

文章编号: 1001-6112(2006)01-0065-08

成岩作用的研究现状及展望

刘建清^{1,2}, 赖兴运¹, 于炳松¹, 陈晓林¹, 隋成¹

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 成都地质矿产研究所 沉积与能源地质研究室, 成都 610082)

摘要:近年来,随着油气勘探的深入发展,成岩作用在理论研究及具体实践中都取得了长足的进展,包括:有机质热降解机理及次生孔隙的研究;化学热力学平衡理论对于成岩反应热力学条件及状况的标定;流体、温度、压力、盆地沉降史等多位一体高度综合的石油地质分析;成岩作用与现代地层学、沉积学研究的紧密结合等。成岩作用研究未来的发展趋势是:继续开展成岩作用实验研究和成岩作用热力学模拟;以盆地—成岩作用系统分析的新观点深化成岩作用研究;探讨地层水的来源及对成岩作用的影响。

关键词:有机酸溶蚀;成岩反应;热力学平衡;库车坳陷;塔里木盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

成岩作用是极其复杂的物理化学过程,其影响因素的多变和过程的复杂性主要体现在岩石成分的复杂性、流体来源的广泛性、温度、压力等成岩环境条件的多变性等。储层孔隙演化的过程同时受到沉积体系、古气候、盆地沉降与折返等多因素的作用和影响,体现了有机和无机界长时间作用的结果。因此,重塑一个地区成岩演化的历史是一项十分艰难的工作,这不仅需要对各种成岩影响因素作深入的理论探讨,同时需要对具体地区的地质背景作出合理和科学的分析,中外地质工作者为此作了大量的研究工作。本文旨在介绍近 30 年来,成岩作用研究领域的一些主要进展和特色。

1 成岩作用中有机地球化学研究进展

成岩作用中有机地球化学研究的进展主要体现在有机酸的来源、分布及对矿物稳定性的影响,烃类与岩石间的氧化—还原反应等。

1.1 有机酸来源、分布及其对矿物稳定性的影响

成岩作用中有机酸之所以令沉积学界、地球化学界关注,主要是由于它可促使矿物溶解,产生次生孔隙。通过热解模拟实验,有机酸被认为来自干酪根成熟作用,但是对其生成时间看法不一。Surdam 等(1984)^[1]认为生成于原油进入储集层之前的干酪根未成熟—低成熟阶段;Barth 等(1984)^[2]认为可持续到烃类生成的终点;Kharaka 等(1993)^[3]的研

究发现,原油热变裂解作用也是其来源之一,但是由于原油中氧元素远低于其母质,所以只有外来氧的介入,才能产生较多的有机酸;Surdam 等(1993)^[4]和 Machel 等(1995)^[5]认为,在特定的条件下,微生物和矿物氧化剂能使烃类氧化,是有机酸不可忽视的成因。陈传平等^[6]通过水热解模拟实验揭示了油田水中低分子量有机酸的 3 种主要来源:1) 干酪根的断裂产生,伴随着干酪根热演化的全过程,主要发生在成熟早期阶段;2) 地下水中微生物对原油的降解及游离氧气的氧化作用;3) 围岩矿物中的高价元素组成的离子或化合物,如 Fe^{3+} , SO_4^{2-} 等,与有机质之间发生的氧化—还原反应所产生,反应受较高温度控制。

在储层温度 80~120 范围内,油田水可含高达 $10\,000 \times 10^{-6}$ 的一元羧酸和 $2\,500 \times 10^{-6}$ 的二元羧酸阴离子。重新评估测试结果后,认为二元羧酸可能低于 500 mg/L ^[7]。另外,有机酸分布的地温范围也存在争议,如加利福尼亚盆地储层温度在 120~150 的油田水中仍实测出高达 $(1\,500 \sim 5\,000) \times 10^{-6}$ 的有机酸^[8],墨西哥湾新生界高有机酸浓度也分布在 135~140 的储层中。高温下乙酸根在 100~200,甚至 200 以上,可能仍是稳定的^[9]。可见,有机酸高温裂解机理并不很清楚。

有机酸对矿物稳定性的影响是通过提供 H^+ 和络合金属元素,来提高矿物的溶解度。实测数据表

收稿日期:2003-10-10;修订日期:2005-12-28。

作者简介:刘建清(1969—),男(汉族),四川成都人,硕士,主要从事油气地质研究工作。

基金项目:国家 973 项目(2001CB209104)。

明,有机酸离子可贡献高达 90% 的总碱度^[10],有机酸因而控制了地层水的碱度。有机酸还能够络合 Ca, Mg, Al, Si 等元素,已得到模拟实验的普遍证实^[7],硅的络合物也已被观察到^[8]。San Joaquin 盆地 Al 浓度高达 2~6 mg/L,被认为以 Al 络合物形式存在。但是,金属元素的有机络合作用可能被夸大了^[9],金属络合物稳定常数的实验测定,是 20 世纪 90 年代以来活跃的研究课题。

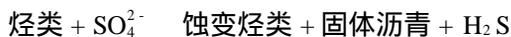
1.2 烃类与岩石间的氧化—还原反应

1.2.1 烃类与矿物氧化剂间的氧化—还原反应

烃类侵入到含矿物氧化剂(如褐铁矿)的储层中,可导致烃类发生氧化作用,褐铁矿被还原而使红色砂岩漂白,并可产生有机酸,使碳酸盐胶结物发生溶解,产生次生孔隙^[5]。高含褐铁矿的红色砂岩物性差,而白色还原带物性好,多孔。

