



深部煤层原位保压保瓦斯取心技术装备及初步应用

高明忠 宋杰 崔鹏飞 李永程 李聪 李佳南 刘贵康 游镇西 史晓军

引用本文:

高明忠, 宋杰, 崔鹏飞, 等. 深部煤层原位保压保瓦斯取心技术装备及初步应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 143-154.
GAO Mingzhong, SONG Jie, CUI Pengfei. Technology and application of in-situ pressure and gas maintaining coring for deep coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 143-154.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0156>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于长距离密闭取心的煤巷条带瓦斯预抽效检研究

Study on efficiency verification of strip in gas pre-drainage coal roadways based on long-distance sealed coring
煤炭科学技术. 2021, 49(3): 106-111 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.013>

煤层瓦斯含量测定技术及装备研究进展

Research progress of coal seam gas content determination technology and equipment
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 164-176 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0170>

瓦斯含量测定中取心管管壁温度变化特性研究

Study on characteristics of temperature variation of coring tube wall during gas content determination process
煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5f40ec5f-4007-4557-9acc-122c19562e95>

深部开采卸压瓦斯精准抽采体系构建及实践

Construction and practice of accurate gas drainage system for pressure relief gas in deep mining
煤炭科学技术. 2021, 49(5): 1-10 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/81d23517-72dd-4887-b651-227f3509a46a>

延川南煤层气田深部煤层气成藏规律与开发技术

Enrichment law and development technology of deep coalbedmethane in South Yanchuan Coalbed Methane Field
煤炭科学技术. 2019(9) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b44ed913-d31a-40fd-9623-c61113830508>

延川南煤层气田深部煤层气藏排采制度的建立与优化

Establishment and optimization of drainage system for deep coalbed methane in South Yanchuan CBM Field
煤炭科学技术. 2021, 49(6): 251-257 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e78a882f-0c4b-4ccc-8ce0-df0b13a9d583>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

“深部煤矿瓦斯防治与利用”专题



移动扫码阅读

高明忠, 宋杰, 崔鹏飞, 等. 深部煤层原位保压保瓦斯取心技术装备及初步应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 143–154.

GAO Mingzhong, SONG Jie, CUI Pengfei, *et al.* Technology and application of in-situ pressure and gas maintaining coring for deep coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 143–154.

深部煤层原位保压保瓦斯取心技术装备及初步应用

高明忠^{1,2,3}, 宋杰^{1,2}, 崔鹏飞^{1,2}, 李永程^{1,2}, 李聪^{3,5}, 李佳南^{3,4,5}, 刘贵康^{3,5}, 游镇西^{3,4,5}, 史晓军^{3,4,5}

(1. 深圳大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 广东 深圳 518060; 2. 深圳大学 广东省深地科学与地热能开发利用重点实验室, 深地科学与绿色能源研究院, 广东 深圳 518060; 3. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 4. 四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610065; 5. 四川大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 深部煤层瓦斯含量精准测定是矿井瓦斯灾害防治和煤层气高效开发利用的基本前提。煤层传统取心技术普遍采用开放式取心, 需利用估算方法获得煤层取心过程中的瓦斯损失量, 难以保证煤层瓦斯原位参数的准确性和有效性。基于“原位保真取心”学术思想, 开发了深部煤层原位保压保瓦斯取心技术, 研制了深部煤矿原位保压保瓦斯取心器, 并基于三维数值仿真对取心器外管、保压舱体结构与关键薄弱部件进行了强度校核。同时, 依托自主研发的保压取心实验室模拟测试平台, 测定并分析了保压控制器的保压能力, 通过煤矿现场试验验证了取心器的可靠性。研究表明: 自主研制的取心器具有保压能力强、保压时间长、防扰动性能稳定等优势; 取心器在内部流体压力 20 MPa 和 1 000 N·m 扭矩作用下等效应力为 121.1 MPa, 远小于材料屈服强度, 满足强度设计要求; 取心器在 20 MPa 荷载作用下等效应力为 63.9 MPa, 满足强度设计要求; 取心器整体在 19.4 MPa 压力条件内可持续稳定运行, 可以满足大部分深部煤矿瓦斯测试需求; 现场测试表明保压保瓦斯取心器的保压控制器闭合情况良好, 现场取心率达 100%。研究成果可为深部煤层瓦斯含量精准测定奠定理论、技术和装备基础, 对于煤矿瓦斯灾害防治和煤层气勘探开发具有重要意义。

关键词: 深部; 瓦斯; 保压保瓦斯; 保压取心; 瓦斯含量; 煤层气开发

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)04-0143-12

Technology and application of in-situ pressure and gas maintaining coring for deep coal seam

GAO Mingzhong^{1,2,3}, SONG Jie^{1,2}, CUI Pengfei^{1,2}, LI Yongcheng^{1,2}, LI Cong^{3,5}, LI Jianan^{3,4,5}, LIU Guikang^{3,5}, YOU Zhenxi^{3,4,5}, SHI Xiaojun^{3,4,5}

(1. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Deep Earth Sciences and Geothermal Energy Exploitation and Utilization, Institute of Deep Earth Sciences and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 4. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 5. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Accurate determination of gas content in deep coal mine is the premise for the prevention and control of gas disaster, as well as the efficient development and utilization of coalbed methane. Traditional coring technology of coal seam is generally open-ended and requires to obtain the amount of gas loss during the coring process by using estimation methods, making it difficult to ensure the accuracy and validity of the in-situ parameters of coalbed methane. Based on the academic idea of “in-site condition-maintaining coring”, the in-situ pressure- and gas-maintaining coring technology for deep coal seam was proposed, and the in-situ pressure- and gas-maintaining corer for

收稿日期: 2024-01-27

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.12438/cst.2024-0156

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年科学基金资助项目(52225403); 国家重点研发计划资助项目(2023YFF0615400)

作者简介: 高明忠(1980—), 男, 山西吕梁人, 教授, 博士。E-mail: gaomzh@szu.edu.cn

通讯作者: 崔鹏飞(1992—), 男, 山西晋中人, 博士研究生。E-mail: cpf6134@163.com

deep coal seam was developed. The strength verification for corer outer tube, pressure-maintaining chamber and key weak parts were conducted based on three-dimensional numerical simulation. Meanwhile, the pressure-maintaining capacity of controller was measured and analysed relied on the self-developed pressure-maintaining coring laboratory simulation test platform, and the reliability of corer was verified through field tests in coal mine. The results shown that, the self-developed corer had the advantages of strong pressure-maintaining capacity, long pressure-maintaining time and stable anti-disturbance performance. The equivalent stress of the corer under internal fluid pressure of 20 MPa and torque of 1 000 N·m was 121.1 MPa, which was much smaller than the yield strength of the material and met the strength design requirements. The equivalent stress of corer under the pressure of 20 MPa was 63.9 MPa, which met the strength design requirements. The corer can operate continuously and stably at the pressure of 19.4 MPa, which met the demand for gas testing in most of deep coal mines. The field test shown that, the pressure-maintaining controller of the pressure- and gas-maintaining corer closed well, with 100% of coring rate in the field. The research provides a theoretical, technical and equipment foundation for the accurate determination of gas content in deep coal seams, which is of great significance for the prevention and control of coal mine gas disasters and the exploration and development of coalbed methane.

