

文章编号: 1000 0747(2007) 03 0310 06

# 辽河拗陷东部凹陷中段古近系粗面岩 有效储集层的识别

谷团<sup>1</sup>, 戴金星<sup>2</sup>, 牛嘉玉<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(北京); 2. 中国石油勘探开发研究院)

基金项目: CNPC 重大科技项目“渤海湾盆地陆上及滩海油气预探目标评价与优选研究”(040103 01)

**摘要:** 辽河拗陷东部凹陷中段古近系粗面岩富含油气, 形成了中国规模最大的整装粗面岩型油气田——黄沙坨油气田。该区火山岩类型多变, 呈层状交互产出, 岩性在横向和纵向上变化大, 开发过程中面临着粗面岩岩性识别及储集空间识别的难题。根据矿物组成特征, 利用 3700 测井资料定性区分粗面岩和玄武岩、粗安岩等火山岩岩性; 采用井周声波成像测井(CBIL)方法识别出了孔缝型、裂缝型、溶蚀孔隙型及微细孔隙型有效储集空间。4类储集空间在CBIL测井图上区别较为明显, 结合粗面岩试油、试采资料及电阻率、声波时差、密度、中子孔隙度参数, 可将有效储集层划分为好、较好和较差3个级别。粗面岩及其有效储集空间识别成果应用于黄沙坨粗面岩油田的开发实践中, 取得了很好的效果。图4表2参17

**关键词:** 粗面岩; 有效储集层识别; 测井资料; 井周声波成像测井; 辽河拗陷东部凹陷中段

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

## Effective reservoir recognition of paleogene trachyte in the middle part of the east sag of Liaohe Depression

G U Tuan<sup>1</sup>, DAI Jin xing<sup>2</sup>, NIU Jia yu<sup>2</sup>

(1. China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration &amp; Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The paleogene trachyte in the middle part of the east sag of Liaohe Depression is abundant in oil and gas forming the biggest trachyte reservoir, Huangshatuo field in China. There are several kinds of volcanic rocks with heavily changed lithology. The development of the reservoir faces two problems—the recognition of trachyte and its effective reservoir space. The logging information is used to recognize the lithology. Circumferential Borehole Imaging Log (CBIL) is used to characterize the effective reservoir space. The trachyte has different lithologic chemistry and mineral characteristics from basalt and other volcanic rocks. This difference is the geological ground to distinguish the lithology quantitatively when the correlating charts—including GR K<sub>2</sub>O, GR Φ<sub>CNL</sub>, GR ρ<sub>b</sub>, GR RT, being employed. Four types of effective reservoir space have been identified through CBIL. Based on testing data and logging parameters, three classes of effective reservoir have been identified.

**Key words:** trachyte; effective reservoir recognition; well logging data; CBIL; middle part of the east sag of Liaohe Depression

## 0 引言

近年来火山岩油气藏勘探取得了大量成果<sup>[1-6]</sup>。辽河拗陷东部凹陷古近系发育多期次、多类型、含油气性不等的火山岩, 其中凹陷中段的粗面质火山岩成藏条件优越<sup>[7,8]</sup>, 形成了中国最大的整装粗面岩型油气田——黄沙坨油气田。

在粗面岩的储集空间特征、类型、控制因素及分布预测等方面已有较为系统的研究<sup>[9,10]</sup>, 但有关粗面岩有效储集层识别与评价的综合研究较少。在粗面岩油藏的生产实践中存在两个难题, 均直接关系到开发效益和对油藏资源潜力的揭示。这两个难题

是: ①粗面岩岩性识别。该类油藏储油层段基本为粗面岩, 如何从穿插互层的玄武岩、粗面岩及其他火山岩类中识别粗面岩段作为投产井段是一大难题; ②有效储集层段识别, 即如何在粗面岩段中可靠地选择孔缝发育段、确定具体的射孔投产井段。采用3700系列数控测井和井周声波成像测井资料对这两个问题进行了研究, 取得了较好效果, 有效地指导了黄沙坨油田的开发。

