于都-赣县矿集区科学钻探NLSD-1孔超声波成像测井响应特征及其深部找矿意义

邹长春[1)],肖昆[1)],周新鹏[2)],李建国[2)],赵斌[2)],项彪[1)],孙少伟[2)],汪振斌[2)],黄波[2)],尹道谨[2)]

1) 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室,中国地质大学,北京,100083;

2) 山西省地球物理化学勘查院,山西运城,044004

内容提要:NLSD-1孔是南岭地区第一口科学钻探孔,也是目前我国金属矿区最深的科学钻探工程之一,终孔深度达到2967.83 m。为了精细刻画矿集区深部结构框架、揭示深部矿化带分布特征和建立深部找矿地球物理解释标尺,提高对深部成矿规律的认识,该孔在钻进过程中实施了连续取芯,并且进行了多种地球物理测井和井中物探方法的测量。超声波成像测井是一种先进的测井技术,包含丰富的原位地质特征信息,在油气勘探中常用于井旁地质构造和地应力分析。本文将超声波成像测井应用于金属矿区科学钻探中,对NLSD-1孔采集到的超声波成像测井资料进行了研究,认为成像测井图像能够精细刻画孔壁裂缝、破碎带等地质特征,同样适合于金属矿勘查中的井旁构造解释;主要矿化层(409~429 m、430~446 m、621~641 m、655~666 m、679~691 m、696~706 m、744~759 m、776~788 m、907~921 m、1031~1042 m、1081~1090 m、1430~1439 m、1440~1448 m等)均发育裂缝或破碎带,表明测井结果对矿化层埋深具有指示作用,并且揭示钻孔附近矿化层具有西浅东深的空间展布特征;根据裂缝产状的垂向变化,推断F_1断层过NLSD-1孔深度范围为1375.32~1380.79 m;此外,裂缝与孔斜关系的研究对钻孔纠斜具有指导意义。研究结果表明超声波成像测井在深部找矿中能够发挥重要作用。

关键词:于都-赣县矿集区;科学钻探;超声波成像测井;裂缝

南岭地区横跨广西、湖南、广东、江西和福建五省,是我国重要的有色和稀有金属矿产富集区,同时也是世界上独具特色的与大陆花岗岩有关成矿作用最为强烈的地区之一(陈毓川等,1989;王登红等,2007;王登红等,2011)。于都-赣县矿集区位于江西省赣州市中部,地处南岭成矿带与武夷山成矿带的交汇部位,贵多金属矿产资源甚为丰富,尤其以中高温系列的钨多金属矿床与中低温系列的金银铜铅锌矿床共生为特色,受到地质学者的广泛关注,取得了一系列重要的地质找矿研究成果(陈毓川等,1990;全淦,1995;张家菁,1997;高贵荣等,1998;叶景平等,1998;施明兴等,2006;许建祥等,2008;赵正等,2012)。随着地质工作程度的提高,如何在此类矿集区实现找矿新突破是一个亟待解决的课题(王登红等,2013)。成矿理论认为成矿有利空间可深达5~10 km(翟裕生等,2004),深部找矿(第二找矿空间:500~2000 m)具有巨大的潜力、被视作重要方向之一(刘宝善,2010)。然而,深部矿相对于浅部矿具有埋深大、矿化信息弱和综合研究程度低等特点,勘查难度大(翟裕生等,2004;曹志新等,2009),但近年来长江中下游成矿带深部立体探测找矿和国外深部找矿实践取得了显著成效,为进一步开展深部找矿提供了示范和有力支持(Milkereit et al.,1992;Goleby et al.,2004;翟裕生等,2004;吕庆田等,2007a,2007b;Malehmir et al.,2009;董树文等,2011;刘振东等,2012;汤井田等,2012;邓震等,2012;祁光等,2012;Dong et al.,2013;Jiang et al.,2013;Lü et al.,2013;Shi et al.,2013;Tang et al.,2013)。

于都-赣县矿集区科学钻探示范实验区是"深部探测技术与实验研究"专项在全国设置的七个大陆科学钻探示范实验区之一,区内已实施了两口科学

注:本文为国家"深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe)"第三项目"深部矿产资源立体探测技术及实验研究"第三课题"于都-赣县矿集区立体探测技术与深部成矿预测示范"(编号SinoProbe-03-03)和中央高校基本科研业务费(编号2652012096,2652011189)联合资助的成果。

收稿日期:2014-02-15;改回日期:2014-03-30;责任编辑:周健。

作者简介:邹长春,男,1969年生。教授,博士生导师,地球探测与信息技术专业,主要从事地球物理测井及岩石物理方面的教学与科研工作。Email:zoucc@cugb.edu.cn。

钻探深孔(NLSD-1、NLSD-2)(董树文等,2011;吕庆田等,2011a,2011b;杨经绥等,2011;陈毓川等,2013)。NLSD-1 孔是南岭地区第一口科学钻探深孔,也是目前我国金属矿区最深的科学钻探工程之一,位于于都县银坑矿田的牛形坝矿区,于 2011 年 6 月开钻,目前已顺利完钻,终孔深度达到 2967.83 m。该孔在钻进过程中实施了连续取芯(岩芯采取率达到 97.8%),还进行了包括超声波成像测井在内的多种地球物理测井和井中物探方法的测量,这些资料的取得,对于精细刻画矿集区深部结构框架、揭示深部矿化带分布特征、建立深部找矿地球物理解释"标尺"以及提高对深部成矿规律的认识具有重要作用。

超声波成像测井是一种先进的测井技术,能够获取反映原位地质特征的井壁图像,使测井资料的应用变得更加直观,测量结果精确,可以有效地识别地层裂缝和破碎带、评价裂缝的类型和产状、分析地层沉积特征和研究地应力状态等,在油气勘探和科学钻探等领域得到广泛应用(尤征等,2000;牛一雄等,2004;朱留方等,2005;邹长春等,2012;聂昕等,2012;Nie et al., 2013)。受采集成本和测量环境的制约,以及认识和重视程度等因素的影响,成像测井在金属矿找矿研究中应用仅有少量报道(南亲江,2008;Blake,2010)。

NLSD-1 孔在 91.44～1535.54 m 深度段采集到宝贵的超声波成像测井资料,笔者对测井资料进行了精细处理,分析了测井图像上的主要地质特征(包括裂缝和破碎带),定量提取了裂缝参数,总结了裂缝随钻孔深度变化的规律,探讨了测井结果对多金属矿化的指示意义,试图为今后超声波成像测井在金属矿区科学钻探中的应用研究提供参考。

