

黄骅拗陷辉绿岩蚀变带储层预测方法

姚军*^① 刘化清^① 曾建宏^② 李双文^{①②} 倪长宽^①

(^①中国石油勘探开发研究院西北分院,甘肃兰州 730020; ^②大港油田勘探开发研究院,天津 300280)

姚军,刘化清,曾建宏,李双文,倪长宽. 黄骅拗陷辉绿岩蚀变带储层预测方法. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 477~482

摘要 黄骅拗陷辉绿岩蚀变带储层裂缝非常发育,但蚀变带厚度较小,这为蚀变带储层预测增大了难度。为此,本文以黄骅拗陷R区的测井资料为出发点,分析了蚀变带的测井响应特征,认为蚀变带的补偿密度值、补偿中子值及自然伽马值与围岩和辉绿岩的界限较为明显;进而选择了波阻抗反演与多属性反演相结合的方法对辉绿岩蚀变带的分布范围和厚度进行了预测;利用“综合概率法”对多种测井响应进行计算,得到表征裂缝发育程度的裂缝发育指数曲线,并再次通过多属性反演,预测了蚀变带裂缝的分布范围和发育程度。通过实际钻井资料验证,预测结果准确度高,为该区辉绿岩蚀变带储层预测提供了重要的依据。

关键词 黄骅拗陷 辉绿岩蚀变带 裂缝 测井响应 波阻抗反演 多属性反演

中图分类号:P631 文献标识码:A

1 引言

黄骅拗陷古近纪、新近纪时期岩浆活动强烈,火成岩体极为发育。从20世纪60年代初期对黄骅拗陷进行火成岩油气藏勘探以来,先后在港深7、张7及扣22等井区发现了多个与辉绿岩蚀变带有关的油气藏,辉绿岩蚀变带储集层已成为黄骅拗陷重要的勘探对象之一^[1]。辉绿岩为浅成侵入岩体,当高温岩浆侵入到地层时,岩浆的热液蚀变作用和高温烘烤作用会使围岩发生接触变质,导致在辉绿岩的顶、底伴生出现蚀变岩相带。此外,由于烘烤、冷凝等一系列变化,使蚀变带普遍发育裂缝,其储集物性良好^[2,3]。目前仅依靠钻井数据对这类储层进行评价,如何利用地球物理手段有效地预测辉绿岩蚀变带及其裂缝的分布范围和厚度,对下一步的油气勘探部署极其重要。

2 利用测井响应识别辉绿岩蚀变带

通常钻井数据中直接含有辉绿岩蚀变带的发育信息。通过观察黄骅拗陷R区钻遇辉绿岩蚀变带

的17口井的岩心和薄片可以确定井点处蚀变带的厚度和埋深,再由不同的常规测井曲线归纳出反映辉绿岩蚀变带的测井响应特征。

图1为研究区W1井测井曲线,由图中可见,该区辉绿岩表现为明显的“两高三低”的测井响应特征:电阻率值(RLLD、RLLS)很高、补偿密度值(DEN)也很高(约为 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$),图中较频繁的抖动是因裂缝的存在而引起的;自然伽马值(GR)、声波时差值(AC)和补偿中子值(CNL)非常低,其响应范围分别为 $15\sim 25\text{API}$ 、 $150\sim 200\mu\text{s}/\text{m}$ 和 $10\%\sim 15\%$ 。蚀变带的测井响应特征与围岩及辉绿岩均不相同,表现为:GR值一般高于邻近的围岩(泥岩),并且与围岩相比蚀变带具有AC值降低、DEN值降低、CNL值增高、RLLD、RLLS值增高的特征,自然电位曲线(SP)有时出现较大的正或负异常^[2,4]。

综合分析辉绿岩、辉绿岩蚀变带和围岩三者的测井响应特征表明:蚀变带的AC值、RLLD、RLLS值介于辉绿岩和围岩之间,CNL值和GR值在三者中最大,辉绿岩的CNL值和GR值在三者中最小;蚀变带的DEN值在三者中最小,辉绿岩的DEN值最大。综上所述,蚀变带的补偿密度值、补偿中子值及自然伽马值与围岩和辉绿岩的界限较为明显(图2)。

