

半合管钻探工艺在滇东南建水普雄稀土矿床 勘查中的应用

张子军^{1,3}, 倪光清^{*1,3}, 瞿亮^{1,3}, 严城民², 伍荣林^{1,3}, 周炳朝^{1,3}, 王长兵^{1,3}

(1. 云南省核工业二〇九地质大队, 云南昆明 650101; 2. 云南省地矿局区域地质矿产调查大队, 云南玉溪 653100;
3. 云南省三稀矿产资源勘查评价工程研究中心, 云南昆明 650101)

摘要:滇东南建水普雄稀土矿是一个超大型风化壳离子吸附型稀土矿床, 矿体赋存于长岭岗碱性岩体的全风化层和半风化层中。不同于花岗岩风化壳离子吸附型稀土矿, 该矿品位高, 厚度大, 用一般的浅井和赣南钻等取样工程无法揭穿稀土矿体。本文介绍了建水普雄矿区用半合管钻探工艺和浅井工程在相邻位置的施工情况。根据相同的取样层位和样品长度, 对比了矿体的品位变化情况, 利用品位的相对误差和正负偏差进行了统计, 结果表明, 单一对应样品品位相对误差合格率为100%; 品位 $<0.07\%$ 的正偏差样品占样品总数的78.57%, 负偏差样品占样品总数的21.43%; 品位 $\geq 0.07\%$ 的正偏差样品占样品总数的52.17%, 负偏差样品占样品总数的47.83%, 正负偏差在可控范围内; 单工程平均品位相对误差合格率为100%。说明半合管钻探工艺能够有效地应用于风化壳离子吸附型稀土矿勘查, 实现资源评价。

关键词:离子吸附型稀土矿; 半合管钻具; 植物胶; 小泵量; 底喷钻头; 滇东南建水普雄

中图分类号: P634 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2021)10-0062-08

Application of the split tube core barrel in the exploration of the Puxiong rare earth deposit in Jianshui, southeast Yunnan

ZHANG Zijun^{1,3}, NI Guangqing^{*1,3}, QU Liang^{1,3}, YAN Chengmin², WU Ronglin^{1,3},

ZHOU Bingchao^{1,3}, WANG Changbing^{1,3}

(1.No.209 Geological Party, Geological Bureau of Yunnan Nuclear Industry, Kunming Yunnan 650101, China;

2.Regional Geological and Mineral Resources Survey Brigade of Yunnan Geological and Mineral Resource Bureau, Yuxi Yunnan 653100, China;

3.Rare Earth, Rare Mental and Rare-Scattered Elements Mineral Resource Exploration and Evaluation Engineering Research Center of Yunnan Province, Kunming Yunnan 650101, China)

Abstract: The Jianshui Puxiong rare earth deposit in southeast Yunnan is a super-large weathered crust ion adsorption rare earth deposit discovered and identified by the No.209 Geological Team, Geological Bureau of Yunnan Nuclear Industry. The ore body occurs in the fully weathered layer and semi-weathered layer of the Changlinggang alkaline rock body. The ore has high grade and large thickness which is different from the ion-adsorbed rare earth ore in the weathered granite crust; thus, conventional shallow wells and the Gannan drills cannot be used to expose the rare earth ore body. In this paper, the split tube core barrel and the construction of shallow wells in adjacent locations are used to compare the grade changes of the ore body in the Jianshui Puxiong mining area for the same sampling layer and sample length with calculation of the relative error, and positive and negative deviation of the grade. The results show that the

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-03-30 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.10.008

作者简介: 张子军, 男, 白族, 1986生, 工程师, 资源勘查工程专业, 长期从事地质矿产调查、矿产勘查工作, 云南省昆明市高新区科高路2007号, 562337090@qq.com。

通信作者: 倪光清, 男, 汉族, 1975生, 高级工程师, 长期从事钻探工程研究及管理工作, 云南省昆明市高新区科高路2007号, 1213835731@qq.com。

引用格式: 张子军, 倪光清, 瞿亮, 等. 半合管钻探工艺在滇东南建水普雄稀土矿床勘查中的应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(10): 62-69.

