中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 9 期: 1410 ~ 1417
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

流纹岩中球粒储集空间类型及主控因素

田景雄, 孙晓猛*, 张旭庆, 寿永成

吉林大学地球科学学院, 长春 130061
* 联系人, E-mail: sunxiaomeng5210@163.com

收稿日期: 2012-09-02; 接受日期: 2012-12-28; 网络版发表日期: 2013-08-08
国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2009CB219305)资助

摘要 海拉尔盆地呼伦湖凹陷西界下白垩统上库力组球粒流纹岩中与球粒有关的油气储集空间类型包括球粒间缝、层间缝、球粒内部同心环状和网状微裂缝、空腔孔、溶蚀孔和脱玻化孔. 球粒间缝和层间缝主要制约了球粒之间有效面孔率的大小. 脱玻化孔、微裂缝和空腔孔以及球粒直径控制了球粒内部有效面孔率的大小. 球粒内部微裂缝的发育程度和类型决定了溶蚀作用的程度. 溶蚀作用从没有微裂缝→中等发育的放射状和环状微裂缝→非常发育的环状、网状微裂缝逐渐增强. 环状、网状微裂缝的另外一个重要效应是沟通脱玻化孔, 形成孔缝网络. 冷凝收缩作用不仅控制了球粒间缝的形成与发育, 还控制了微裂缝和空腔孔的形成和发育. 球粒直径制约了冷凝收缩作用, 尤其是当直径介于常见的球粒和石泡两者之间时, 最有利于微裂缝和空腔孔的形成. 脱玻化孔本身就是良好的储集空间, 同时还能为地下水和有机质的溶蚀提供显微通道, 而这一通道需要微裂缝的沟通才能更好的发挥作用.

关键词
海拉尔盆地
上库力组
球粒
储集空间
冷凝收缩作用
溶蚀作用
脱玻化作用

火山岩油气藏作为油气勘探的一个新领域, 已经引起中国油气工业的高度关注, 并成为增储的重要领域之一[1~4]. 2002 年在松辽盆地徐家围子断陷早白垩世营城组火山岩中发现了中国东部迄今为止最大的火山岩气田——庆深气田, 到 2008 年已探明天然气储量 2.457×10^{11} m^3[5]. 庆深气田储层岩性以球粒流纹岩和酸性凝灰岩为主. 在徐家围子地区的工业气层中, 球粒流纹岩占所有火山岩岩石类型的 59%, 占低产气层的 48%[1)], 说明球粒流纹岩具有良好的储集性能.

海拉尔盆地是中国东北地区一个重要的中生代含油气盆地, 是大庆油田探区后备储量战略接替地区之一. 油气主要储集于早白垩世上库力组火山熔岩、火山碎屑岩以及火山碎屑沉积岩之中. 在海拉尔盆地呼伦湖凹陷西部边界地区, 火山岩连续分布, 岩性以球粒流纹岩为主. 笔者对上库力组测制了三个剖面, 由南向北依次为三道沟度假村剖面、思潮剖面和天然洞剖面; 其中三道沟度假村剖面球粒流纹岩中含有大量的沥青, 它相当于直接出露到地表的深层火山岩油藏, 展示了丰富的油气储集空间信息, 为球粒油气储集空间类型、特征和主控因素的研究提供了难得的天然实验室.

1) 赵海玲, 杨霄, 王盘喜, 等. 火山岩储层孔隙特征及演化研究. 研究报告. 2007

中文引用格式: 田景雄, 孙晓猛, 张旭庆, 等. 流纹岩中球粒储集空间类型及主控因素. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1410–1417
英文引用格式: Tian J X, Sun X M, Zhang X Q, et al. Reservoir space types and the factors influencing the characteristics of spherulite in rhyolite. Science China: Earth Sciences, 2013, 56: 748−755, doi: 10.1007/s11430-013-4599-0

自 20 世纪中后期以来, 一些学者对球粒的形成做了许多矿物学和岩石学的研究, 这些研究主要集中在球粒形态特征[6~9]、球粒的形成机理[10,11]和晶体生长速率与结构的关系[7,12]三个方面, 少量球粒的石油储集空间研究也仅局限在球粒脱玻化孔和溶蚀孔两种孔隙特征上[13,14]. 因此, 本文将对与球粒有关的球粒间缝、层间收缩缝、球粒内部同心环状和网状微裂缝、空腔孔、溶蚀孔和脱玻化孔等石油储集空间特征和它们的储集能力做详细深入的研究, 探讨形成这些储集空间的主要控制因素和形成机制, 将会对我国东部裂谷型断陷火山岩储集体优选、勘探实践具有重要指导意义.