1.2.2 烃类的硫酸盐还原作用

烃类的硫酸盐还原作用包括热化学硫酸盐还原作用(TSR)和微生物硫酸盐还原作用(BSR)。TSR 包括甲烷气^[11]、原油^[12]、早期形成沥青的硫酸盐还原作用。甲烷气 TSR 生成 CO₂ 和 H₂S 气体;而原油和沥青的 TSR 还可导致沥青的形成:



微生物硫酸盐还原菌一般被认为只能消耗喜氧细菌,降解烃类的代谢产物有机酸等^[3,4]。近年来,人们发现 BSR 可直接消耗甲烷和 C₁₂ 以上的烃类^[13],其最终产物与 TSR 一致,两者都可使地层中富含 H₂S 气体,并形成酸性地层水,促进岩石骨架及胶结物的溶解。

BSR 和 TSR 的区分,目前主要依据地温、H₂S 含量、硫同位素等。一般认为,硫酸盐还原菌多存在于 0~80 ℃^[4],而 TSR 发生在 100~140 ℃ 及以上^[11,12];前者生成的 H₂S 气体含量低于 5%,而后者高于 10%^[11];后者生成的 H₂S 和固体硫化物的硫同位素接近硫酸盐矿物的硫同位素,前者低于此值^[13]。

以上理论的提出与发展,尽管存在分歧,并未取得完全的一致,但为深部油气勘探提供了重要的理论基础。

2 成岩作用与“三场”研究的紧密结合

成岩作用发生在油气盆地中,成岩环境的变迁及成岩作用的各个阶段与流体的化学成分、温度、压力条件以及有机质的热降解、盆地的沉降折返等密切相关,将油气盆地成岩史及其相关的温度场、压力场、源岩排烃史、油气运聚史的研究纳入到统一的时

空发展演化过程进行综合全面的石油地质研究,是现今成岩作用研究的一个显著特点。

2.1 成岩作用中的流体历史分析法

地壳中热流体活动就是指地壳中的流体作用。流体的涵义很广泛,除包括 H₂O, CO₂, 烃类化合物, H₂S, N₂, H₂ 等流体外,还包括地壳深部熔融的岩浆。地质学中引入流体概念可追溯到 100 年前。虽然上世纪 50 年代以来人们通过对流体包裹体和水—岩反应的研究已意识到流体是地壳内部一种活跃的营力,但是由于传统理论和技术条件上的影响和限制,人们仍然把固体岩石作为研究中心,忽略地壳流体的作用。直到近 10 年来,由于深部流体活动现象的不断揭示,人们才逐渐认识到地壳中物质和能量在很大程度上是通过流体进行搬运和传输的,地壳流体直接影响和控制着地壳内部的构造、成岩、变质、成矿等重大地质作用。用流体作用的观点不仅可以检验、修正和完善地质科学,而且还可能建立全新的地质理论。因此,当前世界各国都把地壳流体作用列为发展地质科学的重大基础理论研究课题之一^[14]。

石油与天然气运移主要发生在沉积盆地之中,是整个地壳流体活动的一部分,和地壳流体作用一样,长期以来也未受到应有的重视。20 世纪 70 年代以来,人们认识到运移是贯穿油气从生成到最终消亡全过程的纽带。流体的运移对于次生孔隙的形成和成岩演化有着至关重要的影响,也是盆地发展演化的一个重要侧面。同时,油气运移的动力、时期、通道和数量不仅是成岩作用、盆地分析研究的重要内容,也是实际勘探中要解决的关键问题。因此,20 世纪 80 年代以来,油气运移、成岩作用、盆地分析研究相互渗透,并取得了长足的进展。将成岩作用、油气的成藏史等纳入到盆地发展演化历史中统一考虑,是当前研究的一个趋势所在。

成岩作用中自生矿物及其流体包裹体是目前流体历史研究中最有效的方法之一,其中自生矿物流体包裹体真实地记录了成岩的古地温、古压力、古水介质环境(如 Eh, pH 值)及古流体成分,是油气成藏演化及成岩环境变化的全息信息库,对于研究油气运移及成岩作用的阶段、期次、时间有着重要的作用^[15]。图 1 是塔里木盆地库车坳陷的实例,从图中可以看出,方解石胶结物均一温度分布范围主要集中在 80~100 ℃,温度较低,并且其分布深度广,样品采集几率高,是该区主要的胶结物类型,反映出一次普遍而广泛的成岩作用事件;结合其形成温度较低的特点,可以认为方解石代表了同生—早成岩时期碱性成岩环境的产物,它可能经历了较长的地

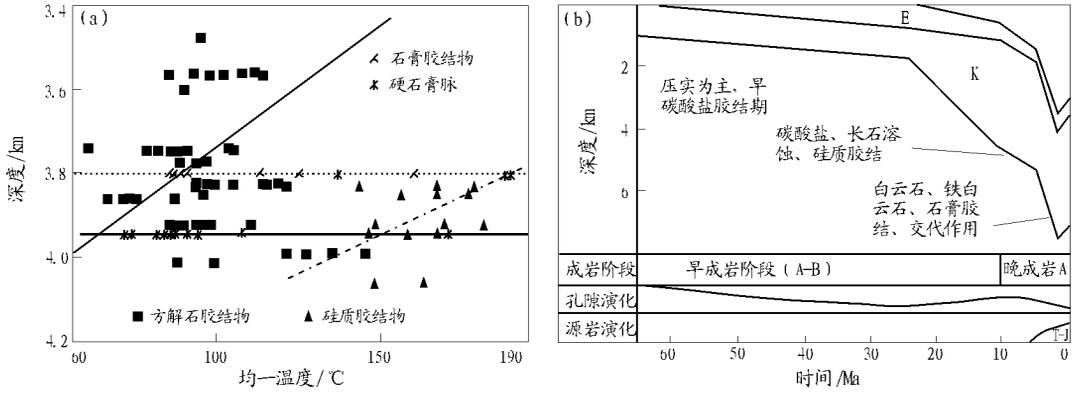


图 1 塔里木盆地库车坳陷克拉 2 气田储层流体包裹体特征及成岩演化模式^[4]

