



煤系地层中砂岩火山尘填隙物的成岩作用特征 ——以鄂尔多斯盆地天然气储层为例

李向博^{1,2}, 王建伟²

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;
2. 胜利油田 现河采油厂 地质所, 山东 东营 257062)

摘要: 在晚石炭世—早二叠世, 鄂尔多斯盆地泥炭沼泽环境下发育的富含火山尘填隙物砂岩是煤成气的主要储集层。研究表明, 该类砂岩的原杂基主要由同沉积期初步水化作用的火山尘构成; 在煤系地层水环境下, 火山尘经过初步水化作用后并不能形成沸石族矿物, 主要形成了铝硅酸盐和硅酸盐的微细混合物; 在埋藏过程中, 砂岩火山尘填隙物的水岩反应受到煤系地层水介质性质及其活动性影响, 主要发生脱水收缩作用、溶解作用、蚀变作用、碳酸盐交代作用和重结晶作用; 火山尘填隙物的成岩作用在局部范围内可改善天然气储层, 但也增强了储层的非均质性。

关键词: 火山尘填隙物; 成岩作用; 煤系地层; 天然气储层; 鄂尔多斯

中图分类号: P588.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2007)01-0042-07

The formation and evolution of volcanic dust fillings of sandstone in coal measures strata of Ordos Basin

LI Xiang-bo^{1,2} and WANG Jian-wei²

(1. State Key Laboratory of Ore Deposits Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guizhou 550002, China; 2. Xianhe Oil Production Plant, Shengli Oilfield, Dongying 257062, China)

Abstract: During the period of Late Carboniferous and Early Permian, the sandstone with abundant volcanic dust fillings was mainly deposited in a peat marsh environment, which constituted a favorable reservoir of coal-formed gas in Ordos Basin. Studies show that the original fillings of sandstone are mainly superficially hydrolyzed volcanic dust, which is a superfine mixture of aluminosilicate and silicate. It is difficult for volcanic dust to form zeolite during hydrolyzing under the condition of acidic syngenetic water in a peat marsh environment. The tuff fillings of sandstone are susceptible to the property and activity of the formation water, and have mainly experienced syneresis, dissolution, alteration, carbonate metasomatism and recrystallization in a burial environment. The evolution of tuff fillings of sandstone can improve the quality of reservoir locally, but enhance the heterogeneity of reservoir regionally.

Key words: volcanic dust fillings; diagenesis; coal-bearing formation; gas reservoir; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地是华北地台次级构造单元, 其构造演化与兴蒙海槽和秦祁海槽的构造活动密切相关 (田在艺等, 1997)。盆地四周均以深大断层分别与东面的山西台背斜、西面的贺兰—六盘台褶带、南面

收稿日期: 2006-01-13, 修订日期: 2006-08-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G19990433) 教育部石油天然气成藏机理重点实验室基金项目

作者简介: 李向博(1967-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事地球化学和油气地质学研究工作, 电话: 13371503956, E-mail: lixiangbo@slf.com。

的秦岭地槽褶皱系和北面的内蒙古地轴为界,晚石炭世—早二叠世盆地周缘曾发生多期强烈的火山活动(李贵东等,1999)。

目前,盆地东部的太原阳泉剖面石炭系灰岩中夹有 23m 的凝灰岩层,盆地北部大青山剖面石炭—二叠系火山喷发岩发育共 12 期 39 层,盆地西部宁夏中卫石炭—二叠系也钻遇了厚达 500m 的火山岩层,而盆地内部石炭—二叠系尚未发现存在火山喷发作用的证据,但砂岩中广泛发育有火山尘填隙物(陈冬霞等,2002),其形成与埋藏演化对该区天然气储层的发育具有重要的影响。本文借助一些岩矿分析测试技术,通过对地层流体介质性质的演化和砂岩火山尘填隙物的水岩反应过程分析,初步探讨鄂尔多斯盆地煤系地层中砂岩火山尘填隙物的形成与埋藏演化机理,从而为该区天然气储层区域评价工作提供理论参考。

1 火山尘砂岩发育特征

鄂尔多斯盆地二叠系自下至上依次可以划分出下二叠统太原组上部、山西组、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组(蒋汉朝等,2002)。二叠系为本区天然气主要储集层系之一,主要发育河流—三角洲—湖沼沉积体系,自下而上划分出 14 个砂层组:山西组分为山 1—山 2;下石盒子组分为盒 8—盒 5;上石盒子组分为盒 4—盒 1;石千峰组分为峰 4—峰 1。结合数十口探井的岩石薄片鉴定结果,对砂岩中原杂基成分进行恢复结果表明,二叠系各个砂层组中砂岩的原杂基主要应为初步水解后的中酸性火山尘,含量为 5.1%~24%,平均为 8.5%。

