

doi:10.3799/dqkx.2016.110

深海热液金属硫化物矿电性结构

席振铎^{1,2}, 李瑞雪¹, 宋刚³, 周胜^{2,3}

1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083

2. 中南大学海洋矿产探测技术与装备研究所, 湖南长沙 410083

3. 湖南五维地质科技有限公司, 湖南长沙 410205

摘要: 深海热液金属硫化物矿位于水深数千米的大洋洋底, 其形态、规模及电性参数难为人知, 迄今未有由实测数据推导其电性结构的研究。依托于“大洋一号”, 在大西洋洋中脊、西南印度洋洋中脊实施了多次深海热液金属硫化物矿探测试验, 实地采集热液金属硫化物矿瞬变电磁响应数据, 并对试验数据进行反演分析。分析表明: 大西洋 TAG(trans-Atlantic geotraverse)热液区及西南印度洋 49°4'E, 37°5'S 热液区内, 深海热液金属硫化物矿形似生长于洋壳内的“蘑菇”, 矿体呈透镜状或似层状结构, 分布于热液喷口的卤水池内, 电阻率约为 0.1 Ω·m, 规模为 50~250 m, 厚度范围为 20~50 m; 热液烟囱直径为 10~50 m, 周围岩石发生热液蚀变, 蚀变岩石电阻率在 0.2~0.5 Ω·m, 以热液通道为中心呈圈层状变化。依据深海热液金属硫化物矿的形态特征及电性参数, 矿体的电性结构模型可简化为 T 型异常体。

关键词: 深海热液金属硫化物矿; TAG 热液区; 西南印度洋热液区; 电性结构; 海底地球物理。

中图分类号: P319.3

文章编号: 1000-2383(2016)08-1395-07

收稿日期: 2016-02-16

Electrical Structure of Sea-Floor Hydrothermal Sulfide Deposits

Xi Zhenzhu^{1,2}, Li Ruixue¹, Song Gang³, Zhou Sheng^{2,3}

1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

2. Institute of Marine Mineral Resource Prospect Techniques and Instruments, Central South University, Changsha 410083, China

3. Hunan 5D Geo-survey & Technical Company Ltd., Changsha 410205, China

Abstract: The deep-sea hydrothermal metallic deposits are located on seafloor at depth about several kilometers, and it is difficult to determine their shape, scale and electrical parameters, and the electrical structure based on field data remains unknown. Using research vessel “DaYang-I”, several detection tests were implemented at Atlantic ridge and Southwest Indian ridge, and the electromagnetic response data of deep-sea hydrothermal metallic sulfide deposits have been observed and analyzed. The analysis show that in the Atlantic TAG (trans-Atlantic geotraverse) hydrothermal area and Southwest Indian Ocean 49°4'E, 37°5'S hydrothermal area, deep-sea hydrothermal metallic sulfide deposits are like ‘mushroom’ in the oceanic crust, located in the brine pool around the hydrothermal vents with lenticular structure or stratoid structure, the resistivity is about 0.1 Ω·m, the scale changes from 50 to 250 m, and the thickness is from 20 to 50 m. The diameter of hydrothermal channel ranges from 10 to 50 m, and hydrothermal alternation took place within and outside the hydrothermal channel. The resistivity of the alternation rocks is in the range of 0.2 to 0.5 Ω·m, and concentrically changes around the hydrothermal channel. Based on the shape and electrical parameters of hydrothermal metallic sulfide deposits, the ore body can be simplified as a T-shaped target for electrical structure model.

Key words: deep-sea hydrothermal metallic sulfide deposits; TAG hydrothermal area; Southwest Indian Ocean hydrothermal area; electrical structure; submarine geophysics.

基金项目: 大洋“十二五”重大项目(No. DY125-11-R-03); 国家自然科学基金资助项目(No. 41304090); 深圳市战略新兴产业发展专项资金项目(No. CXZZ20120618165608947)。

作者简介: 席振铎(1966—), 男, 教授, 主要从事瞬变电磁方法与技术相关教学工作及研究。E-mail: xizhenzhu@163.com

引用格式: 席振铎, 李瑞雪, 宋刚, 等, 2016. 深海热液金属硫化物矿电性结构. 地球科学, 41(8): 1395-1401.

