地质岩心钻孔轨迹控制技术研究进展

潘德元[1]，熊亮[2*]，王杰[1]，蔡隽[1]

1. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心，长沙 410600；
2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局，广州 517000

第一作者，E-mail：pandyice@163.com

* 通信作者，E-mail：36.8du@126.com

2024-07-05 收稿；2024-09-29 修回；2024-09-30 接受

基金项目：中国地质调查局项目(DD20240012)；国家重点研发计划 (2021YFB3401400)

中图分类号：P634.5　　文章编号：2096-8523(2026)01-0147-13　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240373

摘　要：地质岩心钻探是地质勘查的重要技术手段之一，其中钻孔的实钻轨迹是钻孔质量的重要参数，不仅影响着钻探施工时的孔内安全，也关系着地质勘查的质量和精度。地质岩心钻探中具有钻孔直径小、管柱强度低、要求连续地质取心等限制条件，导致地质岩心钻孔轨迹控制难度大。通过系统梳理地质岩心钻孔的轨迹控制方法，主要为以下几个方面：初级定向孔技术以完成目的层取心为首要目的，分析了钻孔倾角、方位、位移等参数的设计方法和随深度变化情况，明确了该技术的适用条件和缺点，为初级定向孔技术在 500 m 以浅钻孔施工使用提供了思路，同时指出深孔应配合其他措施使用；围绕地质钻探满眼钻具技术，分析了常规绳索取心满眼钻具和大口径绳索取心满眼钻具的使用情况，提出了绳索取心满眼钻具管柱力学理论；围绕受控定向钻进技术，分析了在钻孔纠斜和侧钻绕障方面的应用，指出了不同方法的优缺点，小口径井底动力钻具优势明显，但是受地质取心工艺要求的影响，在地质钻探中具有较多限制。通过对地质岩心钻孔轨迹控制技术现状的回顾和分析，明确了影响钻孔轨迹的关键因素以及控制钻孔轨迹的多种技术，可为提高地质钻探的勘查精度提供有益参考和研究思路。

关键词：地质岩心钻探；钻孔轨迹控制；初级定向孔；满眼钻具；受控定向钻进

随着我国新一轮找矿突破战略行动的启动，对矿产勘查技术现状进行系统全面的分析总结是十分有必要的[1]。只有通过研究分析现有矿产勘查技术的原理及其适用性，探索其在战略行动中应用的可行性，才能有力支撑战略行动以实现找矿突破，并可为以后的技术发展提供有利参考和研究思路。

地质岩心钻探是实现各类地质勘查的重要技术手段，可以获取地层的实物资料，进而验证地质信息的推断与解释。地质岩心钻探在矿产勘查中可实现矿体圈定、储量计算、矿产品位评估等工作[2-4]；在隧道建设中可获取沿线地质信息，为隧道设计施工提供地质依据[5-6]。因此地质岩心钻探的工程质量至关重要，而其中钻孔轨迹是评价工程质量的重要因素之一[7]，当钻孔实际轨迹与设计轨迹存在偏差时，则会对上述地质工作的准确性产生一定影响[2, 5-6]。随着这种偏差的增大，将使得地质工作的准确性进一步降低，导致错误的结果，甚至引发事故，同时也使得钻孔工程质量不合格。

孔斜问题在钻探施工中难以避免，影响孔斜的因素主要有岩石的各向异性、地层产状和层状、钻进参数、孔底钻具组合、钻孔轨迹遇层角等[8]。当孔斜过大时，不仅产生诸多工程问题，包括钻进过程中受到过高的摩阻和扭矩、钻具事故风险提高、起下钻及打捞岩心困难等[9]，还产生诸多地质问题，包括未钻遇目的层或目的层位置偏离等问题，从而影响矿产评价和矿山设计质量[10]。

著录信息：潘德元，熊亮，王杰，等. 地质岩心钻孔轨迹控制技术研究进展 [J]. 地质科技通报，2026，45(1)：147-159.
PAN Deyuan, XIONG Liang, WANG Jie, et al. Research progress on trajectory control technology for geological core drilling[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2026, 45(1): 147-159.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

为了确保钻孔的轨迹能够符合工程的设计要求和达到勘查的地质目的，众多学者和技术人员[11-20]都开展了钻孔轨迹控制的相关理论研究工作，并通过实际钻探施工验证其可行性。随着这些研究的不断深入和广泛应用，不仅解决了地质岩心钻探领域一些重点和难点的问题，也为后续的相关研究提供了思路和方向。

1　地质岩心钻探技术

1.1　地质岩心钻探工艺特点

当前地质岩心钻探中最常用的为绳索取心钻进工艺，具有钻探成本低、钻进效率高、岩心采取率高、劳动强度小等优点[2, 5-6]。当前大部分矿产勘查岩心钻孔及科学钻孔的主要终孔口径要求为 N 级[11-12]，即终孔口径不小于 76 mm，相比于石油、地热、水文等行业，终孔口径较小。

该钻探工艺的特点是管柱在钻孔内近似为满眼状态[13]，钻杆管体与孔壁之间的环状间隙极小，基本约 3.25 mm，在钻杆接头和钻杆加厚部位其间距更小；为保障取心内筒能够顺利起下，需确保钻杆管内的通径大小，管柱的整体内外尺寸均受到限制；同时孔底取心钻具组合比较固定。因此在地质岩心钻探中管柱结构受到的限制较大。

1.2　地质钻孔质量要求分析

《地质岩心钻探规程》(DZ/T0227-2010)[14] 对钻孔质量要求中的钻孔弯曲和测量间距提出了技术指标，要求在直孔施工中每 100 m 的顶角偏斜不应超过 2°，在斜孔施工中每 100 m 顶角偏斜不应超过 3°。

规范中对孔斜质量以孔身变化 100 m 的变化为评价指标，如按此规范执行，对于较大孔深时孔底产生极大的偏斜，不利于达到地质勘探目的，因此在施工过程中会根据实际情况制定在相应的钻孔弯曲技术指标。如在赣州科学钻探 NLSD-1 孔中[15]，设计垂直开孔，孔深 3 000 m，要求钻孔弯曲度小于 2°/100 m，且终孔顶角≤30°；在庐枞 LZSD-1 科学钻孔中[16]，设计直孔，孔深 2 500 ~ 3 000 m，要求终孔顶角≤15°，全角变化率小于 2°/30 m；在汶川地震断裂带 WFSD-3 科学钻孔中[17]，设计直孔，孔深 1 500 m，要求终孔顶角≤10°，最大弯曲度 2°/30 m，等等。

同时，由于绳索取心管柱结构的防斜稳斜效果较差，受地层自然造斜的影响非常大。比如在一些地层造斜率高的地方，如在江西德兴的银山矿区[18]、陕西凤太的铅锌铜矿区[19]，地层自然造斜率非常大，导致钻孔的孔斜上漂幅度大于规范要求，对钻探施工造成很大的难度；对于一些地层造斜率小于规范要求但是依然偏大的区域，在施工深孔时导致孔底的偏斜过大，如不采取措施则难以满足质量要求，如在赣州科学钻探 NLSD-1 孔自然弯曲较严重，为了控制孔身轨迹，共进行了 42 次有效纠斜作业，调整累计降顶角达到 25.8°，终孔深度 2 967.83 m，终孔顶角 21.25°[15]；而在一些地层造斜率低的地方以及采用小口径绳索取心的页岩气调查井施工中，如庐枞 LZSD-1 科学钻孔中，钻孔实际终孔孔深 3 008.29 m，终孔直径 77 mm，终孔顶角仅为 7.7°[16]，在小口径绳索取心的页岩气调查井蓝地 1 井和辽凌地 1 井[20] 中，孔深分别为 2 300.30，1 722.28 m，最大孔斜分别为 2.82°，4.81°，上述钻孔的孔斜质量非常好。

由于小口径地质岩心钻孔受设计工艺限制，控制孔斜质量的能力较差，主要受地层造斜能力影响，在高陡易斜区域和部分深孔超深孔的钻孔轨迹控制难度较大。因此对于一些以获取目的层岩心为重点的浅孔，通常以控制钻孔轨迹穿过靶区为首要目的，对钻孔孔斜质量要求会适当放宽，尤其是在地层造斜严重的地区；对于一些深孔，尤其以研究为目的科学钻孔，一般要求满足或高于技术规范要求，同时会制定全孔孔身质量要求，避免全孔弯曲过大引起孔内各种事故，提高勘查的精度。