ZHANG Zijun, NI Guangqing, QU Liang, et al. Application of the split tube core barrel in the exploration of the Puxiong rare earth deposit in Jianshui, southeast Yunnan[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(10): 62-69.

relative error qualification rate of a single corresponding sample is 100%; the samples with grade positive deviation < 0.07% account for 78.57% of the total number of samples, while those with grade negative deviation account for 21.43% of the total number of samples. The samples with grade positive deviation $\geq 0.07\%$ account for samples 52.17% of the total, while those with negative deviation account for 47.83% of the total number of samples, indicating positive and negative deviations within the controllable range. The single project average grade relative error qualification rate is 100%. It shows that the split tube core barrel can be effectively applied to the exploration of weathered crust ion-adsorbed rare-earth minerals to realize resource evaluation.

Key words: ion adsorption type rare earth ore; split tube tool; vegetable glue; small pump volume; bottom jet drill bit; Jianshui Puxiong in southeast Yunnan

0 引言

近年来,云南的风化壳离子吸附型稀土矿找矿效果显著,滇西南临沧花岗岩体、滇东南建水长岭岗碱性岩体、滇西腾冲—陇川地区均发现了不同规模的离子吸附型稀土矿床^[1-5]。这些矿床的发现,增加了稀土储量,丰富了矿床类型。随着找矿勘查的深入,理论研究也得到了不断完善和长足发展^[6-9]。

滇东南建水普雄稀土矿成矿母岩为长岭岗碱性岩体,岩性为霞石正长岩和碱性正长岩。不同于云南省已发现的花岗岩风化壳离子吸附型稀土矿^[10],长岭岗碱性岩体风化壳厚度大,一般为10.50~60.42 m,最厚90.60 m,其中全风化层厚度0.50~71.74 m,半风化层厚度0.50~81.00 m;稀土全相品位高,全风化层稀土全相品位0.164%~0.207%,半风化层稀土全相品位0.126%~0.161%。一般的浅井或赣南钻无法揭穿稀土矿体,传统的机械岩心钻探由于钻具的扰动,致使岩(矿)心结构遭受破坏。目前,半合管钻探技术在其它领域已有较成熟的应用^[11-18],但针对风化壳离子吸附型稀土矿,未见相关文献报到。基于上述因素,云南省核工业二〇九地质大队采用半合管钻探工艺对普雄矿区的稀土矿体进行了揭露和评价。本文通过矿区稀土特征、半合管钻探工艺特点和原理、施工质量,结合单一对应样品、单工程平均品位的相对误差合格率、相对误差超差率对比,总结出半合管钻探工艺能有效的应用于风化壳离子吸附型稀土矿勘查和评价。

1 风化壳离子吸附型稀土矿的特征及钻探施工难点

1.1 风化壳离子吸附型稀土矿的特征

离子吸附型稀土矿系含稀土花岗岩、碱性岩、火山岩或变质岩经多年风化(物理、化学、生物风化)形成粘土矿物,稀土离子以水合离子或羟基水合离子

吸附在粘土矿物的表面,遵循离子交换规律,可用硫酸铵等化学试剂提取稀土。稀土矿体多分布在高程较低的丘陵地带,松散的砂粘土有白色、灰色、红色、黄色等。矿山产品为混合氧化稀土,稀土配分类型有轻稀土型、中重稀土型和重稀土型。矿体埋深浅,矿石中稀土元素大多呈离子状态吸附在高岭土、埃洛石和水云母等粘土矿物上。

云南省离子吸附型稀土矿主要分布在山体平缓地带,母岩一般为花岗岩类和碱性岩类。在不同的母岩分布区,垂向上风化壳厚度有着明显差异。在碱性侵入岩分布区,风化壳具有的主要特征是粘土、高岭土化强烈,原岩特征基本消失,岩石结构疏松、易碎,手搓多为粉末状,且具有滑感。部分地段有淡红、灰绿色的霞石正长岩和碱性正长岩球状未风化体,向下逐渐过渡到弱风化层直至基岩。

1.2 钻探施工难点

稀土矿勘查过程中钻探施工的难点主要表现在以下几个方面:

(1)常规钻探方法钻进,冲洗液对岩(矿)心的冲刷,根本无法取到完整岩(矿)心,采取率低,且稀土离子矿物基本被冲洗液冲走,样品没有代表性,故而规范要求不允许采用冲洗液钻进。