1　区域地质背景

海拉尔盆地位于内蒙古自治区呼伦贝尔盟境内, 是叠置于华北板块和西伯利亚板块之间古生代造山带之上的中新生代陆相沉积盆地, 面积为 44210 km^2, 与蒙古国的塔木察格盆地是一个盆地(图 1). 盆地具有两隆三坳构造格局, 由西向东依次为: 扎莱诺尔坳陷、磋岗隆起、贝尔湖坳陷、巴彦山隆起和呼河湖坳陷. 盆地内中新生界由老至新依次为上侏罗统塔木兰沟组, 下白垩统铜钵庙组、南屯组 (盆地外围将两组统称为上库力组)、大磨拐河组和伊敏组上白垩统青元岗组, 上新统呼查山组及第四系[15]. 盆地构造演化经历了初始张裂阶段(塔木兰沟组沉积期)、断陷阶段(铜钵庙组和南屯组沉积期)、断坳转化-坳陷阶段(大磨拐河组和伊敏组沉积期)、晚白垩世坳陷阶段(青元岗组沉积期)[16~18]. 烃源岩分布在铜钵庙组、南屯组和大磨拐河组中. 扎莱诺尔坳陷和贝尔坳陷是海拉尔盆地烃源岩最为发育的两个坳陷, 呼伦湖凹陷又是扎莱诺尔坳陷 3 个凹陷中最大的凹陷, 面积为 3500 km^2, 暗色泥岩厚达 792 m[19], 为凹陷边缘上库力组火山岩储集层提供油源.

葛文春等[20]测得上库力组的流纹岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 (127±5) Ma, 时代属于早白垩世早期. 上库力组流纹岩是大兴安岭地区晚中生代火山岩的重要组成部分, 尽管前人对火山岩形成的地球动力学背景存在多种不同的解释, 但是大量岩石化学和地球化学研究表明, 该时期火山岩是大陆岩石圈伸展减薄作用的产物[21~24]. 三道沟度假村上库力组剖面火山岩岩性和岩相复杂多样, 下部为火山集块岩、火山角砾岩、角砾凝灰岩、熔接凝灰岩, 代表了火山喷发旋回早期的爆发相, 中部以球粒流纹岩为主, 代

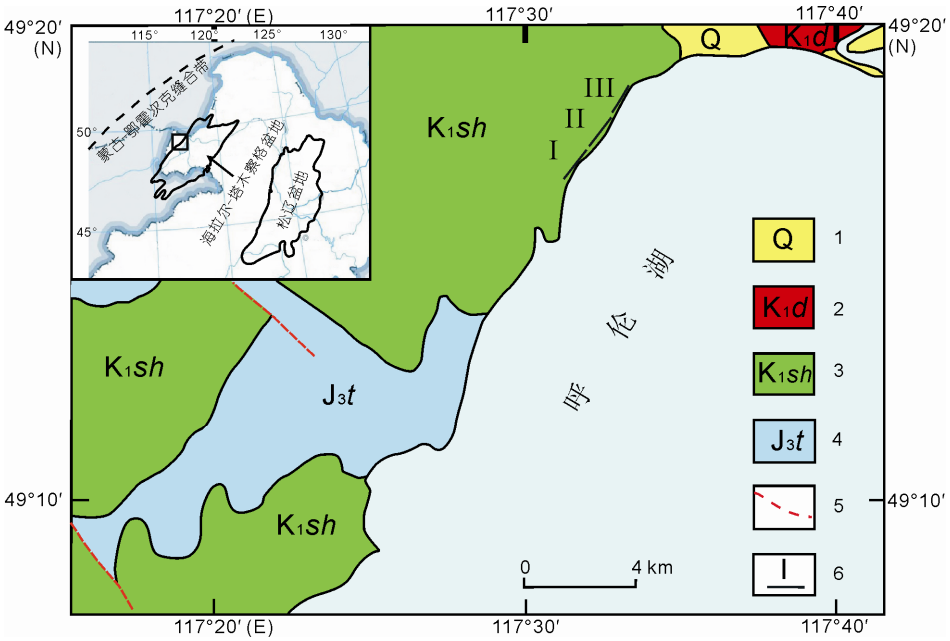


图 1　海拉尔盆地呼伦湖凹陷上库力组地质图

1. 第四系; 2. 下白垩统大磨拐河组; 3. 下白垩统上库力组; 4. 上侏罗统塔木兰沟组; 5. 推断断层; 6. 实测剖面编号及位置. Ⅰ, Ⅱ和Ⅲ分别为三道沟、思潮、天然洞实测剖面

表了火山喷发中期的喷溢相, 上部为角砾集块熔岩、隐爆角砾岩、球粒流纹岩和玻璃质流纹岩, 代表了火山喷发晚期的侵出相和火山通道相, 它们组成了一个完整的火山喷发旋回. 本文所论述的含沥青球粒流纹岩主要分布于火山岩序列中部和上部的喷溢相和侵出相之中.

