文章编号:1673-5005(2019)04-0021-10 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2019.04.003

准噶尔盆地东部石炭系巴塔玛依内山组火山岩气孔充填作用

杨凯凯[1], 边伟华[1], 王璞珺[1], 冯玉辉[2], 李 昭[3], 张增宝[4], 刘晓康[1]

(1. 吉林大学地球科学学院,吉林长春 130061; 2. 沈阳师范大学古生物学院,辽宁沈阳 110034;
3. 中国地质调查局油气资源调查中心,北京 100083; 4. 中国石化胜利油田分公司油气勘探管理中心,山东东营 257017)

摘要:通过薄片鉴定、电子探针、地质温度计、面孔率等手段对准噶尔盆地东部地区巴塔玛依内山组火山岩杏仁体进行研究。结果表明:火山岩内气孔充填物包括硅质、沸石、绿鳞石、绿泥石、皂石等,杏仁体充填以复成分为主,单成分少见,单成分杏仁体见硅质和绿鳞石杏仁体两种,复成分杏仁体包括石英→沸石、石英→绿泥石、石英→绿鳞石→皂石等 10 种;气孔内充填的绿泥石形成温度介于 84.7~123.6 ℃,为低温充填,综合分析认为巴塔玛依内山组中基性火山岩气孔充填为后生流体沉淀结晶的结果;气孔充填使巴塔玛依内山组火山岩储层质量明显变差,约 94.5% 的原生气孔空间完全丧失;充填作用虽然使火山岩储集空间丧失,但是残存的杏仁体内孔、杏仁体收缩孔仍具有一定的储集能力,流体在气孔内沉淀结晶的同时,也伴随着火山岩溶蚀作用的进行,过程中产生的溶蚀孔也在一定程度上对气孔体积的减少起到补偿作用。

关键词:准噶尔盆地东部; 巴塔玛依内山组; 火山岩储层; 气孔充填作用; 杏仁体

中图分类号:P 571; P 588.144 **文献标志码**: A

引用格式:杨凯凯,边伟华,王璞珺,等. 准噶尔盆地东部石炭系巴塔玛依内山组火山岩气孔充填作用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(4):21-30.

YANG Kaikai, BIAN Weihua, WANG Pujun, et al. Study on vesicle filling of Carboniferous Batamayineishan Formation volcanic rocks in eastern Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2019,43(4):21-30.

Study on vesicle filling of Carboniferous Batamayineishan Formation volcanic rocks in eastern Junggar Basin

YANG Kaikai[1], BIAN Weihua[1], WANG Pujun[1], FENG Yuhui[2], LI Zhao[3], ZHANG Zengbao[4], LIU Xiaokang[1]

(1. *College of Earth Sciences*, *Jilin University*, *Changchun* 130061, *China*;
2. *College of Paleontology*, *Shenyang Normal University*, *Shenyang* 110034, *China*;
3. *Oil & Gas Survey Center*, *China Geological Survey*, *Beijing* 100083, *China*;
4. *Management Center of Oil and Gas Explaration*, *Shengli Oilfiled*, *SINOPEC*, *Dongying* 257017, *China*)

Abstract: In order to identify characteristics, genesis and reservoir significance of vesicle filling, volcanic rocks with amygdules of Carboniferous Batamayineishan Formation were sampled in eastern Junggar Basin. Based on thin section observation, EPMA, geologic thermometer and vesicle filling rate analysis, the amygdules were characterized. The results show that the filling minerals include silica, zeolite, celedonite, chlorite, and saponite. There are two filling models, mono- and multiple component ones. Mono-component amygdules include silica and celedonite ones. 10 types of multiple component amygdules can be recognized, including quartz→zeolite, chlorite→quartz, and quartz→celedonite→saponite. The formation tempera-

收稿日期:2018-12-08

基金项目:国家自然科学基金项目(41702128);国家重点基础研究发展计划"973"项目(2009CB219300)

作者简介:杨凯凯(1987-),男,博士研究生,研究方向为矿产普查与勘探。E-mail:yangkk13@mails.jlu.edu.cn。

通信作者:边伟华(1976-),男,副教授,博士,研究方向为盆地火山岩及油气地质。E-mail:WeihuaBian@jlu.edu.cn。

ture of chlorite at the edge of amygdales is between 84.7 and 123.6 ℃, which indicates a low temperature filling process. The amygdules form from precipitation and crystallization of epigenetic fluid. The quality of volcanic reservoirs becomes worse due to the vesicle filling process. 94.5% of the primary vesicle space is completely lost. Although vesicle filling has such a negative influence on reservoir quality, residual amygdule inner pores and amygdule shrink pores still have some reservoir capability. In addition, the dissolution pores generated by the fluid which participate in the formation of amygdule can also compensate the reduction of vesicle volume to a certain extent.

Keywords: eastern Junggar Basin; Batamayineishan Formation; volcanic rock reservoir; vesicle filling; amygdules

火山岩气孔的充填作用主要表现为原生气孔被次生矿物所充填而形成杏仁体。国内外针对气孔充填作用的研究主要包括杏仁体类型描述、杏仁体的成因研究以及气孔充填的储层意义 3 个方面。杏仁体类型的研究以国内学者的研究较为典型[1-2],根据充填矿物成分的差异将杏仁体分为单成分杏仁体和复成分杏仁体两种,进一步根据充填矿物成分的差异将其分为若干种类型。杏仁体成因的研究相对较多,也是目前争议最大的一个方面。国内外学者针对不同地区火山岩中的杏仁体进行研究,提出了不同的成因理论,可归纳为 3 种类型:第一种为准同生期成因[3-4];第二种为后生成因[1-2,5-7];第三种为原生火山玻璃固态下水合或蚀变[1]。相对于前两方面而言,气孔充填的储层意义是研究最多的,尤其是随着中国 2000 年以来火山岩油气勘探取得重大突破以来,充填作用作为影响火山岩储层物性的影响因素而得到了广泛的研究[4,8-13],学者一致认为充填作用对火山岩储层孔隙度和渗透率的破坏性明显,但是这些研究多为定性说明,并没有对充填作用的影响进行量化表征。准噶尔盆地火山岩储层勘探开展较早,可追溯至 1957 年。1994 年以来在石炭系巴塔玛依内山组火山岩中先后发现了石西油田、五彩湾气田、克拉美丽气田等大型油气田。随着勘探的深入,充填作用也得到了较多的研究[12]。这些研究大多集中于气孔充填储层意义的定性分析,针对气孔充填类型、成因的研究相对较少。笔者以准噶尔盆地东部石炭系巴塔玛依内山组火山岩为研究对象,通过薄片鉴定、电子探针、地质温度计以及面孔率分析等手段,对巴塔玛依内山组火山岩气孔的充填矿物类型、杏仁体成因以及充填作用的储层意义进行研究,为杏仁体成因理论的建立和巴塔玛依内山组火山岩储层勘探提供依据。

