

浅层多相原位取样器研制与野外试验

施山山¹, 吴丹², 武占斌³, 孙建³, 余俊⁴, 李小洋¹, 张永勤¹, 王文¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300399; 2. 湖北省地质局第一地质大队, 湖北 大冶 435100; 3. 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东 威海 264209; 4. 广东石化有限责任公司, 广东 揭阳 522000)

摘要: 针对现有浅层取样技术存在的取样深度有限、样品采取率不足、作业成本高、设备笨重导致作业区域受限及无法同步采集原状土与流体样品等问题, 以“低扰动、高效率、多相同步”为设计目标, 研制了浅层多相原位取样器。该取样器采用“双管钻进取土样+真空抽吸取流体样”的组合工艺, 通过对取样钻头、土样内管、流体取样器及密封气囊等关键部件进行结构优化与功能集成, 实现了浅层原状土样与原位水(气)样的同步高效采集。同时分析了护壁钻杆起拔阻力, 并研制了相应的轻量化护壁钻杆起拔器。野外试验结果表明, 该取样器在5 m深度范围内土样平均采取率达75%, 成功实现了原位水(气)样的同步采集, 样品无混样、无泄漏。该取样器具有结构轻便、操作简单、成本较低等优点, 适用于狭小空间及重型设备无法进入区域的浅层取样作业, 为浅层多相介质原位同步采样提供了可靠的技术手段。

关键词: 浅层取样; 原位取样; 多相取样; 取样器; 低扰动; 真空抽吸; 野外试验

中图分类号: P634.4⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)03-0067-06

Development and field testing of a shallow multiphase in-situ sampler

SHI Shanshan¹, WU Dan², WU Zhanbin³, SUN Jian³, YU Jun⁴,
LI Xiaoyang¹, ZHANG Yongqin¹, WANG Wen¹

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin 300399, China; 2. The First Geological Brigade of Hubei Geological Bureau, Daye Hubei 435100, China; 3. No.6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Weihai Shandong 264209, China; 4. Guangdong Petrochemical Co., Ltd., Jieyang Guangdong 522000, China)

Abstract: To address the limitations of existing shallow sampling techniques, such as limited sampling depth, low sample recovery rate, high operational costs, restricted accessibility due to heavy equipment, and the inability to simultaneously collect undisturbed soil and fluid samples, a shallow multiphase in-situ sampler was developed with the design objectives of "low disturbance, high efficiency, and multiphase synchronization." This sampler employs a combined process of "dual-tube drilling for soil sampling and vacuum suction for fluid sampling." Through structural optimization and functional integration of key components, including the sampling bit, soil inner tube, fluid sampler, and sealing airbag, the device achieves synchronous and efficient collection of shallow undisturbed soil samples and in-situ water (gas) samples. Additionally, the extraction resistance of the casing was analyzed, and a corresponding lightweight casing lifting tool was developed. Field test results indicate that the sampler achieved an average soil sample recovery rate of 75% within a depth of 5 m, successfully performed simultaneous collection of in-situ water (gas) samples, and ensured no sample cross-contamination or leakage. Featuring a lightweight structure, simple operation, and low cost, the sampler is suitable for shallow sampling operations in confined spaces or areas inaccessible to heavy equipment, providing a reliable technical means for collaborative sampling of shallow multiphase media.

收稿日期: 2025-10-11; 修回日期: 2026-03-12 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.03.008

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项课题(编号: 2024ZD1000807)

第一作者: 施山山, 男, 汉族, 1993年生, 工程师, 探矿工程专业, 硕士, 从事钻探工艺研究及器具研制工作, 天津市东丽区锦鲤道23号, shiss3@sina.com。

引用格式: 施山山, 吴丹, 武占斌, 等. 浅层多相原位取样器研制与野外试验[J]. 钻探工程, 2026, 53(3): 67-72.

SHI Shanshan, WU Dan, WU Zhanbin, et al. Development and field testing of a shallow multiphase in-situ sampler [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(3): 67-72.

