

KT178型取心钻具在共和干热岩钻井中的应用

张恒春¹, 王稳石¹, 李宽¹, 王跃伟¹, 闫家¹, 曹龙龙¹, 胡晨^{1,2}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘要:青海共和盆地干热岩资源富集于花岗岩地层, 硬度高, 研磨性强, 部分层段裂隙发育, 取心困难。针对干热岩地层和取心需求特点, 研制了一套KT178型取心钻具, 并配套设计了孕镶金刚石取心钻头。该钻具为单动双管取心钻具, 可配套井底动力钻具使用, 设计中注重对钻具外管、卡簧等关键部件的强度校核。在GH-01井和GH-02井中, 经过两轮试验和优化, 钻具逐渐成熟, 获取了较完整的岩心样本, 满足干热岩勘探取心要求, 具备了页岩气、水资源勘察等具有间断取心需求的同类工程推广应用的条件。

关键词:干热岩; 取心钻进; 取心钻具; 取心钻头; 坚硬地层; 共和盆地

中图分类号: P634; TE249 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2021)02-0029-06

Application of the KT178 core tool in Gonghe hot dry rock exploratory wells

ZHANG Hengchun¹, WANG Wenshi¹, LI Kuan¹, WANG Yuewei¹, YAN Jia¹, CAO Longlong¹, HU Chen^{1,2}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: In Gonghe Basin, hot dry rock resources are enriched in granite strata with high hardness and strong abrasiveness, and well developed cracks over some well sections, which leads to difficult core drilling. According to the characteristics of hot dry rock formation and coring demand, the KT178 coring tool was developed, and the impregnated diamond coring bit was designed. The drilling tool was a swivel type double tube core barrel, which can be used with the down-hole motor. The strength check of key components, such as outer barrel, core catcher, was emphasized in the design. The drilling tools have been improved and established through two rounds of experiments and optimization at Well GH-01 and GH-02 with fairly intact core samples obtained, meeting the requirements for coring in hot dry rock exploration. The drilling tools can be extended to similar projects with intermittent coring requirements, such as exploration of shale gas and water resources.

Key words: hot dry rock; core drilling; coring tool; coring bit; hard formation; Gonghe Basin

1 地层情况

共和盆地位于西秦岭造山带西端、青海省东中部, 隶属于青海省海南藏族自治州, 南北宽 90 km、东西长 210 km, 总面积 21186 km², 海拔 3000 m 左

右^[1-2]。共和盆地地处多个造山带(西秦岭、东昆仑、祁连)和块体(柴达木和欧龙布鲁克)交接转换的重要结点地区, 经历了早古生代一晚古生代的裂谷坳陷与中生代以来的陆内构造演化 2 个阶段, 是我国

收稿日期: 2020-08-18; 修回日期: 2020-11-19 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.02.004

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“共和盆地恰卜恰干热岩试验性开发与评价(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号: DD20190136)、“松辽盆地基底探测与高温监测环境的建立(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号: DD20189703)、“苏皖赣地区页岩油气战略选区调查(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号: DD20201171); 中国地质科学院勘探技术研究所科技资助项目“大直径孕镶金刚石取心钻头制备工艺研究”(编号: YB202003)

作者简介: 张恒春, 男, 汉族, 1987年生, 硕士, 主要从事取心钻探和深部钻探技术研究工作, 河北省廊坊市金光道77号, zzhcc2002@163.com。

引用格式: 张恒春, 王稳石, 李宽, 等. KT178型取心钻具在共和干热岩钻井中的应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(2): 29-34.

ZHANG Hengchun, WANG Wenshi, LI Kuan, et al. Application of the KT178 core tool in Gonghe hot dry rock exploratory wells[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2): 29-34.

干热岩资源分布的重要区域之一^[3-4]。共和盆地干热岩勘查工作始于2011年,测算本地区地温梯度为5.42~5.81 °C/100 m,明显高于全球平均地温梯度。2014年,共和DR3井在井深2927 m钻获181 °C干热岩;2017年,GR1井在井深3705 m,钻获236 °C干热

岩;2019年,GH-01井在井深4002 m,钻获212.3 °C干热岩,均证明该地区具有良好的干热岩勘探开发前景^[5-7]。根据共和盆地近年钻探资料,其地层分布如表1所示^[8-9]。

