

碎软煤层密闭保压取心钻具的设计与室内试验

卢春华, 石家润*, 张 涛, 王荣璟, 乔梦迪, 鲁浩然, 江昌禄

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:煤层气含量是表征煤储层特征的关键参数,提高煤层气含量测试结果准确度最为直接有效的途径就是采用密闭保压取心技术,把煤心样品密封在钻具内,提至地面进行解吸。本文提出了一种用于碎软煤层的绳索打捞提拉翻转球阀式密闭保压取心钻具技术方案,对该密闭保压取心钻具的工作机理及关键技术开展研究,详细阐述了该钻具的总体结构方案、主要零部件的结构设计计算、室内试验及优化改进方案。研究和试验表明:该密闭保压取心钻具结构简单、密封效果好、操作方便、可获得尽可能大的岩心直径(118 mm口径钻孔可获取直径50 mm的岩心);带动球阀翻转的拨杆和拨环尺寸的精确配合是决定球阀能否顺利翻转、实现密封的重要因素。

关键词:碎软煤层;保压取心;密闭保压取心钻具;绳索打捞;翻转球阀

中图分类号:P634.4⁺3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)05-0067-09

Design and preliminary experiment of sealed pressure-holding coring tool for crushed soft coal seam

LU Chunhua, SHI Jiarun*, ZHANG Tao, WANG Rongjing, QIAO Mengdi, LU Haoran, JIANG Changlu

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Coalbed methane content is a critical parameter for characterizing coal reservoir properties. The most direct and effective way to improve the accuracy of the test results of coalbed methane content is to use sealed pressure-holding coring technology, wherein the coal core sample is sealed inside the drilling tool and lifted to the ground for desorption. This paper proposes a technical scheme for a wireline-retrievable lifting and tilting ball valve type sealed pressure-holding coring drilling tool used for crushed soft coal seams. The working mechanism and key technologies of the sealed pressure-holding coring drilling tool are studied, and the overall structural scheme of the sealed pressure-holding coring drilling tool, the structural design calculation of the main components, preliminary indoor experiments, and optimization improvement plans are elaborated in detail. Research and experiments have shown that the sealed pressure-holding coring drilling tool has a simple structure, good sealing effect, easy operation, and can obtain the maximum feasible core diameter (a core diameter of 50mm can be obtained from a 118mm diameter borehole); The precise fit between the lever and the ring that drives the ball valve to flip is an important factor in determining whether the ball valve can smoothly flip and seal.

Key words: crushed soft coal seam; pressure-holding coring; sealed pressure-holding coring tool; wireline coring recovery; tilting ball valve

0 引言

煤层气(瓦斯)含量是表征煤储层特征的关键

参数之一,煤层气含量测定是煤层气资源勘探、开发以及矿井瓦斯综合治理等领域的一项重要工作。

收稿日期:2024-12-30; 修回日期:2025-03-16 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.05.009

基金项目:战略性国际科技创新合作重点专项“天然气水合物勘查开发技术联合研究”(编号:2018YFE0208200);横向项目“碎软煤层地面保压取心钻探工具研发”(编号:MTKCY-2024-45)

第一作者:卢春华,男,汉族,1976年生,教授,博士生导师,地质工程专业,研究方向为钻探工具与设备、非常规能源勘探开发、智能钻探等,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,lchct@163.com。

通信作者:石家润,男,汉族,1998年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为钻探工具与设备等,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,1061952311@qq.com。

引用格式:卢春华,石家润,张涛,等.碎软煤层密闭保压取心钻具的设计与室内试验[J].钻探工程,2025,52(5):67-75.

LU Chunhua, SHI Jiarun, ZHANG Tao, et al. Design and preliminary experiment of sealed pressure-holding coring tool for crushed soft coal seam[J]. Drilling Engineering, 2025,52(5):67-75.

准确获取煤层气含量数据对评价煤层气资源量、编制煤层气资源开发方案以及矿井开采设计、矿井通风、瓦斯灾害综合治理意义重大^[1-2]。

煤层气含量主要由解吸气、损失气和残余气3部分组成,解吸气和残余气实测获取,损失气是估算所得,实践中实际煤层气含量与勘探测得气含量存在较大偏差,主要原因是损失气估算不准^[3-5]。在测定过程中,煤心样品采取是关键环节,取心质量好坏直接关系到煤层气含量测定的成功与否和准确程度。保压取心作为一种获取原位高保真岩心样品的技术,可使取出的岩心保持在原位状态,最大限度减少重要数据的丢失,准确获取地下矿产资源储量和地层参数^[6]。提高煤层气含量测试结果准确度最直接有效的途径就是用密闭保压取心技术,将煤心样品在孔底密封,避免提升和地面暴露过程中气体逸散丢失,消除损失量估算不准带来的偏差。目前,密闭保压取心技术主要应用在油气、页岩气、天然气水合物等领域。油气密闭保压取心设备昂贵、工艺复杂、使用成本高,而且油气密闭保压取心目的、测试内容和要求与煤层气不同,因而油气勘探用的密闭保压取心技术及设备无法直接用于煤层气。研究煤层气含量快速测定方法,对煤层气资源勘探与开发和煤矿瓦斯灾害危险程度预测及评估等具有重要理论意义和实用价值^[7-9]。