Fig. 1 The characteristics of fluid inclusion and the model of diagenesis evolution in Kela 2 gas field of the Kuche Depression, the Tarim Basin

质时期,是沉积后到深埋期间一段较长时间内孔隙水演化的结果。储层中硅质胶结物均一温度主要分布在 180 ,从样品采出深度看,主要位于 3 800 m 优质储层段附近;硅质胶结物是长石溶解的结果,因此,这一期成岩作用的时期,应当代表了酸性流体侵位情况下,长石、方解石溶蚀这一成岩作用阶段;按地表平均温度 18 ,每 100 m 地温梯度 2.9 计算,该类胶结物形成深度应 > 5 000 m,因此,现今硅质胶结物的位置实际上是盆地折返抬升的结果,这一期成岩事件应是盆地深埋时期形成的。第三期热事件最高温度 300 ,并具有均一温度跨度大的特点,即在一处发现有包裹体,其均一温度会有高有低,具有明显的热液活动的特点;一次热液活动都是由低温到高温,后又降到围岩温度;这一期胶结物为硬石膏及白云石,它应代表盆地折返抬升时,南天山造山带向南逆冲推覆变形,构造增温(剪切生热)的

结果。以上 3 个成岩作用阶段与盆地的浅埋、深埋、深埋—折返 3 个演化阶段及有机质的成熟降解、裂解、孔隙演化有着密切的联系。

2.2 成岩作用压力场的探讨

近年来,对于成岩环境压力场及其对成岩作用影响的探讨,是该领域研究的重要内容之一,这主要是由于近年来发现的深部优质储层与异常流体压力在空间上有密切的联系,如美国海湾地区、新疆库车坳陷(图 2)。异常流体高压是指地层中孔隙流体压力远大于静水压力,它的产生机理,目前仍未完全研究清楚。通常认为,异常流体高压的产生与大地构造背景(如盆地抬升、逆冲推覆等)、欠压实、有机质成熟排烃动力、水热增压、放射性元素蜕变生热、粘土矿物脱水、油向气的裂解等有关。对于地层条件下孔隙流体压力的确定,可以采用钻井实测数据以及钻井液密度、地震、测井等多种方式间接获取。由

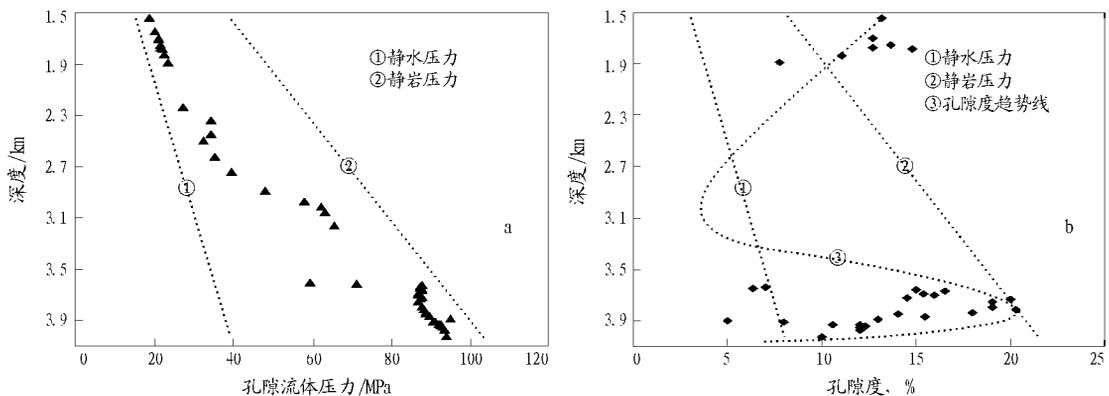


图 2 塔里木盆地库车坳陷克拉 2 气田地层压力系统中超高压带与次生孔隙发育带的相关性

a. 为孔隙流体压力随深度的变化。其中深度为 1 500 ~ 2 500 m 时孔隙流体压力接近静水压力,为正常压力带;2 500 ~ 3 700 m 时,孔隙流体压力高于静水压力,为异常压力带;深度 > 3 700 m,孔隙流体压力接近静岩压力,为超高压带;b. 为孔隙度随深度的变化情况,其中 3 800 m 左右,孔隙度呈明显深部异常,并与地层压力系统中超高压带一致

Fig. 2 The overpressure in strata system and it's relationship with the secondary porosity in Kela 2 gas field of the Kuche Depression, the Tarim Basin

库车坳陷的实例(图 2)可以看出,该区深部物性异常与孔隙流体超高压带有着明显的一致。关于超高压在成岩作用中的作用,目前人们只是注意到这种现象,并未作深入的理论研究。就其现实意义而言,它可能一是在成岩作用中客观上起到了一个物理化学变量的作用,二是其动力学机制,即促使流体进入储层在广泛的空间中进行成岩反应,并对形成的次生孔隙起到了一个“充涨”和保持作用。成岩环境中温度、压力的确定,也是近年发展起来的油气成藏动力学的重要研究内容。

