

从成岩角度看鄂尔多斯马家沟组碳酸盐岩中的裂缝及其储集意义

李国蓉

(成都理工学院石油系)

[内容提要] 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组碳酸盐岩中裂缝非常发育,本文从成岩角度对它们进行了研究。依据裂缝间切割关系、裂缝与成岩组构间关系、裂缝内充填物类型和地球化学特征,将裂缝分为七期。并通过有机质成熟演化历史与裂缝形成历史的匹配分析,认为燕山运动形成的第Ⅵ期裂缝和喜山运动形成的第Ⅶ期裂缝可成为有效储渗裂缝,分别对盆地中部和第三纪断陷区天然气藏的形成有重要意义。

关键词 裂缝 储集意义 碳酸盐岩 马家沟组 鄂尔多斯盆地

裂缝是碳酸盐岩储层的重要特征之一,传统上多从缝脉相互关系角度对其认识。李南豪、谭文斌(1989,1991)^[1]将裂缝作为成岩作用的产物,从成岩作用研究方法角度对塔里木盆地北部奥陶系灰岩中的裂缝进行了富有成效的研究。本文以这一思路对鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组发育的裂缝开展工作,讨论了裂缝的分期与配套,并进一步通过裂缝的形成与有机质演化的匹配分析,认识了各期裂缝的储集意义。

1 地质背景

早奥陶世马家沟组时期,鄂尔多斯盆地具隆坳发育格局,萨勃哈、潮间坪和潟湖等沉积相分异明显;纵向上,受海平面变化的制约,形成了五段特征有别的沉积物,马一段为浅黄灰—灰色泥页岩夹泥云岩、泥灰岩薄层和云质石英砂岩,代表了怀远运动后又一次海侵的初期。马二段为灰、深灰色微晶灰岩夹砾砂屑灰岩、微晶云质灰岩及含云灰岩,属海平面升降旋回海侵阶段的产物。马三段为含膏、膏质微晶云岩、云质膏岩与微晶泥云岩互层,夹细晶云岩或灰岩,代表其处于海平面升降旋回的海退阶段。马四段为灰、深灰色豹斑状微晶含云、云质灰岩与粉—细晶灰质云岩。马五段下部主要发育盐膏岩和云岩,中部为黑色灰岩(称“黑腰带”),上部为云岩、泥云岩。

马家沟组沉积物受到多期构造运动的改造,不同期次的构造运动的表现形式不一样:加里东运动在盆地广大地区主要表现为地壳的抬升,致奥陶系地层剥蚀和风化壳形成,但西缘可能处于祁连加里东挤压应力场影响区;海西期盆地内部较为稳定,盆地南缘及西南缘异常活跃,形成了秦岭海西褶皱带;印支运动在盆地广大地区仍然表现为一种升降运动,未改变盆地原有的构造格局,但盆地西缘强烈抬升成为重要的物源区,盆地南缘(尤其东段)表现为

① 本文1996年12月5日收稿,1997年2月25日收修改稿。

褶皱造山(秦岭印支褶皱带);燕山运动是盆地经历的最强烈的构造变动,它改变了盆内广大地区自加里东运动以来建立的升降运动状态,对盆地内部及盆缘现今构造的形成作了重要贡献,西部及南部表现活跃,冲断带或推覆体发育;喜山运动以断陷为特征,形成了银川、河套、渭河等第三纪断陷盆地。不同地区经历的构造运动频度和强度有差别,盆地南缘、西缘构造运动频繁,而盆地东缘及东部广大地区经历的构造变动次数少,程度较弱^[2]。

在上述沉积和构造背景下,马家沟组沉积物受到多期多类成岩作用的改造,主要包括白云石化、破裂(裂缝的形成)、压实压溶和溶蚀作用,它们的形成演化历史总结于图1中。研究表明,马三、五段白云岩以同生期近地表成岩作用(白云石化和溶蚀)广泛发育,浅埋藏期成岩作用较弱为特征;马四段灰岩及豹斑云灰岩则同生期近地表成岩作用缺乏,浅埋藏期及中一深埋藏期成岩作用(压实压溶、破裂、白云石化)发育;马二段灰岩同生期近地表成岩作用(脱膏脱盐化与溶蚀)和中一深埋藏期成岩作用(压实压溶、破裂)均较为发育:

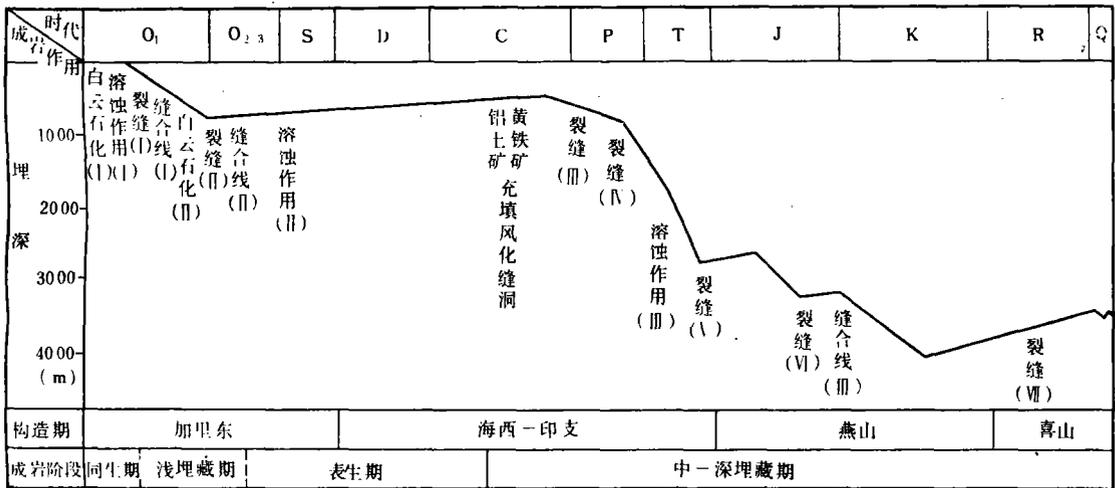


图1 马家沟组碳酸盐岩成岩作用及裂缝的形成历史

Fig. 1 The history of diagenesis and fracture formation in the carbonate rocks of the Majiagou Formation in the Ordos Basin

2 裂缝的发育分布及展布特征

鄂尔多斯盆地马家沟组碳酸盐岩中裂缝非常发育,包括宏观缝($>0.1\text{mm}$)和微缝($<0.1\text{mm}$),总结裂缝发育分布及展布有如下特征。

1. 区域上裂缝的发育状况受构造变动历史制约

盆地南缘地区(如铁瓦殿及SK8号井)构造变动频繁,裂缝发育,密度达6—20条/ cm^2 ,多种类型的裂缝相互交叉,可把岩石分割成角砾状。盆地西缘地区(伊27井)裂缝较发育。盆地东缘及盆地内广大地区,构造变动频度低,裂缝发育程度相对较弱,密度为4—6条/ cm^2 。

2. 纵向上不同层段裂缝发育状况与地层成岩作用特征密切相关

马二段、四段成岩早期近地表成岩作用缺乏,岩性主要为灰岩或豹斑状云灰岩及灰云岩,受破裂作用改造强烈,裂缝密度大,为3—20条/ cm^2 。马三段、五段主要为一套白云岩或膏云岩地层,经历的构造应力场应与马二段、四段类似,但由于成岩早期近地表成岩作用的发育和地层岩性塑性较大,抑制了破裂作用的发生,致这些层段裂缝发育程度大为逊色,密

通过进一步对各期裂缝在成岩序列中位置的讨论、裂缝充填物微量元素和稳定同位素特征指示埋藏条件和成岩环境的分析^[3-5],它们的发育与奥陶系埋藏历史和构造运动的匹配,认识了裂缝的形成历史(图1)。

第Ⅰ期裂缝属成岩成因,主要包括干裂缝和失水收缩缝,前者发生于近地表低温条件,充填作用发生于大气水环境,MgO、Na₂O、MnO、FeO、 $\delta^{18}\text{O}$ 值均低;后者形成于浅埋藏条件,表现为较高的MgO含量。