为了尽可能减少煤心在装罐前的瓦斯逸散量,齐黎明等^[10]开展了密闭液封堵条件下的煤心瓦斯解吸规律实验研究,密闭条件下的瓦斯解吸量呈现不同程度降低,并据此提出采用密封液封堵煤样的卸压密闭取样方式进行定点取样;中国矿业大学^[11]采用活塞密封取样通道,提出一种煤矿密封取样装置及其使用方法;李红涛等^[12]研制了单动双管卸压密闭取心器,优选合适的取心钻头和密闭液,在改进煤样筒、真空脱气系统和粉碎系统的条件下进行瓦斯解吸测定试验,测得的瓦斯含量比传统法平均提高了9%;齐黎明^[13]提出一种井下卸压密闭煤心取样器,取样器包括外管和取心内管(煤样室和黏液室),利用黏液密封取样器来提高瓦斯含量的测定方法。总体来说,传统的瓦斯含量测定方法具有测定程序复杂和测定结果偏差大等不足,现有技术采用密闭液或液氮密封所取样品,成本较高,取心成功率低^[14-16]。机械密闭取心瓦斯含量测定技术是利用机械的方式在煤层中直接钻取煤心并密

闭进行测定,大多数采用地表泵的液压力来关闭密封球阀或板阀,操作相对较复杂,密闭取心成功的可靠性也受一定的影响,且目前保压取心钻具均存在钻具口径大、岩心样品直径小、钻具质量重、钻具结构复杂等问题^[17-19]。本文在分析国内外现有碎软煤层密闭取心钻具优缺点和关键技术基础上,提出一种用于碎软煤层的绳索打捞提拉翻转球阀式密闭保压取心钻具技术方案,对其关键零部件进行了设计和计算,加工了球阀密封部件并进行了初步的室内试验和优化改进。

1 碎软煤层密闭保压取心钻具结构

1.1 关键技术分析

1.1.1 岩心保压密封原理分析

现有密闭取心装置岩心管上端密封形式常采用液压密封或密闭液密封等形式,取心过程较繁琐。本文考虑在不增加复杂结构,依靠绳索取心打捞时拉力的作用,实现岩心管上端密封。该结构的难点有:(1)岩心管外径不变的情况下,如何提供差动所需的位移;(2)如何可靠限制差动位移的大小。

岩心仓下端密封形式的设计,目前煤、石油、天然气等行业取心的经验表明,球阀机构耐压能力和密封效果较好,但由于要切割岩心,还要封住管口,现有钻具的结构复杂,占去了一定的空间,所以取出的岩心直径一般较小。如国际大洋钻探计划天然气水合物航次中应用最广泛的保压取心设备HRC,钻杆直径127 mm时可获取直径51 mm的岩心^[20]。为了保证密封,且在相同钻孔直径中使取心直径尽可能大,需要对球阀机构进行改进。该结构的难点是如何简化球阀机构,在保证外管尺寸不变的情况下,最大限度地增大岩心直径。

1.1.2 提拉力驱动密封结构关闭原理分析

密封结构要保证取心时开启,取心后关闭。驱使密封结构关闭的力主要有地面泵送的液压力和绳索打捞时的提拉力。液压力需要在岩心管打满后,拧开钻杆投入钢球,堵住钻具内部的中心通道,由液压力驱动密封结构关闭,工艺较复杂。绳索提拉力是依靠打捞钻具上提力使密封结构关闭,不增加额外动作,工艺简单。常规的密闭取心钻具为保证可靠性,常采用三重管,密封结构占据空间较大。为增大取心直径,需对钻具结构进行简化,本文将三重管简化为双重管,依据外管和内管的差动设计

驱动岩心保压仓上下端密封结构关闭。

1.2 总体结构设计

碎软煤层密闭保压取心钻具的整体结构设计旨在提升岩心取样效率、保证密闭性能,并简化取心操作流程。密闭保压取心钻具总体结构见图1,

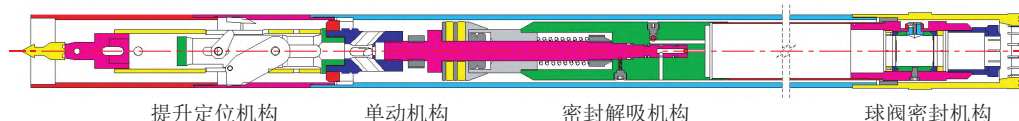


图1 密闭保压取心钻具总体结构示意图

Fig.1 General structure diagram of the sealed pressure-holding coring tool

1.3 主要部件结构设计

1.3.1 外管总成

外管总成结构如图2所示,包括钻杆接头、外管接头、座环、外管、扶正环、外钻头等,总长2668 mm,钻头外径118 mm。外管采用与内管同心的套管组合,确保内外管协同工作,避免摩擦和卡阻。外管总成的设计依据是内管总成的长度,以及弹卡、悬挂环、花键管、内钻头之间的相对位置及运动位移,作用是在取心钻进过程中将钻机产生的扭矩传递给外钻头,且中心通道可完成对内管总成的投放和打捞,实现快速取心的目的。

