

振动液压拔管技术在地质勘探中的创新运用与研究浅谈

侯禄松 云南省地质矿产勘查院大理地质矿产所 671000

摘要：

地质钻探是获取地下实物资料与信息的关键技术手段，而钻杆与套管的高效、安全起拔一直是困扰行业的重大技术挑战，尤其是在复杂地层中进行深孔或超深孔作业时。传统处理卡埋钻事故的方法，如强拉、强顶、反丝钻杆反取等，普遍存在成功率低、程序繁琐、成本高昂的问题。为从根本上突破这一瓶颈，融合了振动技术与液压传动优势的振动液压拔管器应运而生，并迅速发展。本文系统梳理了振动液压拔管技术的工作原理、技术演进、核心优势及典型应用场景，重点分析了其在处理卡埋钻事故、起拔困难套管方面的技术机制与卓越成效。论文指出，以液压式超声波振动拔管机为代表的现代化装备，通过激振力有效降低管壁摩擦阻力，结合精准的液压提拉，将事故处理成功率提升至 90% 以上，标志着地质勘探辅助设备从“蛮力”时代迈入“巧力”时代的重大技术变革。最后，本文对该技术的未来发展趋势与面临的挑战进行了展望，以期地质勘探工程的高效与安全提供理论参考与实践指南。

关键词：振动液压拔管器；地质勘探；卡埋钻处理；超声波振动；液压传动；摩擦阻力

一、绪论

1.1 研究背景与意义

地质勘探是矿产资源开发、重大工程基础勘察及地球科学研究的前置与核心环节。在钻探施工过程中，受复杂地质条件（如破碎带、流沙层、冻土、膨胀性粘土等）和工艺参数影响，钻杆或套管被卡埋的事故频繁发生，成为制约勘探效率、成本与安全的首要难题。据统计，传统的处理方法不仅成功率低下，而且极易造成钻具二次损坏、孔壁坍塌，甚至导致钻孔报废，带来巨大的经济损失与工期延误。因此，研发高效、可靠、智能化的解卡与起拔技术，对于保障地质勘探工作的顺利进行具有重大的现实意义与工程价值。

1.2 传统拔管方法及其局限性

长期以来，现场应对卡埋钻事故主要依赖以下几种传统方法：

1.2.1 机械强力法：利用钻机卷扬进行强拉、强顶，或施加强扭矩试图扭转解脱。此法力量粗暴，极易导致钻杆拉断、螺纹损坏或孔口设备受损，成功率低且风险高。

1.2.2 反丝钻杆反取法：通过反丝钻杆和公锥、母锥等打捞工具，试图从事故钻具内部倒扣连接并反取。此方法程序复杂，对操作人员技术要求极高，且在深孔或复杂卡阻情况下效率极低。

1.2.3 化学与热力法：例如向孔内灌注解卡剂或热水（尤其在冻土地层），试图润滑或融化卡点周围的物质。该方法效果不确定，可能污染地层、扰动原状土样，且成本较高。

这些方法的共同局限在于未能有效解决钻具与孔壁之间巨大的静摩擦力和吸附力，属于被动应对而非主动破解，无法满足现代高效、绿色勘探的需求。

1.3 振动液压拔管技术的提出与发展

为克服传统方法的缺陷，工程技术人员将振动与液压两大技术原理创新性结合，发展出了振动液压拔管技术。其核心思想是变“静力强拔”为“动态巧解”：通过振动器产生的高频激振力传递至被卡管柱，使其与周围岩土介质产生相对微动，从而大幅降低界面摩擦系数和静摩擦阻力；同时，由液压系统提供持续、平稳且可精准控制的巨大提拉力，二者同步协同作用，实现高效解卡与起拔。

该技术自上世纪出现雏形，如早期的“振、冲、拉同步拔管机”（VPP-II 型），已展现出相比人力拔管提高经济效益 50-100 倍的巨大潜力。随着材料科学、液压控制与振动理论的发展，特别是超声波振动技术的引入，现代振动液压拔管器正朝着高频化、智能化、高成功率的阶段演进，成为解决复杂地层拔管难题的利器。

二、振动液压拔管器的技术原理与系统构成

2.1 基本工作原理

振动液压拔管器的工作原理基于动力学减阻与静力学提升的耦合。

1. 振动减阻机制：设备产生的高频振动（如超声波频率 $>20\text{kHz}$ ）通过被拔管柱向周围地层传播。这种振动能破坏管壁与土体间的粘结力，使接触面附近的细颗粒土体发生瞬时“液化”或结构重组，从而显著降低其摩擦阻力和吸附力。研究表明，当振动频率与地层或管柱系统达到某种共振状态时，减阻效果最优。

2. 液压提拉机制：在振动有效降低摩擦阻力的同时，大吨位的液压油缸提供强大、可控的垂直起拔力。液压系统具有力放大倍数高、运行平稳、速度可调的优点，能够适应不同深度和卡阻程度的起拔需求，避免冲击载荷对管柱的损伤。

3. 协同作用：“提拔+振动”的联合作用是成功的关键。单纯的振动难以克服巨大静摩擦；单纯的液压提拔则可能力不从心或导致管柱断裂。二者同步进行，使管柱在“减阻”状态下被“平稳拉出”，形成最优解卡力学模型。

