

桂西南岩溶地区岩心钻探技术实践

潘德元^{1,2}, 周成建^{1,2*}, 徐秋文^{1,2}, 赖小彬^{1,2}

(1. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南长沙 410600; 2. 长沙市深部钻井工程技术创新中心, 湖南长沙 410600)

摘要:在桂西南某矿区外围部署的岩心钻探工程, 钻遇了岩溶裂隙带、串珠型小溶洞、大型溶洞等多种典型岩溶问题, 孔内存在失返性漏失、孔壁不稳定、管柱弯曲等复杂情况。现场通过采取相应的钻进工艺并配合堵漏措施, 完成了工程施工。在岩溶复杂地层段优化孔身结构, 保持孔壁稳定; 采用顶漏钻进穿越串珠型小溶洞地层; 在大型溶洞内通过对管柱弯曲进行可行性分析, 采用相应技术措施降低管柱弯曲, 同时采用投料堵漏法建立循环。通过梳理桂西南地区岩心钻探过程中钻遇的多种复杂情况, 总结了相应的处理技术措施, 以为类似岩心钻探工程提供参考。

关键词:岩心钻探; 岩溶地区; 失返性漏失; 管柱弯曲; 投料堵漏; 顶漏钻进; 桂西南

中图分类号:P634.5 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2026)05-0154-07

Core drilling technology practice in the karst area of Southwest Guangxi

PAN Deyuan^{1,2}, ZHOU Chengjian^{1,2*}, XU Qiuwen^{1,2}, LAI Xiaobin^{1,2}

(1. Changsha General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Changsha Hunan 410600, China; 2. Changsha Deep Drilling Engineering Technology Innovation Center, Changsha Hunan 410600, China)

Abstract: Various typical karst problems, including karst fissure zones, bead-like small karst caves, and large karst caverns are encountered in a core drilling project deployed in the periphery of a mining area in Southwest Guangxi. Complex downhole conditions exist such as lost circulation, unstable borehole walls, and pipe string buckling. Field construction was successfully completed by implementing corresponding drilling techniques alongside plugging measures, that is optimizing the borehole structure in complex karst formations to maintain borehole wall stability, adopting drilling with lost circulation technology when drilling across bead-like small cave formations, conducting feasibility analysis of pipe string bending in large caverns, adopting corresponding technical measures to reduce string bending, and using material-feeding plugging methods to re-establish circulation. By systematically reviewing the multiple complex situations encountered during core drilling in the Southwest Guangxi region, corresponding technical countermeasures have been summarized, aiming to provide references for similar core drilling projects.

Key words: core drilling; karst area; lost circulation; pipe string buckling; material-feeding plugging; drilling with lost circulation; Southwest Guangxi

0 引言

为支撑新一轮找矿突破战略行动, 在桂西南地区部署了地质岩心钻探工作, 目的是查明深部矿体

走向和倾向延长的地质特征, 以及矿体顶底板的地质信息, 为矿体圈定和储量计算提供依据。

桂西南地区以岩溶地貌为主, 是岩溶集中连

收稿日期: 2026-03-12; 修回日期: 2026-04-10 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.05.017

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“战略性矿产靶区查证技术支撑(长沙中心)”(编号: DD202602410505)

第一作者: 潘德元, 男, 汉族, 1982年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 硕士, 从事钻探工艺研究工作, 湖南省长沙市宁乡市城郊街道学府路258号, pandyice@163.com。

通信作者: 周成建, 男, 汉族, 1985年生, 助理工程师, 探矿工程专业, 从事钻探工艺研究工作, 湖南省长沙市宁乡市城郊街道学府路258号, 601101424@qq.com。

引用格式: 潘德元, 周成建, 徐秋文, 等. 桂西南岩溶地区岩心钻探技术实践[J]. 钻探工程, 2026, 53(5): 154-160.

PAN Deyuan, ZHOU Chengjian, XU Qiuwen, et al. Core drilling technology practice in the karst area of Southwest Guangxi[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(5): 154-160.