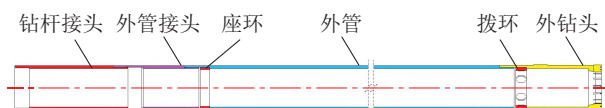


图2 外管总成结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the outer tube assembly

1.3.2 提升定位机构

提升定位机构主要由打捞矛组合件、弹卡组合件以及悬挂环组件3部分组成,结构如图3所示。打捞矛的作用是:(1)内管总成的下放和打捞。(2)通过机械提拉,使内外管产生位移差触动球阀机构上的拨杆与拨环相对运动,实现球阀的翻转。

弹卡的作用是:(1)防止内总成到位后向上串动。内管下放至外管确定位置,弹卡处于张开状态,此时外管总成加压旋转钻进,内管总成在岩心进入的摩擦力作用下有向上移动的趋势,由于弹卡与弹卡架直接相连,作用力经内管传至弹卡,受外管钻杆接头下端限位,防止内管向上串动。(2)弹卡与外管钻杆下接头的拨叉机构配合,带动内管总成

采用双管结构,包括内管总成和外管总成。内管总成包括提升定位机构、单动机构、密封解吸机构、球阀密封机构,各机构协同配合,实现岩心的采样和保持密闭状态。外管总成则通过传递动力和提供保护,协助内管完成取心任务。

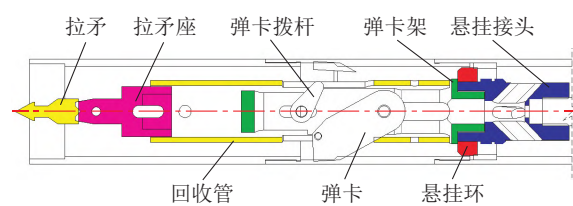


图3 提升定位机构结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of lifting and positioning mechanism

轴承上部与外管一起旋转,避免因相对运动导致弹卡磨损。悬挂接头与弹卡架相连部位装有可拆卸的悬挂环,内管总成到达预定位置后,坐在外管总成的座环上。内钻头底部与外钻头内台阶之间保持一定距离,保证内管总成到位后,外管单动灵活。

1.3.3 单动机构

单动机构如图4所示,主要由芯轴、单动轴承、轴承座等零件组成,作用是保证钻进中内管单动机构下端岩心保压仓不随外管旋转,减少对岩心的磨损。芯轴依次连接调节螺母、单动轴承组合件、缓冲弹簧、密封阀体等零部件。调节螺母与芯轴配合,在内外管组装完之后,调节内钻头底部与外钻头内台阶之间的间隙,预留过水通道。

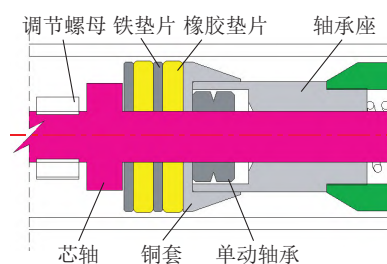


图4 单动机构结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of single-acting mechanism

1.3.4 密封解吸机构

在实现基本的悬挂、限位、调节、单动等功能后,岩心保压仓的设计需要实现密封保压、取心时不易堵心的功能,这就要求在钻进完成后对岩心管上下两端进行密封,且上端应设置单向阀防止钻取岩心时堵心,保证取心过程顺利。密封解吸机构主要由解吸阀门组件、单向密封组件、定位组件等,如图5所示。密封阀体与轴承座之间螺纹连接,轴承与铜套同心安装。密封阀体内部两条中心通道,一条连接气体快速检测阀门,用于到达地面后进行快速采气测试,另一条通道起到防堵心作用。密封阀体上设计有芯轴定位机构,用于芯轴与阀体错位密封后进行限位。芯轴与阀体连接处以及气体检测阀门侧壁均设有密封圈。钻具工作时,解吸阀门关闭。下放钻具时,芯轴上O形密封圈提供的摩擦阻力保证内管总成各组件相对位置不动;打捞内管时,提拉力不断增加,当提拉力超过O形密封圈产生的摩擦力时,芯轴与密封阀体之间差动并产生一定位移,限位机构发挥作用,限位弹簧弹力释放,钢珠卡在芯轴凹槽中,实现定位。随后,继续增加提拉力,上密封解吸机构各部件相对位置不变。钻具打捞至地面,连接地面解吸装置,开始解吸。