深海热液金属硫化物矿是除海洋钴结壳(张富元等,2011)和海底稀土资源(朱克超等,2015)外主要的海洋金属矿产资源,其主要分布在大洋中脊、弧后扩张中心和热点火山构造带内,这些构造带内分布着活跃的热液系统,在热液系统循环的过程中,海水下迁与围岩反应生成原生含矿溶液,含矿热液沿回迁通道回迁后,热液物质堆积形成热液金属硫化物矿(尤·阿·博格达诺夫,2007)。早期对深海热液金属硫化物矿的研究主要围绕洋底热液系统的发生和演化,近年来,研究内容逐渐集中到深海热液金属硫化物的有效勘探方面。深海热液金属硫化物矿的电性结构是采用地球物理电磁方法对其进行勘探的物性基础,对其进行研究将推动此种多金属矿勘探的发展,也为开发利用这一深海矿产资源奠定基础。

为了探明深海热液金属硫化物矿的电性结构特征,已有学者从热液成矿过程或正演模拟计算的角度对其进行了推断。Evans and Everett(1994)以 Galapagos 洋脊热液矿化堆为例建立了深海硫化物矿电性模型;俄罗斯学者尤·阿·博格达诺夫(2007)从地质学角度详细研究了典型的大洋低速扩张脊热液系统成矿过程并推断了其成矿模式,绘制了热液硫化物矿成矿模式图;鹦鹉螺矿业公司(Nautilus Minerals Inc, Canada)于巴布亚新几内亚的俾斯麦海开展了探矿工作,根据钻孔数据推断绘制了块状硫化物矿地质断面图,因为局限于钻孔深度,对于各岩矿层厚度未作推断(Swidinsky *et al.*, 2012)。以上分析结果表明:洋底面以上热液硫化物矿基本呈层状,且中间较周边略厚;洋底面以下热液硫化物矿呈锥形,且有管状烟囱与洋壳内部热源相连。为计算深海热液金属硫化物矿的瞬变电磁响应,刘长胜和林君(2006)、Swidinsky *et al.*(2012)和周胜等(2012)均将深海热液硫化物矿简化为低阻层,建立了层状电性模型,用于正演模拟计算的电性结构模型也以一维层状模型为主。除上述从热液成矿过程或正演模拟计算角度对深海热液硫化物矿电性结构进行推断外,多种地球物理方法也逐渐应用于该研究,尤其是海洋电磁法。最早的深海电磁试验可追溯到 1954 年,Wetheim(1954)研究了海底电场和磁场随时间的变化。Cox(1981)首次使用海洋可控源电磁法测量了洋底岩石圈的电阻率。Cheesman *et al.*(1987, 1990)研制了可控源时间域海底电磁法观测系统,且在加拿大温哥华岛南端 Trincomali 海峡应用此系统进行了探测天然气水合物的试验。Eidesmo *et al.*(2002)和 Ellingsrud *et*

al.(2002)应用海洋可控源电磁测深法探测了安哥拉海域的石油资源。美国埃克森美孚公司进行了海洋电磁法的海试(Constable and Srnka, 2007)。美国 Scripps 海洋研究所海洋 EM(electromagnetic)实验室研制了可控源频率域海底电磁观测系统,在东太平洋海隆开展了大规模的海洋电磁试验,采集了当时最全的可控源电磁法数据,以此绘制了洋中脊热液系统图像(Key and Constable, 2002),同时采用该系统进行了 Loihi 水下山的电导率填图(Myer *et al.*, 2006)。Edwards *et al.*(1981)提出了海上磁电阻率测深法,Tada *et al.*(2005)应用此方法研究了 Mariana 海槽的热液循环系统。国内方面,湖南五维地质有限公司和北京先驱高技术开发公司共同研发了 MTEM-08 拖曳式海洋瞬变电磁探测系统,经多次试验改进,在大西洋及西南印度洋进行了勘察深海热液金属硫化物的试验研究。

本文对在大西洋慢速扩张洋中脊及西南印度洋超慢速扩张洋中脊试验测得的数据进行反演处理,绘制了海洋瞬变电磁多测道剖面图、视电阻率剖面图,以此分析深海热液金属硫化物矿的形态特征及电性参数,从而研究其电性结构。

1 深海热液金属硫化物矿瞬变电磁试验数据

1.1 TAG(trans-Atlantic geotraverse)热液金属硫化物矿瞬变电磁数据

大西洋洋中脊属于洋壳型裂谷,裂谷内是拉斑玄武岩。TAG 热液区位于大西洋中脊 26°08'N, 44°49'W 位置,靠近洋中脊裂谷的东壁,水深为 3 625~3 670 m,有规模巨大的高温热液硫化物丘体(邓希光,2007)。