1　取样位置及研究方法

研究的火山岩样品取材于准噶尔盆地东部隆起区钻遇巴塔玛依内山组火山岩的典型钻井和双井子巴塔玛依内山组建组剖面,研究区、钻井和剖面位置如图 1 所示。

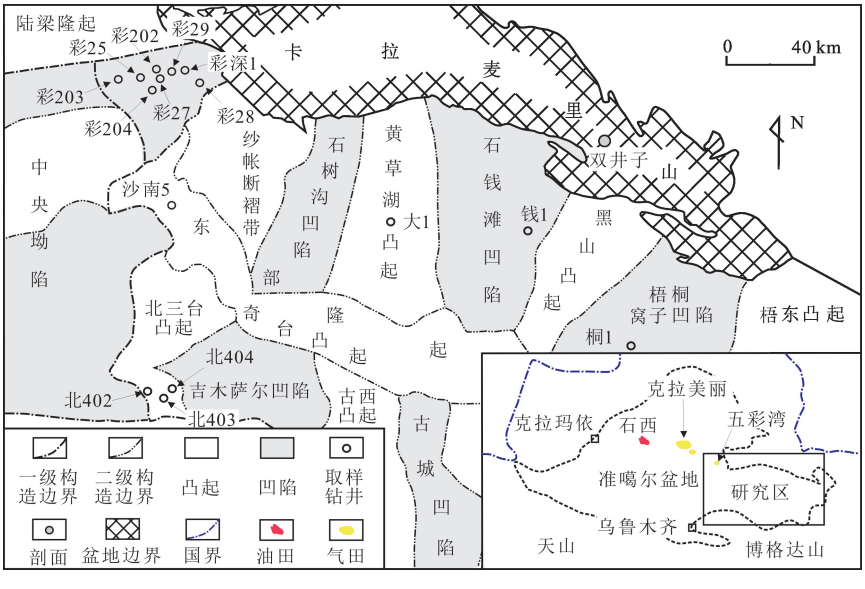


图 1　研究区位置及地质概况

Fig. 1　Location and geological situation of study area

首先通过手标本鉴定,选定孔隙发育部位,磨制光学薄片,使用奥林巴斯 BX51 偏光显微镜,进行充

填物岩矿鉴定,并使用奥林巴斯 DP71 相机拍摄显微图像;在此基础上,选取杏仁体发育、充填矿物类型多且多期充填的样品,磨制电子探针薄片,喷碳,使用 JXA-8230 电子探针仪器进行不同充填物的矿物成分分析,最终确定气孔充填物的矿物类型。测试过程加速电压为 20 kV,电子束束流为 2×10^{-8} A。

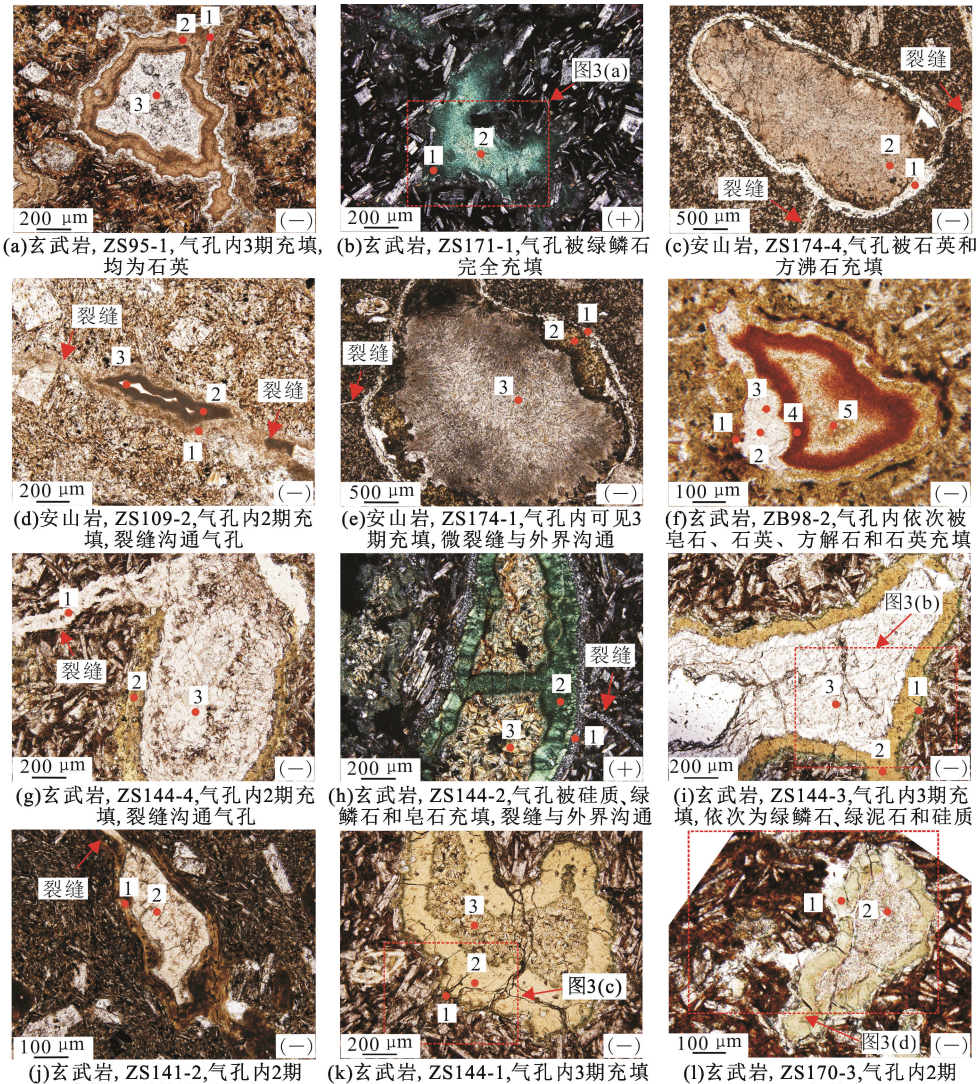
此外选取典型火山岩样品进行铸体薄片制作,对巴塔玛依内山组火山岩储层的气孔充填率进行研究。面积的计算采用 CorelDraw X4 软件进行,首先在单偏光照片下圈定气孔未被充填部分(铸体部分)面积,其次在正交偏光下圈定气孔的总面积,然后使用面积插件 GetArea X4. gms 对两部分面积进行分别计算,最后计算充填率,公式为