(2)不同微地貌单元风化程度不一,部分地段存在球状未风化体。机械干钻的方法,钻头未冷却无法正常钻进,且获得的岩心经过高温,结构状态完全变化(图1),虽然采取率高,但岩样原状结构基本被破坏甚至完全破坏,不符合取样要求。

(3)钻进弱胶结层位时,钻孔孔壁掉块、垮塌,卡钻、埋钻频繁,岩心采取率达不到规范要求,采取的岩(矿)心质量更是无法满足要求;钻进胶结较好层位时,岩心从取心管中取出需要敲击,岩矿原状结构也遭受破坏(图2)。



图1 干钻法取出的稀土矿岩心

Fig.1 Rare earth cores taken out by dry drilling



图2 从岩心管敲击取出的稀土矿岩心

Fig.2 Rare earth ore core taken out from the core tube

(4)在江西、广东、福建等省常用的浅井、赣南钻虽然也能满足取样要求,但对厚大的稀土矿体以及赋存于地下水以下的矿层便无法揭穿。

2 半合管钻探工艺特点和原理

鉴于风化壳离子吸附型稀土矿的特征及钻探施工难点,云南省核工业二〇九地质大队对风化壳层结构特征、可钻性和水敏性进行了充分研究并在现场进行了大量的泥浆、钻头、钻进参数和工艺的试验。最终采用了底喷式钻头和分散无固相抑制性泥浆护壁,结合小泵量单动双管半合管取心工艺,对厚大的风化壳离子吸附型稀土矿进行揭露和评价。

2.1 半合管特点

半合管装置如图3所示,取心工艺主要有以下几个特点。

(1)设置了双级单动机构,确保了岩(矿)心进入半合管内后不再受任何扰动。

(2)内壁磨光的半合管有利于破碎、松散的岩



图3 取心器单动装置、单向阀及内壁光滑的半合管

Fig.3 Swivel, one-way valve and split tube of the core barrel

(矿)心进入,取出地表后直接打开半合管就能顺利取出岩(矿)心,有效地保证了松散岩(矿)心的结构特征。

(3)单向阀保证了冲洗液不对岩(矿)心进行冲刷和浸泡,既保证了钻头的冷却和钻孔的稳定,又避免了冲洗液对岩(矿)心的破坏和浸入,有效提高了岩(矿)心采取率和采取质量。

2.2 半合管原理

半合管钻具的结构示意和应用状态如图4、图5所示。

(1)半合管钻具是通过改进普通单动双管钻具演化而来,通过抱箍钩头定位(图5),上端与下单动相连,下端与卡簧座相连。上单动接头连接外管配合钻头使用(图4)。在钻进过程中半合管内管不随外管转动,部分岩屑分离下沉进入沉砂管,避免进入单向阀和内外管之间。单向阀使冲洗液在正循环钻进时畅通,而在下钻过程中封闭,有效防止钻具在接近孔底时堵塞通道。单向阀的上阀座上面有打捞头,用于打捞钻具。

