

胡刚, 何正勤, 李娜, 叶太兰, 胡德军. 2016. 跨安宁河断裂带浅孔综合地球物理测井成果分析. 地震学报, **38**(5): 684–692. doi:10.11939/jass.2016.05.003.
Hu G, He Z Q, Li N, Ye T L, Hu D J. 2016. Analyses on integrated geophysical logging results in shallow hole across the Anninghe fault zone. *Acta Seismologica Sinica*, **38**(5): 684–692. doi:10.11939/jass.2016.05.003.

跨安宁河断裂带浅孔综合地球 物理测井成果分析^{*}

胡 刚^{1),*} 何正勤¹⁾ 李 娜¹⁾ 叶太兰¹⁾ 胡德军²⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所
2) 中国四川西昌 615000 四川省地震局西昌地震中心站

摘要 利用综合地球物理测井技术测得跨川西安宁河断裂带冕宁—西昌段两个钻孔的电阻率、声波速度、自然电位、自然伽马等 4 种综合测井曲线, 并结合钻孔取芯资料得到了钻孔周围所钻遇岩土层的综合物性参数. 本文得到的综合测井解释成果客观真实地反映了安宁河断裂带东、西两盘的介质物性和岩性特征, 揭示了断层东、西两盘地层的纵波速度变化、视电阻率值等物性变化特征, 为研究安宁河断裂带的物质组成、介质物性、断层结构及其活动状态提供了基础资料. 综合地球物理测井技术有望成为监测活动断裂带附近介质物性参数动态变化的一种新手段.

关键词 综合地球物理测井 安宁河断裂带 物性参数 动态变化
doi:10.11939/jass.2016.05.003 中图分类号: P313.3 文献标志码: A

Analyses on integrated geophysical logging results in shallow hole across the Anninghe fault zone

Hu Gang^{1),*} He Zhengqin¹⁾ Li Na¹⁾ Ye Tailan¹⁾ Hu Dejun²⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China
2) Xichang Earthquake Center Station, Sichuan Earthquake Administration,
Sichuan Xichang 615000, China

Abstract: Using the integrated geophysical logging technique, we measured resistivity, sonic velocity, spontaneous potential and natural gamma logs of two wells which were located in Mianning–Xichang segment of Anninghe fault in western Sichuan, and obtained the integrated physical parameters combining with coring data drilled around the drilled rock layer. The integrated logging interpretation results reflect the physical properties and lithological characteristics of the east and west sets of the Anninghe fault zone objectively, and reveal the physical properties variation of the P-wave velocity and the apparent resistivity of the fault zone, providing the basic data for research on material

* 基金项目 中国地震局地球物理研究所基本科研业务重点专项 (DQJB12C10) 和太原盆地浅层速度结构探测 (DQJB14C04) 共同资助.

收稿日期 2015-10-16 收到初稿, 2016-01-28 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: hugang@cea-igp.ac.cn



composition, media properties, structure and active state of the fault zone. Integrated geophysical logging technology is expected to become a new mean of monitoring dynamic variation of physical parameters near active fault zones.

Key words: integrated geophysical logging; Anninghe fault zone; physical parameter; dynamic variation

引言

川西安宁河断裂带作为青藏地块与华南地块的边界断裂,自新生代以来发生了强烈的构造运动,在晚第四纪反复经历多次断裂活动和强震活动.2008年汶川 $M_s8.0$ 地震发生后,程建武等(2010)认为该地区的强震活动可能沿着鲜水河断裂向南迁移.地震危险性趋势研究和古地震研究结果均表明安宁河断裂带冕宁—西昌段存在一个较大尺度的凹凸体;区域应力场显示该段呈高应力背景下的闭锁状态,是未来川滇地块发生大地震的潜在危险段(易桂喜等,2004,2008;冉勇康等,2008;闻学泽等,2008).因此,研究安宁河断裂带内部介质的岩性、物性特征,厘清断层内部的精细结构,有助于我们认识和理解安宁河断裂带的孕震过程,对评价该断裂带潜在的强震危险性具有重要意义(胡刚等,2013).

