# doi: 10.11720/wtyht.2024.0152

第48卷第6期

2024年12月

康利利,杨永友,王中兴,等.石墨烯基电场传感器研发与测试[J].物探与化探,2024,48(6):1463-1470.http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.0152 Kang L L, Yang Y Y, Wang Z X, et al.R&D and tests of a graphene-based electric field sensor[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2024,48 (6):1463-1470.http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.0152

# 石墨烯基电场传感器研发与测试

康利利<sup>1,2,3</sup>,杨永友<sup>1,2,3,4</sup>,王中兴<sup>1,2,3,4</sup>,陈凯<sup>5</sup>,何朋<sup>6</sup>,王绪哲<sup>6</sup>,丁古巧<sup>6</sup>,李子航<sup>1,2,3</sup> (1.中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029; 2.中国科学院 深层油气理论与智能勘探 开发重点实验室,北京 100029; 3.中国科学院 地球科学研究院,北京 100029; 4.中国科学院大 学地球与行星科学学院,北京 100049; 5.中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院,北京 100083; 6.中科悦达(上海)材料科技有限公司,上海 201808)

摘要:为进一步降低电磁探测系统中电场传感器的极差漂移与本底噪声,提升电场测量精度,本文通过研究极差 漂移和本底噪声的产生机理,明确了电场传感器的设计需求,攻克了基于 Ag-AgCl 体系的石墨烯基稳定电解质凝 胶制备工艺,优化设计了基于高分子微孔隔膜的多仓式、多触角电极结构,研制了低极差漂移、低噪声的石墨烯基 电场传感器。该传感器利用石墨烯的离子保持能力,结合反应区、过渡区、缓冲区 3 区分立的多仓式结构,减缓了 内部离子扩散速率,从而降低了因离子浓度变化而引起的极差漂移。利用石墨烯的导电能力降低了电场传感器的 内阻,通过多触角增强与大地的接触,降低了电场传感器的接触电阻,从而降低了电场传感器的本底噪声。所研制 的石墨烯基电场传感器极差漂移不超过 20  $\mu$ V/24 h,本底噪声不高于 25 nV//Hz。在黑龙江多宝山地区开展了 24 小时野外大地电磁探测试验,获取了 0.000 125~320 Hz 频段的高质量电场数据,视电阻率相位曲线与商用电极测 量结果一致,验证了石墨烯基电场传感器的野外工作有效性。

关键词:电磁探测;电场传感器;石墨烯;低极差漂移;低噪声

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2024)06-1463-08

0 引言

电磁法是获取地下电性结构分布的重要地球物 理探测方法之一,该方法通过在地表测量不同位置 或不同频率的电场或磁场,计算解析地下不同深度 的电性信息。其中,电场分量对地下介质的电阻率、 介电常数等电性参数的灵敏度较高,是电磁法探测 中常用的观测参数。例如,大地电磁法、音频大地电 磁法、可控源音频大地电磁法和广域电磁法都要求 测量单个或多个电场分量<sup>[1-2]</sup>。因此,高精度电场 测量是电磁探测的关键技术问题。尤其是在大地电 磁等天然源电磁探测中,由于天然源信号微弱,地表 响应电场信号幅度最低接近数十 μV/km 数量级,以 **100 m** 接收极距合算至响应电压为百 nV~μV 数量 级<sup>[3-5]</sup>,如此微弱的电场信号对电场传感器的极差 漂移与本底噪声提出的要求较高<sup>[6-8]</sup>。

不极化电极是电磁法探测系统中最常用的电场 传感器,该传感器通过将金属阳极浸入相应的电解 质溶液中,利用金属与溶液之间快速可逆的氧化还 原反应实现导电,从而隔绝纯金属电极与土壤的直 接接触,相比纯金属电极具有低极差、耐腐蚀、耐氧 化等优势。国际上先进的不极化电极当属乌克兰 LEMI 公司生产的 LEMI701 电极,其极差漂移达到 50  $\mu$ V/144 days<sup>[9]</sup>。近几年,国内也出现了几款性 能较优的商用电极,以 Pb-PbCl<sub>2</sub>体系固态电极为代 表<sup>[10-14]</sup>,此类电极的极差漂移一般小于 100  $\mu$ V/d, 本底噪声一般接近 50nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1Hz。国内高性能