Key words: deep mining; coalbed methane; pressure and gas preserved; pressure-preserved coring; coalbed gas content; coalbed methane production

0 引 言

2021年5月,中国煤炭工业协会印发的《煤炭工业“十四五”高质量发展指导意见》提出,我国煤炭年均消费增长1%左右。煤炭在我国能源消耗结构中长期占据主导地位^[1],并且未来相当长时间内,煤炭在我国能源体系中的主体地位和“压舱石”作用仍不会改变^[2-4]。然而,随着浅部资源的逐渐枯竭,资源开采不断走向深部^[5-6],深部工程“三高—扰动”的原位环境,导致灾害频发,难以有效预测和预防^[2,7-9]。瓦斯灾害防治作为深部煤矿开采面临的主要问题之一,严重制约着深部煤炭的安全绿色开采^[10-13]。因此,精准测定深部煤矿原位瓦斯含量是深部安全绿色开采的首要任务。

目前,常规瓦斯含量测试主要依据国家标准GB/T 23250—2009《煤层瓦斯含量井下直接测定方法》^[14]来估算瓦斯损失量(包括 \sqrt{t} 法和幂函数法, \sqrt{t} 法认为煤样开始暴露一段时间内的解吸量与 $\sqrt{t_0+t}$ (t_0 为暴露时间, t 为解吸时间)呈线性关系;幂函数法则通过拟合测得的解吸速度与解吸时间得到最初时间解吸速度与解吸衰减系数,进而计算得到瓦斯损失量)。采用修正参数来反映水分和灰分对瓦斯不可解吸量的影响,导致传统开放式瓦斯测量技术获得的瓦斯含量与煤层原位瓦斯赋存状态相差甚远,严重影响着瓦斯治理方案设计与制定的科学性。故亟需研究新技术、研发新装备、建立新标准,准确测量煤层瓦斯赋存状态及运移规律,为煤与瓦斯突出等动力灾害防控提供基础数据支撑^[15]。此外,随着开采深度和集约化生产程度的迅速提高,深部煤矿地质条件越来越复杂,煤层瓦斯原位赋存状态及运移规律严重影响着瓦斯抽采工艺参数设计与实

施效果,煤层瓦斯含量的精准测定已成为煤矿瓦斯灾害防治和煤层气高效开发利用的关键。解决上述问题的关键突破口在于研发深部煤层原位瓦斯参数测定技术与装备,进而科学开展煤层原位瓦斯赋存规律研究并优化瓦斯抽采技术工艺参数。

在天然气水合物和石油等领域已开展了大量保压取心研究,并且已有较为成熟的研究成果。早在20世纪30年代,美国提出了保压取心技术,为勘探开发天然气水合物资源,国外依托国际深海钻探计划(DSDP)和国际大洋钻探计划(ODP),研制了多种保压取心工具投入使用,如今已有较为成熟的技术,国际大洋钻探计划 ODP 采用 Pressure Core Sampler (PCS)^[16]作为取心工具,保压能力最高可达70 MPa,在 ODP 的 Leg204 航次中进行的39次取样作业中,取心成功率为95%。日本国家石油公司(JNOC)研制的 Pressure-Temperature Coring System (PTCS)^[17]取心器在 Nankai Through 钻探作业中共获取161.3 m 保压岩心,保压成功率约70%。我国大庆油田自20世纪60年代开始了密闭取心技术与探索,为进行油气藏取心作业,先后研制了BYM-I型、BYM-II型和BYM-III型密闭保压取心器^[18];中国石油集团长城钻探工程有限公司针对非常规油气资源成藏机理、赋存形态技术需求,研制了GW-CP194-80A型保压取心工具^[19-20],并提出了3种配套工艺技术,包括液氮冷冻技术、保压密闭取心技术及保压内筒解吸技术。保压内筒单次取心长度为1.0~1.5 m,经5口井27筒次取心测试,平均取心收获率87.5%,保压成功率92.6%。特别是在垂深为3 350 m的页岩油藏L11A井,完成49 MPa保压取心,保压率达到100%;此外,在YS-X页岩气井获得的单位体积岩心含气量为邻井常规取心获取量的4~6倍。

基于保压取心在石油、天然气和天然气水合物等领域已开展的相关研究,针对煤层气取心,中国石油长城钻探工程有限公司研制了GW-CP194-80M型煤层气双保压取心工具^[21-22],采用气液压力补偿技术和复合式胶筒保压内筒,可获得具有原位压力的岩心试样。该取心器于2019年5月在沁水盆地M97-X井进行了煤层气取心现场试验,获得了10.6 MPa原位压力的保压试样(长0.85 m)。中国石油大学(华东)王西贵等^[23]在此基础上,针对煤层实际地质条件,研制了煤层气保温保压保形取心工具,在G-X20井进行了测试应用,保压率达到80%以上,有效降低了取心过程煤层气的散失,对于煤层原始孔隙率、渗透率和饱和度的地质参数获取具有重要的借鉴意义。中国煤炭科工集团研制了地面井煤层气含量精准测试密闭取心钻具及适合井下煤层瓦斯含量测定的长距离定点密闭取心装置^[24-29],提出了适用于碎软煤储层特征的煤层气含量精准测试密闭取心方法^[30],并在淮北芦岭煤矿和淮南潘三煤矿的碎软煤层开展了煤层气瓦斯含量测定试验,结果表明密闭取心获得的煤层气含量比常规取心方法平均高27.22%。中国地质科学院勘探技术研究所研制了煤层气调查评价钻探保压取心钻具,采用翻板阀保压结构,在钻具提升过程及煤心转移过程中能很好地保持煤心原始

压力,有效降低了煤层瓦斯的逸散^[31]。

然而,现有深部煤层密闭取心装置并没有考虑微扰动设计,在基本参数(体积、重量)、耐压性能与稳定性、与钻探设备匹配性、复杂地质条件适应性等方面仍有很大改进空间,特别是适应深部原位复杂煤层作业环境的原位保压保瓦斯取心技术仍需进一步攻关。本文基于自主研发的深部煤矿原位保压保瓦斯取心器,在耐压性能测试的基础上,通过数值模拟、室内试验与工业性测试验证了取心装置的适用性与可靠性。最后,通过自主研发的原位测试系统测试分析了原位瓦斯含量,为精准测定煤层瓦斯含量奠定了技术与装备基础,对煤矿瓦斯灾害防治和煤层气勘探开发具有重要意义。

1 深部煤层原位保压保瓦斯取心原理

如图1和表1所示,综合对比分析了图内外保压取心装备功能参数及原理结构优势,提出了深部煤矿原位保压保瓦斯取心器原理,通过创新设计的伞合方盖保压控制器,实现岩心的自触发密封;通过双筒单动两级轴承,解除钻杆转动对取心的扰动,实现微扰取心;通过绳索取心作业工艺,实现在钻杆内部连续取心作业。如图2所示,取心器主要部件包含保压控制器、弹力稳定器、复合轴承、推力轴承、

表1 国内外主要保压取心器对比

Table 1 Comparison of main pressure maintaining coring devices at domestic and abroad

序号	取心器	研制单位	适用领域	岩心参数	保压方式	耐压强度/MPa	应用案例
1	Pressure Core Sampler(PCS) ^[16]	国际大洋钻探计划(ODP)	天然气水合物	L1.0 m×ø43.2 mm	球阀	70	在ODP的Leg204航次中进行的39次取样作业中,取心成功率为95%
2	Pressure-Temperature Coring System(PTCS) ^[17]	日本国家石油公司(JNOC)	天然气水合物	L3.0 m×ø67 mm	球阀	25	在Nankai Through 钻探作业中,采用PTCS共获取161.3 m保压岩心,保压成功率约70%
3	BYM-III型保压取心工具 ^[18]	大庆石油管理局钻探集团钻井工程技术研究院	石油天然气	—	球阀	40	在徐深12井深层火山岩和砾岩地层应用,井口测试内筒压力为33 MPa,进尺2.2 m,岩心长2.2 m,岩心收获率100%,保压率94.3%
4	GW-CP194-80A型保压取心工具 ^[20]	中国石油集团长城钻探工程有限公司工程技术研究院	石油天然气	L6.0 m×ø80 mm	球阀	60	在辽河、大庆、四川等油气田进行了5口井27筒次的现场试验和应用,平均取心收获率87.5%、保压成功率92.6%
5	GW-CP194-80M型煤层气双保压取心工具 ^[21]	中国石油集团长城钻探工程有限公司工程技术研究院	煤层气	L1.5 m×ø80 mm	球阀	15	沁水盆地M97-X井保压10.6 MPa,取得0.85 m煤岩
6	煤层气保温保压保形取心工具 ^[23]	中国石油集团长城钻探工程有限公司工程技术研究院	煤层气	L1.3 m×ø80 mm L3.0 m×ø80 mm	球阀	60	G-X20井保压取心3筒次,累计进尺9.6 m,岩心收获率94.48%,保压取心成功率>80%
7	地面井煤层气含量精准测试密闭取心钻具 ^[30]	中国煤炭科工集团	煤层气	L1.5 m×ø38 mm	球阀	10	经8组煤层气含量测试,煤层气含量比常规取心方法平均高27.22%
8	煤层气调查评价钻探保压取心钻具 ^[31]	中国地质科学院勘探技术研究所	煤层气	L1.2 m×ø85 mm	翻板阀	20	—
9	DMQ-73型密闭取心装置 ^[32]	煤炭科学研究总院	煤层气	—	错位阀	6.5	在河南某煤矿的底抽巷开展了穿层孔密闭保压取心试验5组,比常规取样测试结果提高10%~15%