2 球粒储集空间类型

在实测地质剖面的基础上, 采用普通薄片显微镜观察、荧光分析(所用仪器为德国蔡司公司生产, 型号为 ZEISS Axio Imager M1m)的方法开展球粒储集空间微观特征及类型的研究. 使用岩石薄片孔隙特征及粒度彩色图像分析系统(所用仪器为四川大学图像信息研究所生产, 型号为 CIAS-2004)对样品的有效面孔率进行统计, 统计有效面孔率和研究储集空间类型所使用的样品均为含沥青的球粒流纹岩, 保证了储集空间类型划分的直观性和提高了有效面孔率统计的准确性. 本区与球粒相关的储集空间类型丰富, 根据成因可划分为原生和次生两大类、5 种基本类型. 原生孔隙和裂缝主要包括球粒内部微裂缝、空腔孔、球粒间缝和层间缝; 次生孔隙主要包括溶蚀孔和脱玻化孔. 尽管研究区球粒流纹岩中也分布一些气孔, 但是前人对流纹岩中气孔已经进行了详细研究[13,25,26], 在斑晶炸裂纹、解理缝以及斑晶溶蚀孔中油迹明显, 但是岩石中斑晶稀少, 斑晶炸裂纹、解理缝以及斑晶溶蚀孔的油气储集能力十分有限, 在此不予以讨论.

2.1 球粒间缝

在流纹面理上观察, 球粒间缝是分布在球粒周边的四边形、五边形或者六边形网状裂缝(图 2(a)), 裂缝形态与柱状节理相似, 球粒的形态明显受裂缝制约. 前人认为它们是显微尺度的柱状节理[27,28], 但是, 柱状节理和球粒间缝二者在形态上存在区别, 柱状节理是垂直层面具有一定长度的柱形裂缝, 而球粒间缝是环绕球粒分布的多面体裂缝, 这种多面体裂缝与珍珠构造中多面体裂缝特征相似. 因此, 我们认为球粒多面体裂缝是冷凝收缩作用形成的. 由于球粒冷却速度没有珍珠构造快, 更容易形成规则的多面体裂缝. 球粒间缝是良好的油气储集空间, 镜下可见大量原油充填到球粒间缝之中.

2.2 层间缝

在流纹面理上球粒相互连接形成球粒网, 球粒网之间的球粒间缝相互连接形成层间缝, 球粒网和层间缝相间排列组成流纹构造. 层间缝的发育使球粒网连接性能降低, 在遭受到后期应力作用和溶蚀作用时其开启宽度增加, 导致有效面孔率和渗透率也明显增加. 野外和显微镜下系统测量表明, 球粒流纹岩的层间缝开启宽度在 0.1~1 mm 之间, 线密度一般为 8~10 条/cm, 原油沿层间缝注入并在垂直流纹面理方向上向球粒间缝进行扩散, 最终沉淀于裂缝和孔隙之中, 凝固成大量沥青(图 2(b)). 由于层间缝线密度大、有效孔隙度高、渗透性好, 因此, 能形成良好的油气储集空间. 球粒间缝和层间缝往往叠加在一起. 对局部岩石露头统计表明, 两者平均有效面孔率之和为 16.04%.

2.3 球粒内部微裂缝及空腔孔

在油迹含量较高的球粒个体中几乎全部都具有明显的同心环状和网状微裂缝, 网状微裂缝将球粒内部分割成许多微颗粒(图 2(c)~(f)), 这些微裂缝是球粒在封闭体系中发生等容冷凝收缩作用形成的. 球粒最外圈层是岩浆急剧冷凝形成的玻璃质外壳, 由于玻璃质外壳的封闭作用, 使球粒内部有相对较长的冷凝收缩时间, 球粒内部等容降温, 促进环状和网状收缩缝的形成以及气体充分逸出. 球粒不同微区微裂缝的发育程度不同. 在球粒中心区, 收缩程度较低, 没有形成同心环状和网状微裂缝或者它们不发育, 因此没有分割成或仅仅形成不明显的微颗粒(图 2(f)). 向球粒中部区, 微颗粒明显, 它们彼此分离呈现出规则排列的斑点状, 暗示出收缩程度增大, 微裂缝加宽, 由于后期脱玻化作用以及石油沿微裂缝溶蚀和充填, 使微裂缝发生弥合, 但是仍可以从微颗粒边界形态推断出来. 如果在冷凝过程中伴随大量气体逸出, 环状收缩缝就会发展成空腔孔(图 2(d), (e)).