西北方阿拉善—阴山古陆、南方秦祁古陆和西南方六盘山古陆是研究区二叠系陆源碎屑物质的主要来源(汪正江等,2001)。砂岩中石英颗粒和硅质岩屑含量较高,岩石类型以“高成分成熟度、低结构成熟度”的石英质砂岩为主,局部地区发育长石岩屑砂岩,胶结物主要有绿泥石薄膜、碳酸盐类胶结物、石英次生加大边和粒间自生石英晶芽等物质。杂基主要由伊利石、蚀变成因的“脏”高岭石和脱玻化或水云母化的火山灰尘构成。

关于该区“脏”高岭石的成因目前尚存在着一定的争议,一些学者提出“脏”高岭石是由长石颗粒蚀变而来的(刘锐娥等,2002)。显微镜下许多团块状“脏”高岭石主要分布在砂岩颗粒间,成分不纯,并且

与火山尘填隙物的蚀变残留部分呈渐变接触关系,这充分说明“脏”高岭石是砂岩火山尘填隙物的主要蚀变产物之一(图 1a)。实际上,该区砂岩的火山尘填隙物含量较高,但保存状况差异比较大,其中部分火山尘填隙物发生溶蚀或蚀变为“脏”高岭石。在显微镜下,保存好的砂岩火山尘填隙物呈类似泥质特征,光性方位不明显,全孔隙式充填砂岩颗粒间(图 1b);扫描电镜下各种组份粒度十分微细,为条片状铝硅酸盐矿物和粒状硅酸盐矿物集合体。

2 砂岩火山尘填隙物的成岩作用

鄂尔多斯盆地石炭—二叠系是一个重要的聚煤层系,地层水介质性质与煤系有机质演化密切相关(图 2)。自同生期至浅埋藏期,有机质成岩演化主要受到生物化学作用控制。泥炭层沉积时的沼泽环境多呈酸性,当泥炭转入褐煤的过程中,腐殖酸转变为腐殖质,地层水酸碱度逐渐升高(郑浚茂等,1997)。随着埋藏深度的增加,当温度达到 80~120℃时,有机质的成岩演化主要受到热动力作用,粘土矿物达到第 2 个脱水高峰,并释放出大量有机—无机酸根离子,从而导致了地层水再次出现弱酸性,进入到晚成岩 B 阶段中、后期,多元有机酸根离子发生热分解,储层水介质开始逐渐变为弱碱性(Surdam *et al.*, 1989)。

以地层水介质为媒介,煤系地层有机质的埋藏演化与砂岩的成岩演化并不是孤立进行的。在埋藏演化过程中,受到煤系地层水介质性质波动性和活动性影响,火山尘填隙物主要发生了脱水收缩作用、溶解作用、蚀变作用、碳酸盐交代作用和重结晶作用(图 3)。

2.1 脱水收缩作用

显微镜下,保存较好的砂岩火山尘填隙物发育单支或多支收缩缝隙,宽度为 10~50 μm。火山尘填隙物经常沿着收缩缝发生蚀变,蚀变产物为高岭石(图 1c)。砂岩火山尘填隙物发育有大量的收缩缝表明,在埋藏早期阶段,火山尘填隙物应主要以压实作用为主,在脱水过程中导致了单支或多支收缩缝隙的形成。这些收缩缝隙成为后继交代作用、蚀变作用及溶蚀作用的突破口,从而只有少量收缩缝隙可以得到较好保存,并且主要发育在远离二叠系底部主力煤层的上部。