(2)半合管的中部抱紧机构通过开口钩头抱箍

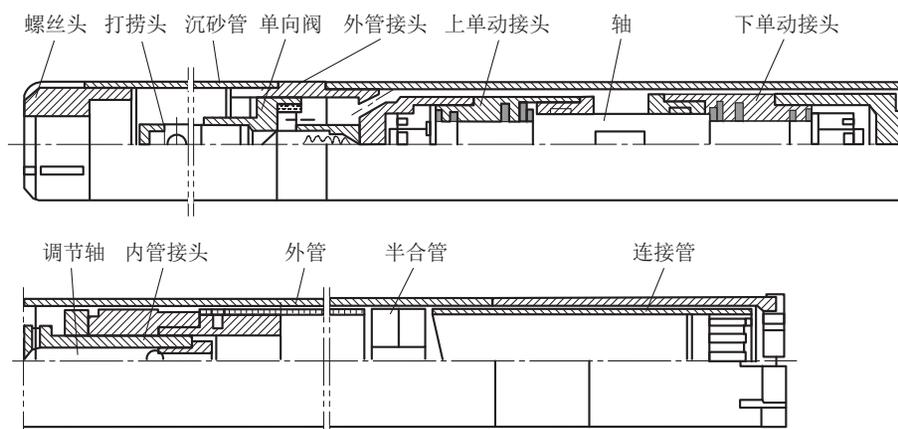


图4 半合管的结构示意

Fig.4 Mechanical design of the split tube



图5 半合管的安装及工作状态

Fig.5 Installation and working status of the split tube

与梯形槽相配合(图5)。半合管中部不同长度位置车削有5道环槽,每道环槽中开有2条梯形槽缝;由于梯形槽在不同位置所夹大弧长度不同,当抱箍钩头由上端进入槽缝,然后推动到下端位置,则将半合管抱紧;在取心过程中将抱箍钩头全部打开,半合管内管分成两半,保留原状岩(矿)心,有效减少在取心和装箱过程中对岩(矿)心的人为干扰。

3 样品采集与分析

3.1 样品采集

本次对比验证工作施工7口浅井,半合管钻探工程7个(图6)。

为保证施工安全,对比验证工程先施工钻孔,钻孔终孔后在钻孔位置1 m范围内施工浅井。为保证样品的可对比性,施工时浅井采样壁须靠近钻孔。采样时参考钻孔采样位置,同时考虑浅井施工中的粘土层、全风化层及半风化层的位置划分样段,采样后样品及时送化实验室分析。

3.2 分析结果

浅井和半合管钻探工程中分别采集37件样品,包含粘土层、全风化层和半风化层样品。样品经玛瑙研钵研磨至200目,在具有甲级测试分析资质的云南省核工业二〇九地质大队实验室分析,测试仪器采用加拿大ELANDRC-e型等离子体质谱仪(Q-ICP-MS),分析精度对稀土元素优于5%。对比试验工程的全相稀土总量(TREO)分析结果见表1。

4 半合管钻探工艺的应用对比及推广情况

根据相同采样位置、同一样品长度的原则进行对比分析。浅井样品为壁上刻槽采集,其数据的真实性、可靠性相对较高。因此,对比试验以浅井样品为基本分析样,钻孔的样品作为验证样。分别采用同工程单一样品、单工程平均品位进行相对误差合格率、相对误差超差率计算。按照《稀土矿产地质勘查规范》(DZ/T 0204—2002)要求,以品位变化系数30%和60%为界,将稀土组分分布均匀程度划分为均匀(品位变化系数<30%)、较均匀(品位变化系数

