

玄武质火山机构火山岩的储集性能分析

——来自福建漳州牛头山古火山机构的类比研究

马野牧, 陆现彩, 张雪芬, 汪恺, 胡文瑄

内生金属矿床成矿机制国家重点实验室; 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京, 210093

内容提要: 火山岩作为特殊的油气储集岩类型, 在国内外均有成功的勘探和开发实例。然而因其规模和储量相对较小, 储集空间和成藏系统较为复杂, 研究工作起步较晚。鉴于前人研究多依赖于钻井岩芯描述和测井数据分析, 为了获得岩石孔隙和各类裂缝在古火山机构中的空间分布规律, 本文对福建漳州牛头山玄武质火山岩进行了野外调查和岩石物性分析。牛头山古火山历经四期喷发, 地表可见四层喷溢相玄武岩层和两处火山颈相岩石出露。喷溢相玄武质火山岩的孔隙度变化较大, 从 5.34% 到 23.73% 间不等, 但渗透率均较低(平均值为 $0.173 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。火山机构中节理和裂缝较为发育, 除火山颈相的柱状节理、火山喷溢相的爆炸缝、冷凝节理外, 熔岩/下伏地层接触热变质成因的高孔带、幔源包体裂缝和爆炸孔以及后期形成的构造裂缝、风化破碎带等均有着重要的意义, 这些面型单元构成了贯通整个火山机构的空间网络, 使古火山机构的储集潜力不容忽视。

关键词: 火山机构; 储集空间; 玄武岩; 岩石物性; 牛头山

近二十年来, 国内外相继发现大量以火山岩为储集岩的油气藏, 火山岩油气藏显示出广阔的时空分布和勘探前景(Nakata, 1980; 张万选等, 1981; Vernik, 1990; Grynberg et al., 1993; 郭占谦, 1998; Waseda et al., 1998; Mitsuhata, et al., 1999; Othman et al., 2001; 刘嘉麒等, 2010)。可作为油气储集层的火山岩岩性多种多样, 业已在凝灰岩(Gries et al., 1997)、正长岩(Gries et al., 1997)、安山岩(Hinterwimmer et al., 2002)、火山碎屑岩(Sakata et al., 1989; Hinterwimmer, 2002; Magara, 2003)和玄武岩(Ruth, 2007)等中发现有工业油藏, 其中玄武岩油气藏报道较多, 如俄罗斯远东和高加索地区 Yarakhtin 粗面玄武岩油气田(Levin, 1995)、印度尼西亚 NW Java 盆地 Jatibarang 油气田(Schutter, 2003)、纳米比亚 Orange 盆地 Kudu 油气田、阿尔及利亚 Triassic/Oude Mya 盆地 Ben Khalala 和 Haoud Berkaoui 油气田(Petford et al., 2003)等。在我国东部已发现的火山岩油气藏亦多赋存于与裂谷带活动有关的玄武岩地层, 例如: 松辽盆地徐家围子断陷火石岭组(Wang et al., 2002)和长岭断陷营城组(王璞珺等, 2003; 杨辉等, 2006; 姜

慧超等, 2009), 济阳坳陷东营凹陷沙河街组(曾广策等, 1997), 黄骅坳陷东营组、沙河街组(Chen et al., 1999), 江汉盆地江陵凹陷始新统(闫春德等, 1996)和苏北盆地古近纪阜宁组(冀国盛等, 2002)等。在这些含油气盆地中, 往往发育有多期次岩浆活动, 出现多层熔岩的叠合, 说明玄武质火山岩及其火山机构具有重要的油气勘探价值。

在玄武质熔岩及其古火山机构中, 广泛发育有多种成因的孔隙和裂缝。孔隙特别是原生孔隙是储集空间的基础(Sruoga et al., 2007), 裂缝是影响火山岩渗透率和连通性的主要因素(Mueller et al., 2008; Quane et al., 2009), 它不仅能连通孤立存在的原生、次生孔隙, 其影响贯穿储层改造、油气运移和聚集及油气开发的全过程(侯英姿, 2003)。从空间上看, 火山岩储层物性和储集空间特征主要受控于火山岩相, 不同岩相带的孔隙和裂隙及其组合存在差异。例如玄武岩储层主要以喷溢相为主, 熔岩层上部主要为溢出孔、杏仁孔、接触带孔缝等, 岩层中下部主要为溶蚀孔、构造裂缝等(Schutter, 2003)。

为了满足火山岩油气藏的开发需要, 有学者基

注: 本次研究得到中石化集团前瞻研究课题(G8804-07-ZS-0020)的资助。

收稿日期: 2010-08-11; 改回日期: 2011-03-08; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 马野牧, 男, 1982年生。博士研究生, 地球探测与信息技术专业。Email: liangliang-001@163.com。通讯作者: 陆现彩, 男, 1972年生。教授。主要从事含油气系统的地球化学过程以及表面矿物学研究。通讯地址: 210093, 南京市鼓楼区汉口路22号, 南京大学地球科学与工程学院; Email: xcljun@nju.edu.cn。

于火山岩野外露头,根据火山岩相分类初步识别出火山通道相、火山熔岩相、火山爆发相和火山喷发沉积相等 4 类孔隙系统(田海芹等,2000)。但更多的研究来自于对钻孔岩芯的岩石学研究(范宜仁等,1999;Wu et al. , 2006)及测井资料的分析和自然伽马、密度、中子和声波等数据来讨论玄武岩的储层物性(Galle et al. ,1992;王芙蓉等,2003)和裂缝产状(Khalil et al. , 1991)等问题,但是对火山岩相与孔隙、裂缝的关系、孔隙—裂缝系统的空间分布还缺乏整体认识。本文选择我国东南部出露较好的新近纪火山机构——牛头山玄武质古火山为研究对象,通过对火山机构的野外调查、典型岩石的镜下观察和物性分析等,探讨玄武质火山岩作为油气储集体系的特征,为认识类似火山岩油气藏的油气聚集条件提供类比依据。

1 地质概况

牛头山古火山位于福建漳州东南部,濒临东海,构造位置处于平潭—东山北东向断裂带中段。火山作用表现为四期间歇性宁静溢流喷发为主的特征(林友坤,1992;夏佳, 1993)。根据岩石结构构造和岩性层序并结合野外产状及分布特征,可区分为喷溢相和火山颈相 2 种岩相(林长江,2002)(图 1)。因其火山机构完整,于 2001 年被批准为国家级地质公园。