2.2 溶解作用

本区砂岩颗粒主要由石英及石英质岩屑构成,充

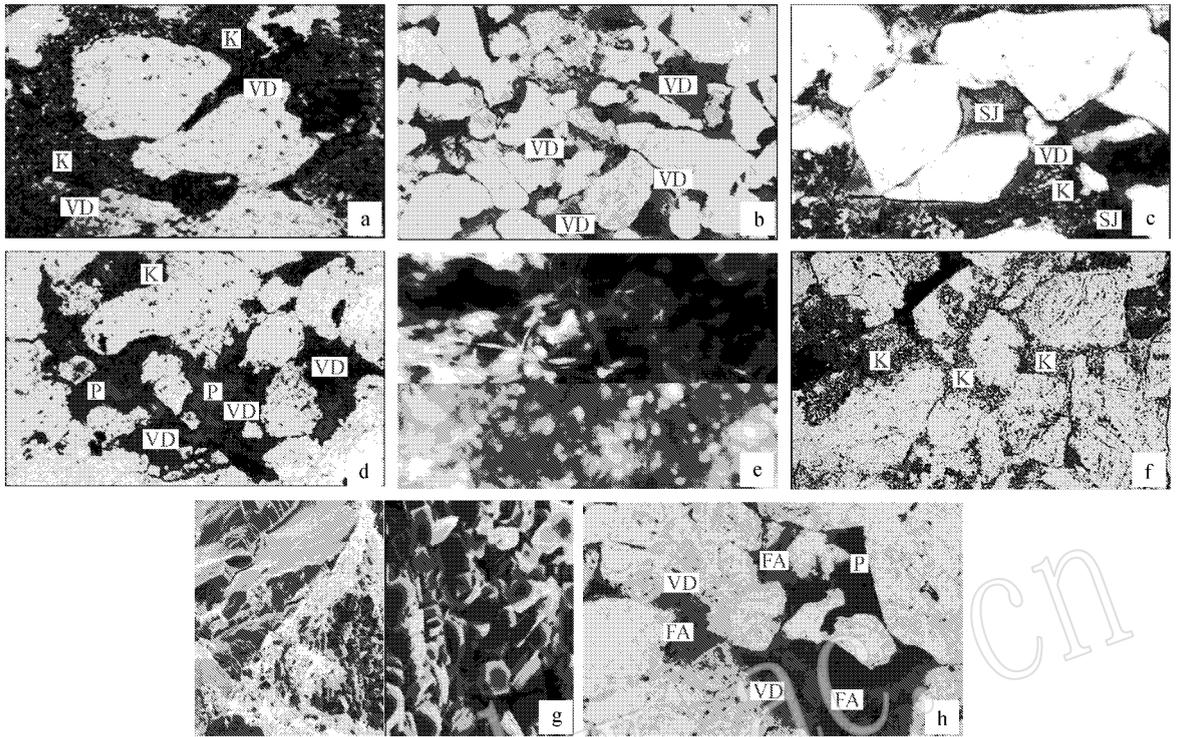


图 1 火山尘填隙物显微照片

Fig. 1 Photographs of volcanic dust fillings

a—“脏”高岭石团块(K)及其边缘的火山尘填隙物残余(VD), 陕 188 井, 下石盒子组, $40\times$, 单偏光; b—砂岩颗粒间的火山尘填隙物(VD)呈全孔隙式充填, 定探 1 井, 上石盒子组, $32\times$, 单偏光; c—砂岩颗粒间火山尘填隙物(VD)沿收缩缝(SJ)发生蚀变, 呼鲁斯台剖面, 下石盒子组, $40\times$, 单偏光; d—粒间溶蚀(P)发育, 孔隙边缘具有“脏”高岭石(K)及火山尘填隙物残余(VD), 苏 5 井, 山西组, $64\times$, 单偏光; e—火山尘填隙物为显微颗粒状矿物和条片状矿物组成的混合物(上部分), 实验条件下用 25% 乙酸溶液将条片状矿物全部溶蚀掉, 残留有大量硅质微球粒(下部分), 鄂 7 井, 盒 6 砂层组, $3000\times$, 扫描电镜; f—砂岩粒间主要充填由火山尘填隙物蚀变所形成的“脏”高岭石团块(K), 色 1 井, 山西组山 1 段, $40\times$, 单偏光; g—砂岩颗粒间火山尘孔隙物蚀变成的“脏”高岭石, 自形程度较差, 苏 12 井, 下石盒子组, 左 $400\times$, 右 $2000\times$, 扫描电镜; h—铁方解石(FA)沿火山尘填隙物收缩缝进行交代, 发育“脏”高岭石晶间孔隙(P), 淳探 1 井, 4550.75 m , 下石盒子组, $40\times$, 单偏光