1.3　地质钻孔轨迹控制现状

我国的地质岩心钻探技术、装备以及各类工具经过数十年的研究，在各方面都得到了长足的发展，其中以绳索取心钻进为主的小口径金刚石钻进技术达到了国际先进水平[21-22]，形成了较先进的技术理论，还成功研发了配套的先进仪器设备。

从地质钻探采用的管柱结构分析，绳索取心钻进不同于石油、水文、地热等钻进工艺，后者由于其管柱结构的特点，通常在管柱下部安装钻铤来提供钻进所需的钻压，并可采用各种井下工具进行井眼轨迹控制[23-27]。而在绳索取心钻进工艺中，为了确保岩心内筒能够在钻杆柱内部顺畅地起下，绳索取心管柱具有直径小、壁薄、柔度大，孔底钻具组合较固定单一等特点，也导致在大口径钻井中采用的防斜技术理论、井下工具和仪器设备不能直接应用，使得绳索取心钻进工艺的孔斜控制能力较弱。

在《地质岩心钻探规程》(DZ/T0227-2010)[14] 中提出了地质岩心钻探中常用的预防钻孔弯曲措施，将可用于绳索取心钻进工艺归纳为初级定向孔、满眼钻进、冲击回转钻进。近年来，有不少学者和技术人员针对绳索取心钻孔弯曲问题开展了深入研究和

现场应用，并在此基础上进行了改进和试验，总结了相关的技术经验和施工要点，同时也提出了小口径井眼的纠斜技术措施。

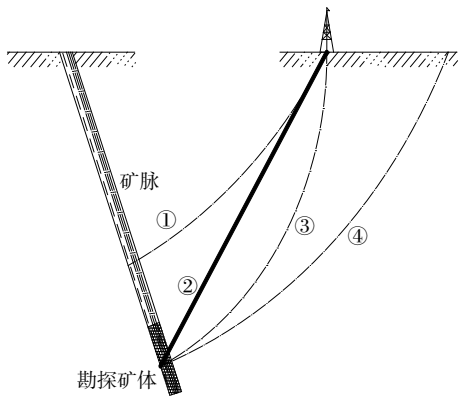
笔者分别对这几项控制地质岩心钻孔轨迹的技术措施从其原理、应用进展及研究现状进行分析总结，梳理其优缺点和适用条件，并对新一轮找矿突破行动中地质钻探轨迹控制方面提出相关建议，以供借鉴。

2 初级定向孔

初级定向孔主要应用在一些掌握了钻孔自然弯曲规律的矿区，根据地层条件及见矿深度等因素，合理地设计开孔角度及位置，确保实际钻遇目的层位置与设计位置的偏差满足勘查质量要求，从而提高矿产勘查的质量和精度，具有操作简单、成本低、效率高等优点[22]。

图 1 为初级定向钻进原理示意图，其中②号轨迹为钻孔设计见矿轨迹，①号轨迹为按照设计开孔角度钻进的轨迹，受地层自然弯曲影响，整体轨迹上倾，见矿位置已偏离设计位置较大距离，导致控制矿脉的长度缩短，勘查精度降低；③④号轨迹为根据地层自然弯曲规律分别调整开孔角度后和开孔位置后的轨迹，其见矿位置满足勘探要求。

开孔角度的调整可分为倾角和方位角调整，位移调整方法分为沿勘探线移动和偏离勘探线移动[18-19, 28-30]。在实际钻探中，需要在充分收集工作区地层自然造斜规律的基础上，采用一种或数种初级定向技术进行钻孔设计。



①为按照设计开孔角度钻进但受地层自然弯曲影响的轨迹；②为钻孔设计见矿轨迹；③为根据地层自然弯曲规律调整开孔角度后的钻进轨迹；④为根据地层自然弯曲规律调整开孔位置后的钻进轨迹。可见①号轨迹偏离设计位置较大距离，导致控制矿脉的长度缩短，勘查精度降低；③④号轨迹见矿位置满足勘探要求

图 1 初级定向孔原理

Fig. 1 Principle of primary directional borehole

2.1 开孔倾角调整技术应用

当钻孔设计方位与地层倾向较一致、钻头中心轴线与地层法线夹角越大直至重合时，钻孔截面的地层可视为横向各向同性[31]，可在一定程度上抵消钻头受到的方位变化的地层力，能够较好地实现控制钻孔方位漂移[28]。

通过上述理论分析及矿产勘查中多数钻孔的设计，针对浅层钻孔，当钻孔方位与地层倾向设计一致时，采用较大的开孔顶角，其钻孔孔底方位偏离勘探线的距离基本能满足技术规范要求，钻孔以控制孔斜变化为主要要求，可通过提前调整钻孔开孔倾角，使得钻孔轨迹变化符合地层自然弯曲规律，最终钻遇设计靶区。

在江西德兴的银山铜铅锌金银多金属矿区中[18]，通过前期大量的钻探施工数据统计，判断在该矿区在采用 N 级口径绳索取心钻进工艺时，钻孔轨迹在地层造斜规律影响下的全角变化率(γ)为 6°/100 m，并提出了开孔调整角度($\Delta\theta$)数值为全角变化率(γ)与设计孔深(h) 乘积一半的简单计算方法，见式(1)。

$$\Delta\theta = \frac{1}{2}\cdot\gamma\cdot h。 \quad (1)$$

在 SK501 钻孔设计中，控制矿体的设计倾角为 59°(即顶角 31°)，设计孔深为 300 m，由式(1)计算需调整角度($\Delta\theta$)为 9°，则实际开孔倾角为 68°(即顶角 22°)。该矿区通过该措施，对矿体的控制效果明显提高，在矿区中得到全面应用。同时侯晓东等[18]也指出了采用该技术措施的缺点：一是对于钻孔孔斜预防和控制并无较好效果，使得钻孔的孔身质量不满足规范要求；二是当开孔角度调整过大时不利于保持钻孔方位的稳定。

2.2 开孔全角和位移调整技术应用

当钻孔深度较大时，则不能忽视钻孔的方位变化，尤其是当通过调整开孔倾角，使得开孔倾角偏大，甚至近乎铅垂时，即使钻孔设计方位与地层倾向一致，钻孔方位也存在较大的偏移[28]，因此在实际施工中，需要根据工作区钻孔轨迹的偏移规律对方位和位移进行提前补偿[29-30]。

在陕西省原平市孙家庄铁矿矿区[29] 部署了孔深 600 ~ 800 m 铁矿勘查孔，矿体、围岩产状倾角均大于 60°，部分区域高达 75°。通过收集汇总该矿区前期 N 级口径钻孔数据资料发现，钻孔顶角 3°时，钻孔方位每百米漂移达 15°以上，孔斜变化率为 2° ~ 3°/100 m；钻孔顶角提高 8°后，钻孔方位每百米漂移在 5°以内，而孔斜变化率提高 7° ~ 9°/100 m。现场在初步掌握地层造斜规律后，计算钻孔轨迹，通过调

整孔位合理部署钻孔顶角。采取的技术措施是采用 H 级口径终孔，提高管柱的外径从而提高防斜能力，将开孔顶角设计为 6°，计算轨迹后 800 m 深钻孔孔位沿着勘探线移动 30 m，600 m 深钻孔移动 20 m，原理见图 1 中④号轨迹线，并根据孔深逆时针调整开孔方位 10°～15°。实际钻探验证，钻孔偏移在设计要求内，孔斜变化率为 2.8°～3.4°/100 m，实现了对矿脉的控制，符合勘查设计要求。通过对钻孔轨迹测量，终孔深度 856 m 的钻孔全孔顶角变化为 30.6°，终孔深度 675 m 的钻孔全孔顶角变化平均 21.5°，下半段 181 m 孔段顶角增加了 9.1°。可见随着孔深和孔斜的增加，钻孔的自然弯曲规律也发生了改变。