第Ⅱ期裂缝在全区广泛发育,形成于一定埋深条件下,是加里东运动的产物,与第Ⅰ期裂缝方解石相比,它具有较高的MgO、SrO、Na₂O、FeO含量和低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。 $\delta^{18}\text{O}$ 值推算形成温度为58℃左右。

第Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ期裂缝见于盆地南缘,第Ⅳ期裂缝于盆地西缘也存在,可能与盆地南缘、西缘表现较强裂的海西运动和印支运动匹配。它们发生于加里东后的进一步埋藏过程中,形成深度和温度较高,地层水溶液盐度较大,裂缝方解石具较高的MgO、SrO、MnO、FeO含量。

第Ⅵ期裂缝在盆地各区广泛发育,密度居各期之首,属燕山运动的结果。裂缝的形成与充填发生在埋藏条件下的封闭系统中。探针分析缝内方解石微量元素特征与微晶灰岩类似(表2),但 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化大。 $\delta^{18}\text{O}$ 值与末期 R_o 有极好的相关性(表3)。

第Ⅵ期裂缝发生于喜山期,在银川、河套、渭河等喜山期断陷区较为发育。

表2 第Ⅵ期裂缝方解石与微晶灰岩基质微量元素含量比较

Table 2 Trace element contents in the calcite and micrite matrices within the VI stage of fractures

微量元素(平均值 $\times 10^{-6}$)	Na ₂ O	MgO	SrO	K ₂ O	MnO	NiO
第Ⅵ期裂缝方解石	484	3283	397	100	359	192
微晶灰岩基质	362	4144	420	170	436	186

表3 第Ⅵ期裂缝方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 值与侏罗纪末 R_o 值

Table 3 $\delta^{18}\text{O}$ values of calcite within the VI stage of fractures and R_o values of the latest Jurassic source rocks

取样地区	方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 值(‰PDB)	侏罗纪末 R_o 值(%)	取样地区	方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 值(‰PDB)	侏罗纪末 R_o 值(%)
伊27井	-11.607	1.15	中参1井	-13.261	1.60
三川河	-11.108~-15.209	1.30	SK8井	-15.065~-17.531	1.85

4 裂缝的充填与储集意义

4.1 裂缝的充填

裂缝(特别是构造裂缝)的充填与溶蚀孔洞有别,溶蚀孔洞的形成和充填可在不同时期,裂缝则很难如此。构造裂缝的形成和充填往往是同期完成的,属封闭体系的成岩作用,此可由碳酸盐矿物的沉淀机制得到解释。矿物的沉淀需要大规模的流体运动,而造成大规模流体运移及其改变需要一定的地质事件作为动力因素。构造运动的发生既为流体运动提供了必要的动力条件,同时又为流体运动提供了裂缝这样一个有利的通道和运动场所,从而造成了裂缝的充填。同期裂缝充填物的性质、地球化学特征具相似性,而不同期裂缝充填物性质及地球化学特征具差异性。即使燕山期褶皱运动成山的露头区,受燕山运动形成的第Ⅵ期裂缝,其内充填物并未显示自晚白垩纪以来长期暴露于大气水成岩环境的特征,而是反映了其为地层水溶液沉淀的性质……等等,可说明构造裂缝的形成与充填应系同时完成。而不同岩

性层段中裂缝充填物特征的差别,如伊24井盐膏富集层段,无论是第I、第II、第VI期裂缝,都为盐膏充填;而在灰岩层段,则表现为方解石充填;白云岩段则多为白云石充填……等等,说明不同层段的岩性控制了地层水溶液的性质,地层水溶液的流动受到层界的限制,层间水体缺乏交换,裂缝充填物的沉淀发生在一个受层界限制的封闭性成岩体系中。

4.2 裂缝的储集意义讨论

裂缝在碳酸盐岩储集层中具有重要地位。事实上,由于碳酸盐岩中溶蚀孔洞发育的非均质性和连通性差,即使是孔洞型碳酸盐岩储集体,要形成具经济价值的油气藏亦离不开裂缝的沟通作用。因此裂缝既是油气聚集的重要场所,又是油气由源岩进入储集体的必要条件。

