

ESR 测年在石油地质研究中的应用

郑荣才

(“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 成都理工学院沉积地质研究所, 四川成都 610059)

ESR 测年的依据为石英形成后所吸附的天然核辐射总剂量与周围物质中由 K, Th, U 含量计算的年辐射剂量之间的比值。石英虽是一种广布的造岩矿物, 较为容易采集, 但在采集时必须确定石英的产状和成因特征。不同成因特征的石英 ESR 年龄代表着不同的地质意义, 如次生石英的 ESR 年龄代表着裂隙充填年龄; 重结晶石英的 ESR 年龄代表着与构造应力作用期次相当的石英重结晶年龄。在实际研究中, 石英 ESR 年龄主要应用于裂隙和溶蚀期次的划分和定年; 构造作用期次划分与定年。结合石英结晶形态、颜色、包裹体及其他共生矿物的研究, ESR 测年还可用来判别油气藏演化各阶段的地质特征, 研究裂缝和溶蚀作用的发展演化规律。

关键词 ESR 测年 新技术 油气地质 应用

作者简介 郑荣才 男 46 岁 副教授 沉积学和石油地质学

ESR 测年技术在第四纪物质及哑地层的定年研究中已得到普遍的应用^[1~3], 效果较好。目前, 在油气地质研究中已开始应用这一新技术解决含油气盆地的储层成岩作用、构造破裂作用、油气演化和成藏作用过程中的期次划分及定年问题^[4~7], 表明这一技术方法不仅易于操作、成本低、结果较可靠, 而且能克服其它测年方法在沉积物(岩)中难以获得样品的难题, 因而在年代测定研究中有广泛的应用前景。

1 基本原理

ESR 测年的中文全称为电子自旋共振法测年, 为一 70 年代末开始应用的绝对年龄测定技术^[1, 2]。测年范围视样品的矿物成分而定, 碳酸盐矿物(方解石和白云石)的可测范围相对较小, 为数千年至数百万年, 主要应用于第四纪沉积物和考古样品的年龄测定; 石英可测范围较大, 可从数百万年至数亿年, 以用于地质研究为主, 所用样品主要为 α 石英, β 石英不可靠。其测年依据为石英形成后所吸收的天然核辐射总剂量(TD, 有的文献资料为 AD, 又称 ESR 信号, 计量单位为 Gy), 与周围物质(或围岩)中由 K, Th, U 含量计算的年辐射剂量(计量单位为 mGy/a)之间的比值(样品年龄 $a = TD/mGy$)。由于石英的天然核辐射剂量积累速度与围岩中的 K, Th, U 含量和年龄成正比, 因此只要用 ESR 谱仪测得石英的天然核辐射总剂量, 再用中子活化分析测出围岩的 K, Th, U 含量和求出年辐射剂量, 即可求出石英的 ESR 年龄^[2]。第四纪石英中的 ESR 信号一般较弱, 测试前须经人工钴-60 γ 射线照射, 以附加剂量法激化和增强 ESR 信号。对于中生代和古生代的石英而言, 因其 ESR 信号很弱, 使用高人工附加剂量照

射则会使 α 石英部分地转变为 β 石英,以致无法用附加剂量法确定其积存古剂量。近期中国计量科学研究院高钧成研究员和成都理工学院梁兴中教授,利用热活化之后 α 石英 E' 心浓度测量 ESR 年龄的方法获得成功^[8],其测量依据是在地质历史中(可长达 10 亿年) α 石英 E' 心浓度积累速度与岩石中 K, Th, U 含量和岩石的年龄有关,只要用 ESR 谱仪在最佳条件下测得 α 石英 E' 心浓度和精确测得围岩 K, Th, U 含量求得全岩铀当量含量(单位为 10^{-6}),然后与已知年龄的石英标样对比即可求得样品的 ESR 年龄^[8]。每个样品的 ESR 年龄测定一般为 3 次,以 3 次测定结果的算术平均值代表样品的 ESR 年龄,其中最大和最小测定值与平均值的误差范围不大于 10%,才能满足地质研究的精度要求。同时在应用测定结果时,也应考虑受测量精度影响的 ESR 年龄变化区间。在室温条件下,经人工附加剂量法或热活化处理的 α 石英可测到 3 个诱发辐射信号,即 OHC 心——氧的空穴心、 E' 心——氧空位的电子心、Ge 心——锗离子置换硅位置的电子心,具测年意义的 E' 心和 Ge 心^[2]。陆源碎屑石英中,天然核辐射剂量的积累有母岩和沉积成岩过程两个来源,由于母岩来源的 E' 心 ESR 信号不受风化影响,在沉积成岩过程中可继续积累增强,因而所测出的年龄仅代表石英离开母岩前的最后一次受热事件影响的结晶年龄。然而母岩来源的 Ge 心 ESR 信号在风化过程中将丧失殆尽,在沉积成岩过程中才重新积累,因此 Ge 心 ESR 年龄可代表其沉积期年龄。