3 成岩作用研究中的化学热力学方法

成岩作用是极其复杂的,成岩体系中往往同时进行着多个成岩反应,这些反应之间相互影响和制约。如何评价地层温、压条件下,各成岩反应的热力学平衡条件及成岩反应的具体状况(正向,逆向,还是处于平衡),并评价它们对于储层次生孔隙形成的影响,是次生孔隙研究中必须解决的问题。化学热力学平衡理论为此项研究工作提供了科学的理论基础。将热力学原理应用于碎屑岩的成岩过程,确定成岩过程中碎屑矿物的稳定性及相关性是过去 30 年来沉积地球化学的一个重要进展^[16,17],对于推动成岩作用由定性到定量的研究起着重要作用。根据化学热力学平衡原理,当化学(成岩)反应达到平衡时,可有如下化学方程:

$$H_{Tr, Pr} + \frac{T}{Tr} C_p dT + \frac{P}{Pr} V_s dP - T S_{Tr, Pr} - T \frac{C_p}{Tr} dT + RT \ln K = 0$$

式中: $H_{Tr, Pr}$ 和 $S_{Tr, Pr}$ 分别指 25、1 个大气压时

反应生成物与反应物焓、熵的差值; V_s 指温度和压力为 T 和 P 时反应前后的体积改变量,对于温度、压力不高的成岩反应来说, V_s 与温度、压力的关系不大,即矿物的压缩因子和膨胀因子为 0, $V_{P, T} = V_{Pr, Tr}$; C_p 为矿物的摩尔热容,其一般表述形式为: $C_p = a + bT + cT^2$,其中, a, b, c 为与矿物有关的常数; R 为理想气体常数; K 为 P, T 条件下特定反应的化学平衡常数。

由式中可以看出,当温度、压力一定时,特定反应的化学平衡常数也就唯一地确定了。换言之,对于特定反应而言,化学平衡常数是温度、压力的函数。当成岩反应达到平衡时,其生成物、反应物的比例关系与化学平衡常数一致;未达到平衡时,则不一致。因此,可以利用地层水特征来标定和表征成岩反应的状况,分析成岩反应对次生孔隙的具体影响和贡献。图 3 是库车坳陷的实例,图 3a 表明斜长石系列中钠长石端元处于部分溶解状态,图 3b 表明斜长石系列中钙长石端元处于完全溶解状态。需要说明的是,固溶体矿物(如斜长石)等作为一种特殊的固体溶液,在热力学计算中必须考虑其活度,其活度值与所选定的矿物模型相关。对于成岩体系中的多个成岩反应,例如方解石胶结物的溶解、白云石对方解石的交代,都可以采用与上相同的理论和方法进行分别的计算和分析。从上面的实例中可以看出,斜长石在该区的溶蚀存在选择性和不彻底性,对于次生孔隙的贡献并不如想象中那么重要。同时,该理论的应用只能建立成岩反应在 T, P 条件下的热力学平衡条件,并分析成岩反应现时的进行状态,它不能反映成岩反应的历史。因此,必须进行综合的研究,如流体包裹体的研究等,才能得出全面和历史的认识。

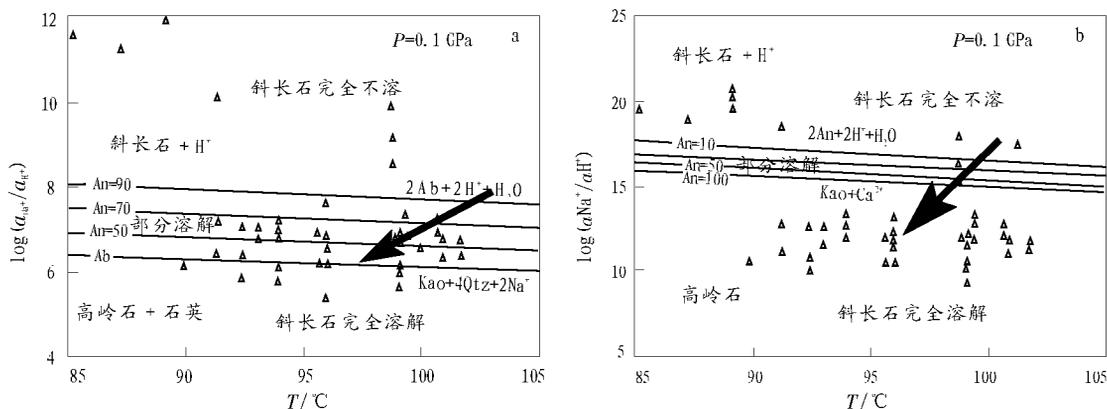


图 3 塔里木盆地库车坳陷白垩系储层斜长石的溶解状态^[18]

An 为斜长石中钙长石的摩尔百分含量; Ab 为钠长石

Fig. 3 The feldspar dissolution situation of Cretaceous reservoir in the Kuche depression, the Tarim Basin

4 成岩作用研究与现代地层学、沉积学的结合

层序地层学是上世纪 80 年代后期从被动大陆边缘海相地层的地质地层学研究发展起来的一门新兴学科,是现代地层学、沉积学、地球物理学和计算机技术相结合的产物。随着层序地层学理论及其应用技术的不断发展,其应用范围已经扩展到各种环境类型的地层。层序地层学的研究手段很多,除了传统的研究方法外,特别是在油田进入开发期后,结合各种计算机油藏描述技术,层序地层的研究精度已由原来的三级层序提高到高分辨率(四、五级),并在油气勘探和开发的各个阶段起着越来越重要的作用。层序地层学现今有 3 大学派,以 Vail 为代表的经典层序地层学派,以 Gallaway 为代表的最大海(湖)泛面划分层序边界的学派,及以 Ross 为代表的科罗拉多高分辨率层序地层学学派。它们都有一个共同的理论前提,即沉积物可容纳空间变化及沉积响应受海(湖)平面变化、地壳沉降速率、沉积物供应速率及气候 4 大因素控制。