片、发育强烈的主要地区之一,在经历了多次构造运动之后,地层褶皱、断裂交错发育,岩溶含水层与非岩溶相对隔水层在垂向上的间隔状分布,形成了地下多种多样的溶洞和裂隙^[1],为地质岩心钻探施工增加了更多难点和不确定性。

地质岩心钻探主要以绳索取心钻进工艺为主^[2],存在钻杆管体与孔壁间的环状间隙小、管壁薄、整体柔度大的特点^[3],受岩溶发育地区地质因素影响较大。该类地区存在岩性多变、溶洞裂隙发育、应力破碎严重等特点^[4],通过已有资料分析可知^[5-7],地质岩心钻探工作主要存在几个复杂情况:岩溶发育段全孔段钻进冲洗液漏失严重甚至失返;岩溶裂隙段孔壁稳定性差,存在较高的卡钻风险;在溶洞内管柱失去孔壁支撑,受压弯曲变形极易发生钻具事故。

针对地质岩心钻探在大型裂隙和溶洞的处理技术措施,可采用充填与堵漏液复合堵漏、以及采用大型尼龙袋桥堵方式^[8],很多学者和技术人员结合现场条件总结了不少措施。宋继伟等^[4]从钻机选型、钻孔结构设计、钻杆钻头级配等方面提出了岩溶地区预防孔内复杂情况的优化建议,从精确灌注水泥浆和抑制性冲洗液方面给出了预防和处理复杂情况的技术措施,又提出了拔管器、打捞工具、劈钻杆钻头事故处理工具。黄建民等^[5]在多溶洞地层提出了跟管钻进的方法。曹雪原等^[6]根据不同岩溶类型总结了其常规的处理方法,包括水泥注浆法和下套管法,水泥注浆法根据注入方式和材料细化为泵送注浆、布袋灌注、骨架填充注浆以及干料投入法,下套管法分为扩孔下入上一级套管、变径下入小一级套管、以及下飞管等,同时也应用了相应的封堵技术处理了钻遇的大型溶洞。孟祥龙等^[7]从浅部潜水压力方面研究了岩溶地区钻探漏失的主要原因和堵漏措施,并提出了相应的钻探施工工艺。在岩溶地区的基础工程施工中^[9-11],现场通过抛填筑壁法、超前注浆填充法、钢护筒跟进法、或全回转全套管法等多种工艺处理遇到的岩溶问题,虽然处理工艺和名称不同,但是其技术原理与地质岩心钻探基本相通。

在桂西南地区部署的地质岩心钻探中,先后在上部地层钻遇了岩溶裂隙破碎带、串珠型小溶洞、以及大型溶洞等多种类型的岩溶发育情况,在综合分析上述处理方法的基础上,现场根据岩溶发育情

况采用了跟管钻进、投料法堵漏、清水顶漏钻进等工艺穿越破碎带及小溶洞,在大型溶洞内,通过判断溶洞内管柱弯曲强度的安全风险,下入了合适级配的套管作为人工孔壁,为下部地层的安全施工提供了保障,较好的处理了该工作区的岩溶复杂情况。本文通过对岩溶地层处理措施的总结分析,可为类似地区的岩心钻探提供技术参考。

1 工作区概况

工作区隶属于广西省靖西市和天等县,大地构造位于南华活动带右江褶皱系中南部,是广西乃至全国最重要锰矿成矿带。工作区经历了多期次构造-岩浆活动,地层产状变化大,局部直立甚至倒转,褶皱、断裂、节理、劈理发育^[12]。地形地貌上处于中国地势第二台阶中的云贵高原东南边缘,山峦巅连起伏,局部为岩溶峰林^[1],山地坡度在 $20^{\circ}\sim 60^{\circ}$,部分地形极为陡峻,使得钻孔的部署工作存在较大难度,钻遇大型溶洞时难以采用调整孔位的措施。