然而,据目前对盆地东缘三川河、南缘铁瓦殿露头剖面及盆地北部伊24井、中参一井、伊25井、伊27井的岩心岩屑薄片观察,尽管马家沟组受到多期构造运动改造,形成了多期裂缝,但基本都被完全充填,失去储渗意义。仅有第VI期裂缝为有效缝,但其发育程度弱,分布较零散,即使能与油气生成匹配,也难担当起将油气从源岩输入储集层的大任。我们这样说,并不想否定鄂尔多斯盆地马家沟组中裂缝作为储渗空间的重要意义,相反,我们认为现在观察的已充填缝在适当的地区和条件下可能未被充填或未被完全充填,成为有效的储渗空间,而已充填缝的存在并不是一个可以值得悲观的信号,通过已充填缝的研究,认识它的期次和相联系的构造运动,预测相应的未充填区的存在,则是研究裂缝对储集性及油气研究的贡献所在。

朱国华(1985)^[6]在对鄂尔多斯盆地碎屑岩储集层深入研究的基础上,提出碎屑岩孔隙充填沉淀的差异沉析原理,即油气进入孔洞则自动地阻止或减缓成岩作用的进行。牟泽辉(1996)^①依据对塔里木盆地的观察和研究得出类似认识。笔者认为这一原理可能对于构造裂缝的充填和保存更为有效,也即只有与油气生成高峰阶段相匹配的构造裂缝,才会为油气进入成为有效储渗裂缝。否则,裂缝将在构造运动同期为成岩矿物所充填,由此建立起构造运动、裂缝形成、保存或充填的模式(图2)。