在陕西凤太某个铅锌铜矿区部署了 ZK4002 号钻孔[19]，原孔位的设计深度为 900 m，设计轨迹倾角 82°，方位 20°，要求钻孔质量的顶角弯曲率≤1°/100 m，钻孔钻遇矿点偏移≤25 m。在统计分析该矿区前期多口钻孔的全角变化规律，并总结该孔多次由于轨迹问题导致报废的施工经验，将孔位偏移至勘探线东南 81 m 处，开孔倾角调整为 88°，方位 70°。在钻至孔深 368 m 后采用了起拔套管扩孔的方式控制孔斜，在钻至 600 m 后由于钻孔方位变化率快速增加，现场只得数次下入螺杆钻具纠正方位，最终钻遇目标靶区，但是在造斜段多次引起钻具事故。

煤层的瓦斯抽采孔一般为非取心孔，其钻进工艺与地质岩心钻孔不同，但是部分钻孔的轨迹控制仍然采用初级定向孔。比如瓦斯抽采孔施工中留下的空白带，会给煤层瓦斯消除工作带来隐患，需根据钻孔偏移的整体规律设计钻孔开孔倾角及方位角，使得钻孔实际轨迹的落点尽可能处于钻孔瓦斯抽采空白带内[32-34]。在贵州的某煤矿 12824 底抽巷 27 号穿层钻孔的施工时[32]，在通过获取周围钻孔轨迹实测数据后，应用相应的软件进行三维计算，得出钻孔的偏移规律，为该底抽巷 27 号孔开孔点周围的 28 号孔纠偏设计提供了依据。对比 27 号孔，28 号孔的设计方位增加 9°，俯仰角增加 13°，实际钻至 50.5 m 终孔，方位偏差 0.68°，俯仰角偏差 0.76°，基本与设计位置一致。

2.3　钻孔自然弯曲规律分析方法

由于钻探过程受多种因素影响，包括岩性和产状、钻孔结构、钻进工艺、孔斜、钻孔遇层角以及钻进参数等，对钻孔轨迹的预测多基于前期在工作区实施的钻孔参数，采用统计作图法或相关分析法[22]对已有钻孔轨迹进行研究，从而对预测后期的钻孔轨迹进行指导[35]。

诸多学者也通过了各种方法对如何精准预测地层自然弯曲规律进行了分析研究。矿产勘查中，张百东等[36]运用了 Excel、SolidWorks 等软件进行作图分析，探讨了钻孔开孔角度变化对靶点偏移的大小；陆洪智等[37]运用了 SPSS 分析软件对孔斜数据进行了多元方程回归分析，研究了不同地层倾角钻孔轨迹的回归方程。在煤层抽采孔设计中，王小龙[34]通过测量钻孔轨迹参数后采用 Voxler 软件进行了建模，根据三维可视化钻孔轨迹，分析了钻孔的偏移量。

2.4　初级定向孔技术小结

通过上述分析，初级定向孔在一些金属矿区和煤层抽采孔中得到了广泛的应用，能够较准确地控制目的靶区，但是使用中也存在诸多的限制。

首先，初级定向孔主要依靠地层的自然造斜规律，对于钻孔孔斜预防和控制并无较好效果，钻孔孔斜质量难以提升。由陕西凤太某个铅锌铜矿区[19]和陕西省原平市孙家庄铁矿矿区[29]的钻孔轨迹变化可以看出，随着孔深和孔斜的增加，钻孔角度的变化率快速增加。因此不利于深孔段施工，易导致钻杆整体弯曲度较大，管柱受到的摩阻增大，造成磨损严重，提高了孔内钻具事故的风险，同时引起取心内管和打捞器下放困难，不利于绳索取心作业[19, 38]，如图 2 为某中深地质钻孔绳索取心钻杆接头的磨损情况。



图 2　钻杆接头磨损情况

Fig. 2　Wear condition of drill pipe joint

其次，实施初级定向孔需要较精准地掌握地层自然造斜率，但是在实际应用中的不确定因素较多，包括地层倾角的变化、岩性的变化以及施工中钻进参数的不同等，都会引起相应条件下地层造斜率的变化，使得钻孔实际轨迹偏离预测轨迹[19]，并且孔深越大不确定性越大，最终导致偏离设计靶区。

综上，为了保障钻孔施工顺利并达到设计靶区，当需对钻孔轨迹进行控制时，初级定向孔宜用于 500 m 以浅的钻孔设计施工，当孔深大于 500 m 时，应配合其他的轨迹控制技术措施同时使用，比如采用满眼钻具组合降低全孔孔斜变化率，或者在深部

孔段采用受控定向钻进措施进行纠斜等。

3 满眼钻进技术措施及应用

满眼钻具的定义源自石油行业中应用的钻具组合，系指由外径接近钻头直径的多个稳定器和大尺寸钻铤组合的下部钻具组合，主要用于防斜和稳斜[39-40]。稳定器主要用于改变井下钻柱的组合形态，从而达到改变钻头的受力情况，实现降斜、稳斜或增斜的目的。

3.1 常规绳索取心满眼钻具

常规绳索取心钻具具有比较固定的管柱结构组合：金刚石取心钻头+下金刚石扩孔器+绳索取心钻具+上金刚石扩孔器+绳索取心钻杆[40]。受工艺要求限制，管柱结构中不具备安装钻铤的条件，因此一般所指的满眼钻具仅在管柱上安装多个稳定器的钻具组合，即取心钻具的上下扩孔器及钻杆上安装的钻杆导正器，用于提高下部管柱的刚度，从而实现稳斜。结合绳索取心钻进工艺的特点，这种满眼钻具中应用稳定器的结构参数与石油行业中存在着一定的不同要求。石油行业中的稳定器工作外径都偏小于钻头直径[40]，而在绳索取心钻具中采用的稳定器外径一般等同于扩孔器，大于钻头直径 0.5 mm[41]，如图 3 所示。

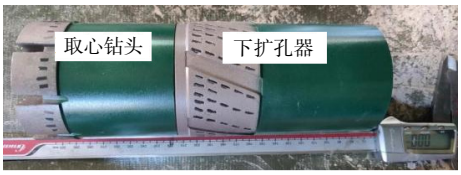


图 3 绳索取心钻头及下扩孔器

Fig. 3 Rope core drilling bit and lower reamer

宋继伟等[42]在贵州省贞丰县烂泥沟金矿大角度斜直孔施工中，通过在取心管柱上设计安装不同数量和位置的扶正器，总结了 3 种绳索防斜钻具结构中扶正器的安装使用方式：一是将常规的绳索取心外管改为两段式，中间一个扶正器形成三扶正器钻具；二是在取心钻具与第一根钻杆连接处可以多加扶正器；三是在钻杆中间每隔一段距离加扶正器。

张弛等[43]在某铁路隧道的 Z-2 #和 Z-3 #水平勘探深孔施工中，设计需钻达隧道洞身位置，需确保钻进过程中不能出现偏斜超标，采用了安装钻杆扶正器的措施，并根据钻遇地层岩性调整安装扶正器的数量，如图 4 为现场采用的钻杆扶正器。在 Z-2#孔的坚硬完整花岗岩中加密增设钻杆扶正器，在 Z-3#孔的破碎大理岩、砂岩、片麻岩等中大间距设计钻杆扶正器，最终钻孔偏移满足设计要求。



图 4 绳索取心钻杆扶正器[43]

Fig. 4 Rope coring drill pipe centralizer

3.2 大口径绳索取心满眼钻具

在当前有一些全孔取心的科学钻孔和调查孔，为满足相应的地质目的，需要较大的终孔直径。研究人员在传统绳索取心管工艺的基础上对管柱结构进行了优化，在满足地质目的的前提下适当减小了岩心直径，扩大了钻孔的环状间隙，从而组装了加重钻杆，形成了类似于油气井的管柱结构。

朱恒银等[44-45]在成熟的绳索取心钻具结构基础上，结合大口径钻具结构特点，开发了一系列的大口径绳索取心钻具，匹配加重钻杆，组合大口径加重绳索取心钻具系统，增加钻具的稳定性，钻具组合：Ø 152 mm 钻头+绳索取心双管钻具总成+ Ø140 mm 加重管+ Ø127 mm 钻杆+扶正器+ Ø114 mm 绳索取心钻杆(图 5)，与邻孔相比，钻孔孔斜变化率由 1.1°/100 m 降为 0.32°/100 m，提高了钻孔质量。