火山颈相为岩浆物质填充喷溢通道并冷凝固结而形成的。牛头山存在三期火山颈相岩石(图 1):第一期火山颈相为深灰色、灰黑色橄榄玄武岩广泛分布二辉橄榄岩捕虏体;第二期火山颈相为灰色碱性橄榄玄武岩;第三期火山颈相为灰黑色粗玄岩。岩石致密,气孔不发育,且分布较为局限,但均具柱状节理。

喷溢相是岩浆在地表流动过程中或滞留后,逐渐冷凝、固结而形成的火山岩。牛头山四期喷溢相岩层各具特征(林长江,2002),第一期为灰色、灰绿色气孔、杏仁孔发育的粗玄岩和拉斑玄武岩(图版 I-1);第二期为灰色、黄绿色含气孔拉斑玄武岩、橄榄玄武岩、细碧岩;第三期相对较薄,厚度仅 2~3 m,主要为紫红色粗玄岩,估计为烘烤接触带经风化作用造成;第四期为深灰色玄武岩,厚度较大,下部柱状节理发育,顶部气孔发育。

2 孔隙和裂缝的类型和分布

火山岩孔隙和裂缝类型多样、形态各异,前人对

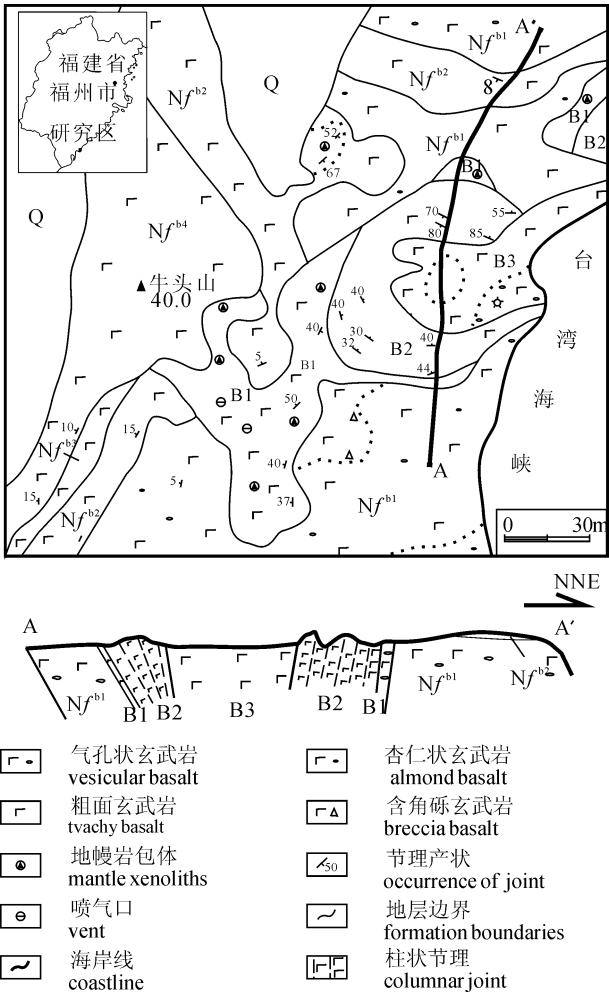


图 1 福建龙海牛头山新近系佛昙组火山口岩性岩相地质图[据林长江(2002)修改]

Fig. 1 The geological map of Lithology— lithofacies of the Neogene Fotan Formation , Niutoushan, Fujian province(Modified from Lin, 2002)

Q—第四系;新近纪佛昙组上段:Nf^{b1}—第一次火山喷溢;Nf^{b2}—第二次火山喷溢;Nf^{b3}—第三次火山喷溢;Nf^{b4}—第四次火山喷溢;火山颈相:B1—第一次侵入;B2—第二次侵入;B3—第三次侵入

Q—Quaternary; the Upper Member of the Neogene Fotan Formation;Nf^{b1}—the 1st volcanic eruption , Nf^{b2}— the 2nd volcanic eruption, Nf^{b3}— the 3rd volcanic eruption, Nf^{b4}— the 4th volcanic eruption; the volcanic diatreme: B1—the 1st invasion, B2—the 2nd invasion, B3— the 3rd invasion;

孔隙和裂缝进行了细致的分类(Luo et al. , 1999, 2005;Sruoga et al. , 2004,2007;王璞珺等,2008;白雪峰,2009;黄玉龙等,2010),主要包括岩浆喷发阶段形成的原生气孔和冷凝裂缝等,以及岩石固结后因构造作用、风化作用以及热液作用等形成的次生孔隙和裂缝。

2.1 孔隙类型及物性特征

2.1.1 原生孔隙

原生孔隙指熔浆流挥发分游离聚集,并呈气泡状向压力较小的熔浆流上方逸出,固结过程中因冷凝而封存形成的气孔。这类气孔的形态包括圆形、椭圆形、线型或不规则形态,大小不等(0.5mm~10mm),多孤立分布,连通性差(图版 I-2);空间分布不均,主要发育在研究区中溢流相玄武岩顶部,在火山颈相的顶部亦有少量出现。如果气孔被裂缝切穿,可使孤立的气孔相互连通,则可形成有效孔隙。部分气孔被绿泥石、方解石或沸石等矿物部分或完全充填,形成缩小的气孔即杏仁孔(图版 I-3)。

2.1.2 次生孔隙

牛头山火山岩中热液活动不显著,但在显微镜下仍可见到喷溢相和火山颈相玄武质火山岩中均发育有斑晶溶蚀孔和基质内溶蚀孔。

斑晶溶蚀孔是长石、橄榄石等斑晶被溶蚀形成的溶蚀孔。孔隙形态不规则,斑晶部分溶蚀为蜂窝状和筛孔状,甚至有斑晶全部被溶蚀。基质内溶蚀孔指玻璃基质发生脱玻化或被溶蚀形成细小的筛孔状次生孔隙。两种类型的次生孔隙均具有一定的连通性。类似次生孔隙在多个火山岩油藏中均可作为重要的储集空间(王璞珺等,2008)。

2.1.3 物性特征

本研究系统分析了两种岩相样品的物性特征,包括孔隙度、视密度、渗透率等。孔隙度测量使用仪器为 WX-2000 型孔隙结构仪,工作压力 200 MPa,汞体积测量范围 0~6 mL,汞体积变化分辨率小于 1 μ L。渗透率测量使用 WD-97 型围压多向流气体渗透率测定仪最大驱替压力 32 MPa,最大环压压力 42 MPa,恒温箱温度范围 15~120℃(控制精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$),平流泵流量 0.01~9.99 mL/min(42 MPa),渗透率测试范围 0.001~5000 mD。分析测试依据中华人民共和国石油天然气行业标准——岩芯分析方法 SY/T 5336-2006 完成。所选测试岩石中未见裂缝。测试分析由中石化无锡石油地质研究所实验研究中心完成。