表1 共和盆地岩性特征

Table 1 Lithology at Gonghe Basin

地 层	深度/m	岩 性 特 征
第四系	全新统一中新统	0~10 以中厚层黄色亚粘土为主
	共和组	10~564 以巨厚层杂色粗砂质砾石、土黄色粗砂为主,夹有土黄色亚粘土、土黄色含砾粗砂
	临夏组	564~1034 以中厚—巨厚层状灰、青灰色泥岩,黄褐、褐黄色粉砂质泥岩为主,夹中厚层灰色泥质粗砂岩、黄色泥质含砾粗砂岩不等厚互层
新近系	咸水河组	1034~1360 中厚—巨厚层状灰、青灰色泥岩,黄褐、褐黄色粉砂质泥岩为主,夹中厚层灰色泥质粗砂岩、黄色泥质含砾粗砂与岩底部紫红色砂质泥岩呈不等厚互层
	中—上三叠统	1360~4000 上部以灰白、浅肉红、青灰色二长花岗岩,青灰色、肉红色花岗岩为主;中段以灰白、浅肉红、青灰色二长花岗岩为主,见青灰色、肉红色花岗岩,浅肉红色似斑状黑云母花岗岩;底部以浅灰、灰白色花岗闪长岩为主,见浅肉红二长花岗岩

干热岩的最新定义为内部不存在或仅存在少量流体,温度高于180 °C的异常高温岩体。共和盆地干热岩埋藏深度基本稳定,温度达180 °C的干热岩埋深基本在3000~3200 m,岩性以花岗岩、黑云母二长花岗岩为主。区域内花岗岩地层裂隙较发育,研磨性强,硬度高,岩石单轴抗压强度在180~275 MPa之间,可钻性差^[10-13]。区域内干热岩勘探井以点取心为主,取心井径大多设计为152 mm,即使在完钻井径为216 mm井眼,也大多采用“小径取心,大径扩眼”的方式完成取心工作,大直径同径取心技术应用较少^[14-15]。

2 钻具设计

页岩气、地热等非常规能源勘探大多以大口径(完钻井眼直径215.9 mm)钻井为主,取心设计通常为每间隔100~200 m取一次岩心。该类钻井工程

的主要工作量为全面钻进,以三牙轮钻头或PDC钻头为主要碎岩工具,相较于金刚石钻头,钻出井眼不规则,使用配套整圆取心钻头的大直径取心钻具常有下钻不畅通现象。KT178型取心钻具是针对上述工程特点研制的一种新型取心工具,是对KT系列取心钻具的补充。KT系列取心钻具是我国大陆科学钻探(包括科钻一井、汶川科钻、松科一井、松科二井等)广泛使用的取心工具,累计取心进尺超万米,在 $\varnothing 215.9$ mm井眼常用KT194型取心钻具。比较KT194型取心钻具,KT178型钻具外径更细,且不使用上下扩孔器,具有更好的通过性。同时,秉承KT系列取心钻具结构简单、可靠高效的特点,为单动双管取心钻具,主要由悬挂总成、外管、岩心管、卡簧、取心钻头

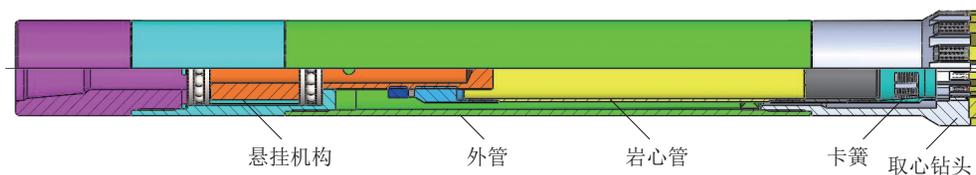


图1 KT178型取心钻具结构示意图

Fig.1 Structure of KT178 coring tool

2.1 技术参数

取心钻具内外筒采用等长结构,每根长度2~10 m,现场可根据需要组合成单筒、双筒、多筒取心钻具,技术参数见表2。

表2 KT178型取心钻具技术参数

Table 2 Technical parameters of KT178 coring tool

参数名称	参数值
适用井眼/mm	215.9~190
推荐钻头(外径/内径)/mm	215.9/110
岩心直径/mm	110
单筒岩心容纳量/m	2~10
外筒外径/mm	178
岩心管外径/mm	130
与钻柱的连接螺纹型式	NC50

2.2 配套钻头结构设计

在共和恰卜恰干热岩勘探工程中,取心井段被设计在破碎地层,以便更直观地了解干热岩地层破碎带裂隙发育情况。针对破碎、坚硬等地层情况,钻头设计为底喷式孕镶金刚石钻头,同时为防止钻头水眼堵塞,部分水眼设计为侧开式,具体结构如图2所示。钻头胎体金刚石粒度40~60目、浓度100%、胎体硬度HRC40~42,内外聚晶保径。钻头实物如图3所示。