a—kaolinite lump(K) and rings of volcanic dust(VD), Well Shaan 188, Xiashihezi Formation, $40\times$, plainlight; b—volcanic dust filling(VD) pores of sandstones, Well Dingtan 1, Shangshihezi Formation, $32\times$, plainlight; c—dissolution and alteration along the shrinkage joints(SJ) of volcanic dust(VD), outcrop of Hulustai, Xiashihezi Formation, $40\times$, plainlight; d—sandstones with well developed secondary pores from dissolution and alteration, with some volcanic dust residue and kaolinite lump(K), Well Su 5, Shanxi Formation, $64\times$, plainlight; e—volcanic dust fillings of sandstones, representing mixture of aluminosilicate and silicate at the upper part of the picture, and dissolution of aluminosilicate with 25% ethanoic acid solution under the experimental condition in the lower part of the picture. Well of E7, Xiashihezi Formation, $3000\times$, SEM; f—large quantities of kaolinite lump(K) from alteration of volcanic dust existing in sandstones, Well Se1, Shanxi Formation, $40\times$, plainlight; g—kaolinite assuming poor automorphism in sandstones, Well Su12, Xiashihezi Formation, $400\times$ (left) and $2000\times$ (right), SEM; h—ferrocalsite(FA) replacing volcanic dust(VD) selectively along the shrinkage joints, kaolinite lump(P) with rich intercrystal pores, Well of Chunta 1, 4550.75 m , Xiashihezi Formation, $40\times$, plainlight.

填于颗粒间的火山尘填隙物成为砂岩的主要可溶组分。铸体薄片鉴定结果表明, 研究区大量溶蚀孔隙系火山尘填隙物的溶蚀作用造成的。溶蚀孔隙的形态不规则, 外形呈港湾状, 孔径大小和分布不均匀, 最大孔径可达到 $500\mu\text{m}$, 内部常被“脏”高岭石及碳酸盐胶结物充填(图 1d)。

为了进一步研究火山尘填隙物的可溶蚀性, 在实验室模拟地层水对火山尘填隙物进行溶蚀性实

验, 并在环境扫描电镜下配合能谱同位观察火山尘填隙物的溶蚀状况(王建伟, 2004)。实验样品取自苏 7 井、苏 15 井和鄂 7 井的上石盒子组砂岩, 砂岩颗粒间火山尘填隙物含量高, 呈全孔隙式充填。溶蚀实验持续时间 25 d 共计 600 h, 实验温度为 $88\pm 2^\circ\text{C}$, 25% 浓度乙酸溶液中溶出量为 $0.2\% \sim 4.6\%$, 5% 浓度乙酸溶液中溶出量 $0.1\% \sim 3.6\%$ 。溶蚀实验后, 砂岩火山尘填隙物中大量的酸性不稳定条片

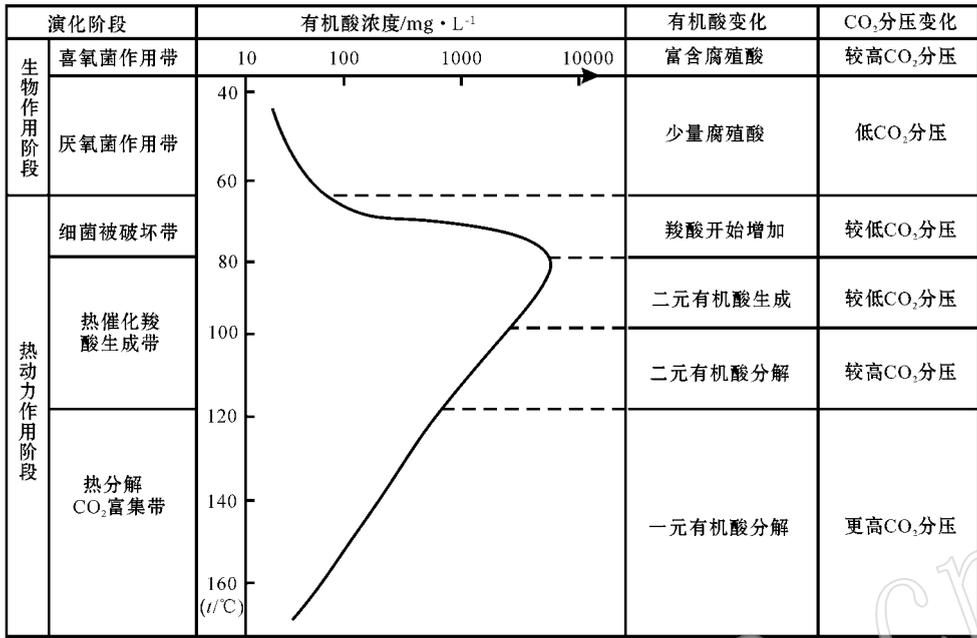


图 2 煤系地层有机质埋藏演化与地层水介质性质波动特征 [据 Surdam 等(1989)修改]