1　地质背景

银坑矿田位于华南板块罗霄块体东缘,银坑－青塘北东向上古生界拗褶带的南段,东邻武夷块体,两块体间以宁都－定南韧性剪切冲断带为拼接带;受东侧武夷块体的作用,形成了以北北东－北东向为主的区域构造格局(张家菁,1997;叶景平等,1998)。出露地层包括新元古界青白口系、震旦系、晚古生界泥盆系、石炭系、二叠系、中生界侏罗系及新生界第四系(施明兴等,2006)。已经发现的主要矿产种类有金矿、银铅矿、银金矿和铅锌矿等,矿化带受破碎带控制,往往位于主干断裂旁侧、多组裂隙交汇处及褶皱轴部横张裂隙发育部位(高荣贵等,1998;李建国等,2012)。

NLSD-1 孔选址在矿田内牛形坝－柳木坑的矿化中心与柳木坑隐伏岩体顶部的有利位置(陈毓川等,2013),如图 1 所示。钻遇地层岩性主要包括板岩、变质沉凝灰岩、变质沉凝灰质细砂岩、变质凝灰质细砂岩、花岗斑岩、凝灰质板岩、花岗闪长斑岩、闪长玢岩、细粒石英砂岩、粉砂岩和细砂岩等(肖昆等,2013);由钻孔岩芯编录资料知该孔的金属矿化类型主要有:黄铁矿化、铅锌矿化、黄铜矿化等,共识别出 97 个金属矿化层,单层厚度最厚达 20 m。

2　测井数据采集和处理

2.1　测井仪器的选择

NLSD-1 孔是围绕深部矿产资源立体探测研究而实施的一口深孔,在钻孔内最大限度地采集各种地球物理测井资料(包括成像测井在内)具有重要性。NLSD-1 孔所采用的钻头直径较小,因而测井不能采用油气勘探开发中较大直径的测井仪器,而只能采用小井眼测井系统。目前国外研制的小井眼测井系统多具有超声波成像测井功能,本次工作采用美国 Mount Sopris 仪器公司的 Matrix Logger 小口径数字测井系统进行超声波成像测井。该系统由主机(Matrix)、测井绞车和下井仪器三部分组成,下井仪器直径 40 mm、耐压 13.78 MPa、耐温 70℃,品质优良、性能稳定,满足实际测井要求。

2.2　测井数据采集

NLSD-1 孔进行了两次成像测井作业,第一次测量时间为 2012 年 3 月 10 日至 11 日,测量井段为 91.44～1020.16 m;第二次测量时间为 2012 年 7 月 13 日至 19 日,测量井段为 999.21～1535.54 m。采样间距为 0.002916 m,采样速度 2 m/min,重复测量井段达到 10%,重复测量结果显示测井资料质量良好。由于金属矿钻孔直径较小,成像测井探头的接收信号强,因此采集到的测井资料质量较好;当然,小井眼也增加下井测井仪器遇阻遇卡的风险。受小井眼超声波成像测井仪器最大测量深度(一般小于 2000 m)的限制和钻探因素的影响,1535.54 m 深度以下未进行超声波成像测井。在成像测井作业的同时,还采集了其他测井数据。

2.3　测井数据处理

超声波成像测井资料的处理包括预处理、图像生成和交互处理解释等内容。针对 NLSD-1 孔,采用卢森堡 Advanced Logic Technology 公司的 WellCAD 软件进行测井数据处理。WellCAD 软件

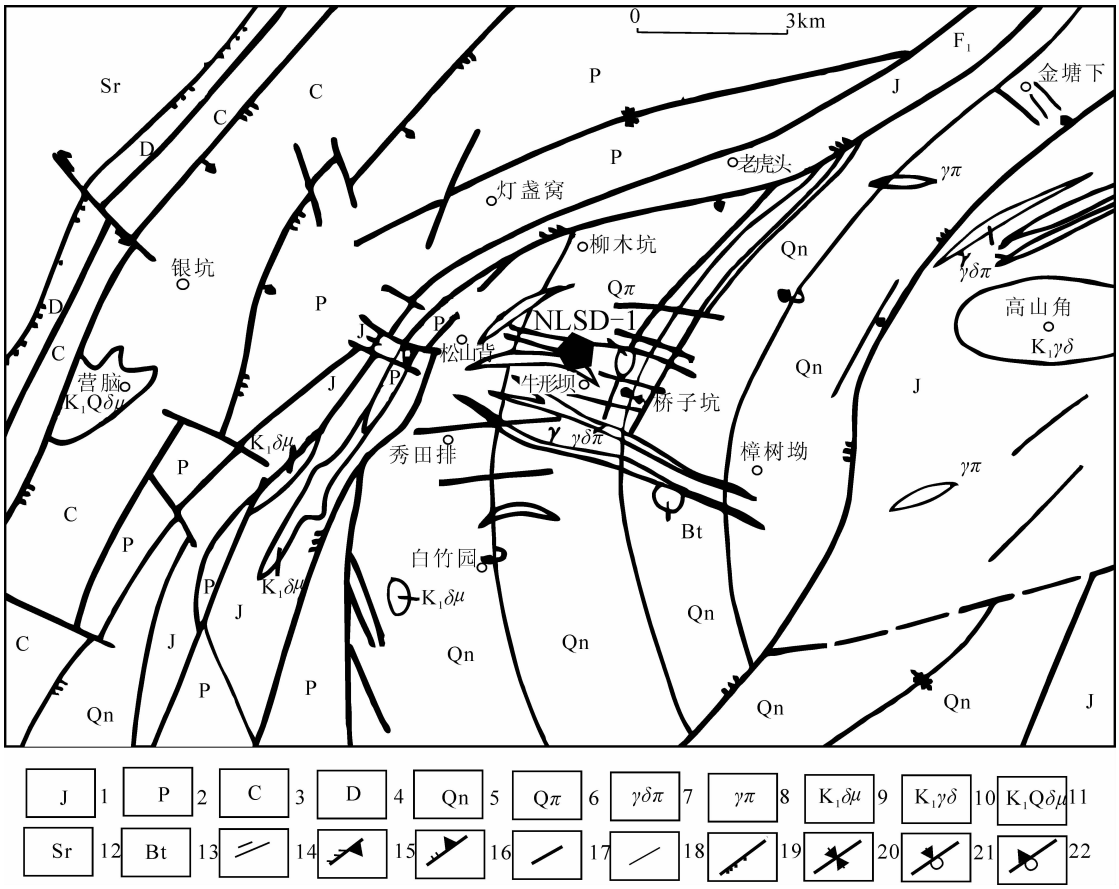


图 1 NLSD-1 孔位置示意及区域地质简图(据高贵荣等,2000)

Fig. 1 Regional geological map and the location of hole NLSD-1 (modified from Gao Guirong et al. ,2000)

