TKP194-80型密闭保压取心工具的研制与应用

赵 义，刘海龙*，蔡家品，阮海龙，梁 涛
（北京探矿工程研究所，北京 100083）

摘要：密闭保压取心是一种能够保持或接近地层压力的特殊取心技术，可使岩心中流体、气体保持在原始状态。这种技术对于正确认识地质情况、计算油田可采储量、分析页岩气藏和煤层气藏机理，制定勘探开发方案有着十分重要的意义。研制TKP194-80型密闭保压取心工具，采用大通径高压球阀密封、密闭液封堵、液压差动、活塞压力补偿等关键技术，配有岩心冷冻、切割、集气等岩心后处理工艺，钻头外径215 mm，保压能力50 MPa，岩心直径80 mm。在山西晋中某煤层气资源地质探井开展保压取心应用，共进行保压取心8筒，总进尺37.51 m，岩心采取率84.4%，保压成功率87.5%。研究结果表明，该取心工具保压性能可靠，技术方案可行，可为常规油气及非常规油气藏勘查开发提供技术装备支撑。

关键词：密闭保压取心；低温保压；页岩气藏；煤层气藏；取心工具
中图分类号：P634.4；TE921 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-9686(2023)04-0077-07

Development and application of TKP194-80 sealed pressure-holding coring tool

ZHAO Yi, LIU Hailong*, CAI Jiapin, RUAN Hailong, LIANG Tao
(*Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Closed pressure maintaining coring is a special coring technique that can maintain or approach formation pressure, allowing fluid and gas in the core to remain in their original state. This technology is of great significance for correctly understanding geological conditions, calculating recoverable reserves of oil fields, analyzing the mechanism of shale gas and coalbed gas reservoirs, and formulating exploration and development plans. TKP194-80 type sealed pressure maintaining coring tool is developed, which adopts key technologies such as large bore high pressure ball valve sealing, sealing fluid plugging, hydraulic differential migration, piston pressure compensation, and is equipped with core post-processing processes such as core freezing, cutting, and gas gathering. The outer diameter of the drill bit is 215mm, the pressure maintaining capacity is 50MPa, and the core diameter is 80mm. The application of pressure retaining coring was carried out in a coalbed methane resource geological exploration well in Jinzhong, Shanxi province. A total of 8 pressure retaining coring barrels were carried out, with a total footage of 37.51m. The core recovery rate was 84.4%, and the pressure retaining success rate was 87.5%. The research results show that the coring tool has reliable pressure retaining performance, feasible technical scheme, and meets the design requirements. It can provide technical equipment support for the exploration and development of conventional and unconventional oil and gas reservoirs.

Key words: closed pressure coring; low temperature pressure maintaining; shale gas reservoir; coalbed methane reservoir; coring tool

收稿日期：2023-01-13；**修回日期**：2023-05-22 **DOI**：10.12143/j.ztgc.2023.04.011
第一作者：赵义，男，汉族，1985年生，高级工程师，机械设计及制造专业，硕士，主要从事地质钻探取心工具研究工作，北京市房山区良乡工业开发区二期创新路1号，bjiee_zy@foxmail.com。
通信作者：刘海龙，男，汉族，1988年生，工程师，钻探工程专业，主要从事地质钻探取心工具研究工作，北京市房山区良乡工业开发区二期创新路1号，510601097@qq.com。
引用格式：赵义，刘海龙，蔡家品，等.TKP194-80型密闭保压取心工具的研制与应用[J].钻探工程，2023，50(4)：77-83.
ZHAO Yi, LIU Hailong, CAI Jiapin, et al. Development and application of TKP194-80 sealed pressure-holding coring tool[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 77-83.

