

CO₂ 流体对火山碎屑岩改造作用的实验研究

郭欣欣^{1,2}, 刘立¹, 曲希玉³, 蒙启安⁴, 宋土顺¹

(1. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030;
3. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东 青岛 266555; 4. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院,
黑龙江 大庆 163712)

摘要:以塔木察格盆地火山碎屑岩为研究对象, 研究不同温度下(100、120、140、160、180℃)CO₂ 流体对火山碎屑岩(流纹质凝灰岩、沉凝灰岩)成分的改造。研究发现, 在 CO₂ 流体的作用下, 火山碎屑岩中的长石、碳酸盐矿物发生溶蚀, 且其溶蚀强度随温度的升高而增大, 石英的溶蚀程度较弱, 火山碎屑岩中的凝灰质成分易溶蚀, 并且是 CO₂ 流体溶蚀火山碎屑岩的主要对象。通过扫描电镜观察发现沉凝灰岩在 160℃ 下样品表面有绿泥石(?)和—水软铝石(?)生成。结合塔木察格盆地中的碳酸盐矿物(尤其是片钠铝石)的存在及盆地中次生溶孔大量发育的特征, 认为盆地内有 CO₂ 流体活动且 CO₂ 流体对塔木察格盆地次生孔隙的形成有重要的贡献。

关键词:火山碎屑岩; CO₂ 流体; 溶蚀; 水热实验; 塔木察格盆地

中图分类号: P588.2; P589

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)02-0189-08

Experimental researches on the reformation of volcanic clastic rocks by CO₂ fluid water

GUO Xin-xin^{1,2}, LIU Li¹, QU Xi-yu³, MENG Qi-an⁴ and SONG Tu-shun¹

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3. Faculty of Earth Sciences and Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China; 4. Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Ltd., Co., Daqing 163712, China)

Abstract: The CO₂ fluids and volcanic clastic rocks chosen from Nanbeier Depression were studied experimentally at different temperatures(100, 120, 140, 160 and 180℃). The results show that the corrosion intensity of feldspar and calcite will be enhanced gradually with the increasing temperature, but the dissolution degree of quartz is very low. The tuffaceous material can be dissolved by CO₂ fluids, and it seems to be the main dissolution object of CO₂ fluids. Chlorite and boehmite were found on the surface of the sedimentary tuff sample at the temperature of 160℃ by scanning electronic microscope (SEM). Considering that there are a good many carbonate minerals (especially dawsonite) and secondary solution pores in Tamtsag Basin, the authors hold that the CO₂ fluids have made considerable contribution to the formation of secondary pores in Tamtsag Basin.

Key words: volcanic clastic rock; CO₂ fluids; dissolution; hydrothermal experiment; Tamtsag Basin

火山碎屑岩是一种介于正常火山岩和正常沉积岩之间的一类岩石,是由火山喷发作用形成的各种火山碎屑物质经搬运、堆积后再经多种成岩方式固结而成的岩石。近年来,随着油气勘探工作的进展,

收稿日期: 2012-11-16; 修订日期: 2013-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(40972075); 高等学校博士学科点专项科研基金(20090061120043); 吉林大学基本科研业务费(200903024)

作者简介: 郭欣欣(1982-), 女, 博士研究生, 主要从事储层地质学方面的研究, E-mail: xinxin8504021@163.com; 通讯作者: 刘立(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事储层、层序地层及沉积方面的研究, E-mail: liuli0892@vip.sina.com

火山碎屑岩已经成为新的勘探目标储层之一。国内外已经相继在火山碎屑岩储层中找到油气资源,例如国内的二连盆地(梁官忠, 2001)、鄂尔多斯盆地(王建伟等, 2005)、渤海湾盆地(王金友等, 2003)、海拉尔盆地等(王海燕等, 2005; 许岩, 2005; 张新涛等, 2008; 彭晓蕾等, 2010); 国外的如美国的 Middle Park 盆地、新西兰的 Taranaki 盆地和土耳其 Thrace 盆地等(黄玉龙等, 2010)。然而火山碎屑岩储层的低孔低渗特征加大了其油气开采的难度。火山碎屑岩中凝灰质组分较高, 且凝灰质组分在 CO_2 等酸性流体的作用下易发生溶蚀, 可提高储层的孔隙度和渗透率, 进而改善储层的物性(王建伟等, 2005; 张凡芹等, 2006; 王宏语等, 2010; 曲希玉等, 2012)。同时由于火山碎屑岩储层中赋存于玄武岩岩屑、安山岩岩屑以及相应成分的隐晶质岩屑和长石、黑云母及角闪石等晶屑中的金属含量较高(木士春, 2000; 万大学, 2002; Maria *et al.*, 2007), 导致在 CO_2 流体的作用下火山碎屑岩可能形成多种碳酸盐矿物, 使火山碎屑岩容易碳酸盐化。地质观察表明, 在坦桑尼亚 Olduvai 峡谷的凝灰岩中发现霞石蚀变后形成的片钠铝石(Hay, 1963); 意大利潘泰莱里亚岛的凝灰岩中 CaO 含量较高, 其碳酸盐矿物发育(Maria *et al.*, 2007); 蒙古国塔木察格盆地发育白云石、方解石、铁方解石、铁白云石、片钠铝石等碳酸盐矿物(汪成辞, 2008; 董林森, 2011; 曲希玉等, 2012); 在青海省满丈岗地区见碳酸盐化晶屑凝灰岩(郁东良, 2008); 在海拉尔盆地贝尔凹陷南屯组的火山碎屑岩中发育泥晶碳酸盐矿物、白云石、铁方解石、铁白云石和片钠铝石等碳酸盐矿物(王海燕等, 2005; 孙彦达等, 2006)。以上发现证明火山碎屑岩具有对 CO_2 的“矿物捕获”的能力(董林森等, 2010a, 2010b)。而 CO_2 流体与火山碎屑岩反应的实验是研究 CO_2 驱油及 CO_2 地下赋存的有效途径之一。本文通过 CO_2 流体-火山碎屑岩相互作用的水热实验, 研究 CO_2 流体对火山碎屑岩的改造特征, 探讨 CO_2 流体对火山碎屑岩储层次生孔隙