* 甘肃省兰州市城关区雁儿湾路535号中国石油勘探开发研究院西北分院油气战略规划所,730020。Email: yao_j@petrochina.com.cn。
本文于2011年4月11日收到,最终修改稿于2012年3月20日收到。

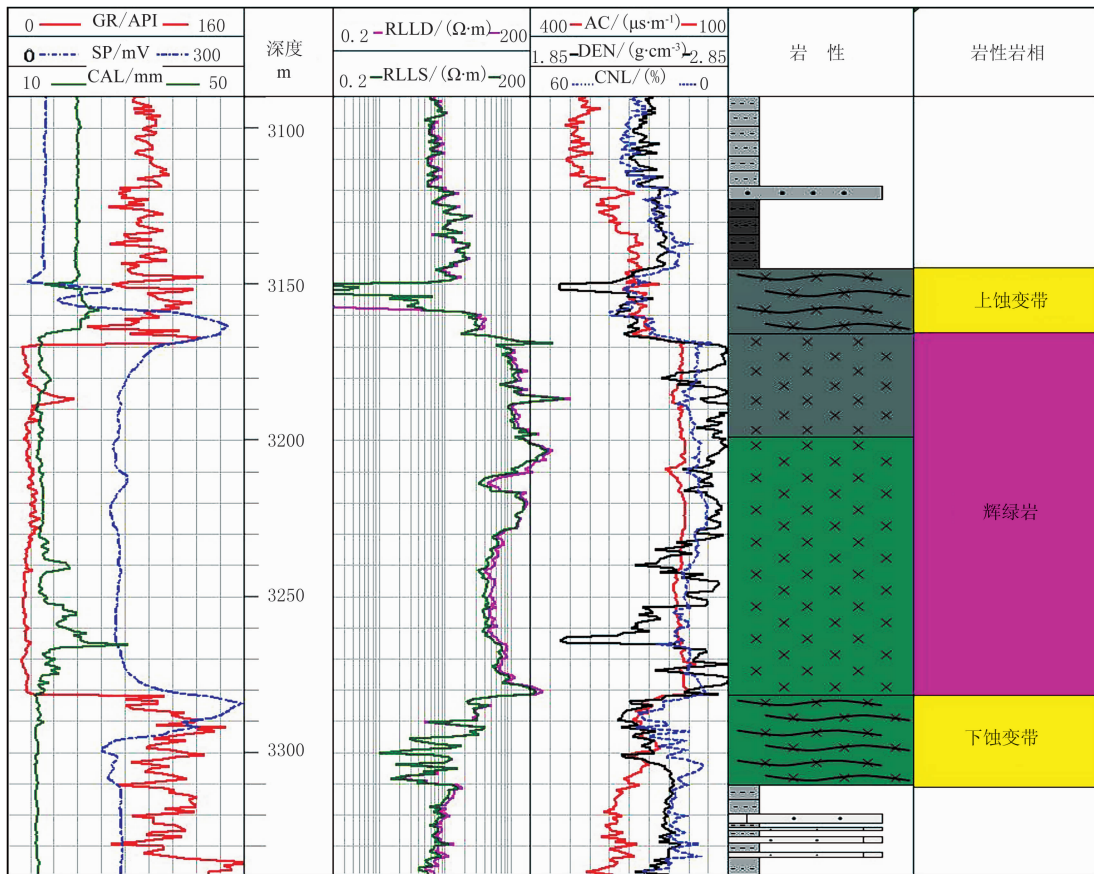


图 1 W1 井测井曲线

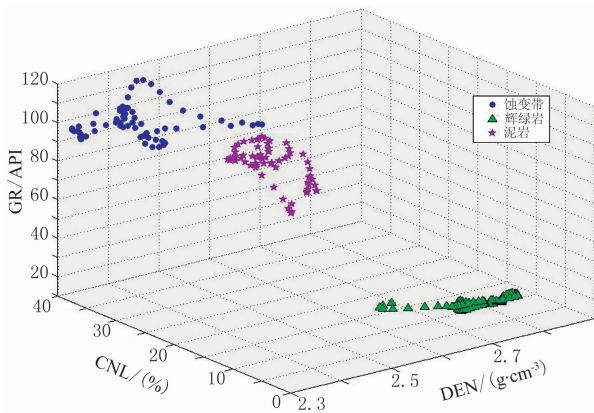


图 2 不同岩性 GR-CNL-DEN 散点图

通过对 R 区钻遇辉绿岩蚀变带测井曲线的统计,计算出该区辉绿岩、蚀变带及围岩的波阻抗值概率分布直方图(图 3)。由图 3 可见,围岩(泥岩)波阻抗值范围为 5500~8500m/s · g/cm³,辉绿岩波阻抗值范围为 12000~16000m/s · g/cm³,辉绿岩蚀变带波阻抗值范围为 8500~13000m/s · g/cm³。因此辉绿岩与蚀变带的波阻抗值有小部分重合,波阻抗界限不清晰,围岩与蚀变带波阻抗界限比较明确。

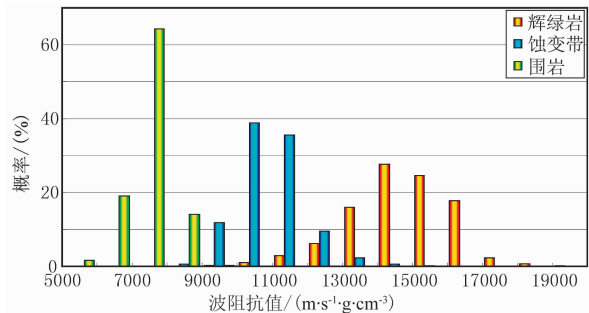


图 3 不同岩性波阻抗概率统计直方图

3 利用地震反演识别辉绿岩蚀变带

R 区辉绿岩与其顶部围岩的界面在地震反射剖面上对应一个能量很强的波峰,辉绿岩与其底部围岩的界面对应一个能量很强的波谷,而辉绿岩上、下蚀变带由于厚度太小以及辉绿岩的影响,使其在地震反射剖面上难以准确地识别出来。但是前文的测井响应分析表明,围岩与蚀变带的波阻抗界限比较明确,因此可通过波阻抗反演预测出围岩与蚀变带