火山颈相与喷溢相的孔隙度和渗透率有明显差别,但不同期次喷溢相的差别不明显(表 1)。喷溢相岩石的

孔隙度变化较大(5.34%~23.73%),平均值 15.10%,大多数样品具高孔隙度特征,说明喷溢相火山岩孔隙较发育;但火山颈相(nts-10,nts-11,nts-24)基本不发育孔隙,孔隙度低,平均 1.0%左右,视密度大,平均 2.77 g/cm³。特别指出,样品 nts-19 呈紫红色,取自第二期喷溢相玄武岩的顶部,受到直接接触的上覆玄武岩的烘烤作用,其孔隙度非常高(28.91%),较为疏松。由此可见,热烘烤对孔隙形成贡献很大。

渗透率分析表明,各相带火山岩的渗透率普遍偏低,在 $0.013\times 10^{-3}\sim 0.691\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,平均值为 $0.145\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (喷溢相火山岩渗透率为 $0.173\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$),属于低渗透率水平[低渗透率: $0.1\times 10^{-3}\sim 0.5\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (王璞珺,2008)]。渗透率与孔隙度呈正相关关系(图 2a),但并非严格的线性递增关系,因为渗透率的大小还取决于喉道结构,即岩石的联通性。对于火山岩而言岩石渗透能力还取决于宏观上的裂缝发育水平。

视密度与孔隙度呈负相关性(图 2b),孔隙度增加,视密度减小。表明岩石中不同岩性中的封闭气孔的相对含量差异不明显,仅细碧岩的视密度相对较低,推测其封闭孔含量相对较高。喷溢相视密度范围 2.14~2.77 g/cm³,平均值 2.52 g/cm³。

2.2 面型储集空间

裂缝不仅是油气运移的通道,亦可作为油气储

表 1 牛头山火成岩孔隙度、渗透率分析结果

Table 1 Porosity and permeability of igneous rocks in Niutoushan

样号	岩相	喷溢期次	岩性	孔隙度 (%)	视密度 (g/cm ³)	渗透率 ($\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$)
nts-24	火山颈相	第二次侵入	橄榄玄武岩	0.92	2.78	0.015
nts-10	火山颈相	第三次侵入	粗面玄武岩	0.86	2.78	0.013
nts-11	火山颈相	第三次侵入	粗面玄武岩	1.49	2.76	0.019
nts-4	喷溢相	第一期	拉斑玄武岩	14.74	2.56	0.127
nts-8	喷溢相	第一期	拉斑玄武岩	17.73	2.58	0.127
nts-15	喷溢相	第一期	拉斑玄武岩	11.78	2.58	0.163
nts-2	喷溢相	第一期	橄榄拉斑玄武岩	5.34	2.77	0.022
nts-12	喷溢相	第一期	橄榄拉斑玄武岩	19.88	2.50	0.157
nts-13	喷溢相	第一期	橄榄拉斑玄武岩	16.77	2.58	0.050
nts-16	喷溢相	第一期	橄榄拉斑玄武岩	17.47	2.41	0.067
nts-1	喷溢相	第一期	橄榄玄武岩	23.73	2.31	0.691
nts-5	喷溢相	第一期	橄榄玄武岩	7.16	2.76	0.026
nts-6	喷溢相	第一期	橄榄玄武岩	9.54	2.74	0.312
nts-17	喷溢相	第一期	橄榄玄武岩	22.56	2.36	0.366
nts-18	喷溢相	第一期	橄榄玄武岩	13.72	2.60	0.068
nts-21	喷溢相	第一期	橄榄玄武岩	16.62	2.52	0.195
nts-27	喷溢相	第二期	细碧岩	14.33	2.40	0.048
nts-19	喷溢相	第二期顶部	橄榄拉斑玄武岩 (接触带)	28.91	2.14	—