1—侏罗系; 2—二叠系; 3—石炭系; 4—泥盆系; 5—青白口系; 6—石英斑岩; 7—花岗闪长斑岩; 8—花岗斑岩;9—早白垩世闪长玢岩; 10—早白垩世花岗闪长岩; 11—早白垩世石英闪长玢岩; 12—志留纪黑云母花岗岩;13—爆破角砾岩; 14—矿化标志带;15—逆断层; 16—正断层; 17—性质不明断层; 18—地质界线; 19—沉积不整合界线; 20—向斜轴; 21—倒转向斜;22—倒转背斜

1—Jurassic; 2—Permian; 3—Carboniferous; 4—Devonian; 5—Qingbaikou System; 6—quartze porphyry; 7—granodiorite-porphyry; 8—granite-porphyry; 9—Early Cretaceous diorite porphyrite; 10—Early Cretaceous granodiorite; 11—Early Cretaceous quartz diorite porphyrite; 12—Silurian biotite granite;13—dynamite breccia; 14—mineralization belt;15—reverse fault; 16—normal fault; 17—infered fault; 18—geologic boundary; 19—unconformity; 20—synclinal; 21—reverse synclinal;22—reverse anticline

的 Image Log 处理子模块可实现成像测井数据滤波、插值、归一化、统计、定向和镜像等一系列预处理功能,针对超声波成像测井资料还可对仪器偏心进行校正和生成井径图像;Structure Log 处理子模块可交互拾取面状构造(如层理、面理、层界面和裂缝等)产状,估算裂缝张开度和破碎带厚度,并可对产状数据进行分段统计。

3 主要结果

超声波成像测井图像包括振幅图像和走时图像两种,二者都能反映钻孔壁的细节地质特征,相比较而言,振幅图像包含的信息更为丰富,因此振幅图像也更常用。地层致密或者硬度较大,钻孔壁与孔内流体界面的声阻抗差也较大,声波反射信号相对较强,测井图像上呈浅色或亮色特征;若钻孔壁存在张开裂缝或破碎严重,容易形成漫反射,也会使回到探头的超声波反射信号相对较弱,则呈黑色或暗色特征。

3.1 裂缝的测井响应特征

NLSD-1 孔超声波成像测井图像上容易识别出钻孔壁原位的裂缝,多数裂缝表现为暗色条带特征,条带宽度变化大且随意中断。据此,采用 Structure Log 处理子模块从 91.44～1535.54 m 深度范围的测井图像上共提取裂缝 1965 条。

采用裂缝产状分类方法,NLSD-1 孔可划分出四类裂缝,即:水平缝(倾角小于 15°)、低角度斜交缝(倾角在 15°～45°之间)、高角度斜交缝(倾角在 45°～75°之间)和垂直缝(倾角大于 75°),如图 2 所

示。根据上述分类方法,NLSD-1 孔低角度和高角度斜交缝常见,而垂直缝和水平缝较少。

在研究的深度范围内,裂缝随深度变化的特征主要表现以下几方面:① 裂缝密度平均值为 13.6 条/10m,最大裂缝密度 46 条/10m,800 m 之上地层要比其下地层裂缝更发育(图 3a);② 裂缝倾角在 800 m 之上主要分布在 60°～90°范围内,800～1375 m 逐渐减小,主要分布在 55°～75°范围内,1375m 之下变化较大(图 3b);③ 裂缝倾向总体上以东倾为主,1375 m 之下以南东向为主(图 3c)。

3.2　破碎带的测井响应特征

在超声波成像测井图像上,破碎带多表现为较宽的暗色条带特征,地层破碎严重时则呈杂乱状。在常规测井图像上,由于受破碎带影响,破碎带多显示为井径扩径,视电阻率、密度、声波速度相对降低。典型破碎带的测井响应特征如图 4 所示,根据岩芯

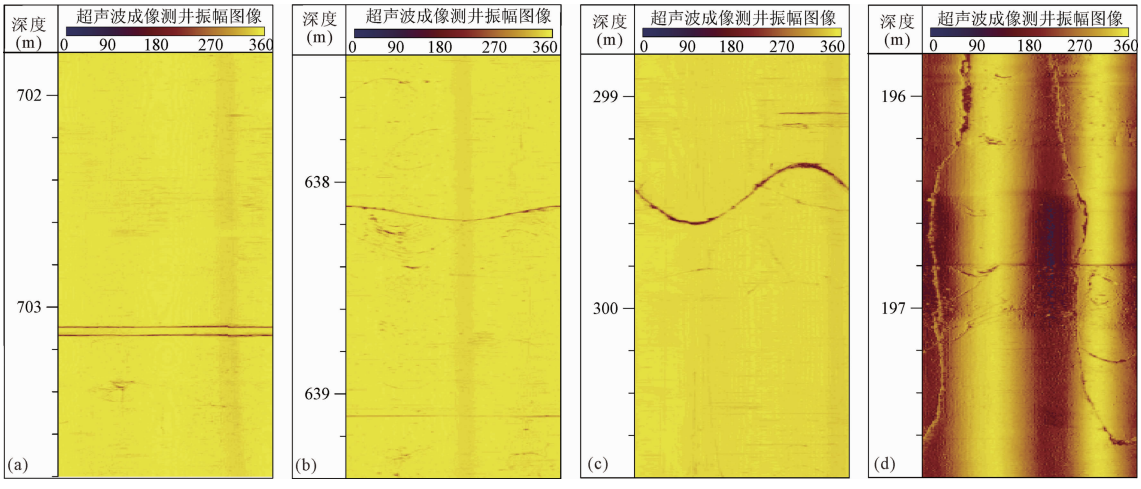


图 2　NLSD-1 孔超声波成像测井典型裂缝类型

Fig. 2　Fracture characteristics of ultrasonic images in hole NLSD-1

(a)—水平缝;(b)—低角度斜交缝;(c)—高角度斜交缝;(d)—垂直缝

(a)—Horizontal fractures; (b)—low-angle fractures; (c)—high-angle fractures; (d)—vertical fractures