Key words: shallow sampling; in-situ sampling; multiphase sampling; sampler; low disturbance; vacuum suction; field experiment

0 引言

随着全国污染源普查、土壤普查等生态环境调查工作的持续推进,对浅层原位土样、水样及气样的需求量日益增大,足量、准确的样品数据已成为调查评价的核心依据。通过分析样品中氮、磷、钾等营养元素的含量,以及重金属、污染物的含量与运移特征,为耕地保护、农业种植结构优化及城市水文地质环境综合评价提供重要支撑,服务于乡村振兴等国家战略^[1-3]。

国外在浅层原位取样领域凭借多年来的技术研发与积累,已经取得了丰硕的成果,特别是在浅层钻进工艺方面,形成了回转、直推、冲击、声波等系列钻进技术。以荷兰皇家Eijkelpkamp公司研发的SRS声波钻机为例,该钻机可以实现50 m以浅的土层快速成孔,通过声波高频振动结合回转动力驱动钻头切入土层,钻进效率更高、土层扰动更小^[4]。在流体取样方面,国外已经实现了单一化采集到分层采集的技术迭代升级。例如,加拿大Solinst 425型非连续地下水采样器可以获取水位以下150 m深度的流体样品,取样器在下入前打压充满气体,防止流体进入,下至设计深度后释放压力,使采样区的流体充满取样器。

目前,国内浅层取样主要采用探针取样、大直径钻孔取样、人工挖掘探槽取样等工艺方法^[5-9]。其中,探针取样受尺寸限制,取样深度和样品获取量均不足;大直径钻孔取样虽能满足深度和取样量要求,但存在作业成本高、工艺流程复杂、设备笨重等问题,难以在森林厚腐殖土、软质农田等重型设备

无法进入的区域开展高效作业^[10];传统浅层取样钻机则以获取土样为主,无法实现原位水(气)样的快速同步采集^[11-12]。

针对现有技术的不足,本文以“低扰动、高效率、多相同步”为设计目标,研制了浅层多相原位取样器,通过优化取样结构与作业流程,实现了土样、水(气)样的同步高效采集,并通过野外试验验证了其可行性与可靠性,为浅层多相原位取样提供了新的技术方案。

1 浅层多相原位取样器设计

1.1 总体设计思路

取样器核心设计目标是同步获取浅层低扰动原状土样与原位水(气)样,采用“双管钻进取土样+真空抽吸取流体样”的组合工艺。具体流程如图1所示:(1)利用振动冲击法钻进成孔,通过双管钻具进行无循环钻进,使土样导入内管,从而实现低扰动土样获取;(2)将护壁钻杆保留在孔内护壁,以避免孔壁坍塌污染原位流体,通过提管工具取出内管与土样;(3)下入清土管至取样钻头底部清理遗留在孔底的土样,使地层流体能够顺利自钻头中心通道进入护壁钻杆内;(4)适当上提护壁钻杆,之后通过抽吸管线和充气管线将流体取样器穿过外管下放至设计深度,利用密封气囊封隔护壁钻杆上部空间,通过真空抽吸形成负压,促使原位水(气)样快速进入取样管;(5)取样完成后,通过专用接头转移样品,确保取样器重复使用与样品无泄漏。

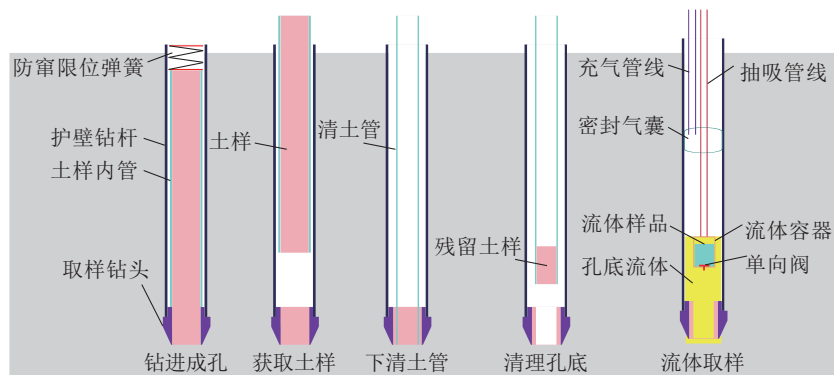


图1 多相原位取样器作业流程示意

Fig.1 Schematic diagram of the operation process of the multiphase in-situ sampler