收稿日期: 2024-04-07; 修回日期: 2024-06-26

基金项目:国家重点研发计划"基础科研条件与重大科学仪器设备研发"重点专项(2022YFF0706203);国家重点研发计划"智能传感器"重点 专项(2021YFB3202103)

第一作者:康利利(1993-),女,2019年毕业于吉林大学获工学博士学位,主要从事电磁探测技术与装备研发工作。Email: kangll@ mail.iggcas. ac.cn

通讯作者:王中兴(1980-),男,2010年获得吉林大学工学博士学位,主要从事地球物理探测技术装备研发工作。Email: zxwang@ mail.iggcas.ac.cn

· 1464 ·

电极与国外相比仍有差距,难以满足高精度电磁探测系统的低极差漂移、低噪声的要求。此外,铅属于 重金属,容易对环境产生污染。

在此背景下,国内一些专家开展了 Ag-AgCl 体 系固态电极的研发工作[15-18],例如申振等[16]用烧 结法制备了全固态 Ag-AgCl 电极,并在海洋电场测 量中开展了性能测试与应用,避免了 Pb-PbCl。电极 的污染问题,且取得了有益的电场测量效果。此类 工作研究并阐述了保持固态不极化电极的极化电位 稳定性的方法,即增大反应界面的交换电流密度,保 证双电层两侧有充足的反应离子。交换电流密度越 大,相同电流在流经时产生的极化电位越小,同时电 极双电层两侧吸附的离子数量更多,外界扩散到双 电层的离子数量相对于双电层两侧的反应离子数量 较小,扩散离子对电极表面的双电层影响减弱,电极 的极化电位越稳定<sup>[19-21]</sup>。李红霞等<sup>[22]</sup>通过在 Ag-AgCl电极中添加石墨烯,引入层状结构进一步增加 了电极的比表面积、增大反应界面的交换电流密度, 缩短了极差稳定时间,减小了电极的极差,提升了电 极稳定性。测试结果表明,加入3%的石墨烯材料 可将电极的极差稳定时间缩短至1h,极差低至70 μV。该方法有效降低了不极化电极的极差,提升了 电极稳定性,为本文研究提供指导与参考<sup>[23-25]</sup>。本 文为进一步降低电场传感器的极差、极差漂移及本

底噪声,提出一种新型石墨烯基电场传感器。通过 攻克基于 Ag-AgCl 体系的石墨烯基稳定电解质凝胶 制备工艺,优化设计基于高分子微孔隔膜的多触角、 多仓式电场传感器结构,减缓了外部离子的扩散影 响,降低了本身的内阻和接触电阻,从而有效降低了 电场传感器极差漂移与本底噪声。

### 1 电场传感器的基本原理与研制需求

要实现低极差、低极差漂移、低噪声的电场传感 器设计,首先需要从电场传感器的基本工作原理和 极化电位的产生机理入手。不极化电极在测量电场 时,利用相距一定极距的一对电极与大地接触,通过 测量不极化电极对之间的电位差,间接测量电场。 理想情况下,假设电极对之间的电场基本均匀,电极 对中点处的电场等于电位差与极距的商。但实际测 量时由于电极对本身存在极化电位和本底噪声,会 在电位差测量时引入误差从而影响电场测量精度, 如图1所示,其中,对交流电磁法而言,极化电位的 影响主要体现在电极对的极化电位差随时间变化而 产生的极差漂移。因此,要提高电场传感器的电场 测量精度,要求电场传感器具有低极差漂移和低本 底噪声。



图 1 电场测量等效电路模型 Fig.1 Equivalent model of electric field measurement circuit

# 1.1 极化电位产生机理

以 Ag-AgCl 体系不极化电极为例,其电化学反应过程如图 2 所示。电极的导电机制是离子导电,通过金属与对应金属阳离子构成氧化还原反应,对实现交流传导<sup>[23]</sup>。稳定条件下电极处于平衡状态,平衡电位计算公式为:

$$E = \varepsilon_0 + \frac{\mathrm{R}T}{nF} \mathrm{ln}c^\circ \quad , \qquad (1)$$