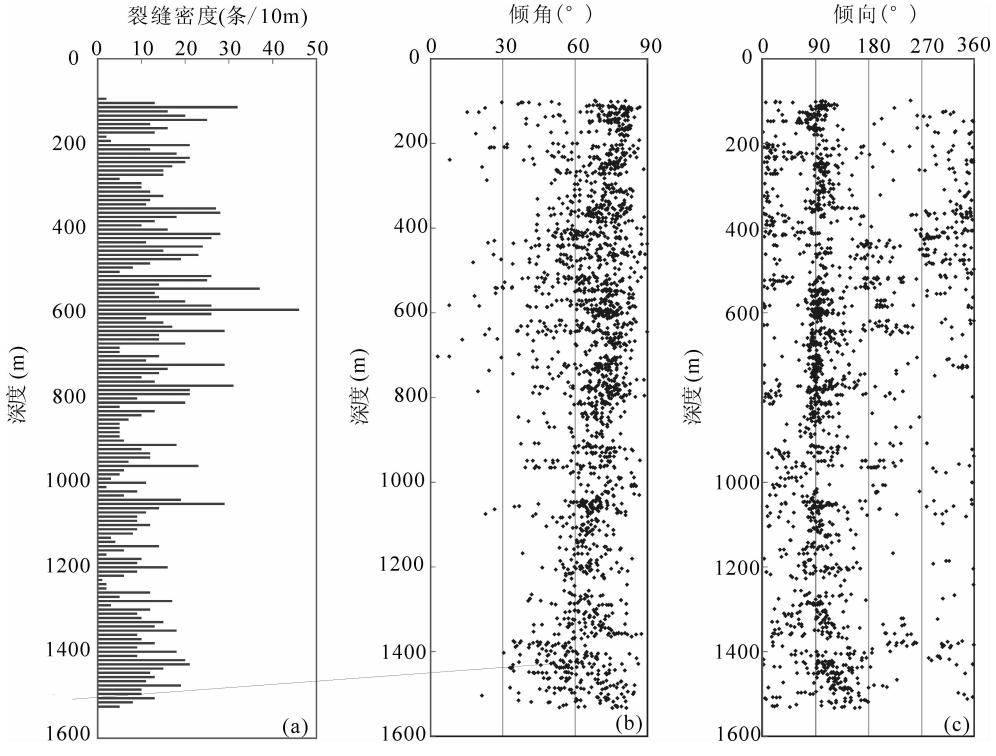


图 3　NLSD-1 孔裂缝密度(a)、倾角(b)及倾向(c)随深度的变化特征

Fig. 3　Statistics of density (a), dip (b) and inclination (c) of fractures in hole NLSD-1

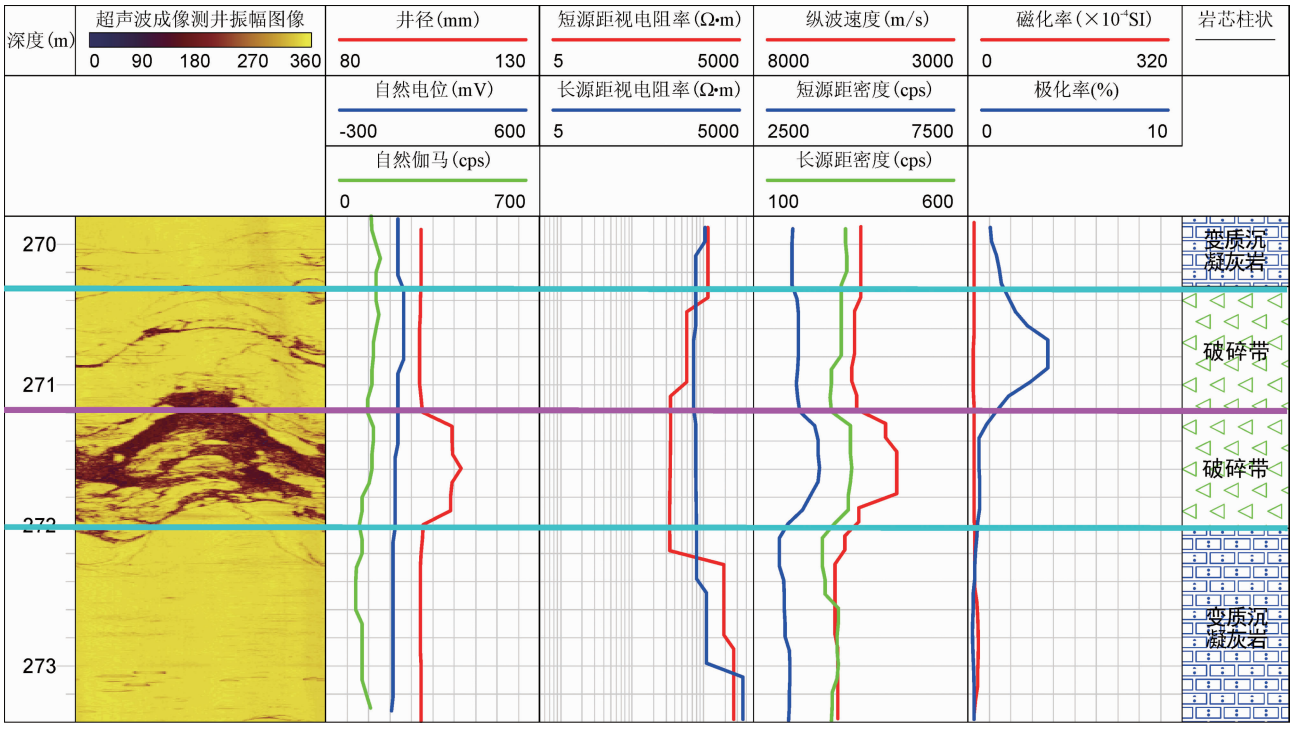


图 4 NLSD-1 孔典型矿化蚀变带测井响应特征

Fig. 4 Logging response characteristics of mineralized layers in hole NLSD-1

编录资料可知,270.42～272.14 m 深度段为一破碎带;根据测井图像可知,270.42～271.23 m 深度段成像测井图像未显示暗色条带特征,且井径曲线未增大,视电阻率、密度、声波速度曲线也未降低,说明井壁地层岩石未破碎,从而表明该破碎带是由岩芯钻探引起的地层岩石破碎所致;271.23～272.14 m 深度段的测井响应特征与破碎带对应较好,反映测井识别破碎带的能力优于钻探岩芯。

根据超声波成像测井资料,NLSD-1 孔共划分出破碎带共 54 处(只统计厚度大于 0.3 m),单层厚度最厚达 8.86 m,结果见表 1。对于浅部(＜500 m),破碎带优势发育深度主要位于 400 m 附近,对于深部(＞500 m),破碎带优势发育深度主要位于 500 m、700 m 附近,其中在深度大于 1000 m 后破碎带发育较少,只出现两处大段破碎带。