2012 年 6 月,“大洋一号”第 26 航次大洋科考在大西洋实施海洋电磁法海试,在已知的 TAG 热液区内,首先采用电视抓斗、深潜现场取样等技术对深海地质情况进行观察,在水深为 3 640~3 700 m 的作业区内发现仍在活动的热液烟囱,矿堆直径为 250~300 m,随后采用拖曳式深海瞬变电磁仪采集热液金属硫化物矿电磁响应数据,完成 6 条 TEM(transient electromagnetic)测线和 2 条 SP(self-potential)测线,有效测线长度约为 36.44 km。数据采集采用重叠回线装置,拖曳高度为 50 m,线圈有效面积为 58.8 m²,发送电流为 20 A,关断时间为

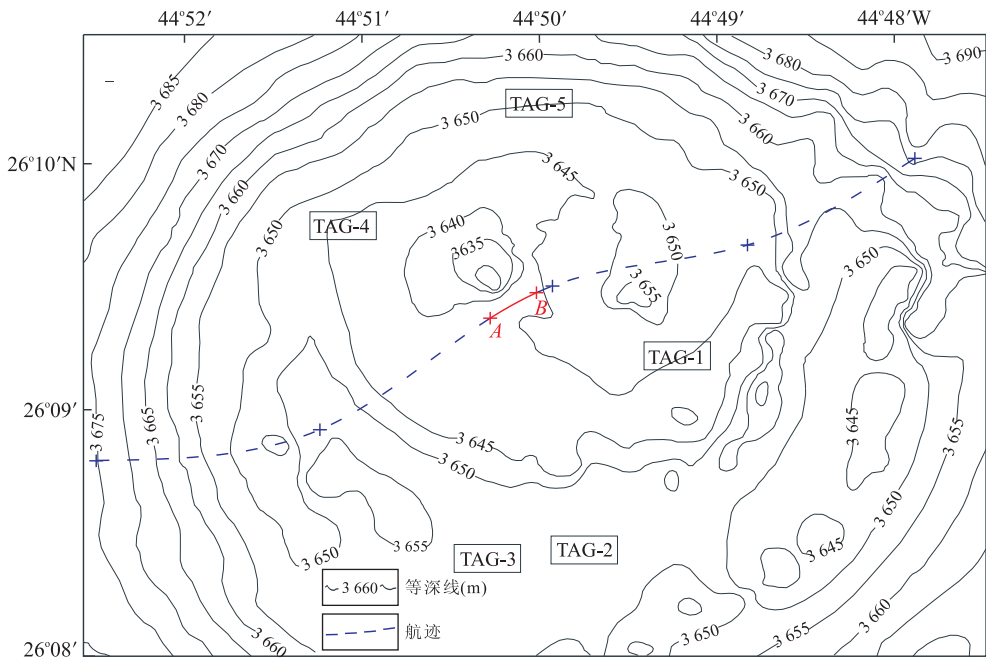


图 1 海洋瞬变电磁测线 TEM06

Fig. 1 Marine transient electromagnetic line TEM06

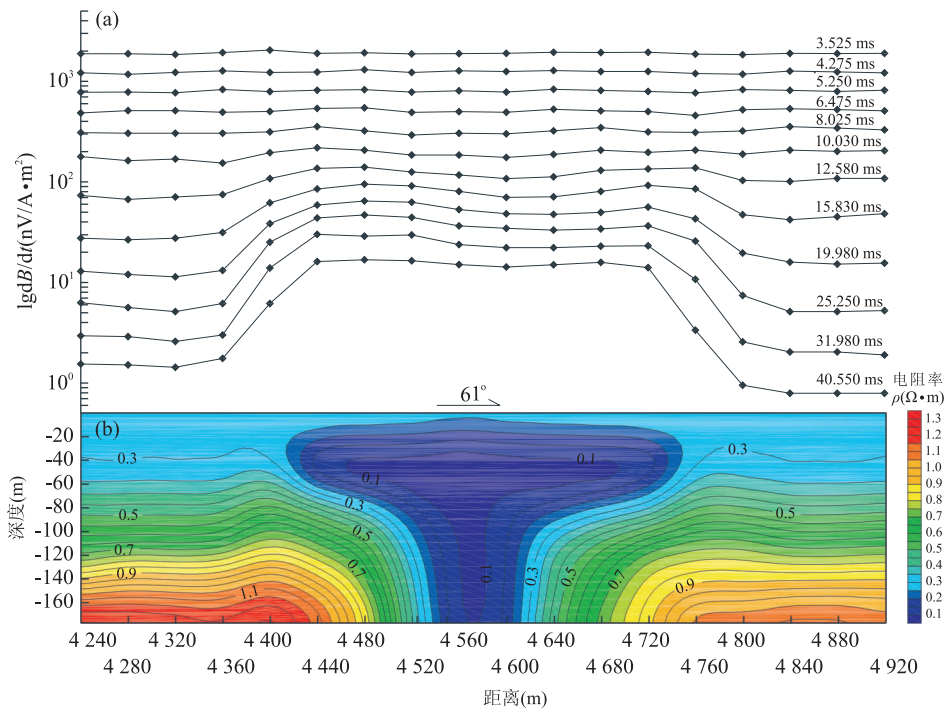


图 2 TEM06 测线 AB 段的数据处理

Fig. 2 Data process of section AB of line TEM06

a. 瞬变电磁响应多测道剖面; b. 视电阻率剖面

0.15 ms. TEM06 测线数据有明显的响应异常,该测线始于 44°52.50'W, 26°8.78'N, 止于 44°47.88'W, 26°10.05'N, 总长为 7.75 km, 测线航迹如图 1 所示, 异常响应范围为 4.24~4.92 km 的 AB 段内.

对 TEM06 测线 AB 段内的观测数据进行分析, 采用 5DEM_TEM 反演软件(湖南五维地质科技有限公司)对数据资料进行处理, 求取视电阻率及深度(图 2). 图 2b 清晰地反映了 TAG 热液硫化物