图2 钻头结构示意图

Fig.2 Coring bit structure

2.3 外管强度校核

取心钻具薄弱部件为外管,设计中外管所用材料最低抗拉强度860 MPa,抗剪强度341 MPa,其抗拉和抗扭能力可根据材料力学相关公式核算。



图3 钻头实物

Fig.3 Actual Bit

抗拉公式:

$$P = A\sigma_b = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)\sigma_b \quad (1)$$

式中: P ——拉力,N; A ——管材截面积, mm^2 ; σ_b ——管材抗拉强度,MPa; D ——管材外径,mm; d ——管材内径,mm。

抗扭公式:

$$T = W_p \tau_p = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D} \tau_p \quad (2)$$

式中: T ——扭矩, $10^{-3}\text{N}\cdot\text{m}$; W_p ——抗扭截面模数, mm^3 ; τ_p ——抗剪强度,MPa。

外管外径178 mm、壁厚13 mm,代入公式(1)和公式(2)可得外管最大抗拉5790 kN、最大抗扭176 kN·m。外管螺纹净壁厚8 mm,代入公式(1)和公式(2)可得外管螺纹管壁最大抗拉4760 kN,最大抗扭118 kN·m。取心钻具正常工作的情况下,拔断岩心时外管所受拉力最大,拔断岩心所需拉力可表示为:

$$F_y = A_y \sigma_y \quad (3)$$

式中: F_y ——拔断岩心所需拉力,N; A_y ——岩心截面积, mm^2 ; σ_y ——岩心抗拉强度,MPa。

设计岩心直径为110 mm,一般岩石抗拉强度 $\geq 36\text{ MPa}$ ^[16],代入公式(3)可得 F_y 最大为340 kN;另外,石油钻机转盘(或顶驱)最大工作扭矩一般不大于101.4 kN·m,取心钻具井底正常工作时,扭矩更小,因此外管强度满足正常工作要求。

2.4 卡簧挤毁校核

上提钻具拔断岩心时,卡簧在岩心和卡簧座的

复合作用下,受力较为复杂,对受力情况进行简化、整理后,卡簧受力如图4所示。其中 α 为卡簧外锥面锥度。卡簧除受自身重力 G 外,还受到岩心对卡簧的侧向压力 F_1 、卡簧和卡簧座间的摩擦力 F_f 、岩心对卡簧的轴向摩擦力 F_2 、卡簧座对卡簧的法向正压力 F_n 。

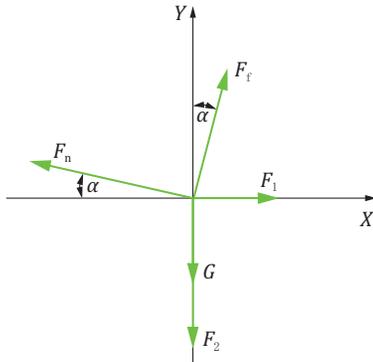


图4 卡簧受力示意

Fig.4 Force diagram of the core catcher

由图4可知:

$$F_n \cos \alpha = F_1 + F_f \sin \alpha \quad (4)$$

$$F_f \cos \alpha + F_n \sin \alpha = G + F_2 \quad (5)$$

$$F_f = \mu F_n \quad (6)$$

$$F_2 = \sigma_y S_y \quad (7)$$

式中: μ ——卡簧与卡簧间的摩擦系数,取0.11; S_y ——岩心横截面积, mm^2 ; σ_y ——岩心抗拉强度,取36 MPa。

由式(4)、(5)、(6)、(7)可知:

$$F_1 = \frac{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}{\mu \cos \alpha + \sin \alpha} (\sigma_y S_y + G) \quad (8)$$

$$F_n = \frac{\sigma_y S_y + G}{\sin \alpha + \mu \cos \alpha} \quad (9)$$

因卡簧座与卡簧的接触面积远大于岩心与卡簧的接触面积,这里只校核 F_1 对卡簧的破坏作用, F_1 作用到卡簧上的应力为:

$$\sigma_k = \frac{F_1}{A_y} = \frac{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}{A_y (\mu \cos \alpha + \sin \alpha)} (\sigma_y S_y + G) \quad (10)$$

式中: σ_k ——卡簧在 F_1 作用下所受应力,MPa; A_y ——岩心与卡簧的接触面积, mm^2 。

把岩心强度和卡簧结构参数代入公式(10)可得计算结果如表3所示。从表中可以看出拔断岩心时钻具卡簧所受最大应力为356.34 MPa,小于其材料屈服强度,满足强度要求。