4 讨论

基于 NLSD-1 孔超声波成像测井资料处理结果,就裂缝、破碎带特征与矿化层分布、空间展布、F_1断层位置以及裂缝与钻孔倾斜关系等问题开展了讨论。

4.1 矿化层分布及其与裂缝、破碎带发育的关系

地层裂缝较发育甚至出现破碎,导致岩石孔隙

表 1 NLSD-1 孔破碎带统计表

Table 1 Statistics of fracture zones in hole NLSD-1

序号	深度范围(m)	厚度(m)	序号	深度范围(m)	厚度(m)
1	107.54～110.42	2.88	28	577.42～578.75	1.33
2	114.46～115.11	0.65	29	584.30～585.08	0.78
3	124.22～124.88	0.66	30	588.26～590.04	1.78
4	226.08～227.73	1.65	31	593.95～594.38	0.43
5	229.93～230.76	0.83	32	599.14～599.56	0.42
6	270.30～272.02	1.72	33	600.50～600.90	0.40
7	296.05～296.16	0.11	34	617.88～618.21	0.33
8	387.51～389.23	1.72	35	623.35～624.33	0.98
9	403.12～405.77	2.65	36	634.29～635.66	1.37
10	408.37～410.36	1.99	37	636.23～636.76	0.53
11	412.78～414.43	1.65	38	644.24～644.69	0.45
12	417.60～418.63	1.03	39	648.40～648.75	0.35
13	420.43～422.96	2.53	40	712.27～712.78	0.51
14	425.88～426.64	0.76	41	720.63～721.23	0.60
15	432.29～433.14	0.85	42	729.75～731.09	1.34
16	433.49～434.58	1.09	43	733.21～733.61	0.40
17	439.67～441.29	1.62	44	748.66～749.32	0.66
18	446.93～447.45	0.52	45	771.87～775.62	3.75
19	462.48～463.03	0.55	46	777.63～778.64	1.01
20	463.82～465.62	1.80	47	787.18～788.11	0.93
21	471.48～473.45	1.97	48	915.74～916.58	0.84
22	476.58～478.14	1.56	49	918.75～921.53	2.78
23	485.82～488.04	2.22	50	932.97～933.69	0.72
24	511.76～512.27	0.51	51	945.55～945.94	0.39
25	515.12～516.26	1.14	52	985.82～986.21	0.39
26	549.97～551.87	1.90	53	1375.32～1380.79	5.47
27	568.20～570.64	2.44	54	1439.03～1447.89	8.86

空间增大及连通性增强,往往有利于矿脉的富集,是良好的储集场所。根据岩芯编录资料,NLSD-1 孔 91.44～1535.54 m 深度段钻遇多个矿化层,矿化层所在位置一般裂缝或破碎带较为发育。主要矿化层所在深度段为 409～429 m、430～446 m、621～641 m、655～666 m、679～691 m、696～706 m、744～759 m、776～788 m、907～921 m、1031～1042 m、1081～1090 m、1430～1439 m、1440～1448 m 等,矿化层最厚达 20 m,矿化类型主要为黄铜矿化、黄铁矿化、铅锌矿化等。

以 390～470 m 深度段为例(图 5),岩芯编录显示该深度段赋存多金属矿化,其中 403～404 m、409～429 m、430～446 m、462.5～463 m 为黄铜矿化、黄铁矿化、铅锌矿化层。在此深度段内,超声波成像测井图像显示为裂缝较发育,其中在 403.38～428.13 m 深度段裂缝最为发育,裂缝平均密度为 25.05 条/10 m;在 418～428 m、435～444 m 深度段图像显示为大段破碎,这与 409～429 m、430～446 m 深度段的多金属矿化层基本相对应。

多金属矿找矿中,利用超声波成像测井识别出裂缝和破碎带,间接指示了矿体赋存位置。当然,并非有裂缝和破碎带的层段,就一定存在矿化层,这可以通过利用其它测井和地质资料进行综合判断。

4.2　裂缝和破碎带对矿化带空间展布的指示

根据超声波成像测井提供的钻孔壁裂缝、破碎带深度和产状等信息,可以精细刻画钻孔周围裂缝、

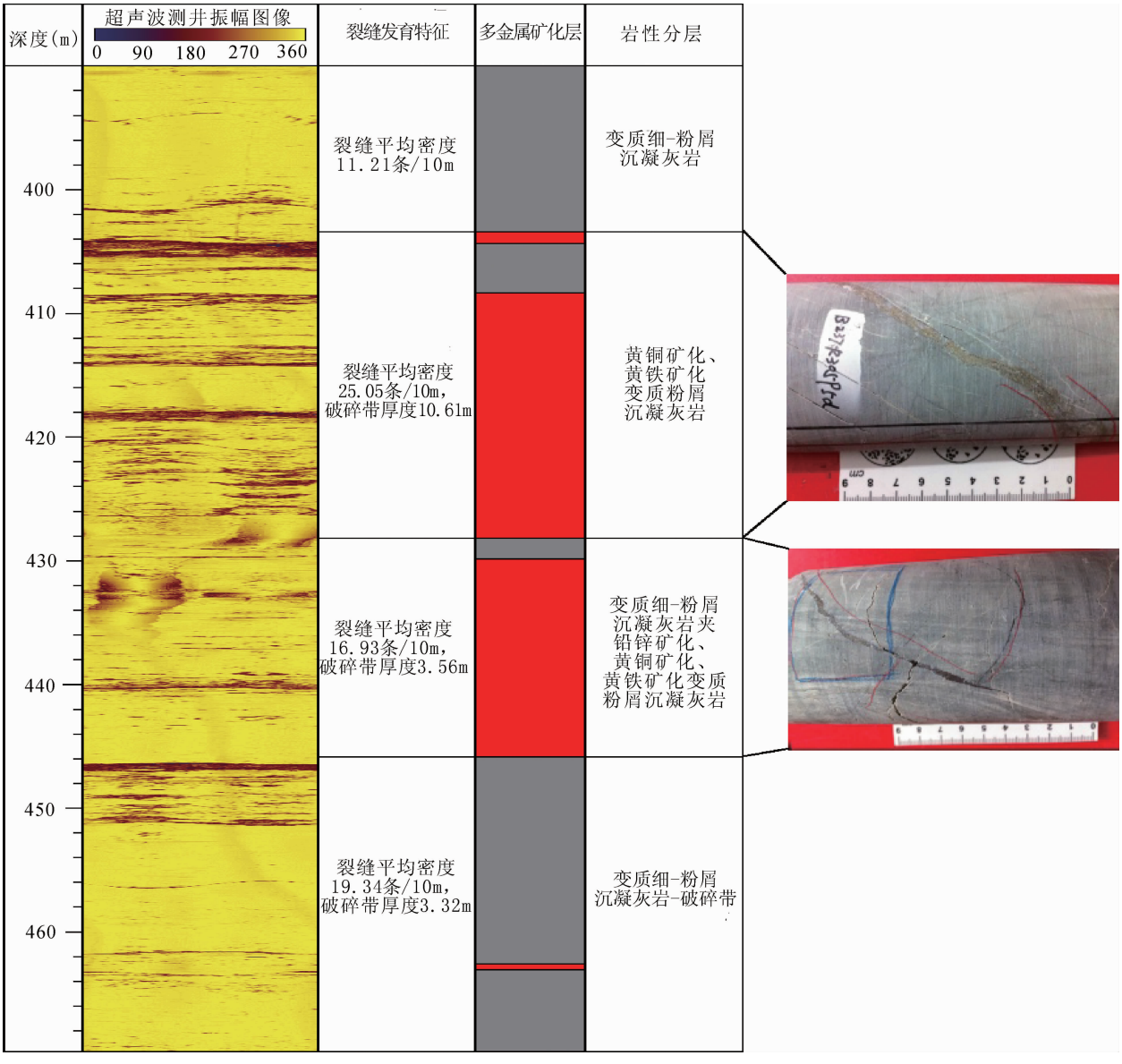


图 5　NLSD-1 孔裂缝发育特征与多金属矿化层关系

Fig. 5　Fracture development characteristics of ultrasonic images for mineralized layers in hole NLSD-1