活动断裂带的科学钻探可以通过钻孔取芯和综合地球物理测井等探测手段为活动断裂带附近地下介质物性变化的研究提供基础资料,为地震的发震机理、孕震过程等根本问题的解决提供重要参考依据(许志琴等,2008).“中国大陆科学钻探”项目的综合地球物理测井利用声波、密度、自然伽马等综合测井资料,结合录井资料所确定的井孔周围变质岩区的岩性与构造细节,可以建立起钻孔区精确的速度模型(潘和平等,2006;杨文采等,2006).台湾车笼埔断层深井钻探计划在500—1900 m深度范围内进行了综合地球物理测井,利用不同的测井资料,如声波、密度、中子、自然电位等测井曲线获得了断裂带内不同地层的地震波速、密度、各向异性等岩石物理参数(Wu *et al.*, 2007).

中国地震局地球物理研究所于2012年设立的“地震重点危险区综合地球物理研究”专项,以“川滇交界东段”年度重点危险区为研究区、冕宁、西昌和巧家地区为关键点,利用地震学、地磁、重力、GPS、数值模拟分析等方法,发展面向年度重点地震危险区短临跟踪的地下介质变化和应力状态监测分析技术.跨安宁河断裂带钻孔综合地球物理测井依托该专项子课题“跨安宁河断裂带井孔地球物理综合物性研究”,通过对跨安宁河断裂带两个钻孔实施声波、自然伽马、电阻率、自然电位等综合地球物理测井,提取钻孔周围地层的各类物性、岩性参数,以综合分析安宁河断裂带冕宁—西昌段的物质组成、介质特性、断层结构及其活动状态,为断层特性研究提供基础资料,为安宁河断裂带北段的地震重点危险区短临跟踪的地下介质变化研究提供基础依据.

1 研究区背景和地球物理测井方法

1.1 研究区背景

跨安宁河断裂带的钻孔位于该断裂带以北约30 km的冕宁—西昌段(图1).安宁河断裂带在该段因逆走滑所造成的断层槽谷地貌发育明显,槽谷走向为近NNW向,总长约1700 m(王虎,2012).图1中绿色方框内为断层槽谷内发育的一个呈三角形的小型断塞塘,实测地形等值线趋势揭示该断塞塘附近呈现出一系列走滑特征的微地貌.本研究所利

用的地震观测钻孔 ZK01 和 ZK02 正好位于该断塞塘北侧的安宁河断裂带西盘和东盘上, 钻孔 ZK01 深度为 113.75 m, 钻孔 ZK02 深度为 112.5 m, 二者海拔高差约为 8.5 m. 钻孔揭露的地层岩性主要为页岩和泥岩, 不同岩性间或同一岩性物理性质发生变化时(节理裂隙、破碎、强度等), 其物性存在差异, 这为开展钻孔内的综合地球物理测井提供了前提条件.

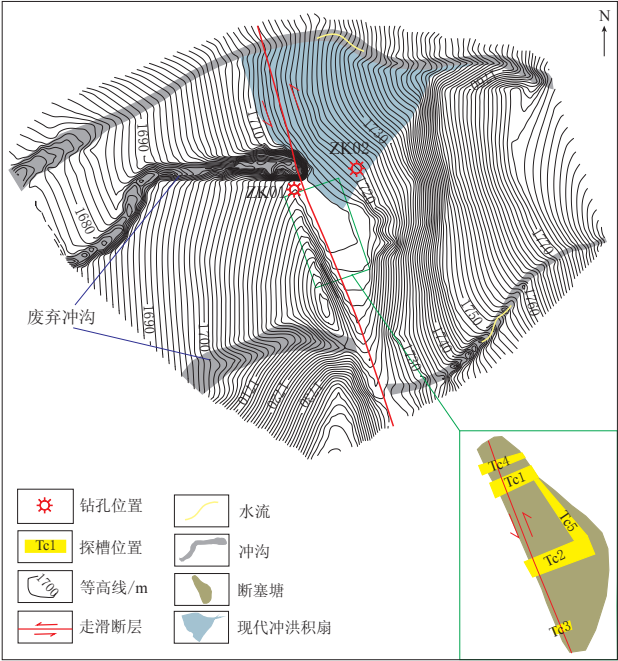


图 1 跨安宁河断裂带的钻孔位置实测地形图(修改自王虎, 2012)

Fig. 1 The topographic map of the borehole location across Anninghe fault zone (modified by Wang, 2012)

1.2 地球物理测井方法

1.2.1 声波速度测井

通常情况下, 声波速度测井通过测量井内一定间隔地层上的声波传播时差来确定岩层性质, 所测得的参数为岩层的纵波速度. 声波在岩层中的传播速度主要取决于岩石的密度、岩石的结构矿物组分以及裂隙发育程度等因素. 因而, 通常依据不同的岩性具有不同的声波速度这一特点来准确精细地划分地层岩性, 以用于地层对比.