$$\varphi=\left(1-\frac{S_1}{S}\right).$$

式中,φ 为充填率;S_1 为未充填部分(铸体部分)面积,μm^2;S 为气孔总面积,μm^2。

2　巴塔玛依内山组火山岩气孔充填类型

综合手标本鉴定、薄片观察和电子探针分析,发现火山岩气孔充填在巴塔玛依内山组火山岩中发育普遍,充填类型多样,充填产物包括单成分杏仁体和复成分杏仁体两种。单成分充填矿物主要为石英和绿鳞石等。复成分充填矿物包括石英、沸石、方解石、绿鳞石、绿泥石、皂石等(图 2、表 1)。



注：图中红点和数字代表电子探针测试点和编号，红色虚线方框代表图3对应图件范围。

图 2　巴塔玛依内山组火山岩杏仁体

Fig. 2　Amygdales in volcanic rocks of Batamayineishan Formation

表 1　巴塔玛依内山组火山岩杏仁体电子探针分析结果

Table 1　EMPA results of amygdales in volcanic rocks in Batamayineishan Formation

杏仁体编号	测试点	化学成分/%										矿物类型
		SiO_2	MgO	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	MnO	FeO	SrO	CO_2	
ZS95-1 (图 2(a))	1	97.21	—	1.40	—	—	0.38	—	—	—	—	石英
	2	99.56	—	—	—	—	0.24	—	—	—	—	石英
	3	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	石英
ZS171-1 (图 2(b))	1	56.51	6.06	6.50	—	12.60	0.28	—	17.80	—	—	绿鳞石
	2	57.70	7.02	3.20	—	12.90	—	—	19.04	—	—	绿鳞石
ZS174-4 (图 2(c))	1	95.66	—	1.75	—	0.71	0.63	—	1.23	—	—	石英
	2	77.59	—	15.47	2.35	0.42	4.16	—	—	—	—	方沸石
ZS109-2 (图 2(d))	1	0.88	—	—	—	—	61.34	1.87	0.88	—	35.03	方解石
	2	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	石英
	3	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	石英
ZS174-1 (图 2(e))	1	93.95	—	1.80	—	1.39	0.46	—	2.41	—	—	石英
	2	34.05	19.89	15.31	—	0.34	1.07	0.89	28.47	—	—	皂石
	3	98.29	—	1.11	—	0.29	0.32	—	—	—	—	石英
ZB98-2 (图 2(f))	1	35.55	12.24	17.83	—	0.39	0.81	0.23	31.97	—	—	皂石
	2	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	石英
	3	—	—	—	—	—	69.16	1.97	2.30	—	26.57	方解石
	4	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	石英
	5	98.06	—	0.70	—	—	0.24	—	0.99	—	—	石英
ZS144-4 (图 2(g))	1	98.47	—	1.00	—	0.22	0.31	—	—	—	—	石英
	2	47.51	15.81	12.32	—	4.44	1.52	0.70	17.70	—	—	绿泥石
	3	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	石英
ZS144-2 (图 2(h))	1	96.68	—	1.41	—	0.68	0.37	—	0.86	—	—	石英
	2	57.18	6.40	5.94	—	12.92	0.50	—	17.07	—	—	绿鳞石
	3	41.20	23.89	13.95	—	0.50	1.25	0.92	18.30	—	—	皂石
ZS144-3 (图 2(i))	1	57.80	6.21	6.35	—	12.85	0.32	—	16.47	—	—	绿鳞石
	2	43.48	18.71	13.95	—	2.59	2.16	—	19.10	—	—	绿泥石
	3	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	石英
ZS141-2 (图 2(j))	1	40.61	16.98	15.37	—	0.67	1.64	—	24.74	—	—	皂石
	2	67.38	1.56	18.13	—	0.72	7.68	—	1.53	3.01	—	菱沸石
ZS144-1 (图 2(k))	1	55.85	9.84	9.51	—	9.54	0.80	—	14.46	—	—	绿鳞石
	2	40.07	21.65	14.24	—	1.06	2.30	—	20.68	—	—	绿泥石
	3	37.49	23.85	15.83	—	0.37	0.818	1.02	20.59	—	—	皂石
ZS170-3 (图 2(l))	1	58.50	6.85	8.24	—	11.47	0.87	—	14.07	—	—	绿鳞石
	2	46.23	24.44	10.88	—	0.34	1.30	—	16.81	—	—	皂石

2.1　单成分杏仁体

单成分杏仁体组成矿物类型有石英(图 2(a))和绿鳞石(图 2(b))两种。其中石英杏仁体可见多期次充填的现象。例如杏仁体 ZS95-1,气孔中充填物根据颜色不同可识别出 3 期充填,电子探针检测发现各期成分一致,均为 SiO_2(图 2(a),表 1)。