其中:*ε*<sub>0</sub>表示电极的标准电势;R表示理想气体常数,8.314 J/(mlo·K);T表示环境温度;n为化合价;F为法拉第常数;c<sup>°</sup>为稳定条件下的离子浓度。

当外加交变电压时,反应区阴阳离子在电压作 用下发生定向移动,诱导金属、离子和掺杂物构成的 三项反应界面上发生氧化还原反应,从而导致电位 偏离平衡状态,直至再次达到稳定,此时稳定电位计 算公式为:

$$E' = \varepsilon_0 + \frac{RT}{nF} \ln c^s \quad , \tag{2}$$

其中:c<sup>\*</sup>为再次达到稳定时的离子浓度。平衡电位 和稳定电位之差值即为电极的极化电位,计算公式 为:

$$\Delta E = E' - E = \frac{\mathrm{R}T}{nF} \ln \frac{c^{\mathrm{s}}}{c^{\mathrm{o}}} \quad (3)$$

选定电极的电解质反应体系后,电极对的极化 电位大小和极差稳定性主要受离子浓度和温度等变 化因素的影响,尤其是当离子浓度呈现的非线性变 化趋势时,将直接影响电极的极差漂移。要研制低 极差漂移的电场传感器,首先要考虑尽可能减缓离 子的浓度变化。



# 图 2 Ag-AgCl 体系不极化电极的电化学反应过程示意 Fig.2 Schematic diagram of electrochemical reaction process of non-polarized electrode with Ag-AgCl system

#### 1.2 本底噪声产生机理

不极化电极的本底噪声主要来源于电极本身的 内阻及其与大地接触电阻引入的电阻热噪声。如图 1 所示,假设电极 M 的内阻为  $R_{e1}$ 、接触电阻为  $R_{c1}$ , 电极 N 的内阻为  $R_{e2}$ 、接触电阻为  $R_{c2}$ ,各电阻产生的 热噪声分别为:

$$e_{n,R_{e1}} = \sqrt{4kTR_{e1}B_w} \quad , \tag{4}$$

$$e_{n,R_{c1}} = \sqrt{4kTR_{c1}B_w} \quad , \tag{5}$$

$$e_{n,R,2} = \sqrt{4kTR_{e2}B_w} \quad , \tag{6}$$

$$e_{n,R,2} = \sqrt{4kTR_{c2}B_w} \quad , \tag{7}$$

其中:k为玻尔兹曼常数;T为环境温度;B<sub>w</sub>为传感器等效带宽。

则电阻热噪声产生的总噪声功率谱密度为:

$$e_{n} = \sqrt{\frac{e_{n,R_{e1}}^{2} + e_{n,R_{c1}}^{2} + e_{n,R_{e2}}^{2} + e_{n,R_{e2}}^{2}}{B_{w}}} , \quad (8)$$

由于在电场测量时,要求传感器和信号采集系统的 带宽需保持一致,因此,上述电阻产生的总噪声功率 谱密度可等效为:

$$e_n = \sqrt{4kT(R_{e1} + R_{e1} + R_{e2} + R_{e2})}$$
。 (9)  
因此,若要实现低噪声电场传感器设计,主要应  
考虑减小电场传感器的内阻和接触电阻。

# 2 石墨烯基电场传感器研制

优选了电极反应体系,改良了电解质溶液配比, 优化设计了稳定电极结构。因金属 Ag 具有较高电 流交换密度、温度系数适中且环保等优异特性,本文 首选 Ag-AgCl 体系。通过反复试验对比了在不同涂 覆工艺及不同溶液配比、不同酸碱度和不同粘稠度 电解质凝胶情况下,电极的极差和漂移情况。结合 机理研究基础,围绕低极差、低漂移的设计需求,确 定了固体 Ag 电极涂覆工艺和电解质凝胶配比的优 化方向。