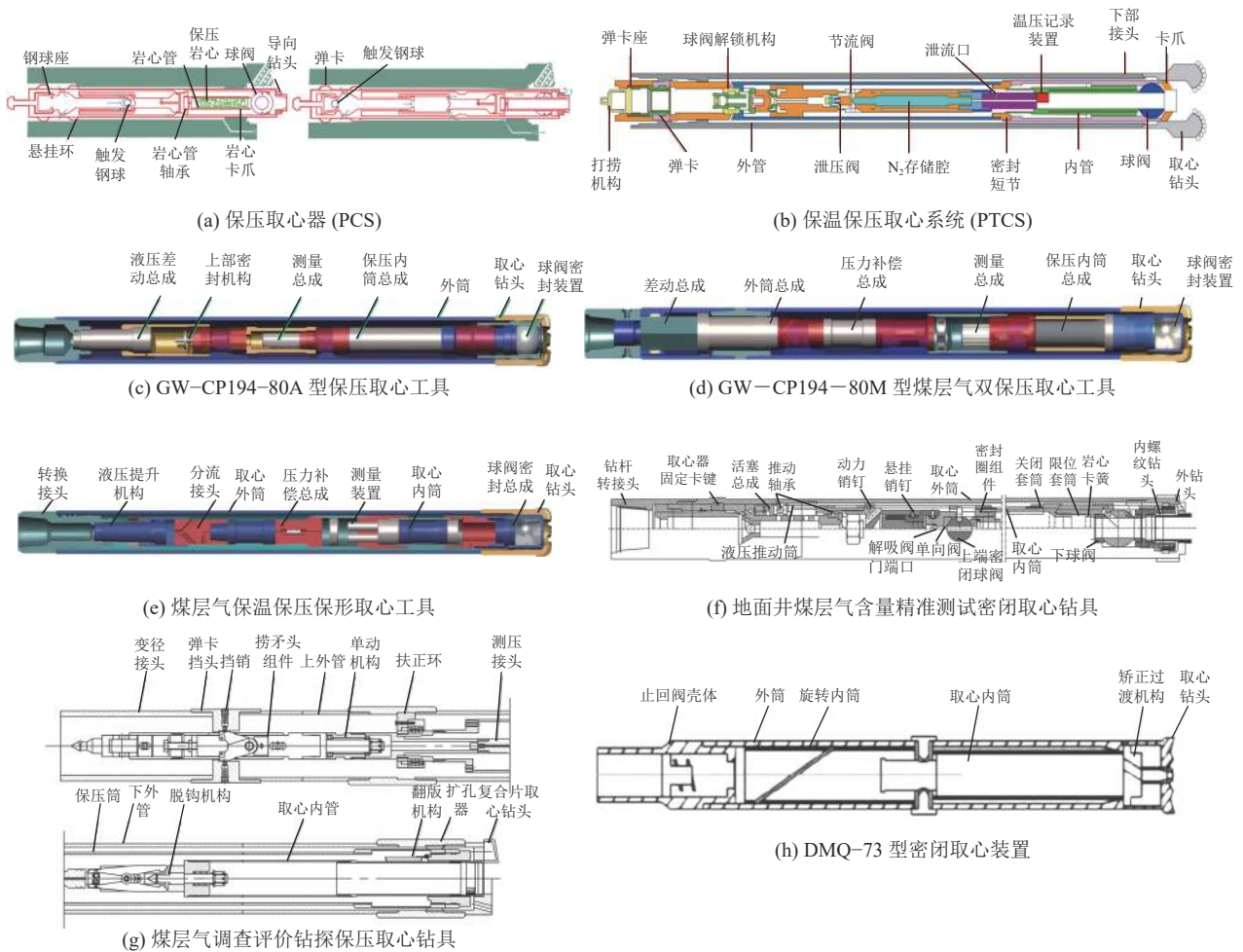


图1 国内外保压取心器结构示意图^[16-17,20-21,23,30-32]

Fig.1 Schematic diagram of pressure maintaining coring device at domestic and abroad^[16-17,20-21,23,30-32]

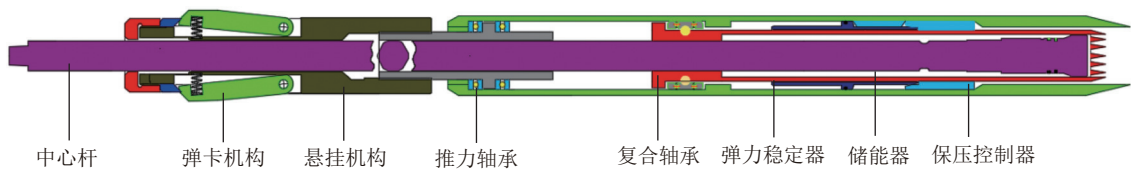


图2 保压保瓦斯取心器结构示意图^[10]

Fig.2 Schematic diagram of pressure and gas preserving coring device^[10]

悬挂机构、弹卡机构以及中心杆等,在保压性能、低扰动取心、取心效率等方面具有显著优势。

保压控制器是原位保压保瓦斯取心的核心部件之一,位于取心器岩心管底部。该部件的构型和性能决定了保压取心器的极限耐压强度。其研制灵感源于牟合方盖原理,牟合方盖是由我国古代数学家刘徽研究球积公式时创建的几何模型,该模型原理是其首先发现并采用的一种用于计算球体体积的方法,类似于微元法^[33-36]。基于牟合方盖几何结构,设计保压取心原理如图3所示,整个过程分为钻进状态、触发状态与闭合状态3个阶段。当取心器处于钻进状态时,保压控制器位于取心器内外筒之间,为

岩心进入保压舱提供通路。当达到设计取心长度时,进入触发状态,保压控制器解除约束限制,自动旋转至阀座,完成密封相态的转换。最终,保压控制器上部的弹力稳定器回弹,为保压控制器的密封提供初始密封比压,进入闭合状态。

2 深部煤层原位保压保瓦斯取心装备研制

基于牟合方盖保压取心原理,集成坑道钻机技术、保压取心技术和连续导管技术的作业优势,自主研制了深部煤矿原位保压保瓦斯取心装备,具备结构精简、作业高效的特点。为进一步检验取心装备的保压能力,重点开展了取心器外管、耐压舱体的数

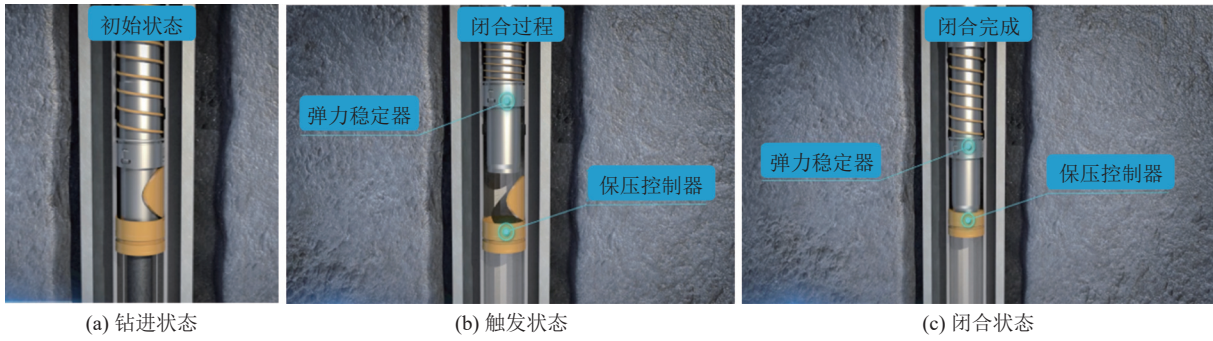


图 3 保压取心过程示意

Fig.3 Schematic diagram of pressure preserving coring process

值仿真分析以及保压能力实验测试。

2.1 取心器外管保压抗扭性能数值仿真

为满足深部高瓦斯压力矿井瓦斯含量测定使用需求,探究取心器在流体压力 20 MPa 条件下的工作可靠性^[37-40]。基于 Abaqus 有限元分析软件,建立取心器三维有限元模型,以最大应力作为失效判据,评估取心器作业时的可靠性。取心器连接管处内径为 62.5 mm,外径为 69.8 mm,总长 401 mm,取心器外管总长 492 mm。使用六面体网格及三维应力单元构建几何模型,有限元模型施加荷载与边界条件情况为:在数值模型内表面施加 20 MPa 均布应力,在模