## 1 岩性特征

东部凹陷中段的火山岩共有4大类: 玄武岩类、粗面岩类、凝灰岩类和沉火山碎屑岩类(见表1), 它们形

表 1 辽河拗陷东部凹陷中段古近系火山岩岩石类型<sup>[1]</sup>

类型	岩石名称	特征	成因
玄武岩类	杏仁状玄武岩	气孔、杏仁构造发育, 呈灰绿色或灰色	分布于玄武岩层顶、底部, 因岩浆流出后压力降低, 气体快速外逸而成
	致密玄武岩	致密块状, 呈黑绿色	分布于玄武岩层中间部位
	粗面岩	块状、斑状结构, 斑晶为斜长石, 呈灰绿色	由正常的粗面质熔岩流形成
粗面岩类	粗面质集块熔岩	主要由粗面质角砾岩组成, 角砾直径大于10 cm, 呈灰黄色	火山喷起的粗面质角砾落于火山灰流中, 由熔浆焊接而成
	粗面质角砾熔岩	主要由粗面质角砾岩组成, 角砾直径小于10 cm, 呈灰黄色	
	角砾化粗面岩	粗面质角砾, 常被钙质充填	粗面岩(熔岩)在水下自碎破裂或构造错动形成
凝灰岩类	熔结凝灰岩	块状, 玻屑、晶屑发育, 呈灰绿色	火山凝灰质与熔岩混合而成
	角砾凝灰岩	由火山角砾岩及火山灰组成, 角砾含量大于50%	距火山口相对较近, 火山喷发而成
	凝灰岩	主要由粒级小于2 mm的火山物质组成	火山喷发的火山灰降落而成
沉火山碎屑岩类			远离火山喷发中心, 由火山碎屑物和正常沉积碎屑物混合形成

成于火山机构的不同相带(见图1), 其中玄武岩类与粗面岩类为最主要的岩石类型。

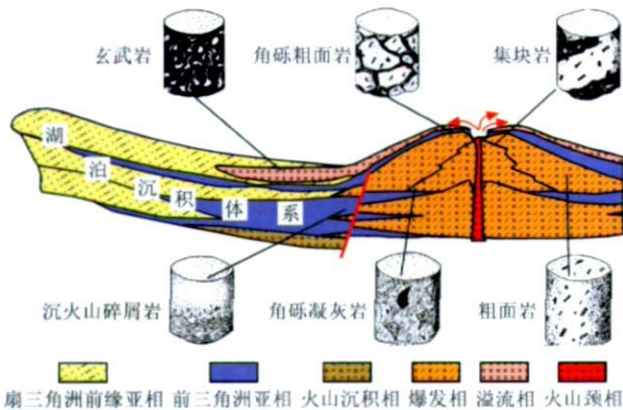


图 1 辽河拗陷东部凹陷中段古近系火山活动模式图

玄武岩形成于火山活动的溢流相, 呈灰黑、深黑、黑绿及紫红等颜色, 具有斑状结构、似斑状结构、杏仁构造、块状构造、气孔构造。斑晶主要为碱性长石、斜长石、橄榄石、辉石, 半自形—自形板状、粒状, 含量一般为15%~30%, 粒径0.20~2.60mm, 以微晶斜长石、碱性长石为主; 少见隐晶玻璃质斜长石、碱性长石, 晶粒大小为0.01~0.25mm; 杏仁体大小为0.15~5.00mm, 杏仁体充填物多为绿泥石、沸石、方沸石、方解石等。构造缝多被绿泥石、沸石充填。

粗面岩形成于火山活动的溢流相和爆发相, 多呈灰色、灰绿色, 具有斑状结构、块状构造、角砾状构造、气孔构造。基质中常含许多呈平行或近于平行排列的透长石或正长石微晶, 称之为粗面结构, 主要由碱性长石组成并含有少量黑云母、角闪石、辉石等铁镁矿物, 属于SiO<sub>2</sub>近于饱和的中性熔岩, 具粗面结构。粗面岩的显著特点是斑晶发育, 斑晶含量一般为14%~33%, 主要成分为碱性斜长石, 呈他形—半自形板状, 卡式双晶发育, 部分长石见环带, 蚀变深, 裂纹、溶孔发育, 晶粒大小为0.20~4.00mm。基质以微晶碱性斜长石为

主, 定向排列, 蚀变较深, 晶粒一般小于0.10mm。角砾状粗面岩中, 岩石破碎成角砾状, 角砾间及裂缝主要被沸石充填, 少量被绿泥石及泥质充填, 具有晶间孔隙及晶体节理缝, 岩石裂缝较发育, 部分岩心见收缩溶解缝。

## 2 粗面岩岩性识别

测井资料在火山岩岩性识别方面得到了广泛的应用<sup>[12,13]</sup>。本文以岩心资料为基础, 对3700系列测井资料进行解释评价, 并以试油、试采资料为验证依据, 对火山岩岩性进行识别。

火山岩的测井响应特征是对岩石的矿物成分、孔隙结构、裂缝及孔隙的发育程度和含油性等因素的综合反映, 而火山岩矿物组成的不同是测井响应差异的内在因素, 不同矿物的声波时差、自然伽马、密度、中子孔隙度有着较为明显的差别<sup>[14]</sup>, 依据这些差异性特征可以进行岩性的定性识别。