0 引言

能源供应和安全事关我国现代化建设全局。当前，世界政治、经济格局深刻调整，能源供求关系正在起着深刻地变化[1]。我国能源资源约束日益加剧，稳步提高石油、天然气产量，寻找页岩气、煤层气等新能源，成为我国长期的发展战略[2-3]。密闭保压取心技术是油气增产、页岩气和煤层气等非常规油气勘探开发的关键技术[4-5]。密闭保压取心与常规取心不同，它能取出保持储层原始压力下的含油、含水饱和度的岩心。常规取心过程中钻井液可侵入并冲刷岩心，驱走了岩心中所含油气水组分[6-9]。当岩心出筒后，因环境压力降低和温度下降影响，使岩心中的气体、液体等组分剧烈膨胀而散逸[10-13]，从而影响了储层物化参数的分析、储量的计算和确定等。密闭取心是指在水基钻井液中取得的岩心基本不受钻井液的污染，能真实再现地层原始孔隙度、含油饱和度及水侵和含水率、含气量等资料，这对于精确分析页岩气藏、煤层气藏机理是十分重要的[14-17]。相对于美国、加拿大等国在密闭保压技术的研究，我国在这方面技术发展和推广较缓慢，目前只有大庆油田的BYM系列密闭取心器[18]和中石油长城钻探GW194-70BB型保压密闭取心器[19]，工程应用实例较少且在密闭保压取心直径、额定保压能力等技术方面相对落后。为此，北京探矿工程研究所研制了TKP194-80型密闭保压取心工具，突破大通径高压球阀密封、差动运移、压力补偿等关键技术，通过室内和现场试验证明了该取心工具的可靠性，可为我国常规油气及非常规油气资源勘查、开采提供有效的技术方法。

1 设计思路

设计采用三筒双动结构，三筒分别为外筒、保压管和岩心管，其中外筒起到传递扭矩和保护内部结构的作用，保压管与球阀配合形成密封腔实现保压，岩心管用来存储岩心。采用自锁式大通径高压球阀，岩心管预先穿过球阀中心孔坐落在取心钻头内，在取心结束后，通过液压差动装置，岩心管带动岩心向上移动，使岩心管运移到球阀上方，球阀在弹簧的带动下翻转关闭，实现密封。密闭液预先灌装在岩心管内，并通过密闭液堵头封堵。堵头头部伸出取心钻头，当取样器到达井底后，通过钻压将密闭液堵头压入岩心内，密闭液可以从堵头周边挤压流出，随着取心进尺，岩心推动密闭液堵头不断向岩心管内部移动，密闭液不断被挤出，将岩心包裹住。

2 主要结构及技术参数

TKP194-80型密闭保压取心工具主要由连接短接、旋转套、外筒、钻头、传动球、差动节、高压气室、补偿气室、岩心管、保压筒、球阀和密闭液堵头等部分组成(见图1)。其中，外管总成主要由连接短接、旋转套、外筒和钻头组成。内管总成主要由传动球、差动节、高压气室、补偿舱、岩心管、保压筒、球阀和密闭液堵头组成，主要技术参数见表1。

表1 TKP194-80型密闭保压取样器技术参数

Table 1 technical parameters of the TKP194-80 closed pressure maintaining sampler

性能指标	指标值
总长/m	10
取样器外径/mm	193.7
钻头外径/mm	215.6
单回次取心长度/m	6
岩心直径/mm	80
额定保压/MPa	50

工作原理：取心工具下井前，预先从密闭液堵头注满密闭液，在钻进过程中密闭液能够不断把岩心包裹起来，保护岩心免遭钻井液污染。当取心钻进完成后，上提钻具，卡簧卡断岩心。球阀在差动总成的作用下关闭，实现对岩心的密封。高压气室、补偿气阀和平衡舱共同组成压力补偿总成，实现对岩心管内的压力补偿，持续维持保压筒内部压力。

3 关键技术

TKP194-80型密闭保压取心工具关键技术主要有大通径高压球阀密封、差动运移、密闭液封堵、压力补偿等。

3.1 大通径高压球阀密封技术

球阀密封技术是密闭保压取样的关键，关系到样品直径和保压成功率。设计球阀时围绕结构简单、可靠性强的设计思路，在保证球体强度的前提下，最大程度的增加球体内通径，球体材质选用630不锈钢，该不锈钢具有高强度、耐腐蚀、高硬度等特性，屈服强度$\sigma_{0.2}$=1000 MPa。球体表面经过镀铬处理，硬度可达910 HV，可有效提高球体表面硬度，