球粒微裂缝的形成过程可分为两个阶段: 原生成岩阶段[29], 岩浆喷出地表, 在骤冷环境中首先形成球粒的玻璃质外壳, 玻璃质外壳封闭了球粒内部热能和气体的溢出, 使其内部发生缓慢的冷凝收缩, 形成球粒内部同心环状和网状微裂缝、空腔孔以及被微裂缝分割的微颗粒. 次生成岩阶段[29], 球粒遭受到脱玻化作用形成脱玻化孔, 在脱玻化过程中, 同心环状

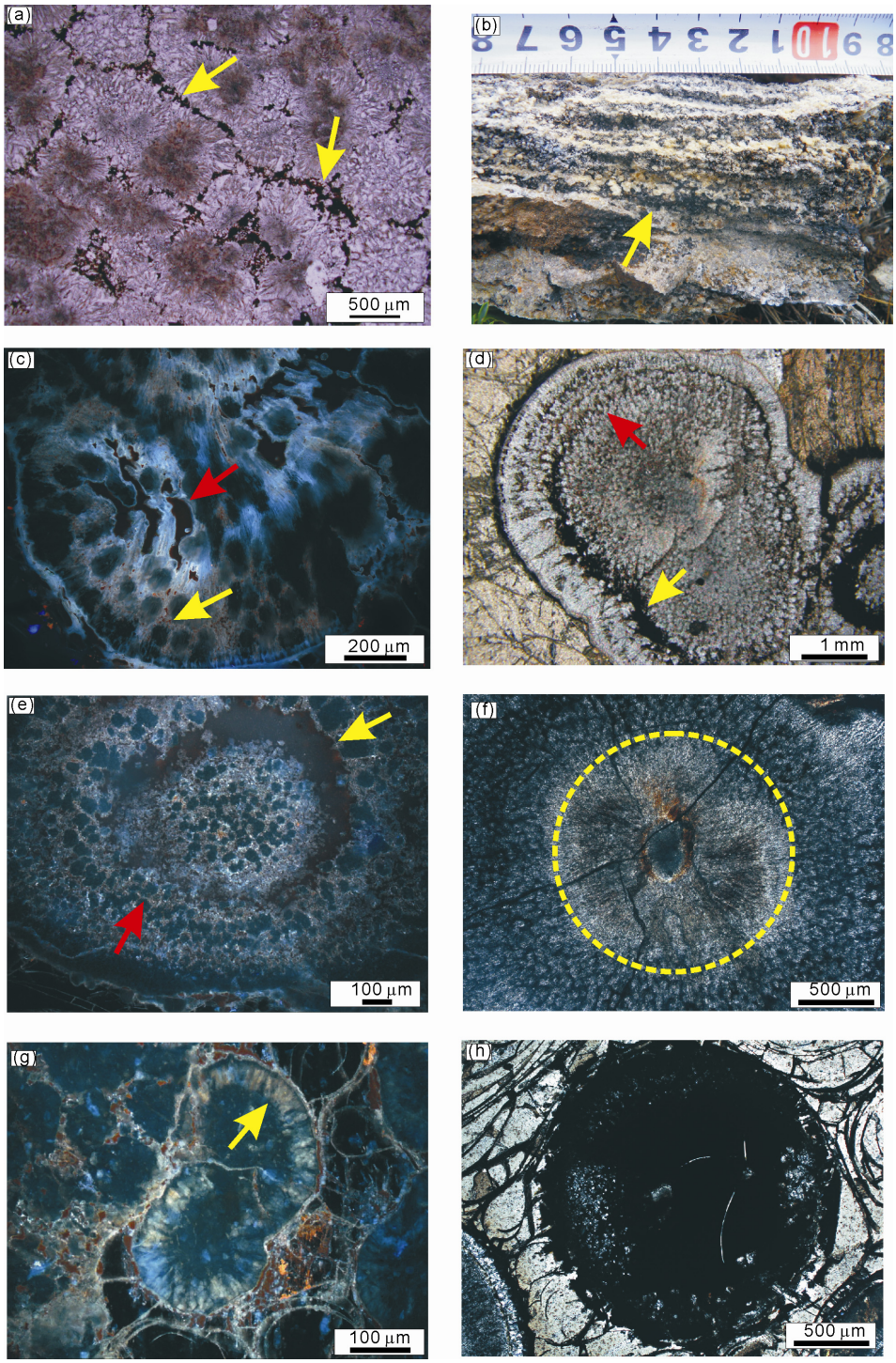


图 2　球粒显微镜单偏光照片((a), (d), (f), (h))、野外照片(b)和荧光照片((c), (e), (g))