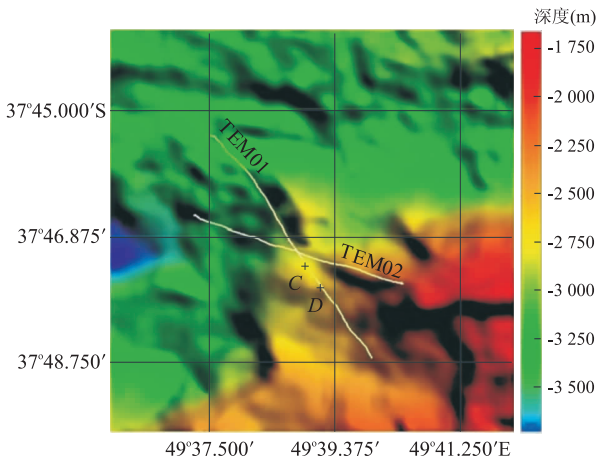


图 3 海洋瞬变电磁测线 TEM01

Fig. 3 Marine transient electromagnetic line TEM01

矿的电性结构,观测区域内只包含一处垂直低阻带,视电阻率剖面图上显示为单一热液喷口。总体来说,热液烟囱及硫化物矿电阻率极低,在 $0.1 \Omega \cdot m$ 左右,形似一颗长在洋壳内的“蘑菇”。其中,热液硫化

物矿堆积在卤水池中,为似层状结构。热液烟囱直径约为 $50 m$,沿垂直方向伸展直至洋底面,周围岩矿石发生蚀变,蚀变岩石电阻率为 $0.2 \sim 0.5 \Omega \cdot m$ 。在可观测的 $150 m$ 范围内,硫化物矿堆的厚度约为 $50 m$,以热液烟囱喷口为中心对称展布,直径约为 $250 m$;热液硫化物矿以外的范围洋壳电阻率呈现层状变化规律,由浅至深电阻率逐渐升高,变化范围在 $0.4 \sim 1.5 \Omega \cdot m$ 。

1.2 西南印度洋热液金属硫化物矿瞬变电磁数据

西南印度洋洋中脊属于洋壳型裂谷,裂谷内是玄武岩。西南印度洋洋中脊 $49^{\circ}4'E$ 、 $37^{\circ}5'S$ 热液区,位置靠近西南印度洋中脊西端,位于裂谷南壁,2007年由“大洋一号”科考船首次发现(叶俊,2010)。相较于 TAG 热液区,该热液区相对年轻。

2014年2月,“大洋一号”在西南印度洋进行了30航次的科学考查,在第2航段的考察区内发现深海热液金属硫化物矿堆,笔者布置了2条 TEM 测线,有效探测长度为 $12.5 km$ 。数据采集使用重叠回