研究区火山岩的主要造岩矿物为正长石、斜长石、辉石, 其次为橄榄石、黑云母、角闪石、方沸石、石英等, 部分造岩矿物发生蚀变形成为绢云母或绿泥石。可将组成火山岩的矿物归纳为10种, 大体分为2个系列: ①含K、Na、Si、Al的浅色矿物系列, 主要包括正长石类(碱性长石、正长石、微斜长石)、斜长石类(钠长石、钙长石)和云母类, 主要构成粗面岩类和含粗面质的凝灰岩等。因正长石(钾长石)、云母类矿物含有放射性K<sup>40</sup>, 所以自然伽马值较高, 该类矿物组成的岩石测井响应特征一般为相对低密度、低补偿中子、高自然伽马。②含Fe、Mg、Ca的暗色矿物系列, 主要包括辉石、普通角闪石、橄榄石、绿泥石, 主要构成玄武岩类。因含Fe、Mg、Ca的矿物密度较大, 且不含钾矿物, 因此测井响应表现出相对高密度、高中子、低自然伽马特征。

粗面岩类K<sub>2</sub>O含量(C<sub>K<sub>2</sub>O</sub>)较高, 因而可以利用自然伽马测井资料定量划分粗面岩类与玄武岩类等(见

图 2a)。由图看出,玄武岩类的自然伽马( $GR$ )值小于 70API,粗安岩类的  $GR$  值在 70~95API,粗面岩的  $GR$

值大于 95API。同时,岩石化学参数的明显不同也可以将玄武岩与其他岩类区别开来(见表 2)。

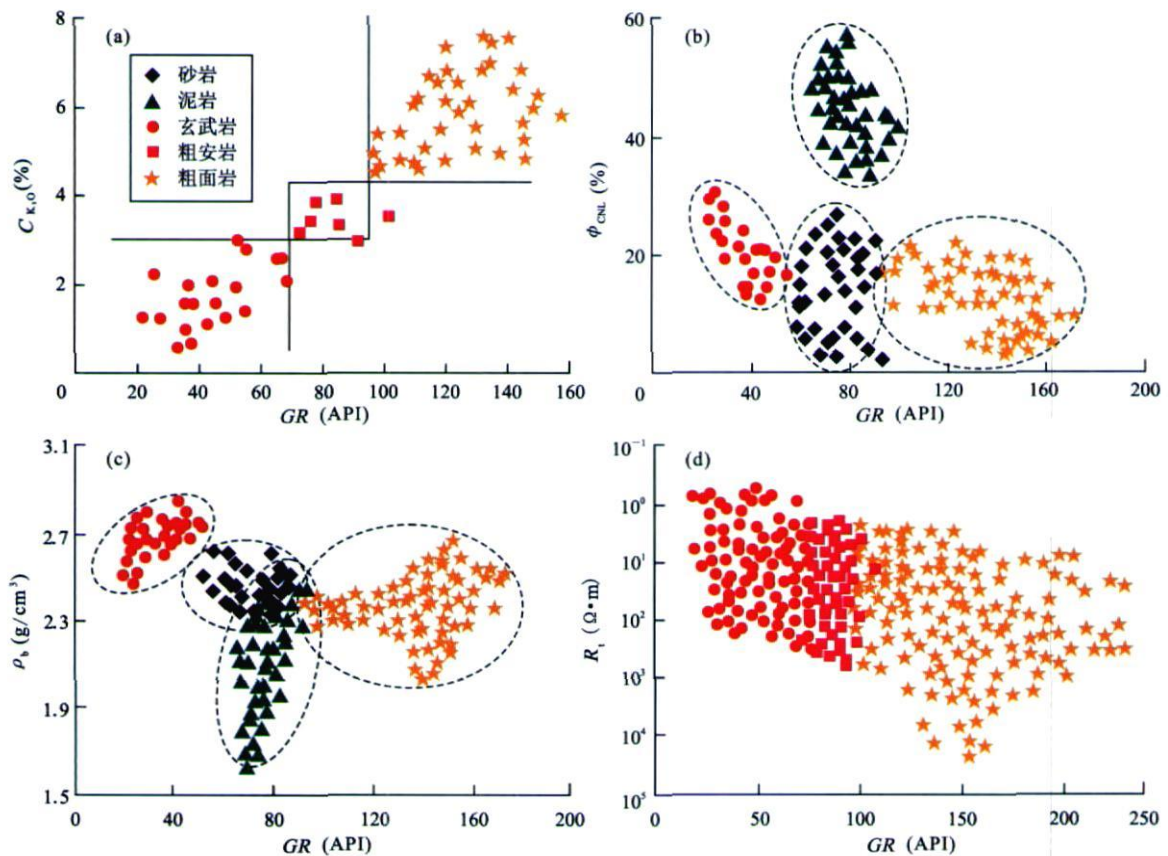


图 2 东部凹陷中段火山岩测井响应特征图

表 2 不同类型火山岩化学特征

岩类	组分含量(%)				类别	$GR$ (API)
	$K_2O$	$CaO$	$Na_2O+K_2O$	$SiO_2$		
玄武岩类	0.5~3.0	> 3.5	4~7	30~53	钙碱性玄武岩	< 70
粗安岩类	3~4	1.6~6.34	7~10	52~57	钙碱性粗安岩	70~95