取样器整体采用轻量化设计,配套 Ø60 mm 规格核心部件及辅助设备,适用于 5 m 以浅的土层取样,具体参数见表 1。

表 1 取样器核心参数
Table 1 Core parameters of the sampler

项 目	长度/mm	外径/mm	内径/mm
钻头	140	60	38
钻杆	1000	58	49
土样内管	937	45	39
充气软管	6000	5	2
抽气管线	6000	7	5
密封气囊	适配内径 Ø49 mm 钻杆,改造自 DN50 堵水气囊		
真空泵	最大可达 -0.09 MPa(相较于大气压)		
单向阀	设计开启压力 >0.05 MPa		
动力头	选配 Y27P 汽油型冲击器,质量 25 kg,冲击频率 40.83 Hz		

1.2 关键部件优化与设计

1.2.1 取样钻头优化

为降低钻头贯入阻力、减少土样扰动,对传统钻头进行结构优化:(1)减小外锥面锥度,增强冲击压力下的地层切入能力;(2)减小底唇面厚度,降低对孔底原状土的挤压扰动。现场试验表明,改进后的小锥度钻头在相同区域的钻进速度较传统大锥度钻头显著提升,土样完整性得到有效保障。钻头尺寸的设计,同时需要考虑土样内管标准件的规格。试制了 12°、13.5°两种不同锥度的取样钻头,通过试验对比发现小锥度取样钻头的钻进效率更高。

1.2.2 土样内管设计

取样器的整体设计思路为“双管钻进取土样+真空抽吸取流体样”的组合工艺,采用双管钻进取土样的目的是为了确保土样的原位性,同时便于观察。金属钻杆作为外管传递冲击力,随钻头一同钻进,同时也起到护壁、防止混样的作用;内管选用透明材质的 PC 管作为土样的容器,PC 管具有高强度和便于观察的特点。例如,针对上述设计的锥度为 12°、前端内径为 38 mm 的取样钻头,选配了 Ø45 mm 规格(内径为 39 mm)的标准 PC 管,两端均加工母螺纹。土样内管上端连接送入杆件,并基于送入杆件与防窜限位弹簧实现轴向自调节式限位,防窜限位弹簧始终处于预压缩状态。此外,为了保障松散

地层土壤样品的采取率,可根据需要在土样内管下端安装拦箕。

1.2.3 流体取样器设计

流体取样装置采用“双密封快速接头-取样管-单向负压阀”的组合结构(图 2),包括双密封快速接头、变扣接头、水(气)样取样管、单向负压阀等,核心目标是确保样品原位性与无泄漏转移:(1)取样管为透明高强度亚克力材质,便于实时观察样品采集情况,两端采用细扣螺纹连接,保障密封性能与取样管整体强度;(2)为避免样品回流,下端设置单向负压阀,达到设计压差时开启,可进行采样,同时内置滤网,防止泥沙堵塞流道;(3)上端双密封快速接头可快速连接真空袋,实现样品无泄漏转移,同时支持取样器重复使用,降低作业成本。受限于当前流体取样器的结构与原理,该取样器主要针对特定深度的原位流体(以水为主,可能含气)进行取样,尚不能实现严格意义上的水、气样品分离与单独获取。



图 2 流体取样器实物

Fig.2 Physical diagram of the fluid sampler

假设孔内地层水密度为 1.03 g/cm^3 ,不考虑地层孔隙水压力的影响,孔底静水压力为:

$$P = \rho gh \quad (1)$$

式中: P ——静水压力; ρ ——地层水密度; g ——重力加速度; h ——静液柱高度。

由式(1)可得,深度 5 m 处的静水压力为 0.05 MPa,小于流体取样器单向负压阀设计的开启压力,即流体取样器在下入过程中流体不会进入取样器,从而确保了设计深度的分层取样。此外,当孔内有承压水时,孔底流体压力可能高于负压阀开启压力,可通过抽吸管线向流体取样器内注入气体,确保流体取样器内部压力高于外部流体压力,防止流体进入。当流体取样器下至设计深度时,地表使用真空泵通过抽吸管线抽空管线及流体取样器内的气体,使护壁钻杆内的地层流体通过单向负压阀进入取样管中。