注:nts-19 样品较为破碎无法取小圆柱,故无渗透率数据。

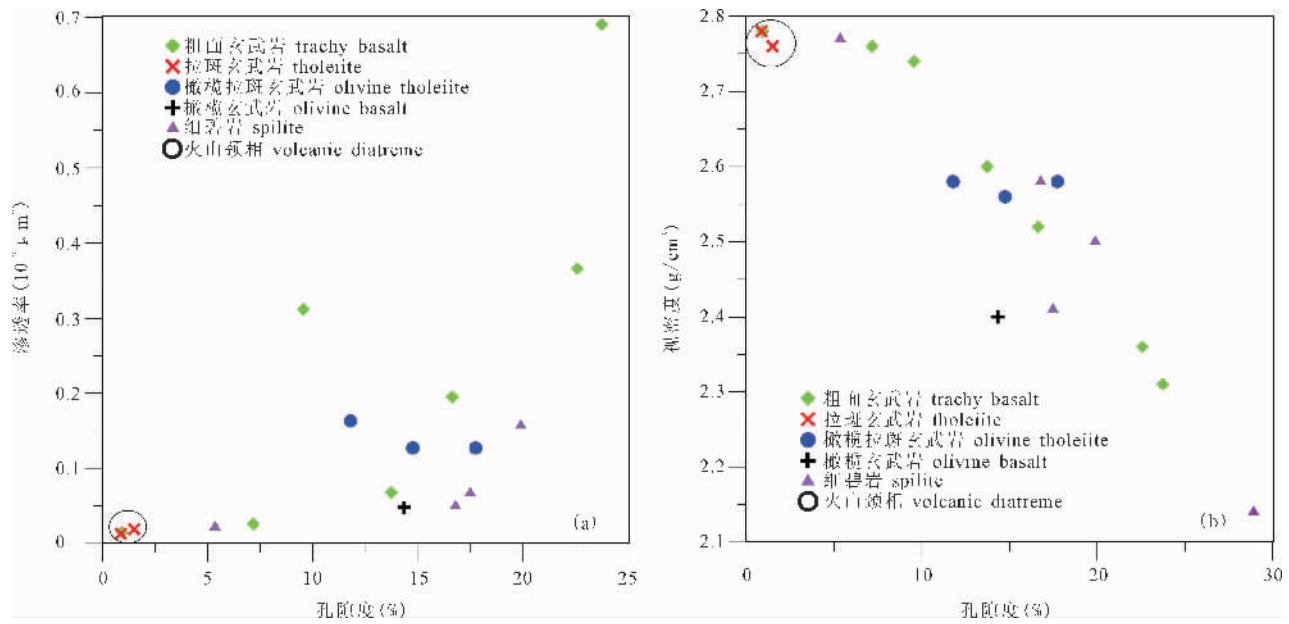


图 2 火山岩渗透率—孔隙度关系图

Fig. 2 Physical properties of volcanic rocks

(a): 视密度与孔隙度关系, (b): 渗透率与孔隙度关系

(a) Apparent density vs. porosity; (b) permeability vs. porosity

集的空间。仅靠岩芯观察、测井数据分析和渗透率测定并不能很好地揭示其空间分布和发育水平。本研究以野外调查为基础,系统考察了牛头山古火山的裂缝特征。根据成因,研究区面状裂缝可分为冷凝裂缝、爆炸裂缝和次生裂缝等 3 类。

2.2.1 冷凝裂缝

柱状节理广泛分布在火山颈相和喷溢相火山岩中,是岩浆冷凝作用,在固结过程中产生垂直于收缩方向的张性裂隙,而产生垂直于熔岩层面或地表的张节理(孙鼎等,1985)。柱状节理表现为密集的多边形的柱状节理(图版 I-5),节理面近直立,柱体直径在 30~50 cm 之间。火山颈相岩石比较致密,但节理缝裂缝宽度大(可达 1~4 mm),基本没有发生充填作用,联通性较好。柱状节理在火山颈相中较为发育,分布在海岸和近海岛屿林进屿。

枕状熔岩环状微裂隙是另外一种冷凝裂缝。玄武质岩浆喷发形成球状熔岩周围发育有环状张裂隙(图版 I-4, I-6)。由于这类熔岩主要分布在近火山颈相附近的喷溢相中,因此该种裂缝分布与之相同。

岩石包体裂缝:在第一期火山颈相橄榄玄武岩中发育有上地幔超基性岩包体(图 1),在岩浆上升过程中包体与围岩因热膨胀性不同,在冷凝过程中不一致收缩,而使其周边形成放射性裂缝(图版 I-

7),且包体矿物中的微裂隙发育(图版 I-8)。在牛头山古火山中,包体裂缝主要分布在火山颈相和近火山口第三次充填相熔岩中,且出露较多,因此这种裂缝也可作为重要的储集空间类型。

2.2.2 爆炸缝

当富挥发分深部残余岩浆或热液上升到地表极浅处时,由于压力降低,岩浆中的挥发物质快速爆裂释放(Sruoga et al., 2007),甚至产生猛烈的爆炸作用,除造成岩石破碎外,还可改造原有气孔或产生新的气孔。同时沿着爆炸孔向四周扩散产生以爆炸孔为中心的放射状爆炸缝隙(图版 II-1),当爆炸孔分布较密时,爆炸缝会相互联结成网状。爆炸缝还能够把单独的孔隙连通起来,使孤立的无效孔隙成为连通的有效油气储集空间,这类缝隙在研究区喷溢相岩层中较为常见,最密集处可达 2~4 个爆炸孔/ m^2 。

2.2.3 次生裂缝

火山岩成岩后受构造应力作用产生的裂缝,连通气孔和晶体、基质溶蚀孔等。其分布受局域构造应力场控制,晚期裂缝切割早期裂缝,同时起着叠加和强化裂缝的作用,连通性好(图版 II-2),不仅是重要的储集空间类型,同时也是深部流体和油气运移的主要通道(刘嘉麒等,2010;黄玉龙等,2010)。主要分布在研究区火山颈塌陷区及断裂带附近。

