

深海硬岩连续取心钻头的研制

王艳丽^{1,2}, 尹献涛³, 殷国乐¹, 陈浩文¹, 王林清^{1,2}, 封优生³, 许刘万¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 廊坊聚力勘探科技有限公司, 河北 廊坊 065000;
3. 邯郸市伟业地热开发有限公司, 河北 邯郸 056000)

摘要:气举反循环技术是一种可用于深井硬岩地层的高效钻进技术, 不受地层裂隙、溶洞影响, 排渣彻底。通过研究专用的连续取心钻头, 可实现深海硬岩的连续取心作业, 提高深海硬岩钻井效率及取心率, 为深海钻探提供一种全新的取心方案。本文从牙掌选型、卡断器结构、岩渣及岩心通道优化设计等方面进行研究, 提出了连续取心钻头的设计方案, 并试制加工钻头。在地热井中进行了验证性应用, 灰岩地层、砂岩地层取心率可达80%以上, 高于大洋钻探统计取心率。陆地验证性应用为该技术在海洋取心钻探中的应用奠定了技术基础。

关键词:深海硬岩钻探; 气举反循环; 连续取心; 钻头; 岩心采取率

中图分类号: P634.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)07-0026-07

Development of the continuous coring bit for hard rock formation in deep-sea

WANG Yanli^{1,2}, YIN Xiantao³, YIN Guoyue¹, CHEN Haowen¹,

WANG Linqing^{1,2}, FENG Yousheng³, XU Liuwan¹

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

2. Langfang Juli Exploration Technology Co., Ltd., Langfang Hebei 065000, China;

3. Handan Weiye Geothermal Development Co., Ltd., Handan Hebei 056000, China)

Abstract: Air-lift reverse circulation drilling is an efficient drilling technique which can be used in deep well drilling in hard rock formation since it is not affected by rock fractures and karst caves with thorough removal of the cuttings. A special continuous coring bit has been developed to carry out continuous coring operations in deep-sea hard rock to improve drilling efficiency and core recovery in deep-sea hard rock; thus, providing a novel coring approach for deep-sea drilling. With studies on the selection of the cone profile, the structure of the core lifter, the optimum design of the passage for the cores and cuttings, etc., the design of the continuous coring bit was put forward, and the test drill bit was made. The bit has been applied in a geothermal well, with core recovery in limestone and sandstone over 80%, higher than that measured in ocean drilling. The verifying test on land has laid a technical foundation for the further application of this technique in deep-sea core drilling.

Key words: deep-sea hard rock drilling; air-lift reverse circulation; continuous coring; drill bit; core recovery

0 引言

深海硬岩取心钻探采用的主要方法是提钻取心技术、绳索取心技术^[1-3]。回次钻进结束后, 提钻

取心技术需将孔内全部钻具提出钻孔, 拆卸岩心管获取岩心; 绳索取心技术需将岩心管从钻杆柱中心打捞至钻台平面, 与提钻取心相比, 减少了频繁提

收稿日期: 2020-09-20; 修回日期: 2021-03-21 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.07.005

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑(中国地质科学院勘探技术研究所)” (编号: 20190585)

作者简介: 王艳丽, 女, 汉族, 1981年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 硕士, 从事多工艺空气钻探技术、各类钻具的研究工作, 河北省廊坊市金光道77号, ylwang3113@163.com。

引用格式: 王艳丽, 尹献涛, 殷国乐, 等. 深海硬岩连续取心钻头的研制[J]. 钻探工程, 2021, 48(7): 26-32.

WANG Yanli, YIN Xiantao, YIN Guoyue, et al. Development of the continuous coring bit for hard rock formation in deep-sea[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7): 26-32.