破碎带的空间展布特征。由于裂缝、破碎带与矿化层关系密切,因此矿化层中裂缝、破碎带的空间展布也反映了矿化带空间展布特征。

NLSD-1 孔主要矿化层中,裂缝优势倾向为正东方向,推测这些矿化层在钻孔附近具有西浅东深的展布特征,为后续找矿提供了十分重要的信息。

在金属矿勘查中,地下构造复杂,超声波成像测井推断的矿化层空间展布特征,局限于钻孔附近。在重点研究区,条件允许时可以实施多个钻孔,综合多孔的结果能够更有效地确定矿化层空间展布情况以及延伸方向。

4.3 F_1 断层过钻孔的推断

F_1 断层是银坑矿田的重要构造,控制了矿田地层、岩浆岩及多金属矿化的展布。多金属矿床(化)在 F_1 断层不同部位均有产出,其中包括:F_1 断层带内、F_1 断层与其上盘次级配套构造的交汇部位、F_1 断层上盘不同方向次级配套构造的复合部位、F_1 断层下盘配套构造中(高贵荣等,2000)。F_1 断层不仅具有单纯的导岩导矿意义,而且还有重要的储矿作用。

根据 NLSD-1 孔钻孔的施工设计,钻孔可能穿过 F_1 断层。根据成像测井图像,1375.32～1380.79 m 深度段出现一破碎带,该深度段井径曲线出现不同程度的扩径,电阻率、密度及声波速度曲线也相对降低,岩芯编录资料显示岩性为构造角砾岩;根据拾取的裂缝产状,该深度段上下裂缝产状发生显著变化,反映该深度段是一个重要的构造事件,有可能为 F_1 断层。

根据钻探资料可知,NLSD-1 孔于 1375.37 m 处揭露了 F_1 断层,钻孔进入二叠系,与上元古界青白口系库里组断层接触。F_1 断层所在位置与成像测井资料所推断的结果基本一致。

4.4 裂缝发育与钻孔倾斜的关系

孔斜是钻探工程的一项重要指标,影响孔斜的因素有多种,一方面钻探工程对孔斜具有较大影响,另外地层岩性、地质构造等对孔斜也有影响。超声波成像测井既可能提供较准确地确定岩层裂隙的产状、定性判断钻孔断面的大小和形状,又能够提供孔斜数据,因而为孔斜研究提供了一种有力手段(朱永宜等,2005)。

根据超声波成像测井结果,NLSD-1 孔 91～1535 m 深度段孔斜倾向主要分布于 240°～280°,裂缝倾向主要分布于 80°～110°范围,两者倾向之间相差接近 160°(图 6)。裂缝倾向与钻孔倾向基本呈相反关系,说明孔斜可能受裂缝发育的影响,在该孔表现为钻孔钻进方向不是顺着裂缝发育方向偏斜,而是与之相反。

利用超声波成像测井结果来研究与钻孔倾斜的关系和规律,对于金属矿钻孔纠斜具有一定的指导意义。

孔斜与裂缝分布特征密切相关,裂缝较为发育的地层会使得钻孔孔斜增大,从而导致钻孔质量不合格及一系列较复杂的井下事故。研究该孔裂缝发育特征与钻孔钻进轨迹关系有利于钻孔纠斜,指导

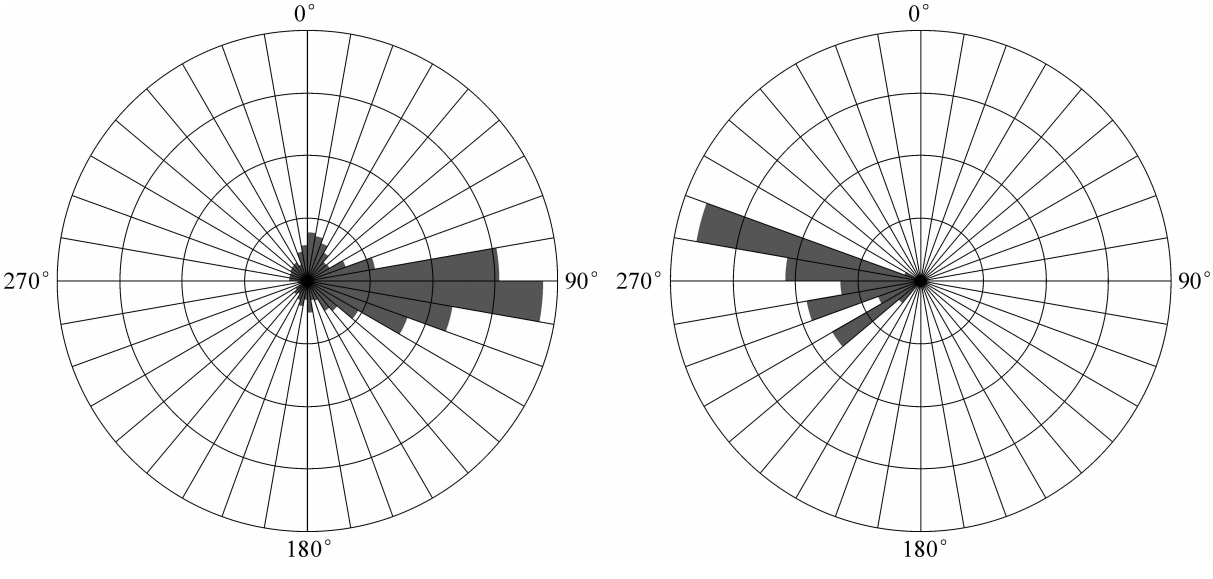


图 6 NLSD-1 孔裂缝倾向(左)与井斜倾向(右)关系图

Fig. 6 Rosemaps showing relationship between fracture inclination and welldeviation of hole NLSD-1

打好直孔及满足地质解释的需求。

5　结论

对于都-赣县矿集区科学钻探 NLSD-1 孔 91.44～1535.54 m 深度段的超声波成像测井进行研究，分析了钻孔裂缝、破碎带特征，探讨了它们在深部找矿中作用，取得以下主要认识：