刘蓓等[46]于甘肃省岷县禾驮乡寨上金矿区的 ZK4816 钻孔钻探施工中，为提高孔身质量，探索采用了大口径绳索取心钻具进行施工，将 P 级口

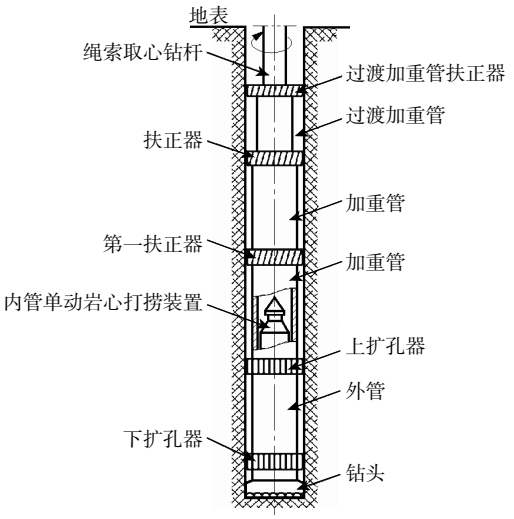


图 5 大口径加重管绳索取心钻具[44-45]

Fig. 5 Large caliber weighted pipe rope core drilling tool

径金刚石绳索取心钻头外径增大至 Ø136 mm，配备了加重钻杆和扶正器，取得了一定效果。该孔的 150.58 ~ 821.66 m 孔段采用如下钻具组合：Ø136 mm 金刚石钻头+Ø136.5 mm 扩孔器+Ø127 mm 绳索取心钻具+Ø136.5 mm 扩孔器+ Ø127 mm 扶正钻杆（加重钻杆）+Ø136.5 mm 扶正器+变丝+Ø114 mm 绳索取心钻杆。

虽然在大口径井眼中使用加重钻杆、钻铤等管材有利于钻孔防斜打直，但是取心钻头、取心工具、扶正器甚至钻机部分系统均需进行定制，同时增大了取心钻头唇面，降低了钻进深度，对大环状间隙下绳索取心管柱结构强度也产生影响，在甘肃省岷县禾驮乡寨上金矿区[46]的试验钻孔即为事故终孔，在试验结论中也提出了要提高钻具质量以降低断钻具风险。

3.3　满眼绳索取心钻具管柱力学理论

在大口径油气井行业中，管柱力学的理论已经较为成熟，我国学者白家祉等[8]基于纵横弯曲连续梁理论提出了油气井管柱力学的分析方法，建立三弯矩方程对井底钻具组合进行力学分析，该井斜控制方法得到了广泛的认可与使用。行业标准《定向井下部钻具组合设计方法》（SY/T 5619-2018）[47]就以此理论为基础设计了增斜、稳斜、降斜等各类钻具组合；当前先进的旋转导向钻井技术也基于此开展了井眼轨迹控制工具载荷与造斜能力关系的研究[48-49]。

黄帆[50]直接将该理论引入至绳索取心管柱结构，分析了扩孔器的安装位置和数量对防斜效果的影响，但是未考虑到绳索取心管柱扩孔器直径大于取心钻头外径的特点，以及受压绳索取心管柱的弹性变形问题，不符合白家祉等[8]提出的力学模型建立的假设条件，导致研究成果对现场施工缺乏指导。

潘德元等[51]在前人对纵横弯曲连续梁理论研究的基础上，针对绳索取心管柱的结构特点，提出了相应的优化方法，研究过程中沿用了白家祉等[8]提出的相关定义，将管柱结构中稳定器上部管柱在自重作用下与孔壁的接触点称为切点；先计算出不同钻压下切点跨距的大小，然后以切点与钻头之间的管柱结构为研究的整体对象；根据纵横弯曲连续梁力学模型中假设条件，将岩心钻头与下扩孔器视为钻头整体，见图 3，不考虑二者的跨连接；同时，绳索取心管柱中稳定器的外径一致，与孔壁之间的间隙均为零，忽略了稳定器偏转产生的其他附加应力；将安装稳定器的、稳定器之间的跨距小于切点跨距的管柱等效简化为刚体，符合力学模型中的小弹性变形体系，依据切点和钻头侧向力计算公式[47]得出跨距和钻头降斜力大小。

潘德元等[51]基于纵横弯曲梁理论计算了 N 级口径的绳索取心钻杆在不同钻压和孔斜下的切点跨距，该跨距随着钻压和孔斜的增大不断减小，在孔斜 15°、钻压 15 kN 时，切点跨距约为 4.8 m；在高钻压水平状态下切点跨距约 3.5 m。试验的工作区地层造斜率约为 2.5°/100 m，取心钻具上下扩孔器间距为 3.8 m，分别部署了跨距 3，6 m 的单扶正器满眼钻具，以及跨距 3 m 的双扶正器，图 6 为 3 种满眼钻具组合示意图。

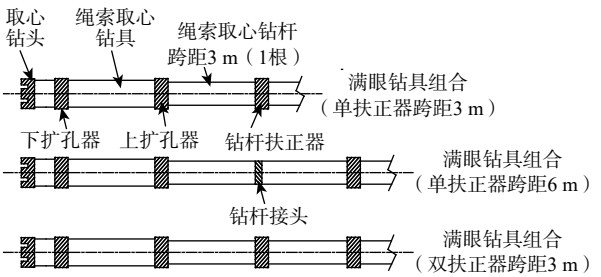


图 6　绳索取心满眼钻具组合结构

Fig. 6　Packed hole assemble of wire-line core

经试验证明，扶正器安装跨距大于切点跨距后，其防斜效果降低，双扶正器的防斜效果明显提高，但是循环泵压与钻机负荷有所上升。该试验配合采用了初级定向孔技术，调整了开孔倾角，孔深 832 m，全孔孔斜增加 11.34°，孔身质量良好。

在实际施工中应根据切点跨距大小合理部署稳定器之间的跨距，稳定器跨距过小，则安装数量过多，导致管柱摩阻大增；稳定器跨距大于切点跨距时管柱间形成屈曲点，不可视为刚体，在一定程度降低了防斜效果；配合初级定向孔技术使用具有较好的效果。

3.4　绳索取心满眼钻具应用小结

通过在取心管柱结构中安装扶正器形成的绳索取心满眼钻具，提高了管柱的刚度，从而改变了取心钻头的受力状态，提高了管柱的防斜能力，是绳索取心钻进中常用的一种防斜技术措施。由于常规绳索取心钻具环空间隙狭小、钻井液循环压力大，过多的稳定器会导致钻机负荷上升、循环压力增加以及孔内风险提升，需要合理部署稳定器的数量。

宋继伟等[42]和张弛等[43]通过实际施工验证绳索取心满眼钻具的防斜效果，但是对钻杆稳定器的安装位置、稳定器间距离要求以及稳定器的安装数量等参数尚缺少深入研究分析，缺乏相应的管柱力学理论，部分学者仅提出了模糊的安装方式，或提出了该方面研究的需求；黄帆[50]针对绳索取心管柱结构特点优化了相应的管柱力学模型，为扶正器的安

装数据和间距提供了理论依据，但是该力学模型为一简化模型，尚不够完善，需进一步研究。

而采用大口径绳索取心满眼钻具，其井眼条件基本接近油气井，可直接采用相关的防斜理论，如采用钻铤、钟摆钻具、满眼钻具等，已脱离了常规地质岩心钻探范畴，仅用于少数的科学钻探工程或试验工程，多数矿产勘查中还是以常规绳索取心工艺为主，推广性和实用性较差。

4 绳索取心液动锤钻进防斜应用

绳索取心液动锤钻进技术是一种结合了液动潜孔锤冲击作用的绳索取心钻进工艺，液动锤总成安装在绳索取心钻具总成上端，与取心内筒同时起下，确保了取心管柱内部的通畅。当循环冲洗液流经液动锤时，在泵压作用下，通过驱动内部结构产生体积变化，形成高、低压差交替作用，潜孔锤反复冲击，最终将冲击荷载通过钻具外管传递至钻头，形成回转切削、轴向压力和冲击荷载三者的共同作用完成碎岩[52-54]。