下钻,但用于投放、打捞内管总成的辅助时间长,总体钻井效率低。钻遇裂隙、溶洞发育地层,泥浆循环很难建立,会导致大量岩屑堆积孔底,易发生埋钻、卡钻事故。

气举反循环钻井技术,自20世纪70年代引进我国后逐渐发展成熟,已广泛应用于地热井、矿山送料孔、大口径工程井等领域^[4-7]。气举反循环钻杆柱由上部的双壁钻杆和下部的单壁钻杆、钻铤组成,高压空气通过双壁钻具环隙压入末端双壁钻杆的中心通道内,高压气体的注入使得钻杆柱中心上部流体密度低于下部和环空,依靠钻杆柱内外密度差将岩心(样)抽吸至岩心(样)收集系统。钻遇裂隙、溶洞地层漏失对气举反循环过程的建立影响很小;抽吸作用减小了孔底岩屑的压持效应,可减少井底岩屑的重复破碎,提高钻井效率;岩心(样)随气液流上返能够实现连续钻井。

依托中国地质调查局地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑(中国地质科学院勘探技术研究所)”,根据深海钻探硬岩取心技术需求,结合气举反循环钻进技术优势,提出气举反循环连续取心技术。气举反循环钻进技术在陆地钻井应用中,多数钻孔为生产应用井不需取心作业,使用全面钻进钻头,针对深海硬岩连续取心钻进需研制专用的钻头。

1 深海取心钻探的技术特点

(1)岩屑循环上返不彻底:在一定水深范围内的取心钻探可使用隔水管系统,建立海底井口与钻井船之间的泥浆往返通道及支持其他器具的下放和撤回。常用的隔水管尺寸为30、36 in(1 in=25.4 mm,下同),由隔水管内径和钻具外径建立的环空面积大,不利于岩屑的上返。受钻井深度、水深、材料自身性能、船载能力的限制,隔水管系统不能无限深度地使用。日本“地球号”是一艘特大型“隔水管”钻探船,可在水深4000 m的海底钻进7000 m,但配套的隔水管也仅有2300 m^[8-10]。在无法使用隔水管系统的深海钻探中,循环泥浆直接排放到海底,泥浆使用量巨大,井口位置堆积有大量的岩屑。

(2)钻头回转速度低:在不使用隔水管系统的情况下,海床至海平面之间的钻杆柱无实际钻孔的限制,过高的转速会使钻杆柱承受各种复杂应力应变,且传导至钻头的扭矩大量削减,限制了钻头的转速。

(3)深海钻井地层多变,复杂地层取心效率低:海洋钻探遇到的地层十分复杂,有松软的沉积层、坚硬的基岩、软硬交替地层、破碎地层。钻头应能满足多种地层的钻进需求,减少因地层变化提钻更换钻头的次数,提高钻井效率。钻遇硬岩漏失地层时,处理手段有限,岩屑排出钻孔难度大,易发生孔内事故。不使用隔水管的情况下无法获得钻井岩屑,复杂地层岩心采取率低、地层信息易丢失。

2 钻头设计

对已实施的国际大洋科学钻探工程进行调研,深海钻探硬岩主要为坚硬的沉积岩或火成岩地层,广泛使用的钻头类型是牙轮钻头,牙轮钻头地层适应范围广、钻进效率高、寿命长^[11-13]。为适应深海多变硬岩地层,深海硬岩连续取心技术亦使用牙轮钻头,并在陆地钻井中的硬岩地层开展应用试验。地热井钻遇的硬岩地层主要有沉积岩(泥岩、砂岩、灰岩)、火成岩(花岗岩)等,灰岩地层是地热井的目标层位,裂隙、溶洞发育,地热井地层岩性与深海硬岩有一定的相似性;地热井的二开、三开井径为12¼、8½ in,与深海硬岩钻探口径接近。基于以上原因,选择地热井二开、三开井段进行深海硬岩连续取心钻头的试验,在今后深海取心钻井工程应用中根据具体口径再设计相应的规格。

2.1 牙轮掌的选型

深海硬岩连续取心钻头采用成熟的石油牙轮钻头掌,根据钻遇的地层选择齿形,软至中软选用勺形齿,中硬、破碎地层选择锥勺形与边楔形齿,研磨性高的硬岩地层适用圆锥形与楔形齿,高研磨坚硬地层如玄武岩选用球形与尖卵形齿^[14-15]。选用的牙掌采用滑动轴承、复合密封,提高钻头使用寿命。

2.2 扣型及中心通孔设计

三牙轮钻头扣型设计一般为公扣,丝扣端中心通孔直径小,无法满足取心钻头的设计要求。连续取心钻头扣型设计为母扣,在保证扣的强度情况下尽可能设计大通孔,确保岩心、岩屑、循环介质的顺利上返。12¼、8½ in连续取心钻头具体设计参数见表1。

