

空气反循环取样钻探技术应用于金矿勘查的地质效果对比研究

陈勇¹, 陆生林², 黄晟辉³

(1.新疆地质矿产勘查开发局第十一地质大队,新疆昌吉831100;

2.中国地质调查局成都地质调查中心,四川成都610081; 3.中国地质科学院探矿工艺研究所,四川成都611734)

摘要:长期以来,由于地质方面对岩样认知的限制,空气反循环取样钻探技术(RC工艺)在我国矿产勘查中的应用并不广泛。本文根据RC工艺在云南鹤庆北衙金矿等矿区的试验情况,从找矿地质效果对比分析角度提出了一些认识。首先明确了此次RC工艺与常规岩心钻进工艺对比示范性应用试验的目的及试验内容;介绍了试验孔选取依据;从岩样收集与采样方法、岩样采取率、地层与矿层丢失情况、岩样获取地层的岩性及原生结构、推算岩层产状方面的准确性、岩心污染程度、计算矿品位的准确性等7个方面对比分析了RC工艺与常规岩心钻进工艺应用于金矿勘查的地质找矿效果;认为RC工艺具高效、低成本等施工优势,且在岩样代表性、岩心污染、矿品位等找矿效果方面优于常规岩心钻进。最后进一步指出了RC工艺目前应用于矿产勘查仍存在的一些问题,并提出相关建议。

关键词:空气反循环取样钻探;常规岩心;RC岩样;金矿勘查;取样工艺;钻进效率;地质效果

中图分类号:P634 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2021)09-0082-07

Comparative study on geological effect of air reverse circulation sampling drilling technology in gold exploration

CHEN Yong¹, LU Shenglin², HUANG Shenghui³

(1. The Eleven Geological Branch, Xinjiang Geological and Mineral Bureau, Changji Xinjiang 831100, China;

2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu Sichuan 610081, China;

3. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: Air reverse circulation sampling drilling technology has not been widely used in mineral exploration for a long time due to the low recognition of rock samples by domestic geologists. In view of the test of air reverse circulation drilling technology in Beiya Gold Mine, Heqing, Yunnan Province, this paper puts forward some findings through comparative analysis of the geological effect in mineral exploration. This paper defines the purpose and contents of the demonstration application test of air reverse circulation sampling technology and conventional core drilling technology; introduces the basis for test hole selection; and compares and analyzes the geological effect of the RC sampling method and the conventional core drilling method in gold exploration from seven aspects: rock sample collection and sampling method, rock sample recovery, missing of strata and ore beds, lithology and primary structure of the sampled strata, accuracy of rock occurrence calculation, core pollution degree, and accuracy of ore grade calculation. The study reveals that the RC sampling method has high efficiency and low cost; and it is superior to conventional core drilling in terms of rock sample representativeness, core pollution and ore grade. Finally, some problems in the application of RC technology in mineral exploration are further pointed out, and the relevant suggestions are put forward.

Key words: air reverse circulation sampling drilling; conventional core; RC rock sample; gold exploration; sampling technology; drilling efficiency; geological effect

收稿日期:2021-01-11; 修回日期:2021-08-13 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.09.009

作者简介:陈勇,男,汉族,1965年生,副队长,高级工程师,探矿工程专业,长期从事地质钻探工艺、堵漏技术及岩心钻探施工管理工作,新疆昌吉市北京南路14号地质村,1653839215@qq.com。

引用格式:陈勇,陆生林,黄晟辉.空气反循环取样钻探技术应用于金矿勘查的地质效果对比研究[J].钻探工程,2021,48(9):82-88.

CHEN Yong, LU Shenglin, HUANG Shenghui. Comparative study on geological effect of air reverse circulation sampling drilling technology in gold exploration[J]. Drilling Engineering, 2021,48(9):82-88.