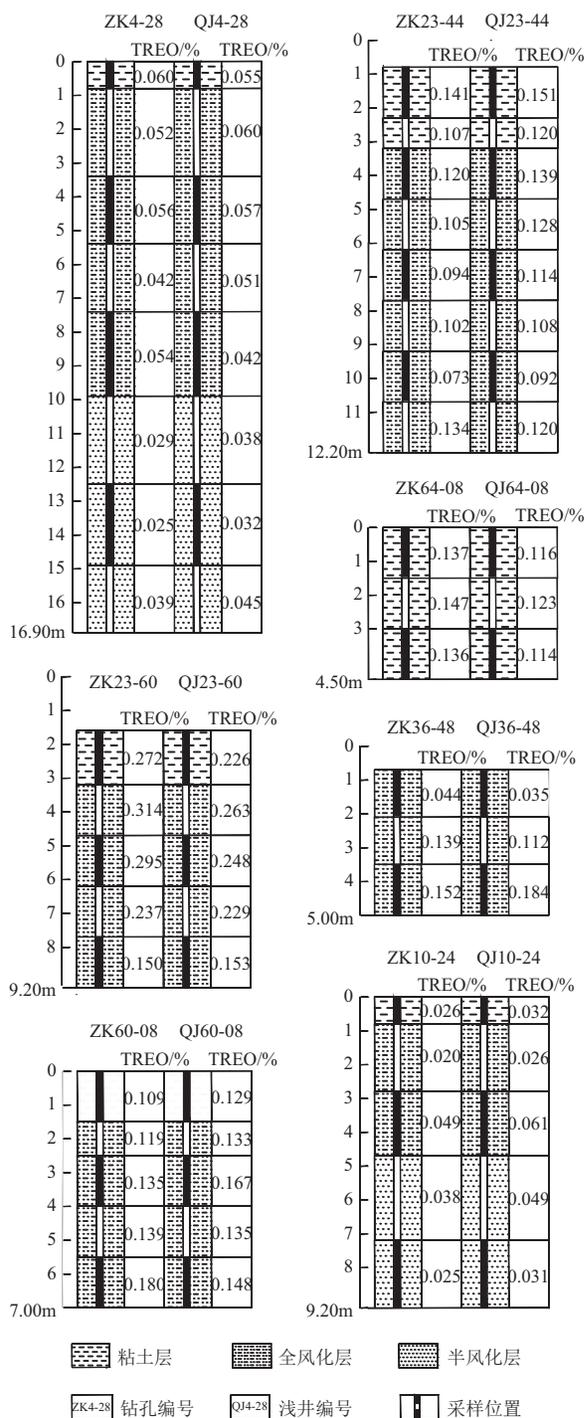


图6 钻孔和浅井对比

Fig.6 Comparison of boreholes and shallow wells

30%~60%) 和不均匀(品位变化系数 $>60\%$)共3种,结合李国生等^[18]数据,本次对比工作相对误差以30%为临界点计算相对误差合格率和相对误差超差率。

表1 对比试验工程取样位置及全相稀土总量(TREO)分析结果

Table 1 Comparative test project sampling location and total rare earth (TREO) analysis results

样号	取样深度/m	全相稀土总量/%		
		浅井	半合管	差值
4-28H01	0.00~0.80	0.055	0.060	-0.005
4-28H02	0.80~2.80	0.060	0.052	0.008
4-28H03	2.80~5.40	0.057	0.056	0.001
4-28H04	5.40~7.40	0.051	0.042	0.009
4-28H05	7.40~9.90	0.042	0.054	-0.012
4-28H06	9.90~12.50	0.038	0.029	0.009
4-28H07	12.50~14.90	0.032	0.025	0.007
4-28H08	14.90~16.90	0.045	0.039	0.006
23-44H01	0.80~2.30	0.151	0.141	0.010
23-44H02	2.30~3.20	0.120	0.107	0.013
23-44H03	3.20~4.70	0.139	0.120	0.019
23-44H04	4.70~6.20	0.128	0.105	0.023
23-44H05	6.20~7.70	0.114	0.094	0.020
23-44H06	7.70~9.20	0.108	0.102	0.006
23-44H07	9.20~10.70	0.092	0.073	0.019
23-44H08	10.70~12.20	0.120	0.134	-0.014
36-48H01	0.70~2.10	0.035	0.044	-0.009
36-48H02	2.10~3.50	0.112	0.139	-0.027
36-48H03	3.50~5.00	0.184	0.152	0.032
64-08H01	0.00~1.50	0.116	0.137	-0.021
64-08H02	1.50~3.00	0.123	0.147	-0.024
64-08H03	3.00~4.50	0.114	0.136	-0.022
10-24H01	0.00~0.80	0.032	0.026	0.006
10-24H02	0.80~2.80	0.026	0.020	0.006
10-24H03	2.80~4.70	0.061	0.049	0.012
10-24H04	4.70~7.20	0.049	0.038	0.011
10-24H05	7.20~9.20	0.031	0.025	0.006
23-60H01	1.60~3.20	0.226	0.272	-0.046
23-60H02	3.20~4.70	0.263	0.314	-0.051
23-60H03	4.70~6.20	0.248	0.295	-0.047
23-60H04	6.20~7.70	0.229	0.237	-0.008
23-60H05	7.70~9.20	0.153	0.150	0.003
60-08H01	0.00~1.50	0.129	0.109	0.020
60-08H02	1.50~2.50	0.133	0.119	0.014
60-08H03	2.50~4.00	0.167	0.135	0.032
60-08H04	4.00~5.50	0.135	0.139	-0.004
60-08H05	5.50~7.00	0.148	0.180	-0.032

4.1 单一样品对比

根据《云南省建水县普雄矿区风化壳型铈稀土矿勘探报告》要求,风化壳离子吸附型稀土矿工业指标:轻稀土边界品位 $[\omega(\text{TREO})]$ 为0.07%~0.1%,最低工业品位 $[\omega(\text{TREO})] \geq 0.1\%$ 。相对误差= $[(\text{浅井样品品位} - \text{钻探样品品位}) / \text{浅井样品品位}] \times 100\%$ 。本文以0.07%作为临界点进行对比分析,对比结果见表2。