的界面,在此基础上再以蚀变带的特征曲线(DEN、CNL、GR)作为测井参数,通过多属性反演来预测蚀变带与辉绿岩的界面。

测井约束下的波阻抗反演是一种基于模型的波阻抗反演技术,即以已知地质规律和钻井、测井资料作为地震反演的约束,对地下岩层波阻特征进行求解。其基本原理是:首先利用测井资料进行约束,以地震解释层位为控制,从井点出发,通过内插、外推,产生初始波阻抗模型;然后采用模型优选迭代算法不断修改、更新初始波阻抗模型,直到用它正演的合成地震记录与实际的地震记录达到最佳吻合为止,得到的最终模型便是反演结果^[5~7]。

图 4 为 R 区通过三维波阻抗反演最终得到的波阻抗反演数据体中的一条连井剖面,由图 4 可见,反演所得的蚀变带与围岩的界面在井点处与井上统计结果(井柱上的横线)基本保持一致,说明运用测井约束的波阻抗反演能够将辉绿岩蚀变带与围岩准确地区分。但由于辉绿岩与蚀变带波阻抗界限不明显,因此在波阻抗反演数据体上未能准确地识别出辉绿岩与蚀变带的界面。

在已知目标区的地震、地质条件前提下,只要储层或流体性质变化的特征参数达到某一程度,就会在地震数据上有所反映,主要表现为波形、能量、频率、相位等地震属性发生一系列几何学、运动学、动力学及统计特征的变化,于是就有可能通过某种数学运算,并结合地质和测井资料的分析,从中找出地震属性与已知井测井参数的对应关系,再利用这种关系即可对目标区的储层参数进行预测,这个过程通常称为多属性反演^[8,9]。