由于空气反循环取样钻探技术(简称RC工艺)具有较高的钻探效率和较低的成本,所以在欧美各国及澳大利亚等国家地质勘探工作中得到广泛的应用。20世纪80年代后期我国引进该项钻探技术,并在10多个省局进行了推广应用。然而,以岩屑代替传统的柱状岩心尚存在争议,又伴随着地质行业的萎缩,这一技术并未得到大范围推广应用^[1-4]。本文根据RC取样技术在云南鹤庆北衙金矿等矿区的试验情况,从找矿地质效果对比分析角度提出一些认识,并针对实践中发现的一些问题提出相关建议。

1 矿区地质特征

北衙金矿位于云南省大理州鹤庆县西邑镇北衙村东南方向约1.44 km,属西南三江富碱斑岩成矿带区域,地质构造复杂,华里西期海相玄武岩和喜山期富碱斑岩极为发育^[5]。

1.1 地层

矿区出露的地层有二叠系上统峨眉山玄武岩组($P_2\beta$);三叠系下统青天堡组(T_1q);中统北衙组(T_2b)岩;第四系更新统蛇山组($Q_{ps/h}$)及第四系全新统(Qh)。其中,三叠系中统北衙组(T_2b)是矿区的主要赋矿地层,其岩性主要为白云质灰岩、铁化砂屑灰岩、条带状含泥质灰岩、似角砾状灰岩夹长石砂岩。

1.2 岩浆岩

矿区内出露岩浆岩以喜马拉雅山期形成的浅层侵入斑岩为主,主要侵入岩有石英正长斑岩、石英二长斑岩、正长斑岩及煌斑岩脉等。矿区内因多期次强烈构造运动,伴有岩浆岩的侵入,使区内各种岩石均发生不同程度的蚀变现象,区内与成矿有关的蚀变主要有褐铁矿化、黄铁矿化、磁铁矿化、铁锰矿化等。

1.3 构造

矿区位于近南北向鹤庆—松桂复式向斜南段,矿区构造与区域构造线方向一致,均呈近南北向展布。区内构造活动强烈,次级褶皱、断层以及节理(裂隙)发育^[6]。

2 空气反循环钻进技术对比试验的目的及内容

2.1 试验目的

通过空气反循环钻进技术示范性应用试验,分析对比该技术与常规岩心钻进技术的找矿效果,为

该技术方法纳入我国地质勘查类规范和《地质岩心钻探规程》(DZ/T 0227—2010)打下坚实的工作基础。

2.2 试验内容

开展采取率、岩性、地层变化、原生结构、岩石物理力学性质、污染程度和矿品位等7大地质找矿效果对比研究^[7]。

2.3 试验孔选择情况

由于本次试验机械设备较大,空压机无法拆卸,对交通条件要求较苛刻。路面宽度需要3 m以上,车载钻机可直接到达孔位。部分矿区受到交通条件的限制,无法进场。根据RC工艺在国内地质勘查领域应用的现状,RC工艺应用于找矿的最大孔深<300 m,因此选择见矿位置在200 m以浅的试验孔(直孔)2个;地下水位低于钻孔深度;试验孔距离常规钻孔距离<5 m,矿体稳定、缓倾斜,品位变化不大,以达到对比的准确性。

根据以上条件,试验区域选择在云南鹤庆北衙金矿。

3 钻进效率研究

3.1 钻孔情况

计划实施深度200 m的对比试验孔2个,但实钻矿区丰富的地下水及采坑造成的应力差等原因影响试验对比孔地质分析效果,综合考虑应增加对比试验孔样本,最终实际施工钻孔4个(见图1),最大孔深为149.02 m。

3.2 钻进效率

在保证地质人员能即时进行岩样编录及分析的基础上,控制转速在20~30 r/min,且根据地质人员需要停钻。统计了不同钻进孔径的机械钻速: $\phi 154$ mm孔径为10.64 m/h、 $\phi 134$ mm孔径为12.1 m/h、 $\phi 114$ mm孔径为9.32 m/h。

RC试验孔的平均台月效率是常规岩心钻进对比孔的2~3倍。试验中最高班进尺达60多米,还有2次达40多米,RC试验孔的平均台月效率为845 m(见图2,扣掉了停工待料时间;主要是考虑到停工待料时间在生产中比重小,而本次试验孔的性质占的比重较大);据统计该矿区的常规岩心钻进的平均台月效率<300 m。