1.2.2 视电阻率测井

视电阻率测井是通过测量地层的视电阻率来研究井剖面地层性质的测井方法, 通常可以获得岩层的视电阻率等电性参数. 不同地层和岩性的视电阻率差异较大. 地层的视电阻率大小与岩性、物性、孔隙流体性质、地层水性质等因素有关(张庚骥, 1996).

视电阻率测井通过下井装置(电极系)供电形成的人工电场来探测岩层电阻率等电性特征, 所得到的视电阻率曲线主要反映的是地层岩性的视电阻率值与围岩背景值的差异, 为一相对值. 若岩石破碎、裂隙发育则通常会出现低阻异常, 比如断裂带内的破碎带表现为视电阻率值的低阻异常.

1.2.3 自然电位测井

地层内的自然电位来源于井孔内流体、原状地层内孔隙流体的扩散和吸附等电化作用

用所产生的电动势. 而静自然电位主要决定自然电位的幅值和特性, 其大小主要受地层岩性、地层水、泥浆成分、电阻率等的影响. 在自然电位测井时一般将测量电极放置地面, 移动电极用电缆放在井下, 提升移动电极沿井轴测量自然电位随深度的变化. 通常根据自然电位曲线中同一岩层中局部的自然电位高低来确定异常, 并按照异常进一步划分岩性等(高楚桥, 谭延栋, 1997).

1.2.4 自然伽马测井

自然伽马测井是原子核物理在测井中的应用, 其原理是利用天然放射性元素发生伽马衰变过程中会释放出伽马射线, 把释放出的伽马射线记录下来, 就能推断出原状地层的天然放射特性. 对于砂泥岩剖面而言, 岩性由粗变细, 泥质含量由小变大, 电阻率和自然电位异常幅度由大变小, 自然伽马异常值由小变大.

2 测井曲线综合分析与解释

2.1 测井数据采集

根据“跨安宁河断裂带井孔地球物理综合物性研究”课题的总体目标, 在安宁河断裂带冕宁—西昌段跨断层实施的单孔孔深超过 110 m, ZK01 和 ZK02 两个钻孔的垂直度误差控制在 1% 以内, 钻孔具体位置如图 1 所示, 两钻孔间距为 67 m. 在钻孔完钻后的 24 小时内, 在裸孔 ZK01 和 ZK02 内, 分别开展声波、自然电位、自然伽马、电阻率等 4 项综合地球物理测井.

数据采集所使用的测井仪器为国产 JGS-1B 型数字测井仪. 在测试前均对仪器进行了标定和调试, 并在厂家标准刻度井内完成各项定量标定, 按规范要求定期返厂标定刻度. 野外工作时严格按照综合地球物理测井规范执行, 仪器性能良好, 工作正常稳定.

根据研究需要和钻孔内地球物理条件, 选择的地球物理测井方法有自然电位、自然伽马、视电阻率、声波速度等 4 项. 测井方法及技术参数见表 1.

表 1 测井方法及其技术参数
Table 1 Logging methods and their technical parameters

方法	物性参数	目的	技术参数
声测井	v_p	测定岩层的纵波速度, 划分断层破碎带范围, 确定断层附近岩层性质	$L_s=0.5\text{ m}$ $L_v=0.2\text{ m}$
核测井	自然伽马	划分钻孔地层剖面, 了解孔内放射性物质的赋存情况	采样间隔为 0.1 m 提升速度:
电测井	三侧向电阻率	岩层定性、定厚, 划分钻孔剖面, 确定破碎带	$A_p0.01A_o0.01A_p$ $A_o=0.05\text{ m}$ $v\leq 6.0\text{ m/min}$
	自然电位	了解自然电场分布, 划分地层剖面	$M\infty N$

注: v_p 为纵波速度; L_s 为声波探管源距, 即激发晶体到第一接收晶体的距离; L_v 为声波探管间距, 即两个接收晶体之间的距离; A_p 为三侧向电阻率探管屏蔽电极; A_o 为三侧向电阻率探管中心电极; M 为地面电极, N 为井中电极.