2.2　复成分杏仁体

相对于单成分杏仁体,复成分杏仁体在巴塔玛依内山组火山岩中更常见。根据组成矿物的不同将巴塔玛依内山组火山岩常见的复成分杏仁体分为以下 10 种(图 2、表 1)。

(1)石英→沸石:由杏仁体壁至中心,充填矿物依次为石英和方沸石,石英呈微晶颗粒状,紧贴孔壁生长,方沸石则呈放射状(图 2(c))。

(2)方解石→石英:充填矿物为方解石和石英。方解石颜色较深,可能是含少量 Mn 和 Fe 的缘故,石英根据颜色不同可分为两期,成分均为 SiO_2(图 2(d))。

(3)石英→皂石→石英:紧贴杏仁体壁生长的为无色微晶状的石英,杏仁体中部为土灰色放射状石英,两者之间为黄色集合体状皂石。电子探针分析结果显示石英含少量的 Al、Ca 和 Fe 元素(图 2(e))。

(4)皂石→石英→方解石→石英:杏仁体壁至中心依次为皂石、石英、方解石和石英。方解石含少量 Mn 和 Fe 元素,中心部位的石英含 Al、Ca 和 Fe(图 2(f))。

(5)绿泥石→石英:杏仁体边部生长绿泥石,内

部生长石英。镜下可见杏仁体被裂缝贯穿,裂缝和杏仁体内部成分一致,均为 SiO_2,含少量 Al、K 和 Ca 等元素(图 2(g))。

(6)石英→绿鳞石→皂石:杏仁体由石英、绿鳞石和皂石组成。杏仁体壁生长石英,内为绿鳞石,中部为花朵状皂石,皂石被绿鳞石分割。石英含少量 Al、K、Ca 和 Fe 等元素(图 2(h))。

(7)绿鳞石→绿泥石→石英:杏仁体内矿物均呈环带状生长,由杏仁体壁至内部依次为绿鳞石、绿泥石和石英。绿鳞石呈绿色,厚度较小。中部的绿泥石呈黄色,呈微晶集合体状;内部的石英结晶较好,正交偏光下单个晶体内光性均一(图 2(i))。

(8)皂石→沸石:可见皂石沿杏仁体壁生长,内部为菱沸石。皂石颜色为棕褐色,菱沸石呈致密状,正交偏光镜下可见非均一消光的现象(图 2(j))。

(9)绿鳞石→绿泥石→皂石:杏仁体壁生长的为绿鳞石,呈绿色,厚度很小;杏仁体内部为黄色花朵状皂石,结晶好;两者之间为黄色绿泥石(图 2(k))。

(10)绿鳞石→皂石:杏仁体壁为放射状绿鳞石;内部为皂石,皂石呈集合体状(图 2(l))。

3　讨　论

3.1　火山岩杏仁体成因探讨

火山岩杏仁体形成的过程可分为 2 个阶段:首先是气孔的形成;其次为流体在气孔内的沉淀结晶[5-6],即气孔的充填过程。气孔是熔浆在喷出地表时随温度与压力降低其中的挥发份逸出而形成的[3,5],其往往分布于熔岩流的上部,伴生大量的微裂缝[14-15],气孔为杏仁体的形成提供了空间,微裂缝则可以充当杏仁体形成的物质运移通道。杏仁体的充填过程则是一个相对复杂的问题,需要根据具体情况进行分析。其中杏仁体形成温度、物质来源的确定是还原杏仁体成因的关键。

3.1.1　杏仁体的形成温度

杏仁体形成温度的确定方法主要有 2 种:利用石英和方解石等充填矿物内的流体包裹体来确定[3,5,16-17];利用电子探针测定充填矿物绿泥石的成分数据,然后使用绿泥石地质温度计来确定[2,18]。本次研究采用后者对巴塔玛依内山组杏仁体形成温度进行确定。

Battaglia[19]在对埃塞俄比亚裂谷、加勒比海、意大利等地区地热田的绿泥石进行 X 射线衍射研究过程中发现,绿泥石面网间距 d_{001} 和结晶温度之间存在很好的线性关系 $d_{001}=14.379-0.001T$。式中,d_{001} 为绿泥石面网间距,Å;T 为结晶温度,℃。如果没有进行 X 射线衍射分析,利用 Rausell-Colom 等[20]提出,后经 Nieto[21]修正的关系式 $d_{001}=14.339-0.1155\,x(Al^{IV})-0.0201x(Fe^{2+})$。式中,$x(Al^{IV})$ 代表绿泥石单位晶胞中 4 次配位的铝 Al 的个数;$x(Fe^{2+})$ 代表绿泥石中 Fe^{2+} 的个数。可以将电子探针数据(表 1)转变为 d_{001}。由于电子探针无法区分 Fe^{2+} 和 Fe^{3+},且绿泥石中 Fe^{2+} 占比大于 Fe 总量的 95%[22-23],因此本次研究忽略 Fe^{3+} 的影响。研究区杏仁体中绿泥石结构参数的计算结果如表 2 所示(以单位晶胞中含 14 个氧原子数为基准)。

表 2　绿泥石结构参数计算结果

Table 2　Calculating results of main parameters of chlorite

杏仁体编号	矿物成分	发育位置	$x(Si^{4+})$	$x(Fe^{2+})$	$x(Mg^{2+})$	$x(Ca^{2+})$	$x(K^{+})$	$x(Al^{IV})$	d_{001}/Å	T/℃
ZS144-4	绿泥石	杏仁体边部	3.86	1.39	2.36	0.24	0.39	0.14	14.29	84.7
ZS144-3	绿泥石	杏仁体边部	3.82	1.40	2.45	0.20	0.29	0.18	14.29	89.6
ZS144-1	绿泥石	杏仁体边部	3.55	1.53	2.86	0.22	0.12	0.45	14.26	123.4

通过计算可得,研究区绿泥石形成温度介于 84.7 ~ 123.6 ℃。前人研究成果也表明,气孔充填的石英和方解石是低温环境下(50 ~ 200 ℃)形成的[5-6,16-17,24],大量沸石族矿物的稳定温度小于 150 ℃[2,7]。前已述及,巴塔玛依内山组火山岩气孔充填矿物包括石英、绿鳞石、绿泥石、皂石、沸石、方解石,由于矿物结晶顺序为从孔壁至孔内依次进行,且温度逐渐降低的过程,因此硅质、绿泥石和沸石的形成温度一定程度上可以代表研究区杏仁体的形成温度。综合来看,研究区杏仁体形成于低温热液环境下。