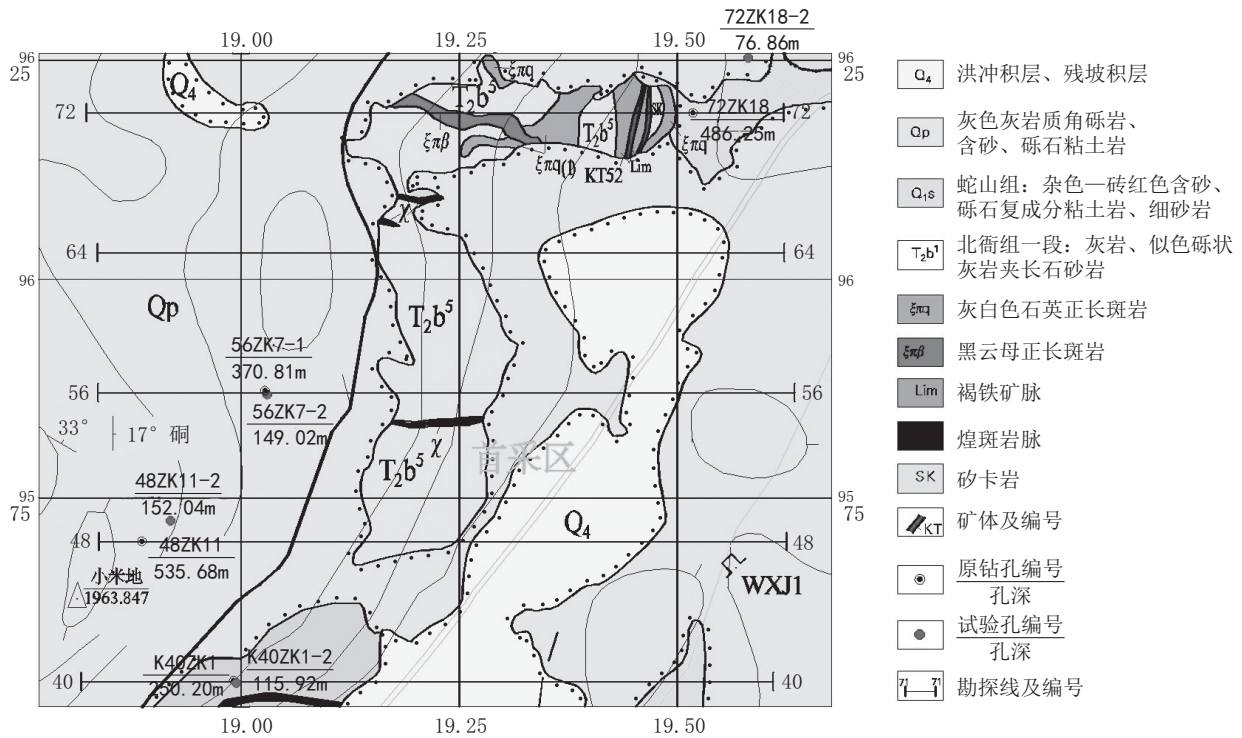


图1 矿区RC工艺对比试验孔孔位示意

Fig.1 Location of RC comparative test holes in the mining area

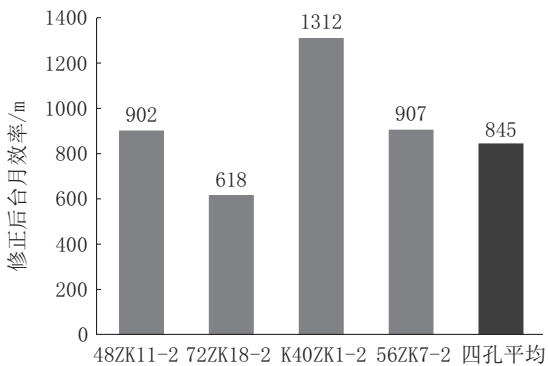


图2 RC工艺试验孔台月效率

Fig.2 Rig month efficiency of RC test holes

4 地质效果对比研究

4.1 岩样收集与采样方法对比研究

由于RC岩样及时喷出,如果没有适当的收集方式,会造成岩样污染以及给岩性分层等后续工作带来很大的麻烦。

根据收集的资料显示,国内某些矿山用桶收集岩样,只采取小部分测试,其余全部废弃,无法直观地研究整孔的岩石、矿化情况,只能了解局部的岩性特征。

本次试验首次采用直径25 cm、长1 m的透明塑

料袋,代替了前期样品箱收集岩样的方式。岩样收集上采取1 m为一个回次,岩样按深度编号,顺序摆放,方便了岩样的采集,又能如同常规钻进的岩心陈列,便于地质专家开展宏观研究^[8]。

参考有关规范,RC岩样充分混合后,采用缩分法,根据质量采取1/2、1/4或1/8进行化验分析。剩余岩样完整保留,以待后续研究。

4.2 岩样与岩心采取率对比研究

在RC取样钻探中,钻头破碎的全部岩石均随高速气流排至地表,通常高达100%。

本次试验采用质量法测试采取率,同时来论证其理论采取率的可靠性(见表1)。采取率计算公式:

$$\text{采取率} = \frac{\text{实际质量}}{\text{理论质量}} \times 100\% \text{ [9]}$$

本次试验取得的反循环工艺采取率的特点:3个试验孔矿体围岩采取率高于《地质岩心钻探规程》(DZ/T 0227—2010)中岩心采取率70%的标准;矿样采取率4个孔均高于《地质岩心钻探规程》(DZ/T 0227—2010)中矿心采取率80%的标准^[7]。