(a) 黄色箭头指示球粒之间多边形收缩缝, 其中充填了黑色沥青; (b) 球粒呈平行链状排列组成流纹构造和层间缝, 黄色箭头指示层间缝中充填的沥青; (c) 球粒内部发育的网状微裂缝, 微裂缝的发育程度不同, 因此溶蚀程度也不同, 黄色箭头指示溶蚀微弱, 红色箭头指示溶蚀强烈; (d), (e) 红色箭头指示球粒内部网状微裂缝, 网状微裂缝将球粒内部分割成许多微颗粒, 黄色箭头指示球粒内部的空腔孔; (f) 在球粒中心区(黄色虚线内), 网状微裂缝不发育; (g) 黄色箭头指示球粒放射状脱玻化结构, 脱玻化孔中充填蓝色烃类和黄色胶质; (h) 黑色部分主要由沥青质组成, 球粒几乎全部被石油溶蚀. 荧光照片中呈蓝色荧光的是烃类, 浅黄色荧光为胶质, 黑褐色荧光为沥青质

和网状微裂缝没有影响到纤维状微晶的生长习性, 因此, 在脱玻化的微颗粒中保留了由中心向外辐射的放射状脱玻结构. 然后, 有机质沿微裂缝向球粒微区中脱玻化孔扩散、溶蚀和充填,使微裂缝发生弥合.

2.4 脱玻化孔

火山玻璃是一种极粘的过冷却溶液, 其中原子排列是无规律的, 并不像固态结晶物质中原子按一定的结晶格架排列, 这种玻璃状态极不稳定, 在固态下会自发的转变为结晶物质, 这个过程称为脱玻化作用[14,30,31]. 流纹岩成岩后, 其中的玻璃质发生脱玻化, 形成由长石、石英微小矿物所组成的放射状、栉状、梳状、束状等脱玻结构. 由于流纹质玻璃的密度(约 2.3 g/cm^3)小于长石和石英的密度(分别约 2.61 和 2.65 g/cm^3)[13], 脱玻化后晶体所占据的空间要小于脱玻化之前玻璃质所占据的空间, 脱玻化后剩余空间则组成微孔隙, 形成油气储集空间. 球粒由中心向外脱玻化程度往往不同, 表现在脱玻结构和孔隙度不同. 脱玻化程度较低, 脱玻结构不发育的球粒一般不含油迹, 脱玻化程度较高, 脱玻结构发育的球粒中可以观察到明显的烃类和胶质(图 2(g)).

2.5 溶蚀孔

赵海玲等[14]近年来对球粒流纹岩中矿物溶蚀孔进行了研究, 为本文的研究开拓了思路. 大量观察发现, 溶蚀作用所形成的溶蚀孔是研究区球粒流纹岩最重要的孔隙类型, 溶蚀作用的强弱控制了球粒流纹岩有效面孔率的大小, 溶蚀作用既可以沿着球粒间缝、层间缝、球粒内部微裂缝以及脱玻化孔发生(详见下述), 也可以沿着构造裂缝发生, 还可以沿着斑晶炸裂纹和解理缝发生.

3 球粒储集空间的主控因素

一些学者强调脱玻化作用对形成油气储集空间的效应, 认为松辽盆地徐家围子断陷球粒流纹岩的储集空间主要是由气孔和脱玻化孔所组成, 脱玻化孔是仅次于气孔的第二大孔隙类型. 脱玻化孔在岩石薄片中的面孔率可达 7%~13%, 理论上计算出脱玻化孔换算成面孔率相当于 8.88%[13,14]. 然而, 笔者研究认为, 球粒流纹岩中孔隙类型复杂多样, 储集能力受球粒间缝的大小、层间缝的发育程度、球粒内部同心环状和网状微裂缝的发育程度、球粒溶蚀程度、球粒的直径、空腔孔的大小、脱玻化孔以及气孔的多少等多种因素共同制约. 笔者将着重讨论脱玻化作用、冷凝收缩作用以及球粒直径大小三个主要因素对流纹岩中球粒储集空间的影响.