层序地层的核心在于确定旋回的等时地层格架及时间地层格架内沉积地层的分布型式。对于海相盆地,特别强调海平面对层序成因和相分布的控制作用;而在陆相盆地中,决定沉积物堆积可容纳空间的是沉积基准面。沉积基准面周期性变化造成的可容纳空间的变化控制了层序的形成、层序间的关系以及层序内部不同相带的分布,也决定了生、储、盖组合特征及含油气系统的形成,决定了不同地区的油气远景和油气藏特征。

近年来的研究中,人们注意到在层序体系内部不同部位或者基准面变化的不同部位,由于水动力条件、Eh 和 pH 值条件以及含盐度的不同,导致了沉积体系原生储集物性、沉积水介质或原生孔隙度的较大差异,并对同生期和后期成岩作用有直接的控制作用。在基准面较低时期,由于水动力条件较

强,沉积物粒度较粗,筛选也较充分,其孔隙度、渗透率较好,对后期成岩作用中流体的充注与扩散、矿物的溶蚀以及次生孔隙的形成有着积极的作用。特别是在一些快速埋藏、逆冲推覆的欠压实盆地中,储层沉积旋回的变化与物性的变化(包括次生孔隙)有着密切的相关性。因此,对于这些盆地沉积基准面旋回的分析,不仅可以弄清成因(或等时)储层单元在空间的展布形态,研究盆地的沉积演化历史,而且可以对储层空间物性变化进行预测和分析。

5 成岩作用研究应用的实例分析

随着油气勘探的深入发展,深埋条件下储层储集物性严重偏离正常压实曲线的现象受到了人们的日益关注,新疆库车坳陷克拉 2 气田就是这一情况的典型实例。该气田是中国最大的陆相气田之一,位于勘探前景良好的塔里木盆地库车坳陷,是中国重要的能源基地。因此,研究其深层优质储层的成因及保持机理,不仅是学科本身发展的要求,也是油气勘探中亟待解决的实际问题。

对塔里木盆地库车坳陷的研究表明,该区储层物性异常带与地层压力系统中超高压带一致(图 2),处于一个相对封闭的体系或异常压力流体封存箱中。同时,该区自生矿物还表现出明显的分带性,并与储层物性呈明显的相关关系。该区深层储集岩从上至下依次为硫酸盐带、方解石带、白云石带、方解石带(表 1)。

硫酸盐带以下第三系底部的膏盐岩层为代表,深度 < 3 640 m,储层砂岩中出现孔隙式胶结的石膏晶体,同时有方解石、白云石等碳酸盐自生矿物,其中的硫以 +6 价的形式出现代表了强氧化介质成岩环境。

白云石带出现于白垩系顶部巴什基其克组的第一段,在克拉苏构造深度 3 670 ~ 3 970 m 之间,标志性矿物为白云石、铁白云石,无方解石出现,但有大量的粘土矿物(高岭石、I/S 混层、伊利石、伊利石/蒙脱石混层矿物、绿泥石)。该带中出现典型的还原性矿物黄铁矿,硫以 -2 价的形式出现,反映了强还原性介质条件,与储层物性异常明显一致(图 4)。

表 1 库车坳陷克拉 2 气田储层自生矿物分带

Table 1 The zoned characteristics of self-reproducing minerals in Kela 2 gas field of the Kuiche Depression

矿物带	深度/m	成因意义	标型矿物及共生矿物
硫酸盐	< 3 640	矿物氧化带, S ⁺⁶	石膏、硬石膏、方解石、白云石
方解石	< 3 670 和 > 3 970	方解石与白云石平衡共生带, 弱氧化-弱还原	白云石、方解石、黄铁矿、少量粘土矿物
白云石	3 670 ~ 3 970	方解石溶解, 白云石化带, 强矿物还原带, S ²⁻ , 成岩化学作用强发生带	白云石、铁白云石、大量自生粘土矿物(高岭石、I/S 混层矿物、伊利石、绿泥石/蒙脱石混层矿物、绿泥石)