本文所得的各种记录清晰完整, 资料齐全; 各种测试参数曲线记录无漏记、畸变、干扰; 深度误差小于 5%; 采样间隔和测量速度均符合技术要求; 各项测试参数均按照技术要求进行检查测试, 检查测试位置一般选择在曲线幅值变化明显的层段; 原始观测曲线与检查测试曲线形态基本一致, 重合性较好; 各种精度要求均满足研究需要.

2.2 资料分析与解释

测井原始记录数据以测井数据通用的 LAS 格式进行存储, 测井资料的预处理是测井解释与数据处理的一项重要的基础性工作, 主要包括曲线深度校正、曲线平滑、异常值去除等. 利用 JGS-IB 智能测井系统提供的软件平台, 综合各测井曲线在不同地层中所表现出的幅值大小、曲线变化形态、物性特征和数值变化范围, 并结合钻孔资料来划分地层岩性、判断断层破碎带范围、确定断裂带内的介质岩性和物性等参数, 最后进行数值计算和成果图绘制.

2.2.1 钻孔 ZK01 综合测井曲线和成果解释

已有的地质资料和浅层地震勘探资料(闻学泽等, 2008; 胡刚等, 2013)表明, 钻孔 ZK01 位于安宁河断裂带下盘, 钻孔正好与断层破碎带斜交. 对钻孔 ZK01 实施声波、三侧向电阻率、自然伽马和自然电位测井, 所获得的测井曲线和测井曲线综合解释成果如图 2 所示. 可以看出, 声波速度曲线与视电阻率曲线幅值大小和形态基本吻合; 在声波速度和视电阻率曲线的异常层段, 自然电位和自然伽马曲线也表现出相应的异常. 前 20 m 由于钻孔套管屏蔽的影响而使得测得的三侧向电阻率数据为无效值. 得到的主要结果如下:

1) 在 32.80 m 处, 钻孔取芯资料显示该深度界面为破碎的粗砂与粉质黏土的分界面. 从表 2 的钻孔 ZK01 地质剖面综合测井解释成果中可以看出, 该层段的三侧向电阻率为