粗面岩类	4~7.5	一般< 3.5	10~13	53~62	碱性粗安岩	> 95

从  $GR-\phi_{CNL}$ (中子孔隙度)交会图看出,玄武岩的中子孔隙度一般大于 10%,最大可达 30%以上(见图 2b),比砂岩高,显然是由于强烈蚀变作用引起的;致密粗面岩类的中子孔隙度一般低于 10%,中子孔隙度为 10%~20%的井段可能是因蚀变形成的孔缝发育带。由  $GR-\rho_b$ (岩石密度)交会图可见,玄武岩密度总体上比粗面岩高,粗面岩密度一般低于 2.65 g/cm<sup>3</sup>,而玄武岩密度最高可达 2.90 g/cm<sup>3</sup>(见图 2c)。 $GR-R_t$ (岩石电阻率)交会图表明,玄武岩电阻率总体上比粗面岩低,玄武岩电阻率一般在 200 $\Omega \cdot m$  以下,最低在 1 $\Omega \cdot m$  以下,反映了玄武岩蚀变强的特点;粗面岩电阻率一般低于 6000 $\Omega \cdot m$ ,但有时可达 10 000~30 000 $\Omega \cdot m$ (见图 2d)。试油资料证实,孔、缝发育的粗面岩段电阻率为 30~1000  $\Omega \cdot m$ ,而电阻率低于 30 $\Omega \cdot m$  的粗面岩蚀变严重,储集层物性变差。

利用自然伽马、密度、中子孔隙度、电阻率测井资料可以定性识别火山岩岩性,区分粗面岩和玄武岩等其他火山岩类。但需要强调的是,玄武岩类通常含有易蚀变的暗色矿物及易风化的黏土矿物,而黏土矿物和蚀变矿物方解石、方沸石等对孔、缝的充填会使储集层物性变差,且暗色矿物具有较强的柔韧性,受力后不容易形成裂缝。与之相比,粗面岩主要含浅色矿物,暗色矿物含量少,风化、蚀变作用对储集层的影响小得多。大量的试油资料也表明了玄武岩类为非有效储集岩,粗面岩类为有效储集岩。