区域出露的地层由老至新有寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系和第四系等。寒武系为碎屑岩与少量碳酸盐岩;泥盆系和石炭系主要岩性为灰岩、白云岩、硅质灰岩、硅质岩,局部夹锰质灰岩或碳酸锰矿薄层,是本区最重要的含锰地层;三叠系为泥质灰岩、白云质灰岩、白云岩、页岩等组成;第四系主要为残、坡积层及岩溶洼地堆积层。

2 钻孔部署

依据矿产调查工作,为实现对矿体边界控制,圈闭矿体,实现找矿突破,在相应工作区分别部署了2个浅孔和2个千米左右深孔,终孔口径不小于N级(76 mm)。其中ZK7103孔为斜直孔,设计倾角 75° (顶角 15°),方位 320° ,孔深900 m;其余均设计为直孔,ZK4703孔设计孔深1130 m,ZK601和ZK602孔设计孔深分别为100和270 m。

在收集相关临孔资料时,发现71号勘探线上已经施工完成的ZK7101孔开孔倾角为 70° ,终孔倾角为 56.7° ,孔深510 m,全孔孔斜增加为 13.3° ,平均孔斜变化为 $2.61^{\circ}/100\text{ m}$,为防止实际钻孔轨迹偏离目标,根据初级定向孔的设计方法^[13],将ZK7103孔开孔倾角调整为 81° (顶角 9°)。

钻孔孔身设计三级结构,拟采用P级口径开孔,见基岩后下入套管更换H级口径钻进,穿越岩溶破

碎带见完整基岩后下入套管,换N级口径钻至设计孔深终孔。为了加强应对岩溶地区复杂情况的能力,现场备用了S级钻具。

ZK7013和ZK4703孔采用CSD-1800X型全液压钻机,采用加强型绳索取心钻杆,ZK601和ZK602孔采用MD1000型便携式模块化钻机,采用常规绳索取心钻杆,均满足相应的钻孔施工深度和复杂情况处理要求。

3 钻遇岩溶发育情况

在该工作区穿透第四系地层进入基岩时均存在岩溶破碎带,且在浅部孔段也间断钻遇破碎带。该段岩体完整性较差,呈松散破碎状,棱角分明,分选差,见图1。

岩溶裂隙带岩体完整性较好,但受地质构造影响,岩体中裂隙极为发育,可见溶蚀小孔、晶洞以及各种裂隙等,见图2。

钻进过程中钻遇多处溶洞,在ZK7103孔最大洞高达13.67 m,ZK601孔在不足30 m的孔段内连续钻遇多个垂直分布的溶洞,具体分布情况见表1。

通过在该工作区钻探施工,查明岩溶发育情况主要分布在200 m以浅孔段,存在破碎带、裂隙段、



图1 岩溶破碎带岩心
Fig.1 Core from the karst fracture zone

表1 钻孔溶洞分布情况			
Table 1 Distribution of karst caves in boreholes			
钻孔编号	溶洞孔段/m	溶洞高度/m	备注
ZK7103	48.86~62.53	13.67	斜距
	93.20~93.70	0.50	
ZK601	58.60~65.60	7.00	
	70.60~76.60	6.00	
	79.50~80.70	1.20	
ZK602	83.40~85.60	2.20	



图2 多种岩溶裂隙
Fig.2 Various karst fissures

以及溶洞等多种岩溶发育情况,在深部孔段岩溶发育情况明显减少。

4 常规岩溶复杂地层处理措施

前文所述,专家和学者们提出了多种岩溶复杂情况的处理技术措施^[4-11],但是由于岩溶发育一般存在不均一的特点,具有很大的随机性和隐蔽性,导致处理复杂情况过程中存在较大的不确定性,需要及时根据地层变化情况,并结合现场施工条件、施工成本及钻探周期等多种因素制定具有可行性的处理方案。

在本工程钻遇岩溶破碎带、裂隙段及小型溶洞等时,存在冲洗液严重漏失甚至失返、孔壁失稳垮塌等复杂情况,如不能有效处理,则下部孔段的施工难度极大。然而现场注水泥浆封堵技术方案存在较大的不确定性:(1)岩溶发育,难以确定水泥浆液的注入量,其封堵的有效性难以保障,如添加速凝剂或采用速凝材料,现场施工风险较高;(2)岩溶发育不确定性高,极可能存在多个复杂地层,需要多次进行封堵,影响钻进周期。因此结合现场施工条件主要采取了以下措施。

