩期裂缝研究提供了坚实的理论基础,同时也提供了一套行之有效的办法。

(3) 不同成岩期泥裂在剖面上的组合形态以矩形为主,在平面上主要为矩形和网状,二者数量比与

地形息息相关。

(4) 泥裂的开裂方式主要包括 3 大类 7 种模式,具体特征如图 3 所示。

(5) 泥裂发育的影响因素包括多个方面,其中黏土含量与盐度是泥裂发育的物质基础,地形变化控制着泥裂的空间组合形态,地层沉积韵律影响着泥裂发育的程度、裂缝内沉积物填充模式以及后期裂缝的发育位置等。

(6) 与构造裂缝相伴生的泥裂,裂缝内填充程度一般较低、发育规模较大,二者相互依存,相互影响。

(7) 泥裂存在于地质演化的各个时期,其微观“毛管作用”不容忽视,特别是不同时期泥裂对地质流体排—运—聚的影响,应该引起大家更广泛的关

注。

参考文献 (References)

- 1 戴贤忠, 李学田. 济阳拗陷第三系天然气藏盖层评价及其形成机理[J]. 石油学报, 1991, 11(2): 4-12 [Dai Xianzhong, Li Xuetian. An evaluation of the cap-rock on the Tertiary gas reservoir in Jiyang Sag and its mechanism of formation [J]. Acta Petrolei Sinica, 1991, 11(2): 4-12]
- 2 刘魁元, 武恒志, 康仁华, 等. 沾化、车镇凹陷泥岩油气藏储集特征分析[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(6): 17-20 [Liu Kuiyuan, Wu Hengzhi, Kang Renhua, et al. Characteristic analysis of shale hydrocarbon reservoir in Zhanhua and Chezhen sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(6): 17-20]
- 3 慕小水, 苑晓荣, 贾贻芳, 等. 东濮凹陷泥岩裂缝油气藏形成条件及分布特点[J]. 断块油气田, 2003, 10(1): 12-16 [Mu Xiaoshui, Yuan Xiaorong, Jia Yifang, et al. The formation conditions and the distribution characteristics of the oil pools in the fractures of the shales in Dongpu Depression [J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2003, 10(1): 12-16]
- 4 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 6-18 [Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 6-18]
- 5 董亨茂. 成像测井资料在构造裂缝预测和评价中的应用[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 58-61 [Tong Hengmao. Application of imaging well logging data in prediction of structural fracture [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(9): 58-61]
- 6 冯乔, 汤锡元. 岩浆活动与油气成藏地质条件的关系[J]. 西北地质科学, 1997, 16(4): 56-62 [Feng Qiao, Tang Xiyuan. The magma activity's influence on conditions forming oil and gas accumulation [J]. Northwest Geoscience, 1997, 16(4): 56-62]
- 7 Khoshbakht F, Memarian H, Mohammadnia M. Comparison of Asmari, Pabdeh and Gurpi Formation's fractures, derived from image log [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009, 67: 65-74
- 8 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学出版社, 1993 [Deng Hongwen, Qian Kai. Sedimentary Geochemistry and Environmental Analysis [M]. Lanzhou: Gansu Scientific Publications, 1993]
- 9 Armstrong A C, Matthews A M, Portwood A M. Crack-up: a pesticide leaching model for cracking clay soils [J]. Agricultural Water Management, 2000, 44: 183-199
- 10 赵澄林. 沉积学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001 [Zhao Chenglin. Sedimentologic Theory [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001]
- 11 周瑶琪, 赵振宇, 马晓鸣, 等. 水下收缩裂缝沉积模式及定量化的研究[J]. 沉积学报, 2006, 24(6): 672-680 [Zhou Yaoqi, Zhao Zhenyu, Ma Xiaoming, et al. The sedimentary model and quantitative analysis of the subaqueous shrink-cracks [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(6): 672-680]
- 12 赵振宇, 周瑶琪, 马晓鸣, 等. 水下收缩裂缝天然实验研究中获得的新认识[J]. 地质论评, 2007, 53(3): 306-317 [Zhao Zhenyu, Zhou Yaoqi, Ma Xiaoming, et al. Some discoveries on researching subaqueous mud-shrinkage cracks in present muddy sediments [J]. Geological Review, 2007, 53(3): 306-317]
- 13 赵振宇, 周瑶琪, 马晓鸣, 等. 水下收缩裂缝形成过程及裂缝充填模式研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(4): 215-221 [Zhao Zhenyu, Zhou Yaoqi, Ma Xiaoming, et al. Genesis of underwater shrinkage cracks and geological models of their filling [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(4): 215-221]
- 14 赵振宇, 周瑶琪, 马晓鸣. 泥岩非构造裂缝与现代水下收缩裂缝相似性研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(3): 6-11 [Zhao Zhenyu, Zhou Yaoqi, Ma Xiaoming. Study on the similarity of the non-tectonic cracks in mud-shale to underwater shrinkage cracks in present muddy sediments [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2008, 23(3): 6-11]
- 15 Shipitalo M J, Visa Nuutinen, Kevin R B. Interaction of earthworm burrows and cracks in a clayey, subsurface-drained, soil [J]. Applied Soil Ecology, 2004, 26: 209-217
- 16 Parker P Anthony. Stability of arrays of multiple edge cracks [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 62: 577-591
- 17 Shuichiro Yoshida, Kazuhide Adachi. Numerical analysis of crack generation in saturated deformable soil under row-planted vegetation [J]. Geoderma, 2004, 120: 63-74
- 18 Preston S, Griffiths B S, Young I M. An investigation into sources of soil crack heterogeneity using fractal geometry [J]. European Journal of Soil Science, 1997, 48: 31-37
- 19 Horgan G W, Young I M. An empirical stochastic model for the geometry of two-dimensional crack growth in soil [J]. Geoderma, 2000, 96: 263-276
- 20 Morris P H, Graham J, Williams D J. Cracking in drying soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29: 263-277
- 21 Hull D. The evolution of cone cracks under axisymmetrical loading conditions [J]. International Journal of Fracture, 1994, 66: 295-312
- 22 Lima L A, Grismer M E. Soil crack morphology and soil-salinity [J]. Soil Science, 1992, 153: 149-153
- 23 Yassoglou N, Kosmas C S, Moustakas N, et al. Cracking in recent alluvial soils as related to easily determined soil properties [J]. Geoderma, 1994, 63: 289-298
- 24 Jeffrey S K, Joseph F S J, Charles P S. Mud cracks and dedolomitization in the Wittenoom Dolomite, Hamersley Group, Western Australia [J]. Global and Planetary Change, 1996, 14: 73-96
- 25 Vogel H J, Hoffmann H, Leopold A, et al. Studies of crack dynamics in clay soil: II. A physically based model for crack formation [J]. Geoderma, 2005, 125: 213-223
- 26 Hallet P D, Dexter A R, Seville J P K. Identification of pre-existing cracks on soil fracture surfaces using dye [J]. Soil & Tillage Research, 1995, 33: 163-184
- 27 Chertkov V Y, Ravina I. Morphology of horizontal cracks in swelling soils [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1999, 31: 19-29