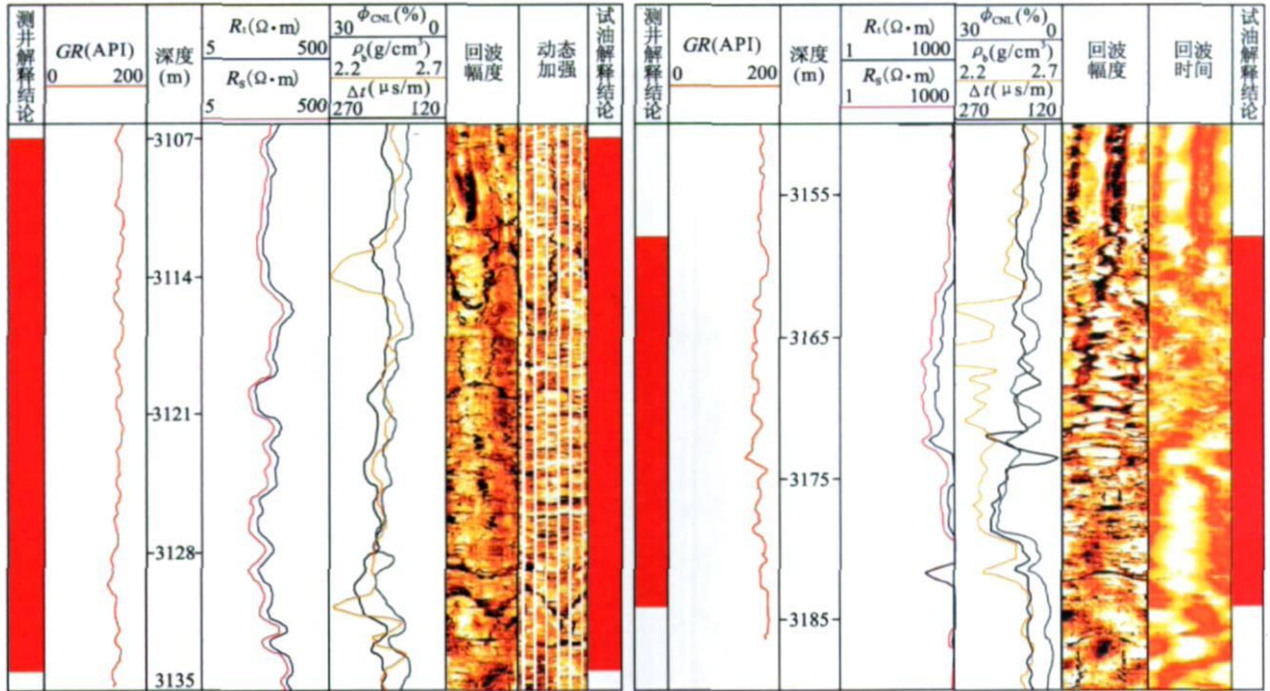
### 3 粗面岩有效储集空间的识别及评价

已有研究者利用常规测井资料对火山岩裂缝型储集空间的识别进行了有益的尝试<sup>[15,16]</sup>,并初步建立了裂缝孔隙度地质模型。3700 测井系列虽然可以定性划

分火山岩岩性,但不能直观判断出是裂缝型储集层还是孔隙型储集层,并且很难评价裂缝的形态、产状、裂缝孔隙度、开度及密度。而井周声波成像测井(Circumferential Borehole Imaging Log, CBIL)具有识别孔、缝的能力(见图3)。

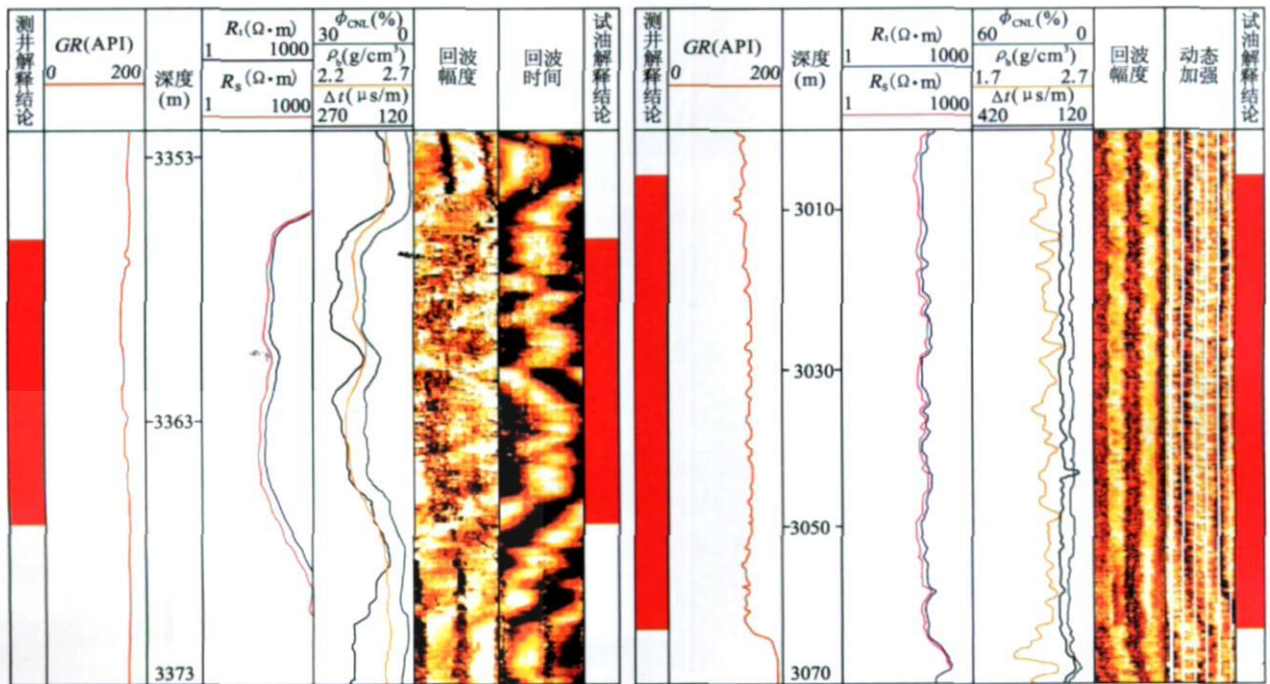
CBIL以脉冲回波法为基础,由井下换能器(电声转换装置)发射短促的声脉冲,经井眼流体传播并部分地