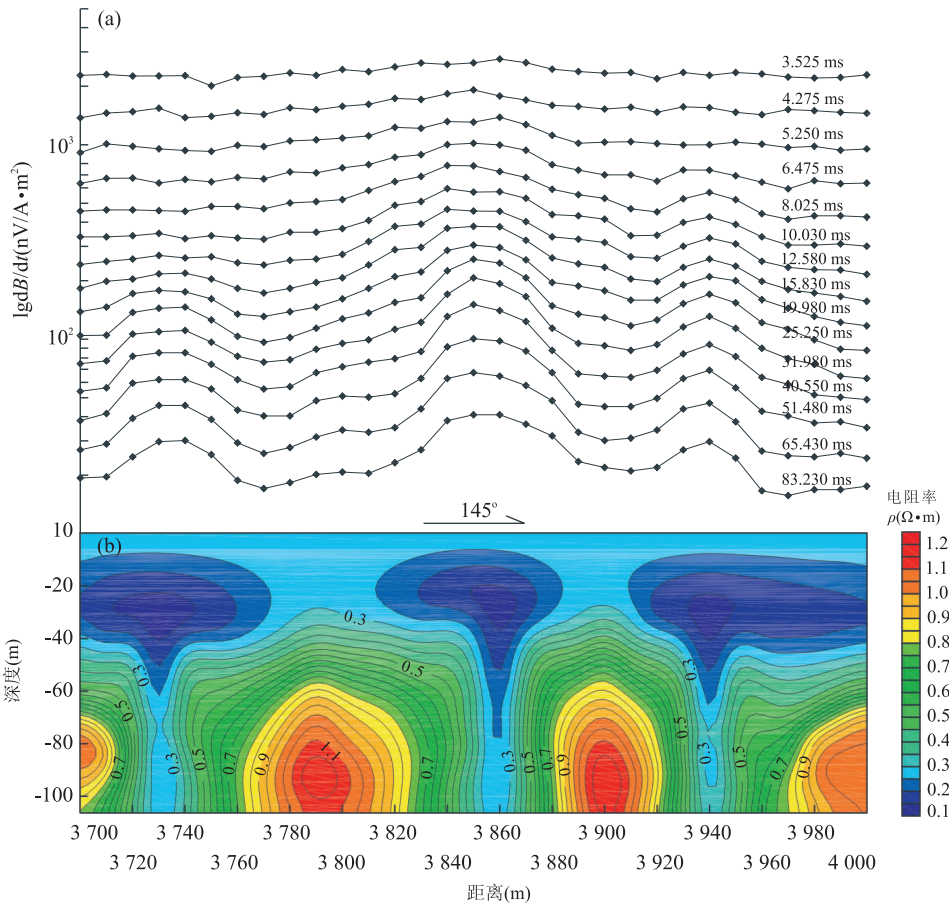


图 4 TEM01 测线 CD 段的数据处理

Fig. 4 Data process of section CD of line TEM01

a. 瞬变电磁响应多测道剖面; b. 视电阻率剖面

线装置,拖曳高度为 50 m,线圈有效面积为 58.8 m²,发射电流为 24.8 A,关断时间为 0.15 ms. 测线航迹如图 3 所示,其中 TEM01 测线起于 49°37.500'E,37°45.426'S,止于 49°39.928'E,37°48.703'S,总长约 7.62 km,在 3.7~4.0 km 范围 CD 段内数据异常明显.笔者采用电视抓斗在该范围内发现近乎连续的热液硫化物矿,且有 3 个热液烟囱喷口分布其中.

笔者采用 5DEM_TEM 反演软件对 TEM01 测线 CD 段数据资料进行处理,求取视电阻率及深度(图 4),并分析西南印度洋热液硫化物矿的电性结构.该观测区域内 3 处热液烟囱平行排列,依次间隔 130 m 和 80 m,其形态都是与 TAG 热液硫化物矿类似的“蘑菇”态,但是规模相对较小;洋底面以上矿体部分直径为 50~85 m,厚度为 20~30 m,表现为似层状结构,分布在喷口处的卤水池内;热液通道直径为 10~20 m,竖立立于洋壳内.硫化物矿体与热液通道的电阻率极低,在 0.1 Ω·m 左右.围绕热液通道的围岩发生热液蚀变,蚀变围岩的电阻率为 0.2~0.5 Ω·m.热液金属硫化物矿体及热液烟囱以外的区域,洋壳岩石电阻率呈现层状变化规律,由浅至深逐渐升高,变化范围为 0.4~1.2 Ω·m.