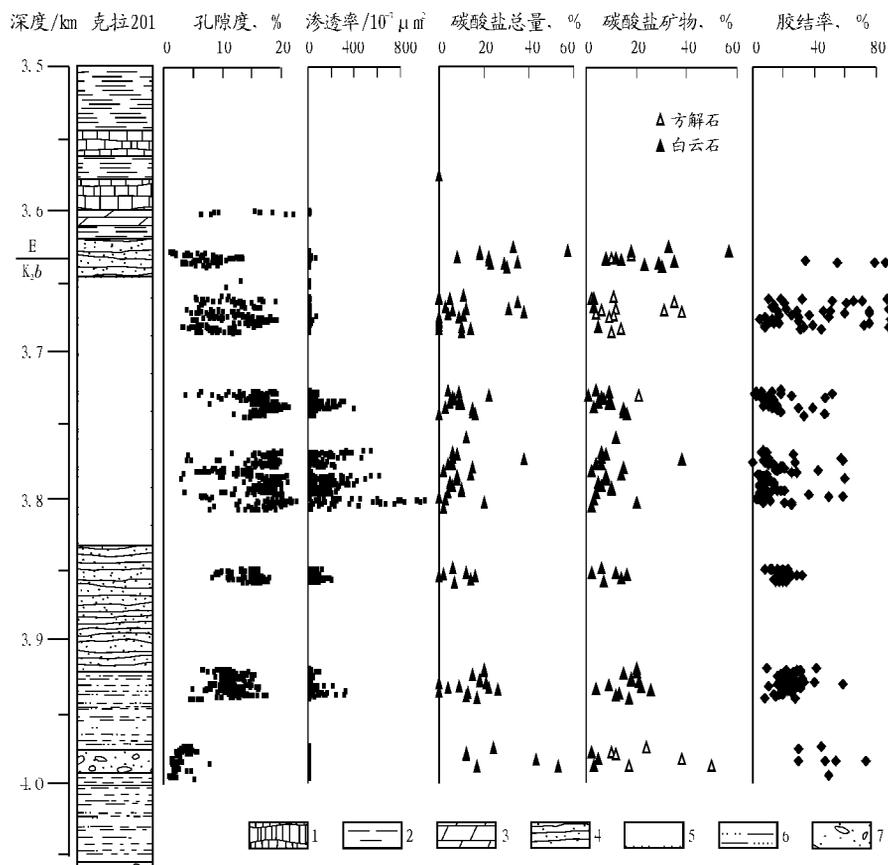


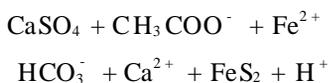
图 4 库车坳陷克拉 2 气田次生孔隙带与自生矿物分带及胶结率的关系

1. 石膏; 2. 泥岩; 3. 白云岩; 4. 泥质砂岩; 5. 细砂岩; 6. 粉砂岩; 7. 砾岩

Fig. 4 The self-reproducing mineral assemblage, cementation ratio and their relationship with the secondary porosity in the Kela 2 gas field of the Kuche Depression

方解石带分别出现于白云石带的顶部 (< 3 670 m) 和底部 (> 3 970 m), 与其伴生的矿物有白云石及少量的粘土矿物, 少量黄铁矿的出现表明相对还原性的成岩环境。

从硫酸盐矿物氧化带至碳酸盐矿物还原带, 孔隙介质条件氧化 - 还原性质的转变表明本区下第三系底部盖层与下部白垩系碳酸盐胶结的砂岩储集层过渡带之间存在一个强烈的氧化 - 还原反应带:



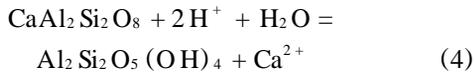
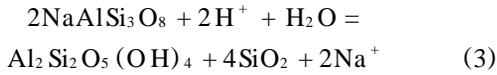
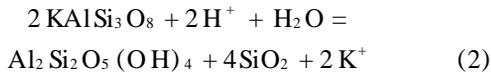
上式表明膏盐岩层与下部含有有机酸根 (如 CH_3COO^-) 流体发生反应, 使硫从 +6 价转变为 -2 价并与水中的 Fe^{2+} 结合形成黄铁矿, 同时释放出 H^+ 循环进入下部的砂岩层中, 促使方解石胶结物及长石、岩屑等骨架颗粒溶解, 有利于次生孔隙的发育。

该区储集岩的孔隙胶结物主要为方解石、白云石和铁白云石。但它们在纵向上呈不均一分布。储

层中孔隙度与渗透率的大小明显与碳酸盐的总量呈现负相关的趋势 (图 4), 即孔渗值最高的部位碳酸盐总量最低; 孔渗值降低的部位碳酸盐总量反而很高。显然, 储层中孔隙度和渗透率的分布与其中的碳酸盐矿物的地球化学行为特征密切相关。从方解石和白云石的纵向分布来看, 白云石含量从浅至深无明显的改变, 但方解石含量呈现出高一低一消失一低一高的趋势。这种现象反映了 3 800 m 左右处优质储层的出现与岩石中方解石的消失有直接的关系。储集岩中方解石的消失是成岩过程中早期方解石胶结物被深部流体溶解的结果。如图 5 所示, 孔隙中的方解石胶结物呈溶解残留体或被铁白云石取代, 而白云石不仅不存在溶解的现象, 而且还有铁白云石次生加大的现象。碳酸盐是该区储层的主要胶结物, 储层中方解石的溶蚀导致了孔、渗特性及胶结率呈联带规律的变化: 方解石含量低, 孔、渗值高, 而胶结率低。

库车坳陷油气主力储层为白垩系巴西盖组, 巴什基克组砂岩、细砂岩, 是一套典型的陆相磨拉石建造, 在地层水条件下, 涉及的成岩反应包括长石系

列的溶解、方解石的溶解、白云石对方解石的交代作用。



根据优质储层段温度、压力条件,可建立各成岩反应在成岩环境下的热力学平衡条件,并可依据孔隙水中离子的浓度(活度)特征,对各成岩反应的具体状态进行定量研究和分析。研究表明,库车坳陷白垩系储层长石系列中钾长石处于沉淀状态,钠长石处于部分溶解状态,钙长石大多处于溶解状态,即长石系列的溶解存在选择性和不彻底性^[18]。同时,地层水特征也显示出白云石对方解石的交代作用,这与在铸体薄片见到的情形是一致的(图 5)。然而,长石系列的溶解、白云石对方解石的交代,都因有新的固体矿物生成而不会有太大的体积空间形成,深埋地层条件下,大规模次生孔隙的形成,只能从方解石胶结物的溶蚀得到解释。同时,该区深部次生孔隙发育带处于沉积基准面由低-高-低的转换部位,储层沉积时处于较强的水动力环境^[19]。依据自生矿物流体包裹体特征,并结合古气候条件、古水介质特征及与盆地沉降史等的综合研究,可建立