受到井壁反射,再由换能器接收返回的声能量,经信号处理后得到井壁声波回波的幅度成像。井下声波换能器接收的反射波强度(幅度)可以反映井壁表面的几何形状(裂缝、溶蚀孔洞等),这是CBIL识别地质特征的基础。在裸眼井中,由于天然裂缝和溶蚀孔洞能够散射入射声束的能量,因此换能器接收到的回波信号强度弱,在声波幅度成像上产生可以识别的黑色特征线型或区域。



(a) 孔-缝型储集层(小23井)

(b) 裂缝型储集层(小22-14-18井)



(c) 溶蚀孔隙型储集层(小22-20-38井)

(d) 微细孔隙型储集层(小25井)

图3 粗面岩有效储集空间识别交会图

而对于缺少裂缝或孔洞的光滑井壁,其反射信号较强,所以在声波幅度成像测井图上表现为一片白色区域。

由于火山岩岩性及其蚀变程度对 CBIL 的分辨能力有一定的影响,因此将 CBIL 曲线与常规 3700 系列数控测井曲线结合,可以更为可靠地识别和评价孔隙裂缝性储集层。由上述分析得知,粗面岩有效储集层电阻率变化大,为  $30 \sim 1000 \Omega \cdot m$ ,难以反映储集层油气饱和度的变化。实践表明,CBIL 能够识别出粗面岩的 4 种有效储集空间:孔缝型、裂缝型、溶蚀孔隙型及微细孔隙型。

取心、试油资料已经证实<sup>[11]</sup>,工区内玄武岩类储集层物性差、含油性差,试油未获得工业油流,为非有效储集层;孔、缝发育段的粗面岩储集层物性好、含油性好,试油获得了高产油气流,为有效储集层。根据粗面岩试油、试采资料及测井资料制作交会图版,确定了利用地层电阻率( $R_t$ )、声波时差( $\Delta t$ )、密度和中子孔隙度参数划分有效储集层的标准<sup>[17]</sup>为: $R_t$ 为  $36 \sim 800 \Omega \cdot m$ , $\Delta t$  大于  $203.4 \mu s/m$ , $\rho_b$  小于  $2.50 g/cm^3$ , $\phi_{CNL}$  大于  $9\%$ 。同时,依据测井资料将有效储集层划分为 3 类。

I 类储集层: $\Delta t$  大于  $213.2 \mu s/m$ , $\phi_{CNL}$  大于  $10\%$ , $R_t$  为  $55 \sim 800 \Omega \cdot m$ , $\rho_b$  小于  $2.45 g/cm^3$ ;发育较厚的裂缝、孔洞集中段,CBIL 有清楚的缝洞显示(见图 3a、图 3b,图 4a、图 4b)。该类储集层储集空间为砾间孔、溶蚀孔、裂缝;一般单井日产油在  $30t$  以上,是研究区最好的储集层。

II 类储集层: $\Delta t$  大于  $213.2 \mu s/m$ , $\phi_{CNL}$  大于  $10\%$ , $R_t$  为  $36 \sim 100 \Omega \cdot m$ , $\rho_b$  小于  $2.45 g/cm^3$ ;成像显示以孔隙为主,少见裂缝(见图 3c、图 4c)。该类储集层发育位置一般靠近风化壳顶部,因风化蚀变作用强,以发育溶蚀孔隙为主;一般单井日产油为  $7 \sim 30 t$ ,属于较好的储集层。

III 类储集层: $\Delta t$  为  $203.4 \sim 213.2 \mu s/m$ , $R_t$  为  $60 \sim 800 \Omega \cdot m$ , $\rho_b$  为  $2.40 \sim 2.50 g/cm^3$ ;成像测井基本无裂缝显示,以微细孔隙为主,且孔隙往往被方沸石和方解石充填(见图 3d、图 4d)。该类储集层储集空间为微孔、微裂缝、溶孔,以微孔、微裂缝为主,孔隙度多为  $7\% \sim 10\%$ ;常规生产产量较低,通过压裂酸化可获得较高产量,属于比较差的储集层。