的贡献。

1 实验部分

1.1 实验材料

本次实验材料包括火山碎屑岩样品(流纹质凝灰岩、沉凝灰岩)干冰及蒸馏水。火山碎屑岩样品的流纹质凝灰岩(M2)和沉凝灰岩(M4), 分别采自蒙古国塔木察格盆地南贝尔凹陷的塔 21-35 井南一段二油组的 1 469.05 m 和 1 478.17 m 处。实验前利用偏光显微镜对样品进行观察, M2 中的火山碎屑物质主要为石英晶屑、长石晶屑、云母晶屑和玻屑, 石英占矿物成分的 1%、长石占 2%、云母占 1%、玻屑占 1%、粒间物火山灰含量较高占 90% 其他为胶结物和杂基占 4%(表 1)。该样品粒间物较多以火山灰为主, 为熔结凝灰结构, 块状构造。矿物颗粒多小于 0.05 mm, 为火山灰级别, 样品具有较强的玻屑脱玻化现象, 火山尘及晶屑被碳酸盐化, 多形成方解石晶屑及火山尘。M4 中的火山碎屑物质主要为石英、长石、云母、岩屑和玻屑, 石英占矿物成分的 12%、长石占 18%、云母占 2%、岩屑占 20%、玻屑占 37%; 粒间物火山灰占 5%、胶结物占 5%、杂基较少占 1%(表 1)。该样品粒间物较少, 为弱熔结凝灰结构, 假流纹构造。矿物颗粒粒度较大, 多大于 0.2 mm, 玻屑脱玻化程度较低, 也可见岩屑脱玻化, 长石多见绢云母化, 长石、岩屑、玻屑均被碳酸盐化。采用 PW1404/10 型 X 射线荧光光谱仪分析样品(M2、M4)的化学成分, 其化学成分见表 2。实验前, 将火山碎屑岩样品加工成 10 mm × 10 mm × 3 mm 的形状, 用蒸馏水反复清洗, 烘干(105℃, 24 h), 并用精度为 0.01 g 的电子天平称重。实验时用干冰(购于吉林新星液碳有限公司)代替 CO_2 。

1.2 实验及测试仪器

实验所需要的仪器为 101A-1E 型电热鼓风干燥箱和容积为 45 mL 的小釜(外壳为不锈钢, 内胆为聚四氟乙烯, 承受温度 $\leq 200^\circ\text{C}$)。

表 1 火山碎屑岩样品矿物成分统计表

$v_B/\%$

Table 1 Statistics of mineral composition of volcanic clastic rock sample

样品号	火山碎屑物质					粒间物		
	石英	长石	云母	岩屑	玻屑	火山灰	杂基	胶结物
M2	1	2	1	1	1	90	1	3
M4	12	18	2	20	37	5	1	5

表 2 火山碎屑岩样品主要化学成分含量

ω_B/%

Table 2 Main chemical composition of volcanic clastic rock sample

样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	损失量	合计
M2	77.7	10.9	1.00	0.16	0.1	0.04	0.45	0.35	5.74	0.61	2.5	99.55
M4	48.6	9.86	1.95	0.16	0.08	0.74	16.97	0.47	3.81	1.47	15.39	99.56

反应前火山碎屑岩样品的成分统计采用的是 OLYMPUS 偏光显微镜;化学成分测定采用 PW1404/10 型 X 射线荧光光谱仪;测定反应前后样品表面的矿物组成及相对含量用 XD-3 型 X 射线衍射仪(吉林大学实验测试中心);反应前后样品的扫描电镜观察采用的是配置 INCAX-SIGHT 型能谱仪的 JSM-6700F 型扫描电镜(吉林大学古生物中心实验室);反应后剩余溶液的化学成分是利用 96-750 型 ICP-AES 和 Cary-50 型紫外分光光度计测定的(吉林大学实验测试中心)。

1.3 实验流程

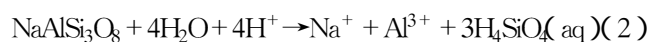
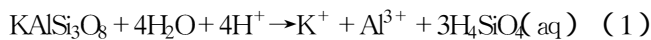
实验过程中先将 40 mL 的碳酸溶液(30 mL 蒸馏水 + 8 g 干冰)分别放入 2 个反应釜中,然后在 2 个反应釜中分别放入切制好的实验样品(M2、M4)并密封,再将反应釜放入 101A-1E 型电热鼓风干燥箱中,在压力为 4 MPa 下,于不同温度(100、120、140、160、180℃)下恒温反应 72 h(高温高压是为了加速实验进程)。反应结束后,待釜内温度降至室温时,将反应后的样品取出并反复用蒸馏水冲洗,烘干(105℃, 24 h)并称量,进行扫描电镜观察及 X-衍射分析。同时反应液用一次性针管取出装入无污染的塑料瓶中,进行化学成分分析。