4.1 扩孔钻进

由于岩溶地区的地质不确定性,孔身结构需要根据实际情况及时调整。在钻遇上述复杂情况时,提出当前取心钻具,采用上一级钻杆作为套管接扩孔钻头扩孔钻进至孔底,然后继续采用当前取心钻具钻进一段进尺后,再次进行扩孔,直至穿过复杂地层段,使得上一级套管加深至稳定地层,形成稳定孔壁,建立冲洗液循环。

ZK7103孔采用 $\varnothing 122$ mm单管取心钻具开孔,至孔深30.30 m穿透第四系松散地层,下入 $\varnothing 114$ mm套管至30.27 m后换 $\varnothing 98$ mm绳索取心钻具钻进,钻遇浅部岩溶破碎带,钻至孔深42.30 m后采用 $\varnothing 114$ mm套管扩孔至42.15 m,然后继续采用 $\varnothing 98$ mm绳索取心钻具钻进,该孔最终 $\varnothing 114$ mm套管扩孔至111.10 m, $\varnothing 98$ mm绳索取心钻具钻进至191.90 m后岩溶发育明显减少后换 $\varnothing 78$ mm绳索取心钻具施工完钻。

ZK4703孔亦是如此,采用 $\varnothing 122$ mm口径钻具开孔后,钻遇多层长段的破碎带和裂隙段,多次进行扩孔作业,最终开孔口径加大至 $\varnothing 152$ mm,其余级配套管依次封隔复杂孔段,在岩溶发育情况明显减

少后换 $\varnothing 78$ mm口径完钻。

在ZK602孔钻遇小型溶洞后,采用上一级套管扩孔至溶洞底部,在溶洞内形成人工孔壁,然后继续采用 $\varnothing 75$ mm绳索取心钻具终孔。

4.2 堵漏工艺

在钻遇破碎带和大型裂隙时,孔内冲洗液失返,常规的随钻堵漏工艺基本失效。为支撑上述的扩孔钻进作业,短时间的建立孔内循环,现场采用锯末、黏土、堵漏剂等材料加水搅拌混合后搓成5~8 cm的球状(图3),从孔口投入至孔底,然后钻具下至孔底反复挤压使其进入地层,水化膨胀后封堵裂隙,在短时间内形成稳定孔壁。ZK7103和ZK4703孔均采用该种堵漏方法穿过上部复杂地层,ZK602孔则采用该种方式封堵小型溶洞。



图3 堵漏材料

Fig.3 Plugging materials

4.3 低参数顶漏钻进

ZK601孔设计孔深100 m,采用 $\varnothing 122$ mm口径开孔,穿过第四系钻至15.10 m见基岩,下入 $\varnothing 114$ mm套管后换 $\varnothing 95$ mm绳索取心钻具施工,穿过上部岩溶破碎带至37.1 m后采用 $\varnothing 91$ mm钻杆作为套管,拟采用 $\varnothing 75$ mm绳索取心钻具继续钻进直至终孔。

在孔深58.6 m处钻遇第一个溶洞,探得溶洞底板深为65.60 m,溶洞高达7 m。考虑到该孔终孔深度仅为100 m,且为直孔,现场尝试采用低参数顶漏钻进,同时做好扩孔和挪孔的准备工作。

由于溶洞内管柱缺少孔壁支撑,为防止发生钻具事故,将钻压控制在2~3 kN以降低管柱的弯曲程度,降低转速至100 r/min以内减小离心力,同时做好现场的供水顶漏钻进,由经验丰富的机班长操作施工,在溶洞底板形成进尺,钻遇下部的溶洞时由于有中间岩体对管柱的径向支撑,管柱的弯曲变形较小,顺利钻至设计孔深,钻遇矿层完钻。