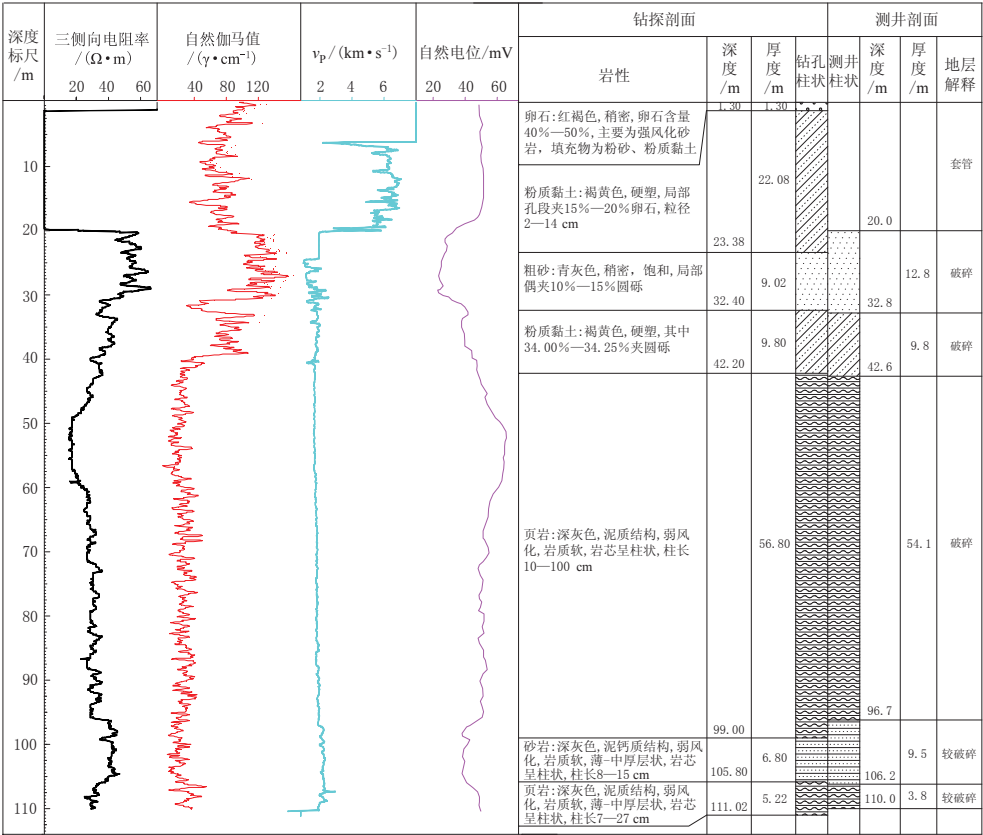


图 2 钻孔 ZK01 测井曲线综合解释成果图

Fig. 2 Comprehensive interpretation results of borehole ZK01 logging curves

表 2 钻孔 ZK01 综合测井解释成果表

Table 2 Integrated logging interpretation results of the borehole ZK01

地层 代号	底板 井深 /m	层厚 /m	岩性	物性参数						$v_p/(km \cdot s^{-1})$				围岩 分级	异常 解释
				视电阻率/ $(\Omega \cdot m)$			自然伽马值/ $(\gamma \cdot cm^{-1})$			极小值	极大值	一般值	采用值		
				极小值	极大值	一般值	极小值	极大值	一般值						
1	20.0		套管												水位
2	32.8	12.8	粗砂	33	66	51	35.3	155.4	122.3	0.98	2.53	1.86	1.58	Ⅳ	破碎
3	42.6	9.8	粉质黏土	28	44	31	20.2	116.8	77.2	1.11	2.23	1.82	1.55	Ⅳ	破碎
4	96.7	54.1	页岩	18	37	29	1.6	45.5	24.4	1.74	1.96	1.85	1.57	Ⅳ	破碎
5	106.2	9.5	砂岩	36	47	41	3.1	36.9	18.7	1.93	2.67	2.53	2.15	Ⅳ	较破碎
6	110.0	3.8	页岩	23	38	29	2.7	47.9	31.6	1.87	3.02	2.61	2.21	Ⅳ	较破碎

表 3 钻孔 ZK02 综合测井解释成果表

Table 3 Integrated logging interpretation results of the borehole ZK02

地层 代号	底板 井深 /m	层厚 /m	岩性	物性参数						$v_p/(km \cdot s^{-1})$				围岩 分级	异常 解释
				视电阻率/ $(\Omega \cdot m)$			自然伽马值/ $(\gamma \cdot cm^{-1})$			极小值	极大值	一般值	采用值		
				极小值	极大值	一般值	极小值	极大值	一般值						
1	11.0		水位												水位
2	20.1	9.1	粉质黏土	1	400	178	77.1	153.4	149.3						
3	30.0	9.9	卵石土	103	264	183	107.2	166.8	137.2						
4	51.1	21.1	粉砂	105	187	143	67.6	105.5	81.4	1.71	3.16	2.05	1.74	Ⅳ	破碎
5	63.8	12.7	粉质黏土	86	147	128	66.1	96.9	78.7	1.03	3.87	1.93	1.64	Ⅳ	破碎
6	74.9	11.1	粉土	92	400	223	72.3	167.7	92.2	1.11	5.85	1.94	1.65	Ⅳ	破碎
7	77.3	2.4	漂石土	102	153	126	89.9	138.1	100.5	1.13	5.25	2.11	1.79	Ⅳ	破碎
8	87.4	10.1	泥岩	97	143	112	63.1	94.2	72.8	1.84	2.16	1.95	1.65	Ⅳ	破碎
9	88.6	1.2	砂岩	106	197	168	92.1	156.2	118.4	1.89	2.07	1.93	1.64	Ⅳ	破碎
10	111.0	22.4	粉砂质泥岩	95	241	158	61.5	299.4	94.1	1.73	2.16	1.96	1.66	Ⅳ	破碎

51 Ω·m 的正异常, 该分界面即为安宁河断裂带的断层面与钻孔 ZK01 交接的界面, 表明测井曲线与钻孔地质资料相吻合. 所测得的自然伽马值为 122.3 γ/cm 的正异常, 声波平均速度为 1.58 km/s, 表明钻孔所钻遇的断层破碎, 其结果与钻孔资料基本吻合.

2) 依据表 2 钻孔 ZK01 的地质剖面综合测井解释成果, 将 ZK01 测井剖面分为 6 层, 钻孔内最大自然伽马值为 122.3 γ/cm 的异常背景值. 3 号层位以下地层的自然伽马值依次下降, 声波速度随着地层压实程度的增加而逐渐增大, 2 号和 3 号层位正好位于断层破碎带. 测井曲线和综合解释成果很好地印证了断层破碎带位置和破碎带的物性参数分布.