2 实验结果与讨论

2.1 反应后样品的溶蚀、溶解

2.1.1 长石

在本次两组实验中,由于反应后溶液的 pH 值均呈酸性(图 1),所以长石(钾长石、钠长石、钙长石)发生溶蚀(罗孝俊等, 2001)的反应式为:



在 CO₂ 流体-流纹质凝灰岩(M2)实验中,通过扫描电镜观察发现,随温度的升高,长石的溶蚀强度逐渐增强。如钾长石在 120℃ 时发生微弱溶蚀,形成

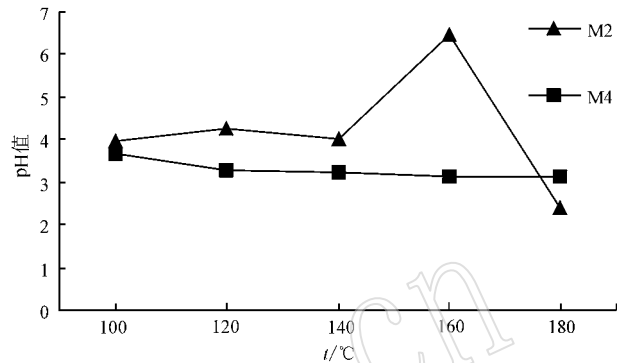


图 1 不同温度下反应液 pH 值变化图

Fig. 1 Variation of pH in the two experiments at different temperatures

溶蚀孔、洞(图 2a);在 160℃ 和 180℃(图 2b)时发生剧烈溶蚀,形成溶蚀孔和溶蚀沟。在 180℃ 下还可见钠长石的剧烈溶蚀,形成溶蚀沟(图 2c)。

在 CO₂ 流体-沉凝灰岩(M4)实验中随温度的升高,该反应中长石的溶蚀强度同样是逐渐增强。如钾长石在 120℃ 时钾长石沿边部发生港湾状溶蚀(图 2d),在 160℃ 时样品表面见斜长石的强烈溶蚀,沿双晶缝及解理方向发生强烈溶蚀,被溶成“网格状”及一些深溶沟(图 2e),形成大量的次生孔隙。

2.1.2 石英

前人(Kamiya and Shimokata, 1976; Blatt *et al.*, 1980; 曾允孚等, 1986; Knauss and Wolery, 1988)的研究表明,温度、pH 值及盐度均影响石英的溶解度。其中, pH 值是控制包括石英在内的很多矿物溶解速率的重要变量。在中性-碱性区域, pH 值增大一般可加快石英的溶解速率,但在酸性区域影响甚微。由于本次两组实验的 pH 值都小于 7,处于酸性或弱酸性范围内,因此本次实验中石英的溶解度较低。具体溶解特征如下:

在 CO₂ 流体-流纹质凝灰岩(M2)实验中,石英基本未见溶蚀,仅在 180℃ 下见极其微弱的溶蚀,形成溶蚀小凹坑(图 2f)。

在 CO₂ 流体-沉凝灰岩(M4)实验中,实验后的

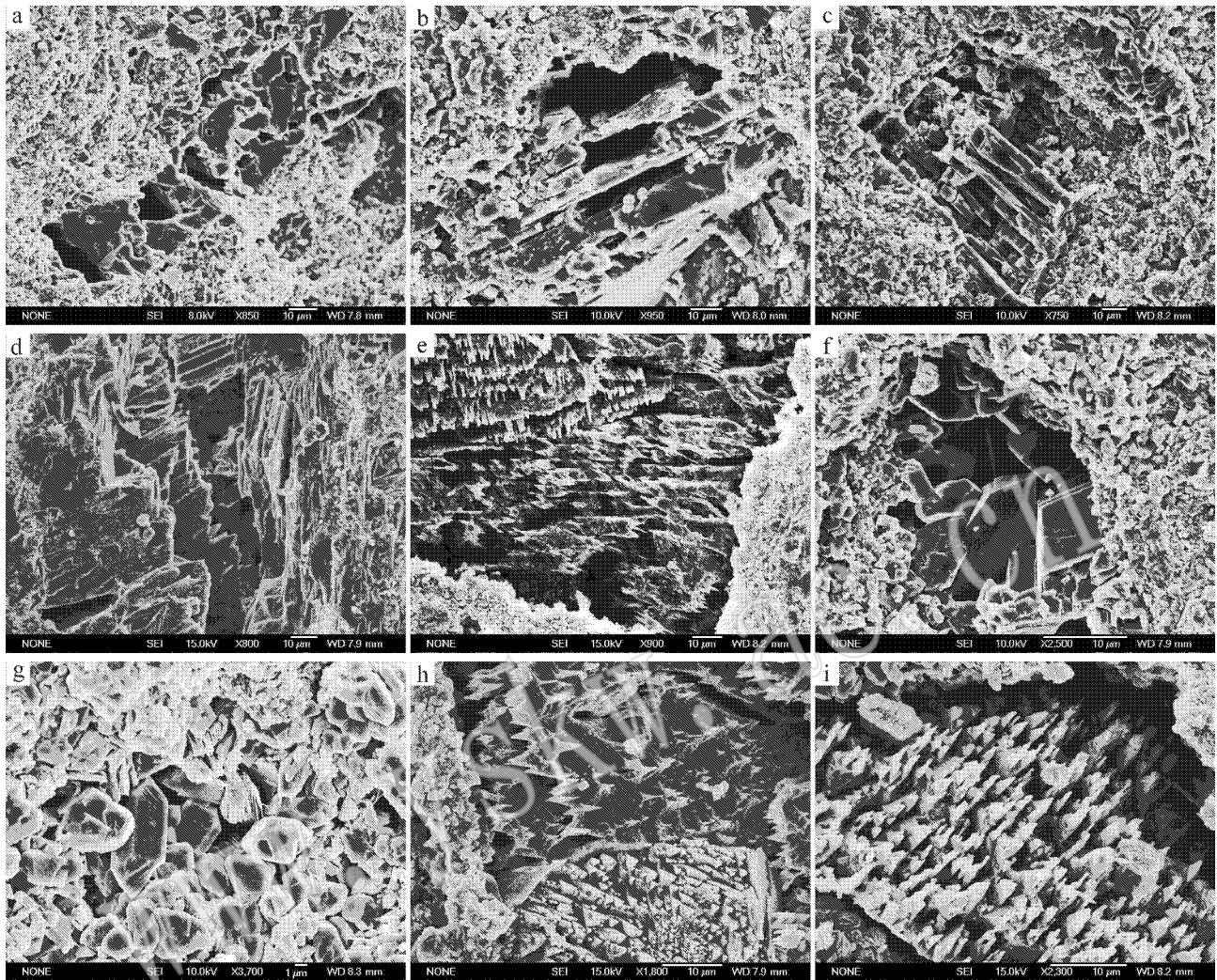


图 2 反应后矿物溶蚀、溶解的扫描电镜照片

Fig. 2 Microphotographs of the erosion/dissolution after reaction by SEM

a—120℃下 M2 表面钾长石微弱溶蚀；b—180℃下 M2 表面钾长石剧烈溶蚀，凝灰物质溶蚀呈圆弧状；c—180℃下 M2 表面钠长石剧烈溶蚀；d—120℃下 M4 表面钾长石沿边部发育港湾状溶蚀；e—160℃下 M4 表面斜长石沿解理强烈溶蚀；f—180℃下 M2 孔隙中充填微晶石英，极其微弱溶蚀；g—180℃下 M4 孔隙中微晶石英微弱溶蚀；h—120℃下 M4 表面方解石发生溶蚀，呈“拔丝状”；i—160℃下 M4 表面方解石强烈溶蚀，呈“钉板状”

a—very weak dissolution of potash feldspar on the surface of M2 at 120℃ ; b—intense dissolution of potash feldspar on M2 surface at 180℃ , the tuffaceous material being arc-shaped for the reason of dissolution ; c—albite dissolved severely on M2 surface at 180℃ ; d—potash feldspar on M4 surface dissolved into harbor form along the edge at 120℃ ; e—strong dissolution of anorthose 160℃ , M4 ; f—weak dissolution of quartz filling in the pore at 180℃ , M2 ; g—weak dissolution of microlitic quartz in the pore of M4 ; h—calcite assuming dissolved filamentous at 120℃ , M4 ; i—nailed plate-shaped calcite resulting from strong dissolution at 160℃ , M4

扫描电镜观察发现，石英基本未见溶蚀，180℃下见与书页状高岭石共生的微晶石英发生微弱溶蚀，形成溶蚀小凹坑(图 2g)。

2.1.3 碳酸盐矿物

在 CO₂ 流体-流纹质凝灰岩(M2)实验中，未见碳酸盐矿物的溶解，可能与样品 M2 中 CaO 低有关

(表 2)。而在样品 M4 中，CaO 的含量达到 16.97% (表 2)除了钙长石中含 CaO 以外，其主要赋存在碳酸盐矿物中。在 CO₂ 流体-沉凝灰岩(M4)实验中，实验中碳酸盐矿物的溶蚀尤以方解石最为明显，扫描电镜观察见方解石强烈溶蚀，且随温度的升高其溶蚀强度逐渐增大，在 120℃ 时方解石发生强烈溶

蚀,沿两组解理方向被溶成“拔丝状”(图2h);160℃时方解石发生剧烈溶蚀,沿两组解理方向发生深溶,形成“钉板状”溶蚀(图2i),该矿物颗粒几乎被溶透,形成大量的次生孔隙。

2.1.4 凝灰质物质的溶蚀

大量的研究表明(王建伟等,2005;张凡芹等,2006;王宏语等,2010;曲希玉等,2012),凝灰质物质在酸性条件下易发生溶蚀,且可提供大量的次生孔隙,改善低孔低渗的火山碎屑岩储层的物性。本实验中凝灰质物质在CO₂流体的作用下也发生了大量的溶蚀。例如,在180℃下,M2样品表面的凝灰质填隙物成分发生溶蚀,导致填隙物的边缘呈圆弧状(图2b)。同时,不同温度下,M2样品的反应液中SiO₂的浓度分别为0.93、23.4、47.26、62.16、148.26 mg/L(图3);M4样品反应液中SiO₂的浓度分别12.03、24.45、48.91、97.72、162.5 mg/L(图3)SiO₂的浓度随温度变化具有线性特征,即随温度的增高浓度增大。在酸性流体下溶液中SiO₂主要来源于富含硅质的长石晶屑、玻屑、岩屑和火山灰基质等溶蚀,而M2、M4样品中的长石含量不高,分别占2%和18%,充分说明随着温度升高其他富含硅质的凝灰质成分的溶蚀程度增加。