2 深海热液金属硫化物矿电性结构分析

由 TAG 热液金属硫化物矿及西南印度洋热液金属硫化物矿的电性结构分析总结可知:形态方面,深海热液金属硫化物矿形似生长于洋壳内的“蘑菇”,矿体部分呈透镜状或似层状堆积在热液卤水池内,以热液烟囱喷口为中心近似对称展布;矿体规模相差较大,直径为 50~250 m,厚度为 20~50 m,笔者推测矿体规模与热液反应时间、矿物堆积地质环境等成矿条件相关;热液硫化物矿的电阻率极低,在 0.1 Ω·m 左右.

“蘑菇”茎部即热液通道几乎竖直地立于洋壳内,由于洋底热液的喷出通道与洋底围岩的破碎断裂带相关,岩石破碎程度高的区域更有利于热液涌出,因此不能排除热液烟囱有倾斜的情况.热液通道直径相差较大(10~50 m),其与岩浆房内热液规模和洋壳岩石破碎带规模相关.对于活动的热液烟囱,通道内是仍在喷发的含矿热液溶液,不活动的热液烟囱通道内是破碎倒塌的烟囱体即热液硫化物矿,

因此热液通道的电阻率同热液硫化物矿近似为 0.1 Ω·m.

可观测的 150 m 范围内,热液通道周围的岩石分层蚀变,蚀变厚度与通道大小近似正相关,即通道直径越大,蚀变范围越广.由于温度是蚀变反应的主要影响因素,直径越大的热液通道热源越充足,因此可保持高温时间越长,蚀变范围越广.蚀变围岩的电阻率以热液通道为中心由内至外,层层升高,为 0.2~0.5 Ω·m;其余部分洋壳岩石电阻率呈层状变化,由浅至深逐渐升高,在 0.4~1.5 Ω·m 范围内.

通过分析大西洋 TAG 热液金属硫化物矿及西南印度洋热液金属硫化物矿的形态特征及电性参数,笔者建立图 5 所示的电性结构模型图,将深海热液金属硫化物矿简化为双半空间中的 T 型异常体.

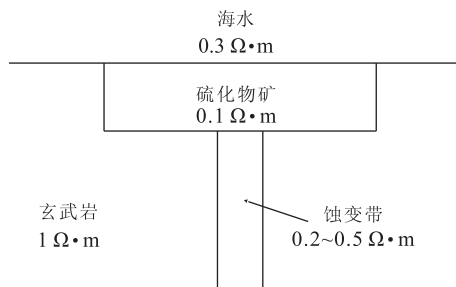


图 5 深海热液金属硫化物矿电性结构模型

Fig. 5 Electrical structure model of deep-sea hydrothermal metallic sulfide deposits

3 正演验证

采用矢量有限元法对图 5 所示的深海热液金属硫化物矿电性结构模型进行正演.将硫化物矿和蚀变带视为矩形异常体,硫化物矿床规模为 200 m×200 m×50 m,电阻率为 0.1 Ω·m,蚀变带规模为 40 m×40 m×100 m,电阻率为 0.4 Ω·m;海水电阻率为 0.3 Ω·m,厚度为 2 000 m;玄武岩电阻率为 1 Ω·m,厚度为 2 000 m;计算区域大小为 3 000 m×3 000 m×4 000 m,剖分后各方向节点数为 23×23×25,总节点数为 13 225 个,总棱边数为 37 996 个,总单元数为 11 616 个.发射线圈及接收线圈采用 10 m×10 m 的方形回线,激发电流为 10 A,上升沿为 0.2 ms,持续时间为 20 ms,关断时间为 0.2 ms.坐标原点位于硫化物矿顶面中心,测线位于洋底面,长为 600 m,共 13 个测点,中心测点位于原点位置.由正演数据绘制多测道响应剖面图,如图 6