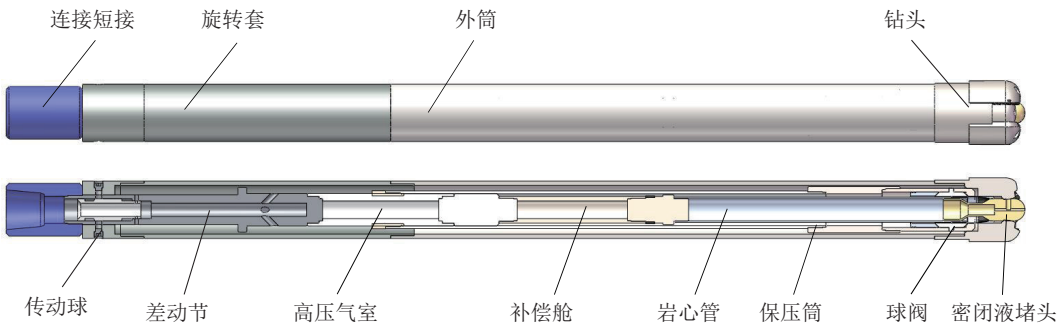

图1　TKP194-80A型保压密闭取心钻具结构示意

Fig.1　Structure diagram of the TKP194-80A pressure maintaining sealed coring tool

增加球体抗杂质性和耐磨性,延长球阀使用寿命。上密封材质选用聚氨酯密封,具有耐低温高回弹性,保障密封可靠性。选用矩形弹簧,其具有负载高、寿命高的特性,可为上密封提高足够的预紧力,提高密封可靠性。

在选择球阀座密封时,首先建立球阀座受力方式(各参数详见图2)。

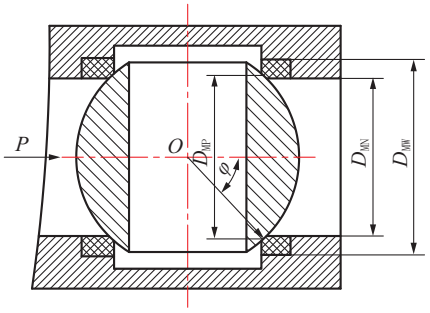

图2　球阀座计算说明

Fig.2　Calculation diagram of ball valve seat

球阀作用在密封座上的力为:

$$Q=\frac{\pi D_{MP}^{\ 2}}{4}\cdot P=\frac{\pi\left(D_{MW}+D_{MN}\right)^{2}}{16}\cdot P \qquad (1)$$

球体对密封面的法向力:

$$N=\frac{Q}{\cos\varphi}=\frac{\pi\left(D_{MN}+D_{MW}\right)^{2}P}{16\cos\varphi} \qquad (2)$$

密封面的比压:

$$q=\frac{\left(D_{MW}+D_{MN}\right)^{2}P}{4\left(D_{MW}^{\ 2}-D_{MN}^{\ 2}\right)} \qquad (3)$$

式中:D_{MP}——密封座受力有效作用面直径;P——内部压力;φ——密封副与中心线夹角。

选择合适的密封材料确立密封材料许用比压,可以确立球阀座外密封尺寸D_{MW}与阀座内密封尺寸D_{MN}的关系(球阀结构见图3)。

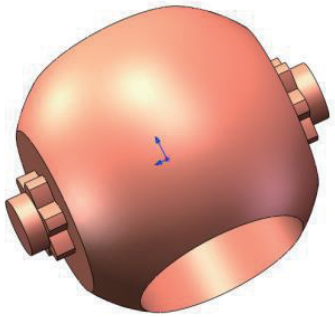

图3　球阀结构示意

Fig.3　Structure diagram of ball valve

设计的球阀两边加工有齿轮转轴,通过带导向齿条的套筒相配合,工作时在差动机构带动下套筒向上抬升(1/4)πD的距离(D为齿轮转轴节圆直径),球阀在齿轮转轴的作用下旋转90°,完成球阀关闭动作。