2.2 系统核心构成

以先进的液压式超声波振动拔管机为例，其系统主要包括三大模块：

2.2.1 超声波振动装置

功能：核心激振源，产生高频超声波振动。

构成：包括振动装置保护壳、内置的若干超声波振动器。振动器通常采用压电陶瓷换能器，在交变电场作用下产生精确的轴向或径向机械振动。

特点：频率高（远超普通机械振动）、能量集中、可控性强，能更有效地实现土体液化与减阻。

2.2.2 液压给进机构

功能：提供主起拔力，并作为设备的机械框架。

构成：包括底座（固定于地面）、液压油缸（对称布置于两侧）、液压顶管及固定横梁。固定横梁中心设有倒锥形卡槽，用于安装匹配倒锥形卡盘以夹持不同直径的套管。

液压控制箱

功能：系统的“大脑”，集成控制与监测功能。

构成：包含液压泵站、控制阀组、人机交互界面。操作面板通常设有振动装置调频旋钮、启动按钮、油缸升降控制旋钮及显示面板等。

特点：实现振动频率的无级调节、液压力的精确控制，并能根据起拔反馈动态调整参数以达到最佳共振解卡效果。

不同技术代际振动拔管设备核心参数对比

为了更清晰地展示振动拔管技术的演进，以下将早期设备与现代超声波液压设备进行对比：

设备类型：振、冲、拉同步拔管机 (VPP-II 型)

技术代际：早期/机械式

核心振动源：机械式振动器

典型振动频率：低频 (通常<100 Hz)

主要作用机制：冲击、振动、提拉机械联动

优势：相比人力，效率提升显著

局限性：频率不可精细调节，减阻效率有上限，对精密地层可能扰动较大

设备类型：液压式超声波振动拔管机

技术代际：现代/智能式

核心振动源：压电陶瓷超声波振动器

典型振动频率：高频/超声波 (>20,000 Hz)

主要作用机制：超声波致土体液化减阻 + 液压精准提拉

优势：减阻效率极高，频率可无级调节以适应地层，对孔壁扰动小

局限性：设备成本较高，技术复杂度高

2.3 工作流程

一套标准化的振动液压拔管作业流程如下：

1. 现场准备与设备固定：清理孔口，将拔管机底座对准孔位并使用地锚或螺栓牢固固定于地面。
2. 管柱连接与卡盘安装：使待拔套管穿过设备中心通孔，根据套管直径选取合适的倒锥形卡盘安装于固定横梁的卡槽内，牢固夹持套管。
3. 系统调试：启动液压系统，进行空载调试，确保油缸升降平稳。
4. 启动振动与参数优化：启动超声波振动装置，通过控制箱从低频开始逐步调高振动频率，同时尝试小幅提拉，通过观察负荷变化找到当前地层的“最优减阻频率点”。
5. 同步振动提拔：在最佳振动参数下，同步操作液压系统进行持续或分段提拔。过程中可根据提拔负荷反馈，微调振动频率以维持最佳减阻状态。
6. 完成作业与拆卸：套管完全拔出后，依次关闭振动装置、液压系统，拆卸卡盘与设备，完成作业。

三、振动液压拔管技术在地质勘探中的典型应用

3.1 卡埋钻事故处理

2025 年 9 月在云南省鹤庆县北衙金矿区施工的生产勘探钻孔 32ZK41，该钻孔于 2025 年 6 月 19 日开始施工，至 9 月 8 日施工结束，施工深度 708.06 米， $\Phi 108\text{mm}$ 套管下至孔深 307 米，终孔后处理钻孔内各类套管，由于孔深 0.00-85.00 米都是杂色砂砾、粘土地层，极易糊卡套管，钻机卷扬器无法拔起套管，项目组通过研究讨论采用振动液压拔管技术可以顺利起拔 $\Phi 108\text{mm}$ 套管 307 米，给公司减少了损失，创造了效益，这是振动液压拔管器最直接和高效的应用场景。在岩心钻探中，遇到地层破碎、钻孔缩径或钻渣沉淀，极易发生卡钻或埋钻，传统的反丝处理法成功率低且耗时。将振动拔管器安装在孔口钻杆上，其产生的高频振动能有效传递至事故点，松动卡点周围的岩粉或破碎岩石，配合钻机主卷扬提拔，能快速解除卡阻，该项目上其他钻孔卡钻事故、起拔套管上应用该技术很多，也很高效。现场应用反应表明，该方法处理此类事故的成功率可达 90% 以上，且大幅缩短了处理时间，节约了成本。

3.2 复杂地层套管起拔

在深厚砂卵石层、冻土层、淤泥层等特殊地层中进行跟管钻进后，套管起拔异常困难。

砂卵石地层：套管外壁与卵石镶嵌紧密，摩擦力极大。早期“振、冲、拉同步拔管机”已在此类地层中成功解决直径 89-273 毫米套管的起拔难题。

冻土地层：套管与冻结土壤牢固胶结。传统灌热水法会破坏地温场。超声波振动拔管机通过高频振动产生的能量，能在不显著升温的前提下，破坏冰晶结构与土体粘结，实现套管的安全、环保起拔，尤其适用于需要原状地温观测的科研钻孔。