采取率对比情况:4个对比试验钻孔整孔的岩样采取率与常规钻进的岩心采取率相比较,RC试

表1 RC工艺钻孔在围岩与矿层中的采取率

Table 1 Sample recovery of RC drilling in surrounding rock and ore beds

钻孔编号	矿体采取率/%	围岩采取率/%
48ZK11-2	140	97.67
72ZK18-2	100	80.80
K40ZK1-2	117	67.50
56ZK7-2	134	84.00

验孔的整孔采取率普遍低于常规钻进,但是矿样采取率都高于矿心采取率,RC围岩采取率接近于常规钻进。由于围岩较为完整,所采小体重样基本符合岩石的实际物理性质,因此岩样采取率低于100%;矿体赋存于褐铁矿化中,由于蚀变程度及构造等的影响,实际岩矿样比较破碎、松散,在相应矿层成孔过程中易造成局部孔径扩大;另外,本次采集的样品主要为完整不易破碎的块状物,因此采集的块体密度要高于实际矿样的密度,造成矿体整体采取率大于或等于100%。

试验统计了所有孔段收集的每米岩样的质量,同一钻孔中岩样岩性相同时,每米样品质量仅与该孔段直径成正比相关。本次计算的样品质量未计入丢失废样质量(通过正循环返出、反循环通道粘挂及地层孔隙等方式丢失的岩样),由于丢失废样质量占全孔岩样质量的比例不足1%,因此当采用实际质量来计算岩样采取率,RC工艺采取率高于常规岩心钻进。

试验所采为小体重样,不能代表原位岩矿层的岩石密度,因此每米样段采取率有大于100%的情况;本次RC样品采取率采用质量法计算是否合理,有待在后续工作中完善RC样品采取率计算方法的研究。

4.3 岩样与岩心在地层丢失和矿层丢失方面的对比研究

常规钻进工艺出现地层丢失和矿层丢失的主要因素:地层破碎、岩石耐磨性低,部分岩屑随冲洗液流失,造成采取率降低,以及溶洞等发育引起地层丢失和矿层丢失现象。

RC工艺所有岩样都喷出地表,开孔及堵塞情况下出现极少正循环现象,岩样从孔口喷出不收集,其他反循环管道出口岩样全部收集,理论上不存在地层丢失和矿层丢失现象。如果出现较大裂隙及溶