3.2　差动机构

差动机构可使取样器内管总成和外管总成之间产生一定的相对位移,在差动过程中密封球阀关闭,压力补偿打开,实现对保压样品的压力维持(详细结构见图4)。差动机构由内外管接头、钢球、活塞管、活塞套、剪切销钉、分水接头等机构组成。其中活塞管与活塞套形成油缸结构,取心结束后通过投入钢球,堵塞原钻井液通道,在液压的作用下剪切销钉,活塞套在液压的作用下上行一定的距离,从而带动内部结构实现差动。差动机构通过液压提供动力,实现内、外筒产生一定的相对位移,同机械差动机构相比,提升了差动成功率。

3.3　密闭液封堵技术

保压密闭取心使用的密闭液是一种粘度高、流

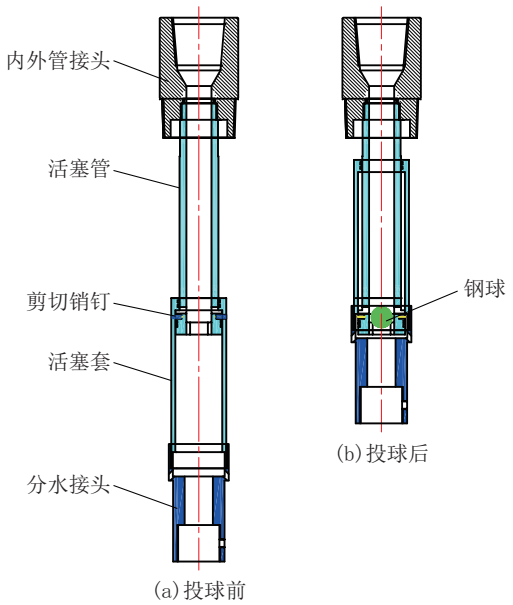

图4 差动机构示意

Fig.4 Schematic diagram of differential mechanism

动性好、粘附性强的高分子混合物质。取样器作业时,密闭液可在岩心表面形成一种保护膜,可有效阻止钻井液对岩心的侵入,从而保护岩心不与外界接触污染岩心,可最大程度的保护岩心原位数据参数,这对精确获取地层科学数据是必要的。密闭液堵头主要作用是将密闭液封堵在样品管中不泄露,当开始取心作业时,岩心顶开密闭液堵头,并进入取样筒内,密闭液可从堵头侧面挤出包裹岩心,密闭液粘附于岩心表面产生微弱的一层侵入带,并在岩心表面形成较致密的保护膜,避免岩心受污染。取样器密闭液堵头由固定孔、注液孔、排气孔、密封带、基体等组成(具体结构见图5)。其中固定孔可与取心钻头配合,起固定安装作用。密封带与取心钻头内保径孔配合,起密封作用。

3.4 压力补偿技术

压力补偿机构的作用是维持取样器岩心保压筒内的压力,由高压气室、补偿气阀、平衡舱组成。其

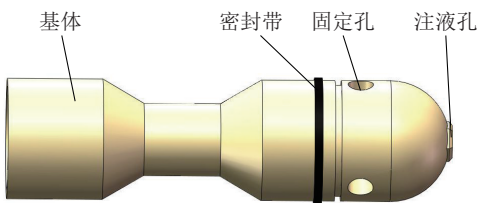

图5 密闭液堵头结构示意

Fig.5 Structural diagram of sealing fluid plug

工作原理为(见图6):在取样作业前往高压气室中预充高压氮气,预充的压力为储层地层压力的120%~150%,设置补偿气阀打开压力为储层地层压力。取样完毕球阀关闭后,当岩心保压筒内的压力低于储层地层压力时,补偿气阀打开,高压气室的高压氮气舱与平衡舱相连,在活塞的作用下,利用压力与体积成反比的原理(Boyle定律$P_1V_1=P_2V_2$)来调节岩心保压筒中的压力,岩心保压筒内的压力减小,高压气室的高压氮气将活塞往下推,减小平衡舱的体积,增加保压筒的压力,以达到保持保压岩心压力的能力。当岩心保压筒内的压力高于储层地层压力时,补偿气阀关闭。