Fig. 2 Fluctuation of water property with organic evolution of coal measures strata(modified after Surdam *et al.* ,1989)

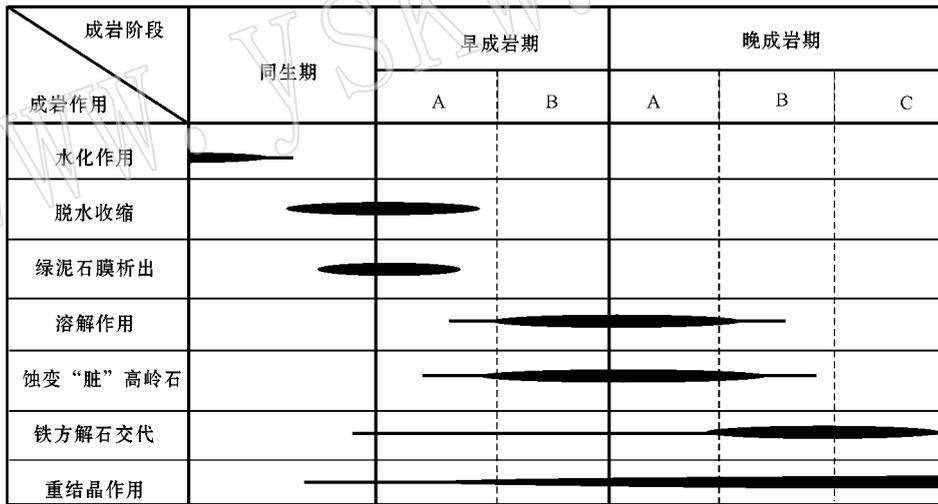


图 3 埋藏过程中砂岩火山尘填隙物的成岩演化模式图

Fig. 3 Diagenetic model of volcanic dust fillings of sandstone in the burial process

状矿物发生溶蚀,主要残留微细的硅酸盐颗粒(图 1e)。模拟环境下酸性水具有很大的流通性,而溶蚀产物可以立即带出。因此,该实验基本上能反映出,在流通性很好的理想弱酸性水环境下,砂岩的火山尘填隙物具有可溶性。另外,本次实验仅以酸性溶液作为溶蚀剂,未能对火山尘填隙物中碱性不稳定物质的可溶性进行测定。

在早成岩 B—晚成岩 A 阶段,煤系地层中的有机质含氧官能团相继脱出(煤 $R_0 = 1.2\%$),二氧化

碳及羧酸类物质造成地层水呈现酸性,从而导致砂岩火山尘填隙物中的一些酸性不稳定矿物发生溶蚀。火山尘填隙物经过溶蚀作用后,砂岩的不规则溶蚀孔隙得以大量形成,溶孔外缘常伴随有蚀变“脏”高岭石及火山尘溶蚀残余环边。

2.3 蚀变作用

研究区砂岩孔隙中普遍充填了大量的团块状高岭石,其周围常伴有火山尘填隙物的蚀变残留物(图 1f)。通过高岭石团块与火山尘填隙物的空间接触

关系来看,这些高岭石团块与火山尘填隙物的蚀变作用密切相关(图 1a)。扫描电镜下显示,砂岩颗粒间充填的团块状高岭石晶形差,成分不纯,混有其他铝硅酸盐矿物及石英晶芽(图 1g)。从成岩作用阶段来看,火山尘填隙物的蚀变作用与溶蚀作用大致在同时期发生,但在地层水活动性较差的情况下,火山尘填隙物主要发生蚀变作用,容易形成“脏”高岭石。

鄂尔多斯西北部二叠系砂岩火山尘填隙物的溶解及蚀变强度主要受到距二叠系主力煤系远近程度和煤系地层水活动性的共同影响。围绕二叠系底部煤系,砂岩火山尘填隙物的溶蚀范围呈箱状分布(王建伟等 2005)。在远离二叠系底部主力泥煤层系的砂层组,如下石盒子组盒 4 砂层组以及盒 5—盒 7 砂层组,火山尘填隙物保存较好,溶蚀孔隙和蚀变成因的“脏”高岭石逐渐不发育(表 1)。