3.1 脱玻化作用对储集空间的控制

荧光分析显示, 在脱玻化程度较低和微裂缝不发育的球粒微区中, 一般没有遭受到溶蚀作用, 球粒没有油迹显示. 在脱玻化程度较高和微裂缝不发育的球粒微区中, 可见烃类和胶质充填在脱玻化孔之中, 油迹往往沿脱玻结构呈放射状分布(图 2(g)). 在微裂缝发育的球粒中, 溶蚀作用非常强烈, 大量油迹分布在微裂缝附近的溶蚀微区中, 溶蚀区还保留了放射状脱玻结构的假象, 说明有机质的溶蚀沿裂隙向脱玻化孔扩散. 远离微裂缝的微区, 不含或仅含有微量油迹(图 2(c)). 研究认为, 溶蚀作用的强弱控制了球粒内部有效面孔率的发育程度与大小. 当微裂缝发育时, 微裂缝可以大面积沟通脱玻化孔, 形成孔缝网络, 非常有利于地层水和有机流体沿着微裂缝扩散到脱玻化孔进行溶蚀, 为石油的充注创造了有利条件. 脱玻化孔对球粒储集空间的影响体现在两个方面, 首先脱玻化孔本身就可以成为良好的储集空间; 其次, 为有机质的溶蚀提供显微通道, 这一通道需要微裂缝的沟通才能更好的发挥作用.

呼伦湖凹陷上库力组球粒流纹岩十分发育, 占剖面总长度的 53%, 含油的集块、角砾熔岩中的火山碎屑也是由球粒流纹岩所组成, 球粒流纹岩及其角砾都发生不同程度的脱玻化现象. 由于球粒流纹岩分布广, 脱玻化孔数量多, 可以作为重要的油气储集空间.

3.2 冷凝收缩作用对微裂缝和溶蚀作用的制约

系统显微镜观察和荧光分析显示, 球粒内部有效面孔率主要取决于溶蚀作用的强弱. 在有溶蚀作用参与时, 有效面孔率明显增加. 溶蚀作用越强烈, 有效面孔率也越大. 然而, 又是什么因素控制了溶蚀作用的强弱呢? 研究显示, 球粒内部微裂缝形成于溶蚀作用之前, 而且通常微裂缝的面孔率和渗透率明显大于脱玻化孔, 它为地层水和有机质流体的流动和溶蚀提供了良好的显微通道, 有利于促进溶蚀作用的发生. 微裂缝不发育的球粒, 不利于地层水和

有机质等流体的流动, 因此, 溶蚀作用不明显, 有效面孔率主要取决于脱玻化孔的发育程度; 微裂缝中等程度发育的球粒, 有利于流体流动, 加速了溶蚀进程, 导致了溶蚀作用的增强, 球粒内部形成丰富的溶蚀孔, 其中充填了油迹, 有效面孔率达 10%~20%; 同心环状和网状微裂缝非常发育的球粒溶蚀作用最为强烈, 有机质首先沿同心环状和网状微裂缝渗入溶蚀, 然后再向球粒微区中脱玻化孔扩散, 大面积均匀地对球粒进行溶蚀, 形成网状溶蚀孔. 溶蚀后球粒内部充填大量烃类, 胶质和沥青质, 其有效面孔率高达 10%~37% (图 2(c)~(e)). 溶蚀作用的极限是整个球粒都遭受到溶蚀并充填了石油. 图 2(h)的球粒几乎全部溶蚀, 有效面孔率高达 80%以上. 普遍规律是: 溶蚀作用最强烈的球粒微区是在微裂缝附近, 远离微裂缝的微区溶蚀作用较弱. 溶蚀作用从没有微裂缝→中等发育的放射状和环状微裂缝→非常发育的环状、网状微裂缝逐渐增强, 说明微裂缝的发育程度和类型决定了溶蚀作用的程度, 而溶蚀作用又决定了有效孔隙度的大小. 上文已经讨论了控制微裂缝形成和发育的主要因素是冷凝收缩作用, 正是由于球粒封闭体系中缓慢的冷凝收缩, 才导致了球粒内部同心环状和网状微裂缝以及微颗粒的形成, 从而进一步控制了溶蚀作用的发生.

环状、网状微裂缝的另外一个重要作用是沟通脱玻化孔, 形成孔缝网络, 使溶蚀作用在球粒内部能大面积发生, 大幅度提高了球粒内部的有效面孔率.

3.3 球粒直径对冷凝收缩作用的制约

制约溶蚀作用强弱的主要因素是冷凝收缩作用形成的微裂缝, 但是, 上库力组不同层位的球粒流纹岩中球粒内部微裂缝和空腔孔的发育程度是不同的, 有的层位发育, 溶蚀作用强烈, 含有大量油迹, 有的层位不发育, 溶蚀微弱, 不含或仅含有微量油迹. 因此, 需要进一步回答是什么因素制约了冷凝收缩作用和微裂缝、空腔孔的发育程度.