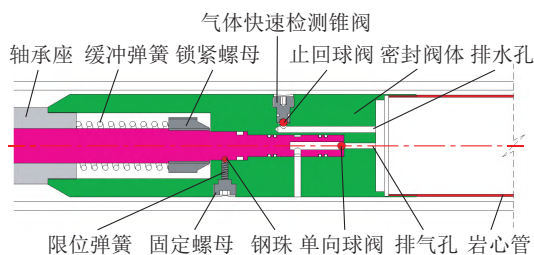


图5 密封解吸机构结构示意图
Fig.5 Schematic diagram of sealing and desorption mechanism

1.3.5 球阀机构

球阀机构是整套密闭保压取心钻具能否实现保压密封的关键,球阀机构的翻转可靠性尤为重要。本文设计了一种拨杆驱动球阀翻转机构,钻孔口径118 mm时可获取直径50 mm的岩心,见图6。

该结构包括:花键管、球体、传动杆、拨杆、压盖、密封圈、密封圈支座等零件,岩心管、花键管、内钻头依次通过螺纹连接,球体安装在花键管内部,传动杆穿过花键管通孔固定在工作球轴向顶部,能

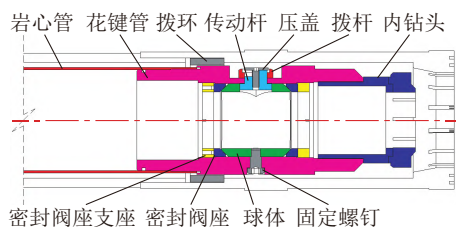


图6 拨杆球阀机构结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of lever ball valve mechanism

够带动球体轴向旋转,拨杆套设在传动杆外围,设有拨叉,拨杆与传动杆间隙处设有复位簧,拨杆拨叉一侧与传动杆上部缺口一侧接触,另一侧与复位簧接触,拨环内侧阵列有6个内台阶,任意两个内台阶之间距离等于拨环短边的直径,安装时,拨杆长边沿岩心管径向安装且复位簧位于左侧。下放钻具时,拨杆压缩复位簧通过拨环;上提钻具时,拨环与花键管差动46 mm,拨杆带动传动杆转动,进而带动球阀翻转90°。取心过程中如果岩心卡在球阀处,通过钻具巨大提拉力驱动球阀切断碎软煤心,从而提高球阀的翻转可靠性。

2 关键零部件设计计算

2.1 球阀密封性能计算

2.1.1 球阀密封力计算

球阀密封结构如图7所示,球阀的密封力是作用在阀座密封面上沿流体流动方向的合力,它包括流体压力在阀座上引起的作用力、阀座预紧力和阀座滑动摩擦力^[21-22]。

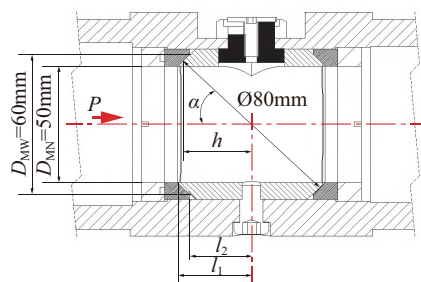


图7 球阀密封结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of ball valve sealing structure

$$Q = Q_J + Q_{YJ} - Q_F \quad (1)$$

式中: Q ——作用在阀座密封面上沿流体流动方向总的的作用力, N; Q_J ——介质作用力在阀座密封面上的轴向作用力, N; Q_{YJ} ——阀座轴向预紧力, N; Q_F ——阀座的轴向运动滑动摩擦力, N。

(1) 阀座密封面所承受的介质作用力 Q_J 计算

$$Q_J = PS_1 \quad (2)$$

$$S_1 = \pi(D_2^2 - D_1^2)/4 \quad (3)$$

式中: P ——设计密封压力, 取 10 MPa; S_1 ——介质作用于阀座的环状面积, mm; D_2 ——阀座支座环状空间外径, mm; D_1 ——阀座支座环状空间内径, mm。

(2) 阀座预紧力 Q_{YJ} 计算

$$Q_{YJ} = \pi q_{\min}(D_{MW}^2 - D_{MN}^2)/4 \quad (4)$$

式中: $q_{\min}$ ——预紧所必须的最小比压, $q_{\min} = 0.1P$, 且 ≥ 2 MPa, 取 4 MPa; D_{MW} ——阀座密封面的外径, 为 60 mm; D_{MN} ——阀座密封面的内径, 为 50 mm。

为简化计算, 忽略 Q_F , 代入式(1)~(4)得, $Q_J = 5372.10$ N; $Q_{YJ} = 3455.76$ N; $Q = 8827.88$ N。

2.1.2 球阀的密封比压计算

密封面上单位面积上的压力称为比压。关闭件保证密封性所必需的比压称作必须比压(q_b), 必须比压大小取决于密封面的宽度、材料及介质工作压力。由于密封材料的限制, 密封面间的压强不可能无限地加大, 其不能超过某一临界压强, 这一压强称作许用比压($[q]$)。密封面上的实际比压(q)必须介于必须比压和许用比压之间, 小于必须比压则无法保证密封, 大于许用比压则密封件容易磨损和破坏, 验算条件为 $q_b < q < [q]$ 。