表3 卡簧校核

Table 3 Calibration of the core catcher

卡簧屈服强度/MPa	A_y/mm^2	σ_y/MPa	G/N	S_y/mm^2	σ_k/MPa
785.00	5295.07	36	2.79	9503.32	356.34

3 现场应用

3.1 GH-01井试验应用

2019年,KT178型取心钻具首先在共和干热岩GH-01井进行试验性应用。该井完钻井深4002.88 m,试验井段为3000~3800 m。该段地层岩性以浅灰、灰白色花岗闪长岩为主,并常见浅肉红二长花岗岩,地层破碎,研磨性高。钻具试验井眼及钻进参数如下:

井眼直径:215.9 mm

裸眼段长:1500~2300 m

驱动方式:地面转盘驱动

钻具组合:KT178型取心钻具+ $\text{O}165$ mm 钻铤+ $\text{O}127$ mm 加重钻杆+ $\text{O}127$ mm 钻杆

转速:55 r/min

钻压:20~80 kN

排量:30 L/s

KT178型取心钻具在该井段共入井试验4个回次,进尺13 m,仅第3个回次在3528~3532 m井段,进尺4.00 m,获取岩心3.35 m,采取率84%,岩心发育近水平向的裂隙,且岩心沿裂隙断开,整体较为破碎。其它回次均未能获得岩心,且钻头存在不同程度的开裂、变形等非正常损坏(如图5所示)。分析认为取心失败的原因如下:

(1) 钻头刚体开裂、变形导致取心钻头内圆变



图5 钻头开裂

Fig.5 Cracks in the core bit

形,钻取的岩心直径小于卡簧完全收缩时的内径,卡簧不能卡取岩心。

(2)地面转盘驱动取心钻具,转速低,机械钻速很慢,同时钻头内保径较长,内保径长时间研磨岩心,消耗岩心直径,导致卡簧完全收缩也不能卡取岩心。

(3)取心钻具未设计上下扩孔器,地面转盘驱动时钻头在孔底存在涡动现象,钻头涡动同样消耗岩心直径,使岩心直径变小。

(4)岩心整体较为破碎,进入取心筒内岩心多为块状及颗粒状,卡簧自身无法抓住岩心或在起钻过程中丢心。

3.2 GH-02井现场应用

在2019年试验的基础上,改进钻头刚体结构,提高其结构强度,防止钻头变形;其次改单卡簧结构为双卡簧结构,提高卡簧卡取岩心的可靠性。钻具优化后在共和干热岩GH-02井现场进行应用,井眼及钻进参数如下:

井眼直径:215.9 mm

裸眼段长:180 m

驱动方式:地面转盘驱动+螺杆钻具

钻具组合:KT178型取心钻具+ \varnothing 172 mm直螺杆+ \varnothing 178 mm钻铤+ \varnothing 172 mm钻铤+ \varnothing 114 mm加重钻杆+ \varnothing 127 mm钻杆

转速:转盘 55 r/min+螺杆转速

钻压:5~40 kN

排量:30 L/s

本次取心设计在破碎地层,为防止钻井液冲刷岩心,采取投球取心的方式进行取心钻进。在1690~1691.64 m井段,取心钻进1.64 m,因设备异常提钻,获取岩心1.24 m,岩心采取率75.61%。岩心整体较完整(见图6),为地层岩石应力、物理性质测试提供了实物样本。岩心柱上端直径磨损至102 mm,可见孔底消耗岩心直径之严重。



图6 获取的岩心

Fig.6 Cores obtained

4 结语

(1)在硬岩地层,大钻压工况下,对钻头结构强度要求较高,在钻头设计时应特别加强钻头刚体的整体强度。

(2)在干热岩地层,地面驱动(转盘或顶驱)+井底动力钻具的复合钻进方式,是一种有效的取心钻进方法,提高机械钻速的同时,减少岩心直径的磨损,提高取心成功率。

(3)改进后,KT178型取心钻具逐渐成熟,满足以干热岩地层为代表的坚硬、破碎地层的取心需求,同时具备了向页岩气、水资源勘察等具有间断取心需求的同类工程推广应用的条件。

参考文献(References):