在辉绿岩与蚀变带的界面处,GR 曲线存在明显的突变,即 GR 曲线可以很好地区分辉绿岩与蚀变带的界面。根据这一特征,可以利用多属性反演预测辉绿岩与蚀变带的界面。具体反演方法分为以下三个主要步骤^[10]:①加载地震、测井资料并作标定;②在 R 区井点附近采用多元线性回归算法或神经网络算法找到与井上 GR 曲线相关性很好的地震属性来预测 GR 值;③将挑选出的地震属性与 GR 值的对应关系应用于整个地震数据体及波阻抗反演数据体,从而反演 GR 数据体。

图 5 是与图 4 相对应的多属性反演 GR 数据体

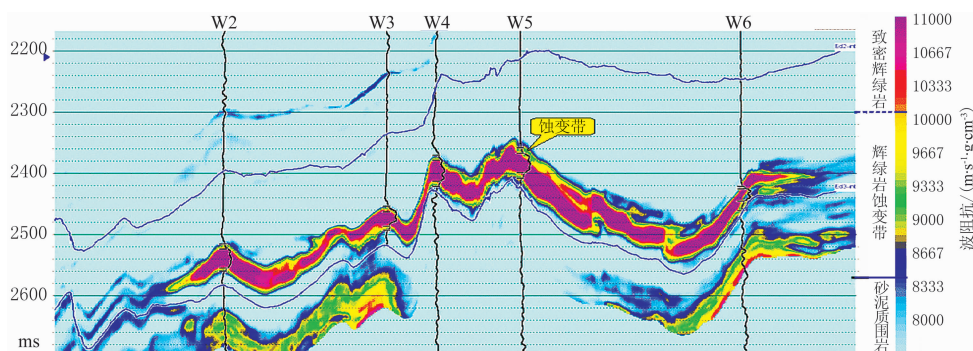


图 4 波阻抗反演连井剖面

图中测井曲线为 AC 曲线,单位为 $\mu\text{s}/\text{m}$

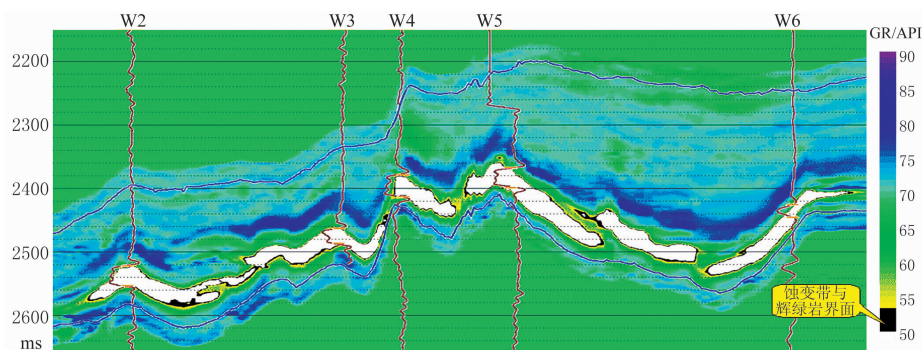


图 5 多属性反演 GR 数据体连井剖面

在 GR 数据体上取 50~55 API 作为辉绿岩的顶、底界面值,该取值范围是统计 R 区已知井上的 GR 曲线在辉绿岩和蚀变带界面处的半幅值点的值得到的。图中井曲线为 GR 曲线,单位为 API