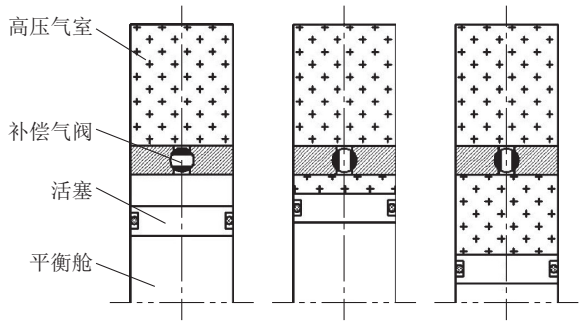

图6 压力补偿机构原理

Fig.6 Principle of pressure compensation mechanism

4 密闭保压岩心处理工艺

岩心处理是密闭保压取心的重要基础工作,关系到整个密闭保压取心工作的成败。非常规油气资源成藏机理、赋存形态及开发技术不同于油气资源,岩心处理工艺也不同。密闭保压岩心处理工艺主要包括岩心冷冻、岩心集气、岩心切割等工艺。

4.1 岩心冷冻工艺

在处理密闭保压岩心时,为了避免岩心中的油、气、水三相损失,通常情况下对保压岩心进行冷冻处理,使其凝固在岩心中,方便后续的岩心分析。取样器提取到地面上,测试压力后,将取样器保压筒放入特制的冷冻筒内,冷冻筒连接液氮杜瓦罐,打开杜瓦罐开关,可对岩心保压筒进行液氮喷淋急速冷冻,冷冻时间约为10 h。在冷冻过程中,岩心中的流体变为固态,失去流动性和挥发性,气体也溶固在岩心中,最大程度地减小岩心组分的损失。当岩心完成冷冻后,保压筒内的压力消失,可进行切割操作。冷

冻设备及效果见图7。

图7　岩心冷冻处理现场

Fig.7　Scene pictures of core freezing treatment

4.2　岩心集气工艺

使用密闭保压取样器获取的岩心中含有游离气、解吸气等气体成分,根据需求也可选择现场集气,以便分析地层含气量和临界解吸气压力等科学参数,这对于煤层气藏和页岩气藏资源开发和地质评价是非常重要的。特设计了一套岩心集气装置,可与TKP194-80型密闭保压取心工具集气孔连接,此装置带有减压阀、气水分离器、燃烧头(详见图8)。打开取样器集气开关,取样器保压筒与集气装置连通,可收集取样器内岩心气体。

4.3　岩心切割工艺

研制的TKP194-80型密闭保压取心工具单回次取样长度6 m,为了更方便地分析、保存岩心,需要对保压岩心在冷冻状态下快速分段切割(见图9)。切割时需要利用杜瓦罐将低温液氮慢速喷淋到切割部位,避免岩心在切割过程中解冻(切割操作需佩带液氮防冻手套,以免冻伤皮肤)。切割完毕后使