2 样品的采集与操作要点

α 石英是一类广泛分布的造岩矿物,大多数沉积岩或构造破碎带岩石中均可较容易地采集到所需样品。又由于石英的测年范围宽,结果较方解石更为可靠,因而在地质研究中的应用更普遍。所用样品除测量“哑地层”选用碎屑石英外,测量成岩、构造和油气藏演化阶段的年龄,以选用次生石英为主。鉴于石英又为一类易沉淀和重结晶的矿物,从次生石英中测得的 ESR 年龄或为初始结晶年龄,或为重结晶年龄。前者常见于溶蚀孔、洞、缝中自由生长的石英测年结果,可代表溶蚀充填期的年龄;后者常见于构造活动频繁、应力集中、重结晶活跃的破碎带测年结果,代表与构造应力作用期次相当的石英重结晶年龄。显然,在采集各种石英样品时,必须确定石英的产状和成因特征,及其所具有的地质意义,这对于测年结果的合理解释是至关重要的。有意义的是,在同一标本或露头中,有时可采集到多种成因特征的石英样品,且不同成因特征的 ESR 年龄差值较大,它们通常为同一部位遭受多期次溶蚀和充填作用的结果,可作为合理划分期次并进行定年的重要依据。由此可见,如在同一部位采集到不同成因特征的石英,必须按成因特征的差异,如晶形、颜色、包裹体、产状等进行分类取样,以保证样品分析结果的可靠性和获得尽可能多的有用信息。

石英样品以取自钻井岩芯为最佳,如为地表露头,则必须保证样品未受到较强的大气水溶蚀和阳光强烈照晒,防止 ESR 信号受损或丢失。所需用量下限为 150 mg,如单个石英碎屑或晶体足够大,以选用 1 至数颗为最佳;如非常细小,按成因特征分类的纯度是保证测试结果可靠性的关键。取样方法随意,任选用机械破碎后挑选、微钻钻取或用常规酸液浸泡后分离等方法(不能加热)。样品采集后先用酒精或丙酮清洗凉干,研磨成 100~200 目的微粒后,送往有关单位测定。须指出的是,每一件或同一部位采集的数件样品必须配备一件用以测定 K, Th, U 含量和计算年辐射剂量(或全岩平衡铀当量含量)的围岩样品。

3 应用实例

辽河盆地西部凹陷中的古潜山油气藏(古潜山内幕由中上元古界组成),储层主要为网状

裂缝及相关溶蚀孔、洞、缝非常发育的古岩溶型碳酸盐岩, 部分地区为裂缝-溶蚀孔洞型碎屑岩。盖层为古新统玄武岩, 局部为始新统半深湖-深湖相黑色页岩(油源岩)。储层中的裂缝及溶蚀孔、洞、缝具多期次和多成因继承性发展演化的特点, 然而有关裂缝和溶蚀期次的划分, 以及各期次对储层发育和油气富集成藏的贡献始终未能得到合理的解释。针对这一问题, 作者在常规地质研究的基础上, 进一步开展了石英 ESR 测年和相配套的声发射实验研究, 得出如下几点新认识。

3 1 裂缝和溶蚀期次的划分和定年

8 件次生石英 ESR 测年数据, 可划分为 300~ 400 Ma, 134 Ma 和 40~ 45 Ma 三个年龄段。同年龄段的次生石英成因特征相似, 而不同年龄段的石英具显著的差异(表 1), 表明年龄段代