经过诸多应用证明，绳索取心液动锤钻进的冲击作用能够提高坚硬致密地层中的机械钻速[55]，并能有效减少破碎地层中产生的岩心堵塞次数，增加回次进尺长度，同时，配合其他辅助措施也能有效地降低孔斜，实现钻孔防斜保直[56-61]。

在江西新余梅山煤矿勘查项目中[59]，ZK3802 孔设计孔深 1 250 m，设计顶角 90°，孔斜要求每 100 m 不大于 2°。该钻孔前期因为地层造斜严重导致孔斜超标，连续挪孔 3 次，均是采用Ø77 mm 绳索取心金刚石钻进约 250 m 顶角达到 12°而报废。经过研究，该孔采用满眼钻具组合配合绳索取心液动锤钻进工艺，在绳索取钻具与钻杆连接部增设组扩孔器，严格控制钻进参数和冲洗液性能，钻至 1 201.08 m 终孔，孔底孔斜为 9.2°，孔斜变化率为 0.77°/100 m，达到了设计要求。

绳索取心液动锤钻进增加了冲击碎岩作用，进而采用了较低的钻进压力，可以较好地改变钻头及管柱受力状况，实现防斜保直钻进。

5 地质岩心钻探受控定向钻进

在一些地质岩心钻探的深孔、超深孔钻探施工中，当地层造斜严重，采用预防钻孔弯曲的技术措施也难以控制钻孔轨迹，孔身质量超出钻孔设计要求时，或者在处理一些孔内事故，以及一些特殊钻孔如定向孔、分支孔施工时，需要采用受控定向钻进技术进行纠斜作业、侧钻绕障以及定向钻进等达到目的，常用的造斜工具有造斜楔、连续造斜器和孔底动力钻具等[22]。

5.1 造斜楔侧钻应用

造斜楔又称偏心楔，是利用倾斜楔面对钻孔进行造斜，同时改变钻孔轨迹方位，其结构简单，加工方便，可用于孔底或某个孔段的造斜[22]，是地质岩心钻探中常用的侧钻方法[62-64]。

在招远市栾家河金矿区的 47ZK3 钻孔施工中[63]，在孔深 2 297 m 处发生钻具断落事故，处理过程中又发生事故叠加，现场决定采用偏心楔进行侧钻绕障作业。偏心楔采用Ø75 mm×3 m 的圆钢制作，楔面长 2.9 m，偏心楔顶角近似为 1.47°，下至井底后投放卡料使其固定，然后采用锥形造斜钻头低钻压低转速造斜钻进，造斜完成后对造斜孔段进行修孔，然后继续钻进完成施工。

当需要固定方位造斜时，可在偏心楔上连接定位机构，到孔底后采用陀螺测斜仪依据定位机构确定偏心楔的工具面，调整至设计方位后将偏心楔固定[64]。

采用偏心楔侧钻是一种结构简单、操作容易、成本低廉的技术方法，但是其对造斜段的孔斜变化率和方位难以控制，易形成较大的钻孔弯曲度。

5.2 连续造斜器应用

连续造斜器是利用机构产生偏斜力实现定向造斜，造斜孔身轨迹较平滑，无急弯，主要由导向(定子)和造斜(转子)2 个部分组成，造斜时导向部分定位在指定方位上，产生一个推力推动造斜部分沿着指定方位造斜钻进[22]。

在四川某铀矿区进行详查工作时[65]，ZK2-4 钻孔的孔斜增大，方位发生偏移，经计算按照该偏移率最终将导致终孔位置脱离靶点。现场采用了 LZ 型连续造斜器进行了纠斜作业，辅助采用有线定向仪测量造斜器安装参数，进行了 5 次纠斜作业，钻孔轨迹最终进入目的矿层。

赵燕来等[66] 对常用的单滑块 LZ 型连续造斜器进行了优化设计，针对单滑块与孔壁之间支撑的径向制动扭矩小、稳定性较差的问题，创新性采用了双滑块结构形式，即根据造斜设计要求调节结构的造斜强度，在甘肃省文县阳山金矿区数个钻孔进行了多次纠斜作业，每次纠斜进尺为 0.6 ~ 1.5 m，纠斜段的全角变化率为 0.56° ~ 1.14°/m，较好地控制了钻孔轨迹，满足了矿产勘查的需求。

5.3　小口径孔底动力钻具应用

井底动力钻具是油气定向井、水平井中常用且十分成熟的钻进技术，通过不同的钻具组合搭配形成增斜钻具组合、稳斜钻具组合、降斜钻具组合等[47]，适用于不同的需要进行轨迹控制的井段，随着技术的发展一般采用泥浆脉冲传递信息的无线随钻测量系统（MWD）来监测井底井斜方位。

在小口径地质岩心钻探中，受狭小孔内空间限制，孔底一般仅采用最简单的小直径弯螺杆钻具，同时受现场循环泵和冲洗液体系的限制，难以采用泥浆脉冲传递信息，现场一般采用有线随钻测斜仪器测量孔底参数[5-6, 67-68]。

河南省内乡县某多金属矿区中[6]，ZK1403 钻孔设计深度为 1 800 m，当钻至孔深 900 m 后，发现尽管钻孔顶角的变化率不大于 2°/100 m，满足技术规范的要求，但是钻孔轨迹偏离已过大，不能满足地质需求，故采用小直径螺杆钻具纠斜。钻孔直径为 Ø78.5 mm，采用Ø60 mm 螺杆钻具，弯度为 1.25°，专用的通揽水龙头和无磁钻具配合有线随钻测斜仪，以及全面钻头，共进行了纠斜钻进 5 次，进尺累计 25.41 m，钻孔顶角从 10°降至 7°，方位角从 143°降到 18°，钻孔轨迹满足了地质要求。

赣州科学钻探 NLSD-1 井在实际钻探施工中钻孔自然弯曲严重[15]，为了控制孔身轨迹，提高钻孔质量，采用小直径弯螺杆钻具共进行了 96 次纠斜作业，其中有效纠斜为 42 次，根据孔径分别采用了 LF-54、YF-65、LF-65、5LZ73 等型号的螺杆马达，弯外管角度有 1°，1.25°，调整累计降顶角达到了 25.8°，终孔深度为 2 967.83 m，终孔顶角 21.25°。该钻孔为达到设计质量要求，通过多次纠斜控制钻孔轨迹，且该纠斜作业为全面钻进，为了防止岩心损失，采用先取心钻进后再水泥封孔，然后再进行侧钻纠斜的施工工艺。

在铁路沿线隧道勘查施工中部署的长位移小口径绳索取心水平孔施工中，由于管柱处于近水平状态，自重与钻进方向近似垂直，钻进所需的钻压只能由钻机通过管柱传递到钻头，钻孔轨迹极易发生偏斜[5-6, 67]。在川藏铁路多吉隧道 CSDZ-DJ-1 水平钻孔施工中[5, 67]，设计钻孔倾角为 12.3°，钻至孔深 671 m 处倾角上飘至 3.1°，此时钻孔直径Ø96 mm，采用小直径孔底动力钻具进行纠斜，弯螺杆外径Ø73 mm，弯度 1.25°，定向纠斜钻进 3.13 m，复合钻进 18 m，降斜 3°，较好地控制了钻孔轨迹上飘趋势。

5.4　地质岩心钻探受控定向技术小结

常规绳索取心钻进工艺对防斜能力较弱，当钻孔轨迹需要及时调整时可通过侧钻纠斜的方法进行控制。由于完成纠斜恢复常规钻具后，钻孔轨迹再次偏斜的概率大，应结合施工现场要求合理选择定向方法。偏心楔法定向困难，更多地是用于侧钻绕障，将钻孔轨迹偏离事故头即可继续钻进；连续造斜器法误差较大，一般用于纠斜工作量较小的钻孔中，进行一次或数次纠斜后钻孔轨迹即可满足设计要求；小直径螺杆钻具轨迹控制较精确，可用于对钻孔质量和轨迹要求高的钻探工程中，如科学钻探孔和隧道勘查孔，随时根据钻孔轨迹变化调整方位与孔斜。

6　结　论

（1）地质岩心钻探是服务于地质调查和矿产资源评价的钻探工程，以采取岩心为主要目的，因此采用的钻探工艺以小口径取心钻进为主，受钻孔尺寸、管柱结构、取心要求、施工成本等多因素限制，当前地质岩心钻探中钻孔轨迹控制难度较大，需结合勘查目的合理制定钻孔质量要求。