(1) 必须比压计算

根据《球阀设计与选用》第二版第四章中提出的经验公式进行计算:

$$q_b = m(a + cP)/\sqrt{b} \quad (5)$$

式中: m ——与流体介质有关的系数, 常温水 $m=1$; 高温液体、气体 $m=1.4$, 取 $m=1.4$; a 、 c ——密封材料有关的系数, 取 $a=1.8$, $c=0.9$; b ——密封面在垂直接流流动方向上的投影宽度, mm, 本文根据所设计球阀尺寸确定密封面投影宽度为 5 mm。

带入数据得必须比压: $q_b = 6.76$ MPa。

(2) 设计比压计算

为保证球阀密封可靠, 在球体和阀座的接触表面上应有足够的比压, 根据比压定义:

$$q = N/S \quad (6)$$

式中: N ——球体于阀座密封面的法向力, N; S ——阀座与球体密封面的面积, mm²。

$$N = Q/\cos \alpha \quad (7)$$

$$\cos \alpha = h/R = (l_1 + l_2)/2R \quad (8)$$

$$l_1 = \sqrt{(4R^2 - D_{MN}^2)}/4 \quad (9)$$

$$l_2 = \sqrt{(4R^2 - D_{MW}^2)}/4 \quad (10)$$

式中: α ——阀座与球体密封处与通道中心的夹角; R ——球体的半径, mm; l_1 、 l_2 ——球体中心至密封面的距离, mm。

密封环带面积:

$$S = 2\pi R(l_1 - l_2) \quad (11)$$

整理得:

$$q = 4Q/[\pi(D_{MW}^2 - D_{MN}^2)] \quad (12)$$

代入数据得: $l_1 = 31.57$ mm; $l_2 = 26.57$ mm; $S = 1256.64$ mm²; $q = 10.22$ MPa。

(3) 许用比压计算

本文球阀密封阀座选用增强型聚四氟乙烯材料, 球阀所用材料为 316 不锈钢, 增强型聚四氟乙烯材料的许用应力为 30.2 MPa, 316 不锈钢材料的许用应力为 520 MPa, 许用应力取两者中较小值, 该材料许用应力为 30.2 MPa。

(4) 比压验算

由以上分析可知: 密封面上比压 $q = 10.22$ MPa, 必须比压 $q_b = 6.76$ MPa, 许用比压 $[q] = 30.2$ MPa, 符合验算条件 $q_b < q < [q]$, 密封设计合理。

2.2 传动杆强度计算

传动杆是整个球阀机构的重要受力部件。拨杆传递的转矩借助传动杆控制工作球体的旋转动作, 因此, 应对传动杆强度进行校核, 参考相关研究资料^[23-24]:

$$\tau_N = M/W < [\tau_N] \quad (13)$$

其中: τ_N ——传动杆所受扭转应力, MPa; M ——传动杆所受摩擦转矩, N·mm; W ——截面扭断系数, mm³; $[\tau_N]$ ——材料的许用扭转应力, MPa。

传动杆在工作过程中受力包括: 工作球体与阀座密封面间的摩擦转矩(M_1)、传动杆台肩与花键管上壁孔之间的摩擦转矩(M_2)、传动杆与花键管孔壁之间的摩擦转矩(M_3)。在此球阀结构设计中, 传动杆侧壁尽量光滑, 与 M_1 相比小的多, 因此 M_2 、 M_3 忽略不计, 仅计算 M_1 即可。

在介质力的作用下, 阀座作用于球体上的力为介质作用力和最小密封比压所需的作用力之和, 本文计算的最小密封比压所需的作用力(Q_{YJ})通过安装时阀座支座对阀座的预紧力表示, 由于阀座安装

时,进出口端均受到预紧力的作用,即:

$$Q_M = Q_J + 2Q_{YJ} \quad (14)$$

球体与阀座密封面的摩擦转矩 M_1 :

$$M_1 = Q_M \mu_Q r \quad (15)$$

式中: Q_M ——作用在阀座密封面上沿流体方向的合力,N; $Q_J = 5372.12$ N; $Q_{YJ} = 3455.76$ N; r ——摩擦半径,mm,如图8所示; μ_Q ——球体与阀座之间的摩擦系数,对于加强型聚四氟乙烯密封圈, $\mu_Q = 0.08 \sim 0.15$,取平均值 $\mu_Q = 0.115$ 。