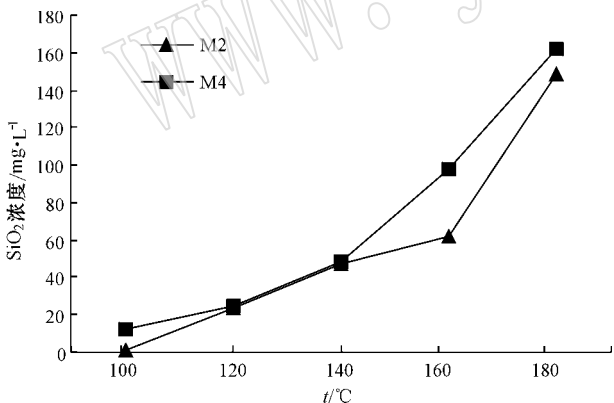


图3 不同温度下SiO₂质量浓度变化

Fig. 3 Concentrations of SiO₂ at different experimental temperatures

2.2 反应后样品表面新生成的矿物

在CO₂流体-流纹质凝灰岩(M2)实验中未见新矿物生成。在CO₂流体-沉凝灰岩(M4)实验中,160℃时样品表面见豆粒状新矿物形成(图4a),其能谱成分为Ca、O、C,与方解石的成分一致,但在高倍显微镜下(8500倍)可以观察到这些豆粒状的矿物是由片状矿物组成的集合体,很多集合体的形态为“绒

线团”状(图4b),可见其能谱分析结果与矿物的形貌特征不符,推测由于新生成的矿物颗粒太小,能谱仪所测成分主要为其下部方解石溶蚀剩余的部分,根据该矿物的形貌特征,推断该矿物为绿泥石。160℃下除了绿泥石,在样品表面还有一些单体呈柱状、棒状,集合体呈放射状的新矿物生成(图4c),其能谱成分与方解石一致,其能谱分析结果与矿物的形貌特征也不符,原因与前者相同。由于M4样品在160℃时反应液中SiO₂浓度迅速升高(图3),证明长石和凝灰质物质大量溶蚀;在长石和凝灰质物质大量溶蚀的同时,溶液中也会释放出大量的Al³⁺,结合新生成的矿物单体呈柱状、棒状,集合体呈放射状的形貌特征,推测该新生成的矿物为一水软铝石。

2.3 CO₂流体对火山碎屑岩次生孔隙的贡献

上述实验说明,在CO₂流体的作用下,火山碎屑岩中长石、碳酸盐矿物和凝灰质物质溶蚀作用较强,而石英的溶蚀较弱。长石、碳酸盐矿物及凝灰质物质的溶蚀为低孔低渗的火山碎屑岩储层能够提供大量的次生孔隙,并且改善孔隙间的连通性,从而影响火山碎屑岩储层的质量。

在储层中,有机质热演化所产生的酸性流体与CO₂流体在次生孔隙形成上有相似的作用,而在海拉尔盆地贝尔凹陷南屯组的火山碎屑岩中发育泥晶碳酸盐矿物、白云石、铁方解石、铁白云石和片钠铝石等碳酸盐矿物(王海燕等,2005;孙彦达等,2006)。目前蒙古国塔木察格盆地塔南凹陷已有4口钻井在下白垩统火山碎屑岩中发现片钠铝石,分别为19-35井的2305.72~2308.37 m,19-47井的1667.50~1774.96 m,19-48井的1968.10~1985.67 m和19-75井的1565.55 m,其中19-47井片钠铝石的体积含量为2%~29%,大部分在10%以上(曲希玉等,2010)。塔木察格盆地出现大量的碳酸盐矿物,尤其是CO₂的运移、聚集的示踪矿物片钠铝石的出现(徐衍彬等,1994;高玉巧等,2005),证明本区曾有CO₂流体的活动。加之对塔木察格盆地南贝尔凹陷南屯组火山碎屑岩孔隙类型的统计发现,火山碎屑岩中的孔隙类型主要为火山碎屑物质(凝灰质)溶孔、岩屑溶孔、长石溶孔和粒间溶孔,还有一定数量的铸模孔和超大孔(表3),孔隙类型基本为次生孔隙,次生溶孔所占比例为61.68%~100%。次生溶孔的大量出现,加之CO₂流体活动的证据可以证明CO₂流体对塔木察格盆地火山碎屑岩储层次生孔隙的形成有重要贡献。