连井剖面,由图中可见,辉绿岩与蚀变带的界面与已知井上标定的界面(桔黄色线段)是一致的,由此预测的辉绿岩与蚀变带界面的不确定性减小,可信度很高。

综合波阻抗反演和多属性反演结果,追踪了R区辉绿岩顶、底蚀变带的上、下界面,从而预测了辉绿岩蚀变带的分布范围和厚度(图6)。由图6可

见,R区辉绿岩蚀变带整体是由中心部位向边缘减薄,顶部蚀变带厚度为0~32m(图6a),底部蚀变带厚度为0~72m(图6b)。通过与钻井数据相比(1口井顶部蚀变带未钻穿)可知,顶部蚀变带预测厚度相对误差平均小于6%(表1),在辉绿岩体边缘及断层附近误差较大。底部蚀变带为非储集层,未做统计。

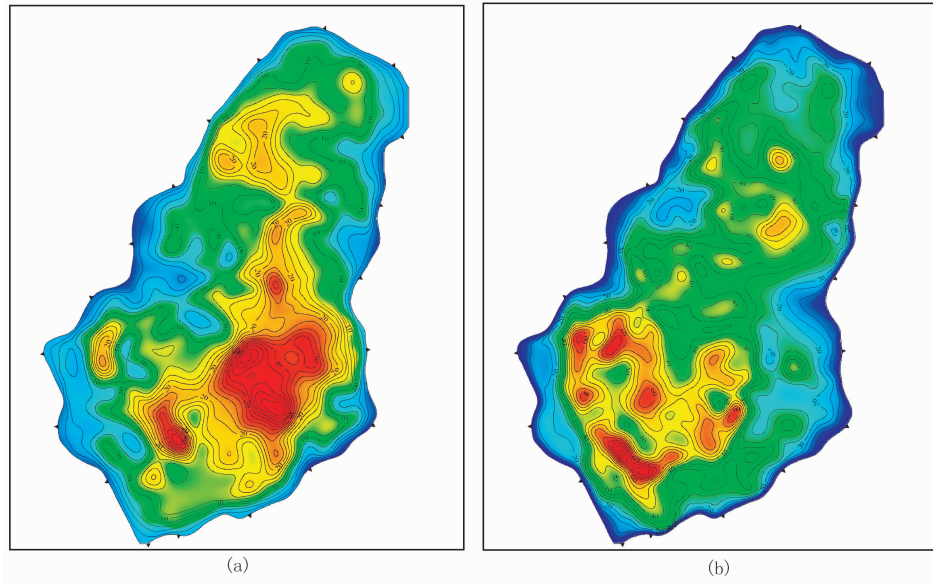


图6 R区辉绿岩顶部(a)、底部(b)蚀变带厚度图(单位:m)

表1 顶部蚀变带预测厚度与钻井厚度误差统计表

井名	实际厚度/m	预测厚度/m	相对误差/(%)
W1	28.7	28.8	0.3
W2	15.1	14.9	1.3
W3	18.9	18.1	4.2
W4	24.4	24.3	0.4
W5	16.2	17.4	7.4
W6	7.7	7.7	0
W7	12.4	14.1	13.7
W8	20.9	20.9	0
W9	4.5	5.3	17.8
W10	6.6	7.8	18.1
W11	10.8	10.9	0.9
W12	21.0	21.1	0.5
W13	33.5	33.1	1.2
W14	12.9	12.7	1.6
W15	4.2	5.0	19.1
W16	14.7	15.4	4.8

4 蚀变带裂缝预测

由于蚀变带裂缝极为发育,因此蚀变带可成为

良好储集层,有效预测蚀变带裂缝的分布范围和发育程度对油气勘探具有现实意义。由于各种测井方法对裂缝的敏感程度并非完全相同,加之某些非裂缝因素也可能引起与裂缝相同的测井异常响应,因此仅单独利用某种测井方法往往很难准确地判别裂缝的测井异常响应。综合裂缝概率方法是利用测井响应特征判别裂缝发育的概率,通过对多种测井响应进行加权计算,最后构成一条裂缝发育指数曲线,从而对裂缝进行综合判断^[11],其计算公式为

$$p = \frac{|x - x_b|}{|x_f - x_b|} \quad (1)$$

$$Q = \sum_{i=0}^m w_i p_i \quad (2)$$

其中: p 为单曲线裂缝概率; x 为测井曲线值; x_b 为致密段测井曲线值; x_f 为裂缝发育段测井曲线值; Q 为综合裂缝概率; m 为所选曲线种类的个数; i 表示不同的测井曲线类型; w 为权系数。