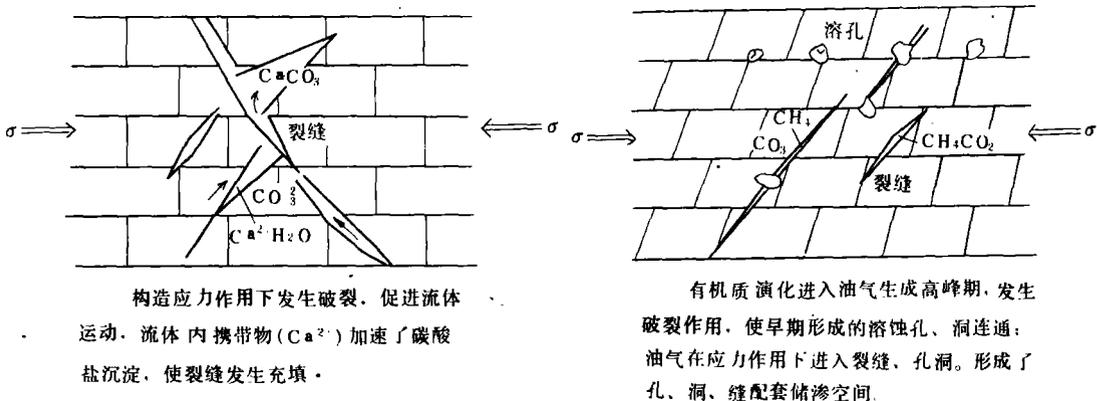


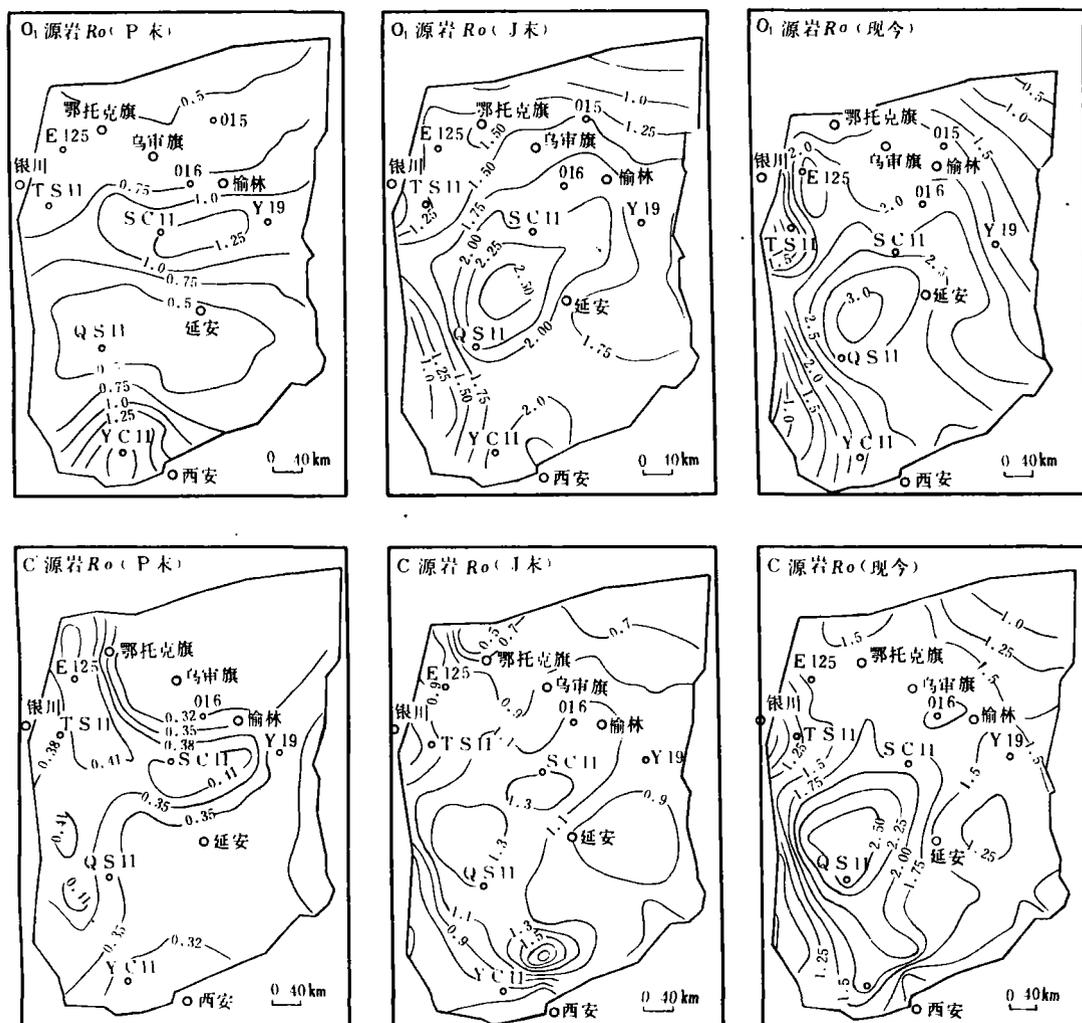
图2 构造裂缝形成、充填或保存模式

Fig. 2 Models showing the formation, filling and preservation of tectonic fractures in the study area

基于上述,结合盆地奥陶系及上覆石炭系有机质演化特征(图3)^[7],得到如下认识。

(1)加里东期,盆内有机质演化尚处于未成熟—低成熟期;海西—印支期,盆地广大地区

① 牟泽辉,1996年,新疆塔里木盆地满加尔坳陷(C—O)含油气系统研究,博士学位论文。

图3 奥陶系、石炭系源岩 R_o 值演化图(据贝丰等,1995)Fig. 3 The variations in R_o values of the Ordovician and Carboniferous source rocks (after Bei Feng et al., 1995)

下古生界生油岩进入大量生油期,但构造稳定,裂缝不发育,沥青充填分析揭示此期石油运移以进入早期形成的孔洞为特征(贝丰等,1995)^[7]。盆地南缘、西缘虽构造活跃,裂缝发育,然有机质演化程度低,致裂缝为成岩矿物充填。有关南缘、西缘上述几期构造作用形成的缝内方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值 0.195—0.505‰PDB,亦反映出裂缝充填过程未有有机质演化产生的轻 ^{12}C 的影响。总之,加里东—印支期的裂缝(I—V期)形成与生油岩演化匹配不佳。

(2)燕山期,构造破裂作用与油气生成高峰期匹配良好,可由此期构造裂缝内沥青赋存和缝内方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负(-4.156‰PDB)得到证明,但不同地区有别。

①鄂托克旗—乌审旗—榆林一线以南大部分地区,燕山期,石炭系源岩有机质 R_o 达 1.4%—2.2%左右,进入煤生气高峰阶段(第二个高峰阶段)。奥陶系源岩热演化程度与之较为类似。燕山构造运动与油气生成高峰期匹配,该期裂缝成为天然气运移的通道和重要聚集场所,陕参一井奥陶系地层钻井岩心观察统计有效裂缝率为35.1条/m,主要为垂直缝,与