#### 2.1 石墨烯基电解质凝胶制备

氧化石墨烯电解质凝胶的形态会随着石墨烯材 料质量比重的变化而变化,粘度和锁水性也随之改 变。为探究氧化石墨烯质量比重对氧化石墨烯电解 质凝胶的影响,制备了4组石墨烯溶液,其中石墨烯 的质量比重分别是1%、2%、3%、5%,再通过添加电 解质及粘稠剂等材料制备石墨烯基电解质凝胶,所 制备出的氧化石墨烯凝胶形貌如图3所示,测试比 对了4种凝胶的锁水性,进而评估凝胶的离子保持 能力。



图 3 不同质量比重的氧化石墨烯凝胶形态 Fig.3 Morphology of graphene oxide gel with different mass ratio

将制备好的凝胶放置于 50 ℃干燥箱内进行干 燥,不同质量比重的氧化石墨烯凝胶随着时间的推 移,水分出现不同程度的挥发(图4)。经过36h的 干燥,当氧化石墨烯质量比重为1%时,损失水分质 量为 196.2 g; 当氧化石墨烯质量比重为 2%时, 损失 水分质量为 172.6 g; 当氧化石墨烯质量比重为 3% 时,损失水分质量为161g;当氧化石墨烯质量比重 为5%时,损失水分质量为168.3g。通过数据可以 看出,当氧化石墨烯比重在3%以下时,保水效果随 着氧化石墨烯质量比重的增加而有所提升,但当氧 化石墨烯的质量比重达到 5% 时,保水效果反而没 有预想的高,此时其保水性高于质量比重为2%的 石墨烯凝胶而低于质量比重为3%的石墨烯凝胶。 经分析得知,过高的氧化石墨烯比重会影响其在水 中的分散效果,并随之影响到凝胶的交联效果。因 此,可通过比对试验方式确定最佳的石墨烯质量比 重,以保证石墨烯基电解质凝胶具备最强的保水性, 进而提升凝胶的离子保持能力。





#### 2.2 多触角电场传感器结构设计

为充分发挥石墨烯基电解质凝胶的性能,降低 电极的极差漂移与本底噪声,还需要研究稳定的电 极结构。本文提出一种如图 5 所示的多仓式、多触 角电极结构,在外壳的侧壁贯穿开设有若干通孔与 大地连通,内壁抵接安装在外壳内腔,用于盛装电解 质凝胶,内壁的四周固接有若干个与外壳通孔对应 设置的触角,以便伸入通孔并与大地接触。利用侧 壁设置的多接触点,增加电极与大地的接触面,增强 电极与大地的接触性,降低电极的接触电阻。

如图 6 所示,该结构利用高分子微孔隔膜将电 极整体分为由反应区、过渡区、缓冲区组成的多仓结 构,高分子微孔隔膜通过支撑架固定于电极内壁的 内测,距离内壁一定宽度处。隔膜内测为反应区,隔 膜外侧为过渡区,凸起的多个触角构成缓冲区。如 此,可通过分区隔离减缓外部离子向电极的反应区 进行扩散,进而有效减缓反应区离子浓度受外部离 子扩散影响而引起的极差变化,增强电极的极差稳 定性,降低电极的极差和极差漂移。







图 6 多触角电场传感器结构俯视分区示意 Fig.6 Overlooking partition diagram of multi-contactor electric field sensor structure

3 石墨烯基电场传感器测试

#### 3.1 石墨烯基电场传感器性能指标测试

3.1.1 石墨烯基电场传感器极差与极差漂移测试

在可密封容器中加入适量的 3.5%浓度 NaCl 溶 液(饱和食盐水),保证所有待测电极的接触角能够 充分浸没在溶液中,容器顶部预留适宜接线端口,一 端连接待测电极对,另一端接入高精度直流电压表。 本文测试中选用精度达到 6 位半的 Keithley 2700 数 字万用表,能够保证数微伏级电压测量精度。设置 数字万用表工作于直流电压测量模式,根据测试需 求,每隔 1 min 记录一次电压值,连续测量 120 h。 测量结束后,导出测试结果数据,利用 Matlab 软件 进行数据处理成图,每个通道测得直流电压的平均 值即为被测电极对的极差,特定时间段内电压的峰 峰值对应该时间段内的极差漂移(如图7所示),例 如连续5天的测量电压峰峰值即为5日的极差漂 移,每日连续24h测量的电压峰峰值即为每日极差 漂移。成图并统计连续5天测量的极差和极差漂移 结果,统计每日极差漂移情况,计算5天连续测量的 5组每日极差漂移的标准差,分析电场传感器的极 差及其极差漂移的稳定性情况。