2.3 牙轮布掌

连续取心钻头设计为4个牙轮掌按圆周90°分布,硬质合金齿相互啮合;牙轮掌与钻头体焊接固定,牙轮掌布置见图1、图2。四牙轮结构牙轮掌转

表1 连续取心钻头参数

Table 1 Parameters of the continuous coring bit

钻头规格/in	8½	12¼
扣型	410	620
牙轮数量/个	4	4
通孔直径/mm	77	110
取心直径/mm	40、55	70
取心长度/mm	100	120
轴承系统	滑动轴承	滑动轴承
密封系统	复合密封	复合密封
推荐钻压/kN	60~180	121~265
推荐转速/(r·min ⁻¹)	40~180	40~180
上扣扭矩/(kN·m)	16.3~21.7	37.93~43.3

动平稳,有利于岩心的保护,钻井形成的断面较规则,为钻孔完成后套管的下入提供较好的孔壁条件。

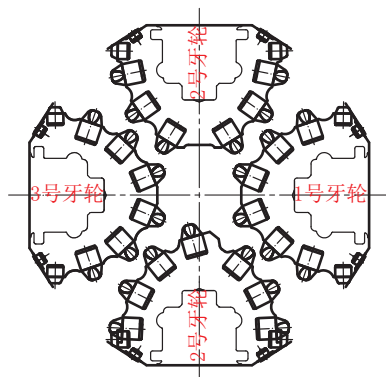


图1 连续取心钻头牙轮掌布置

Fig.1 Cone arrangement

2.4 岩心卡断器

在钻头的中心通道内设置岩心卡断器,实现岩心的定长卡断,避免超过一定长度的岩心卡阻在岩心上返通道内。岩心卡断器由本体及球形硬质合金组成,通过焊接的方式将卡断器固定在钻头体上。岩心卡断器中心与牙轮掌中心支点的距离为岩心设计长度;钻取的岩心与卡断器球形硬质合金最前端发生干涉受阻后折断。

深海硬岩连续取心钻头结构见图2。

3 试验与分析

3.1 模拟试验

按设计方案试制加工钻头,先通过模拟试验

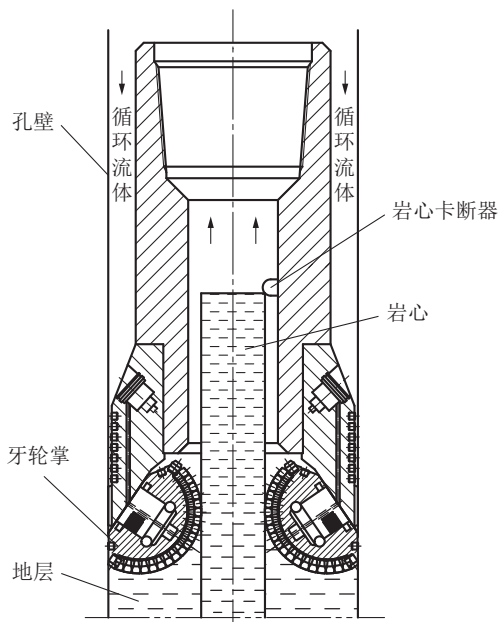


图2 连续取心钻头结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the continuous coring bit

证钻头基本功能。定制单轴抗压强度为130 MPa的花岗岩块模拟深海硬岩地层,岩块尺寸为2 m×2 m×2.3 m,埋置在试验场地内。因岩块埋置较浅不能建立气举反循环过程,采用SDC-1000型全液压动力头钻机配备正循环泥浆工艺开展模拟试验。