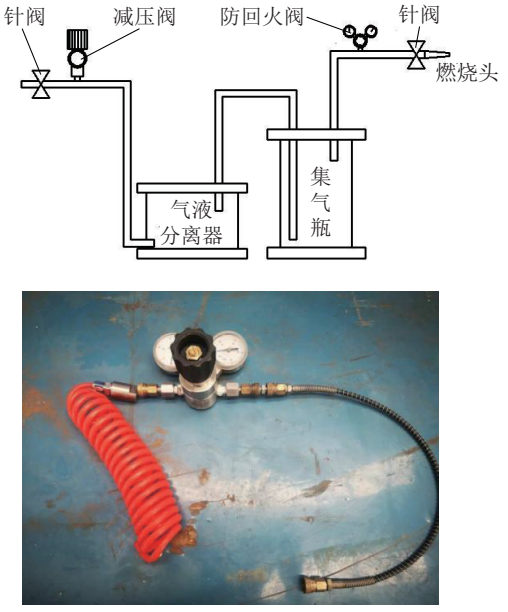

图8　岩心集气装置

Fig.8　Physical drawing of core gas gathering device

用岩心盖将分段岩心两端封好,并做标记。

图9　岩心分段切割

Fig.9　Sectional core cutting diagram

5 现场应用

2022年9月23日在山西省晋中某煤层气资源地质探井开展了密闭保压取心作业。井深1246 m，层位山西组、太原组，岩性为砂岩、灰岩、煤层，共进行密闭保压取心8回次。其中第2回次球阀被岩心堵塞未关闭，保压失败，其余7回次均保压成功，总进尺37.51 m，获取岩心31.66 m，岩心采取率84.4%。现场应用数据详见表2。第3、4、5回次通过集气装置收集岩心气体，经综合计算测量地层瓦斯含量约为5.62 m^3/t。第7回次对岩心进行液氮冷冻后，切割成长45 cm的岩心段送往试验室开展岩石矿物及油气水等分析测试。通过本次密闭保压取心作业查明煤储层的特征和物性，探明煤层气含量，为目标区块勘探开发方案的制订提供了基础数据。

表2 岩心采取率和保压率

Table 2 Core recovery and pressure maintenance rate

回次	地层	井段/m	进尺/m	岩心长/m	采取率/%	静液柱压力/MPa	样品压力/MPa	保压率/%
1	山西组	1246～1252.48	6.48	5.58	86.11	12.71	11.59	91.21
2	太原组	1334～1337.55	3.55	3.22	90.70	13.61	0	0
3	太原组	1337.55～1341.55	4.00	3.89	97.25	13.64	12.89	94.50
4	太原组	1341.55～1344.55	3.00	3.00	100.00	13.68	12.09	88.34
5	太原组	1367～1373	6.00	2.72	45.33	13.94	11.88	85.21
6	太原组	1373～1378	5.00	5.00	100.00	14.00	12.89	92.02
7	太原组	1383.01～1387.49	4.48	3.12	69.64	14.11	12.47	88.43
8	本溪组	1442～1447	5.00	4.93	98.60	14.71	12.59	85.62

6 结语

（1）通过现场应用情况表明研制的密闭保压取心工具设计合理，保压性能稳定，有助于获取高保真地层岩心资料，为精确获取地层科学参数提供了新的技术方法。

（2）设计的齿轮副闭合球阀精确关闭球阀，克服了球阀关闭不到位现象；独特的液压差动机构性能稳定，为球阀关闭提供了可靠的动力源，提升了取样工具保压成功率；密闭液包裹岩心可有效防止钻井液对岩心的污染，为后期岩心精确分析创造了条件。

（3）建议加强密闭保压取心岩心处理技术研究，针对不同作业目标，制定最佳岩心处理工艺及配套机具，进一步提升保压取心作业效率。

参考文献（References）：

[1] 蒋国盛，王荣璟．页岩气勘探开发关键技术综述[J]．探矿工程（岩土钻掘工程），2013，40(1)：3-8.
JIANG Guosheng, WANG Rongjing. Review of key technology for shale gas exploration and development[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(1): 3-8.

[2] 董大忠，邹才能，李建忠，等．页岩气资源潜力与勘探开发前景[J]．地质通报，2011，30(2)：324-336.
DONG Dazhong, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Resource potential, exploration and development prospect of shale gas in the whole world[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2): 324-336.

[3] 李欣，段胜楷，孙扬，等．美国页岩气勘探开发最新进展[J]．天然气工业，2011，31(8)：124-126，142.
LI Xin, DUAN Shengkai, SUN Yang, et al. Advances in the exploration and development of U.S. shale gas[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(8): 124-126, 142.

[4] 李开荣，薄万顺．密闭取心技术的新发展[J]．石油钻采工艺，1998(2)：36-38，112-113.
LI Kairong, BO Wanshun. Advances in sealed coring technology [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1998(2): 36-38, 112-113.

[5] 易贵华，易明，谢勇，等．密闭取心技术[J]．新疆石油天然气，2008，4(4)：46-50.
YI Guihua, YI Ming, XIE Yong, et al. Sealing coring technology[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2008, 4(4): 46-50.

[6] 鲁文婷，谢希，汪敏，等．页岩气开发的关键技术[J]．石油化工应用，2012，31(6)：17-19.
LU Wenting, XIE Xi, WANG Min, et al. The key technology of shale gas development[J]. Petrochemical Industry Application, 2012, 31(6): 17-19.