洞,会造成地层缺失。试验地层虽破碎,但是无大的裂隙及溶洞出现,根据质量法测试平均采取率明显大于常规钻进,无地层丢失现象,因此该工艺本次试验地层丢失现象的情况小于常规钻进。今后工作中应加强有关防止岩粉灌入裂隙及溶洞,造成采取率降低及地层缺失的研究。

4.4 岩样与岩心获取地层的岩性、原生结构和岩石物理力学性质对比研究

常规岩心能够比较直观地表达岩层及矿化体的接触部位及岩石成分、物理特征等,而RC上返岩样多呈粉状,少量碎块,岩石特征识别有一定难度。

由于该金矿区构造发育,岩石比较破碎,导致岩样颗粒细小,因此钻进过程中采用RC取心钻头增大上返岩样颗粒粒径。根据现场统计:完整地层中1 m岩样,岩石颗粒最大化程度,直径2 cm岩块2颗、直径1~2 cm岩块出现16颗(见图3)。由于该矿区出现灰岩及角砾灰岩,粒度太小,无法识别其为角砾或者灰岩;黑云二长斑岩的鉴定由于粒度的问题,只能根据其出现的细小黑云母粉末及常规钻进的原始编录来判定。金矿体赋存于褐铁矿化灰岩中,对矿体的分层主要根据岩样的颜色及蚀变强弱来区分。

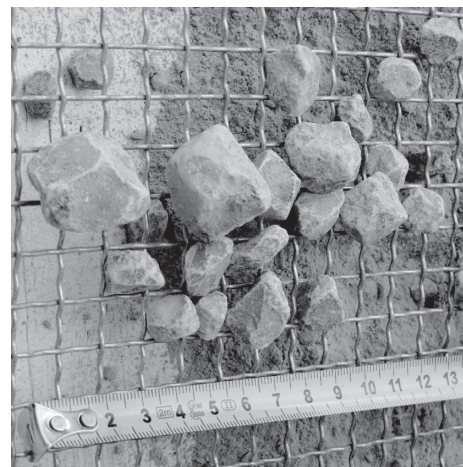


图3 1 m RC工艺上返样品中的灰岩颗粒粒径

Fig.3 Size of limestone chips in 1m RC sample

本次RC钻进工艺在金矿区进行对比试验采用每米间隔收集岩样,保证了分层的精度可达到0.5 m。经对比分析,RC工艺的岩样分层与常规钻进的分层,在岩性命名上,没有较大差别,只是岩石的结构、构造、物质成分的含量上尚无法准确识别。

RC工艺采取的是岩屑状样品,地层结构信息贫乏,但亦可通过测井或钻孔照相等间接手段弥补,提高岩石判别及岩性分层的准确性;另外可根据不同矿种控制采取岩样长度以实现精细岩层的划分。岩样收集得越短,岩层分层越精确,可达到常规取心钻进的岩性分层精度^[10-11]。

4.5 岩样与岩心在推算岩层产状方面的准确性对比研究

常规取心钻进工艺推算岩层产状,主要依靠岩心轴夹角、加密钻孔同层位连接及附近工程或地层的产状,推算岩层产状。但常规钻进在破碎地层中也无法取得轴夹角。

RC工艺通常情况下是无法取得较大块度的样品,无法取得地层产状及物理样等。虽然上返岩样中有直径3 cm的可供识别岩性的岩块,但其在在上返管道的过程中可能发生旋转,导致原始的产出状态发生变化,造成岩样的轴夹角无法判断。因此必须依靠加密钻孔,通过加密钻孔同层位连接及附近工程或地层的产状,推算岩层产状。