3) 在 96.7—106.2 m 深度处, 岩性逐渐由较为软弱的页岩转变为砂岩, 地层胶结程度也相应地由破碎转变为较破碎的状态. 视电阻率出现 41 Ω·m 的高异常值, 砂岩岩性表现为自然伽马的负异常. 但声波速度随着岩层胶结和压实程度的增加而增大. 测井曲线所反映的物性参数变化与钻孔岩性十分吻合.

2.2.2 钻孔 ZK02 综合测井曲线和成果解释

钻孔 ZK02 位于安宁河断裂带的上盘, 钻孔所钻遇的地层没有与安宁河断裂带相交. 通过对钻孔 ZK02 实施声波速度、视电阻率、自然伽马和自然电位测井, 所获得的综合测井曲线如图 3 所示. 依据表 3 的钻孔 ZK02 地质剖面综合测井解释成果, 将测井剖面分为 10 层. 孔内最大的自然伽马值为 149.3 γ/cm 的高异常值, 从图 3 所示的测井曲线中可以看出, 声速曲线与视电阻率曲线的幅值和形态基本吻合, 声波和电阻率曲线出现异常的部

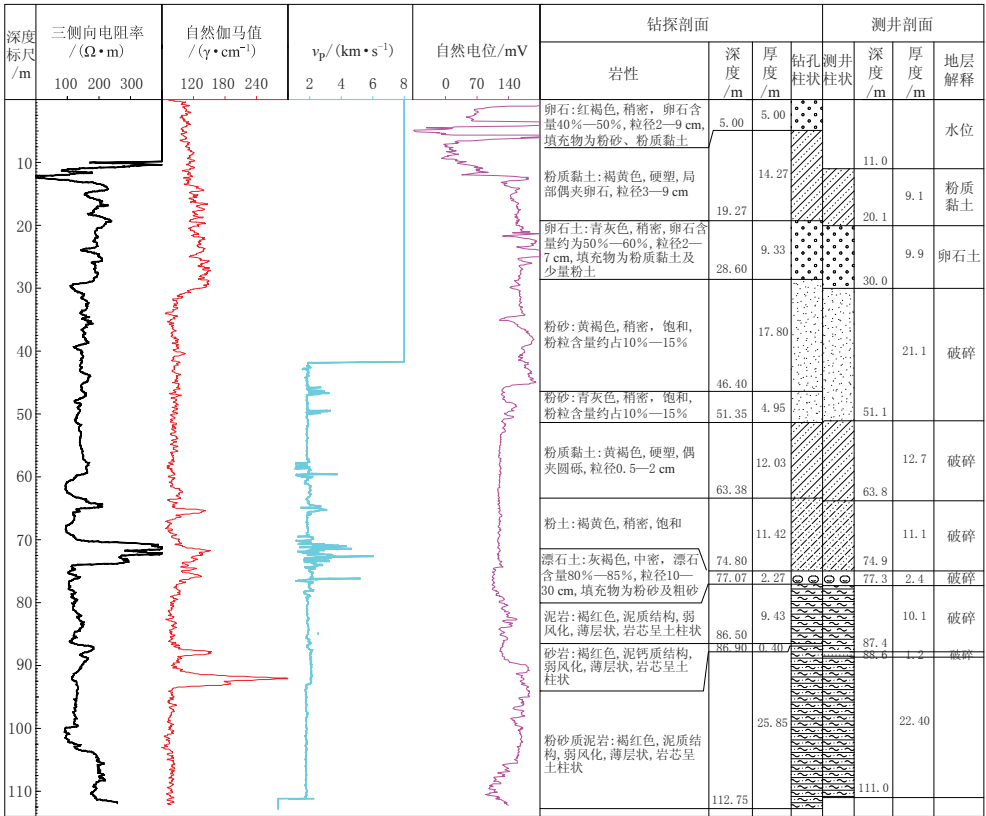


图 3 钻孔 ZK02 测井曲线综合解释成果图

Fig. 3 Comprehensive interpretation results of borehole ZK02 loggings curves

位,自然电位和自然伽马曲线也表现出相应的异常.得到的主要结果如下:

1) 随着深度增加,钻孔 ZK02 依据测井曲线将其岩性分别解释为粉质黏土、卵石层、粉砂、粉质黏土、粉土、漂石土、泥岩、砂岩和粉砂质泥岩.从测井曲线形态和分段上可以推断该钻孔所处上部地层应该为洪积和冲积所形成的岩性交替变化的沉积旋回,视电阻率值上高下低,而且某些层段出现异常值.自然伽马值的时高时低也体现了地层岩性的交替变化.声波测井曲线在 40 m 以上深度由于受到井孔无水的困扰而未测得实际数据,40 m 以下层段的声波速度在 1.60—1.80 km/s 之间,表明地层岩性较为破碎,即使到了 100 m 深度地层依然比较破碎,这与钻孔取芯的结果是一致的.