北部伊24井发育的燕山期构造裂缝产出状态一致。鄂尔多斯盆地古生界或下古生界的天然气勘探,几乎所有的具工业价值的天然气井都分布于该区,可能反映出本期(第Ⅵ期)裂缝对油气的运移和聚集有重要意义。

②鄂托克旗—乌审旗—榆林一线以北地区及西缘银川附近地区,虽然奥陶系源岩 R_o 在0.8%—1.4%范围,进入油气共生阶段,但由于奥陶系源岩有机碳含量及转化率低(仅及邻区的1/4),由本地层提供的油气量有限,石炭系源岩 R_o 低于1.4%,未达生气高峰。结合区内伊24井、中参一井及伊27井奥陶系中燕山期构造裂缝(第Ⅵ期)基本为石膏及方解石充填,西缘银川附近任3井见少量原油从奥陶系岩心裂缝中渗出,认为该地区燕山期形成的裂缝可能有少部分为来源于本地层的油气所进入,而大量的裂缝仍为成岩矿物所充填成为非有效缝。

(3)盆地局部地区喜山期断陷作用可与有机质演化相匹配,形成储集天然气的有效裂缝。

盆地受喜山运动影响形成了河套、银川、渭河断陷。据目前研究,银川断陷东缘地区(横山堡—陶乐—乌海市东一带),石炭系有机质 R_o 值达1.4%—2.0%,进入生气高峰期,可与喜山期断陷作用相匹配,因此此期形成的裂缝将成为有效缝。目前上述地区合参井、包1井、任4井、任6井、刘庆1井在石炭一二叠系地层中喷出工业性气流。可以预测下伏奥陶系有效裂缝将较为发育,具产气的可能性。

主要参考文献

- 1 李南豪等.塔里木盆地东北地区下古生界及震旦系碳酸盐岩储层控制因素.中国塔里木盆地北部油气地质研究(1).武汉:中国地质大学出版社,1991
- 2 张抗著.鄂尔多斯断块构造和资源.西安:陕西科学技术出版社,1989
- 3 Arthur, M. A., Anderson, T. F., Kaplan, I. R., Veizer, J. and Land, L. S. Stable isotopes in sedimentary geology. SEPM Short Course No. 10, Dallas 1983
- 4 Veizer, J. Chemical diagenesis of carbonates; theory and application of trace element technique. SEPM Short Course No. 10, Dallas 1983
- 5 Tilley, B. J., Nesbitt, B. E. and Longstaffe, F. J. Thermal history of Alberta deep basin comparative study of fluid inclusion and vitrinite reflectance data. AAPG Bulletin, 1989, 73: 1206—1222
- 6 朱国华.陕北延长统砂体成岩作用与油气富集关系.石油勘探与开发, 1985
- 7 贝丰等著.鄂尔多斯盆地古生界含油气岩系有机-岩石学研究及天然气生成条件与评价.成都:成都科技大学出版社, 1995

DIAGENESIS OF THE CARBONATE ROCKS OF THE MAJIAGOU FORMATION IN THE ORDOS BASIN: FRACTURES AND THEIR IMPLICATIONS FOR OIL AND GAS STORAGE

Li Guorong

Chengdu University of Technology

ABSTRACT

Fractures are well developed in the carbonate rocks of the Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin. In this paper, the fractures investigated are interpreted as the products of diagenesis, and underwent seven stages of evolution, which have been distinguished in terms of the crosscutting relationships between the fractures, relationships between fractures and diagenetic fabrics, types and geochemical characteristics of the fillings within the fractures. Viewed from the history of the fracture formation, matching with that of organic matter maturation, the V and VI stages of fractures created by Yanshanian and Himalayan Movements, respectively may become valid fractures for oil and gas storage, and play an important part in the migration and accumulation of oil and gas in the central part of the basin and the Tertiary faulted trough areas.

Key words: fracture, implications for oil and gas storage, carbonate rock, Majiagou Formation, Ordos Basin