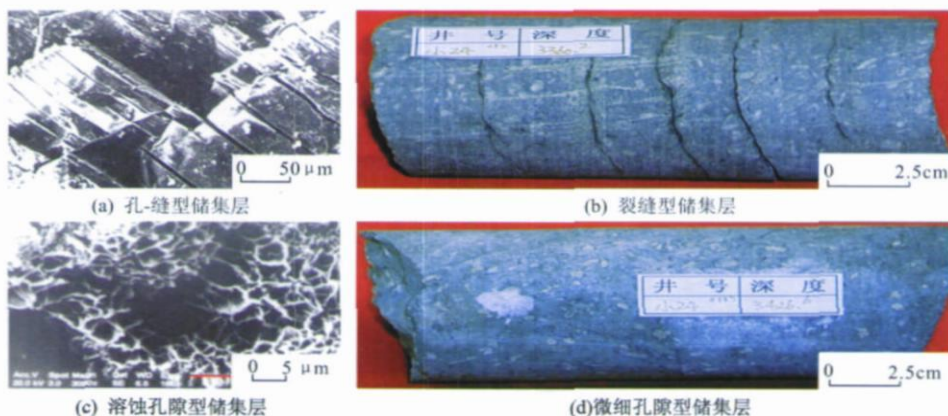


图 4 粗面岩有效储集空间类型

## 4 应用效果

上述针对粗面岩有效储集层识别和评价的方法在黄沙坨粗面岩油气田的开发实践中得到了具体的应用,取得了很好的效果。除部分井具有较好的裂缝型、孔缝型、溶蚀孔隙型储集空间(I 类和 II 类储集层)未压裂就能高产油气外(如小 22 井日产油  $62.47t$ ,日产气  $8169m^3$ ),部分井仅发育微细孔隙,需要压裂才能投产。在选择压裂井段过程中,本方法发挥了很好的作用,大部分井压裂后获得高产,如小 22 18 30 井压裂改造后,8mm 油嘴日产油达  $107t$ 。截至 2005 年底,黄沙坨地区粗面岩油气藏先后共投产 60 余口井,其中压裂投产 38 井次,初期日增油  $325t$ ,措施有效率  $100\%$ ,实

施酸化措施 5 井次,初期日增油  $33t$ ,目前开井 49 口,断块日产油  $223t$ ,已累计产油  $114$  万  $t$ ,表明了粗面岩有效储集层识别方法的实用性和可靠性。

## 5 结论

综合运用测井资料、岩心资料与试油资料,对辽河坳陷东部凹陷中段粗面岩有效储集层进行了识别。针对该区火山岩类型多变、呈层状交互产出、岩性在横向和纵向上变化大的问题,应用了 3700 系列常规测井资料,识别出不同的火山岩类,区分了粗面岩与其他非产层。针对孔缝洞有效储集空间识别的难题,采用井周声波成像测井资料对有效储集空间进行识别,识别出了孔缝型、裂缝型、溶蚀孔隙型、微细孔隙型 4 种储集

性能各异的储集空间,并结合试油资料把粗面岩有效储集层划分为3类。将该研究成果应用于黄沙坨油气田的开发实践中,取得了显著的开发效果和经济效益。

#### 参考文献:

- [1] 周立宏,吴永平,肖敦清,等. 黄骅拗陷第三系火成岩与油气关系探讨[J]. 石油学报, 2000, 21(6): 29-34.
- [2] 郭占谦. 火山作用与油气田的形成和分布[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(3): 183-185.
- [3] 肖军, Kamay e Touba 王华, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷火山岩特征及其有利成藏条件分析[J]. 地质科技情报, 2004, 23(1): 52-56.
- [4] 慕德梁, 李成, 柳锦云. 辽河拗陷牛心坨地区中生界火山岩预测技术与勘探效果[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 67-69.
- [5] 杨辉, 张研, 邹才能, 等. 松辽盆地深层火山岩天然气勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 274-281.
- [6] 杨金龙, 罗静兰, 何发歧, 等. 塔河地区二叠系火山岩储集层特征[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(4): 44-47.
- [7] 张坤, 罗海炳, 王国勇, 等. 黄沙坨地区火山岩成藏条件分析[J]. 特种油气藏, 2001, 8(4): 17-22.
- [8] 马志宏. 热河台 黄沙坨地区沙三段火山岩成藏的控制因素[J]. 特种油气藏, 2004, 11(2): 15-17.
- [9] 马志宏. 黄沙坨地区火山岩储层研究及预测[J]. 断块油气田,

2003, 10(3): 5-8.

- [10] 张坤. 欧利坨子 黄沙坨地区粗面岩储层裂缝特征及平面预测研究[J]. 特种油气藏, 2004, 11(2): 20-23.
- [11] 张兴华, 张吉昌, 张新培, 等. 欧利坨子地区火山岩地质特征[R]. 盘锦: 辽河油田勘探开发研究院, 2002.
- [12] 金勇, 唐文清, 陈福利, 等. 石油测井地质综合应用网络平台 Forward.NET [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 92-96.
- [13] 魏斌, 陈建文, 李长山, 等. 徐家围子断陷火山岩岩性的测井识别技术[J]. 特种油气藏, 2003, 10(1): 73-75.
- [14] 潘保芝, 薛林福, 李舟波, 等. 裂缝性火成岩储层测井评价方法与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [15] 邓攀, 陈孟晋, 高哲荣, 等. 火山岩储层构造裂缝的测井识别及解释[J]. 石油学报, 2002, 23(6): 32-36.
- [16] 徐正顺, 王渝明, 庞彦明, 等. 大庆徐深气田火山岩气藏储集层识别与评价[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(5): 521-531.
- [17] 张吉昌, 陈元春, 张兴华, 等. 黄沙坨油田粗面岩综合地质研究[R]. 盘锦: 辽河油田勘探开发研究院, 2004.