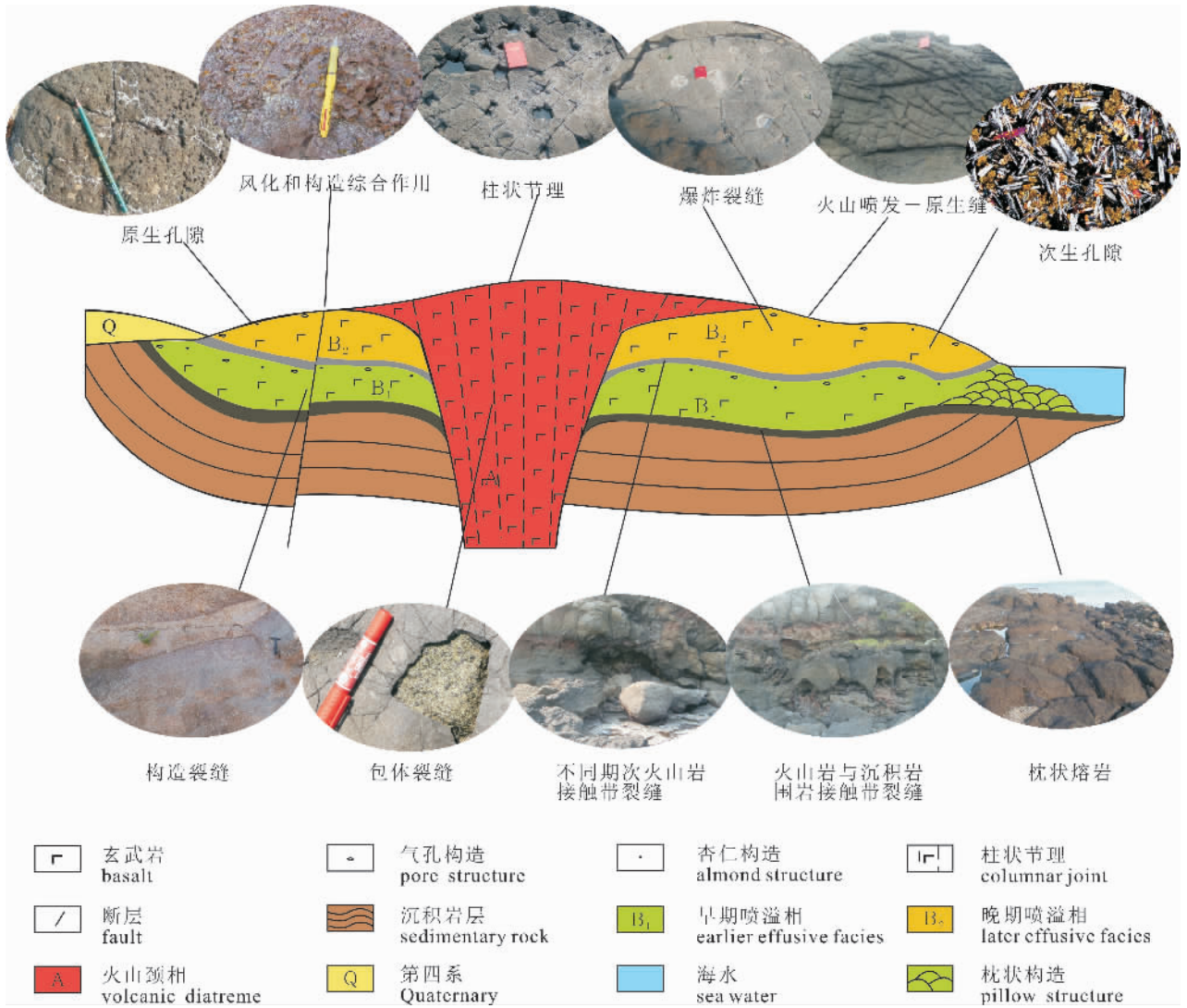


图 3 牛头山火山机构孔隙、裂缝分布示意图
Fig. 3 Distribution of pores and cracks in the Niutoushan volcanic edifice

在火山间歇期或火山活动结束后,长期暴露于地表的火山岩遭受风化作用而使先期形成的裂缝进一步发育,贯通性增加(图版 II-3)(李森明等,2007,黄玉龙等,2010);若长期暴露,甚至有可能形成风化壳。研究区内仅在断层和熔岩与下伏岩层接触带附近见到风化作用的影响。

2.3 熔岩层下伏接触带

喷溢相火山岩在冷却结晶过程中使下伏岩层受热而变质,通常会产生变质孔隙和裂缝。尽管受热变质岩石的厚度较薄,但接触带分布面积大,其重要性不容忽视。接触带包括火成岩与下伏沉积围岩接触带、不同喷发期次的火山岩之间接触带两类。

当下伏岩层为碎屑沉积岩时,火成岩对围岩烘烤后使之岩性发生变化,使岩层中的碳酸盐矿物分

解,产生变质孔隙;同时,下伏碎屑沉积岩中的孔隙流体受热,化学活性增强,不断溶蚀接触带附近岩石的原生矿物而形成溶蚀孔,亦可增强上覆火成岩的储集性能(谢忠怀等,1998)。图版 II-4、II-5 可见先期沉积岩经后期喷溢的火山岩烘烤后受热变质,再经历风化作用产生大量孔洞。接触带厚度 1~2 m 左右,孔洞大小不一,直径由几 cm 到 50 cm 不等。

当晚期喷溢的火山岩覆盖在早期火山岩上时(图版 II-6),受喷溢岩浆热烘烤作用,下伏玄武质火成岩氧化,接触带出现大量的孔隙和裂缝,同时颜色变紫红色。接触带厚度 1~2 m 左右,产生圆形、椭圆形、或不规则的孔隙和裂缝,孔隙大概在 0.5~5 cm 间,裂缝最宽处可达 10 cm,产生高孔隙高流通能力的双高现象,提高了岩石的储集空间和流通能

力。该类接触带次生孔隙的成因大概以热液蚀变为主,玄武岩层暴露地表后,会受雨水或地表径流影响而富含孔隙流体,被晚期岩浆覆盖后,形成热液,进而造成蚀变孔隙富集带。

3 讨论

以玄武岩为代表的火山岩孔隙度和渗透率及岩石结构随埋藏深度变化不明显,尤其是在埋藏深度较大时,其储集性能远好于同埋深的碎屑岩储层(Dobson et al., 2003; Moldrup et al., 2003; Stimac et al., 2004; 王璞珺等,2008),能够作为深部油气藏的重要勘探对象。

3.1 孔隙特征与火山岩相

火山岩的原生、次生孔隙和裂缝影响其孔隙度和渗透性,进而成为油气储集性能的决定性因素(Sruoga et al., 2004,2007; Reimus et al., 2007)。由牛头山古火山机构可知,爆发相、喷溢相均可作为油气储层,但近火山口附近岩层的存储条件最好(王璞珺等,2003,2006),喷溢相岩石兼具孔隙和裂缝两种储集空间,孔隙主要分布于每期喷发火山岩的上部,裂缝成因各异。结合研究区野外观察和薄片描述对玄武质火山岩的孔隙和裂缝进行分类(表 2)

牛头山喷溢相火山岩具有高孔隙度(平均值 16.02%)低渗透率(平均值 $0.173 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的特点,略好于松辽盆地营城组玄武岩储层(孔隙度均值 4.70%,渗透率均值 $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)(黄玉龙等,2010)。尽管孔隙度与渗透率之间存在正相关性,但不同于砂岩,由于火山岩中存在相当数量的孤立孔隙,因此渗透率明显偏低。随着热接触变质、构造活动和风化作用等的影响,在大量生成次生孔隙的同

时,原生孔隙的连通性亦增强,甚至有可能成为优于砂岩的油气储集空间。

3.2 接触带—裂缝系统及其石油地质意义

由牛头山古火山可知,在火山机构中,存在着复杂的孔隙体系(图 3)。研究区玄武质火山岩中所发育的溢出孔、杏仁孔、斑晶和基质溶蚀孔等孔隙具有分散性和不连通性,难以形成有效的储集空间,但冷凝节理、熔岩与下伏岩石接触带以及包体爆炸缝能够起到连通孤立孔隙的效果。在其它次生作用改造后,岩体中可形成各种次生孔隙和裂隙,孔、缝、洞交织在一起可以大大改善火山岩的储集性能。

除冷凝节理和微裂缝外,爆炸缝和接触带裂缝不容忽视。爆炸缝主要发育在近火山口处,因其多呈网状分布、且具穿层特征,可连通各个孤立的原生孔隙,提高火山岩的渗透性(谢忠怀等,1998)。玄武岩往往具有单层厚度小、延伸范围大和活动期次多的特点,尽管熔岩与下伏岩层顶部的接触带较薄,但热变质或热蚀变孔隙和裂缝发育,如取烘烤接触带下伏火山岩样品 nts-19 的孔隙度高达 28.91%(表 1),说明受到热影响以后的玄武质火山岩中可产生更多的孔隙和裂缝。勘探发现,火山岩旋回或期次顶部是油气储层有利单元(黄玉龙等,2010),对比松辽盆地营城组基性火山岩储层(Feng, 2008,黄玉龙等,2010)和辽河盆地兴隆台玄武岩储层(Luo et al., 2005),虽然两个地区均为中低孔隙度、低渗透率,仅局部发育宏观孔缝,但由于火山活动具有多期性,产生多个接触带裂缝连通孔隙,且厚度可观,使其均为良好油气储层。