文中采用四种对裂缝反应敏感的测井曲线进行计算,分别为双侧向电阻率之差绝对值(RLLD—

RLLS)、微球形聚焦电阻率(RMSF)、井径(CAL)、声波时差(AC),其中 RLLD-RLLS 取绝对值,RMSF 和 AC 取剩余变化曲线^[12]。通过与钻井资料进行对比,并反复计算验证,最终确定四种测井曲

线的权系数依次为 0.4、0.3、0.15、0.15。图 7 为 R 区 W7 井的裂缝发育指数曲线(FDE)计算结果,由图中可见,该井蚀变带裂缝非常发育,而辉绿岩及围岩裂缝基本不发育。

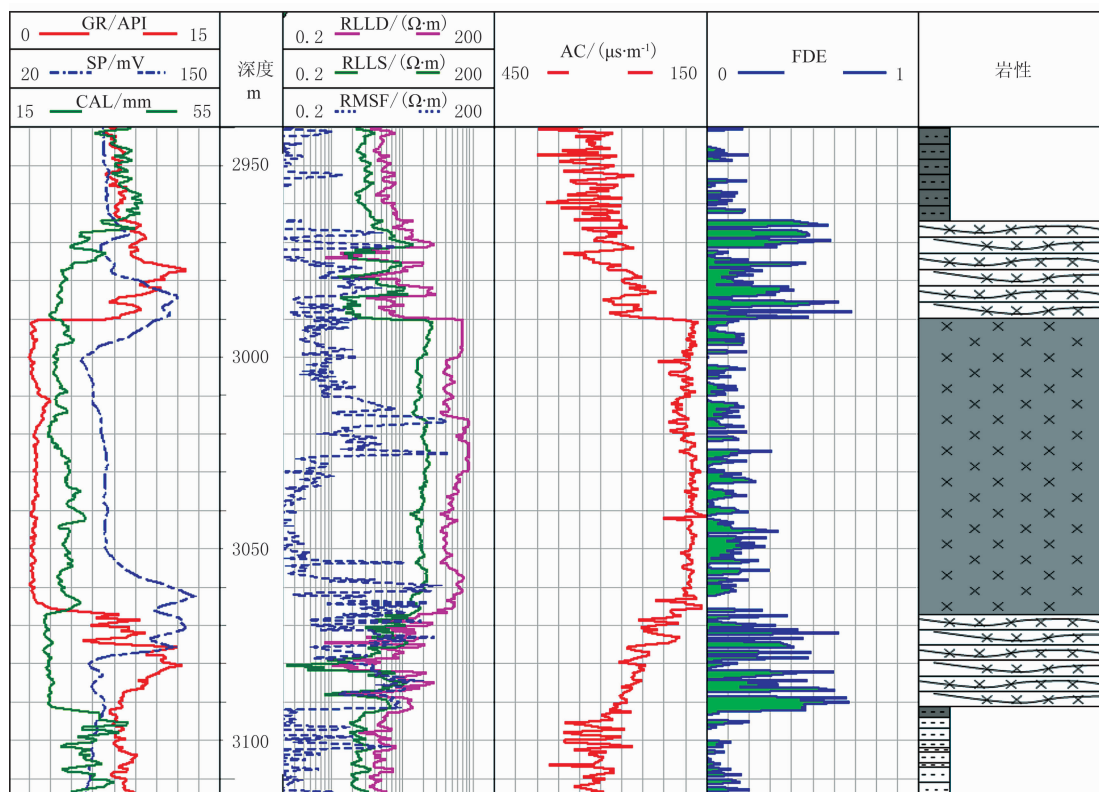


图 7 W7 井裂缝发育指数曲线(FDE)计算结果

以 FDE 曲线作为测井参数,在三维地震、波阻抗及 GR 数据体上再次运用多属性反演预测蚀变带裂缝在全区的分布范围和发育程度,图 8 为 FDE 反演数据体顶部蚀变带层间均方根振幅切片,该图指示了顶部蚀变带裂缝的分布范围和发育程度,由蓝色到红色指示裂缝从发育到非常发育的变化特征。