3.1.1 试验钻头规格

8½ in 钻头,设计取心直径为40 mm(见图3); 12¼ in 钻头,设计取心直径为70 mm。



图3 8½ in 连续取心钻头

Fig.3 8½ in continuous coring bit

3.1.2 钻具组合

1根 5½ in 钻杆(DS60)+变径接头(DS60-411)+8½ in 连续取心钻头(410)。

1根5½ in 钻杆(DS60)+变径接头(DS60-621)+12¼ in连续取心钻头(620)。

3.1.3 试验过程

试验过程分为3个回次,试验具体数据见表2,试验现场见图4。

表2 连续取心钻头模拟试验数据

Table 2 Simulation test data of the continuous coring bit

试验回次	钻头直径/in	钻进用时/min	进尺/mm		进尺速度/(m·h ⁻¹)	岩心形态描述	钻进参数			
			阶段	累计			钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	泵压/MPa	泵量/(L·s ⁻¹)
1	12¼	20	18	18	0.05	提钻后未发现岩心	10	20	0	12
		10	130	218	1.30		60	40	0	12
2	8½	22	32	32	0.09	提钻未见成段岩心,岩渣中有26 mm大块岩块,孔底有未断裂岩心	10	28	0	12
		7	100	132	0.86		40	30	0	12
		7	100	232	0.86		50	40	0	12
		6	100	332	1		60	40	0	12
3	8½	3	84	416	1.68	岩心一段(Ø40 mm,长30 mm),孔底有未折断岩心	50	30	0	12



图4 模拟试验现场

Fig.4 Simulation test site

3.1.4 试验情况

(1)试验岩块表面无导孔,12¼、8½ in 钻头均先使用较低的转速、钻压钻进一段距离,形成一定深度的导孔后再开始试验钻进。

(2)12¼ in 钻头试验一个回次,钻压60 kN、转速40 r/min,进尺130 mm,用时10 min,机械钻速为1.3 m/h。提钻后可见规则钻孔但未发现岩心。

(3)8½ in 钻头试验2个回次。第二回次,钻压40~60 kN,转速30~40 r/min,进尺300 mm,用时20 min,平均机械钻速为0.90 m/h,提钻仅看到26

mm的大块岩心及残留井内未折断的岩心柱(见图5);第三回次,钻压50 kN,转速30 r/min,进尺84 mm,用时3 min,机械钻速为1.68 m/h,获取了一段直径40 mm、长度30 mm岩心。

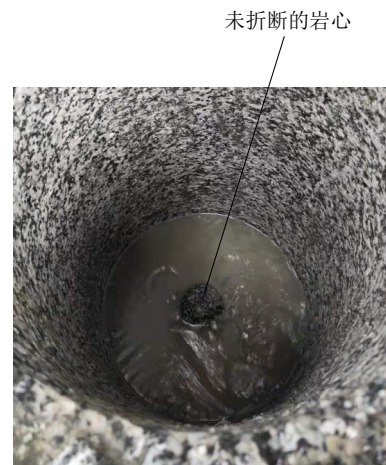


图5 试验形成的钻孔及未折断的岩心

Fig.5 Test drilled hole with the residual core

3.1.5 试验分析

气举反循环连续取心钻头的模拟试验,初步验证研制的钻头可在花岗岩硬地层钻进。正循环钻井泥浆将断掉的岩心冲至牙轮掌中间再次破碎,仅8½ in 钻头钻获一段岩心,岩心尺寸与设计尺寸一致。模拟试验的加压条件、岩石性质、钻具配置与实

际应用有很大差别,硬岩连续取心钻头的性能还需进行野外应用试验。

3.2 野外应用试验

气举反循环连续取心技术将岩心岩屑抽吸至地表,同时对孔壁也会有抽吸作用,因此野外应用试验选择在地热井硬岩地层进行。试验配备设备需满足大通径钻具提升、回转的要求。邯郸市伟业地热开发有限公司在江苏宜兴施工的一口地热井,设计孔深为2000 m,终孔直径 $8\frac{1}{2}$ in。二开($12\frac{1}{4}$ in,设计深度300~1000 m)地层以灰岩、砂岩为主,三开($8\frac{1}{2}$ in,设计深度1000~2000 m)地层以灰岩、砂岩为主。配备的设备有ZJ20型钻机、3NB-800型泥浆泵、LG.WF-12.5/150型空压机等。综合分析该口地热井的地层情况、井身结构设计、设备配置,均能满足连续取心的试验需求。在邯郸市伟业地热开发有限公司的大力支持下,在二开、三开井段开展了连

续取心试验(见图6,表3、4)。



图6 $12\frac{1}{4}$ in连续取心钻头下井试验

Fig.6 RIH of $12\frac{1}{4}$ in continuous coring bit for test

表3 $12\frac{1}{4}$ in连续取心钻头地热井试验数据

Table 3 Test data of $12\frac{1}{4}$ in continuous coring bit drilling in the geothermal well