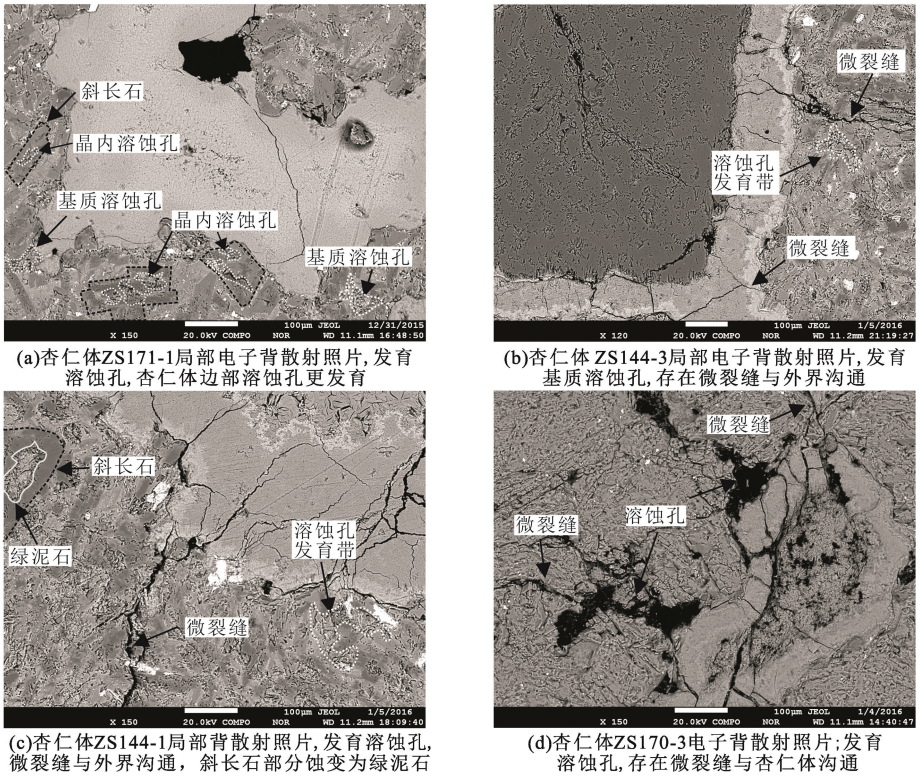
3.1.2　杏仁体的成因模式

目前杏仁体形成的流体和物质来源仍然是一个存在争议的问题,存在 3 种截然不同的观点:第一种观点认为其形成于封闭体系下的岩浆期热液沉淀结晶,所需离子来源于杏仁体宿主岩石高温高压下的元素迁移,杏仁体边部通常可见蚀变晕[3];第二种观点认为杏仁体与后生流体的沉淀结晶作用有关,后生流体对宿主岩石的溶蚀或蚀变为杏仁体的形成提供了所需的各种离子[1,5-6];第三种观点将复成分

杏仁体的成因归结于原生火山玻璃固态下水合或蚀变,通常在杏仁体中部可见残余的火山玻璃[1]。前两种观点的主要区别为杏仁体是否处于封闭体系下,即是否存在裂缝作为流体循环的通道,第三种观点的典型特征为杏仁体保留火山玻璃的原始形态且杏仁体中部通常可见残存的火山玻璃等物质。

研究区巴塔玛依内山组火山岩形成于石炭纪,在 3 亿多年的地质历史中,发生了不同程度的蚀变[25],而蚀变的发生伴随着溶蚀作用的进行[9]。这与研究区杏仁体宿主岩石的特征相符,即蚀变和溶蚀作用大量发生。单偏光下可见大量的蚀变现象,如斜长石黏土化、辉石绿泥石化、橄榄石皂石化等蚀变类型(关于蚀变的具体成果另文发表);电子探针背散射照片则显示斑晶和基质表面存在大量溶蚀孔(图 3)。同时,无论单偏光照片,还是电子探针背散射照片均显示杏仁体周围分布大量的微裂缝(图 2(c)、(d)、(e)、(g)、(h)、(j)和图 3)。

由于研究区杏仁体内未见火山玻璃,且杏仁体形态多呈椭圆形,与火山玻璃的形态也不符,因此刘万洙等[1]提出的杏仁体形成于原生火山玻璃固态下水合或蚀变的观点可能并不适合研究区。此外杏仁体边部发育溶蚀孔和微裂缝,且与外界存在沟通,这与岩浆期热液沉淀结晶模式所需的封闭体系不符,在杏仁体边部也未见蚀变晕等特征,结合杏仁体充填矿物全部为低温矿物的事实,可以排除杏仁体在岩浆温度下形成的可能性[6]。因此杏仁体形成于岩浆期热液沉淀结晶的观点也一般可以排除。综上所述,笔者更倾向于杏仁体形成于后生流体的沉淀结晶。研究区杏仁体形成的具体过程可以归纳为:①由于岩浆中挥发分气体的逸出,在岩石顶部形成了大量的气孔和微裂缝[14-15],这为杏仁体的形成提供了空间和物质运输通道(图 4(a));②宿主岩石在后期低温流体的作用下,矿物和基质发生溶蚀、蚀变,使流体中富集了 Fe^{2+}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Si^{2+}、K^{+}等离子[5],从而为杏仁体中充填矿物的形成提供了物质来源(图 4(b));③富含离子的流体随温度的降低逐渐由孔壁至孔内沉淀结晶,从而形成了杏仁体(图 4(c))。