型左端取心口处施加 1 000 N·m 扭矩^[10],在模型右端施加完全固定约束。

考虑取心器在高温高压复杂环境下对材料的耐腐蚀与防锈要求,选取 304 不锈钢作为取心外管和保压舱以及储能器的材料,材料的基本力学参数见表 2^[41]。

由图 4a、图 4b 可知,取心器最大变形出现在取

表 2 材料力学参数^[41]

Table 2 Mechanical material parameter^[41]

材料	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
304不锈钢	193	0.3	634

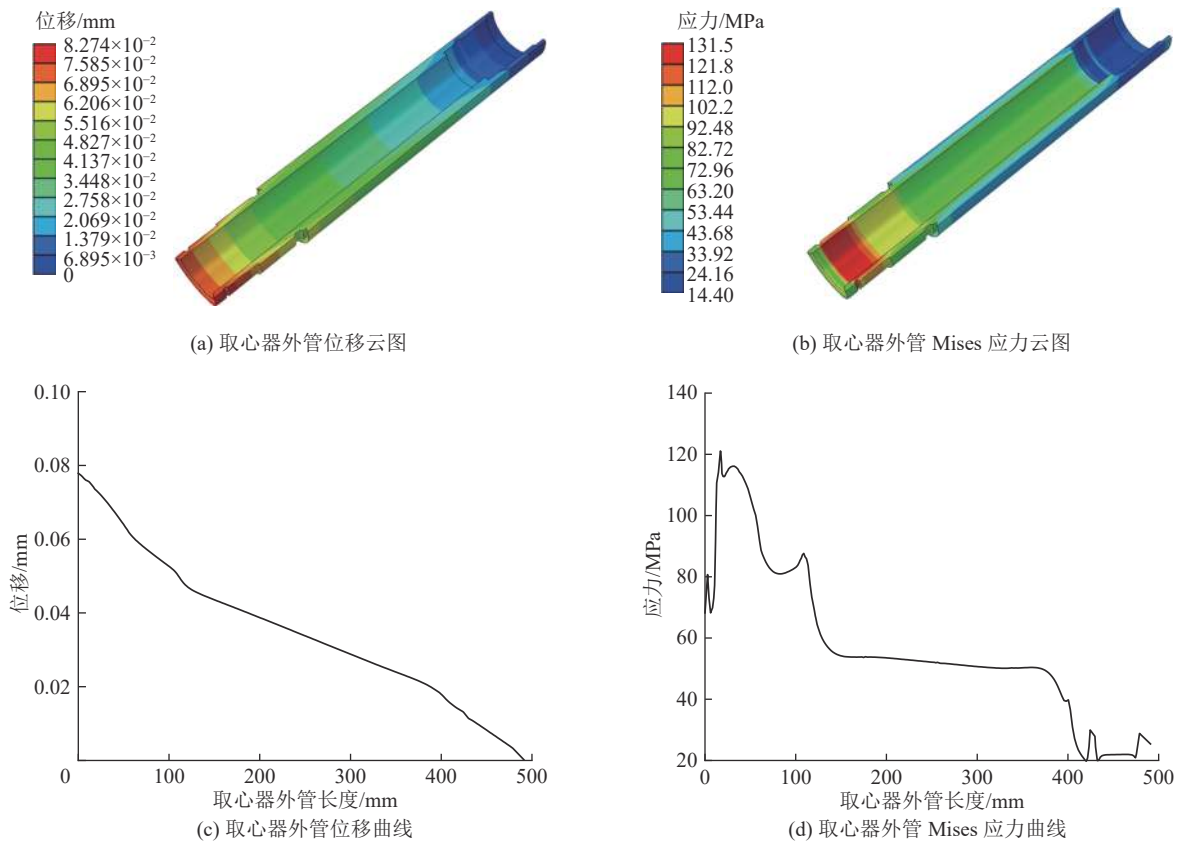


图 4 取心器外管数值模拟结果

Fig.4 Numerical simulation results of outer tube of coring device

心口处为 0.077 88 mm(图 4c);最大 Mises 应力出现在取心口处为 121.1 MPa,沿取心外管轴向逐渐减小至 20.0 MPa(图 4d),取心外管在钻进扭矩和内部流体压力耦合作用下整体未超过材料的屈服强度,满足使用强度要求。

2.2 取心器耐压舱体保压性能数值仿真

为进一步探究取心器耐压舱保压性能,需校核取心装备在压差 20 MPa 作用下的工作能力,同步进行保压能力室内物理试验,两者试验结果相互验证,最终说明耐压舱体的可靠性。保压舱内径为 64 mm,外径为 90 mm,总长 1 000 mm,单元选择三维应力单元,根据保压保瓦斯取心装备实际使用工况,有限元模型应用的边界条件如下:在数值模型内表面施加

20 MPa 静水压力,两端施加全位移约束。

保压舱径向位移如图 5a 所示、保压舱等效应力如图 5b 所示。保压舱最大变形出现在内壁为 0.010 4 mm,向外逐渐减小,至外壁减小为 0.008 6 mm(图 5c),满足密封要求;最大 Mises 应力也出现在保压舱内壁为 68.64 MPa,向外逐渐减小,至保压舱外壁减小为 37.38 MPa(图 5d),未超过材料的屈服强度,材料产生弹性变形,满足强度要求。储能器等效位移如图 5e 所示、等效应力如图 5f 所示。储能器最大变形出现在中间凹槽部位,这是由于中间凹槽部位壁厚较薄造成的,最大变形量 0.003 mm,满足密封要求;最大 Mises 应力也出现在中间凹槽部位为 60.06 MPa,未超过材料的屈服强度,材料仅有弹性变形,满足强