2) 在 30—51.1 m 层段,电阻率和自然伽马曲线均出现了一个小的负异常,此段岩性从卵石土变为粉砂,视电阻率值下降了 $40 \Omega \cdot \text{m}$,自然伽马值下降了 $55.8 \text{ } \gamma/\text{cm}$,所测得的岩性和物性参数很好地表征了钻孔所遇地层的物性特征,与钻孔资料结果具有很好的一致性.

3 讨论与结论

本次跨安宁河断裂带的综合地球物理测井共完成两孔 221 m 进尺的声波速度、自然伽马、自然电位、三侧向电阻率等 4 类测井资料的采集,经室内资料处理后获得了跨安宁河断裂带东、西两盘各个钻孔的 4 条测井曲线.经资料解释可得,钻孔 ZK01 测井剖面共分 6 层,钻孔 ZK02 测井剖面共分 10 层,钻孔 ZK01 围岩变化表现为由破碎到较为破碎状态,钻孔 ZK02 围岩基本表现为破碎状态,测井分层与钻探地质分层的岩性描述和层厚等结果基本吻合.本文主要结论如下:

1) 跨安宁河断裂带两个钻孔的综合地球物理测井解释成果图客观真实地反映了安宁河断裂带东、西盘介质的岩性和物性特征,同时证实了钻孔 ZK01 在 32.6 m 处与断层面相交,这与钻孔资料相吻合.所测得的断层破碎带内的物性参数为研究安宁河断裂带的物质组成、介质物性、断层结构和活动状态提供了基础资料.

2) 在以声波速度和视电阻率资料为主的基础上,结合自然电位和自然伽马测井曲线资料,本文所得结果真实客观地揭示了安宁河断裂带东、西两盘地层的纵波速度变化和视电阻率值等物性变化特征,这也是钻孔取芯所无法取代的.

3) 综合地球物理测井方法不仅能够确定断裂带附近地层的完整性、划分地层、确定岩层的物性和岩性,还可以在取得纵、横波速度之后进行泊松比、弹性模量、体积模量等岩石物性参数的计算.在已知密度参数的基础上,还可以进一步研究断裂带的力学性质.

跨安宁河断裂带的井孔综合地球物理测井成果初步反映了该断裂带东、西两盘的介质物性特征,为揭示该断裂带潜在的强震危险性和孕震过程提供了基础资料,但由于受钻孔深度的限制,本文研究结果所反映的仅为安宁河断裂带浅部断点处的介质物性特征;限于钻孔深度和单次观测的局限,并不能及时准确地捕捉到大震孕育过程中所引起的断裂带内外介质物性的变化.若能通过深孔综合地球物理测井对断裂带内外介质的物性参数进行不定期长时段的监测,则可为断裂带活动状态的监测和大震孕育机理研究提供基础参考依据.

总之,综合地球物理测井技术为研究断裂带物质组成、介质物性、断层结构和活动状态提供了基础资料,有望成为监测活动断裂带附近介质物性参数动态变化的一种新手段.