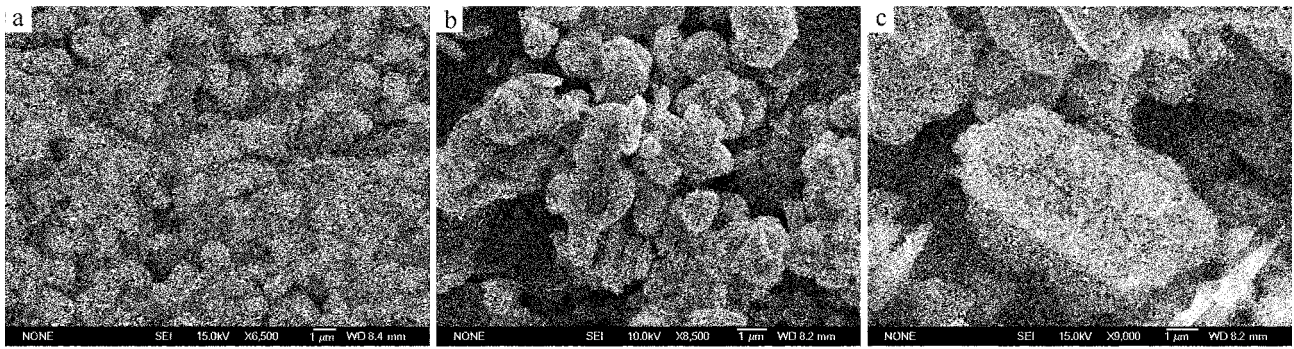


图 4 反应后新生矿物扫描电镜照片

Fig. 4 SEM microphotographs of the new mineral after reaction

a—160°C 下 M4 表面有豆粒状新矿物形成 ; b—160°C 下 M4 表面贴附叶片状集合体绒线团状的绿泥石 ; c—160°C 下 M4 表面沉淀柱状新矿物

a—granular new mineral on M4 surface at 160°C ; b—newly-formed chlorite on M4 surface at 160°C ; c—newly-formed columnar mineral on M4 surface at 160°C

表 3 塔木察格盆地南贝尔凹陷南屯组火山碎屑岩孔隙发育情况统计表

%

Table 3 Statistics of porosities of volcanic clastic rock in Nantun Formation of South Beier Depression, Tamsag Basin

井号	井深/m	原生孔相对比例			次生孔隙相对比例							次生孔总比例
		原生粒间孔	裂缝	晶间孔	岩屑溶孔	凝灰质溶孔	铸模孔	长石溶孔	粒间溶孔	超大溶孔	碳酸岩溶孔	
塔 21-18	1463.23	0	0	0	28.08	1.24	15.79	16.66	37.25	0	0.98	100
塔 21-18	1464.48	0	0	0	40.71	0.4	37.52	2.53	18.83	0	0	100
塔 21-18	1471.11	0	0	0	41.58	1.69	0	4.91	51.82	0	0	100
塔 21-21	1646.12	0	0	0	25.44	29.1	23	20.35	1.42	0	0.69	100
塔 21-21	1647.66	0	18.17	0	4.36	45.27	0	31.05	0.97	0	0.19	81.83
塔 21-21	1648.59	0	0	0	14.51	65.14	0	20.35		0	0	100
塔 21-36-3	2464.68	0	0	0	7.28	57.49	0	29.85	2.94	2.44	0	100
塔 21-36-3	2465.17	0	0	0	12.93	55.95	2.72	24.13	3.78	0	0.49	100
塔 21-36-3	2465.39	0	0	5.15	30.08	20.01	0	3.14	41.62	0	0	94.85
塔 21-36-3	2465.61	0.81	0	5.6	11.4	61.01	1.97	2.45	16.75	0	0	93.59
塔 21-36-3	2467.06	0	0	4.63	9.86	46.52	0	36.31	2.68	0	0	95.37
塔 21-36-3	2470.36	3.19	0	17.39	7.85	60.76	3.05	7.13	0.63	0	0	79.42
塔 21-36-3	2471.57	0	0	9.05	3.06	42.1	0.91	35.69	9.19	0	0	90.95
塔 21-36-3	2471.77	0	0	11.97	5.88	47.12	3.09	15.45	16.49	0	0	88.03
塔 21-36-3	2472.11	0	0	6.84	47.77	15.2	3.03	4.4	22.76	0	0	93.16
塔 21-36-3	2472.49	0	0	4.31	48.43	25.69	0	19.31	1.03	0	1.22	95.68
塔 21-36-3	2474.72	0	0	0	12.34	54.18	0	31.45	2.03	0	0	100
塔 21-36-3	2476.73	0	0	13.23	16.87	26.38	0.18	42.5	0.8	0	0.05	86.78
塔 21-36-3	2477.26	0	0	19.04	11.43	19.79	3.87	34.45	11.43	0	0	80.97
塔 21-36-3	2478.4	0	0	19.9		62.97	0	17.13		0	0	80.1
塔 21-36-3	2479.2	0	0	13.43	15.91	14.3	2.88	50.05	3.21	0	0.23	86.58
塔 21-36-3	2480.13	0	0	10.33	12.81	19.91	0	48.83	4.57	3.56		89.68
塔 21-59	1523.64	0.57	0	0	13.19	31.3	3.15	20.36	19.09	12.34		99.43
塔 21-7-1	1960.39	0	0	1.13	4.87	81.54	0	7.05	5.41			98.87

3 结论

(1) 在 CO₂ 流体的作用下,火山碎屑岩中的长

石、碳酸盐矿物发生溶蚀,且其溶蚀强度随温度的升高而增大,石英的溶蚀程度较弱。

(2) 在 CO₂ 流体的作用下,火山碎屑岩中的凝灰质成分易溶蚀,并且是 CO₂ 流体溶蚀火山碎屑岩

的主要对象。

(3) 沉凝灰岩在 160℃ 下样品表面有绿泥石(?) 和一水软铝石(?) 生成。

(4) 塔木察格盆地的碳酸盐矿物, 尤其是片钠铝石的存在, 证明盆地内有 CO₂ 流体活动, 且 CO₂ 流体对塔木察格盆地次生孔隙的形成有重要的贡献。

References

Blatt H, Middleton G and Murray R. 1980. The Origin of Sedimentary Rocks(Second edition) [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice&Hall, Inc: 332~362.