表 1 辽河盆地西部凹陷古潜山中的石英 ESR 测年结果及成因特征

井号 样号	石英成因 类型	产状	成因特征			成因解释	ESR 年 龄/ Ma	次生矿物或 外来充填物	相关裂缝的声 发射实验解释
			晶 形	颜 色	包裹体类型				
曙古 3 井 1(1/5) A	次生, 有重结 晶作用	网状构造裂缝 充填物, 围岩强烈硅化	细-粗晶, 它形	无色	以气液两相无机型为主	中、低温无机热液沉淀物	300	方解石、石英	海西-印支期构造运动产物 (第一期裂缝)
曙古 43 井 4(5/8) A			细-中晶, 它形	乳白色			400		
曙古 48 井 3(1/4) A			细-巨晶, 它形				370		
曙古 43 井 4(5/8) B	次生	溶蚀孔、洞、缝充填物	细-巨晶, 个别晶簇状	浅肉红-铁红色	以气液两相无机型为主, 含 Fe ³⁺ 和粘土杂质	下渗大气水沉淀物	134	石英、方解石; 粘土、砂、砾	燕山期构造运动产物 (第二期裂缝)
曙古 3 井 1(1/5) B	次生	网状溶蚀孔、洞、缝充填物	微晶, 自形晶簇	浅褐色	以气液两相有机型为主, 少量固相沥青和纯烃类液相包裹体	含烃有机热液沉淀物	45	方解石、石英、高岭石、有机质	喜山早期早期构造运动产物 (第三期裂缝)
曙古 43 井 4(5/8) C			微-细晶、自形晶簇	浅-深褐色			44		
曙古 47 井 2(5/6) A							40		
曙古 48 井 3(1/4) B							43		
曙古 23 井 1(10/11)	碎屑	覆盖潜山	石英质细砾石	铁红色	—	潜山地表残积物(中生代地层)	180	砂、砾、粘土、铁质和少量钙质胶结物	燕山期构造运动产物
曙古 43 井 78(5/6)		充填潜山内巨型洞穴	石英质细-中粒砂			岩溶期下渗大气携入潜山内部的洞穴充填物	142		燕山期构造运动产物 (第二期溶蚀裂缝)
曙古 103-1 井 4(5/22)						113			

表三期不同性质的裂缝和溶蚀作用发育期, 并分别与声发射实验所确定的四期裂缝中的前三期剪切裂缝和相关的溶蚀作用相对应(表 1), 即海西-印支期裂缝(第一期裂缝)、燕山期裂缝

(第二期裂缝)、喜山早期早时裂缝(第三期裂缝)。显然,次生石英的 ESR 测年数据,为裂缝和溶蚀期次的划分和定年提供了更为可靠的依据。

3 2 油气藏演化各阶段的地质特征判别

从表 1 和表 2 中可看出,不同 ESR 年龄段的次生石英成因特征较为充分地显示油气藏演化各阶段的地质特征。

表 2 辽河油田西部凹陷古潜山裂缝期次与油气成藏的关系

构造运动	裂缝期次	石英 ESR 年龄/M a	裂缝成因特征	应力分量/MPa	与古潜山油气藏的关系
海西-印支期	第一期	300~ 400	网状剪切裂缝	20. 7~ 33. 13	为后期裂缝和溶蚀作用提供了易破裂的薄弱力学结构部位和破碎带
燕山期	第二期	134±10	网状裂缝继承性活动,被大气水强烈溶蚀	15. 43~ 25. 88	控制了古潜山地貌和岩溶型储层的展布规律,提供油气藏发育基础
喜山早期早时	第三期	40~ 45	网状裂缝继承性活动,被有机热液强烈溶蚀	8. 49~ 15. 47	储层叠加溶蚀和破裂改造,油气开始运移和早期聚集成藏
喜山早期晚时	第四期	无石英,推测为 29~ 35	网状裂缝继承性张扭或张性开裂,弱溶蚀	5. 36~ 9. 11	油气大规模二次运移和聚集的主要成藏期

(1) 充填第一期裂缝和溶蚀孔、洞、缝的石英和方解石均以发育气液两相无机包裹体为主,方解石氧同位素平衡温度为 97. 2~ 129. 1℃,可作为中-低温无机热液沉淀物的标志。虽然该期构造破裂和溶蚀作用非常强烈,但因充填完全,且围岩往往因硅化和强烈的重结晶作用变得很致密,因而对改善储层的孔渗性无明显贡献。另据盆地边缘尚残存有零星分布的晚古生代-中生代早期地层,说明海西-印支期中、上元古界仍深埋地腹,尚未形成对古潜山油藏至关重要的地貌控制。