1.2.4 密封气囊设计

密封气囊用于封隔护壁钻杆内环空,避免地表

空气或上部流体混入样品,实现分层取样,其改造设计(图3):(1)在调研基础上,选用DN50规格城市污水管道堵水气囊为基础,适配钻杆内径 $\Phi 49$ mm;(2)采用 $\Phi 6$ mm薄壁金属管作为中心管,轴向贯穿气囊形成抽气和注气通道;(3)在气囊上端面加工小孔并安装 $\Phi 4$ mm宝塔接头,用于连接充气管线;(4)中心管、宝塔接头与气囊端面连接处采用垫片、螺母紧固,再配合橡胶专用胶水密封,确保充气加压时无漏气现象,密封时最高充气压力可达0.25 MPa。改造后的密封气囊包括双密封快速接头、中心管、DN50堵水气囊、宝塔接头、充气管等。参考堵水气囊使用规范,其内部压力值只需略高于钻杆内流体压力即可实现有效密封。根据上述计算,深度5 m处静水压力为0.05 MPa,则充气压力 >0.05 MPa即可实现有效密封,考虑打气筒性能及密封可靠性、地层承压水压力,充气压力可选择0.10 MPa或更高数值。



图3 基于DN50堵水气囊改造的密封气囊
Fig.3 Sealing airbag modified based on DN50 water-blocking airbag

2 护壁钻杆起拔阻力分析

针对淤泥、黏土等松软土层取样钻进时,由于孔壁缩径紧贴护壁钻杆,后续起拔护壁钻杆时阻力极大,因此有必要针对护壁钻杆的起拔阻力进行分析计算,以优选合适的护壁钻杆起拔方法。侧摩阻力计算公式:

$$F = f_s A_s \quad (2)$$

$$A_s = \pi DL \quad (3)$$

$$f_s = \alpha S_u \quad (4)$$

式中: F ——总侧摩阻力; f_s ——单位面积侧摩阻力; A_s ——护壁钻杆侧面积; D ——护壁钻杆直径; L ——护壁钻杆与土体接触长度; α ——黏附系数,通常为0.3~0.6; S_u ——介质的不排水抗剪强度。

根据上述设计参数,护壁钻杆直径为58 mm,假设钻头最大外径与钻杆外径相同,护壁钻杆与土

体的接触长度为5 m。根据相关规范,黏土层的不排水抗剪强度取25 kPa、黏附系数取0.3。计算可得,5 m长的钻杆在软塑性黏土中起拔的阻力约6.8 kN,可使用千斤顶或加力杠杆两种方式辅助起拔。其中,常规小型液压千斤顶起升能力超过20 kN,质量仅2.1 kg,可以满足当前工况下钻杆起拔的需求。此外,根据杠杆原理,假设靠近护壁钻杆一侧的力臂为0.1 m,另一侧的力臂为1 m,则仅需0.68 kN的下压力即可实现护壁钻杆起拔。据此研制了护壁钻杆起拔器,如图4所示,现场通过1~2人共同下压加力杠杆末端即可实现护壁钻杆起拔。



图4 试验过程中使用的护壁钻杆起拔器

Fig.4 The casing lifting tool used during the test process

3 野外试验

3.1 试验区域概况

试验区位于河北省廊坊市开发区某河道河床,该区域浅覆盖层土质松软、水网密布、孔内出水快,为浅层取样典型场景,可有效验证取样器在复杂水文地质条件下的工作性能。完成了深度5 m的取样试验,同步采集原状土样与原位水样。

3.2 试验流程

野外试验流程如图5所示。

(1)钻具组装与钻进取土:连接取样钻头、护壁钻杆、土样内管及动力头,启动Y27P型汽油型冲击器,以高频锤击方式将护壁钻杆与取样管钻入地层,原状土进入土样内管;单根护壁钻杆钻进结束后,通过送入杆起出土样内管,若取样深度超过1 m,使用多根送入工具及防窜限位弹簧进行限位,避免内管窜动。