序号	井段/m	钻遇地层	转速/ ($r\cdot\min^{-1}$)	钻压/ kN	平均进 尺速度/ ($m\cdot h^{-1}$)	空压机 风压/ MPa	空压机 风量/ ($m^3\cdot\min^{-1}$)	岩心形态
1	279.2~305	水泥	43	20	2.28	1.50	12.5	上返岩心为柱状,单根岩心长度60~120 mm,直径60~67 mm
2	305~314	层状灰岩	43	20	0.78	1.50	12.5	上返岩心多为不规则圆饼状,直径
3	486~496		43	20	0.46	1.50	12.5	为65~70 mm,厚度20~40 mm

表4 $8\frac{1}{2}$ in连续取心钻头地热井试验数据

Table 4 Test data of $8\frac{1}{2}$ in continuous coring bit drilling in the geothermal well

序号	井段/m	钻遇 地层	转速/ ($r\cdot\min^{-1}$)	钻压/ kN	平均进 尺速度/ ($m\cdot h^{-1}$)	空压机 风压/ MPa	空压机 风量/ ($m^3\cdot\min^{-1}$)	岩心形态
1	1286.74~1289.12	砂岩	43	80~120	1.0	1.70	12.5	上返岩心为柱状,单根岩心长度约40~60 mm,岩心直径36 mm
2	1508.5~1510.0	砂岩	43	80~120	1.5	1.70	12.5	无岩心上返,提钻钻铤内堵塞岩心呈柱状,单根岩心长度40~60 mm,岩心直径50 mm

(1)研制的连续取心钻头可在软地层、硬地层、弱胶结地层钻取岩心,钻取的岩心尺寸满足反循环上返的要求。

(2) $12\frac{1}{4}$ in钻头在水泥塞段获取的岩心(见图7),直径60~67 mm,长度60~120 mm,有的端面平

齐,有的端面呈楔形,相邻两节岩心端面可整合;层状灰岩地层岩心为不规则圆饼状(见图8),上端有钻头克取痕迹,下端为地层的弱胶结面,直径65~70 mm,厚度20~40 mm,与井场周围采石出露的岩层厚度一致。 $8\frac{1}{2}$ in钻头在砂岩地层获取的岩心为

柱状(见图9),直径36、50 mm,长度40~60 mm。



图7 水泥岩心

Fig.7 Cement core



图8 灰岩地层岩心

Fig.8 Limestone core

(3)在486~496 m井段共获取8.32 m岩心,取心率为83.20%;在1286.74~1289.12 m井段获取岩心2.06 m,取心率为86.55%。据统计大洋科学钻探平均取心率为62.2%,硬岩钻进的取心率更低,平均取心率仅为40.8%^[1-3]。气举反循环连续取心野外试验硬岩取心率高于大洋科学钻探。

(4)12¼ in连续取心钻头组合钻具下部未配备大通径钻铤,使用加重钻杆扶正加压效果差,为保证钻孔垂直度仅加小钻压,硬岩钻井速度为大钻压正



图9 砂岩地层岩心

Fig.9 Sandstone core

循环钻井的1/2。8½ in连续取心钻头试验时,下部增加大通径钻铤提高钻压,硬岩钻井速度与正循环钻井相当。

4 结论与建议

(1)通过试验验证,研制的深海硬岩连续取心钻头,能够在软硬岩地层中钻取、卡断岩心,获取的岩心可随循环介质连续上返,满足工艺技术的需求。

(2)在钻具合理配置的情况下,深海硬岩连续取心钻头钻井效率与正循环三牙轮钻头相当;钻井取心过程辅助时间短;形成的钻孔质量好,为套管的下放创造了良好的孔壁条件。

(3)在试验的灰岩地层、砂岩地层取心率均可达到80%以上,高于大洋科学钻探统计硬岩取心率。陆地试验累计进尺少,且陆地试验地层、设备配置等与实际海洋钻井有一定的差距,还需在海洋钻井中进一步验证。

(4)深海硬岩连续取心钻头对岩层适应性好,可应对软硬地层的转换,减少因地层变换而提钻更换钻头的次数,提高钻井效率,可为海洋取心钻井提供技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 鄢泰宁,陈铸.大洋钻探计划及其高新技术[J].探矿工程,1998(3):41-44.
YAN Taining, CHEN Zhu. Ocean drilling program and the high tech used in the program[J]. Exploration Engineering, 1998(3): 41-44.
- [2] 汪品先.未雨绸缪——迎接大洋钻探学术新计划的制定[J].地球科学进展,2017,32(12):1229-1235.