Dong Linsen. 2011. The characteristics and mechanism of CO₂-pyroclastic rock interaction-example from the Tanan Depression, Tamtsag Basin, Mongolia [D]. Changchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).

Dong Linsen, Liu Li, Qu Xiyu, et al. 2010a. Research progress of ability of mineral trapping of CO₂ [J]. Advances in Earth Science, 25 (9): 941~949(in Chinese with English abstract).

Dong Linsen, Liu Li, Zhang Ge, et al. 2010b. The mineral trapping of CO₂ for pyroclastic rock [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 28(3): 572~578(in Chinese with English abstract).

Gao Yuqiao, Liu Li and Qu Xiyu. 2005. Genesis of sawsonite and its indication significance of CO₂ migration and accumulation [J]. Advances in Earth Science, 20(10): 1 083~1 088(in Chinese with English abstract).

Hay R L. 1963. Zeolite weathering in Olduvai gorge, Tanganyik [J]. Bulletin of Geological Society of America, 74: 1 281~1 286.

Huang Yulong, Wang Pujun and Shao Rui. 2010. Porosity and permeability of pyroclastic rocks of the Yingcheng Formation in Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 40 (2): 227~236(in Chinese with English abstract).

Kamiya H and Shimokata K. 1976. The role of salts in the dissolution of powdered quartz [A]. Cadek J and Paces T. Proceedings of The International Symposium on Water-rock Interaction [C]. Prague, Czechoslovakia, Geol. Surv. Prague: 426~429.

Knauss K G and Wolery T J. 1988. The dissolution kinetics of quartz as a function of pH and time at 70℃ [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 52: 43~53.

Liang Guanzhong. 2001. Fracture development of tuff reservoirs in the Hanan area of the Erlian Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 23(4): 412~417(in Chinese with English abstract).

Luo Xiaojun, Yang Weidong, Li Rongxi, et al. 2001. Effects of pH on the solubility of the feldspar and the development of secondary porosity [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 20(2): 103~107(in Chinese with English abstract).

Maria G F, Adriana B, Rodolfo N, et al. 2007. Chemical weathering of volcanic rocks at the island of Pantelleria, Italy: Information from

soil profile and soil solution investigations [J]. Chemical Geology, 246: 1~18.

Mu Shichun. 2000. Physical and chemical features of tuff its development and application [J]. China Mining Magazine, 9(3): 17~20(in Chinese with English abstract).

Peng Xiaolei, Zeng Xiangpeng and Hong Xue. 2010. Diagenetic characteristics of pyroclastic rocks in Shangkuli Formation, Labudalin Basin [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 40(4): 961~970(in Chinese with English abstract).

Qu Xiyu, Liu Li, Gao Yuqiao, et al. 2010. Geology record of mantle-derived magmatogenic CO₂ gas in the northeastern China [J]. Acta Petroli Sinica, 31(1): 61~67(in Chinese with English abstract).

Qu Xiyu, Liu Li, Meng Qian, et al. 2012. Reformation effect of atmospheric water on volcanic clastic rocks: a case study in Tamtsag Basin, Mongolia [J]. Petroleum Geology & Experiment, 34(3): 285~290(in Chinese with English abstract).

Sun Yanda and Zhang Minzhi. 2006. Characteristics of dawsonite and its petroleum geologic significance in the Hailaer Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 28(5): 504~506(in Chinese with English abstract).

Wan Daxue. 2002. Discovery on the tuff of the middle Anisian Stage in the Yangkan Area, Panxian, Guizhou and its significance [J]. Guizhou Geology, 19(2): 77~81(in Chinese with English abstract).

Wang Chengci. 2008. The Diagenesis of pyroclastic rock and the effect of the injection of CO₂ on reservoir in Tanan Depression of Tamuchage Basin [D]. Chang Chun: Jilin University(in Chinese with English abstract).

Wang Haiyan, Liu Li, Gao Yuqiao, et al. 2005. Discussion of diageneses of volcanoclastic rocks of Nantun Formation in Beier Sags, Hailaer Basin [J]. Global Geology, 24(3): 219~224(in Chinese with English abstract).

Wang Jianwei, Bao Zhidong, Chen Mengjin, et al. 2005. Differentiation of sandstones' tuff fillings and its effect on porosity-An example from the Paleozoic sandstones in Northwestern Ordos [J]. Chinese Journal of Geology, 40(3): 429~438(in Chinese with English abstract).

Wang Jinyou, Zhang Shiqi, Zhao Junqing, et al. 2003. Characteristics of volcanic rock reservoirs in the Linshang area of the Huimin sag [J]. Petroleum Geology & Experiment, 25(3): 264~268(in Chinese with English abstract).

Wang Hongyu, Fan Tailiang, Xiao Yingying, et al. 2010. Effect of tuffaceous components on physical property of sandstone reservoir [J]. Acta Petroli Sinica, 31(3): 432~439(in Chinese with English abstract).