图 7 极差与极差漂移测试平台 Fig.7 Measurement platform of potential difference and drift

依据测试方案,对所研制的石墨烯基电场传感器的极差和极差漂移进行测试,并与国内主流的商用电极进行比对。按上述数据处理方法处理多次、 多天电极极差和漂移测量的结果,得到如图 8 所示的极差与极差漂移测试比对结果。可知,两对石墨 烯基电场传感器连续 5 天测得的平均极差分别为 40 μV 和 5 μV,远小于商用电极的 1 760 μV;而且, 两对自研石墨烯基电场传感器连续 5 天(120 h)的 极差漂移约为 20 μV,小于商用电极所达到的 50 μV。



如图 9 所示,将截断数据重新成图,以便观察比 对每日连续 24 h 内电极的极差漂移情况,统计连续 5 天极差漂移的变化及标准差结果如表 1 所示。



#### 图 9 每日极差漂移比对结果

Fig.9 Comparison results the potential drift for one day

## 表1 连续5天的每日极差漂移测量结果统计

Table 1 Results of the potential drift per

day for 5 consecutive days

	西日	每日极差漂移结果/µV					标准
坝日	第1天	第2天	第3天	第4天	第5天	差/μV	
	自研电极 1	9.1	5.3	3.1	1.4	7.8	3.2
	自研电极 2	11.0	3.9	9.4	7.1	5.2	2.9
	商用电极	3.7	6.8	15.5	16.7	12.0	5.6

同等测试条件下,同时、同步测量结果显示,自研石墨烯基电场传感器的极差漂移不超过 11 µV/ 24 h,小于商用电极达到的不超过 16.7 µV/24 h,而 且两对石墨烯基电场传感器连续 5 天测得的每日极 差漂移标准差更小,表示其每日极差漂移更稳定。 3.1.2 石墨烯基电场传感器本底噪声测试

借助经计量标定的高精度多路动态信号分析设备开展本底噪声测试,该设备的基本参数指标如表2所示,等效输入本底噪声小于10 nV/√Hz@1 Hz,可用于待测电极的本底噪声测试。具体步骤为:将待测电极对浸入3.5%浓度 NaCl 溶液中实现短路,记录待测电场传感器的内阻与接触电阻,结果如表3所示,将其输入端接入多路动态信号分析设备,在测试电极短路状态下测量本底噪声时间序列,连续采集10 min,求取等效噪声功率谱密度,测试结果如图10 所示。

	表 2	本底噪声测试设备及参数指标
Table 2	Noise	e test equipment and its parameter index

设备名	用途	主要技术指标	实物图片
高精度多路 噪声分析 装置	噪声 测量	本底噪声 优于 10nV∕ √Hz@1Hz; 观测带宽 DC~1000Hz	Realess

•	1468	
	1700	



同等测试条件下,同时、同步测量结果显示,自研石墨烯基电场传感器的本底噪声不超过 25 nV/ √Hz@1 Hz,小于商用电极达到的 61.8 nV/√Hz@1 Hz,通过选用导电性更强的石墨烯材料与多触角的 优化结构,使得自研石墨烯电场传感器的内阻与接 触电阻远小于商用电极,这可能是间接导致传感器 本底噪声低于商用电极的主要原因。

#### 3.2 石墨烯基电场传感器野外探测试验应用

在黑龙江多宝山矿区,使用 DRU-3C 采集站、磁 传感器、石墨烯基电场传感器和商用电极等设备,开 展了石墨烯基电场传感器与商用电极的大地电磁 (MT)探测对比试验。通过采集时长为 24 小时的