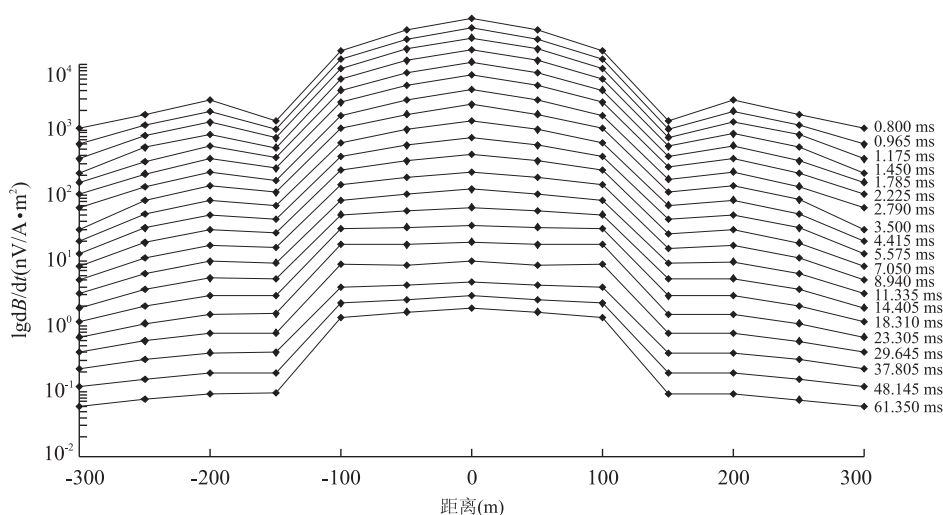


图 6 深海热液金属硫化物矿多测道响应剖面

Fig. 6 Multichannel profile of deep-sea hydrothermal metallic sulfide deposits

所示,由于正演计算中测线位于洋底面,没有考虑拖曳高度,因此不同于实测数据,早期测道的数据就反映出热液硫化物矿的异常响应,且响应值比实测值略高。热液硫化物矿区域的瞬变电磁响应高于不含矿区域的响应,且在蚀变带处响应值最大,与实测响应异常特征吻合,说明图 5 所示的模型图可准确地反映深海热液金属硫化物矿的电性结构特征。

4 结论

(1)大西洋 TAG 热液区和西南印度洋 $49^{\circ}4'E$, $37^{\circ}5'S$ 热液区内,深海热液金属硫化物矿形似生长于洋壳内的“蘑菇”,并非简单的层状低阻体,也不简单地呈现为上宽下窄的锥形形态,堆积矿体一般为透镜状或似层状结构,分布为热液卤水池中,矿体电阻率约为 $0.1 \Omega \cdot m$,热液硫化物矿堆的规模变化范围较大;热液通道周围的岩石发生热液蚀变,电阻率以热液烟囱为中心呈圈层状变化,范围为 $0.2 \sim 0.5 \Omega \cdot m$ 。

(2)大西洋 TAG 热液区和西南印度洋 $49^{\circ}4'E$, $37^{\circ}5'S$ 热液区内,洋壳岩石电阻率呈现层状变化规律,由浅至深逐渐升高,可观测的 150 m 范围内电阻率为 $0.4 \sim 1.5 \Omega \cdot m$ 。

(3)TAG 热液区金属硫化物矿与西南印度洋 $49^{\circ}4'E$, $37^{\circ}5'S$ 热液区金属硫化物矿电性参数一致,形态相似,可简化为双半空间内的 T 型异常体。

致谢:衷心感谢两位审稿人对本文的审阅以及提出的宝贵意见!

References

- Cheesman, S. J., Edwards, R. N., Chave, A. D., 1987. On the Theory of Sea-Floor Conductivity Mapping Using Transient Electromagnetic Systems. *Geophysics*, 52 (2): 204–217. doi:10.1190/1.1442296
- Cheesman, S. J., Edwards, R. N., Law, L. K., 1990. A Test of a Short-Baseline Sea-Floor Transient Electromagnetic System. *Geophysical Journal International*, 103 (2): 431–437. doi:10.1111/j.1365-246X.1990.tb01782.x
- Constable, S., Srnka, L. J., 2007. An Introduction to Marine Controlled-Source Electromagnetic Methods for Hydrocarbon Exploration. *Geophysics*, 72 (2): WA3-WA12. doi:10.1190/1.2432483
- Cox, C. S., 1981. On the Electrical Conductivity of the Oceanic Lithosphere. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25 (3): 196–201. doi:10.1016/0031-9201(81)90061-3
- Deng, X. G., 2007. The Deposits and Mineral Compositions of Hydrothermal Sulphides in Mid-Ocean Ridge. *Geological Research of South China Sea*, 54–64 (in Chinese with English abstract).
- Edwards, R. N., Law, L. K., DeLaurier, J. M., 1981. On Measuring the Electrical Conductivity of the Oceanic Crust by a Modified Magnetometric Resistivity Method. *Journal of Geophysical Research*, 86 (B12): 11609. doi:10.1029/JB086iB12p11609
- Eidesmo, T., Ellingsrud, S., Macgregor, L. M., et al., 2002. Sea Bed Logging (SBL), a New Method for Remote and Direct Identification of Hydrocarbon Filled Layers in Deepwater Areas. *First Break*, 20(20): 144–152.
- Ellingsrud, S., Eidesmo, T., Johansen, S., et al., 2002. Remote