Xu Yan. 2005. Diagenesis and its comparative study of pyroclastic rock, dawsonite-bearing sandstone and common sandstone in Hailaer basin [D]. Changchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).

Xu Yanbin, Chen Ping and Xu Yongcheng. 1994. Dawsonite distribution and its relationship with oil and gas in Hailaer basin [J]. Oil &

- Gas Geology, 15(4):322~327 in Chinese with English abstract).
- Yu Dongliang. 2008. Geochemical characteristics and prospect direction of the gold in Manzhanggong Area of Qinghai Province[J]. Gold Science and Technology, 16(1):52~55(in Chinese with English abstract).
- Zeng Yunfu and Xia Wenjie. 1986. Sedimentary Petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 194~199(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fanqin, Wang Weifeng, Wang Jianwei, et al. 2006. Dissolution of tuff filling and its effects on the porosity of the coal-formed gas reservoir in the Suligemiao Area of the Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 36(3):365~369(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xintao, Liu Li and Wei Wenyan. 2008. Diagenesis and its influence to porosity evolution of Tongbomiao Formation in Beier Sag, Hailaer Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 38(1):34~42(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 董林森. 2011. CO₂-火山碎屑岩相互作用的特征与机理-以蒙古国塔木察格盆地塔南凹陷为例[D]. 长春: 吉林大学.
- 董林森, 刘立, 曲希玉, 等. 2010a. CO₂ 矿物捕获能力的研究进展[J]. 地球科学进展, 25(9):941~949.
- 董林森, 刘立, 张革, 等. 2010b. 火山碎屑岩对 CO₂ 的矿物捕获能力[J]. 沉积学报, 28(3):572~578.
- 高玉巧, 刘立, 曲希玉. 2005. 片钠铝石的成因及其对 CO₂ 天然气运聚的指示意义[J]. 地球科学进展, 20(10):1083~1088.
- 黄玉龙, 王璞珺, 邵锐. 2010. 火山碎屑岩的储层物性-以松辽盆地营城组为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(2):227~236.
- 梁官忠. 2001. 二连盆地哈南凝灰岩油藏裂缝发育特征[J]. 石油实验地质, 23(4):412~417.
- 罗孝俊, 杨卫东, 李荣西, 等. 2001. pH 值对长石溶解度及次生孔隙发育的影响[J]. 矿物岩石地球化学通报, 20(2):103~107.
- 木士春. 2000. 凝灰岩的物理化学性质及其开发利用[J]. 中国矿业, 9(3):17~20.
- 彭晓蕾, 曾祥鹏, 洪雪. 2010. 拉布达林盆地上库力组火山碎屑岩成岩作用特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(4):961~970.
- 曲希玉, 刘立, 高玉巧, 等. 2010. 中国东北地区幔源-岩浆 CO₂ 赋存的地质记录[J]. 石油学报, 31(1):61~67.
- 曲希玉, 刘立, 蒙启安, 等. 2012. 大气水对火山碎屑岩改造作用的研究-以塔木察格盆地为例[J]. 石油实验地质, 34(3):285~290.
- 孙彦达, 张民志. 2006. 海拉尔盆地碳钠铝石特征及其地质意义[J]. 石油实验地质, 28(5):504~506.
- 万大学. 2002. 贵州盘县羊麒地区安尼锡克中期凝灰岩的发现及其意义[J]. 贵州地质, 19(2):77~81.
- 汪成辞. 2008. 塔木察格盆地塔南凹陷火山碎屑岩成岩作用及 CO₂ 注入对储层的影响[D]. 长春: 吉林大学.
- 王海燕, 刘立, 高玉巧, 等. 2005. 海拉尔盆地贝尔凹陷南屯组火山碎屑岩成岩作用的讨论[J]. 世界地质, 24(3):219~224.
- 王建伟, 鲍志东, 陈孟晋, 等. 2005. 砂岩中的凝灰质填隙物分异特征及其对油气储集空间影响-以鄂尔多斯盆地西北部二叠系为例[J]. 地质科学, 40(3):429~438.
- 王金友, 张世奇, 赵俊青, 等. 2003. 渤海湾盆地惠民凹陷临商地区火山岩储层特征[J]. 石油实验地质, 25(3):264~268.
- 王宏语, 樊太亮, 肖莹莹, 等. 2010. 凝灰质成分对砂岩储集性能的影响[J]. 石油学报, 31(3):432~439.
- 许岩. 2005. 海拉尔盆地火山碎屑岩、含片钠铝石砂岩与普通砂岩的成岩作用及其比较研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 徐衍彬, 陈平, 徐永成. 1994. 海拉尔盆地片钠铝石分布与油气的关系[J]. 石油与天然气地质, 15(4):322~327.
- 郁东良. 2008. 青海省满丈岗地区金地球化学特征及找矿方向探索[J]. 黄金科学技术, 16(1):52~55.
- 曾允孚, 夏文杰. 1986. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社.
- 张凡芹, 王伟锋, 王建伟, 等. 2006. 苏里格庙地区凝灰质溶蚀作用及其对煤成气储层的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 36(3):365~369.
- 张新涛, 刘立, 魏文艳. 2008. 海拉尔盆地贝尔凹陷铜钵庙组成岩作用及其对孔隙演化的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 38(1):34~42.