MT 试验,测试了石墨烯基电场传感器的野外实际 应用效果。按照标准的大地电磁布极方式进行装置 布设,整体布置如图 11 所示,在北、南、东、西 4 个方 向同一点位分别布置两对石墨烯基电极和一对商用 电极,电极距为 100 m,同时布置三分量的磁场传感 器。

对未经任何处理的原始数据进行电场功率谱和 视电阻率相位计算,绘制电场和视电阻率比对曲线, 如图 12 所示。可知,采集的 24 小时的大地电磁原 始数据经简单时频变换处理后,获取了 0.000 125~ 320 Hz 频段的有效电场及视电阻率相位结果。电 场及视电阻率相位曲线在整个频段内相对平滑,符 合大地电磁数据的基本特点。电场和视电阻率相位 处理结果表明,在 MT 模式下,石墨烯基电场传感器 与商用电极可获取基本一致的电场和视电阻率相位 曲线,验证了石墨烯基电场传感器野外工作的有效









6期

性。进一步分析发现,该测点处视电阻率取值范围为400~2000  $\Omega$ ·m,表明该区域属于中阻区。对应电场信号取值范围为50  $\mu$ V/(km/ $\sqrt{Hz}$ )~100 mV/(km/ $\sqrt{Hz}$ ),以100 m极距换算到电压取值范围为5  $\mu$ V/ $\sqrt{Hz}$ ~10 mV/ $\sqrt{Hz}$ 。电场信号幅度远高于电场传感器的本底噪声,且单日测量时,漂移对其影响也较小。因此,本次试验获得了高质量的原始电场数据,若要充分发挥石墨烯基电场传感器的本底噪声和极差漂移优势,应考虑在接地条件更恶劣、大地电磁信号更微弱的低电阻率区域开展更深入的比对测试。

4 结论及讨论

自主研制石墨烯电场传感器,利用比表面积更 大、交换电流密度更大的 Ag-AgCl 体系石墨烯基电 解质凝胶作为反应浆料,结合隔离性更强、接触性更 优的基于高分子微孔隔膜结构分割的多仓式、多触 角电极结构,有效提升了电场传感器的极差漂移和 本底噪声等性能指标,研制的电场传感器极差漂移 不高于 20 μV/24 h,本底噪声不超过 25 nV/√Hz@ 1 Hz,有效提升了电磁探测系统中电场的测量精度。 在中阻区开展的大地电磁野外实际探测中,研制的 石墨烯基电场传感器获得了频率范围覆盖 0.000 125~320 Hz 的高质量电场数据,验证了其野 外应用效果,但由于该测区信号较强,未能完全发挥 石墨烯基电场传感器的性能优势,下一步工作中将 选择信号较微弱的低电阻率区域开展大地电磁探测 与参数对比试验,以更深入测试石墨烯基电场传感 器的电场测量精度。

# 参考文献(References):

- Cagniard L.Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting [J].Geophysics, 1953, 18(3):605.
- [2] Tikhonov A N.On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust[J].Doklady, 1950, 73(2):295-297.
- [3] 魏文博.我国大地电磁测深新进展及瞻望[J].地球物理学进展,2002,17(2):245-254.

Wei W B.New advance and prospect of magnetotelluric sounding (MT) in China [J].Progress in Geophysics, 2002, 17(2):245-254.

- [4] Egbert G D, Booker J R, Schultz A. Very long period magnetotellurics at Tucson Observatory: Estimation of impedances [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1992, 97 (B11): 15113 – 15128.
- [5] Egbert G D, Booker J R. Very long period magnetotellurics at Tuc-

son Observatory:Implications for mantle conductivity[J].Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1992, 97 (B11): 15099 -15112.