- [1] 张超,胡圣标,宋荣彩,等.共和盆地干热岩地热资源的成因机制:来自岩石放射性生热率的约束[J].地球物理学报,2020,63(7):2697-2709.
ZHANG Chao, HU Shenbiao, SONG Rongcai, et al. Genesis of the hot dry rock geothermal resources in the Gonghe Base: constraints from the radiogenic heat production rate of rocks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(7): 2697-2709.
- [2] 严维德.共和盆地干热岩特征及利用前景[J].科技导报,2015,33(19):54-57.
YAN Weide. Characteristics of Gonghe Basin hot dry rock and its utilization prospects [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19): 54-57.
- [3] 张盛生,张磊,田成成,等.青海共和盆地干热岩赋存地质特征及开发潜力[J].地质力学学报,2019,25(4):501-508.
ZHANG Shengsheng, ZHANG Lei, TIAN Chengcheng, et al. Occurrence geological characteristics and development potential of hot dry rocks in Qinghai Gonghe Basin[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(4): 501-508.
- [4] 谢文苹,路睿,张盛生,等.青海共和盆地干热岩勘查进展及开发技术探讨[J].石油钻探技术,2020,48(3):77-84.
XIE Weiping, LU Rui, ZHANG Shengsheng, et al. Progress in hot dry rock exploration and a discussion on development technology in the Gonghe Basin of Qinghai [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 77-84.
- [5] 王志刚,胡志兴,李宽,等.干热岩钻井的挑战及技术展望[J].科技导报,2019,37(19):58-65.
WANG Zhigang, HU Zhixing, LI Kuan, et al. Challenges and technical prospects of dry-hot rock drilling and completion [J]. Science & Technology Review, 2019, 37(19): 58-65.
- [6] 王文,吴纪修,施山山,等.探秘“能源新星”——干热岩[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):88-93.
WANG Wen, WU Jixiu, SHI Shanshan, et al. Probe a new energy—hot dry rock [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil

- Drilling and Tunneling), 2020, 47(3):88-93.
- [7] 张二勇,王璜,王贵玲.干热岩:前景可期的新能源[J].紫光阁, 2018(3):87.
ZHANG Eryong, WANG Huang, WANG Guiling. Hot dry rock: the prospective new energy [J]. Purple Light Pavilion, 2018(3):87.
- [8] 郑宇轩,单文军,赵长亮,等.青海共和干热岩GR1井钻井工艺技术[J].地质与勘探,2018,54(5):1038-1045.
ZHENG Yuxuan, SHAN Wenjun, ZHAO Changliang, et al. The drilling technology for the GR1 well in hot-dry rock of Gonghe, Qinghai province [J]. Geology and Exploration, 2018, 54(5):1038-1045.
- [9] 赵福森,张凯.青海贵德Zr₁干热岩井钻进工艺研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(2):18-23,35.
ZHAO Fushen, ZHANG Kai. Research on hot dry rock well drilling technology [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(2):18-23, 35.
- [10] 冉恒谦,冯起赠.我国干热岩勘查的有关技术问题[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(10):17-21.
RAN Hengqian, FENG Qizeng. Some technical issues on hot dry rock exploration in China [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(10):17-21.
- [11] 苏长寿,阴文行,冯红喜,等.液动潜孔锤技术应用于干热岩钻井的可行性探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(3):14-16,26.
SU Changshou, YIN Wenhong, FENG Hongxi, et al. Feasibility study on application of hydraulic hammer technology in hot dry rock drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(3):14-16, 26.
- [12] 贾军,张德龙,翁炜,等.干热岩钻探关键技术及进展[J].科技导报,2015,33(19):40-44.
JIA Jun, ZHANG Delong, WENG Wei, et al. Key technology and development of hot dry rock drilling [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19):40-44.
- [13] 张所邦,宋鸿,陈兵,等.中国干热岩开发与钻井关键技术[J].资源环境与工程,2017,31(2):202-207.
ZHANG Suobang, SONG Hong, CHEN Bing, et al. The development and key drilling technology of hot dry rock in China [J]. Resources Environment & Engineering, 2017, 31(2):202-207.
- [14] 谭现锋,刘肖,王贵玲,等.利津干热岩型地热资源调查评价关键技术研究[J].地质学报,2020,94(7):2166-2176.
TAN Xianfeng, LIU Xiao, WANG Guiling, et al. Research on the key technology for the investigation and evaluation of the hot dry rock geothermal resources in Lijin [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7):2166-2176.
- [15] 高科,高红通,谭现锋,等.仿生异型齿钻头在干热岩钻探中的应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2018,48(6):1804-1809.
GAO Ke, GAO Hongtong, TAN Xianfeng, et al. Application of bionic abnormal shape bit in dry rock drilling [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(6):1804-1809.
- [16] 刘佑荣,唐辉明.岩体力学[M].武汉:中国地质大学出版社,1999:58-59.
LIU Yourong, TANG Huiming. Rockmass mechanics [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999:58-59.

(编辑 荐华)