- WANG Pinxian. Towards the new decade of ocean drilling: Preparing its science plan[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(12):1229-1235.
- [3] 汪品先. 大洋钻探五十年:回顾与前瞻[J]. *科学通报*, 2018, 63(36):3868.
- WANG Pinxian. Fifty years of ocean drilling: Review and prospect[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(36):3868.
- [4] 许刘万, 史兵言, 李国栋. 大力推广气动潜孔锤及气举反循环组合钻进技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2007, 34(9):41-45.
- XU Liuwan, SHI Bingyan, LI Guodong. Extension of combination drilling technique of pneumatic down-the-hole and air-lift reverse circulation [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2007, 34(9):41-45.
- [5] 陈怡, 段德培. 气举反循环钻进技术在地热深井施工中的应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2009, 36(4):23-24, 28.
- CHEN Yi, DUAN Depei. Application of air-lift reverse circulation drilling in Baoli ZK3 deep geothermal well of Guizhou[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2009, 36(4):23-24, 28.
- [6] 许刘万, 伍晓龙, 王艳丽. 我国地热资源开发利用及钻进技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2013, 40(4):1-5.
- XU Liuwan, WU Xiaolong, WANG Yanli. Development and utilization of geothermal resource in China and the drilling technology[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2013, 40(4):1-5.
- [7] 郝文奎, 宋宏兵, 康亢, 等. 多工艺空气钻井工艺在深水井施工中的应用实践[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2014, 41(12):11-14.
- HAO Wenkui, SONG Hongbing, KANG Kang, et al. Application practice of multi-process air drilling technology in deep well construction[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2014, 41(12):11-14.
- [8] 赵义, 蔡家品, 阮海龙, 等. 大洋科学钻探船综述[J]. *地质装备*, 2019, 20(3):12-13.
- ZHAO Yi, CAI Jiapin, RUAN Hailong, et al. Overview of ocean scientific drilling ships[J]. *Equipment for Geotechnical Engineering*, 2019, 20(3):12-13.
- [9] 刘淮. “地球”号深海钻探船[J]. *船舶工业技术信息*, 2004(4):38.
- LIU Huai. “Chikyu” drilling ship[J]. *Technology and Economy Information of Ship Buildings Industry*, 2004(4):38.
- [10] 梁涛, 陈云龙, 赵义. “地球号”钻探船钻井系统介绍[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会. 第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 北京:地质出版社, 2019:348-356.
- LIANG Tao, CHEN Yunlong, ZHAO Yi. Introduction to the drilling system on “Chikyu” drilling vessel[C]// Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Twentieth National Exploration Engineering (Drilling and Tunneling) Academic Conferences. Beijing: Geological Publishing House, 2019:348-356.
- [11] 刘广志. 国际大洋钻探计划(IODP)的新进展[J]. *探矿工程*, 2002(4):45-46.
- LIU Guangzhi. The new advances of Integrated Ocean Drilling Program (IODP) [J]. *Exploration Engineering*, 2002(4):45-46.
- [12] 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):27-28.
- WANG Da, ZHAO Guolong, ZUO Ruqiang, 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):27-28.
- [13] 叶建良, 张伟, 谢文卫. 我国实施大洋钻探工程的初步设想[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2019, 46(2):1-8.
- YE Jianliang, ZHANG Wei, XIE Wenwei. Preliminary thoughts on implementation of the ocean drilling project in China[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019, 46(2):1-8.
- [14] 许刘万, 王艳丽. 牙轮钻头的应用领域及钻进技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2011, 38(9):60-64.
- XU Liuwan, WANG Yanli. Application fields and drilling technologies of roller bit[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2011, 38(9):60-64.
- [15] 左汝强. 国际油气井钻头进展概述(一)——Kymera组合式(Hybrid)钻头系列[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016, 43(1):4-6.
- ZUO Ruqiang. International advancement of drilling bits for oil and gas well (1)—Kymera Hybrid Bit[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(1):4-6.

(编辑 荐华)