根据蚀变带在反演结果上的平面分布情况及发育程度,通过对蚀变带裂缝进行系统评价(图 9)来指导蚀变带的勘探部署。由于蚀变带普遍发育裂缝,只是裂缝的张开度、密度、延伸长度等有所不同,故将全区的裂缝发育程度分为裂缝发育区和裂缝极发育区两级。利用文中方法对黄骅拗陷 R 区块蚀变带进行目标识别与预测,目前钻探的两口井都钻遇了蚀变带,厚度相对误差在 5%之内,并且在该层段获得工业油流。

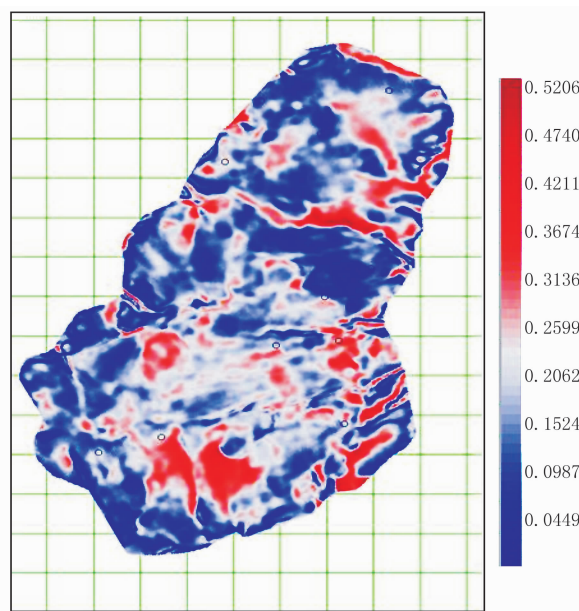


图 8 FDE 反演数据体顶部蚀变带层间均方根振幅切片

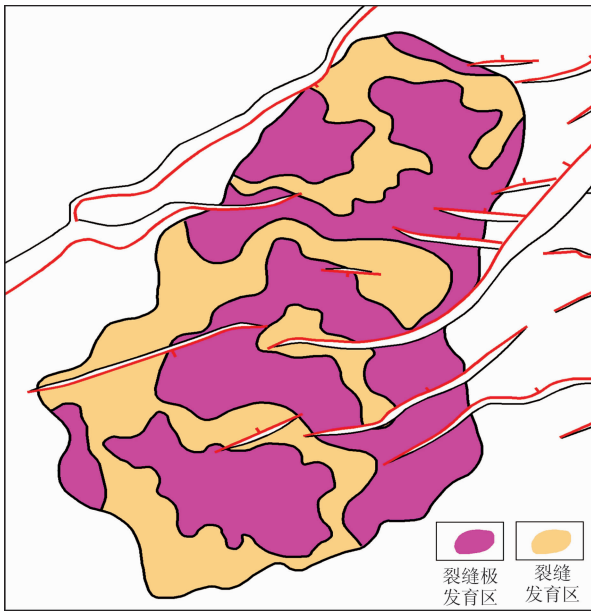


图9 顶部蚀变带裂缝评价图

5 结束语

辉绿岩是火成岩中分布较普遍的岩石类型,其外围常伴随裂缝极发育的蚀变带,成为油气富集藏的有效储集体,这已在渤海湾盆地多处得到证实。通过本文的研究,提供了定量识别、预测该类储层的基本思路与技术体系,即首先从已知井出发,应用蚀变带测井响应特征确定单井蚀变带分布及厚度,再通过波阻抗反演及多属性反演定量识别其三维分布及厚度,最后进一步应用“综合概率法”与多属性反演相结合预测裂缝的分布范围和发育程度,从而为该类油气藏的综合评价提供了可靠的依据。