(2)流体取样器下放与密封:起出土样内管后,沿外管通孔下放流体取样器至孔底,通过高压打气筒向密封气囊充气至0.1 MPa以上,确保密封气囊与护壁钻杆内壁紧密贴合,实现孔段上下封隔。

(3)真空抽吸取样:开启真空泵,排出抽气管线



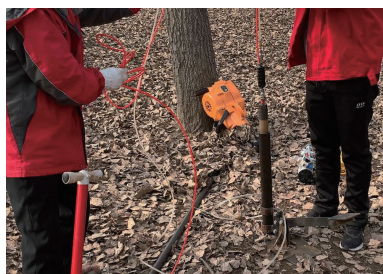
(a)钻进取土



(b)流体取样器下放



(c)真空抽吸取样



(d)上提流体取样器

图5 野外试验流程

Fig.5 Field experiment procedure

与水(气)样取样管内原有空气,当管内外压差达到设计值时,单向负压阀开启,孔底水(气)样在压差作用下进入取样管。

(4)样品转移与设备回收:关闭真空泵,上提流体取样器,通过上端双密封快速接头将水(气)样转移至真空袋;起拔全部护壁钻杆,准备下一孔段取样。

3.3 试验结果分析

试验时共取样钻进5回次,每回次进尺1 m。每

回次取出土样后,立即下入流体取样器获取该回次孔底的水(气)样。土体与流体样品的采集情况见表2,土壤样品见图6,流体样品见图7。

表2 野外试验取样结果统计

Table 2 Statistical results of field experiment sampling

取样深度/m	钻进进尺/m	土样长度/m	土样采取率/%	流体样品获取情况
1	1	0.50	50	未见流体
2	1	0.65	65	少量流体
3	1	0.80	80	少量流体
4	1	0.88	88	满管
5	1	0.92	92	满管

注:前3 m取样时,孔底出水量较少。



图6 野外试验获取的部分土壤样品

Fig.6 Some soil samples obtained from the field experiment



图7 野外试验获取的部分流体样品

Fig.7 Partial fluid samples obtained from the field experiment

试验结果表明:(1)本次野外试验中,土样采取率随深度增加逐步提升,前2 m因表层土质松散,采取率偏低(50%~65%),后3 m土质密实度提高,采取率稳定在80%以上且逐步提高,5回次土壤样品采取率平均达75%;(2)流体样品采集受地层出水速率影响显著,前3 m地层出水较慢,故未获取到足量水样,后2 m孔底出水快,成功采集满管原位水(气)样;(3)所有样品均无混样、泄漏现象,水(气)样原位性良好,土样扰动程度低,验证了取样器密封可靠性与样品采集质量。试验过程中,主要针对土壤样品、地层水样品获取开展了试验,未针对地层内气体样品开展单独试验,但水样的成功获取验证了流体取样器原理的可行性与可靠性,理论上可实现对气体样品的同步获取。

4 结论与展望

(1)研制的浅层多相原位取样器创新性地实现了浅层原状土样与原位水(气)样的同步高效采集,解决了传统技术取样深度有限、成本高、设备笨重及无法同步取流体样品等问题。

(2)双密封组合式流体取样器保障了样品原位性与无泄漏转移,改造的密封气囊实现了孔段可靠分隔,整体满足浅层取样技术要求。

(3)野外试验验证了取样器的实用性与可靠性,在5 m深度范围内,土样平均采取率75%,并成功获取水(气)样,该取样器结构轻便、操作简单,适用于狭小空间及重型设备无法进入区域的取样作业。