在溶洞内钻探施工,必须严格控制钻进规程参数,确保管柱安全,同时防止钻头偏移位置,避免起钻后无法重入溶洞底部钻孔。

5 大型溶洞处理技术措施

ZK7103孔通过多次扩孔穿过上部岩溶破碎带,采用 $\varnothing 98$ mm 绳索取心钻具钻至溶洞后,探得48.86~62.53 m孔段为洞高达到13.67 m的大型溶洞。现场分析认为该孔为斜孔,溶洞内管柱缺乏孔壁的约束支撑,在溶洞顶板探出后会在重力作用下弯曲(见图4),即使下入套管封隔后,后续的各个级配钻杆依然受到该弯曲强度影响。为降低管柱的使用风险,应该对溶洞内管柱的弯曲强度进行分析,判断其可行性。

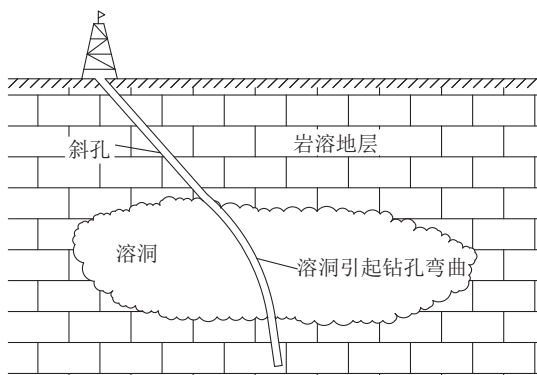


图4 溶洞内管柱弯曲示意

Fig.4 Schematic diagram of pipe string bending in karst cave

5.1 管柱弯曲安全性分析

江天寿等^[14]根据各地区地质钻探的施工经验,绘制了地质钻杆在不同弯曲强度所处的安全风险范围,见图5,其中 $\leq 0.4^\circ/\text{m}$ 为较安全区, $0.4\sim 0.5^\circ/\text{m}$ 为临界区, $> 0.5^\circ/\text{m}$ 为危险区,指出绳索取心钻杆合适的造斜弯曲强度为 $0.2\sim 0.5^\circ/\text{m}$ 。任攀攀等^[15]根据该强度范围开展了绳索取心钻进连续造斜器的设计研发。

近年来小口径受控定向钻进技术发展迅速^[16-20]。弯曲强度通常表示为每30 m孔段的全角变化率,单位为 $^\circ/30\text{ m}$ 。宋继伟等^[16]在小口径定向分支孔施工中,以及韩泽龙等^[17]在相关定向连续取心钻具研发中,绳索取心钻杆的安全造斜强度控制在 $6^\circ/30\text{ m}$ 以内;葛字家等^[18]隧道勘察方面设计造斜强度为 $3\sim 12^\circ/30\text{ m}$;苟晓东等^[19]在岩土工程勘察

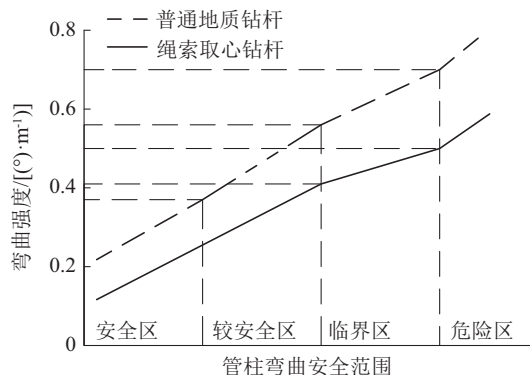


图5 地质钻杆弯曲安全范围^[14-15]