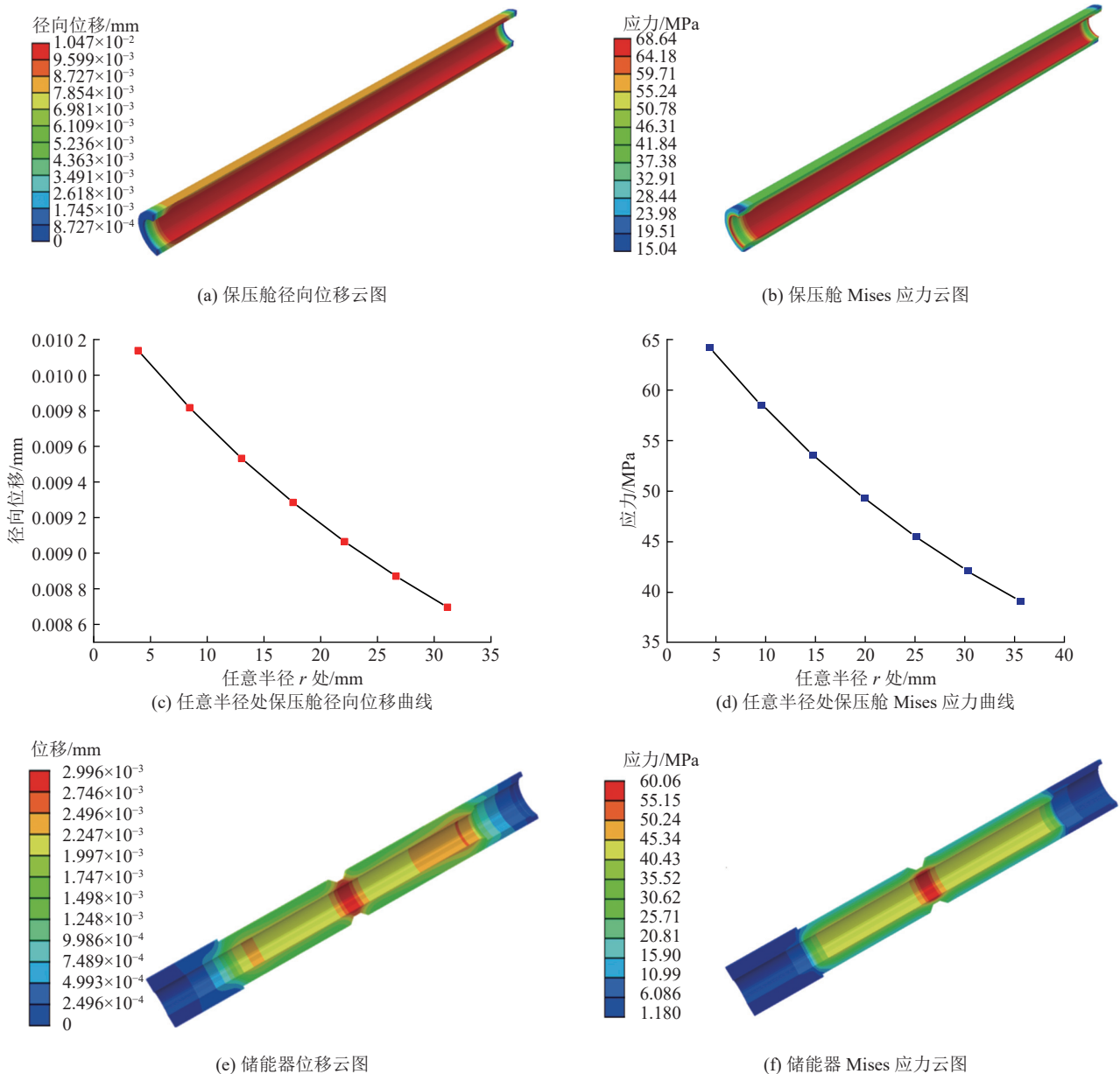


图 5 保压舱数值模拟结果

Fig.5 Numerical simulation results of pressure maintaining chamber

度要求。上述保压舱的数值仿真分析与耐压能力测试综合考虑保压舱径向位移及等效应力因素影响，进一步验证了保压保瓦斯取心装备耐压舱体设计可满足强度要求。

2.3 取心器保压能力室内物理试验

工业性测试是验证保压保瓦斯取心器的关键，本次取心器保压能力工业性测试采用四川大学深地科学研究中心的液压系统。如图 6 所示，该系统包

括液压站、储水箱、高压管路、保压取心器以及压力记录显示仪，可提供 0~200 MPa 压力源。测试流程为：首先向保压控制器内通入某一初始流体压力，初始流体压力稳定后判断流体压力在 5~15 min 内的压力维持情况，2 min 内压力不发生衰减后继续提高流体压力判断保压控制器内压力维持情况。旨在通过二次加压分别模拟保压控制器在保压空间内压力形成初期和最终状态的保压能力。

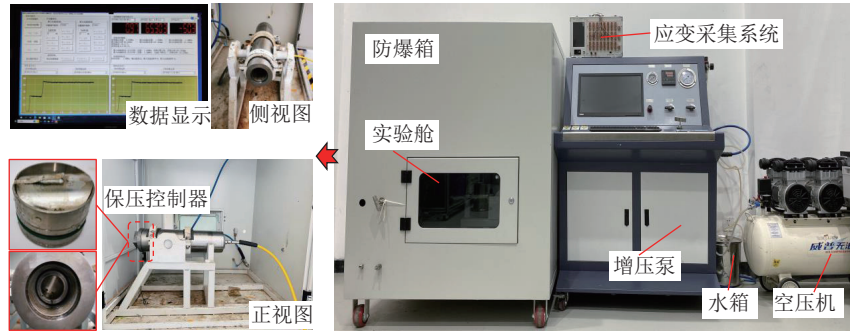


图 6 保压取心实验室模拟测试平台

Fig.6 Pressure preserving coring laboratory simulation test platform

保压取心模拟测试基本试验步骤为

1)检查保压控制器阀盖闭合处以及密封圈状态，确认实验开始前不存在密封圈破损以及闭合处存在杂物后开始实验。

2)检查保压取心模拟系统设备状态，确认状态良好后将保压控制器装在测试舱底部。

3)将安装完毕后的测试舱用吊装工具安装至实验舱内部，将实验舱支架固定至取心模拟系统后使用空压机进行加压。

4)实验过程中可能存在流体泄露风险，因此实验室内采用水作为压力流体。打开自来水管路及截止阀，将测试舱内全部充入水以排出舱内气体避免形成高压气体。

5)打开增压泵和增压阀，按时预设压力值进行初次打压，待压力维持 5~15 min 后进行二次打压，最终压力分别设置为：1、3、5、10、15、20 MPa，试验最终实现参数见表 3，实验时间维持 1 h 并监测测试舱内压力变化。

6)依次关闭增压泵和增压阀，打开卸压阀门逐渐降压，将测试舱内水排出后打开测试舱取出保压控制器清洁，导出并保存数据。

7)测试下一流体压力状态时重复 1)~6)操作依次设置不同压力进行试验。

如图 7 所示，首先向测试舱内通入流体压力，初次压力维持数值为 0.52 MPa，保压控制器内压力维

持稳定，持续至 13 min 时开始进一步向保压控制器中进行二次打压，待保压控制器内流体压力增加至 0.99 MPa 后停止加压，压力持续维持至 1 h 后停止实验，由图可知，初次加压和二次加压过程中，保压控

表 3 保压取心模拟测试参数

Table 3 Simulated testing parameters for pressure holding core sampling

序号	初次压力/MPa	初次压力维持时间/min	二次压力/MPa	二次压力维持时间/min
1	0.52	13	0.99	60
2	1.52	12	2.99	60
3	2.50	12	4.97	60
4	4.97	12	9.98	60
5	7.49	12	14.97	60
6	10.8	7	19.60	60

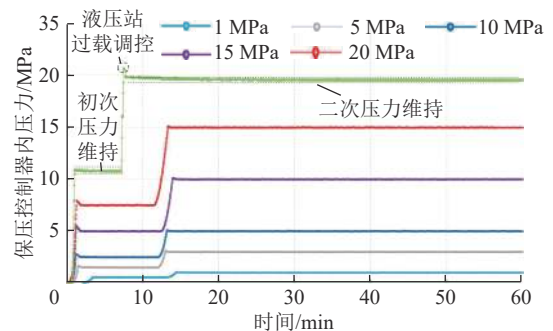


图 7 取心器实验室保压能力试验曲线

Fig.7 Laboratory pressure holding capacity test curve

制器压力维持稳定未发生明显衰减;将保压控制器清洁后开始第2次试验,初次测试舱内压力增加至1.52 MPa,压力维持12 min后进行二次加压,二次压力维持值为2.99 MPa,随着压力增加,初次加压和二次加压过程中初次达到压力时存在压力降低过程,该数值波动是由于设备运行液压站压力过载调控和保压控制器内压力稳定综合作用导致,而并非保压控制器压力维持失败,后续各压力测定过程中均出现此情况。同理,后续分别实现了最终流体压力达到4.97、9.98、14.97和19.6 MPa,压力维持时间均大于60 min。测试过程中保压控制器内流体压力在不同压力值工况下均维持平稳,进一步验证了保压控制器保压能力可靠性,可将其配置至保压取心器中,作为保压空间下端压力维持构件。

3 深部煤层原位保压保瓦斯取心工艺及现场应用

现场应用是保压保瓦斯取心效果评价的最直接方式,选取国内典型矿井分别开展了地面取心和井下2种作业工艺。为验证深部原位保压保瓦斯取心装备工程现场实际应用效果,选取河南省与黑龙江省典型矿井作为现场试验基地。通过现场取心试验,验证保压保瓦斯取心装备及取心工艺的可靠性,获取原位瓦斯参数,为试验矿井瓦斯治理与安全开采提供指导。