(a)杏仁体ZS171-1局部电子背散射照片,发育溶蚀孔,杏仁体边部溶蚀孔更发育

(b)杏仁体 ZS144-3局部电子背散射照片,发育基质溶蚀孔,存在微裂缝与外界沟通

(c)杏仁体ZS144-1局部背散射照片,发育溶蚀孔,微裂缝与外界沟通,斜长石部分蚀变为绿泥石

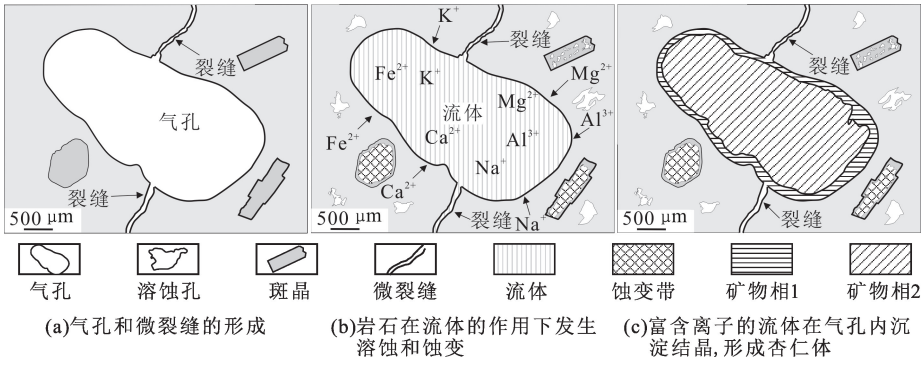
(d)杏仁体ZS170-3电子背散射照片;发育溶蚀孔,存在微裂缝与杏仁体沟通

图 3　巴塔玛依内山组杏仁体边部溶蚀孔和微裂缝发育特征

Fig. 3　Characteristics of dissolution pores and microfractures at edge of amygdales in Batamayineishan Formation

这一后生成因模式同样具有矿物学的证据来支撑。前已述及,绿鳞石是巴塔玛依内山组火山岩杏仁体中一种常见充填矿物。绿鳞石成因主要包括 2 种:①海水作用下,中基性火山岩发生蚀变形成,海水为绿鳞石的形成提供所需离子[26-27];② 陆相环境下形成,所需离子来源于铁镁质矿物的蚀变[2,28]。考虑到巴塔玛依内山组火山岩形成于后碰撞伸展背景下[29],卡拉麦里洋盆早已闭合,海水不可能对其

产生影响,因此可以确定绿鳞石形成于陆相环境下,火山玻璃、铁镁质矿物的蚀变为其形成提供了所需的 K^+、Mg^{2+}、Fe^{2+}、Al^{3+} 等离子,即气孔中充填的绿鳞石形成于蚀变之后,是富含离子的后生流体在气孔内沉淀结晶的结果。此外电子探针分析结果显示,部分杏仁体内的方解石除含有 Ca、C 和 O 等元素外,含有少量 Fe、Mn 等元素(表 1,ZS109-2,测试点 1);部分杏仁体内石英除含 Si 和 O 外,还略微富集 Al 和 Ca 等元素(表 1,ZS95-1,测试点 1 和 2),这些现象同样可能与火山物质的蚀变有关。



(a)气孔和微裂缝的形成　(b)岩石在流体的作用下发生溶蚀和蚀变　(c)富含离子的流体在气孔内沉淀结晶,形成杏仁体

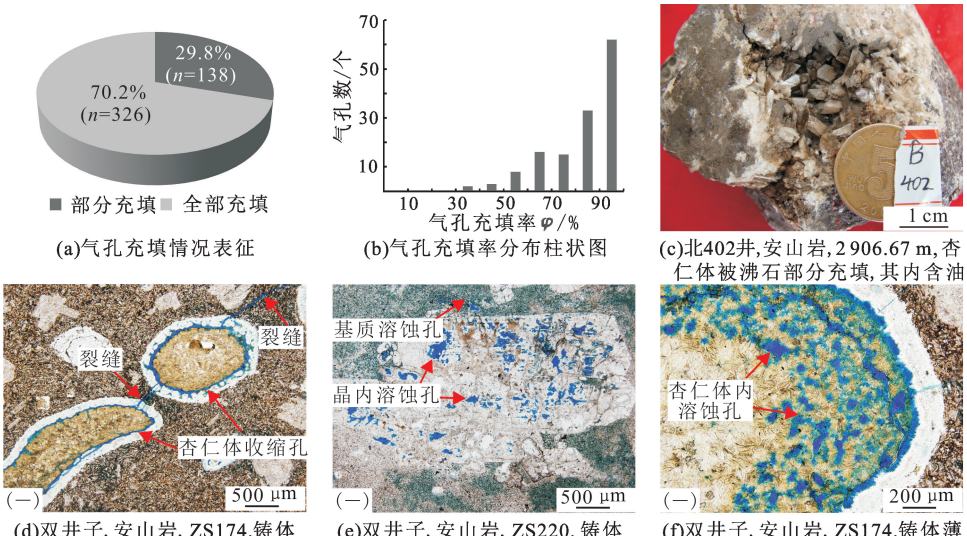
图 4　巴塔玛依内山组火山岩杏仁体成因模式

Fig. 4　Geological genesis model of amygdales in Batamayineishan Formation

3.2　气孔充填的储层意义

充填作用是影响火山岩储层物性特征的一种重要的成岩作用。充填作用使得原生气孔储集空间体积变小,导致储层物性变差[4,8-12]。这已经成为学界的共识,但是目前针对充填作用储层意义的研究,往往都是定性分析,无法满足火山岩储层量化研究的需要。本次研究通过对气孔充填率的研究,定量表征了巴塔玛依内山组气孔充填作用的储层意义。

本次研究共计磨制 30 个铸体薄片,这些铸体薄片内共计发育 464 个气孔。气孔孔径主要介于 0.3 ~7.9 mm,集中于 0.9 ~1.7 mm。所有的气孔都发生了充填,其中 326 个完全被充填,占比 70.2%,其余的 138 个(29.8%)气孔也发生了不同程度的充填(图 5(a)),最低充填率为 33.8%,最高充填率为 99.2%,平均充填率为 82.6%,同时充填率高的气孔数量明显多于充填率低的气孔数量(图 5(b))。整体来看,94.5% 的原生气孔储集空间丧失。说明巴塔玛依内山组火山岩的原生气孔遭受了强烈的充填作用改造,很难作为巴塔玛依内山组火山岩储层的主体储集空间,这是与松辽盆地火山岩储层的明显差别[30],这也解释了为何准噶尔盆地原状火山岩储集层物性差,一般不能形成有效储集层,大量的油气储存在风化壳内[31]。