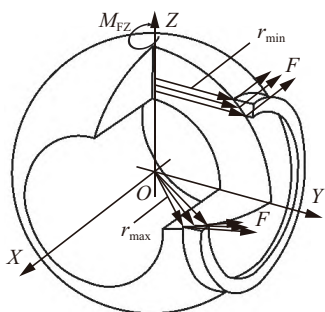


图8 球体与阀座密封圈之间的摩擦半径示意

Fig.8 Schematic diagram of friction radius between ball and valve seat seal ring

代入数据计算得, $Q_M = 12283.64$ N; $M_1 = 48791.85$ N·mm。

对于正方形断面,其抗扭截面系数:

$$W = b^3/4.8 \quad (16)$$

根据尺寸设计 $b = 20$ mm,代入数据计算, $\tau_N = M/W = 29.27$ MPa。对于316不锈钢,取许用应力 $\tau_N = \sigma_b/2 = 260$ MPa,该截面的扭转应力远小于材料的许用应力,传动杆的强度符合要求。

2.3 球阀机构强度计算

在介质力作用下,固定球阀机构所承受的全部力由传动杆传递。同时,在钻具提拉过程中,通过拨环与拨杆配合实现球阀的翻转关闭,这就要求拨杆结构必须能够承受全部的翻转扭矩。因此,本节模拟钻具打捞过程中,球阀机构翻转受力状态,对介质力条件下传动杆和拨杆的强度进行详细分析。

2.3.1 建立球阀机构受力分析模型

本节对运动状态下的球阀机构强度进行有限元分析。SolidWorks软件具有操作简单和直观的优势,能够方便高效地进行零件装配,同时该软件能够实现和ANSYS软件的无缝对接,通过SolidWorks软件建立球阀机构与拨环的接触模型

并导入到ANSYS软件进行有限元分析。

2.3.2 设定材料参数

密封阀座所用材料为增强型聚四氟乙烯,其余材料均采用316不锈钢。查阅相关资料,316不锈钢材料的泊松比为0.3,抗拉强度为520 MPa,屈服强度为205 MPa,弹性模量210 GPa。密封阀座所用增强型聚四氟乙烯材料抗拉强度32 MPa。根据前面所介绍的材料要求将新材料库导入到软件中,同时将材料的性能参数添加到新材料库中。

2.3.3 网格划分

有限元分析的收敛性、计算时间以及计算精度受网格质量的影响。本节用静力学分析方法分析球阀机构受力情况,为了兼顾计算效率和网格质量,应用局部加密及周边粗糙网格自动生成的方法,在球体传动杆以及拨杆局部进行局部网格加密,如图9所示。

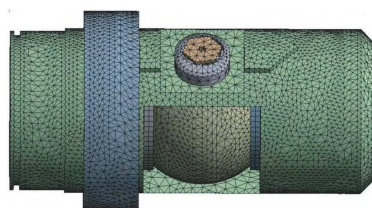


图9 网格划分结果

Fig.9 Meshing result

2.3.4 边界条件及荷载施加

本模型是为模拟钻具打捞过程中球阀机构拨杆与外管拨环配合时的受力情况,花键管、球体、传动杆、拨杆等为一体安装在岩心管上,随内管沿轴向上行,拨环固定在外管总成上静止不动。本模型对其进行简化,仅分析球阀机构与拨环的配合。因此给拨环施加固定约束,在拨杆与传动杆的轴向施加487.9 N·m的扭矩。约束添加情况如图10所示。

2.3.5 有限元求解

查看在此条件下球阀机构的应力分布,有限元

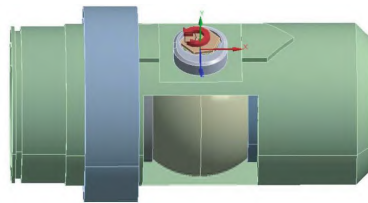


图10 扭矩施加条件

Fig.10 Torque application conditions

求解云图见图11,可以看出,拨杆与传动杆所受应力最大,为进一步了解局部零件所受应力大小,对拨杆和传动杆进行单独分析,如图12、图13所示。

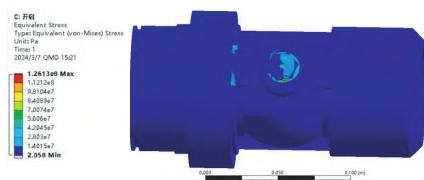


图11 球阀机构应力云图

Fig.11 Stress nephogram of ball valve mechanism

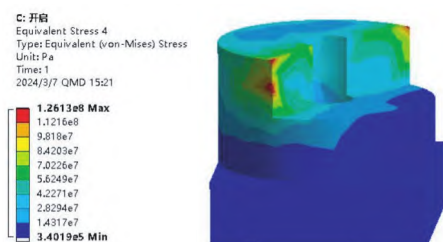


图12 传动杆应力云图

Fig.12 Stress nephogram of drive rod

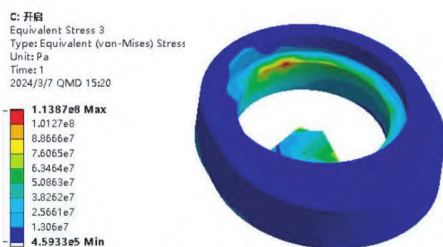


图13 拨杆应力云图

Fig.13 Stress nephogram of swing bar

单独对拨杆和传动杆有限元分析结果,最大应力分布在拨杆与传动杆接触面上,且主要分布在传动杆与拨杆接触部位的缺口两侧,最大应力约为126 MPa,远小于材料的屈服强度,结构设计可靠。