国内油气勘探显示,各地油气藏玄武质火山岩储集空间类型都有与牛头山相同或相似的地方(邹

表 2 牛头山火山机构储集空间类型和特征
Table 2 Types and characteristics of volcanic reservoir space in Niutoushan

成因	类型	储集空间类型	形成机理	分布特征	分布岩相
火山岩孔隙	原生孔隙	溢出孔 杏仁孔	挥发分逃逸 矿物充填后残余孔隙	岩层顶部 岩体的顶部、不规则状	喷溢相 喷溢相
	次生孔隙	斑晶溶蚀孔 基质内溶蚀孔	溶解和交代 溶解和交代	斑晶间 自生矿物晶内	喷溢相、火山颈相 喷溢相、火山颈相
面型储集空间	原生裂缝	柱状节理	冷凝收缩	岩体中、下部,高角度	喷溢相、火山颈相
		球状冷凝裂缝	冷凝收缩	岩层表面	喷溢相
		包体裂缝	冷凝收缩	岩体中均有分布	喷溢相
		爆炸缝	气压降低,爆炸作用	岩层顶部,中间圆形放射状	喷溢相
		构造裂缝	构造应力作用	近断层处,呈低角度	喷溢相
		风化裂缝	风化作用	岩层表面	喷溢相、火山颈相
接触带	次生裂缝	下伏沉积岩溶蚀裂缝	接触带热作用	岩层接触面上	喷溢相
		下伏火山岩溶蚀裂缝	接触带热作用	岩层接触面上	喷溢相

注:参考 Luo et al. (1999)、Sruoga et al. (2004)、王璞珺等(2008)制作。

才能等,2008),如松辽盆地徐家围子断陷内下白垩统营城组气藏玄武岩储层以溶孔—裂缝为主,分布在靠近断裂处,喷发具有多期次性(陈建文等,2000;宋维海等,2003);辽河坳陷东部凹陷沙河街组三段油藏玄武岩储层是以发育构造裂隙为特征(张春林等,2008);江汉盆地古近系油藏玄武岩储层亦为中孔低渗的特点,各种类型的气孔为储集空间(闫春德等,1996);济阳坳陷古近系玄武岩及受其热影响的沉积岩油藏具有广阔的发展前景(谢忠怀等,1998;钱峥,1999;刘惠民等,2003);其他如黄骅坳陷枣北地区沙河街组三段、东营凹陷沙河街组(曾广策等,1997),准噶尔盆地车排子凸起石炭系(刘喜顺等,2008)等油气藏的玄武质火山岩储层都广泛发育孔隙和裂缝,基本与牛头山喷溢相火山岩储集空间类型相同或相似,且均具有旋回性。由此可见,可以运用牛头山作为火山机构的模式储集空间(图3),达到火山岩油气储层评价和预测的目的。

4 主要认识

本文通过对福建漳州牛头山古火山玄武质火山岩进行野外调查和岩石物性分析,获得岩石孔隙和各类裂缝在古火山机构中的空间分布特征。主要认识如下:

(1)牛头山玄武质火山岩主要包括喷溢相和火山颈相。其中喷溢相广泛发育孔隙、裂缝。孔隙度变化较大,从5.34%到23.73%间不等,平均值16.02%,属于孔隙度较高,渗透率较低(平均值为 $0.173 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的岩层。

(2)研究区喷溢相顶部包体爆炸缝和多期次喷溢接触带有着重要的意义。接触带因热变质而使孔隙、裂缝广泛发育;爆炸缝可以连接形成裂缝体系,并连通孤立的孔隙。增加和扩大玄武质火山岩的储集空间,使喷溢相顶部成为良好的油气储层。

(3)牛头山玄武质火山机构中发育有复杂的、相互连通的孔—缝带储集空间,与已开发的多个油气田玄武质火山岩储层的储集空间特征一致或相似,具有良好的类比性。

致谢:图版 I-8 由南京大学邱检生教授提供,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献 / References

白雪峰. 2009. 松辽盆地营城组火山岩储层裂缝特征. 世界地质, 28(3): 318~325.
陈建文, 李长山. 2000. 松辽盆地徐家围子断陷营城组火山岩相和火山机构分析. 地学前缘, 7(4): 371~379.