2.4 碳酸盐交代作用

本区砂岩中存在着一定量铁方解石和铁白云石,显微镜下可见到其与硅酸盐晶屑呈锯齿状接触关系,主要是因为铁方解石和铁白云石与火山尘填隙物中碱性不稳定物质,如硅酸盐晶屑发生了交代作用,交代作用主要沿颗粒的边缘发生(图 1b)。交

代作用的实质是水-岩反应体系内的化学平衡及平衡转移问题。进入晚成岩 B 阶段后,地层水 pH 值逐渐升高,较高温度下碳酸盐开始交代高温成因的硅酸盐晶屑。在局部封闭成岩环境下,铁方解石矿物沿着收缩缝对火山尘填隙物进行交代。在较开放成岩环境下,铁方解石还可以充填早期火山尘填隙物的溶蚀孔隙,并对溶蚀孔隙外围火山尘残余进行交代。随着埋藏深度的增大,碳酸盐矿物对溶蚀孔隙的胶结作用和对火山尘填隙物的溶蚀残余交代作用逐步增强。

2.5 重结晶作用

砂岩颗粒间的这种类似泥质特征填隙物呈全孔隙式充填,并发育有大量的收缩缝隙,这表明该类填隙物不是来自塑性玻屑,而是来自同沉积期水化的火山尘。在显微镜下,火山尘填隙物具有弱光性而没有明显方位,这应是重结晶作用的结果。扫描电镜下火山尘填隙物的各种组分粒度十分微细,为条片状和粒状的铝硅酸盐矿物集合体。在埋藏过程中,砂岩火山尘填隙物的重结晶作用持续进行,一些物化性质不稳定物质由非晶态逐步向似晶态转化。由于远离主力煤层砂岩的溶蚀作用和蚀变作用较

表 1 不同层位砂岩中“脏”高岭石与火山尘填隙物含量变化表

$\omega_B/\%$

Table 1 Content of volcanic dust fillings and its altered kaolinite of sandstone in different interval

钻井	上石盒子组盒 4 砂层组		下石盒子组盒 5—盒 7 砂层组		下石盒子组盒 8 砂层组		山西组		太原组上部	
	“脏”高岭石	火山尘填隙物	“脏”高岭石	火山尘填隙物	“脏”高岭石	火山尘填隙物	“脏”高岭石	火山尘填隙物	“脏”高岭石	火山尘填隙物
任 5	0	23	4.75	9.33	8.5	1.0	9.67	0	9.0	0
任 11	0	19	4.0	9.0	8.2	1.6	—	—	10.3	0
李华 1	—	—	2.0	7.0	5.5	1.0	6.0	0	1.0	0
李 1	—	—	5.4	15.0	—	—	—	—	2.0	0
芦参 1	0	16	0	20	3.0	0	3.0	0	0	0
苦深 1	—	—	4.0	12.5	6.3	0.17	5.0	0	5.0	0
鄂 8	—	—	—	—	8.17	1.0	6.67	0.33	—	—
苏 20	—	—	—	—	2.21	1.89	1.5	1.0	—	—
鄂 9	—	—	—	—	4.0	1.3	9.4	0.9	—	—
鄂 6	—	—	—	—	7	1.17	7.0	1.0	2.5	20
定探 1	3	20	8.4	5.8	3.9	0.13	—	—	3.0	1.0

“—”示未取样测试。

弱,砂岩火山尘填隙物的重结晶作用较强。

3 火山尘填隙物水岩反应对天然气储层的影响

3.1 火山尘填隙物水岩反应对天然气储层的改善作用

深埋藏条件下,压溶作用是石英质砂岩储集性能变差的一个重要因素。在富含火山尘填隙物砂岩中,火山尘填隙物多呈全孔隙式充填,在强压实条件下石英颗粒间接触范围仍相对较小。因此,火山尘填隙物在一定程度上可以抑制石英质砂岩压溶作用的充分进行。富含火山尘填隙物砂岩的很多硅质颗

粒具有不协调次生加大特征,火山尘填隙物或溶蚀残余充填的砂岩颗粒间主要以点-线接触关系为主,而缺少火山尘填隙物充填的石英质砂岩颗粒间却表现为凹凸接触关系。

在同生期和早埋藏阶段,砂岩中火山尘填隙物的溶蚀作用不强,在压实作用下主要发生塑性变形,这对砂岩的储集空间和渗透性能具有明显的损害。

但是,随着埋藏深度的增大,火山尘填隙物发生脱水收缩作用而发育大量收缩缝隙,形成了火山尘填隙物与地层水介质相互联系的通道。在地层水介质性质波动过程中,火山尘填隙物中的酸、碱性不稳定物质发生蚀变及溶解作用,原来那些被火山尘充填的粒间体积部分被“释放”,从而在局部范围内改善了砂岩的储集性能(图 4)。