（2）初级定向孔技术成本低，操作简单，通过调整开孔倾角、方位及位移等，以钻孔轴线钻达预定目标为目的，对钻孔轴线的质量要求不高，但随着孔深孔斜的增大，孔底的不确定也增大，因此认为初级定向孔的适用深度不宜超过 500 m。

（3）对地质岩心钻探满眼钻具的应用进行了分析总结，讨论了基于纵横梁理论的绳索取心管柱力学模型在实际钻探中的适用性。建议满眼钻具扶正器间的跨距应小于切点跨距，合理地安装扶正器数量，管柱结构具有较好的防斜效果；绳索取心液动锤通常配合满眼钻具使用，具有一定的防斜效果。

（4）受控定向钻进在地质岩心钻探中主要用于纠斜和侧钻绕障，偏心楔及连续造斜器的造斜率和方位控制难度较大、稳定性较差，小口径孔底钻具可较好地控制钻孔轨迹。

（5）地质岩心钻孔通常可数种轨迹控制技术同时使用，比如可采用初级定向孔配合满眼钻具，当钻孔轨迹超出设计后，可再采用受控定向钻进技术进行纠正，在实现地质目前的前提下保证孔身质量。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1]　任辉. 对新一轮找矿突破战略行动相关问题的进一步研究 [J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(11): 1-8.

REN H. Further study on the related issues of the new round of prospecting breakthrough strategy[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(11): 1-8. (in Chinese with English abstract)

[2] 冉恒谦, 张金昌, 谢文卫, 等. 地质钻探技术与应用研究 [J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1806-1822.
RAN H Q, ZHANG J C, XIE W W, et al. Applications study of geo-drilling technology[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1806-1822. (in Chinese with English abstract)

[3] 唐骥, 蒋潇, 姜雪莲, 等. 矿体三维可视化建模技术在成矿模式分析中的应用 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 273-284.
TANG J, JIANG X, JIANG X L, et al. Application of three-dimensional visualization modeling technology of ore bodies in metallogenic mode analysis[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 273-284. (in Chinese with English abstract)

[4] 李宏达, 吴志春, 柏瑞, 等. 复杂脉状矿体精细化三维建模方法探讨 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(4): 379-390.
LI H D, WU Z C, BAI R, et al. Discussion on fine 3D modeling method of complex vein-type ore body[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(4): 379-390.(in Chinese with English abstract)

[5] 吴金生, 黄晓林, 蒋炳, 等. 水平绳索随钻定向钻进技术研究与应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 260-264.
WU J S, HUANG X L, JIANG B, et al. Research and application of horizontal wire-line directional deviation correction while drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 260-264. (in Chinese with English abstract)

[6] 谢毅, 徐正宣, 陈明浩, 等. 山区铁路隧道超长定向钻探关键技术研究 [J]. 铁道工程学报, 2022, 39(8): 1-5.
XIE Y, XU Z X, CHEN M H, et al. Research on the key technology of ultra long directional drilling in railway tunnel in mountainous area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(8): 1-5. (in Chinese with English abstract)

[7] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 固体矿产勘查工作规范: GB/T33444-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification for exploration of solid mineral resources: GB/T33444-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)

[8] 白家祉, 苏义脑. 井斜控制理论与实践 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1990: 8-9.
BAI J Z, SU Y N. Theory and practice of well deviation control [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990: 8-9. (in Chinese)

[9] 王达, 张伟, 贾军. 特深科学钻探的关键问题 [J]. 科学通报, 2018, 63(26): 2698-2706.
WANG D, ZHANG W, JIA J. The key problems of ultra-deep drilling engineering[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(26): 2698-2706. (in Chinese with English abstract)

[10] 徐文喜, 李光辉, 史建民, 等. 我国固体矿产勘查钻孔质量评价指标分析及黑龙江省地方标准的制定 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(12): 85-90.
XU W X, LI G H, SHI J M, et al. Analysis of solid mineral exploration borehole quality assessment index of China and development of provincial standard of Heilongjiang[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(12): 85-90. (in Chinese with English abstract)

[11] 张金昌. 地质钻探技术与装备 21 世纪新进展 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(4): 10-17.
ZHANG J C. New development of the 21st century geological drilling technology and equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(4): 10-17. (in Chinese with English abstract)

[12] 董海燕, 王鲁朝, 杨芳, 等. 国产 CNH(T)绳索取心钻杆在中国岩金勘查第一深钻工程中的应用分析 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(1): 49-53.
DONG H Y, WANG L Z, YANG F, et al. Analysis on the application of China-made CNH(T) wire-line drill pipe in the first deep drilling engineering construction by China rock gold exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(1): 49-53. (in Chinese with English abstract)

[13] 孙建华, 陈师逊, 刘秀美, 等. 小直径特深孔绳索取心口径系列及钻柱方案 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(8): 1-5.
SUN J H, CHEN S X, LIU X M, et al. Diameter series and drill pipe scheme for wire-line coring with small diameter in ultra-deep borehole[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(8): 1-5. (in Chinese with English abstract)

[14] 国土资源部. 地质岩心钻探规程: DZ/T0227-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Geological core drilling regulations: DZ/T0227-2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)

[15] 朱恒银, 蔡正水, 王强, 等. 赣州科学钻探 NLSD-1 孔施工技术研究与实践 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(6): 1-7.
ZHU H Y, CAI Z S, WANG Q, et al. Study and practice of construction technology for scientific drilling hole NLSD-1 in Ganzhou[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(6): 1-7. (in Chinese with English abstract)

[16] 余善平. 庐枞 LZSD-1 孔科学钻孔钻头选择与使用 [J]. 安徽地质, 2016, 26(1): 36-37.
YU S P. Choice and use of drill bit for scientific drilling of hole LZSD-1 in the Lu-Zong area[J]. Geology of Anhui, 2016, 26(1): 36-37. (in Chinese with English abstract)

[17] 朱恒银, 朱永宜, 张文生, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSP-3 施工技术与体会 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(9): 12-17.
ZHU H Y, ZHU Y Y, ZHANG W S, et al. Construction technology and experience of WFSD-3 hole of Wenchuan earthquake fault scientific drilling project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(9): 12-17. (in Chinese with English abstract)

[18] 侯晓东, 张艳芳. 预飘措施在复杂地层中深孔钻探中的运用 [J]. 金属矿山, 2009(10): 114-116.
HOU X D, ZHANG Y F. Application of pre-floating measures in deep-hole drilling in the complex strata[J]. Metal Mine, 2009(10): 114-116. (in Chinese with English abstract)

[19] 李国才, 祁恩强. 离线移位初级定向技术在凤太矿区某孔斜严重钻孔施工中的应用 [J]. 中国金属通报, 2021(4): 35-37.
LI G C, QI E Q. Application of off-line displacement primary directional technology in serious drilling construction of a inclined hole in Fengtai mining area[J]. China Metal Bulletin, 2021(4): 35-37. (in Chinese with English abstract)

[20] 张强, 战启帅, 张文良, 等. 页岩气地质调查井小口径绳索取心钻探技术分析 [J]. 钻探工程, 2022, 49(5): 72-79.
ZHANG Q, ZHAN Q S, ZHANG W L, et al. Application of small diameter wire-line core drilling in shale gas geological wells[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 72-79. (in Chinese with English abstract)

[21] 王达, 赵国隆, 左汝强, 等. 地质钻探工程的发展历程与展望: 回顾探矿工程事业 70 年 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(9): 1-31.
WANG D, ZHAO G L, ZUO R Q, et al. The development and outlook of geological drilling engineering: To review the 70th anniversary of exploration engineering[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(9): 1-31. (in Chinese with English abstract)

[22] 汤凤林, A. Г. 加里宁, 段隆臣. 岩心钻探学 [M]. 第 2 版. 武汉: 中国地质大学出版社, 2009.
TANG F L, KALININ A G, DUAN L C. Core drilling technology[M]. Second Edition. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2009. (in Chinese)

[23] KREMERS N A H, DETOURNAY E, VAN DE WOUW N. Model-based robust control of directional drilling systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(1): 226-239.