3.1 取心孔位

河南某矿试验钻孔位于该矿保护煤柱范围内,距西侧己15-17-13180采空区48.7 m,距东侧己七主运输下山34.5 m,东北方向距F2逆断层35.3 m。己15-17煤层整体上赋存比较稳定,从进、回风巷掘进过程来看,回风巷己15煤与己16-17煤合层。己15、己16-17煤层分叉合并线位于13180工作面之中,走向与13180工作面走向基本一致,回风巷沿己15-17煤层施工,煤层较厚,平均5.5 m。进风巷沿己15煤层施工,平均煤厚约3.5 m,在局部构造影响区域煤厚变薄约为2.0 m。

黑龙江某矿试验钻孔位于该矿东部区14号/右三上巷,拉门位置为东部区-360石门及车场1号/测点处,方位215°,坡度沿煤,与地表垂深810~840 m。邻近工作面东部区-360石门及车场,涉及煤层为14号/煤层,该煤层为突出煤层,煤层结构单一,煤层平均厚度1.80~2.00 m,煤层呈单斜构造发育,施工区域煤层平均倾角3°~6°。

3.2 取心试验

深部煤矿原位保压试验工况如图8所示,河南

某矿地面取心为地面井取心,取心方向为竖直取心,黑龙江某井下取心主要为近水平取心,分别进行了顺层孔取心和穿层孔取心。深部煤矿原位保压保瓦斯取心工艺是实现瓦斯精准测量的关键,其工艺关联性强,共分为4个部分,分别为:取心器安装与调试、钻进取心、提钻保压、保压保瓦斯岩心回收与瓦斯含量测定。

1)取心器安装与调试。安装过程中,需检查取心器内部所有密封圈是否存在破损。当取心器安装完成后,在地面调试取心动作,抽拉中心杆使得取心器中的保压控制器实现触发动作,此时取心器内部保压舱完成密封解锁。利用现场液压泵测试密封性能,若无泄露,则开始下一阶段。

2)钻进取心。取心动力由煤矿取心钻机提供,通过钻具将取心器送入孔底,钻取方式可以选择竖直向下或者水平倾斜。取心器在外钻的包裹下钻进取心,此时煤心进入煤心存储筒,向前钻进预设距离后停止钻进,如图9a所示。

3)提钻保压。当煤心钻进完成后,利用取心钻机配套绞车提拉中心杆;待煤心管越过保压控制器,触发保压动作,形成密封空间,获得保压保瓦斯煤心,如图9b所示。

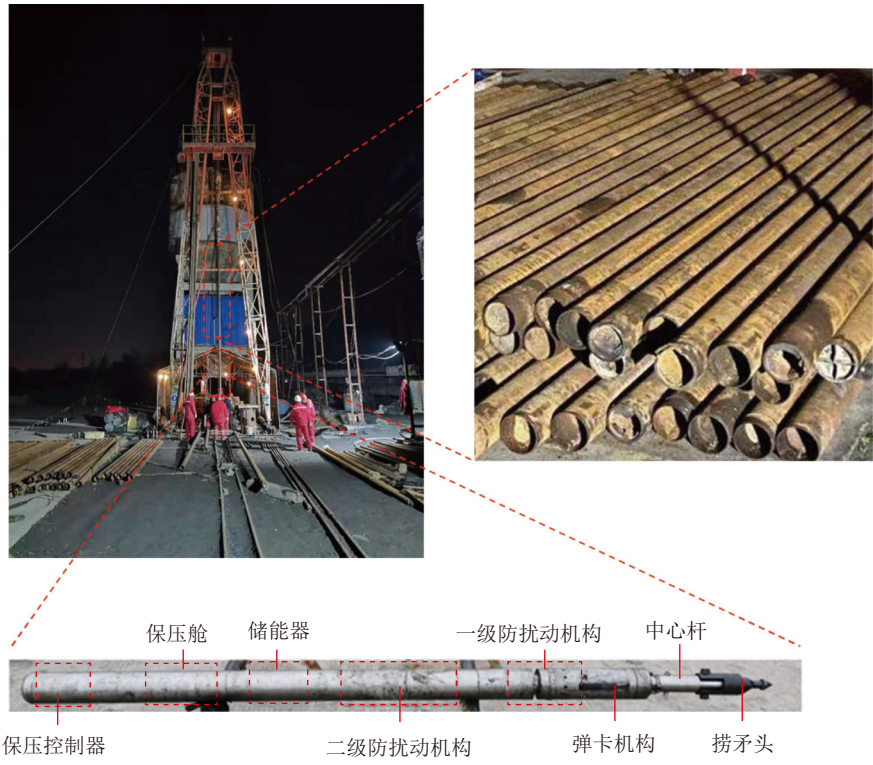
4)保压保瓦斯煤心回收与瓦斯含量测定。首先将保压保瓦斯取心器转移至地面,进行带压初次解吸,测定瓦斯初次解吸量。然后将保压舱对接至自主研发的密闭转移舱中,取出初次解吸后的煤样,进行初次破碎及二次解吸。最后将破碎煤样转移至球磨罐,进行三次解吸,完成测定。

保压保瓦斯取心整体过程与传统取心方法操作流程类似,却具有“钻进过程中低扰动”“保压取心”以及“避免损失量估算失真”等优势,可以实现瓦斯含量更精准的测定。

3.3 取心样品及瓦斯含量测定结果

试验过程中保压保瓦斯取心器的保压控制器闭合密封状态良好,可为原位煤心提供可靠的保压空间,如图10a所示。同时,由图2中推力轴承和复合轴承构成的一级防转和二级防转构成的低扰动防转模块可有效避免取心过程中对岩心样品造成的强烈机械扰动,图10b为利用保压保瓦斯取心工艺获取的低扰动煤心样品。

保压保瓦斯取心共开展现场应用7次,其中在河南某矿开展地面取心3次,在黑龙江某矿开展井下取心4次,保压控制器均成功闭合,保压保瓦斯取心成功率为100%,实现深部煤层保压保瓦斯取心,



(a) 河南某矿地面取心现场与保压保瓦斯取心器实物



(b) 黑龙江某矿井下取心现场

图 8 深部煤矿原位保压试验工况
Fig.8 In-situ pressure holding test in deep coal mine

验证了保压保瓦斯取心装备及工艺的可靠性。

在前期井下实验的基础上^[42], 保压保瓦斯取心分别实现了井下顺层钻孔和穿层钻孔取心, 进一步拓展了瓦斯含量精准测定取心工艺应用范围。通过保压保瓦斯取心测得的瓦斯含量与传统取心方式测得的瓦斯含量进行对比, 可验证保压保瓦斯取心相对传统取心的优越性, 具体测试结果如下所示:

如表 4 和图 11 所示, 采用保压保瓦斯取心获得

的瓦斯含量参数普遍高于传统取心方法获得的瓦斯含量, 瓦斯含量上升 20% ~ 50%, 极大缩小了瓦斯测试误差。首先, 取样钻进过程中通过双级扰动可在确保样品完整度更高的同时, 避免强扰动带来的摩擦生热加速瓦斯解吸; 然后, 保压保瓦斯取心可以在煤矿井下钻孔小空间内实现自密封, 为样品提供了可靠的保压空间, 有效避免了取样过程中的煤样暴露与瓦斯逸散, 同时, 取心作业取得样品以煤柱为主,