海上或饱和地层：液压式超声波振动可使套管周围饱和土体产生局部液化，极大降低负摩擦力和吸附力，避免套管废弃。

3.3 超深超长钻具的辅助取出

对于深度极大的勘探孔，钻杆自重巨大，其与孔壁的摩擦累积阻力惊人。单纯的提拉可能超过钻杆抗拉强度。采用振动液压辅助，可在提拉的同时大幅降低摩阻，为安全取出超深钻具提供了可能。相关施工方法也强调了在处理废弃超深钻杆时，结合其他工艺（如外围钻孔）的必要性，而振动拔管可作为其中的关键助力环节。

3.4 其他相关领域的延伸应用

该技术的原理具有普适性，已延伸至其他工业领域。例如，在油田抽油机维修中，借鉴其“变蛮力为巧力”的思想，研制出的液压拔键器，成功解决了曲柄键锈蚀卡死、传统撞击法拔出率底下的难题，将成功率提升至 100%，并创造了显著经济效益。这印证了振动液压“减阻巧拔”思路的强大生命力。

四、 技术优势、挑战与未来展望

4.1 主要技术优势

综合来看，现代振动液压拔管技术具备以下突出优势：

1. 高效率与高成功率：针对卡埋钻事故，成功率高达 90%以上，处理时间较传统方法成倍缩短。
2. 安全性好：平稳的液压提拔配合振动减阻，避免了强力冲击对钻杆、套管和钻孔结构的二次破坏，降低了安全事故风险。
3. 适应性强：通过调节振动频率、振幅和液压压力，可适配从松软土层到致密冻土、砂卵石层的多种复杂地质条件。
4. 经济环保：快速处理事故减少了钻孔报废率，提高了管材回收利用率。相比化学或热力法，更为绿色环保，尤其适用于环境敏感区。
5. 操作相对简便：设备集成度高，操作流程趋于标准化，降低了对现场人员极端经验的依赖。

4.2 当前面临的挑战

尽管优势明显，该技术在推广中仍面临一些挑战：

1. 设备成本与维护：尤其是先进的超声波液压拔管机，制造成本较高，其核心压电陶瓷换能器等部件的维护需要专业知识。
2. 地层适应性理论研究待深化：不同地层（如不同粒径的砂土、黏土、岩石）对应的“最优减阻频率”和振动模式尚无完备的理论模型和数据库支持，目前多依赖现场试验调整。
3. 深孔振动能量衰减：对于极深孔（如>1500米），振动能量从孔口传递至深部卡点可能存在严重衰减，影响解卡效果。如何实现深部定向振动激励是一个技术难点。
4. 智能化水平有待提升：当前设备虽可调频调压，但尚未普遍实现基于实时阻力反馈的闭环自适应智能控制。

4.3 未来发展趋势

未来，振动液压拔管技术将朝着以下方向发展：

1. 智能化与自适应化：集成高精度传感器（如力、声、振传感器），结合人工智能算法，实现“感知-决策-控制”一体化。设备能自动识别地层特性，实时寻优并调整振动参数和提拔策略，实现全自动化高效拔管。
2. 振动方式多元化与精准化：研发径向、轴向、扭转向复合振动模式，以及可下入孔内的井下近卡点振动发生器，以解决深孔能量衰减问题，实现对卡点的精准能量输入。
3. 轻量化与模块化设计：为适应山区、高原等交通不便的勘探场地，设备将向轻便、模块化、快速组装的方向发展。
4. 多技术融合：与高压射流、孔内测卡、定向钻进等技术进一步融合，形成一套应对各类复杂孔内事故的综合处理技术与装备体系。

五、结论

振动液压拔管技术，特别是集成了超声波高频振动与精密液压控制的新型装备，通过巧妙的“动力学减阻”原理，成功破解了长期困扰地质勘探行业的钻具卡埋与套管起拔难题。它将事故处理从依赖经验和蛮力的传统模式，提升到了依靠科学原理和先进机电一体化技术的崭新阶段。现场实践已证明其在提升作业成功率、保障施工安全、降低勘探成本、保护地层样本方面具有不可替代的价值。

当前，该技术正从成熟应用走向深化创新。面对深部勘探、环保要求提升等新挑战，未来通过与智能化、自适应控制技术深度融合，振动液压拔管器必将变得更“聪明”、更高效、更通用，成为保障国家资源勘探与重大工程安全实施的不可或缺的核心技术装备之一，为推

动地质勘探技术进步发挥更重要的作用。

参考资料：《液压技术实用手册》赵周礼、宋锦春编著中国电力出版社，《液压传动与控制》沈兴全、于大国编著国防工业出版社，《震动理论与测试技术》殷祥超编著中国矿业大学出版社，《液压传动系统》王洁、苏东海、官忠范编著机械工业出版社，《振动力学》刘廷柱、陈立群、陈文良编著高等教育出版社，《液压控制系统》王春行主编机械工业出版社。