Fig.5 Safe bending range of geological drill pipe

中的弯曲强度为 $9^\circ/30\text{ m}$ 。

根据上述分析,为确保下部孔段施工安全顺利,溶洞内管柱的弯曲强度宜控制在 $0.4^\circ/\text{m}$ 之内,且越小越好。

5.2 溶洞内管柱影响因素

在大型溶洞内,尤其是斜孔中,管柱受到多种因素影响,其状态较复杂,通过分析主要有以下因素。

(1)管柱的自重。受地质因素和工程因素影响,钻孔轴线与铅垂方向始终存在一定的夹角,在重力影响下,管柱始终存在向铅垂方向的侧向力,在井斜控制理论中将该作用力称为降斜力^[3]。处于大型溶洞内的管柱失去孔壁支撑,在重力作用下管柱弯曲偏离原钻孔轴线。将进入溶洞内的这段管柱视为悬臂梁,依据材料力学中的相关理论^[20],其弯曲角度与孔斜、管柱材质和惯性矩、以及伸出的长度相关,可通过调整管柱级配改变惯性矩,从而降低该因素引起的弯曲。

(2)孔壁间的环状间隙。在绳索取心钻进工艺中,尽管钻杆与孔壁间的间隙极小,但是依然需要取心钻头、扩孔器等工具确保管柱在钻孔内居中。在溶洞内失去钻头和扩孔器等支撑,导致钻孔内的钻杆紧靠于孔壁一侧,进而造成溶洞内管柱产生位移。当施工现场具备条件时,应选用小间隙的钻具用于封隔溶洞。

(3)溶洞空间形态。溶洞的发育存在多种空间形态,如钻遇溶洞边界,管柱受溶洞边界影响极易产生弯曲变形甚至折断,需制定针对性的处理措施。曹雪原等^[6]在钻遇溶洞边界,下放管柱探测时遇阻卡现象,上提后发现钻具折断,采用了多种填

充物数次封填该段溶洞。

(4) 钻杆柱的运动状态。溶洞管柱失去孔壁支撑,受钻压和转速影响,在溶洞底板的钻孔极易偏移原轨迹。为防止偏移过大,在溶洞底部应采用低参数钻进一段进尺,在新孔段形成稳定支撑后方可逐渐提高参数。

5.3 溶洞内管柱弯曲测量

经上述分析,为防止溶洞内管柱弯曲强度过大,引起下部孔段钻进施工困难,需要对其孔斜进行测量后对比安全性。

ZK7103孔采用 $\varnothing 98$ mm口径钻得溶洞后,采用 $\varnothing 122$ mm钻具扩孔后下放,下放过程中未见遇阻、憋扭等现象,说明无溶洞边界影响。下放至溶洞底板后分别在孔深48.86 m和62.53 m处测量孔斜数据,经测量顶板处孔斜 9.39° ,底板处管柱向铅垂方向弯曲,孔斜为 3.12° 。经计算,溶洞内管柱的平均弯曲强度为 $0.46^\circ/\text{m}$,依据图5处于临界范围,考虑该孔设计深度为900 m,地质设计中深部地层硅质成分含量高,需采用较高钻进参数,为防止发生钻具事故,需降低溶洞引起的管柱弯曲强度。

因此,ZK7103孔将孔内 $\varnothing 114$ mm套管起拔后,采用 $\varnothing 152$ mm钻头进行顶漏扩孔作业,钻杆外径为 $\varnothing 146$ mm,内径 $\varnothing 126$ mm。完成扩孔后再次测量,溶洞底板处孔斜为 6.19° ,管柱弯曲有较大幅度的减轻,平均弯曲强度为 $0.23^\circ/\text{m}$,即为 $6.9^\circ/30$ m,接近常规的小口径定向钻进中造斜轨迹控制要求,孔内安全性有较大的提升,满足后续施工条件,于是采用该尺寸套管作为溶洞的人工孔壁。综合分析主要是大直径管柱抗弯性能更高,同时管柱与孔壁间的环状间隙更小。