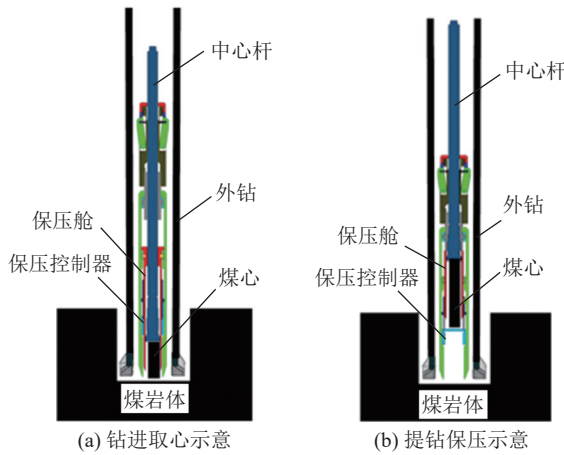


图9 取心工作示意

Fig.9 Schematic of coring work

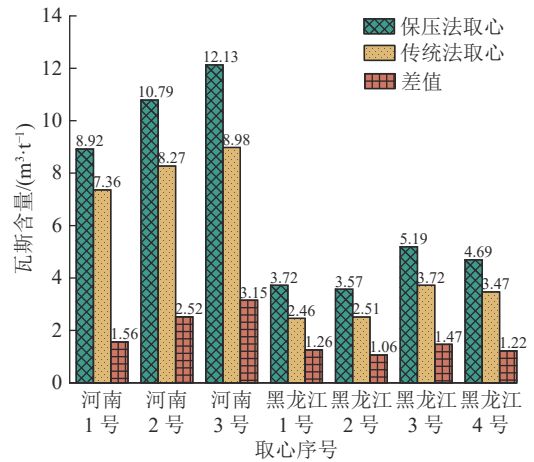


图11 瓦斯含量测试结果对比

Fig.11 Comparison of gas content test results

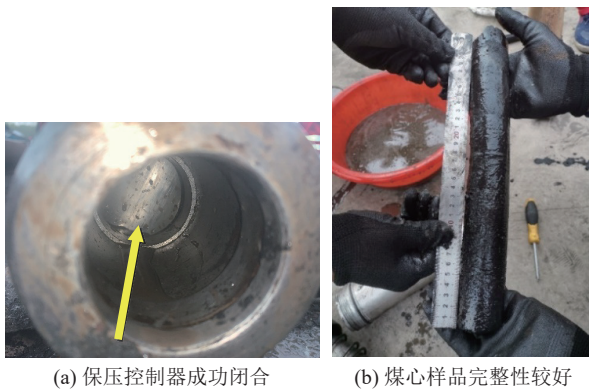


图10 河南某矿保压取心现场试验结果

Fig.10 Field test results of pressure preserving coring

表4 瓦斯含量测试结果

Table 4 Simulated testing parameters for pressure holding core sampling

编号	取心工艺	取心深度/m	瓦斯含量/(m³·t⁻¹)		瓦斯含量差值/(m³·t⁻¹)	瓦斯增加量/%
			保压取心	传统取心		
河南 1号	地面竖直取心	133	8.92	7.36	1.56	21.20
河南 2号	地面竖直取心	145	10.79	8.27	2.52	30.47
河南 3号	地面竖直取心	167	12.13	8.98	3.15	35.08
黑龙江 1号	近水平顺层孔	38	3.72	2.46	1.26	51.22
黑龙江 2号	近水平顺层孔	42	3.57	2.51	1.06	42.23
黑龙江 3号	近水平穿孔层孔	50	5.19	3.72	1.47	39.52
黑龙江 4号	近水平穿孔层孔	60	4.69	3.47	1.22	35.16

解吸速度远小于煤颗粒样品,无需估算损失量。综上所述可知,保压保瓦斯取心可为深部煤矿地勘时期煤层瓦斯含量测定和井下巷道掘进、瓦斯抽采以及工作面回采过程中瓦斯含量精准测定提供先进可靠的技术及装备支撑。

4 结论与展望

1)创新提出深部原位保压保瓦斯取心技术,揭示了取心关键技术原理,研发了能够自动密封、保压时间长、保压效果好的保压保瓦斯取心装备。

2)计算了取心器外管在内部流体压力 20 MPa、扭矩 1 000 N·m 作用下的形变与受力。取心器外管最大变形为 0.077 88 mm,最大应力为 121.1 MPa。同时计算了保压舱与储能器在 20 MPa 工作压力下的形变与受力。保压舱的最大变形量为 0.010 4 mm,最大应力为 68.6 MPa,储能器的最大变形量为 0.003 mm,最大应力为 60.06 MPa,完全满足密封要求且未超过材料的屈服强度,证明保压保瓦斯取心器关键部件在最高工作压力下的强度满足要求。

3)基于自主研发的打压设备开展了取心器室内耐压强度及保压性能测试,验证了取心器在 20 MPa 水压内可以实现长时间稳定保压。

4)提出了保压保瓦斯取心及测试工艺流程,开展了现场取心作业,获得了原位保压保瓦斯样品,保压保瓦斯取心成功率达到 100%,为实际工程应用提供了现场测试范例。

基于深部煤层原位保压保瓦斯取心原理,采用数值模拟、室内试验手段对保压保瓦斯取心装备设计参数强度及可靠性进行检验,结合现场实验进一步验证该取心装备具有保压能力强、保压时间长、防扰动性能稳定等优点。为进一步增强保压保瓦斯取心装备在现场应用的适用性,在后续研究中可针对设备整体的触发稳定性、压力主动补偿等方面开展进一步深入研究,为煤层瓦斯精准测定提供可靠的技术及装备支撑。以上研究在应用于煤矿原位瓦斯取心领域的同时,也可为深部石油原位取心、深海沉

积物原位取心等领域提供技术支持与原理借鉴。

参考文献(References):

- [1] 谢和平, 钱鸣高, 彭苏萍, 等. 煤炭科学产能及发展战略初探[J]. 中国工程科学, 2011, 13(6): 44-50.
XIE Heping, QIAN Minggao, PENG Shuping, *et al.* Preliminary study on production capacity and development strategy of coal science[J]. *China Engineering Sciences*, 2011, 13(6): 44-50.
- [2] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-130.5.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1283-130.
- [3] 高明忠, 刘建军, 林文明, 等. 特厚煤层超前采动原位应力演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 28-35.
GAO Mingzhong, LIU Junjun, LIN Wenming, *et al.* Study on in-situ stress evolution law of ultra-thick coal seam in advance mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(2): 28-35.
- [4] 刘见中, 申宝宏, 姜鹏飞, 等. 提高我国煤炭科学产能的技术对策[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(1): 21-24.
LIU Jianzhong, SHEN Baohong, JIANG Pengfei, *et al.* Technical countermeasures of improving china coal production capacity[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(1): 21-24.
- [5] XIE H, KONIETZKY H, ZHOU H. Special issue “Deep Mining” [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(5): 1415-1416.
- [6] XIE HP, GAO MZ, ZHANG R, *et al.* Study on the mechanical properties and mechanical response of coal mining at 1000 m or deeper[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(5): 1475-1490.
- [7] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 1-8.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, *et al.* Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(1): 1-8.
- [8] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 1-10.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, *et al.* Quantitative definition and investigation of deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 1-10.
- [9] 高明忠, 叶思琪, 杨本高, 等. 深部原位岩石力学研究进展[J]. 中国科学基金, 2021, 35(6): 895-903.
GAO Mingzhong, YE Siqi, YANG Bengao, *et al.* Research advances in deep in-situ rock mechanics [J]. *China Science Foundation*, 2021, 35(6): 895-903.
- [10] 高明忠, 陈领, 凡东, 等. 深部煤矿原位保压保瓦斯取心原理与技术探索[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 885-897.
GAO Mingzhong, CHEN Ling, FAN Dong, *et al.* Principle and technology of coring with in-situ pressure and gas maintaining in deep coal mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 885-897.
- [11] GAO MZ, RU Z, XIE J, *et al.* Field experiments on fracture evolution and correlations between connectivity and abutment pressure under top coal caving conditions[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 111: 84-93.
- [12] GAO M, ZHANG Z, YIN XG, *et al.* The location optimum and permeability-enhancing effect of a low-level shield rock roadway[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51: 2935-2948.
- [13] GAO M, XIE J, GAO Y, *et al.* Mechanical behavior of coal under different mining rates: A case study from laboratory experiments to field testing[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31: 7645.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局中国国家标准化管理委员会. GB/T 23250-2009 煤层瓦斯含量井下直接测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [15] 谢和平, 高明忠, 张茹, 等. 深部岩石原位“五保”取心构想与研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(5): 865-876.
XIE Heping, GAO Mingzhong, ZHANG Ru, *et al.* Study on concept and progress of in situ fidelity coring of deep rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(5): 865-876.
- [16] ABID K, SPAGNOLI G, TEODORIU C, *et al.* Review of pressure coring systems for offshore gas hydrates research[J]. *Underwater Technology*, 2015, 33(1): 19-30.
- [17] HE S, PENG Y, JIN Y, *et al.* Review and Analysis of Key Techniques in Marine Sediment Sampling[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 33(5): 160-176.
- [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(4): 110-111, 114, 128.
ZHANG Hongjun, LIU Chunlai, WANG Xiaozhou, *et al.* Application of submerge pressure maintaining sealed coring techniques to Well Xushen-12[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2007(4): 110-111, 114, 128.
- [19] 罗军. 保温保压取心技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2015.
LUO Jun. Research on pressure & heat coring[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2015.
- [20] 杨立文, 苏洋, 罗军, 等. GW-CP194-80A型保压取心工具的研制[J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 91-96.
YANG Liwen, SU Yang, LUO Jun, *et al.* Development and application of GW-CP194-80A pressure-maintaining coring tool[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(4): 91-96.
- [21] 朱庆忠, 苏雪峰, 杨立文, 等. GW-CP194-80M型煤层气双保压取心工具研制及现场试验[J]. 特种油气藏, 2020, 27(5): 139-144.
ZHU Qingzhong, SU Xuefeng, YANG Liwen, *et al.* Development and field test of GW-CP194-80M CBM dual pressure coring tool[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(5): 139-144.
- [22] 王西贵, 邹德永, 杨立文, 等. 保温保压保形取心工具优化设计及应用[J]. 石油机械, 2022, 50(2): 109-114.
WANG Xigui, ZOU Deyong, YANG Liwen, *et al.* Optimization and application in unconventional oil and gas development of heat-pressure-shape-preserved coring tool [J]. *China Petroleum Machinery*, 2022, 50(2): 109-114.
- [23] 王西贵, 邹德永, 杨立文, 等. 煤层气保温保压保形取心工具研制及现场应用[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 94-99.