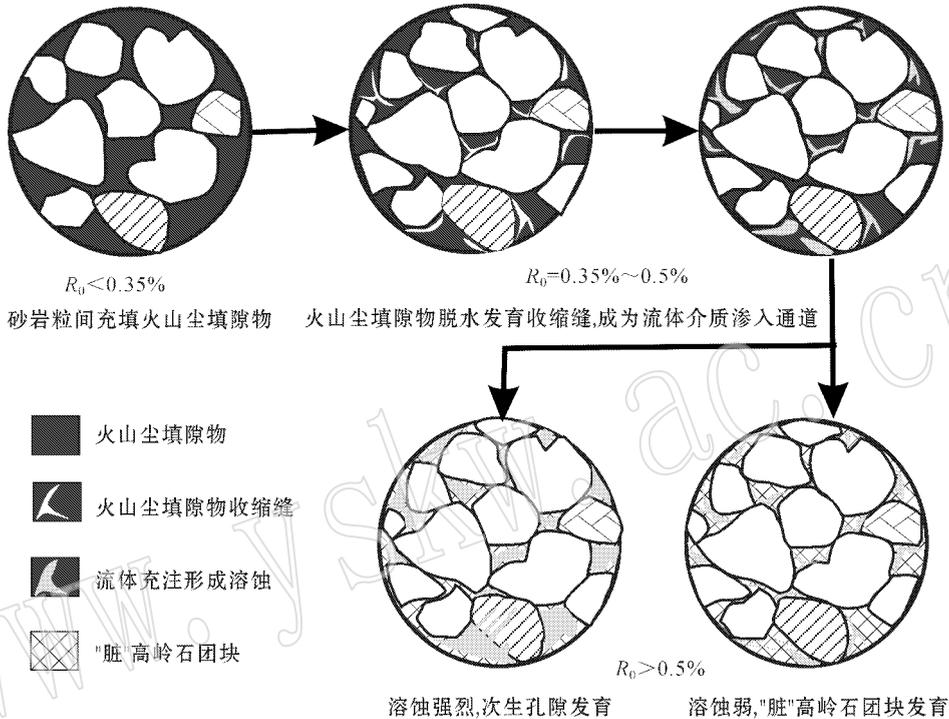


图 4 火山尘填隙物水岩反应改善砂岩储集性能模式图

Fig. 4 Model for porosity improvement of sandstone with evolution of volcanic dust fillings in the burial process

3.2 火山尘填隙物水岩反应对天然气储层的损害作用

鄂尔多斯盆地上古生界天然气储层的最大特点就是强非均质性和低渗透能力(魏红红等,1998),这在很大程度上与火山尘填隙物水岩反应有关。地下砂岩储层就是一个复杂的物理化学反应容器,遵从质量守恒定律和质量传递规律。尽管火山尘填隙物的溶蚀作用在局部范围内可以改善砂岩的储集性能,但溶蚀产物发生质量传递和异地胶结作用,使得区域上储层非均质性增强和局部孔隙喉道被封闭。

4 结论

(1)晚石炭世—早二叠世,鄂尔多斯盆地周缘火山活动强烈,被抛入空中的中酸性火山灰尘经过

长距离漂移降落到盆地内,经过河流的搬运及再沉积作用,砂岩火山尘填隙物普遍发育。

(2)煤系地层水环境下,火山灰尘经过初步水化作用并不能形成沸石族矿物,主要形成了铝硅酸盐和硅酸盐胶状混合物;在埋藏过程中,水岩作用发生应主要受到煤系地层水介质性质的波动性和活动性的影响,能够识别出脱水收缩作用、溶解作用、蚀变作用、交代作用和重结晶作用。

(3)研究区天然气储层的储集空间以次生粒间孔隙为主,非均质性强,这与砂岩火山尘填隙物的溶解和蚀变作用密切相关。

References

Chen Dongxia, Wang Xingzhi, Li Ling, et al. 2002. Reservoir characteristics of the Upper Palaeozoic in the Jiaxian-Zizhou area of Ordos