表2 单一样品相对误差统计
Table 2 Relative errors of a single sample

取样工程	样品品位	样品件数	相对误差<30%	
			样品件数	合格率/%
QJ/ZK	<0.07%	14	14	100
	$\geq 0.07\%$	23	23	100

注:QJ为浅井,ZK为半合管钻探(下同)

由表2可以看出,在品位<0.07%的14件样品中,2种取样工程相对误差<30%的有14件,占样品总数的100%;在品位 $\geq 0.07\%$ 的23件样品中,相对误差<30%的有23件,占样品总数的100%。所有对比样品分析结果的相对误差均在30%以内,满足行业规范所允许的误差范围要求。

4.2 正负偏差对比

本次工作对样品品位的正负偏差进行了统计,同样以0.07%作为临界点进行对比分析,统计结果见表3。

表3 正负偏差统计
Table 3 Positive and negative deviations

取样工程	样品品位	样品件数	正偏差		负偏差	
			样品件数	偏差率/%	样品件数	偏差率/%
QJ/ZK	<0.07%	14	11	78.57	3	21.43
	$\geq 0.07\%$	23	12	52.17	11	47.83

从表3可以看出,在品位<0.07%的14件样品中,正偏差的样品有11件,占样品总数的78.57%,负偏差的样品有3件,占样品总数的21.43%;在品位 $\geq 0.07\%$ 的23件样品中,正偏差的样品有12件,占样品总数的52.17%,负偏差的样品有11件,占样品总数的47.83%。品位 $\geq 0.07\%$ 的样品正负偏差大体相当,满足资源量估算要求。

4.3 平均品位对比

在对比的7个取样工程中,以0.07%作为临界点对单工程内所有样品用算数平均法求得单工程平均品位,再计算单工程平均品位误差,其计算结果见表4。

表4 平均品位相对误差统计
Table 4 Relative errors of average grade

取样工程	样品品位	工程个数	相对误差<30%	
			工程个数	合格率/%
QJ/ZK	<0.07%	2	2	100
	$\geq 0.10\%$	5	5	100

表4中,在品位<0.07%的2个工程中,相对误差<30%的有2个,占同一品级可对比工程的100%;在品位 $\geq 0.10\%$ 的5个工程中,相对误差<30%的有5个,占同一品级可对比工程的100%。2种取样工程对于矿体的圈定和资源储量估算均符合行业规范要求。

4.4 项目应用情况

(1)半合管钻探工艺采取的岩(矿)心如图7所示。从图中可以看出,不同层位的岩(矿)心结构完整,未受到冲洗液的侵蚀或污染。

(2)建水普雄稀土矿详查项目完成钻孔93个,钻探进尺11800 m。平均岩心采取率97.36%,平均矿心采取率98.55%,所有钻孔质量都为优秀。

(3)临沧岔河稀土矿调查评价项目完成钻孔34个,有效钻探进尺1511.27 m。30个钻孔见矿,4个钻孔见矿化。有32个钻孔经地质编录评定为优质钻孔,2个钻孔评定为良好。平均岩心采取率95.23%,平均矿心采取率97.56%。

(4)半合管钻探工艺的应用突破了离子吸附性稀土矿不能使用冲洗液的规定,为有效地勘查该类型矿床奠定了坚实的基础。

5 注意事项及改进方向

5.1 注意事项

(1)每次下钻前要将钻具沉砂管中的沉砂清除干净,确保单向阀正常工作。并检查双级单动机构,添加润滑油脂确保轴承润滑良好。

(2)冲洗液采用优质SM植物胶和聚丙烯酰胺。SM植物胶为天然高分子复合材料,聚丙烯酰胺为



图7 半合管钻进工艺采取各含矿层位岩心照片

Fig.7 Cores taken from each ore-bearing layer with the split tube drilling process