球粒和石泡是流纹岩中两种不同的组构类型. 球粒直径一般为 0.1~1 mm, 大者直径可达 5 mm, 内部一般不具有空腔孔. 石泡直径最小为 5 mm, 最大可达 10 余厘米[32], 内部具有空腔孔. 在成因上, 两者都可以是在原生成岩作用阶段岩浆冷却而成, 可见两者主要区别是在粒度和内部结构上. 在研究区, 大部分层位的流纹岩球粒直径较小, 与常见的球粒直径相同, 一般为 0.1~1 mm 之间, 它们内部一般没有微裂缝, 油迹主要分布在球粒粒间孔、气孔和层间缝中. 另外一些层位的流纹岩球粒直径较大, 在 1~8 mm 之间, 介于常见的球粒和石泡过渡区间(图 2(c)~(f), (h)), 内部同心环状微裂缝和网状微裂缝十分发育, 其中含有大量油迹. 此外, 在同一块标本中不仅仅分布大量球粒, 在球粒之间还分布许多石泡. 石泡除了具有空腔孔外, 在粒度、球形冷凝外壳、微裂缝、脱玻化等特征上与球粒完全相同, 因此, 研究认为它们属于球粒和石泡的过渡类型, 暂时将这种过渡类型归属到球粒中来讨论它的成因.

球粒内部的收缩体积与球粒直径有直接关系, 当直径小于 1 mm 时, 球粒封闭体系体积小, 等容降温后收缩的体积更小, 不利于形成微裂缝. 当直径介于常见的球粒和石泡两者之间时, 封闭体系内收缩的体积随之增大. 在熔浆成分均一的条件下, 颗粒直径与封闭体系内的挥发份含量呈正比, 颗粒直径较大, 等容降温后溢出的挥发份就会增加, 形成大量的空间, 有利于形成空腔孔, 同时较大的直径也有利于形成环状和网状微裂缝. 因此, 当直径介于常见的球粒和石泡两者之间时, 非常有利于微裂缝和空腔孔的形成. 对于同一岩石标本上球粒和石泡共生的现象, 一个可能的解释是石泡球形冷凝外壳冷凝速率更快, 大部分气体在逸出之前冷凝壳已经形成, 将气体封闭在体系内部, 有利于空腔孔的形成. 我们还观察到, 直径在几个厘米的更大的石泡, 虽然一些个体发育了空腔孔, 但是大部分个体的空腔孔不同程度被同生期熔浆充填, 形成“实芯”的石泡, 因此, 并不是颗粒直径越大, 有效储集空间就越大. 颗粒直径是形成球粒内部微裂缝和空腔孔的重要控制因素, 当直径介于常见的球粒和石泡直径过渡区间时, 最有利于个体微裂缝和空腔孔的形成. 这也解释了为什么同样是球粒流纹岩, 但是球粒收缩缝的发育程度、溶蚀强弱和有效面孔率有很大差异的原因.

必须指出, 球粒流纹岩成藏机理是一个十分复杂的物理、化学过程. 由于试验进度或者试验手段的制约, 关于有机酸及石油对球粒溶蚀作用机理, 以及微裂缝和脱玻化孔电镜下特征的系统研究, 还有待于以后的工作中进行.

4 结论

(1) 研究区上库力组球粒流纹岩是大兴安岭地区晚中生代火山岩的重要组成部分, 是大陆岩石圈伸展减薄作用的产物, 含沥青球粒流纹岩分布在呼伦湖凹陷边缘火山岩喷溢相和侵出相之中, 即三道沟度假村剖面火山岩序列的中部和上部.

(2) 球粒流纹岩孔隙类型复杂多样, 石油储集能力受球粒间缝、层间缝、球粒内部同心环状和网状微裂缝、空腔孔、溶蚀程度、球粒直径、脱玻化作用以及气孔等多种因素共同制约.

(3) 球粒直径制约了冷凝收缩空间大小, 当球粒直径介于常见的球粒和石泡两者之间时, 最有利于微裂缝和空腔孔的形成. 冷凝收缩作用导致了球粒间缝的形成以及控制了球粒内部微裂缝和空腔孔的形成和发育. 球粒内部微裂缝的发育程度和类型决定了溶蚀作用的强弱, 而溶蚀作用又制约了球粒内部有效面孔率的大小. 微裂缝可以大面积沟通脱玻化孔, 形成孔缝网络, 有利于有机流体扩散到脱玻化孔中进行溶蚀和充注.