- [6] Prystai A M, Pronenko V O. Improving of electrical channels for magnetotelluric sounding instrumentation [J]. Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems, 2015, 4(2):149–154.
- [7] 席继楼,邱颖,刘超,等.电极极化电位对地电场观测影响研究
  [J].地震地磁观测与研究,2008,29(6):22-26.
  Xi J L, Qiu Y, Liu C, et al. Analysis and study on the influence of polarization potential in measuring geoelectric field[J].Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2008,29(6):22-26.
- [8] 史红军.地电场观测过程中的干扰因素分析[J].东北地震研究,2009,25(2):51-57.
  Shi H J.Analysis on the interference factors in geoelectric field observation[J].Seismological Research of Northeast China, 2009,25 (2):51-57.
- [9] Petiau G, Dupis A. Noise, temperature coefficient, and long time stability of electrodes for telluric observations [J]. Geophysical Prospecting, 1980, 28(5):792-804.
- [10] 陆阳泉,梁子斌,刘建毅.固体不极化电极的研制及其应用效果
  [J].物探与化探,1999,23(1):64-65,71.
  Lu Y Q, Liang Z B, Liu J Y. The development and application of solid nonpolarized electrodes[J].Geophysical and Geochemical Exploration,1999,23(1):64-65,71.
- [11] 宋艳茹,席继楼,刘超,等.一种 Pb-PbCl<sub>2</sub> 不极化电极试验研究
   [J].地震地磁观测与研究,2011,32(6):97-103.
   Song Y R,Xi J L,Liu C, et al.Research on a type of Pb-PbCl<sub>2</sub> non-polarizable electrode[J].Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2011,32(6):97-103.
- [12] 王辉,叶高峰,魏文博.Pb-PbCl<sub>2</sub> 不极化电极的设计与实现[J]. 地震地磁观测与研究,2010,31(3):115-120.
  Wang H,Ye G F,Wei W B.The design and implementation of non-polarizable Pb-PbCl<sub>2</sub> electrodes[J].Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2010,31(3):115-120.
- [13] 王辉,姚硕,魏文博,等.Pb-PbCl<sub>2</sub> 不极化电极在长周期大地电 磁测深观测中的应用效果 [C]//第二届深海研究与地球系统 科学学术研讨会,2012.

Wang H, Yao S, Wei W B, et al. Application effect of Pb-PbCl<sub>2</sub> non-polarized electrode in Long period magnetotelluric sounding observation[C]//Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Symposium on Deep Sea Research and Earth System Science, 2012.

- [14] 王辉,付书计,葛帅寅,等.免维护超低噪声固体不极化电极的研制与性能测试[J].物探与化探,2022,46(3):714-721.
  Wang H, Fu S J, Ge S Y, et al. Development and performance tests of maintenance-free ultra-low noise solid nonpolarizing electrodes
  [J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3):714-721.
- [15] Perrier F E, Petiau G, Clerc G, et al. A one-year systematic study of electrodes for long period measurements of the electric field in geophysical environments [J]. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 1997, 49(11):1677-1696.
- [16] 申振,宋玉苏,王烨煊,等.Ag/AgCl 和碳纤维海洋电场电极的

#### · 1470 ·

探测特性研究[J].仪器仪表学报,2018,39(2):211-217. Shen Z,Song Y S,Wang Y X, et al.Study on the detection characteristics of Ag/AgCl and carbon fiber marine electric field electrodes[J].Chinese Journal of Scientific Instrument,2018,39(2): 211-217.

- [17] Luo W, Dong H B, Ge J, et al.Design and characterization of an ultralow-potential drift Ag/AgCl electric field sensor[C]//The 37<sup>th</sup> Chinese Control Conference (CCC), IEEE, 2018.
- [18] 黄芳丽,曹全喜,卫云鸽,等.Ag/AgCl 电极的制备及电化学性能[J].电子科技,2010,23(6):29-31,34.
  Huang F L,Cao Q X,Wei Y G,et al.The preparation and electrochemical performance of Ag/AgCl electrodes [J].Electronic Science and Technology,2010,23(6):29-31,34.
- [19] Zhang Z M, Hu J, Wang Y Y, et al. Relationship between microstructure of AgCl film and electrochemical behavior of Ag/AgCl electrode for chloride detection [J]. The Journal on Environmental Degradation of Materials and Its Controb, 2021, 184:109393.
- [20] Jin X B, Lu J T, Liu P F, et al. The electrochemical formation and reduction of a thick AgCl deposition layer on a silver substrate[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2003, 542:85–96.
- [21] Cho K R, Kim M, Kim B, et al. Investigation of the AgCl formation mechanism on the Ag wire surface for the fabrication of a marine low-frequency-electric-field-detection Ag/AgCl sensor electrode

[J].ACS Omega,2022,7(29):25110-25121.