5.4 穿越溶洞技术措施

采用 $\varnothing 152$ mm的管鞋作为钻头在溶洞底板处低钻进参数顶漏钻进1 m左右,严格控制钻进参数,确保钻头在溶洞底板处形成固定支撑。为了避免起钻后难以重入溶洞底板,在施工过程中不提出 $\varnothing 146$ mm钻杆,将其作为套管保持在孔底。然后下入 $\varnothing 122$ mm绳索取心钻具扫除套管内的岩心并继续钻进一定进尺,形成新的孔段后提出绳索取心钻具,采用上级套管对新的孔段进行扩孔跟管钻进,如此重复,最终 $\varnothing 146$ mm套管下至孔深69.16 m。后续钻进施工如4.1节所述,采用4.2节所述堵漏工艺将 $\varnothing 114$ mm套管与孔壁之间填充堵漏材料,水化

膨胀后完成堵漏,建立孔内循环。ZK7103孔成孔结构见表2。

表2 ZK7103孔钻孔结构
Table 2 Structure of ZK7103 hole

孔深/m	口径/mm	套管直径/mm
69.16	152	146
111.10	122	114
191.90	98	89
883.16	78	/

6 结论与建议

(1) 岩溶发育地区地下情况复杂,不确定性高,需要根据实际钻遇岩溶情况和钻孔设计制定可行性的处理措施。在浅孔施工中,可采用顶漏钻进等工艺快速穿过岩溶段钻至目的层,要求胆大心细,精心操作。在中深孔及深孔施工中,可采用扩孔钻进结合堵漏工艺,优化孔身结构,做好上部岩溶段的封隔措施,保障下部孔段施工顺利。

(2) 当钻遇大型溶洞采用套管作为人工孔壁时,需考虑管柱在溶洞内弯曲程度,判断其所处的安全风险范围,当弯曲强度较大时,应采取相应的措施降低,建议控制在 $6^\circ/30$ m之内。

(3) 在岩溶发育地区开展钻探施工,应制定好岩溶地层的多种处理措施预案,同时现场应储备大口径级配的钻具以及足够数量的钻杆。

参考文献(References):

- [1] 覃小群,宋开本,黄奇波,等.广西岩溶峰林区地下水赋存特征及钻探成井模式[J].中国岩溶,2017,36(5):618-625.
QIN Xiaqun, SONG Kaiben, HUANG Qibo, et al. Groundwater occurrence characteristics and drilling well models in karst peak forest areas, Guangxi, China [J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(5): 618-625.
- [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 Hengqian, ZHANG Jinchang, XIE Wenwei, et al. Applications study of geo-drilling technology [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1806-1822.
- [3] 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.
- [4] 宋继伟,蔡记华,朱斗圣,等.贵州岩溶地区复杂地层深部取心钻探技术[J].贵州地质,2025,42(3):414-422.