3 室内试验与优化改进

3.1 室内试验

碎软煤层密闭保压取心钻具内管总成和外管总成如图14所示,试验在中国地质大学(武汉)钻探实验室进行,利用水平提拉力驱动球阀翻转,观察球阀的翻转情况,验证球阀机构的翻转可靠性,以及上密封机构芯轴O形密封圈执行情况,之后方可进一步验证岩心保压仓的保压能力。



图14 碎软煤层密闭保压取心钻具内、外管总成

Fig.14 Inner and outer tube assembly of sealed pressure-holding coring tool

3.1.1 试验过程

- (1) 组装钻具后用叉车移动到指定位置。
- (2) 用定滑轮把竖直方向的提拉力改变为沿水平方向的力,并用打捞工具钩住拉矛,开始提拉。
- (3) 拆卸钻具,为了避免花键管凸台在外管内部摩擦以及经过座环时出现磕碰,先拆卸外管外钻头,检查球阀是否翻转到位。

3.1.2 试验结果

- (1) 试验结束后球阀机构未翻转。
- (2) 对球阀机构单独试验,如图15、图16所示,拨环通过拨杆等部件困难,且拨环内部台阶有磨损;用外力单独推动拨杆发现仍很难拨动其旋转,随后用打磨纸将拨杆表面及花键管平面磨光后再进行试验,拨杆可旋转,但在球阀机构整体进行试验时仍翻转困难。



图15 球阀机构未正常工作

Fig.15 Ball valve mechanism is not operating normally



图16 单独对拨杆试验示意

Fig.16 Schematic diagram of the separate lever test

(3)人工翻转球阀到位,与岩心管、密封解吸机构等密封件组装完毕,对岩心保压仓密封性能试验,密封效果良好,说明岩心保压仓功能可靠。

3.1.3 试验结果分析

通过大量的室内试验,对球阀机构不能正常工作的问题进行分析,原因如下:

(1)加工精度较为粗糙,导致拨轮与花键管平台摩擦较大。对球阀机构进行单独试验中,在不依靠拨环、不安装弹簧情况下,用手指水平逆向(与传动杆不接触一侧)推动拨杆,仍存在拨杆不旋转的现象。随后用打磨纸将拨杆表面及花键管平面磨光后进行试验,拨杆可旋转,但在球阀机构整体进行试验时仍翻转困难。

(2)拨环与拨杆为点接触,并且是斜边棱点,存在卡死的可能,导致拨轮没能旋转。在 SolidWorks 软件中进行分析,如图 17、图 18 所示。

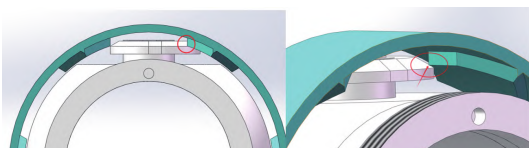


图 17 拨环与拨杆接触情况示意

Fig.17 Contact diagram of swing ring and lever



图 18 拨环与拨杆配合情况示意

Fig.18 Swing ring and lever matching diagram

3.2 优化改进

基于上述分析对球阀各执行零部件进行优化:

(1)对接触面的粗糙度进行仔细分析,抛光处理至粗糙度 $Ra0.1$ 。与加工厂仔细对接,避免加工误差及精度不足导致翻转困难。

(2)改进拨环和拨杆结构。拨杆内部设有台阶,将拨杆与上部压盖接触改为内台阶接触,同时将拨杆台阶倒角尺寸由 2 mm 改为 1 mm,有效增大了拨杆与拨环的接触面积,如图 19、图 20 所示。

对球阀机构各执行零部件改进后再次进行了试验,球阀能够顺利关闭且密封效果良好。

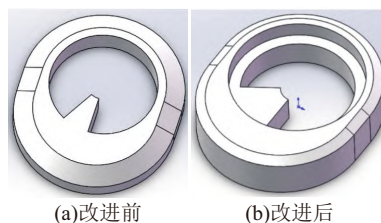


图 19 拨杆改进前后结构对比

Fig.19 Comparison of structure before and after improvement of lever



图 20 改进后拨环、拨杆实物图

Fig.20 After the improvement of the dial ring, dial rod physical pictures

4 结论

(1)开发的碎软煤层密闭保压取心钻具采用绳索打捞时的提拉力驱动岩心管上、下端密封机构的动作,工艺简单;两重管拨杆式球阀机构结构简单、密封效果好、相同钻孔口径中可获得尽可能大的岩心直径,在 118 mm 口径钻孔中岩心直径为 50 mm。