复合高分子材料,加入冲洗液中可迅速形成网状结构,可以有效地控制冲洗液降失水量防止孔壁坍塌,有利于保护岩(矿)心。SM植物胶、聚丙烯酰胺可自动降解,不污染环境。

(3)钻头的选择。选择底喷钻头或深水槽钻头(图8所示),将半合管内管间隙调至低于1 mm,冲洗液流经钻头水眼冷却钻头,有效减少了冲洗液对岩(矿)心的冲蚀,冲洗液从钻杆与孔壁之间携带岩屑返出,从而保证钻孔内清洁。

(4)施工中采用正常钻进1/2的泵量(10 L/min),冲洗液流速变低,减小了冲洗液对孔壁和松散层位的冲刷。

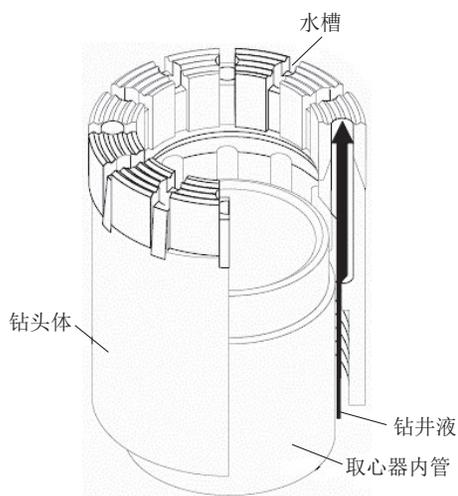


图8 底喷钻头

Fig.8 Bottom jet drill bit

5.2 改进方向

(1)2次项目的应用和施工,采用的都是内管为3 m长的半合管,且在总成上加装了沉砂装置,钻具总长超过了4 m。地表层4~5 m需要采用干钻法取心钻进后,才能转换成半合管钻具施工,岩心样品结构受到了一定的破坏。

(2)由于下钻时,冲洗液首先充填在半合管中,虽然随着岩心进入半合管,半合管中的冲洗液通过单向阀回流到半合管外,但每个回次最上面5~10 cm的岩心还是被冲洗液浸泡了一个回次的时间,受到了一定的影响。

针对以上的不足,在以后的项目中我们将对钻具做出改进。一方面制作0.5~1 m长的半合管专门用作施工5 m以浅孔段。另一方面在半合管内加装活塞,最大限度地减少冲洗液对岩样的影响。

参考文献(References):

- [1] 王敏,周家喜,刘凤祥,等.滇东南建水普雄铌稀土矿床矿物学和元素地球化学特征[J].地质学报,2020,94(12):3746-3760.
WANG Min, ZHOU Jiayi, LIU Fengxiang, et al. Mineralogy and elemental geochemistry of the Puxiong Nb-REE deposit in Jianshui city, southeast Yunnan province, SW China [J]. Acta Geologica Sinica, 2020,94(12):3746-3760.
- [2] 张保涛,蓝信杰,金刚,等.云南临沧花岗岩带回龙卡离子吸附型稀土矿床地质特征和控制因素[J].地质论评,2020,66(2):380-392.
ZHANG Baotao, LAN Xinjie, JIN Gang, et al. Geological characteristics and controlling factors of the Huilongka