[24] DENNEY D. Drilling automation: An automatic trajectory-control system[J]. Journal of Petroleum Technology, 2011, 63(12): 84-87.

[25] LIU X S. Borehole trajectory uncertainty and its characterization[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 407-412.

[26] BROOKS A G, WILSON H. An improved method for computing wellbore position uncertainty and its application to collision and target intersection probability analysis[C]//Anon. European Petroleum Conference. Milan, Italy: SPE, 1996: SPE-36863-MS.

[27] 董本京, 高德利, 柳贡慧. 井眼轨迹不确定性分析方法的探讨 [J]. 天然气工业, 1999, 19(4): 59-63.
DONG B J, GAO D L, LIU G H. Discussion on the analytical method of well track uncertainty[J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(4): 59-63. (in Chinese with English abstract)

[28] 张文庆. 孙家庄铁矿初级定向钻进及防斜措施 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(12): 22-24.
ZHANG W Q. Primary directional drilling in Sunjiazhuang iron mine and deviation prevention measure[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(12): 22-24. (in Chinese with English abstract)

[29] 赵国法, 吕新前. 开化黄山矿区钻孔偏斜规律研究及控制措施 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(2): 48-52.
ZHAO G F, LYU X Q. Study on borehole deviation rules in Kaihua Huangshan mining area and the control measures[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(2): 48-52. (in Chinese with English abstract)

[30] 彭桥梁, 李天虎, 刘瑞, 等. 湖南龙山矿区钻孔偏斜规律分析及控制 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(11): 12-15.
PENG Q L, LI T H, LIU R, et al. Analysis and control of borehole deviation regularity of Longshan mining area in Hunan[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(11): 12-15. (in Chinese with English abstract)

[31] 高德利, 刘希圣. 正交各向异性地层对井斜的影响 [J]. 石油学报, 1990, 11(2): 98-105.
GAO D L, LIU X S. The effect of an orthotropic formation on bore hole deviation[J]. Acta Petrolei Sinica, 1990, 11(2): 98-105. (in Chinese with English abstract)

[32] 冀超辉. 基于穿层钻孔偏移规律的角度补偿纠偏技术 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 34-39.
JI C H. Angle compensation and correction technology based on the offset law of cross-seam borehole[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2023, 42(4): 34-39. (in Chinese with English abstract)

[33] 张军, 王霄菲, 王小龙. 基于钻孔轨迹精确测量的瓦斯抽采钻孔群空白带控制技术 [J]. 煤矿安全, 2022, 53(1): 100-104.
ZHANG J, WANG X F, WANG X L. Control technology of blank zone in gas drainage boreholes group based on accurate measurement of borehole trajectory[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(1): 100-104. (in Chinese with English abstract)

[34] 王小龙. 煤矿瓦斯抽采钻孔轨迹三维可视化及偏移规律研究 [J]. 地球物理学进展, 2022, 37(4): 1764-1768.
WANG X L. Study on 3D visualization of coal mine gas borehole trajectory and borehole deviation regular pattern[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(4): 1764-1768. (in Chinese with English abstract)

[35] 李静, 张金昌, 陈晓琳. 地质勘探钻孔轨迹计算新模型 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(1): 22-24.
LI J, ZHANG J C, CHEN X L. New model for drilling trajectory calculation in geo-exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(1): 22-24. (in Chinese with English abstract)

[36] 张百东, 王宏斌. 钻孔轨迹参数计算及三维成图方法研究 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(4): 31-35.
ZHANG B D, WANG H B. Calculation of drilling trajectory parameters and discussion of 3D mapping method[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(4): 31-35. (in Chinese with English abstract)

[37] 陆洪智, 余瑞琪, 石耀军. SPSS 软件在钻孔弯曲规律预测中的应用研究 [J]. 钻探工程, 2023, 50(4): 49-56.
LU H Z, YU R Q, SHI Y J. Application of SPSS software in prediction of borehole bending law[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 49-56. (in Chinese with English abstract)

[38] 贾飞, 王健策, 潘垚, 等. 钻进技术与测斜监控双管齐下的西岭超深孔防控斜与纠斜技术 [J]. 矿产勘查, 2022, 13(12): 1833-1842.
JIA F, WANG J C, PAN Y, et al. Deviation prevention, control and rectification technology of Xiling ultra-deep hole based on drilling technology and deviation monitoring[J]. Mineral Exploration, 2022, 13(12): 1833-1842. (in Chinese with English abstract)

[39] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 钻井工程术语：SY/T 5313-2006[S]. 北京：石油工业出版社, 2007.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Vocabulary of well drilling engineering: SY/T 5313-2006[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007. (in Chinese)

[40] 杜晓瑞, 李华泰. 钻井工具手册 [M]. 2012 版. 北京：中国石化出版社, 2013.
DU X R, LI H T. Drilling tool manual[M]. 2012 Edition. Beijing: China Petrochemical Press, 2013. (in Chinese)

[41] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地质岩心钻探钻具：GB/T16950-2014[S]. 北京：中国标准出版社, 2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Geological core drilling tools: GB/T16950-2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)

[42] 宋继伟, 冉飞, 吴博, 等. 贵州省烂泥沟金矿大角度斜直深孔绳索取心钻探技术 [J]. 贵州地质, 2022, 39(4)：414-418.
SONG J W, RAN F, WU B, et al. Large angle oblique deep hole rope core drilling technology for Lannigou gold mine in Guizhou Province[J]. Guizhou Geology, 2022, 39(4): 414-418. (in Chinese with English abstract)

[43] 张驰, 吴万炯, 李飞, 等. 小口径水平绳索取芯钻进防偏斜方法探索与实践 [J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(增刊 1)：283-288.
ZHANG C, WU W J, LI F, et al. Exploration and practice of deviation prevention method in small diameter horizontal rope coring drilling[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(S1): 283-288. (in Chinese with English abstract)

[44] 朱恒银, 王强, 田波, 等. 大直径加重管组合绳索取心钻具研究与应用 [J]. 地质与勘探, 2016, 52(6)：1159-1166.
ZHU H Y, WANG Q, TIAN B, et al. Research and application of a combined large-diameter wireline drilling tool with a heavy pipe[J]. Geology and Exploration, 2016, 52(6): 1159-1166. (in Chinese with English abstract)

[45] 朱恒银, 王强, 张正, 等. 大直径加重管绳索取心技术在页岩气勘探中的应用研究 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10)：160-164.
ZHU H Y, WANG Q, ZHANG Z, et al. Application research on large diameter weighted combined wire-line coring technology for shale gas exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10): 160-164. (in Chinese with English abstract)

[46] 刘蓓, 蔡正水, 杨可, 等. 寨上金矿复杂地层深孔岩心钻探技术 [J]. 钻探工程, 2023, 50(增刊 1)：240-245.
LIU B, CAI Z S, YANG K, et al. Deep hole core drilling technology in complex formation of Zhaishang gold deposit[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 240-245. (in Chinese with English abstract)

[47] 国家能源局. 定向井下部钻具组合设计方法：SY/T5619-2018[S]. 北京：石油工业出版社, 2018.
National Energy Bureau of the People's Republic of China. Design method for lower drilling tool assembly in directional wells: SY/T5619-2018[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018. (in Chinese)

[48] 张红, 向正新, 钱利勤, 等. 井眼轨迹控制工具主轴载荷与造斜能力关系研究 [J]. 力学与实践, 2017, 39(2)：152-157.
ZHANG H, XIANG Z X, QIAN L Q, et al. The correlation between the spindle load and the deflecting capacity of the wellbore trajectory control tool[J]. Mechanics in Engineering, 2017, 39(2): 152-157. (in Chinese with English abstract)

[49] 唐博, 王鹏, 张红, 等. 指向式导向工具主轴偏置力与造斜性能研究 [J]. 力学与实践, 2022, 44(2)：310-316.
TANG B, WANG P, ZHANG H, et al. Study on spindle offset force and deflection performance of point-bit steerable tool[J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(2): 310-316. (in Chinese with English abstract)

[50] 黄帆. 基于纵横弯曲理论的绳索取心满眼防斜技术研究与应用 [D]. 武汉：中国地质大学(武汉), 2014.
HUANG F. Research and application of rope coring eyeful anti-deviation technology based on vertical and horizontal bending theory[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2014. (in Chinese with English abstract)