(a)气孔充填情况表征　(b)气孔充填率分布柱状图　(c)北402井,安山岩,2 906.67 m,杏仁体被沸石部分充填,其内含油

(d)双井子,安山岩,ZS174,铸体薄片;发育杏仁体内收缩孔　(e)双井子,安山岩,ZS220,铸体薄片;基质和斑晶均发育溶蚀孔　(f)双井子,安山岩,ZS174,铸体薄片;气孔充填物皂石内的溶蚀孔

图 5　巴塔玛依内山组火山岩气孔充填率定量表征及剩余储集空间特征

Fig. 5　Quantitative characterization of vesicle filling and residual reservoir space

虽然气孔充填作用在一定程度上使巴塔玛依内山组火山岩储层的原生储集空间明显减少,但是并不意味着其储集能力的完全丧失。因为即使气孔已经被全部或部分充填,气孔充填后残存的杏仁体内孔(图 5(c))、杏仁体收缩孔(图 5(d))仍然可能具有一定的储集性能[32],均可以作为油气的有效储集空间而存在。在准噶尔盆地东部隆起区北三台凸起的北 402 井安山岩中就发现了杏仁体内孔的油气显示(图 5(c)),这是杏仁体内孔可以作为有效储集空间存在的最直接证据。此外各种成岩作用并不是孤立存在的,因为充填作用的发生往往伴随着热液等流体的参与,从而使火山岩储层处于开放体系中[9],流体在气孔内沉淀结晶的同时,也伴随着溶蚀作用和蚀变作用的进行,溶蚀和蚀变作用在此过程中产生的基质溶蚀孔、晶内溶蚀孔(图 5(e))以及杏仁体内溶蚀孔(图 5(f))会在一定程度上对气孔体积的减少起到补偿作用。

4 结 论

(1)巴塔玛依内山组火山岩气孔充填矿物有石英、方解石、沸石、绿鳞石、绿泥石、皂石等。可分为单成分杏仁体和复成分杏仁体两种,以复成分杏仁体为主,单成分杏仁体少见。

(2)巴塔玛依内山组杏仁体为后生低温流体成因,成因模式包括:气孔和微裂缝形成,为杏仁体的形成提供了空间和物质运移通道;宿主岩石在后期低温流体的作用下发生溶蚀、蚀变,为杏仁体的形成提供了物质基础;富含离子的低温流体在气孔内沉淀结晶形成杏仁体。

(3)充填作用使火山岩储层质量变差,94.5%的原生气孔储集空间丧失。气孔被充填后残存的杏仁体内孔、杏仁体收缩孔仍具储集能力,此外溶蚀作用和蚀变作用产生的溶蚀孔也对气孔体积的减少起到补偿作用。

参考文献:

[1] 刘万洙,黄玉龙,庞彦明,等. 松辽盆地营城组中基性火山岩成岩作用:矿物晶出序列、杏仁体充填和储层效应[J]. 岩石学报,2010,26(1):158-164.
LIU Wanzhu, HUANG Yulong, PANG Yanming, et al. Diagenesis of intermediate and mafic volcanic rocks of Yingcheng Formation (K_1y) in the Songliao Basin: sequential crystallization, amygdule filling and reservoir effect[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010,26(1):158-164.

[2] 南云,柳益群,周鼎武,等. 三塘湖盆地晚石炭世火山岩气孔和裂缝填充物特征及其成因研究[J]. 岩石学报,2016,32(6):1901-1913.
NAN Yun, LIU Yiqun, ZHOU Dingwu, et al. Characteristics and origin of amygdale and crack fillers in volcanic rock of Late Carboniferous in Santanghu Basin, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016,32(6):1901-1913.

[3] PROUST D, FONTAINE C. Amethyst-bearing lava flows in the Paraná Basin(Rio Grande do Sul, Brazil): cooling, vesiculation and formation of the Geodic Cavities [J]. Geological Magazine, 2007,144(1):304-307.

[4] 高有峰,刘万洙,纪学雁,等. 松辽盆地营城组火山岩成岩作用类型、特征及其对储层物性的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2007,37(6):1251-1258.
GAO Youfeng, LIU Wanzhu, JI Xueyan, et al. Diagenesis types and features of volcanic rocks and its impact on porosity and permeability in Yingcheng Formation, Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(6):1251-1258.

[5] GILG H A, MORTEANI G, KOSTITSYN Y, et al. Genesis of amethyst geodes in basaltic rocks of the Serra Geral Formation (Ametista do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil): a fluid inclusion, REE, oxygen, carbon, and Sr isotope study on basalt, quartz, and calcite[J]. Mineralium Deposita, 2003,38(8):1009-1025.

[6] DUARTE L C, HARTMANN L A, VASCONCELLOS M A Z, et al. Epigenetic formation of amethyst-bearing geodes from Los Catalanes gemological district, Artigas, Uruguay, Southern Paraná Magmatic Province[J]. Journal of Volcanology & Geothermal Research, 2009,184(3/4):427-436.

[7] TRIANA R, JUAN M H R, JAVIER F R R, et al. Natural zeolites filling amygdales and veins in basalts from the British Tertiary Igneous Province on the Isle of Skye, Scotland[J]. Earth Sciences Research Journal, 2012,16(1):41-53.

[8] 邱隆伟,姜在兴,席庆福. 欧利坨子地区沙三下亚段火山岩成岩作用及孔隙演化[J]. 石油与天然气地质,2000,21(2):139-143.
QIU Longwei, JIANG Zaixing, XI Qingfu. Diagenesis and pore evolution of lower Es_3 volcanic rocks in Oulituozi region[J]. Oil & Gas Geology, 2000,21(2):139-143.

[9] SRUOGA P, RUBINSTEIN N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina[J]. AAPG Bulletin, 2007,91(1):115-129.