因此产状的准确性对比,两种工艺方法区别不是很大,都需要借助其他方法来获取数据,仅轴夹角或单一钻孔是无法推算岩层产状的^[12]。

4.6 岩样与岩心污染程度的对比研究

RC工艺通过风力实时把岩样输送到地表,因此不存在泥浆等介质对岩样的污染问题。

本次试验矿种为金矿,因此其采样及钻进长度采用1 m样段。从微观上看,由于RC岩样颗粒大小不一,上返途中存在着速度差,会导致层位混乱;但从1 m取样段来看,其层位混乱仅存在于1 cm之内,可忽略不计。算例如下:通常情况下,上返风速可达80 m/s,此时RC岩块上返速度为50~60 m/s、RC岩屑上返速度为80 m/s,因此在孔深200 m处,RC岩块与岩屑上返至孔口时间分别为3.3~4 s、2.5 s,假设机械钻速为15 m/h(0.42 cm/s),RC岩块与岩屑上返时间差为1.5 s,200 m孔深上返RC岩块与岩屑样品的时间差造成的进尺仅为0.63 cm。故在1 m取样段内存在小于1 cm的岩样层位混乱,但其相对于在200 m孔深处由于RC岩样颗粒上返速度造成的岩样混层影响是极细微的,可忽略不计。

另外,在钻进中严格按照每米停钻、给风,待该进尺长度内所有岩样全部喷出后,再进行下一个1 m的钻进,保证了岩样的污染减低到1 m的研究范

围内。工作过程中严格按照规范进行,不出现岩样残留;在含水地层钻进时容易产生堵塞,管道壁容易积垢潮湿的岩粉,工作中应及时进行清理,降低污染程度,试验潮湿地层的钻进几乎达到了无污染的程度;每米进尺岩样使用自制塑料袋收集,做到1 m一个样段,按米编号,可防止岩样在收集中混入相邻取样段的岩样,之后在密封塑料袋外部再用样品带包装,可避免后续处理样品中出现二次污染。

在钻进过程中,地质人员应严格要求现场取样人员,规范岩样收集流程,可避免在取样过程中出现样品污染情况,即时上返的岩样能够真实反映实钻地层的岩性顺序^[13-14]。

4.7 岩样与岩心计算矿品位的准确性对比研究

常规钻进工艺采用“劈心法”采样,由于岩心矿化不均匀,品位代表性差,与岩层实际情况有一定出入。RC岩样充分混合后,能真实地代表该采样段内的矿化情况。经测试分析对比,RC样品的测试品位:在矿化体取样段,部分品位高于劈心取样,矿层数量及矿体厚度较常规钻进的都有明显的增加(见图4)。

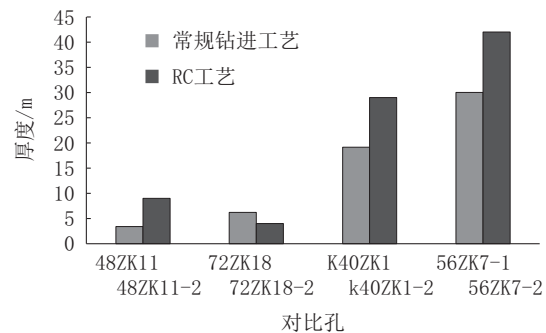


图4 矿体厚度对比

Fig.4 Comparison of ore body thickness

本次试验钻孔数量少,对矿体不能有效对比连接,不能满足资源量估算要求。因此其储量计算无法达到三维空间的真实性,目前只能利用矿体厚度、品位来表示一维空间的相对储量(见图5)来说明RC工艺的优越性。矿体可采厚度、工业品位参考矿山经济指标。72ZK18-2孔,由于孔位距离较远,出现误差,其他试验孔储量均高于原孔的测试结果。

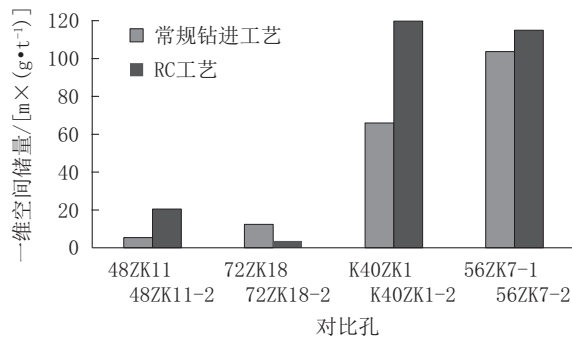


图5 一维空间储量对比

Fig.5 Comparison of ore reserves in one dimensional space

5 我国RC工艺仍存在的问题

近年来,RC工艺在多矿区得到推广应用,取得了显著的钻探经济效益和较好的地质找矿效果,但由于我国目前RC工艺及相关配套设备仍不成熟,故在地质勘查领域应用该钻探工艺仍存在问题亟待解决^[15-16]:

(1)钻机及配套设施较大,因此在许多交通不便的矿山无法应用,希望能开发适应不同交通地区的钻机。

(2)试验岩样颗粒较小,较难判定岩石的一些物理特征。

(3)地下水对钻进的影响较大,容易堵塞,造成岩样污染,RC工艺更适于干旱无水地层的找矿勘探。

(4)通过人工在现场对样品进行缩分,不仅易产生缩分偏差,而且增加了地质人员的工作量。

6 结论与建议

(1)RC工艺采用长1 m的透明塑料袋收集岩样代替了传统样品箱,后期按需缩分的方式是适于该工艺的取样方法;RC工艺采用质量法计算平均采取率,4个孔RC矿样采取率均满足规范要求,但该采取率计算方法是否完善,有待在下步工作中去验证和完善采取率的研究;RC工艺地层丢失现象的情况小于常规钻进,今后工作中有待加强有关防止岩粉灌入裂隙及溶洞,造成采取率降低及地层缺失的研究;通过RC工艺进行岩性分层可达到常规取心钻进的岩性分层精度,在岩性命名上没有较大差别,只是岩石的结构、构造、物质成分的含量上尚无法准确识别,但亦可通过测井或钻孔照相等间接手

段弥补,进一步提高岩石判别及岩性分层的准确性;在产状的准确性对比方面,RC工艺与常规取心方法区别不是很大,都需要通过加密钻孔同层位连接及附近工程或地层的产状,推算岩层产状,仅轴夹角或单一钻孔是无法推算岩层产状的;RC岩样上返过程中不会出现样品污染,施工过程中可通过规范岩样收集流程避免在取样过程中出现样品污染情况,因此即时上返的岩样能真实反映实钻地层的岩性顺序;在矿化体取样段,RC样品的部分测试品位高于劈心取样,矿层数量及矿体厚度较常规钻进都有明显的增加。

(2)本次RC试验孔的平均台月效率是常规岩心钻进对比孔的2~3倍,RC工艺具有高效、低成本等施工优势,且在岩样代表性、岩心污染、矿品位等找矿效果方面优于常规岩心钻进;因此RC工艺具有钻速高、成本低、找矿效果好等特点,用于矿产勘查取样是一种可靠且高效的探矿工艺方法。

(3)由于目前RC工艺在找矿领域中应用较少,建议继续加强该工艺在矿产勘查领域找矿效果的研究,另外有关RC工艺的编录表格与常规岩心编录表格不同,可根据实际需要不断改进,通过完善RC工艺钻探规程以培养更多的熟悉RC工艺的操作人员。

(4)RC工艺在国外矿山勘探中的运用已很成熟,在国内矿山鲜有使用,仅有部分外资公司内部使用,无法推广到整个行业。但究其原因,国内地质矿产勘查规范并无禁止使用RC工艺的条例,甚至部分矿种的地质勘查规范早已将RC工艺纳入探矿工艺的范畴;笔者认为国内矿业公司及地质人员习惯沿用老的找矿思维模式,同时认为岩样较难直观地去展现岩心的物理情况,国家地质矿产勘查规范没有强制或建议推广RC工艺,RC工艺配套设备仍不成熟等诸多因素制约着该工艺在国内的推广。

参考文献(References):

- [1] 贾庆军,马秀春,江宁成,等.RC钻探技术在黑龙江争光岩金矿区的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(8):9-12.
JIA Qingjun, MA Xiuchun, JIANG Ningcheng, et al. Application of RC drilling technology in Zhengguangyan gold deposit in Heilongjiang province [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, 34(8):9-12.
- [2] 黄晨辉,邓梦春,陆生林.反循环连续取样技术在矿产勘探中的应用[J].地质评论,2013,59(S1):975-976.