该区成岩作用的演化历史及成岩作用模式(图 1)。

成岩作用研究的重大意义在于为深部油气勘探提供理论基础和科学依据。国家 973 项目(2001CB209104)结合库车坳陷实际,对成岩作用的影响因素进行了全面和历史的分析,主次分明,突出重点,紧密围绕该区深埋地层条件异常孔隙特征及形成机理,证实了有机酸对骨架矿物及胶结物的溶蚀是形成深部次生孔隙的根本因素,这将现实地扩大盆地的评价远景。在进一步的研究中,可结合钻井资料,进行地下水动力学的研究,根据地下水流动势特征,对次生孔隙进行分析和预测。在一些具备生烃潜力,地表为致密型储层的盆地也有可比和借鉴之处。

6 成岩作用研究未来的展望

1) 各种成岩作用的实验仍将广泛开展,这包括:有机质在地层温、压条件及地层水条件下的裂解机理;岩石骨架矿物及胶结物在地层水条件下的溶解速率、溶解平衡常数的测定;有机酸与无机酸在矿物溶解过程中的具体影响和差异;金属离子在有机酸条件下的络合机理及对成岩作用的影响以及模拟地层水运动状态及地质结构特点等。研究静态及动态条件下矿物的溶解特征及沉淀位置的不同,进一步深化成岩基础理论的研究,使各项研究具有重要的实际意义。

2) 以化学热力学平衡理论为基础的成岩作用热力学模拟仍将在成岩作用的定量研究中发挥重要作用,这项研究的深入进行取决于成岩环境下各种矿物的热力学参数的进一步完善、各种矿物模型更加精确以及地层水测试技术的进一步提高。

3) 盆地—成岩作用系统分析的新观点仍将是未

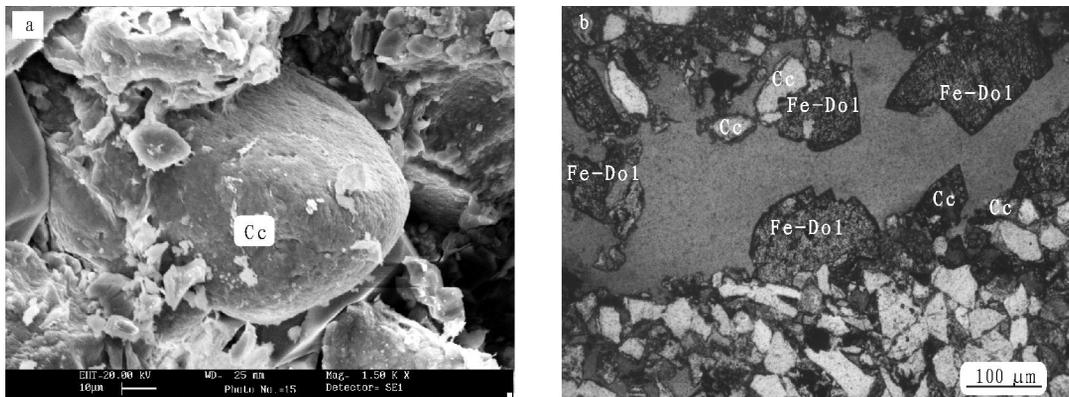


图 5 塔里木盆地库车坳陷方解石溶蚀、白云石交代方解石的典型图片

a. 克拉 201 井 3 923.27 m, 方解石溶蚀形成的秃顶状; b. 克拉 201 井 3 663 m 铸体片, 构造裂隙及白云石交代方解石现象, 铁白云石沿裂隙沉淀, 并在白云石(Dol)边部次生加大, 方解石(Cc)呈溶蚀残留体, 被铁白云石取代

Fig. 5 The typical pictures of calcite dissolution and the replacement of dolomite to calcite in the Kuche Depression, the Tarim Basin

来成岩作用研究中的一个显著特点,即将油气盆地的成岩史与油气的成藏演化史紧密结合起来,使成岩作用研究工作的开展能直接为油气勘探服务。

4) 地层水作为成岩反应的介质,在成岩作用的研究中占有重要的地位。地层水有多种可能的来源,如沉积封存水、地表水、泥岩挤出水、有机质热解产物等,应用碳、氧、锶等同位素值可分析地层水的来源以及 HCO_3^- 中碳是有机还是无机来源等。在未来的研究中,这仍将是一个发展的趋势,并和其它成岩手段的研究结合起来,互为印证,探讨地层水的来源及对成岩作用的影响,深化对成岩作用的研究。

5) 传统的成岩作用研究手段,如铸体薄片法、电镜扫描、X 衍射、阴极发光薄片、流体包裹体乃至各种钻井、测井、地震资料仍将在成岩研究中发挥重要作用,它们是认识各种成岩现象,获取各种成岩参数不可替代的重要步骤和工作方法。

谨以此文深切缅怀我的导师赖兴运副教授。赖老师因积劳成疾,不幸于出差途中去世。

参考文献:

- 1 Surdam R C, Boese S W, Crossey L J. The chemistry of secondary porosity[A]. In: McDonald D A, Surdam R C, eds. Clastic Diagenesis[M]. Tulsa: AAPG, 1985. 127 ~ 149
- 2 Barth T, Bjørlykke K. Organic acids from source rock maturation: generation potentials, transport mechanism and relevance for mineral diagenesis[J]. Applied Geochemistry, 1993, 8: 325 ~ 337
- 3 Kharaka Y K, Lungedard P D, Ambats G, et al. Generation of aliphatic acid anions and carbon dioxide by hydrous pyrolysis of crude oils[J]. Applied Geochemistry, 1993, 8: 317 ~ 324
- 4 Kachel H G, Krouse H R. Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction[J]. Applied Geochemistry, 1995, 10: 373 ~ 389
- 5 Surdam R C, Crossey L J, MacGowan. Redox reaction involving hydrocarbons and mineral oxidants: a mechanism for significant porosity enhancement in sandstones[J]. AAPG Bull, 1993, 77 (9): 1 509 ~ 1 818
- 6 陈传平, 梅博文, 易绍金等. 地层水中低分子量有机酸成因分析[J]. 石油学报, 1995, 16(4): 48 ~ 54
- 7 Giordano T H, Kharaka Y K. Organic ligand distribution and speciation in sedimentary basin brines, diagenetic fluids and related ore solutions[A]. In: Parnell J, ed. Geofluids: origin, migration and evolution of sedimentary basin[M]. London: The Geological society, 1994. 175 ~ 202
- 8 梅博文译. 储层地球化学译文集[M]. 西安: 西北大学出版社, 1991. 1 ~ 241
- 9 Fisher J B. Distribution and occurrence of aliphatic anions in deep subsurface waters[J]. Geochimica et Cosmochim Acta, 1987, 51 (9): 2 459 ~ 2 468
- 10 Willey L M, Kharaka Y K, Presser T S, et al. Short chain aliphatic acid anions in oil field waters and their contribution to the measured alkalinity[J]. Geochimica et Cosmochim Acta, 1975, 39: 1 707 ~ 1 711
- 11 Worden R H, Smalley P C, Oxtoby N H. Gas Souring by thermochemical sulfate reduction at 140 °C [J]. AAPG, 1995, 79 (6): 854 ~ 864
- 12 Sassen R. Geochemical and carbon isotopic studies of crude oil destruction, bitumen precipitation and sulfate reduction in the deep Smackover Formation [J]. Org Geochem, 1988, 12: 351 ~ 361
- 13 Kirkland D W, Denison E, Rooney M A. Diagenetic alteration of Permian strata at oil fields of south central Oklahoma, USA[J]. Marine Petroleum Geology, 1995, 12: 629 ~ 644
- 14 李明诚. 地壳中的热流体活动与油气运移[J]. 地学前缘, 1995, 2(3-4): 155 ~ 162
- 15 侯建国, 任丽华, 董春梅. 有机包裹体技术在油气运移与聚集中的应用研究[J]. 石油实验地质, 2005, 27(4): 409 ~ 413
- 16 Garreis R M, Christ C L. Solutions, Minerals and equilibria [M]. New York: Harper and Row, 1965. 1 ~ 450
- 17 Burley S D, Kantorwicz J D, Waugh B. Clastic diagenesis[A]. In: Brenchley P T, Williams B P eds. Sedimentology: Recent developments and applied aspects[C]. London: The Geological Society, 1995. 189 ~ 226
- 18 赖兴运, 于炳松, 陈军元等. 碎屑岩骨架颗粒溶解的热力学条件及其在克拉 2 气田的应用[J]. 中国科学(D), 2004, 34(1): 45 ~ 53
- 19 陈晓林. 塔里木盆地库车坳陷白垩系高分辨率层序地层与储层研究[D]: [学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2004

THE CURRENT SITUATION AND DEVELOPING TENDENCY OF THE STUDY ON DIA GENESIS

Liu Jianqing^{1,2}, Lai Xingyun¹, Yu Bingsong¹, Chen Xiaolin¹, Sui Cheng¹

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu, Sichuan 610082, China)

Abstract: With the development of oil and gas exploration, the study on diagenesis has made considerable progress both in theory and in practice. In this paper, a summary of the advances in the study on diagenesis (to be continued on page 77)

IN SITU VISUALIZATION OF PYROLYSIS OF ORGANIC MATTER IN HIGH TEMPERATURE AND HIGH PRESSURE WATER ——TAKING KEROGEN AND ASPHALT AS AN EXAMPLE

Chen Jinyang¹, Zhang Hong², Zheng Haifei³, Zeng Yishan³

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 201800, China;

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

3. School of the Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract : The in situ visualization of pyrolysis of kerogen and asphalt in high-temperature and high-pressure water studied by hydrothermal anvil cell. The phenomena of these two matter present great different. Kerogen pyrolyzes to liquid and gas phase hydrocarbon compounds in an inhomogeneous form at high temperature and high-pressure. These hydrocarbon compounds dissolve in water at high temperature and high pressure and separate out during the decrease of temperature to the ambient temperature. Asphalt dissolves in water at high temperature and high pressure firstly, with increasing temperature further, it finally reactions with water to form graphite-soot matter.

Key words : high-temperature and high-pressure; kerogen; asphalt; pyrolysis of organic matter; hydrothermal anvil cell; in situ visualization

(continued from page 72)

sis was given, mainly including the mechanism of organic matter thermal degradation and the formation of secondary pores, the determination of the diagenetic reaction thermodynamic equilibrium condition and state by using the chemical thermodynamic equilibrium theory, the petroleum geologic analysis of integrating basin fluid, temperature and pressure with the basin evolution history, the combination of contemporary sequence stratigraphic study with diagenesis. The future developing trends of diagenesis were put forward in this paper, including continue making researches on diagenetic experiment and thermodynamic analogy, deepening the study of diagenesis in a new way of basin-diagenesis system analysis, studying the source of formation water and its influences upon diagenesis.

Key words : dissolution of organic acids; diagenetic reaction; thermodynamic equilibrium; the Kuche Depression; the Tarim Basin