(1)采集到的超声波成像测井资料质量良好，测井图像能够精细刻画孔壁地质构造(包括裂隙、破碎带等)特征，在金属矿勘查中可用于井旁构造解释。

(2)主要矿化层(409～429 m、430～446 m、621～641 m、655～666 m、679～691 m、696～706 m、744～759 m、776～788 m、907～921 m、1031～1042 m、1081～1090 m、1430～1439 m、1440～1448 m等)均发育裂缝或破碎带，因而通过超声波成像测井识别出裂缝和破碎带，间接指示了矿体赋存的可能；测井反映的裂缝倾向指示钻孔附近矿化层具有西浅东深的空间展布特征。

(3)根据裂缝产状的垂向变化，推断 F_1 断层过 NLSD-1 孔深度范围为 1375.32～1380.79 m，与他人研究结果基本一致；此外，裂缝与孔斜关系的研究对钻孔纠斜具有指导意义。

致谢：野外工作期间得到了赣南地质大队曾载淋、张永忠高工的帮助和配合；论文使用了中国地质科学院矿床资源研究所的地质岩芯资料；审稿专家提出了宝贵意见，在此一并表示诚挚谢意。

参　考　文　献

陈毓川，陈郑辉，曾载淋，赵正，赵斌，王登红，张永忠，李建国，周新鹏，李江东. 2013. 南岭科学钻探第一孔选址研究. 中国地质，40(3)：659～670.

陈毓川，裴荣富，张宏良，等. 1989. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质. 北京：地质出版社，1～508.

陈毓川，裴荣富，张宏良. 1990. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色、稀有金属矿床地质. 中国地质科学院院报，20：79～85.

曹新志，张旺生，孙华山. 2009. 我国深部找矿研究进展综述. 地质科技情报，28(2)：104～109.

董树文，李廷栋，SinoProbe 团队. 2011. 深部探测技术与实验研究(SinoProbe). 地球学报，32(Supp. 1)：3～23.

董树文，李廷栋，陈宣华，魏文博，高锐，吕庆田，杨经绥，王学求，陈群策，石耀霖，黄大年，周琦. 2012. 我国深部探测技术与实验研究进展综述. 地球物理学报，55(12)：3884～3901.

邓震，吕庆田，严加永，赵金花，刘彦. 2012. 九江－瑞昌矿集区的 3D 结构及对区域找矿的启示. 地球物理学报，55(12)：4169～4180.

高贵荣，张勉斌. 1998. 江西省于都县银坑贵多金属矿田矿化特征、成矿控制及找矿方向. 火山地质与矿产，19(4)：347～356.

高贵荣，林长仔. 2000. 于都县银坑矿田 F_1 断裂特征及其控矿作用. 江西地质，14(1)：49～53.

全淦. 1995. 江西于都银坑银多金属矿田地质特征与找矿远景初步分析. 江西地质，9(4)：259～266.

吕庆田. 2007. 我国东部深部找矿方向、找矿思路与勘查技术——以长江中下游成矿带为实例. 中国地球物理，12～19.

吕庆田，杨竹森，严加永，徐文艺. 2007. 长江中下游成矿带深部成矿潜力、找矿思路与初步尝试——以铜陵矿集区为实例. 地质学报，81(7)：865～881.

吕庆田，常印佛，SinoProbe-03 项目组. 2011a. 地壳结构与深部矿产资源立体探测技术实验——SinoProbe-03 项目介绍. 地球学报，32(s1)：49～64.

吕庆田，史大年，汤井田，吴明安，常印佛，SinoProbe-03-CJ 项目组. 2011b. 长江中下游成矿带及典型矿集区深部结构探测——SinoProbe-03 年度进展综述. 地球学报，32(3)：257～268.

刘振东，吕庆田，严加永，赵金花，吴明安. 2012. 庐枞盆地浅表地壳速度成像与隐伏矿靶区预测. 地球物理学报，55(12)：3910～3922.

李建国，赵斌，孙少伟，周新鹏，孙渊，宋立芳，黄琴，项彪，肖昆. 2012. 地震初至波速度层析反演在多金属矿探测中的应用. 现代地质，26(6)：1218～1224.

刘善宝，陈毓川，范世祥，许建祥，屈文俊，应立娟. 2010. 南岭成矿带中、东段的第二找矿空间——来自同位素年代学的证据. 中国地质，37(4)：1034～1049.

牛一雄，潘和平，王文先，朱留方，许东辉. 2004. 中国大陆科学钻探主孔(0～2000 m)地球物理测井. 岩石学报，20(1)：165～178.

南亲江. 2008. 定向扫描成像测井技术在利国铁矿的应用. 金属矿山，382：113～116.

聂昕，邹长春，肖昆，徐晋，牛一雄，孔广胜. 2012. 汶川地震断裂带科学钻探 WFSD-1 孔成像测井岩芯空间归位. 地球物理学进展，27(1)：75～82.

祁光，吕庆田，严加永，吴明安，刘彦. 2012. 先验地质信息约束下的三维重磁反演建模研究——以安徽泥河铁矿为例. 地球物理学报，55(12)：4194～4206.

施明兴，高贵荣. 2006. 江西于都银坑矿田银金铅锌矿床地质特征. 资源调查与环境，27(2)：164～172.

汤井田，徐志敏，肖晓，李晋. 2012. 庐枞矿集区大地电磁测深强噪声的影响规律. 地球物理学报，55(12)：4147～4159.

王登红，陈毓川，陈郑辉，刘善宝，许建祥，张家菁，曾载淋，陈富文，李华芹，郭春丽. 2007. 南岭地区矿产资源形势分析和找矿方向研究. 地质学报，81(7)：882～890.

王登红，陈富文，张永忠，等. 2011. 南岭地区有色－贵金属成矿潜力及综合探测技术示范研究. 北京：地质出版社，472.

王登红，陈毓川，王瑞江，黄凡，王永磊. 2013. 对南岭与找矿有关问题的探讨. 矿床地质，32(4)：854～863.

肖昆，邹长春，周新鹏，项彪，王丽忱. 2013. 南岭科学钻探 NLSD-1 孔井中磁测资料分析. 金属矿山，439：107～109.

许建祥，曾载淋，王登红，陈郑辉，刘善宝，王成辉，应立娟. 2008. 赣南钨矿新类型及“五层楼＋地下室”找矿模型. 地质学报，82(7)：880～997.

杨经绥，许志琴，汤中立，刘嘉麒，戚学祥，张泽明，吴才来，薛怀民，张金昌，张晓西，姜枚，曾载淋. 2011. 大陆科学钻探选址与钻探实验. 地球学报，32 (Supp. 1)：84～112.

叶景平,徐贻赣.1998.江西于都老虎头锌,铅(银)矿床地质特征及其成因.江西地质,12(1):42～47.