- basin [J]. Journal of Palaeogeography , 4(3): 93 ~ 100 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Hanchao , Wang Mingzhen , Zhang Xilin , *et al.* 2002. Study on late Paleozoic sporopollen assemblages in east part Jining coalfield , Shandong province [J]. Chinese Journal of Geology , 37(1): 47 ~ 61 (in Chinese with English abstract).
- Li Guidong and Wen Xianrui. 1999. The characteristics of volcanic shards strata in Taiyuan Member mid-north part , eastern margin of Ordos [J]. Earth Science Frontiers , 6(Supplement): 22 ~ 25 (in Chinese).
- Liu Rui'e , Sun Fenjin , Bai Wenhua , *et al.* 2002. An approach to the generating mechanism of secondary pores and pore evolution model of He 8 gas layer in Suligemaio gas field [J]. Petroleum Exploration and Development , 29(4): 47 ~ 49 (in Chinese with English abstract).
- Tian Zaiyi and Zhang Qingchun. 1997. Lithofacies-paleogeographic and petroleum of petroliferous basin in China [M]. Beijing : Geological Publishing House 25 ~ 24 (in Chinese).
- Surdam R C , Crossey L J , Sven H E , *et al.* 1989. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis [J]. AAPG Bulletin , 73(1): 1 ~ 23.
- Wang Zhengjiang , Zhang Jinquan and Chen Hongde. 2001. Study of the dispositional provenance of the terrigenous detritus in Ordos basin in later Palaeozoic Era [J]. Journal of Chengdu University of Technology , 28(1): 7 ~ 12 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianwei. 2004. Study on the main characteristics of Late Paleozoic reservoirs of pre-foreland basin strata in the west of Ordos Basin (Doctorial degree thesis) [D]. Beijing : Beijing University of Petroleum (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianwei , Bao Zhidong , Chen Mengjin , *et al.* 2005. On the evolution of sandstone tuff fillings in the burial environment and its effect on porosity—Taking Paleozoic sandstone of the northwestern Ordos Basin as an example [J]. Chinese Journal of Geology , 40(3): 429 ~ 438 (in Chinese with English abstract).
- Wei Honghong , Peng Huiqun , Li Jingqun , *et al.* 1998. Sedimentary and reservoir characters of permo-carboniferous in Ordos basin [J]. Oil & Gas Geology , 19(2): 136 ~ 141 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Junmao and Ying Fengxiang. 1997. Reservoir characteristics and diagenetic model of sandstone intercalated in coal-bearing strata [J]. Acta Petrolei Sinica , 18(4): 19 ~ 24 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈冬霞 , 王兴志 , 李 凌 , 等. 2002. 鄂尔多斯盆地佳县—子洲地区上古生界储层特征 [J]. 古地理学报 , 4(3): 93 ~ 100.
- 蒋汉朝 , 王明镇 , 张锡麒 , 等. 2002. 山东济宁煤田(东区)晚古生代孢粉组合 [J]. 地质科学 , 37(1): 47 ~ 61.
- 李贵东 , 温显端. 1999. 鄂尔多斯东缘中北部太原组火山灰层的特征 [J]. 地学前缘 (增刊) 22 ~ 25.
- 刘锐娥 , 孙粉锦 , 拜文华 , 等. 2002. 苏里格庙盒 8 气层次生孔隙成因及孔隙演化模式探讨 [J]. 石油勘探与开发 , 29(4): 47 ~ 49.
- 田在艺 , 张庆春. 1997. 中国含油气盆地岩相古地理与油气 [M]. 北京 : 地质出版社 25 ~ 40.
- 王建伟. 2004. 鄂尔多斯西缘前陆盆地系上古生界主要储层特征 (博士论文) [D]. 北京 : 石油大学.
- 王建伟 , 鲍志东 , 陈孟晋 , 等. 2005. 砂岩凝灰质填隙物变异特征及其对油气储集空间的影响——以鄂尔多斯盆地西北部二叠系为例 [J]. 地质科学 , 40(3): 429 ~ 438.
- 汪正江 , 张锦泉 , 陈洪德. 2001. 鄂尔多斯盆地晚古生代陆源碎屑沉积源区分析 [J]. 成都理工学院学报 , 28(1): 7 ~ 12.
- 魏红红 , 彭惠群 , 李静群 , 等. 1998. 鄂尔多斯盆地石炭二叠系沉积特征与储集条件 [J]. 石油与天然气地质 , 19(2): 136 ~ 141.
- 郑浚茂 , 应凤祥. 1997. 煤系地层(酸性水介质)的砂岩储层特征及成岩模式 [J]. 石油学报 , 18(4): 19 ~ 24.