[51] 潘德元, 贺前平, 蔡隽, 等. 绳索取心满眼管柱的力学模型优化与应用 [J]. 力学与实践, 2023, 45(3)：585-591.
PAN D Y, HE Q P, CAI J, et al. Optimization and application of mechanical model of wire coring string with packed hole assembly[J]. Mechanics in Engineering, 2023, 45(3): 585-591. (in Chinese with English abstract)

[52] 廖国平, 刘国经, 李胜达, 等. 绳索取心冲击回转钻具组合设计及应用试验 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(4)：31-35.
LIAO G P, LIU G J, LI S D, et al. Combination design of wire-line coring & percussive rotary drilling tool and the application test[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(4): 31-35. (in Chinese with English abstract)

[53] 张飞, 熊虎林, 张建, 等. 蓄能式绳索取心液动潜孔锤的应用研究 [J]. 地质与勘探, 2017, 53(6)：1188-1196.
ZHANG F, XIONG H L, ZHANG J, et al. Application of the drilling tool with energy-storage-type rope coring hydro hammer[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(6): 1188-1196. (in Chinese with English abstract)

[54] 杨泽英, 齐力强, 崔淑英, 等. 深孔绳索取心液动锤钻具的研制与应用 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(12)：66-70.
YANG Z Y, QI L Q, CUI S Y, et al. Development and application of wire-line coring hydro-hammer for deep hole[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(12): 66-70. (in Chinese with English abstract)

[55] 傅丛群, 彭金灶. SYZX75 型绳索取心液动锤在福建武平银多金属矿的应用 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(6)：33-34.
FU C Q, PENG J Z. Application of SYZX75 rope coring hydraulic hammer in Wuping silver polymetallic mine, Fujian Province[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(6): 33-34. (in Chinese with English abstract)

[56] 周宗奇, 熊家勤, 余慎军. SYZX75 绳索取心液动锤在破碎地层中的应用 [J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(1)：64-65.
ZHOU Z Q, XIONG J Q, YU S J. Application of wire-line coring hydraulic hammer in crumbling strata[J]. Coal Geology of China,

2011, 23(1): 64-65. (in Chinese with English abstract)

[57] 罗永贵. SYZX 绳索取心液动锤在小秦岭金矿田复杂地层深部钻探中的应用 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(3): 7-9.
LUO Y G. Application of SYZX wire-ling coring hydro-hammer in deep drilling in complex formation of Xiaoqinling gold field[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(3): 7-9. (in Chinese with English abstract)

[58] 卢予北. 小秦岭复杂地层液动锤绳索取心钻探试验研究 [J]. 地质与勘探, 2014, 50(2): 391-396.
LU Y B. An experiment of hydro-hammer and wire-line coring drilling in complex formations of the Xiaoqinling area[J]. Geology and Exploration, 2014, 50(2): 391-396. (in Chinese with English abstract)

[59] 赵华. SYZX 系列绳索取心液动锤在新余梅山煤矿易斜深孔防斜钻进中的应用 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(9): 27-29.
ZHAO H. Application of SYZX hydraulic hammer in deviation control for easy deviation deep hole drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(9): 27-29. (in Chinese with English abstract)

[60] 罗冠平. SYZX75 型绳索取心液动锤在肃北德勒诺尔铁矿区的应用 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(1): 47-49.
LUO G P. Application of SYZX75 wire-line coring hydro-hammer in Delenuoer iron deposit of Subei[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(1): 47-49. (in Chinese with English abstract)

[61] 曹学斌, 王发民, 何玉云, 等. SYZX96 型绳索取心液动锤在甘肃李坝金矿复杂地层中的应用及效果 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(6): 30-33.
CAO X B, WANG F M, HE Y Y, et al. Application of SYZX96 wire-line coring hydro-hammer in complex strata of Gansu Liba gold mine and the effects[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(6): 30-33. (in Chinese with English abstract)

[62] 王红阳, 罗永贵, 腾新明. 绳索取心深孔偏心楔同径侧钻绕障技术实践 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(6): 17-20.
WANG H Y, LUO Y G, TENG X M. Practice of sidetracking obstacle-avoiding with same-diameter bit in deep hole wire-line core drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(6): 17-20. (in Chinese with English abstract)

[63] 刘治, 王智峰, 宋宝杰, 等. 简易偏心楔在钻探施工中的应用 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(12): 49-53.
LIU Z, WANG Z F, SONG B J, et al. Application of simple eccentric wedge in drilling construction[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(12): 49-53. (in Chinese with English abstract)

[64] 廖远苏, 胡啟锋, 廖长生, 等. 采用偏心楔侧钻处理坚硬地层烧钻事故 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(9): 5-8.
LIAO Y S, HU Q F, LIAO C S, et al. Treatment of bit burning in hard formation with eccentric wedge sidetracking[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(9): 5-8. (in Chinese with English abstract)

[65] 赵燕来. LZ 型连续造斜器在四川某铀矿区详勘中的应用 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(7): 84-86.
ZHAO Y L. Application of LZ continuous whipstock in detailed exploration of a uranium mine in Sichuan[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(7): 84-86. (in Chinese with English abstract)

[66] 赵燕来, 李忠. 定向钻探新型双滑块连续造斜器研究与应用 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(8): 3-9.
ZHAO Y L, LI Z. Research and application of new double-slider continuous whipstock in directional drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(8): 3-9. (in Chinese with English abstract)

[67] 吴金生, 罗显粱, 王子忠, 等. 水平定向钻探与综合测试技术研究及应用 [J]. 钻探工程, 2023, 50(增刊 1): 200-204.
WU J S, LUO X L, WANG Z Z, et al. Research and application of horizontal directional drilling and comprehensive testing technology[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 200-204. (in Chinese with English abstract)

[68] 韩明耀, 柳硕林, 王朝晖, 等. 河南省板厂矿区小直径螺杆钻定向纠斜技术 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(3): 36-41.
HAN M Y, LIU S L, WANG Z H, et al. Deviation correction drilling with slim hole mud motor in Henan Banchang mining area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(3): 36-41. (in Chinese with English abstract)

Summary for “地质岩心钻孔轨迹控制技术研究进展”

Research progress on trajectory control technology for geological core drilling

PAN Deyuan[1]，XIONG Liang[2*]，WANG Jie[1]，CAI Jun[1]

1. Changsha General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Changsha 410600, China；
2. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 517000, China

First author，E-mail：pandyice@163.com

* Corresponding author， E-mail：36.8du@126.com

Abstract：[**Objective and Significance**] Geological core drilling serves as a critical technical method in geological exploration，with borehole trajectory being a key factor in assessing drilling quality. The borehole trajectory not only impacts borehole safety during construction but also directly influences the accuracy and reliability of geological exploration outcomes. However， challenges such as small diameters， low pipe strength， and continuous coring requirements of the borehole significantly complicate trajectory control. [**Analysis, Discussion and Progress**] By analyzing the characteristics of geological core drilling， we systematically classify and summarize methodologies for trajectory control. The following results are obtained: First，the primary objective of primary directional boreholes is to obtain the core of the target layer. Design methods for parameters such as inclination angle，orientation，and displacement alongside their depth-dependent variations were analyzed. The applicable conditions and drawbacks were clarified，providing ideas for the use of primary directional boreholes in drilling construction of depths less than 500 meters. It was pointed out that deep boreholes should be used in conjunction with other measures. Second，in terms of packed hole assemblies for geological drilling，we analyzed the use of conventional hole assemblies and large-diameter hole assemblies，and proposed the mechanical theory of the wire coring string with packed hole assembly. Third，regarding controlled directional drilling technology，we analyzed its application in drilling deviation correction and lateral drilling obstacle avoidance. We pointed out the advantages and disadvantages of different methods，indicating that small-diameter bottomhole power drilling tools have obvious advantages. However，due to the requirements of geological coring technology，they have many limitations in geological core drilling. [**Conclusion and Prospects**] This study reviews the status of geological core drilling trajectory control technologies，identifies key influencing factors，and evaluates various control techniques to enhance exploration precision.

Key words: geological core drilling； drilling trajectory control； primary directional borehole； packed hole assemble；controlled directional drilling

Received：2024-07-05；Revised：2024-09-29；Accepted：2024-09-30

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240373