- ion-adsorption type REE deposit in Lincang granite belt, Yunnan province[J]. *Geological Review*, 2020, 66(2):380-392.
- [3] 何显川,李杨,张民. 云南上允花岗岩风化壳离子吸附型稀土矿床成矿条件浅析[J]. *世界有色金属*, 2016(3):117-122.
HE Xianchuan, LI Yang, ZHANG Min. Analysis on the metallogenic conditions of the ion adsorption type rare earth deposit on the upper and the granite weathering crust in Yunnan[J]. *World Nonferrous Metals*, 2016(3):117-122.
- [4] 刀俊山,黄俊坤,贾奎,等. 云南省富东离子吸附型稀土矿床成因浅析[J]. *世界有色金属*, 2017(3):194-196.
DAO Junshan, HUANG Junkun, JIA Kui, et al. Analysis of the genesis of ore deposit in Yunnan province, east of rare earth ion adsorption type [J]. *World Nonferrous Metals*, 2017(3):194-196.
- [5] 陆蕾,王登红,王成辉,等. 云南临沧花岗岩中离子吸附型稀土矿床的成矿规律[J]. *地质学报*, 2019, 93(6):1466-1478.
LU Lei, WANG Denghong, WANG Chenghui, et al. Mineralization regularity of ion-adsorption type REE deposits on Lincang granite in Yunnan province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6):1466-1478.
- [6] 燕利军,陈永清,邓志祥,等. 云南盈江地区风化壳型稀土矿特征及找矿方向[J]. *地质与勘探*, 2020, 56(2):288-301.
YAN Lijun, CHEN Yongqing, DENG Zhixiang, et al. Features of weathered crust rare earth ores and prospecting direction in the Yingjiang area, Yunnan province[J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(2):288-301.
- [7] 肖仕银,李秋萍,王一丁. 云南陇川县户撒地区稀土矿成因及找矿方法[J]. *云南地质*, 2018, 37(2):213-219.
XIAO Shiyin, LI Qiuping, WANG Yiding. The genesis and prospecting method of REE deposit in Husa area of Longchuan, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 2018, 37(2):213-219.
- [8] 陆蕾,王登红,王成辉,等. 云南离子吸附型稀土矿成矿规律[J]. *地质学报*, 2020, 94(1):179-191.
LU Lei, WANG Denghong, WANG Chenghui, et al. The metallogenic regularity of ion-adsorption type REE deposit in Yunnan province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(1):179-191.
- [9] 李家云,李治平. 云南陇川地区稀土矿床成矿预测[J]. *云南地质*, 2010, 29(4):429-430.
LI Jiayun, LI Zhiping. The metallogenesis prognosis of REE deposit in Longchuan area, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 2010, 29(4):429-430.
- [10] 赵芝,王登红,陈郑辉,等. 南岭离子吸附型稀土矿床成矿规律研究新进展[J]. *地质学报*, 2017, 91(12):2814-2827.
ZHAO Zhi, WANG Denghong, CHEN Zhenghui, et al. Progress of research on metallogenic regularity of ion-adsorption type REE deposit in the Nanling range[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(12):2814-2827.
- [11] 钟丕和. 半合管钻进采心工具[J]. *探矿工程*, 1985(2):66.
ZHONG Pihe. Split tube core barrel [J]. *Exploration Engineering*, 1985(2):66.
- [12] 沈义国. 砂钻半合管取样钻具试验效果[J]. *探矿工程*, 1988(4):44-47.
SHEN Yiguo. Testing of the split tube core barrel for gold placer drilling[J]. *Exploration Engineering*, 1988(4):44-47.
- [13] 蒲俊杰. DJ型单动双管取心器的改进与应用[J]. *中国煤炭地质*, 2009, 21(9):61-63.
PU Junjie. Improvement and application of DJ single swiveling double-tube core barrel [J]. *Coal Geology of China*, 2009, 21(9):61-63.
- [14] 陈建. 半合管在粉细砂层取芯技术中的应用浅析[J]. *低碳世界*, 2016(31):90-91.
CHEN Jian. Application of the split tube in silt and fine sand coring[J]. *Low Carbon World*, 2016(31):90-91.
- [15] 叶兰肃,苗晓晓,王建兴,等. 91单动三重半合管钻具的研制与应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2017, 44(7):56-61.
YE Lansu, MIAO Xiaoxiao, WANG Jianxing, et al. Development of 91 single-action triple coupling pipe core drilling tools and its application [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017, 44(7):56-61.
- [16] 梁文臻. 孔内冲击半合管式取土器[J]. *探矿工程*, 1986(5):55-56.
LIANG Wenzhen. In-hole impact split tube sampler[J]. *Exploration Engineering*, 1986(5):55-56.
- [17] 程玉芝. 取心器半合管卡箍固紧法[J]. *探矿工程*, 1987(1):61.
CHENG Yuzhi. Fastening method for the core barrel split tube with clamps[J]. *Exploration Engineering*, 1987(1):61.
- [18] 李国生,谢琳,李燕茹. 洛阳铲与小圆井在赣南风化壳离子吸附型稀土矿床勘查评价应用中的对比分析[J]. *中国矿业*, 2016, 25(8):152-155, 160.
LI Guosheng, XIE Lin, LI Yanru. Comparison between applications of Luoyang shovel and small well on exploration and evaluation of weathering crust ion-adsorption type REE deposits in southern Jiangxi province [J]. *China Mining Magazine*, 2016, 25(8):152-155, 160.

(编辑 荐华)