(2)碎软煤层密闭保压取心钻具的关键技术在于岩心管上、下密封结构的设计以及如何驱动密封机构工作。传统的液压密封或密闭液密封取心过程繁琐,本文将保压取心钻具常用的三重管简化为双重管,依靠绳索取心打捞时的提拉力使外管和内管差动驱动岩心保压仓上下端密封结构。

(3)室内试验表明,带动球阀翻转的拨杆和拨环的表面粗糙度及其尺寸的精确配合是决定球阀能否顺利翻转、实现密封的重要因素。通过抛光处理将粗糙度优化至 $Ra0.1$,并改变拨环、拨杆结构,实现球阀顺利关闭且密封效果良好。

参考文献(References):

- [1] 郑凯歌,孙四清,龙威成,等.地面钻井煤层气含量样品原位密闭取心装置及工艺研究[J].煤炭工程,2022,54(10):141-145.
ZHENG Kaige, SUN Siqing, LONG Weicheng, et al. In-situ sealed coring device and technology of CBM content sample in ground drilling[J]. Coal Engineering, 2022, 54(10):141-145.
- [2] 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 coal-

- bed gas content in ground well[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7):2523-2530.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 景兴鹏. 煤层气含量密闭取心测定装置及测试技术[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(4):603-609.
JING Xingpeng. Testing device of methane content sealed coring and measuring technology[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(4):603-609.
- [6] 韩泽龙, 李小洋, 赵明, 等. 保压取心钻具球阀工作动力学分析[J]. 钻探工程, 2024, 51(6):32-38.
HAN Zelong, LI Xiaoyang, ZHAO Ming, et al. Analysis of working dynamics of ball valve with pressure core sampler[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6):32-38.
- [7] 张丁亮. 煤矿井下煤层密闭取心装置[J]. 中国煤炭地质, 2015, 27(7):80-81, 87.
ZHANG Dingliang. Study on coal seam airtight coring facility in coalmines[J]. Coal Geology of China, 2015, 27(7):80-81, 87.
- [8] 孙四清, 张群, 龙威成, 等. 煤矿井下长钻孔煤层瓦斯含量精准测试技术及装置[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4):1-5.
SUN Siqing, ZHANG Qun, LONG Weicheng, et al. Accurate test technology and device for coal seam gas content in long boreholes in underground coal mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4):1-5.
- [9] 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.
- [10] 齐黎明, 陈学习, 程五一, 等. 新型煤层瓦斯含量准确测定方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1):111-115.
QI Liming, CHEN Xuexi, CHENG Wuyi, et al. Newly developed method for exact measurement of gas content[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, 27(1):111-115.
- [11] 中国矿业大学. 一种煤矿密封取样装置及其使用方法: CN201310062688.1[P]. 2023-02-28.
China University of Mining and Technology. A sealed sampling device for coal mines and its usage method: CN201310062688.1[P]. 2023-02-28.
- [12] 李红涛, 齐黎明, 陈学习. 密闭液封堵条件下的瓦斯解吸规律实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(3):18-21.
LI Hongtao, QI Liming, CHEN Xuexi. Experiment research on the gas desorption rule of sealing fluid enveloping coal core[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(3):18-21.
- [13] 齐黎明. 卸压密闭煤层瓦斯含量测定技术研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2011.
QI Liming. Research on the measuring gas content technology of stress-releasing and sealed coal core[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2011.
- [14] 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.
- [15] Ferrannini E. The theoretical bases of indirect calorimetry: a review[J]. Metabolism, 1988, 37(3):287-301.
- [16] Szlázak N, Obracaj D, Korzec M. Estimation of gas loss in methodology for determining methane content of coal seams[J]. Energies, 2021, 14(4):982.
- [17] 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.
- [18] 俱养社, 马峰良, 华立. 钻孔瓦斯密闭保压取心器研制及应用[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(4):79-83.
JU Yangshe, MA Fengliang, HUA Li. Development and application of borehole gas airtight pressurized corer[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(4):79-83.
- [19] Diamond W P, Schatzel S J. Measuring the gas content of coal: a review [J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35(1/4):311-331.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 刘贵康, 李聪, 游镇西, 等. 煤矿井下原位磁控多向保压取心原理与技术[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(8):13-20.
LIU Guikang, LI Cong, YOU Zhenxi, et al. Principle and technology of in-situ magnetically controlled multidirectional pressure-preserved coring in the coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(8):13-20.
- [23] 黄伟, 陈领, 李佳南, 等. 煤矿井下水平保压取心保压触发装置研制与试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(8):39-46.
HUANG Wei, CHEN Ling, LI Jianan, et al. R&D and experimental research of pressure-preserved triggering device for horizontal pressure-preserved coring in coal mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(8):39-46.
- [24] 卢春华, 张涛, 徐俊, 等. 海域天然气水合物保压取心钻具的研制与试验[J]. 钻探工程, 2023, 50(6):18-26.
LU Chunhua, ZHANG Tao, XU Jun, et al. Development and experiment of pressure core sampler for Marine natural gas hydrates[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6):18-26.

(编辑 王跃伟)