范宜仁, 黄隆基, 代诗华. 1999. 交会图技术在火山岩岩性与裂缝识别中的应用. 测井技术, 23(1): 53~56, 64.
郭占谦. 1998. 火山活动与沉积盆地的形成和演化. 地球科学, 23(1): 59~64.
侯英姿. 2003. 松辽盆地杏山—莺山地区火山岩储集空间类型特征及其控制因素. 特种油气藏, 10(1): 99~105.
黄玉龙, 王璞珺, 舒萍, 张彦玲. 2010. 松辽盆地营城组忠基性火山岩储层特征及成储机理. 岩石学报, 26(1): 82~92.
冀国盛, 戴俊生, 马欣本, 王志云. 2002. 苏北盆地闵北地区阜宁组一、二段火山岩的储集特征. 石油与天然气地质, 23(3): 289~291.
姜慧超, 雷敏, 刘汝强. 2009. 长岭断陷东部下白垩统火山岩储层特征及油气勘探潜力. 岩石矿物学杂志, 28(1): 69~77.
李森明, 陈凤来, 漆万珍, 何燕清, 赵昊, 施兰花. 2007. 马朗凹陷下二叠统风化壳特征与油气成藏关系. 新疆石油地质, 28(5): 554~556.
林长江. 2002. 福建漳州牛头山火山地质公园火山喷发层序及岩相. 福建地质, 21(4): 195~199.
林友坤. 1992. 福建天马山—牛头山新生代玄武岩及其火山作用. 岩石学报, 8(4): 376~385.
刘惠民, 谢忠怀. 2003. 渤海湾盆地济阳坳陷第三系火成岩岩石化学特征及成因分析. 石油实验地质, 25(4): 385~389.
刘嘉麒, 孟凡超, 崔岩, 张玉涛. 2010. 试论火山岩油气藏成藏机理. 岩石学报, 26(1): 1~13.
刘喜顺, 郭建华, 瞿建华, 张源志, 李炉明. 2008. 准噶尔盆地西北缘火山岩孔隙特征及演化. 新疆石油地质, 29(5): 555~558.
钱峥. 1999. 济阳坳陷罗151块火成岩油藏储集层概念模型. 石油勘探与开发, 26(6): 72~74.
束景锐, 肖敦清, 苏俊青. 1997. 黄骅坳陷枣北地区沙三段火山岩油藏储层特征. 特种油气藏, 4(3): 1~5.
宋维海, 王璞珺, 张兴洲等. 2003. 松辽盆地中生代火山岩油气藏特征. 石油与天然气地质, 24(1): 12~17.
孙鼎, 彭亚鸣. 1985. 火成岩石学. 地质出版社, 55~131.
田海芹, 马玉新, 于文芹, 赵勇生, 刘克奇. 2000. 山东昌乐—临朐火山岩孔隙系统研究. 岩石学报, 16(2): 174~182.
王芙蓉, 陈振林, 田继军, 王雪莲. 2006. 火山岩储集性研究. 重庆石油高等专科学校学报(自然科学版), 5(3): 44~46.
王璞珺, 陈树民, 刘万洙, 单玄龙, 程日辉, 张艳, 吴海波, 齐景顺. 2003. 松辽盆地火山岩相与火山岩储层的关系. 石油与天然气, 24(1): 18~23.
王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 程日辉, 单玄龙, 任延广. 2003. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义. 吉林大学学报(地区科学版), 33(4): 449~456.
王璞珺, 吴核勇, 庞颜明, 门广田, 任延广, 刘万洙, 边伟华. 2006. 松辽盆地火山岩相: 相序、相模式与储层物性的定量关系. 36(5): 805~812.
王璞珺, 冯志强, 刘万洙, 陈树民, 单玄龙, 吴河勇, 程日辉, 王玉华, 边伟华, 任延广, 郑常青, 冯子辉, 黄薇, 唐华风, 黄玉龙. 2008. 盆地火山岩. 北京: 北京科学出版社, 1~115.
夏佳. 1993. 福建省龙海牛头山区玄武岩地质学和岩石学研究. 南京建筑工程学院学报, 26(3): 49~63.
谢忠怀, 刘宝军. 1998. 济阳坳陷第三系火成岩岩相, 储集特征及成因. 复式油气田, 12(4): 62~64.
闫春德, 俞惠隆, 余芳权, 王典敷. 1996. 江汉盆地火山岩气孔发育规律及其储集性能. 江汉石油学院学报, 18(2): 2~6.
杨辉, 张研, 邹才能, 文百红, 李建忠, 李明. 2006. 松辽盆地深层火山岩天然气勘探方向. 石油勘探与开发, 33(3): 274~281.
曾广策, 王正方, 郑和荣, 付瑾平. 1997. 东营凹陷新生代火山岩及其

- 与盆地演化,油藏的关系. 地球科学:中国地质大学学报, 22(2):157~164.
- 张春林,朱志国. 2008. 辽河凹陷热河台油田火山岩储层评价. 内蒙古石油化工, 13:47~50.
- 张万选,张厚福. 1981. 石油地质学. 北京:北京石油工业出版社:125~126.
- 邹才能,赵文智,贾承造,朱如凯,张光亚,赵霞,袁选俊. 2008. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布. 石油勘探与开发, 35(3):257~271.
- Chen Zhenyan, Yan Huo, Li Junsheng, Ge Zhang, Zhang Zhanwen, and Liu Baozhu. 1999. Relationship between Tertiary volcanic rocks and hydrocarbons in the Liaohe Basin, People's Republic of China. AAPG Bulletin, 83(6):1004~1014.
- Dobson P F, Kneafsey T J, Hulen J, and Simmons A. 2003. Porosity, permeability, and fluid flow in the Yellowstone geothermal system, Wyoming. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 123(3~4):313~324.
- Feng Zhiqiang. 2008. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: A case study from the Qingshen gas field in the Songliao Basin, NE China. Marine and Petroleum geology, 25(4~5):416~432.
- Galle C, Lapeyre C, Struillou R. 1992. Total water porosity and neutron porosity. Oil & Gas Science and Technology, 47(5):587~602.
- Gries R R, Clayton J L, China O. 1997. Leonard Geology, thermal maturation, and source rock geochemistry in a volcanic covered basin; San Juan Sag, south-central Colorado. AAPG Bulletin, 81(7):1133~1160.
- Grynberg M E, Papava D, Shengelia M, Takaishvili A, Nanadze A, Patton D K. 1993. Petrophysical characteristics of the middle Eocene laumontite tuff reservoir, samgori field, republic-of-georgia. Journal of Petroleum Geology, 16(3):313~322.
- Hinterwimmer G. 2002. Los reservorios de la Serie Tobifera. In: Schiuma M, Hinterwimmer G, Vergani G, eds. Rocas reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina; V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos; Instituto Argentino de Petróleo y Gas, Bs. As.:27~47.
- Khalil M M, Pigah J. 1991. Petrophysical approach to description of a producing fractured basement reservoir. Middle East Oil Show, 11:16~19.
- Levin L W. 1995. Volcanogenic and volcanoclastic reservoir rocks in Mesozoic-Cenozoic island arcs; examples from the Caucasus and the NW Pacific. Journal of Petroleum Geology, 18(3):267~287.
- Luo Jinglan, Zhang Chengli, Qu Zhihao. 1999. Volcanic reservoir rocks: A case study of the Cretaceous Fenghuadian Suite, Huanghua Basin, eastern China. Journal of Petroleum Geology, 22(4):397~415.
- Luo Jinglan, Morad S, Liang Zhigang, and Zhu Yushuang. 2005. Controls on the quality of Archean metamorphic and Jurassic volcanic reservoir rocks from the Xinglongtai buried hill, western depression of Liaohe basin, China. AAPG Bulletin, 89(10):1319~1346.
- K. 2003. Volcanic reservoir rocks of northwestern Honshu Island, Japan (in Hydrocarbons in crystalline rocks). Geological Society Special Publications, 214:69~81.
- Mitsuhata Y, Matsuo K, Minegishi M. 1999. Magnetotelluric survey for exploration of a volcanic-rock reservoir in the Yurihara oil and gas field, Japan. Geophysical Prospecting, 47(2):195~218.
- Moldrup P, Yoshikawa S, Olesen T, Komatsu T, and Rolston D E. 2003. Air permeability in undisturbed volcanic ash soils; predictive model test and soil structure fingerprint. Soil Science Society of America Journal, 67(1):32~40.
- Mueller S, Scheu B, Spieler O, Dingwell D B. 2008. Permeability control on magma fragmentation. Geological Society of America, 36(5):399~402.
- Nakata J K. 1980. Distribution and petrology of the Anderson-Coyote Reservoir volcanic rocks, California. Open-File Report—US Geological Survey:130.
- Othman R, Arouri K R, Ward C R, McKirdy D M. 2001. Oil generation by igneous intrusions in the northern Gunnedah basin, Australia. Organic Geochemistry, 32:1219~1232.
- Petford N and McCaffery K J W. 2003. Hydrocarbons in crystalline rocks: An introduction (in Hydrocarbons in crystalline rocks). Geological Society, London, Special Publications, 214:1~5.
- Quane S L, Russell J K, and Elizabeth A. 2009. Friedlander. Time scales of compaction in volcanic systems. Geological Society of America, 37(5):471~474.
- Reimus P W, Callahan T J, Ware S D, Haga M J, and Counce D A. 2007. Matrix diffusion coefficients in volcanic rocks at the Nevada test site: Influence of matrix porosity, matrix permeability, and fracture coating minerals. Journal of Contaminant Hydrology, 93(1~4):85~95.
- Ruth E B Andrew. 2007. Agust Gudmundsson Distribution, structure, and formation of Holocene lava shields in Iceland. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 168:137~154.
- Sakata S, Takahashi M, Igari S, Suzuki N. 1989. Origin of light hydrocarbons from volcanic rocks in the "Green tuff" region of Northeast Japan; biogenic versus magmatic. Chemical Geology, 74(3~4):241~248.
- Schutter S R. 2003. Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks. Geological Society, London, Special Publications, 214:35~68.
- Sruoga P, Rubinstein N, Hinterwimmer G. 2004. Porosity and permeability in volcanic rocks; a case study on the Serie Tobifera, South Patagonia, Argentina. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 132(1):31~43.
- Sruoga P, Rubinstein N. 2007. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquen basins, Argentina. AAPG Bulletin, 91(1):115~129.
- Stimac J A, Powell T S, and Golla G U. 2004. Porosity and permeability of the Tiwi geothermal field, Philippines, based on continuous and spot core measurements. Geothermics, 33(1~2):87~107.
- Vernik L. 1990. A new type reservoir rock in volcanoclastic sequences. AAPG Bulletin, 74:830~836.
- Wang Pujun, Liu Wanzhu, Wang Shuxue and Song Weihai. 2002.⁴⁰Ar/³⁹Ar and K/Ar dating on the volcanic rocks in the Songliao basin, NE China: Constraints on stratigraphy and basin dynamics. International Journal of Earth Sciences, 91:331~340.
- Waseda A, Nishita H. 1998. Geochemical characteristics of terrigenous and marine-sourced oils in Hokkaido, Japan. Organic Geochemistry, 28(1/2):21~47.