(2) 据充填第二期裂缝的石英 ESR 年龄(134 Ma)明显低于古潜山顶面残积的中生代地层年龄(180 Ma)和石英本身具有富含氧化铁和粘土杂质而呈铁红色的氧化性流体沉淀物标志,以及共生的方解石氧同位素平衡温度仅为 24. 9℃,说明组成古潜山的中-上元古界于中生代晚期强烈暴露并遭受下渗大气水溶蚀,不仅改善了储层的孔渗性,同时也控制了古潜山地形地貌及岩溶型储层的分布,从而奠定了古潜山油气藏所必备的地形地貌和储层等基础条件。

(3) 充填第三期裂缝的石英和方解石都含有大量气液两相有机包裹体和少量纯烃类液相或沥青固相包裹体,包裹体均一温度为 96. 1~ 116. 8℃,与方解石氧同位素平衡温度 77. 9~ 111. 5℃基本一致,说明溶蚀流体应来自烃源岩排出的含烃有机热液。结合次生石英 40~ 45 Ma 的 ESR 年龄,不难确定始新世早中期为储层进一步遭受破裂和溶蚀叠加改造,以及油气开始发生早期运移和聚集成藏的重要时期。须指出的是,与喜山早期早时断块活动有关的该期构造破裂和溶蚀作用较强,无论是碎屑岩或碳酸盐岩储层中的网状溶蚀孔、洞、缝,大多呈半充填或无充填状,不但大大改善了储层的孔渗性,而且与断块-岩性圈闭和油气运移、聚集具良好的配置关系,构成古潜山油藏的雏型。

(4) 在声发射实验中反应良好的第四期裂缝中虽未获得次生石英样品,但据薄片观察和阴极发光研究,该期裂缝错开了第三期裂缝,其年代应小于充填第三期裂缝中次生石英 ESR 年龄的上限(40 Ma),与始新统沙河街组与渐新统东营组之间的不整合面年龄(29~ 35 Ma)相

当。由于该期裂缝为喜山早期晚时断块构造隆升运动的产物,受地层舒张反弹和应力释放影响,裂缝具一定的张性和张扭性,开启性好,且溶蚀孔、洞、缝很快被油气占据而阻碍了次生矿物沉淀,因而不进一步改善了储层的孔渗性,同时亦为古潜山油藏的形成,提供了极其重要的油气二次运移和聚集成藏的通道和储集空间。

3.3 洞穴充填物的识别及其地质意义

在古潜山的内幕,时可钻遇厚达数十至百余米的铁红色碎屑岩,岩性与古潜山顶面残积的中生代地层相似,并具有一定的成层性,但井间难以追踪对比。以往或将其划归中-上元古界碳酸盐岩中的不稳定夹层,或将其视为逆断层下盘重复出现的中生代地层。作者依据碎屑石英的 ESR 年龄(113~142 Ma)明显低于古潜山顶面残积的中生代地层(180 Ma),而与岩溶流体沉淀的铁红色次生石英(134 Ma)相一致的特点,认为这套碎屑岩为古潜山内部巨型岩溶漏斗或地下暗河的充填物。其地质意义不仅在于反映古潜山内幕的岩溶作用规模巨大,同时还可由充填物的底界至古潜山顶面的距离,确定有利于岩溶型储层发育的厚度范围,进而为储层预测提供依据,如曙古43和曙103两井区,依此方法确定古潜山顶面至内部的岩溶底界深度分别为300 m和207 m,系两井区有利于岩溶型储层发育的范围。

3.4 裂缝和溶蚀作用的发展演化规律判别

从表1中还可看出,在同一岩芯标本中往往发育有2~3期不同成因的次生石英,表明储层中的裂缝和溶蚀作用虽然发育在时间相隔甚远的各构造运动期,但在空间上却具有继承性发展演化的规律。原因在于前期裂缝构成后期破裂和溶蚀的薄弱部位,导致后期裂缝和溶蚀充填的次生石英依次追踪和叠加发育在同一部位,并对应于油气藏演化的各主要阶段(表2)。此特征与声发射实验中,同一样品亦常具有3~4个代表主要构造应力场事件的效应点,以及各效应点的应力分量值所表征的构造破裂所需应力强度下限,从接近岩层抗剪强度依次递减为远低于抗剪强度的特征相拟合(表2)。这一将储层和油气演化各主要阶段的信息浓缩在同一储集空间部位,并体现在各期次充填的次生石英 ESR 年龄和共生的石英和方解石的成因特征上,无疑为研究储层和油气藏演化各阶段的地质特征提供了捷径。