- HUANG Shenghui, DENG Mengchun, LU Shengling. Application of reverse circulation continuous sampling technology in mineral exploration[J]. Geological Review, 2013, 59(S1):975-976.
- [3] 张永勤. 高效钻探技术是加速“危机矿山接替资源勘探规划”实施的最有效手段[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2006, 33(1): 6-8.
- ZHANG Yongqin. High efficiency drilling tech. is best way to speed up “Crisis Mine Replacement Resources Exploration Plan” [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2006, 33(1):6-8.
- [4] 张永勤. 反循环钻探技术的推广应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(9):46-47.
- ZHANG Yongqin. Popularization and application of reverse circulation drilling technique[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, 34(9):46-47.
- [5] 王顺英. 北衙金矿成矿地质条件浅析[J]. 云南地质, 2003, 22(3):274-280.
- WANG Shunying. The geological conditions of metallogenesis of Beiya gold deposit[J]. Geology of Yunnan, 2003, 22(3): 274-280.
- [6] 黄晟辉, 陆生林, 殷琨, 等. 地质勘探空气反循环钻进技术找矿效果示范应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(3):1-6.
- HUANG Shenghui, LU Shenglin, YIN Kun, et al. Application research on demonstration of air reverse circulation drilling for prospecting in geological exploration [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(3):1-6.
- [7] DZ/T 0227—2010, 地质岩心钻探规程[S].
- DZ/T 0227—2010, Geological core drilling regulations[S].
- [8] DZ/T 0078—2015, 固体矿产勘查原始地质编录规定[S].
- DZ/T 0078—2015, Procedures for original geological record of solid mineral exploration[S].
- [9] 邓梦春, 陆生林, 黄晟辉. 空气反循环取样钻探岩心采取率的计算方法探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(9): 6-8, 13.
- DENG Mengchun, LU Shenglin, HUANG Shenghui. Discussion of calculation method for core recovery percent of air reverse circulation sampling drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(9):6-8, 13.
- [10] 黄勇. 潜孔锤反循环钻进岩屑粒度分布规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(4):1119-1124.
- HUANG Yong. Grain size distribution law of cuttings in DTH hammer reverse circulation drilling[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(4):1119-1124.
- [11] 范黎明, 殷琨, 张永光, 等. 基于引射原理的侧吸式反循环钻头结构参数数值研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(1):220-226.
- FAN Liming, YIN Kun, ZHANG Yongguang, et al. Numerical investigation of geometry parameters on side-ejector DTH hammer RC bit [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(1):220-226.
- [12] 陆生林, 邓梦春, 李正前. 空气反循环取样钻探与岩心钻探的地质找矿效果对比研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(11):8-11.
- LU Shenglin, DENG Mengchun, LI Zhengqian. Air reverse circulation drilling and core sampling drilling in geological prospecting effects[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(11):8-11.
- [13] 邓梦春, 黄晟辉, 殷琨, 等. 空气反循环取样钻探的岩样收集和缩分技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(7):73-76, 80.
- DENG Mengchun, HUANG Shenghui, YIN Kun, et al. Rock sample collection and division technologies for air reverse circulation sampling drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(7):73-76, 80.
- [14] 张运钧, 周润民, 周国荣, 等. 金矿钻探技术[M]. 北京:地质出版社, 1991.
- ZHANG Yunjun, ZHOU Runmin, ZHOU Guorong, et al. Drilling Technology for Gold Deposits [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [15] 郑伯乐, 郑秀华, 段晨阳, 等. 气举反循环钻进井壁稳定及适用性探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(6):13-18.
- ZHENG Bole, ZHENG Xiuhua, DUAN Chenyang, et al. Discussion on stability and applicability of gas lift reverse circulation drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(6):13-18.
- [16] 李汞, 王德龙, 王占丑, 等. 空气反循环连续取样钻进技术在紫金山金铜矿区的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(6):45-47, 51.
- LI Gong, WANG Delong, WANG Zhanchou, et al. Application of air reverse circulation continuous sampling drilling technology in Zijinshan gold-copper mine [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(6):45-47, 51.

(编辑 荐华)