第一作者简介: 谷团(1972), 男, 河北昌黎人, 博士, 主要从事石油、天然气地质研究与勘探工作。地址: 北京市学院路20号, 中国石油勘探开发研究院石油地质研究所, 邮政编码: 100083。E-mail: gutuan@sohu.com

收稿日期: 2006 05 27 修回日期: 2006 12 02

(编辑 李建国 绘图 付改荣)

(上接第 298 页)

## 5 结论

鄂尔多斯盆地南部马家沟组马五段存在与靖边气田类似的云坪和含膏云坪相带, 平凉组发育深水斜坡相, 局部还存在深海盆地相沉积。盆地南部发育晶间孔、溶蚀孔洞、裂缝、洞穴等多种古岩溶储集空间类型, 但只有较少部分白云岩层段晶间孔较发育, 而溶蚀孔洞多被次生矿物充填; 灰岩分布区裂缝及洞穴系统较为发育。盆地南部不同地区风化壳储集层发育主控因素为岩溶古地貌、风化壳层位和沉积相, 分布规律不同: 中央古隆起西侧微裂缝发育并在风化壳不同深度形成洞穴系统; 中央古隆起南侧断裂、洞穴系统、风化裂隙相对较为发育; 中央古隆起区岩性致密, 风化壳顶部垂直裂隙带发育, 溶蚀孔洞不发育; 中央古隆起东侧风化壳多位于云坪沉积层, 古地貌多属于岩溶阶地, 溶蚀孔洞较为发育, 但风化壳若在泥云坪沉积层, 则储集性就相对较差。

鄂尔多斯盆地南部岩溶古地貌天然气成藏主控因素为生烃中心和风化壳储集层, 天然气主要在淳化平凉组生烃中心和中央古隆起东侧马五段有利沉积相带富集。

#### 参考文献:

- [1] 何自新, 郑聪斌, 王彩丽, 等. 鄂尔多斯盆地靖边气田的发现与勘探[J]. 海相油气地质, 2005, 10(2): 37-44.
- [2] 马新华. 鄂尔多斯盆地天然气勘探开发形势分析[J]. 石油勘探与

开发, 2005, 32(4): 50-53.

- [3] 杨俊杰. 陕甘宁盆地古生界天然气的发现[J]. 天然气工业, 1991, 11(2): 1-6.
- [4] 代金友, 张一伟, 史若珩, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田剥蚀脊与沟槽[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 29-31.
- [5] 赵文智, 王新民, 郭彦如, 等. 鄂尔多斯盆地西部晚三叠世原型盆地恢复及其改造演化[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 6-13.
- [6] 李道燧, 张宗林, 徐晓蓉. 鄂尔多斯盆地中部古地貌构造对气藏的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(3): 9-14.
- [7] 陈孟晋, 汪泽成, 郭彦如, 等. 鄂尔多斯盆地南部晚古生代沉积特征与天然气勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 1-5.
- [8] 杨承运, Carozzi A V. 碳酸盐岩实用分类及微相分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 1986.
- [9] 冯增昭, 鲍志东. 鄂尔多斯奥陶纪马家沟组岩相古地理[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 1-8.
- [10] 马振芳. 鄂尔多斯盆地中部古风化壳储层特征[J]. 天然气地球科学, 1994, 5(6): 28-36.
- [11] 郑聪斌, 张军, 李振宏. 鄂尔多斯盆地西缘古岩溶洞穴特征[J]. 天然气工业, 2005, 25(4): 27-30.
- [12] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 海相沉积有机质的碳同位素记录及其环境意义——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 11-16.
- [13] 谢增业, 胡国艺, 李剑, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系烃源岩有效性识别[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 29-32.

第一作者简介: 夏明军(1975), 男, 安徽淮北市人, 中国石油勘探开发研究院博士研究生, 从事石油与天然气地质研究工作。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院研究生部, 邮政编码: 100083。E-mail: x\_m\_j@sina.com

收稿日期: 2006 10 11 修回日期: 2007 04 28

(编辑、绘图 王孝陵)