- Sensing of Hydrocarbon Layers by Seabed Logging (SBL): Results from a Cruise Offshore Angola. *The Leading Edge*, 21(10):972—982. doi:10.1190/1.1518433
- Evans, R. L., Everett, M. E., 1994. Discrimination of Hydrothermal Mound Structures Using Transient Electromagnetic Methods. *Geophysical Research Letters*, 21(6):501—504. doi:10.1029/94GL00418
- Key, K., Constable, S., 2002. Broadband Marine MT Exploration of the East Pacific Rise at 9°50'N. *Geophysical Research Letters*, 29(22):11—1—11—4. doi:10.1029/2002GL016035
- Liu, C. S., Lin, J., 2006. Transient Electromagnetic Response Modeling of Magnetic Source on Seafloor and the Analysis of Seawater Effect. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(6):1891—1898 (in Chinese with English abstract).
- Myer, D. G., Constable, S., Key, K., 2006. Electromagnetic Exploration of the Loihi Seamount. American Geophysical Union, San Francisco.
- Swidinsky, A., Hölz, S., Jegen, M., 2012. On Mapping Sea Floor Mineral Deposits with Central Loop Transient Electromagnetics. *Geophysics*, 77(3):171—184. doi:10.1190/geo2011—0242.1
- Tada, N., Seama, N., Goto, T. N., et al., 2005. 1-D Resistivity Structures of the Oceanic Crust around the Hydrothermal Circulation System in the Central Mariana Through Using Magnetometric Resistivity Method. *Earth, Planets and Space*, 57(7):673—677. doi:10.1186/BF03351846
- Wetheim, G. K., 1954. Studies of the Electric Potential between Key West, Florida, and Havana, Cuba. *Earth and Space Science News*, 35(6):872—882. doi:10.1029/TR035i006p00872
- Ye, J., 2010. Mineralization of Polymetallic Sulfides on Ultra-Slow Spreading Southwest Indian Ridge at 49.6°E (Dissertation). The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. Y., Zhang, W. Y., Zhu, K. C., et al., 2011. Resource Estimation of Co-Rich Crusts of Seamounts in Pacific. *Earth Science*, 36(1):1—11 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, S., Xi, Z. Z., Song, G., et al., 2012. Response of the Towed Transient Electromagnetic Sounding on Deep Seafloor. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 43(2):605—610 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, K. C., Ren, J. B., Wang, H. F., et al., 2015. Enrichment Mechanism of REY and Geochemical Characteristics of REY-Rich Clay from the Central Pacific. *Earth Science*, 40(6):1052—1060 (in Chinese with English abstract).
- Богданов, Ю. А., 2007. Modern Ocean Sulphide Deposits Category. Translated by Chen B. Y., *Marine Geology*, (4):18—30 (in Chinese).

附中文参考文献

- 邓希光, 2007. 大洋中脊热液硫化物矿床分布及矿物组成. 南海地质研究, 54—64.
- 刘长胜, 林君, 2006. 海底表面磁源瞬变响应建模及海水影响分析. 地球物理学报, 49(6):1891—1898.
- 叶俊, 2010. 西南印度洋超慢速扩张脊 49.6°E 热液区多金属硫化物成矿作用研究(博士学位论文). 青岛:中国科学院海洋研究所.
- 张富元, 章伟艳, 朱克超, 等, 2011. 太平洋海山钴结壳资源量估算. 地球科学, 36(1):1—11.
- 周胜, 席振铎, 宋刚, 等, 2012. 深海拖曳式瞬变电磁的响应规律. 中南大学学报(自然科学版), 43(2):605—610.
- 朱克超, 任江波, 王海峰, 等, 2015. 太平洋中部富 REY 深海粘土的地球化学特征及 REY 富集机制. 地球科学, 40(6):1052—1060.
- 尤·阿·博格达诺夫, 2007. 大洋现代硫化物矿藏分类. 陈邦彦, 译. 海洋地质, (4):18—30.