4 结语

通过 ESR 测年及矿物成因特征的综合研究,可较为有效地解决成岩作用、破裂作用、溶蚀作用、油气演化史及成藏过程的期次(或阶段)划分和定年问题,进而为建立含油气盆地的区域构造演化史、沉积成岩史、有机演化史与储层和油气藏演化各阶段的对应关系,在此基础上可确定圈闭与油气运移、聚集、成藏的匹配条件和时间,为储层预测和油气藏描述提供重要的定量分析资料和依据。

致谢:次生石英 ESR 年龄,由成都理工学院“核技术及应用研究所”梁兴中教授分析,声发射实验由成都理工学院“工程地质国家专业实验室”徐进高级工程师完成,在此一并致以谢意。

参 考 文 献

- 1 黄培华,彭子成,金嗣诏,等.电子自旋共振法(ESR)测定第四纪物质年龄的研究.科学通报,1986,31(C):453~455
- 2 业渝光,和杰,习少波.冲积物中石英 ESR 测年的研究.地质科技情报,1991,10(2):93~96
- 3 李元林.芦山-天全地区晚白垩世-老第三纪冲积扇-湖泊沉积.成都理工学院学报,1995,22(2):11~14
- 4 郑荣才,陈洪德,刘文均,等.川北大安寨段储层深部热水溶蚀作用.石油与天然气地质,1996,17(4):293~301
- 5 张哨楠,李德敏,邓礼正,等.ESR 测年技术在裂缝型储层研究中的应用.成都理工学院学报,1995,22(1):7~11

- 6 李德敏, 张峭楠. 川西地区上三叠统香二香四裂缝特征及形成时间. 矿物岩石, 1996, 16(4): 83~ 90
- 7 郑荣才. 顺磁共振法测年和包裹体在大安寨段成藏模式研究中的应用. 矿物岩石, 1997, 17(4): 47~ 54
- 8 高钧成, 梁兴中. α 石英 E' 心浓度测量与测年研究. 核技术, 1995, 18(8): 507~ 508

APPLICATION OF ESR DATING TO PETROLEUM GEOLOGY

Zheng Rongcai

(*State Laboratory of Hydrocarbon Reservoir Geology, Chengdu College of Technology, Chengdu, Sichuan*)

Abstract

The basis of ESR dating is the ratio of total nuclear radiation amount absorbed by quartz to per year radiation amount that was calculated according to K, Th and U contents in surrounding substances. The ESR age of different genetic quartz may have different geological significance, so it is necessary to pay attention to the occurrence and genesis of the quartz during sampling. In practical, the ESR age of quartz is mainly used to distinguish different fissure and solution stages and ages; to distinguish tectonic periods and ages. Combined with the configuration and colour of the quartz crystal, the inclusions and the associated minerals, ESR dating could also be used to distinguish the geological features during hydrocarbon migration, to study the development and evolution rule of the fissure and solution.

(上接第 92 页)

HETEROGENEITY OF POROSITY AND PERMEABILITY IN CLASTIC ROCK RESERVOIRS

Jiao Yangquan Li Sitian

(*China University of Geosciences, Wuhan*)

Li Zhen Wen Xianduan

(*China University of Geosciences, Beijing*)

Abstract

The heterogeneity of porosity and permeability of reservoirs are closely related to the architectures of depositional systems, and can be studied by scale. (1) On the scale of depositional system, different depositional systems are different in porosity and permeability. Porosity and permeability of different genetic facies in the same depositional system may have great differences. This depends mainly on the paleo-current energy and environment in which the genetic facies were formed. (2) On the scale of genetic facies, porosity and permeability of the same fluid-flow unit and between different fluid-flow units are on the whole different. This is related to lithology of reservoirs constituting the fluid-flow units. The superimposition of nonhomogenous diagenesis could decrease greatly the porosity and permeability of fluid-flow units. (3) On the scale of core, porous media show anisotropic characteristics.