- SONG Jiwei, CAI Jihua, ZHU Dousheng, et al. Drilling core sampling technologies for complex deep strata in karst areas of Guizhou Province[J]. *Guizhou Geology*, 2025, 42(3): 414-422.
- [5] 黄建民, 孔汉光. 在多溶洞地层增长同级套管护孔方法[J]. *探矿工程*, 1982(1): 60-61.
- HUANG Jianmin, KONG Hanguang. Method of increasing casing protection at the same level in multi cave formation[J]. *Drilling Engineering*, 1982(1): 60-61.
- [6] 曹雪原, 任晓顺, 饶剑辉, 等. 小口径钻进遇溶洞的分析及处理[J]. *地质装备*, 2023, 24(1): 44-48.
- CAO Xueyuan, REN Xiaoshun, RAO Jianhui, et al. Analysis and treatment of small-calibre drilling into caves[J]. *Equipment for Geotechnical Engineering*, 2023, 24(1): 44-48.
- [7] 孟祥龙, 李大勇, 甘新科, 等. 岩溶地貌区浅层孔隙压力剖面的构建与钻探工艺探讨[J]. *钻探工程*, 2025, 52(3): 141-145.
- MENG Xianglong, LI Dayong, GAN Xinke, et al. Construction of shallow pore pressure profile and exploration of drilling technology in karst landform areas[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(3): 141-145.
- [8] 国土资源部. 地质岩心钻探规程: DZ/T 0227-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010-12-31.
- 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, 2010-12-31.
- [9] 孙国庆, 张民庆. 圆梁山隧道粉细砂充填型溶洞注浆技术探讨[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2005, 32(1): 58-60, 64.
- SUN Guoqing, ZHANG Mingqing. Discussion on grouting technology in karst cave filled by fine sand within Yuanliangshan Tunnel[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2005, 32(1): 58-60, 64.
- [10] 崔琦. 岩溶地区高速铁路桥梁桩基施工中溶洞处理技术[J]. *交通科技与管理*, 2025, 6(2): 126-128.
- CUI Qi. Karst cave treatment technology in high-speed railway bridge pile foundation construction in karst areas[J]. *Transportation Science & Technology Management*, 2025, 6(2): 126-128.
- [11] 李强, 秦余顺. 中老铁路桥梁桩基岩溶处理施工技术研究[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(4): 607-611.
- LI Qiang, QIN Yushun. Technologies to deal with karst caves beneath pile foundation of the big bridge on the Laos-China railway[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(4): 607-611.
- [12] 林春松. 广西靖西市龙昌锰矿区控矿构造特征及找矿方向分析[J]. *华北自然资源*, 2024(4): 70-73.
- LIN Chunsong. Analysis of ore-controlling structural characteristics and prospecting direction in Longchang Manganese mining area, Jingxi City, Guangxi[J]. *HuaBei Natural Resources*, 2024(4): 70-73.
- [13] 潘德元, 贺前平, 蔡隽, 等. 雪峰弧构造带钻孔轨迹控制关键技术研究[J]. *钻探工程*, 2024, 51(5): 108-114.
- PAN Deyuan, HE Qianping, CAI Juan, et al. Study of drilling trajectory control for improving exploration accuracy in Xuefenghu structural belt[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(5): 108-114.
- [14] 江天寿, 周铁芳. 受控定向钻探技术[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- JIANG Tianshou, ZHOU Tiefang. Controlled Directional Drilling Technology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [15] 任攀攀, 陈晓琳, 林修阔. 连续造斜绳索取心钻具造斜机构的设计与试验[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2010, 37(1): 35-36.
- REN Panpan, CHEN Xiaolin, LIN Xiukuo. Design and test of continuous deflecting wire-line coring Tool assembly[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2010, 37(1): 35-36.
- [16] 宋继伟, 冉飞, 方青, 等. 贵州省贞丰县金矿勘查小口径定向分支钻进技术[J]. *地质与勘探*, 2024, 60(6): 1217-1227.
- SONG Jiwei, RAN Fei, FANG Qing, et al. The small-bore directional branch drilling technology in gold exploration of Zhenfeng County, Guizhou Province[J]. *Geology and Exploration*, 2024, 60(6): 1217-1227.
- [17] 韩泽龙, 李小洋, 施山山, 等. 定向钻进连续取心钻具设计及取心参数仿真分析[J]. *钻探工程*, 2025, 52(1): 39-46.
- HAN Zelong, LI Xiaoyang, SHI Shanshan, et al. Design of drilling tool and simulation analysis of parameters for continuous coring in directional drilling[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(1): 39-46.
- [18] 葛字家, 张书磊, 张恒春, 等. 隧洞勘察定向钻进连续取心钻具性能验证试验[J]. *钻探工程*, 2026, 53(1): 85-90.
- GE Zijia, ZHANG Shulei, ZHANG Hengchun, et al. Performance verification test of directional drilling continuous coring tools for tunnel exploration[J]. *Drilling Engineering*, 2026, 53(1): 85-90.
- [19] 苟晓东. 长距离定向连续取心技术在岩土勘察中的应用与研究——以新加坡HDC3-1地铁勘察项目为例[J]. *钻探工程*, 2025, 52(5): 134-141.
- GOU Xiaodong. Application and research of long-distance directional continuous coring technology in geotechnical investigation: A case study of the Singapore HDC3-1 metro project[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(5): 134-141.
- [20] 刘鸿文. 材料力学[M]. 第6版. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- LIU Hongwen. Mechanics of Materials[M]. 6th ed. Beijing: Higher Education Press, 2017.

(编辑 王文)