Wu Changzhi, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, Ren Zuowei, Chen Zhengyan, Li Weiqiang. 2006. Formation mechanisms of hydrocarbon reservoirs associated with volcanic and subvolcanic intrusive rocks: Examples in Mesozoic—Cenozoic basins of Eastern China. AAPG Bulletin, 90(1): 137~147.

Physical Properties of Basalt Reservoir of Paleovolcanic Edifices
—— An Analogous Study on Niutoushan Volcanic Edifice,
Fujian Province, Eastern China

MA Yemu, LU Xiancai, ZHANG Xuefen, WANG Kai, HU Wenxuan

State key lab for mineral deposits, School of earth sciences and engineering, Nanjing University, Nanjing, 210093

Abstract: As a special type of oil and gas reservoir rocks, volcanic rock has been successfully explored and exploited in China and many other countries. However, due to its smaller size and relatively lower oil reserves than sedimentary rocks, and complexity of reservoir spaces, researches on the physical properties of volcanic rocks have been carried out only in the past decade. Most of the previous studies focus on the description of drilling cores and ananalysis of well log data, field investigations and physical property analysis of rocks has been done in Niutoushan edifice, eastern Fujian province, was carried out in order to obtain the spatial distribution of the pores and cracks with various genesis. The porosity and permeability of typical basaltic rocks have been analyzed. Four effusive facies basalt layers and two volcanic necks with rock outcrops can be identified. For effusive basaltic volcanic rocks, the porosity changes greatly from 5.34% to 23.73%, while low permeability is found for all the samples (average $0.173\times10^{-3}\mu\text{m}^2$). Joints and cracks in the whole edifice are well developed. In addition to the columnar joints in volcanic plugs, crack explosion and condensation joints in the volcanic eruption phase, the contact between the lava and underlying rocks (high porosity zones), mantle xenoliths cracks, explode holes and post-volcano tectonic or weathering fractures also play important roles in the accumulation of petroleum. These facial spaces in different volcanic facies can form a interconnected network, bringing considerable potentials to volcanic edifices as oil—gas reservoirs.

Key words: volcanic edifice; reservoir space; basaltic volcanic; porosity and permeability; Niutoushan, Fujian

图 版 说 明 / Explanation of Plates

图 版 I / Plate I

1. 喷溢相玄武质火山岩。
2. 溢出孔。
3. 杏仁孔。
4. 张节理。
5. 柱状节理。
6. 球状冷凝裂缝。
7. 二辉橄榄岩包体裂缝。
8. 尖晶石二辉橄榄岩包体显微照片(正交偏光)。
1. Basaltic volcanic of effusive facies.
2. Overflow hole.
3. Amygdale.
4. Tensional joint.
5. Columnar joint.

6. Spherical condensation crack.
7. Crack of lherzolite xenoliths.
8. Micrographs of spinel lherzolite xenoliths(orthogonal polarized).

图 版 II / Plate II

1. 爆炸裂缝。
2. 构造裂缝。
3. 构造和风化综合作用造成的破碎带。
4、5. 火山岩与围岩接触带。
6. 不同期次火山岩接触带。
1. Crack explosion.
2. Structural fracture.
3. Fracture zone by comprehensive role of weathering and tectonism.
4, 5. Fracture of contact zone between volcanic and sedimentary rocks.
6. Fracture of contact zone between different periods volcanic.

马野牧等:玄武质火山机构火山岩的储集性能分析

图版 I