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

1 邹才能, 赵文智, 贾承造, 等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布. 石油勘探与开发, 2008, 35: 257–271
2 赵文智, 邹才能, 李建忠, 等. 中国陆上东、西部地区火山岩成藏比较研究与意义. 石油勘探与开发, 2009, 36: 1–11
3 刘嘉麒, 孟凡超, 崔岩, 等. 试论火山岩油气成藏机理. 岩石学报, 2010, 26: 1–13
4 陈树民, 李来林, 赵海波. 松辽盆地白垩系火山岩储层岩石物理声学特性分析. 岩石学报, 2010, 26: 14–20
5 Feng Z Q. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: A case study from the Qingshen gas field in the Songliao Basin, NE China. Mar Petrol Geol, 2008, 25: 416–432
6 Lofgren G E. Spherulitic textures in glassay and crystalline rocks. J Geophys Res, 1971, 76: 5635–5648
7 Lofgren G E. An experiment study of plagioclase crystal morphology: Iosthermal crystalization. Amer J Sci, 1974, 274: 243–273
8 Fowler A D, Berger B, Shore M, et al. Supercooled rocks: development and significance of varioles, spherulites, dendrites and spinifex in Archaean volcanic rocks, Abitibi Greenstone belt, Canada. Precambrian Res, 2002, 115: 311–328
9 Gránásy L, Pusztai T, Tegze G, et al. Growth and form of spherulites. Phys Rev, 2005, 72: 1–15
10 Keith H D, Padden F J, JR. A phenomenological theory of spherulitic crystallization. J Appl Phys, 1963, 34: 2409–2421
11 Watkins J, Manga M, Huber C, et al. Diffusion-controlled spherulite growth in obsidian inferred from H_2O concentration profiles. Contrib Mineral Petrol, 2008, 157: 163–172
12 Swanson S E. Relation of nucleation and crystal-growth rate to the development of granitic textures. Am Mineral, 1977, 62: 966–978
13 冯子辉, 邵红梅, 童英. 松辽盆地庆深气田深层火山岩储层储集性控制因素研究. 地质学报, 2008, 82: 760–768
14 赵海玲, 黄薇, 王成, 等. 火山岩中脱玻化孔及其对储层的贡献. 石油与天然气地质, 2009, 30: 47–58
15 陈均亮, 吴河勇, 朱德丰, 等. 海拉尔盆地构造演化及油气勘探前景. 地质科学, 2007, 42: 147–159
16 曹瑞成, 朱德丰, 陈均亮, 等. 海拉尔-塔木察格盆地构造演化特征. 大庆石油地质与开发, 2009, 28: 39–43
17 李占东, 张明学, 胡玉双, 等. 海拉尔盆地贝尔凹陷构造演化及其对油气控制. 科学技术与工程, 2010, 10: 1671–1815
18 孙晓猛, 鲁宝亮, 张梅生, 等. 海拉尔盆地及盆缘露头区典型构造样式及变形序列. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(增刊 1): 1–9
19 冯志强, 任延广, 张晓东, 等. 海拉尔盆地油气分布规律及下步勘探方向. 石油地质, 2004, 9: 19–23
20 葛文春, 李献华, 林强, 等. 呼伦湖早白垩世碱性流纹岩的地球化学特征及其意义. 地质科学, 2001, 36: 176–183
21 葛文春, 林强, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代玄武岩的地球化学特征: 壳幔相互作用的证据. 岩石学报, 1999, 15: 396–407
22 邵济安, 张履桥, 肖庆辉, 等. 中生代大兴安岭的隆起——一种可能的陆内造山机制. 岩石学报, 2005, 21: 789–794
23 Zhang J H, Ge W C, Wu F Y, et al. Large-scale early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, Northestern China. Lithos, 2008, 102: 138–157
24 周新华, 英基丰, 张连昌, 等. 大兴安岭晚中生代火山岩成因与古老地块物质贡献: 锆石 U-Pb 年龄及多元同位素制约. 地球科学——中国地质大学学报, 2009, 34: 1–10
25 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. 吉林大学学报(地球科学版), 2007,

37: 1251–1258
26 王璞珺, 冯志强, 刘万洙, 等. 盆地火山岩: 岩性岩相储层气藏勘探. 北京: 科学出版社, 2008. 76–79
27 张树业, 刘如曦, 常丽华, 等. 火成岩结构构造图册. 北京: 地质出版社, 1982. 30
28 常丽华, 曹林, 高福红. 火成岩鉴定手册. 北京: 地质出版社, 2009. 82
29 Sruoga P, Rubinstein N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén Basins, Argentina. AAPG Bull, 2007, 91: 115–129
30 Lofgren G E. Experimentally produced devitrification textures in natural rhyolitic glass. Geol Soc Am Bull, 1971b, 82: 111–124
31 陶元奎. 火山岩相学. 南京: 江苏省金陵科技著作出版社, 1994. 47–50
32 赵文选. 火山岩结构构造图册. 北京: 原子能出版社, 1979. 53