28 Donovan R N and Archer R . Sedimentological consequences of a fall
in the level Haweswater , Cumbria [J]. Proceeding Yorkshire Geology

Society ,1975 ,40: 547-562

The Growth Patterns and Mechanisms of Mud Cracks at Different Diagenetic Stages and Its Geological Significance

ZHAO Zhen-yu¹ GUO Yan-ru¹ GU Jia-yu¹ ZHANG Qing² LIU Hong²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development , PetroChina , Beijing 100083;

2. Changqing Oilfield Branch Company , PetroChina , Xi'an 710018)

Abstract: This paper discusses the growth stages , spatial structures , quantitative fitting relationships among various parameters , growth patterns and influencing factors of mud cracks by field survey , core observation and SEM analysis. The study shows that: (1) Mud crack growth can go through three stages , i. e. syndiagenetic stage , burial diagenetic stage (including early diagenetic stage , middle-late diagenetic stage) and epidiagenetic stage in turn. The number of mud cracks in different stages is represented as Σ syndiagenesis > Σ epidiagenesis > Σ burial diagenesis. (2) Mud crack growth has three models , such as unilateral growth model including linear growth pattern , curvilinear growth pattern and bifurcation growth pattern , multilateral growth model including intersectional growth pattern , join growth pattern and dispersed growth pattern , and mixed growth model including the combination of any patterns listed above. (3) Modern mud crack growth usually undergoes four stages , among which , sand beds in sand-mud rhythmic strata can play a lubricative role on crack growth , and provide enough sandy sediments for filling cracks. (4) Mud crack growth usually produces bifurcation and bifurcation angle is mostly 120 , then 90 , mainly related to sediment heterogeneity and released energy. (5) Factors affecting mud crack growth cover many aspects , that is to say , clay content and salinity can control the number of mud cracks in different areas , terrain can control mud crack morphology , and different sedimentary cycle can control the growth patterns and filling models of mud cracks. (6) Structure fractures can contribute to the growth and preservation of mud cracks , and they affect each other at different diagenetic stages.

Key words: mud crack; characteristic; growth pattern; geological model