参考文献

- [1] 周立宏,吴永平等. 黄骅坳陷第三系火成岩与油气关系探讨. 石油学报, 2000, 21(5): 29~34
Zhou Lihong, Wu Yongping et al. Characteristics of the Tertiary igneous rocks and investigation of their relationships with hydrocarbon in Huanghua Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(5): 29~34
- [2] 邵维志,梁巧峰,李俊国等. 黄骅凹陷火成岩储层测井响应特征研究. 测井技术, 2006, 30(2): 149~153
Shao Weizhi, Liang Qiaofeng, Li Junguo et al. On log response characteristics of igneous reservoir in Huanghua Depression. *Well Logging Technology*, 2006, 30(2): 149~153
- [3] 南雪芬,叶庆丽,蒋素霞. 黄骅凹陷风化店地区火成岩研究与识别. 录井工程, 2006, 17(4): 72~75
Nan Xuefen, Ye Qingli and Jiang Suxia. The igneous

studying and distinguishing for Fenghuadian Area of Huanghua Depression. *Mud Logging Engineering*, 2006, 17(4): 72~75

- [4] 王鹏等. 大港油田科技丛书. 北京:石油工业出版社, 1999, 98~120
- [5] 肖阳,朱敏,朱文奎等. 测井约束反演技术在油藏描述中的应用. 石油地球物理勘探, 2001, 36(5): 633~639
Xiao Yang, Zhu Min, Zhu Wenkui et al. Application of logging-constrained version in reservoir description. *OGP*, 2001, 36(5): 633~639
- [6] 王西文,石兰亭,雍学善等. 地震波阻抗反演方法研究. 岩性油气藏, 2007, 19(3): 1~8
Wang Xiwen, Shi Lanting, Yong Xueshan et al. Study on seismic impedance inversion. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(3): 1~8
- [7] 刘磊,邢正岩,孙国等. 应用测井约束地震反演技术描述桩106断块储集层. 石油勘探与开发, 1999, 26(5): 80~82
Liu Lei, Xing Zhengyan, Sun Guo et al. The application of well log constrained seismic inversion to the description of reservoirs in Zhuang 106 Block. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(5): 80~82
- [8] 谢雄举,季玉新. 优选地震属性预测储层参数的方法及其应用. 石油物探, 2004, 43(增刊): 127~131
Xie Xiongju, Ji Yuxin. The method and its application of preferring seismic attributes to predict reservoir parameters. *GPP*, 2004, 43(Sup): 127~131
- [9] 江文荣,李允,蔡东升. 秦皇岛27-33区块三维地震精细解释及储层预测. 天然气地球科学, 2006, 17(4): 502~509
Jiang Wenrong, Li Yun and Cai Dongsheng. Fine interpretation and reservoir prediction on 3D seismic data of QHD 27/33. *Natural Gas Geoscience*, 2006, 17(4): 502~509
- [10] 蔡刚,黄玉,姚清洲等. 储层地震反演方法及其在Q三维工区的应用. 天然气地球科学, 2009, 20(6): 972~976
Cai Gang, Hang Yu, Yao Qingzhou et al. Method of reservoir seismic inversion and its application in the Q 3D survey. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(6): 972~976
- [11] 汤小燕,王兴元,朱永红. 综合概率法评价火山岩裂缝发育程度. 天然气勘探与开发, 2009, 32(1): 26~27
Tang Xiaoyan, Wang Xingyuan and Zhu Yonghong. Use synthetic probability method to evaluate the fracture development of volcanic rocks. *Natural Gas Exploration and Development*, 2009, 32(1): 26~27
- [12] 潘保芝,李舟波,石雨田. 测井曲线剩余变化的分维描述火成岩裂缝发育情况. 吉林大学学报(地球科学版), 2002, 32(4): 399~402
Pan Baozhi, Li Zhoubo and Shi Yutian. Characterizing fracture intensity of igneous formations by fractal dimension of residual variation of logs. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2002, 32(4): 399~402

(本文编辑:刘勇)