尤征,杜旭东,侯会军,周开凤,张舫.2000.成像测井解释模式探讨.测井技术,24(5):393～398.

翟裕生,邓军,王建平,彭润民,刘家军,杨立强.2004.深部找矿研究问题.矿床地质,23(2):142～149.

邹长春,刘东明,聂昕,项彪,牛一雄,孔广胜.2012.利用成像测井资料分析汶川地震断裂带科学钻探3号孔(WFSD-3)裂缝特征.现代地质,26(6):1146～1153.

朱永宜,王达.2005.中国科钻一井先导孔的防斜与纠斜.地球科学—中国地质大学学报,30(Suppl.):37～42.

朱留方,许东晖,李双林.2005.中国大陆科学钻探主孔(0～2000 m)成像测井地质特征分析.地球科学,30(Suppl):57～61.

周平,陈胜礼,朱丽丽.几种金属矿地下物探方法评述.地质通报,28(2～3):224～231.

赵正,陈毓川,陈郑辉,王登红,曾载淋,赵斌,张家菁.2012.赣南银坑矿田高山角花岗闪长岩SHRIMP U-Pb定年及其与成矿的关系.岩矿测试,31(3):536～542.

张家菁.1997.赣南东部银坑矿田控矿因素及找矿方向浅析.江西地质,11(4):23～29.

Blake J R. 2010. Application of borehole imagery in iron ore: examples from Mount Whaleback, Western Australia. Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B), 119(3): 176～182.

Dong Shuwen, Li Tingdong, Lü Qingtian, Gao Rui, Yang Jingsui, Chen Xuanhua, Wei Wenbo, Zhou Qi. 2013. Progress in deep lithospheric exploration of the continental China: a review of the SinoProbe. Tectonophysics, 606: 1～13.

Goleby B R, Blewett R S, Korsch R J, Champion D C, Cassidy K F, Jones L E A, Groenewald P B, Henson P. 2004. Deep seismic reflection profiling in the Archaean northeastern Yilgarn Cration, Western Australia: implications for crustal architecture and mineral potential. Tectonophysics, 388: 119～133.

Jiang Guoming, Zhang Guibin, Lü Qingtian, Shi Danian, Xu Yao. 2013. 3-D velocity model beneath the Middle-Lower Yangtze River and its implication to the deep geodynamics. Tectonophysics, 606:36～47.

Lü Qingtian, Yan Jiayong, Shi Danian, Dong Shuwen, Tang Jingtian, Wu Mingan, Chang Yinfo. 2013. Reflection seismic imaging of the Lujiang-Zongyang volcanic basin, Yangtze metallogenic belt: an insight into the crustal structure and geodynamics of an ore district. Tectonophysics, 606:60～77.

Malehmir A, Thunehed H, Tryggvason A. 2009. The Paleoproterozoic Kristineberg mining area, northern Sweden: results from integrated 3D geophysical and geologic modeling and implications for targeting ore deposits. Geophysics, 74(1): B9～B22.

Milkereit Bernd, Eaton David, Wu J, Perron G, Salisbury Matthew H, Berrer E K, Morrison G. 1992. Seismic imaging of massive sulfide deposits: Part II: reflection seismic profiling. Geology, 20: 807～811.

Nie Xin, Zou Changchun, Pan Li, Huang Zhaohui, Liu Dongming. 2013. Fracture analysis and determination of in-situ stress direction from resistivity and acoustic image logs and core data in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Borehole-2 (50～1370 m). Tectonophysics, 593:167～171.

Shi Danian, Lü Qingtian, Xu Wenyi, Yan Jiayong, Zhao Jinhua, Dong Shuwen, Chang Yinfo. 2013. Crustal structure beneath the middle-lower Yangtze metallogenic belt in East China: constraints from passive source seismic experiment on the Mesozoic intra-continental mineralization. Tectonophysics, 606: 48～59.

Tang Jingtian, Zhou Cong, Wang Xianying, Xiao Xiao, Lü Qingtian. 2013. Deep electrical structure and geological significance of Tongling ore district. Tectonophysics, 606:78～96.

Response Characteristics of Ultrasonic Imaging Logging in Hole NLSD-1 of the Scientific Drilling in Yudu-Ganxian Ore District and Their Implications for Deep Mineral Prospecting

ZOU Changchun[1)], XIAO Kun[1)], ZHOU Xinpeng[2)], LI Jianguo[2)], ZHAO Bin[2)], XIANG Biao[1)], SUN Shaowei[2)], WANG Zhenbin[2)], HUANG Bo[2)], YIN Daojin[2)]

1) *Key Laboratory of Geo-detection (China University of Geosciences, Beijing), Ministry of Education, Beijing*, 100083;
2) *Geophysical Exploration Institute of Chemistry of Shanxi Province, Yuncheng, Shanxi*, 044004

Abstract

The hole NLSD-1 is the first scientific drilling deep hole in the Nanling region, which also is one of the deepest scientific drilling projects in metallic ore districts of China, and its final depth is 2967.83 m. In order to characterize the deep structural frame of the ore concentration area, reveal the distribution characteristics of the deep mineralization belt, establish the geophysical interpretation rule of deep ore prospecting, and improve the understanding of the laws of deep mineralization of deposit, this hole was implemented continuous coring, and conducted the measuring of a variety of geophysical logging and borehole geophysical methods in the drilling process. Ultrasonic imaging logging is an advanced logging technology, which contains abundant in-situ geological characteristics information, often used to analyze the geological structure and in-situ stress near the hole in the oil and gas exploration. This paper applied ultrasonic imaging logging to scientific drilling in metallic ore districts, studied the ultrasonic imaging logging data of hole NLSD-1, considered that ultrasonic imaging logging images which can characterize the geological features of fractures and fracture zones of the borehole wall, are also suitable for the structural interpretation near the hole in the metal ore exploration. All the main mineralized layers (409～429 m, 430～446 m, 621～641 m, 655～666 m, 679～691 m, 696～706 m, 744～759 m, 776～788 m, 907～921 m, 1031～1042 m, 1081～1090 m, 1430～1439 m, and 1440～1448 m et al.) were developed fractures or fracture zones, which indicated that the logging results can illustrate the depth of mineralized layers, and explained the spatial extension characteristics of west light and east deep in the mineralized layers near the hole. Based on the vertical variation of the fracture occurrence, we inferred that the intersection depth range of the fault F_1 and hole NLSD-1 is 1375.32～1380.79 m. Besides, the study of the relation between fracture inclination and well deviation has guiding significance for drilling hole straightening. The study results indicate that the ultrasonic imaging logging plays an important role in deep ore prospecting.

Key words: Yudu-Ganxian ore concentration area; scientific drilling; ultrasonic imaging logging; fracture