[10] 孟凡超,操应长,崔岩,等. 准噶尔盆地西缘车排子凸起石炭系火山岩储层成因[J]. 中国石油大学学报

(自然科学版),2016,40(5):22-31.
MENG Fanchao, CAO Yingchang, CUI Yan, et al. Genesis of Carboniferous volcanic reservoirs in Chepaizi salient in western margin of Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(5):22-31.

[11] 罗静兰,邵红梅,杨艳芳,等. 松辽盆地深层火山岩储层的埋藏-烃类充注-成岩时空演化过程[J]. 地学前缘,2013,20(5):175-187.
LUO Jinglan, SHAO Hongmei, YANG Yanfang, et al. Temporal and spatial evolution of burial-hydrocarbon filling-diagenetic process of deep volcanic reservoir in Songliao Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013,20(5):175-187.

[12] 曲江秀,高长海,查明,等. 准噶尔盆地克拉美丽气田石炭系火山岩储层特征及成岩演化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(5):1-8.
QU Jiangxiu, GAO Changhai, ZHA Ming, et al. Reservoir characteristics and diagenetic evolution of Carboniferous volcanic rock in Kelameili gas field of Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(5):1-8.

[13] 杨少春,何妮茜,宋明水,等. 准噶尔盆地车排子地区不整合结构对火山岩裂缝发育的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(2):1-9.
YANG Shaochun, HE Niqian, SONG Mingshui, et al. Effects of structural unconformity on development of volcanic rock fracture in Chepaizi area, Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(2):1-9.

[14] AUBELE J C, CRUMPLER L S, ELSTON W E. Vesicle zonation and vertical structure of Basalt Flows[J]. Journal of Volcanology & Geothermal Research, 1988, 35(4):349-374.

[15] 黄玉龙,孙德有,王璞珺,等. 松辽盆地营城组玄武岩流动单元测井响应特征[J]. 地球物理学报,2011,54(2):524-533.
HUANG Yulong, SUN Deyou, WANG Pujun, et al. Characteristics of well-logging response to lava flow units of the Lower Cretaceous basalts in Songliao Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011,54(2):524-533.

[16] MORTEANI G, KOSTITSYN Y, PREINFALK C. The genesis of the amethyst geodes at Artigas (Uruguay) and the Paleohydrology of the Guaraní Aquifer: structural, geochemical, oxygen, carbon, strontium isotope and fluid inclusion study[J]. International Journal of Earth Sciences, 2010,99(4):927-947.

[17] COMMIN-FISCHER A, BERGER G, POLVÉ M, et al. Petrography and chemistry of SiO_2 filling phases in the amethyst geodes from the Serra Geral Formation deposit, Rio Grande do Sul, Brazil[J]. Journal of South American Earth Sciences, 2010,29(3):751-760.

[18] 杨献忠,杨祝良,陶奎元,等. 含油玄武岩中绿泥石的形成温度[J]. 矿物学报,2002,22(4):365-370.
YANG Xianzhong, YANG Zhuliang, TAO Kuiyuan, et al. Formation temperature of chlorite in oil-bearing basalt[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2002,22(4):365-370.

[19] BATTAGLIA S. Applying X-ray geothermometer diffraction to a chlorite[J]. Clays & Clay Minerals, 1999,47(1):54-63.

[20] RAUSELL-COLOM J A, WIEWIORA A, MATESANZ E. Relation between composition and d_{001} for chlorite[J]. American Mineralogist, 1991,76(7/8):1373-1379.

[21] NIETO F. Chemical composition of metapelitic chlorites: X-ray diffraction and optical property approach[J]. European Journal of Mineralogy, 1997,9(4):829-841.

[22] DEER W A, HOWIE R A, ZUSSMAN J. Rock-forming minerals (3): sheet silicates[M]. London: Longman, 1962:270.

[23] SHIROZU H. Developments in sedimentalogy (chlorite minerals)[M]. New York: Elsevier, 1978:243-246.

[24] HARTMANN L A, DUARTE L C, MASSONNE H J, et al. Sequential opening and filling of cavities forming vesicles, amygdales and giant amethyst geodes in lavas from the southern Paraná volcanic province, Brazil and Uruguay[J]. International Geology Review, 2012,54(1):1-14.

[25] 邹才能,张光亚,朱如凯,等. 火山岩油气地质[M]. 北京:地质出版社,2012:95-96.

[26] VELDE B. Infrared spectra of synthetic micas in the series muscovite-MgAl celadonite[J]. American Mineralogist, 1978,63(3/4):343-349.

[27] ODIN G S, DESPRAIRIES A, FULLAGAR P D, et al. Nature and geological significance of celadonite[M]// ODIN G S. Developments in sedimentology: green marine clays. Amsterdam: Elservier, 1988:337-398.

[28] BAKER L L, REMBER W C, SPRENKE K F, et al. Celadonite in continental flood basalts of the Columbia River Basalt Group[J]. American Mineralogist, 2012, 97(8/9):1284-1290.

[29] ZHANG Yuanyuan, GUO Zhaojie, PE-PIPER G, et al. Geochemistry and petrogenesis of Early Carboniferous volcanic rocks in East Junggar, North Xinjiang: implica-

tions for post-collisional magmatism and geodynamic process[J]. Gondwana Research, 2015,28(4):1466-1481.

[30] WANG Pujun, CHEN Shumin. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, northeast China[J]. AAPG Bulletin, 2015,99(3):499-523.

[31] 侯连华,邹才能,刘磊,等. 新疆北部石炭系火山岩风化壳油气地质条件[J]. 石油学报,2012,33(4):533-540.
HOU Lianhua, ZOU Caineng, LIU Lei, et al. Geologic essential elements for hydrocarbon accumulation within Carboniferous volcanic weathered crusts in northern Xinjiang, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(4):533-540.

[32] 高有峰,吴艳辉,刘万洙,等. 松辽盆地南部英台断陷营城组火山岩晶间微孔特征及储层效应[J]. 石油学报,2013,34(4):667-674.
GAO Youfeng, WU Yanhui, LIU Wanzhu, et al. Intercrystalline micropore characteristics and reservoir effect of Yingcheng Formation volcanic rock in Yingtai fault depression, southern Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,34(4):667-674.

(编辑　徐会永)