- WANG Xigui, ZOU Deyong, YANG Liwen, *et al.* Development and field application of a coalbed methane coring tool with pressure maintenance, thermal insulation, and shape preservation capabilities [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(3): 94–99.
- [24] 孙四清. 煤层气含量地面井密闭取心与快速测定技术研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2018.
SUN Siqing. Study on surface well sealed coring and fast measurement for coal seam gas content[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018.
- [25] 龙威成. 井下煤层长距离定点密闭取心技术及应用研究 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(1): 9–16.
LONG Weicheng. Research of long distance fixed-point sealed coring technology and application in underground coal seam[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2022, 41(1): 9–16.
- [26] 龙威成, 孙四清, 陈建. 碎软煤层井下长距离定点密闭取心技术研究 [J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(8): 93–98.
LONG Weicheng, SUN Siqing, CHEN Jian. Study on long-distance fixed-point sealed coring technology in broken-soft coal seam[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(8): 93–98.
- [27] 芦伟, 龙威成, 康锴, 等. 中硬煤层井下长距离密闭取心瓦斯含量测定技术应用研究 [J]. *煤炭技术*, 2021, 40(12): 153–156.
LU Wei, LONG Weicheng, KANG Kai, *et al.* Application of gas content measurement technology for long-distance sealed coring in medium hard coal seam[J]. *Coal Technology*, 2021, 40(12): 153–156.
- [28] 冯强, 龙威成, 李振福, 等. 基于长距离密闭取心的煤巷条带瓦斯预抽效检验研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(3): 106–111.
FENG Qiang, LONG Weicheng, LI Zhenfu, *et al.* Study on efficiency verification of strip in gas pre-drainage coal roadways based on long-distance sealed coring[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(3): 106–111.
- [29] 李泉新, 方俊, 许超, 等. 井下长距离定点保压密闭煤层瓦斯含量测定取样技术 [J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(7): 68–73, 166.
LI Quanxin, FANG Jun, XU Chao, *et al.* Sampling technology for measuring gas content in coal seam with long distance fixed-point pressure sealing in underground mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(7): 68–73, 166.
- [30] 孙四清, 张群, 郑凯歌, 等. 地面井煤层气含量精准测试密闭取心技术及设备 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2523–2530.
SUN Siqing, ZHANG Qun, ZHENG Kaige, *et al.* Technology and equipment of sealed coring for accurate determination of coalbed gas content in ground well[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2523–2530.
- [31] 李小洋, 张永勤, 王汉宝, 等. 煤层气调查评价钻探保压取心钻具设计与试制 [J]. *地质与勘探*, 2019, 55(4): 1045–1050.
LI Xiaoyang, ZHANG Yongqin, WANG Hanbao, *et al.* Design and trial-manufacture of the pressure-holding core drilling tool for evaluation of coal-seam[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(4): 1045–1050.
- [32] 卢宗玮, 王清峰, 李彦明. 密闭取心装置研究现状与解决方案 [J]. *煤炭技术*, 2022, 41(5): 142–144.
LU Zongwei, WANG Qingfeng, LI Yanming. Research and solution of closed sampling device[J]. *Coal Technology*, 2022, 41(5): 142–144.
- [33] ZHANG L, CHU J, LI N. Application and implementation of Steinmetz solid[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2019, 1345: 042093.
- [34] 谢和平, 陈领, 高明忠, 等. 一种自动控制的高稳定性保压取芯装置 [P]. CN107514240A, 2017–12–26.
XIE Heping, CHEN Ling, GAO Mingzhong, *et al.* A highly stable pressure maintaining and core taking device with automatic control [P] CN107514240A, 2017–12–26.
- [35] 谢和平, 陈领, 高明忠, 等. 可增加密封比压的岩心筒密封结构 [P]. CN109505993A, 2019–03–22.
XIE Heping, CHEN Ling, GAO Mingzhong, *et al.* Core cylinder sealing structure that can increase sealing pressure [P]. CN109505993A, 2019–03–22.
- [36] 李聪, 高明忠, 陈领, 等. 一种保压舱压力补偿方法及结构 [P]. CN110749470A, 2020–02–04.
LI Cong, GAO Mingzhong, CHEN Ling, *et al.* A pressure compensation method and structure for maintaining pressure cabin [P]. CN110749470A, 2020–02–04.
- [37] 谢和平, 侯正猛, 高峰, 等. 原位保真取芯系统及取芯方法 [P]. CN106124242B, 2019–03–29.
XIE Heping, HOU Zhengmeng, GAO Feng, *et al.* In situ fidelity core extraction system and core extraction method [P]. CN106124242B, 2019–03–29.
- [38] 李润芝. 毛家庄煤矿高瓦斯掘进工作面瓦斯防治技术研究 [J]. *煤炭工程*, 2022, 54(1): 80–83.
LI Runzhi. Gas governance technology of high-gas driving face in Maojiazhuang coal mine[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(1): 80–83.
- [39] 路永贵. 屯兰矿2号煤层区域瓦斯突出预测敏感性指标及临界值研究 [J]. *煤炭与化工*, 2020, 43(5): 104–107.
LU Yonggui. Study on sensitivity index and critical value of gas outburst prediction in No. 2 coal seam area of Tunlan Mine[J]. *Coal and Chemical Industry*, 2020, 43(5): 104–107.
- [40] 杨安红, 冯纪林, 陈琦, 等. 沙曲矿北翼风井揭过煤层瓦斯含量及瓦斯压力测定技术 [J]. *煤炭技术*, 2010, 29(9): 98–100.
YANG Anhong, FENG Jiling, CHEN Qi, *et al.* Measurement technique of gas content and pressure in cut through coal seam in North air shaft of Shaqu Coal Mine[J]. *Coal Technology*, 2010, 29(9): 98–100.
- [41] 史晓军, 李铭辉, 刘贵康, 等. 深部煤矿保压取心触发装置仿真优化及应用 [J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(8): 21–29.
SHI Xiaojun, LI Minghui, LIU Guikang, *et al.* Simulation optimization and applications of pressure-preserved triggering device for coring in deep coal mines[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(8): 21–29.
- [42] 谢和平, 崔鹏飞, 尚德磊, 等. 深部煤层原位保压取心技术原理与瓦斯参数测定研究进展 [J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(8): 1–12.
XIE Heping, CUI Pengfei, SHANG Delei, *et al.* Research advances on the in-situ pressure-preserved coring and gas parameter determination for deep coal seams[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(8): 1–12.