[7] 乔东宇，宋朝晖，黄治中，等．高性能取心密闭液的研究与应用[J]．钻井液与完井液，2010，27(5)：28-30.
QIAO Dongyu, SONG Zhaohui, HUANG Zhizhong, et al. Research and application of high performance sealed coring fluid

[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010,27(5):28-30.

[8] 邓都都,阮海龙,赵义,等.保压取样钻具内岩心温压采集器的研制与应用[J].钻探工程,2022,49(6):116-121.
DENG Dudu, RUAN Hailong, ZHAO Yi, et al. Development and application of the temperature and pressure collector in the pressure core sampler[J]. Drilling Engineering, 2022,49(6):116-121.

[9] 刘协鲁,阮海龙,赵义,等.海域天然气水合物保温保压取样钻具研究与应用进展[J].钻探工程,2021,48(7):33-39.
LIU Xielu, RUAN Hailong, ZHAO Yi, et al. Progress in research and application of the pressure-temperature core sampler for marine natural gas hydrate[J]. Drilling Engineering, 2021,48(7):33-39.

[10] 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.

[11] 郑军卫,孙德强,李小燕,等.页岩气勘探开发技术进展[J].天然气地球科学,2011,22(3):511-517.
ZHEN Junwei, SUN Deqiang, LI Xiaoyan, et al. Advances in exploration and exploitation technologies of shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2011,22(3):511-517.

[12] 刘协鲁,阮海龙,陈云龙,等.国内常规海洋地质钻探取心技术进展[J].钻探工程,2021,48(3):113-117.
LIU Xielu, RUAN Hailong, CHEN Yunlong, et al. Progress in domestic conventional marine geological coring technology [J]. Drilling Engineering, 2021,48(3):113-117.

[13] 郝召兵,黄为清,秦静欣,等.气体水合物密闭采样原位饱和度评估技术研究[J].地球物理学报,2013,56(11):3917-3921.
HAO Zhaobing, HUANG Weiqing, QIN Jingxin, et al. Estimation technique for gas hydrate saturation of pressure core samples[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013,56(11):3917-3921.

[14] 范文星.密闭取心井钻井技术及其问题探讨[J].石油天然气学报,2007,29(2):129-131.
FAN Wenxing. Discussion on drilling technology and problems of closed coring well[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007,29(2):129-131.

[15] 刘刚,赵谦平,高潮,等.提高页岩含气量测试中损失气量计算精度的解吸临界时间点法[J].天然气工业,2019,39(2):71-75.
LIU Gang, ZHAO Qianping, GAO Chao, et al. A critical desorption time method to improve the calculation accuracy of gas loss in shale gas content testing[J]. Natural Gas Industry, 2019,39(2):71-75.

[16] 李正前,房勇,陈孝红,等.沅麻盆地页岩气地质调查湘桃地1井钻井技术及井下复杂处理[J].钻探工程,2022,49(5):48-56.
LI Zhengqian, FANG Yong, CHEN Xiaohong, et al. Drilling and downhole complex treatment of Well Xiangtaodi-1 for shale gas geological survey in Yuanma Basin[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):48-56.

[17] 刘文武,朱文鉴,赵洪波,等.鄂西地区页岩气地质调查鄂建地4井钻井技术[J].钻探工程,2022,49(5):39-47.
LIU Wenwu, ZHU Wenjian, ZHAO Hongbo, et al. Drilling technology of Well Ejiandi-4 for shale gas geological survey in western Hubei[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):39-47.

[18] 张洪君,刘春来,王晓舟,等.深层保压密闭取心技术在徐深12井的应用[J].石油钻采工艺,2007,29(4):110-114.
ZHANG Hongjun, LIU Chunlai, WANG Xiaozhou, et al. Application of submerged pressure maintaining sealed coring techniques to Well Xushen-12[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007,29(4):110-114.

[19] 杨立文,孙文涛,罗军,等.GWY194-70BB型保温保压取心工具的研制和应用[J].石油钻采工艺,2014,36(5):58-61.
YANG Liwen, SUN Wentao, LUO Jun, et al. Study and application of GWY194-70BB heat and pressure preservation coring tool[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014,36(5):58-61.

（编辑　荐华）