参 考 文 献

- 程建武, 郭桂红, 岳志军. 2010. 安宁河断裂带晚第四纪活动的基本特征及强震危险性分析[J]. 地震研究, **33**(3): 265–272.
- Cheng J W, Guo G H, Yue Z J. 2010. Basic characteristics and earthquake risk analysis of the Anning river fault zone in the west of Sichuan Province[J]. *Journal of Seismological Research*, **33**(3): 265–272 (in Chinese).
- 高楚桥, 谭廷栋. 1997. 常见测井响应参数的理论计算[J]. 石油地球物理勘探, **32**(6): 818–825.
- Gao C Q, Tan T D. 1997. Theoretical computation of ordinary parameters of logging responses[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, **32**(6): 818–825 (in Chinese).
- 胡刚, 何正勤, 叶太兰, 李娜. 2013. 安宁河断裂带井孔地球物理综合物性研究[C]//中国地球物理 2013: 第二十一专题论文集. 北京: 中国地球物理学会: 8–9.
- Hu G, He Z Q, Ye T L, Li N. 2013. Research on borehole geophysical physical properties for Anninghe fault[C]//*The Chinese Geophysics 2013: XXI Symposium*. Beijing: Chinese Geophysical Society: 8–9 (in Chinese).
- 潘和平, 牛一雄, 王文先, 朱留芳, 许东辉, 李双林. 2006. 测井和地震联合解释 CCSD 先导孔反射体[J]. 地球科学, **31**(4): 569–574.
- Pan H P, Niu Y X, Wang W X, Zhu L F, Xu D H, Li S L. 2006. Joint interpretation of reflectors via well logging and seismic data in the pilot hole of CCSD[J]. *Earth Science*, **31**(4): 569–574 (in Chinese).
- 冉勇康, 陈立春, 程建武, 宫会玲. 2008. 安宁河断裂冕宁以北晚第四纪地表变形与强震破裂行为[J]. 中国科学: D 辑, **38**(5): 543–554.
- Ran Y K, Chen L C, Cheng J W, Gong H L. 2008. Late Quaternary surface deformation and rupture behavior of strong earthquake on the segment north of Mianning of the Anninghe fault[J]. *Science in China: Series D*, **51**(9): 1224–1237.
- 王虎. 2012. 川西安宁河—则木河断裂带上大地震复发及其相关性研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所: 15–18.
- Wang H. 2012. *Recurrence Behavior and Interactions of Large Earthquakes on the Anninghe Fault and Zemuhe Fault Along the Eastern Margin of the Sichuan-Yunnan Faulted Block*[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 15–18 (in Chinese).
- 闻学泽, 范军, 易桂喜, 邓一唯, 龙锋. 2008. 川西安宁河断裂上的地震空区[J]. 中国科学: D 辑, **38**(7): 797–807.
- Wen X Z, Fan J, Yi G X, Deng Y W, Long F. 2008. A seismic gap on the Anninghe fault in western Sichuan, China[J]. *Science in China: Series D*, **51**(10): 1375–1387.
- 许志琴, 李海兵, 吴忠良. 2008. 汶川地震和科学钻探[J]. 地质学报, **82**(12): 1613–1622.
- Xu Z Q, Li H B, Wu Z L. 2008. Wenchuan earthquake and scientific drilling[J]. *Acta Geologica Sinica*, **82**(12): 1613–1622 (in Chinese).
- 杨文采, 杨午阳, 程振炎. 2006. 中国大陆科学钻探孔区的地震波速模型[J]. 地球物理学报, **49**(2): 477–489.
- Yang W C, Yang W Y, Cheng Z Y. 2006. Seismic velocity model of the Chinese continental scientific drilling site[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **49**(2): 477–489 (in Chinese).
- 易桂喜, 闻学泽, 范军, 王思维. 2004. 由地震活动参数分析安宁河—则木河断裂带的现今活动习性 & 地震危险性[J]. 地震学报, **26**(3): 294–303.
- Yi G X, Wen X Z, Fan J, Wang S W. 2004. Assessing current faulting behaviors and seismic risk of the Anninghe-Zemuhe fault zone from seismicity parameters[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **26**(3): 294–303 (in Chinese).
- 易桂喜, 闻学泽, 苏有锦. 2008. 川滇活动地块东边界强震危险性研究[J]. 地球物理学报, **51**(6): 1719–1725.
- Yi G X, Wen X Z, Su Y J. 2008. Study on the potential strong earthquake risk for the eastern boundary of the Sichuan Yunnan active faulted block, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **51**(6): 1719–1725 (in Chinese).
- 张庚骥. 1996. 电法测井[M]. 北京: 石油大学出版社: 1–191.
- Zhang G J. 1996. *Electric Logging*[M]. Beijing: Petroleum University Press: 1–191 (in Chinese).
- Wu H Y, Ma K F, Zoback M, Boness N, Ito H, Hung J H, Hickman S. 2007. Stress orientations of Taiwan Chelungpu-Fault Drilling Project (TCDP) hole-A as observed from geophysical logs[J]. *Geophys Res Lett*, **34**(1): L01303.