[22] 李红霞,宋玉苏,王烨煊,等.石墨烯对 Ag/AgCl 电极水下电场 探测性能的影响研究[J].兵工学报,2019,40(12):2529-2536.

Li H X,Song Y S,Wang Y X, et al.Effect of graphene modification on the detection performance of Ag/AgCl electrode in undersea electric field[J].Acta Armamentarii,2019,40(12):2529-2536.

 [23] 陈闻博,宋玉苏,李红霞,等.石墨烯和粘胶基碳纤维改性 Ag/ AgCl海洋电场电极的研究[J].兵器装备工程学报,2020,41
 (3):173-177.

Chen W B, Song Y S, Li H X, et al. Effect of carbon material modification on Ag/AgCl underwater electric field electrode[J].Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(3):173-177.

- [24] 李红霞,宋玉苏,陈闻博,等.石墨烯改性 Ag/AgCl 电极的表面 特性研究[J].兵器装备工程学报,2020,41(1):184-187.
  Li H X,Song Y S,Chen W B,et al.Study on surface properties of graphene modified Ag/AgCl electrode[J].Journal of Ordnance Equipment Engineering,2020,41(1):184-187.
- [25] 刘余杰,李昉.全固态石墨烯 Ag/AgCl 海洋电场探测电极的制备及性能研究[J].化学工程与装备,2022(10):8-12.
  Liu Y J,Li F.Preparation and Properties of all solid state graphene Ag/AgCl Ocean Electric Field Detection electrode [J]. Chemical Engineering & Equipment,2022(10):8-12.

# R&D and tests of a graphene-based electric field sensor

# KANG Li-Li<sup>1,2,3</sup>, YANG Yong-You<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Zhong-Xing<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Kai<sup>5</sup>, HE Peng<sup>6</sup>, WANG Xu-Zhe<sup>6</sup>, DING Gu-Qiao<sup>6</sup>, LI Zi-Hang<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Key Laboratory of Deep Petroleum Intelligent Exploration and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. College of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 6. Zhongke Yueda (Shanghai) Materials Technology Co., Ltd., Shanghai 201808, China)

Abstract: This study aims to enhance the measurement accuracy of the electric field by reducing the range shifting and background noise of electric field sensors in the electromagnetic detection system. First, it ascertained the design requirements of electric field sensors by investigating the mechanisms of the range drift and background noise. Second, it established the Ag-AgCl-based preparation process for graphene-based stable electrolyte gel. Third, it optimized the multi-cell multi-contactor electrode structure based on polymeric microporous membranes. Finally, it developed a graphene-based electric field sensor characterized by low range drift and background noise. This sensor can retard internal ion diffusion by leveraging the ion retention ability of graphene and the multi-cell structure composed of reaction, transition, and buffer zones. Consequently, the range drift caused by changes in the ion concentration is reduced. The internal and contact resistance of this sensor can be reduced through the conductive ability of graphene and the enhanced contact with the ground via multiple contactors, respectively, thereby reducing the sensor's background noise. The graphene-based electric field sensor developed in this study shows range drift not exceeding 20  $\mu$ V/24 h, and background noise not above 25 nV/ $\sqrt{}$ Hz. This sensor was applied to a 24 h field magnetotelluric sounding test conducted in the Duobaoshan area, Heilongjiang Province, yielding high-quality electric field data in the frequency band of 0.000 125~320 Hz, with the apparent resistivity phase curve aligning with the result of commercial electrodes. Therefore, the graphene-based electric field sensor proves effective in fieldwork.

Key words: electromagnetic detection; electric field sensor; graphene; low range drift; low noise