(4)后续将针对试验中暴露的问题对取样器进行优化改进:进一步增强密封气囊的耐压性能与稳定性,确保复杂地层条件下的密封可靠性;优化钻头结构与钻进参数,并增加拦簧机构,以提高表层松散土层的土样采取率;研制以滚珠丝杠为基础的起拔器,通过直流手电钻驱动实现护壁钻杆的省力高效起拔;拓展取样深度范围,开展10 m以浅地层的取样试验,为环境地质调查、农业地质调查等提供更高效的技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 周杰.浅覆盖区深层土壤化探异常识别及成矿预测研究——以张八岭-管店地区为例[D].合肥:合肥工业大学,2018.
ZHOU Jie. Geochemical anomaly identification and mineralization prediction of deep soil in shallow coverage area —A case study in Zhangbaling-Guandian Area[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [2] 冉灵杰.浅层土壤环境取样钻进技术研究[D].北京:中国地质大学(北京),2019.
RAN Lingjie. Research on drilling technology of soil environment sampling in shallow layer[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2019.
- [3] 王青薇,钟道旭,尹业新,等.砂土卵石地层高频冲击直推半合管取样工艺应用研究[J].钻探工程,2022,49(4):111-116.
WANG Qingwei, ZHONG Daoxu, YIN Yexin, et al. High frequency impact direct push split tube sampling technology for sandy pebble layers [J]. Drilling Engineering, 2022, 49 (4) : 111-116.
- [4] 孙平贺.直推钻探技术在污染场地调查中的应用现状研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2021,48(1):95-102.
SUN Pinghe. Study on application status of direct push drilling technology in contaminated site investigation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2021, 48(1):

- 95-102.
- [5] 尹飞,陈天红,徐恒.内蒙古草原半干旱浅覆盖区地质调查钻探取样工艺[J].现代矿业,2017,33(3):26-34.
YIN Fei, CHEN Tianhong, XU Heng. Drilling sampling process of geological investigation of the semi-arid shallow coverage of Inner Mongolia Grassland[J]. Modern Mining, 2017, 33(3): 26-34.
- [6] 马新宁.工程地质勘察钻探中的取样问题[J].科技展望,2016,26(1):33.
MA Xinning. Sampling problems in the engineering geological investigation drilling[J]. Science and Technology, 2016, 26(1):33.
- [7] 岳永东,谭春亮,冉灵杰,等.TGQ-200RC型多工艺自动化钻机的研制与应用[J].钻探工程,2024,51(5):101-107.
YUE Yongdong, TAN Chunliang, RAN Lingjie, et al. Development and application of TGQ-200RC multi-technique automatic drill[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5):101-107.
- [8] 渠洪杰,卢猛,谭春亮,等.基于构造解析及孔内成像技术的以钻代槽绿色勘查技术试验应用[J].钻探工程,2025,52(4):103-110.
QU Hongjie, LU Meng, TAN Chunliang, et al. Experimentation and application of green exploration by drilling instead of trenching based on structural analysis and borehole imaging technology[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(4):103-110.
- [9] 赵洪波,宋殿兰,卢猛,等.浅层钻探技术在海南某矿区化探取样中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014(2):18-21.
ZHAO Hongbo, SONG Dianlan, LU Meng, et al. Application research on shallow drilling technology for geochemical exploration sampling in a mining area of Hainan[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014(2):18-21.
- [10] 岳永东,谭春亮,卢倩,等.锂电池电动冲击取样钻机及其配套工具的研制[J].钻探工程,2022,49(3):44-50.
YUE Yongdong, TAN Chunliang, LU Qian, et al. Development of the lithium battery-driven impact sampling drill and complete accessories[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 44-50.
- [11] 宁国军,王书辰,申大元.便携式浅层取样钻在矿产勘查中的应用[J].采矿技术,2015,15(4):106-108.
NING Guojun, WANG Shuchen, SHEN Dayuan. Application of portable shallow sampling rig in mineral exploration[J]. Mining Technology, 2015, 15(4):106-108.
- [12] 周增辉,杨振,刘锐,等.半干旱草原浅覆盖区手持钻机化探取样技术的应用及探索——以内蒙古拜仁达坝银铅锌矿区为例[J].地质与勘探,2021,57(2):360-369.
ZHOU Zenghui, YANG Zhen, LIU Rui, et al. Application of the geochemical exploration sampling technology using hand-held sampling drilling tools in semiarid grasslands with thin cover—An example of the Bairendaba Ag-Pb-Zn deposit in Inner Mongolia[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(2): 360-369.

(编辑 王跃伟)