

# 多点位保压取样器结构与强度分析

唐文波, 彭佑多\*, 何术东

(湖南科技大学 海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 为了便于获得宽海域多点位的沉积物保压样品, 提高潜水器下潜的工作效能, 开发一种可搭载在潜水器和遥控无人潜水器 (Remote Operated Vehicle, ROV) 上的万米级深海底沉积物多点位保压取样器。在材料选择、设计方案、结构布局 and 保压原理等方面对该多点位保压取样器进行介绍, 结合安全系数分别运用弹性失效理论和有限元仿真对其主要保压元件进行分析, 理论计算与有限元分析结果基本一致, 验证了多点位保压取样器强度设计的合理性; 同时对研制的保压元件进行试验验证, 试验结果证明多点位保压取样器的结构强度和密封性均能满足全海深保压技术指标要求, 证实锁紧式密封结构的可行性。

**关键词:** 沉积物; 保压取样器; 多点位; 强度分析

中图分类号: P742

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)03-0001-10

## Structure Design and Strength Analysis of Multi-point Pressure-holding Sampler

TANG Wenbo, PENG Youduo, HE Shudong

(National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** To facilitate the acquisition of pressure-maintained sediment samples from multiple points in a wide sea area and improve the working efficiency of submersibles, a 10,000-meter-level deep-sea sediment multi-point pressure-holding sampler that can be mounted on submersibles and Remote Operated Vehicles (ROV) has been developed. This paper introduces the multi-point pressure-holding sampler in terms of material selection, design plan, structural layout, and pressure-maintaining principles. It analyzes the main pressure-holding components using elastic failure theory and finite element simulation combined with safety coefficients. The theoretical calculations are basically consistent with the finite element analysis results, verifying the rationality of the strength design of the multi-point pressure-holding sampler. At the same time, the developed pressure-holding components have been tested and verified. The test results prove that the structural strength and sealing performance of the multi-point pressure-holding sampler meet the technical requirements for full-ocean-depth pressure maintenance, confirming the feasibility of the locking seal structure.

**Keywords:** sediment; pressure-holding sampler; multi-point; strength analysis

在面积约为 2.52 亿 km<sup>2</sup> 的国际海底区域中蕴藏着极为丰富的多金属结核、钴结壳、热液硫化物、海洋生物、石油、天然气、天然气水合物、黏土矿物以及海底沉积物等具有重大经济价值的资源<sup>[1]</sup>。深海沉积物记录着深海环境的变化过程, 已经发现深海沉积物在某些情况下, 记录了地球磁场的逆转, 这些逆转可以

收稿日期: 2022-02-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51779092); 国家重点研发计划资助项目 (2016YFC0300502); 湖南创新型省份建设专项经费资助项目 (2020GK1021; 2019SK2271; 2019GK1010)

\* 通信作者, E-mail: ydpeng1964@163.com

从地层学上加以利用<sup>[2-5]</sup>.与陆地上的水环境不同,深海沉积物是在高压、缺氧、低温和高盐度等独特环境共同影响下形成的,深海海床中蕴含大量嗜压微生物、微化石以及古海洋生物遗骸,对这些资源的探索研究可了解海洋生物多样性、海洋生态系统演化提供多方位的见解,并为深海古基因组学的发展开辟新视野<sup>[6-8]</sup>.同时,通过对深海沉积物的定量通量的长期研究,可得出它们的埋葬率,这是评估生物地球化学循环的关键,对预测未来海洋变化至关重要<sup>[9-11]</sup>.此外,大量研究表明,深海沉积物含有外星尘埃物质,可为陨石的来源、小行星撞击说提供有力证据<sup>[12-13]</sup>;同样,还可通过深海沉积物的成分来寻找或确认海底能源的信息.因此,开展万米级深海底沉积物多点位保压取样器的研究在海底矿产资源勘探和深海海洋工程等方面都有着重要的研究前景与应用价值<sup>[14-17]</sup>.

人类自1872年首次对海底进行取样以来,深海沉积物取样方法与技术装备得到了快速发展,相继开发了多种用于海底沉积物样品采集的技术方法和装备<sup>[18-24]</sup>,如压入式取样器、射入式取样器、箱式取样器、拖网取样器、多管取样器、抓斗取样器(包括可视抓斗)、重力柱状取样器以及重力活塞式取样器等<sup>[25]</sup>.但这些传统的取样方法不仅依赖水面母船上的吊索进行作业,对母船动力定位要求较高,受洋流影响较大,而且无法长时间保持所取样品的压力,易引起样品中气相溶解组分散失、变价离子氧化态改变以及有机组分分解等,据此获得的相关数据和研究结论也就难以准确地反映沉积物的原始状态与成分.中国载人潜水器“奋斗者”号在西太平洋马里亚纳海沟成功下潜并突破万米<sup>[26]</sup>,开发与之配套的万米级深海底沉积物保压取样技术与装备可提升我国载人潜水器深海作业能力,该类尖端技术装备对新世纪海洋强国战略和海洋强国建设具有重要意义.

目前,国内外在研的万米级深海底沉积物保压取样器都是单体结构,即一个取样器只包含一个保压筒,这种结构决定了取样器所搭载的潜水器下潜一次只能实现一次有效取样,而在万米级深海作业环境中,潜水器下潜与上升时间长,作业工况环境复杂,不可抗力因素和不可控因素众多,这就大大增加有效取样的风险与成本.若需要取得多量或多点区域的深海沉积物样品,则需要潜水器多次下潜,或潜水器一次同时携带多个单体取样器,但前者浪费时间且取样效率十分低下,后者将导致潜水器超出规定携带的作业工具重量.

为便于获得宽海域多个点位的沉积物保压样品,提高潜水器下潜一次的工作效能,开发一种万米级深海底沉积物多点位保压取样器,可搭载在载人潜水器和遥控无人潜水器(Remote Operated Vehicle, ROV)上,与机械手配合操作实现在万米级深海底收集不同区域的沉积物样品.

## 1 结构设计

多点位保压取样器采用模块化方案,每个模块都包含2个独立的取样单元.独立取样单元的设计,可以有效降低取样作业的容错率,任何一个取样单元发生故障不会导致整个取样系统失效,提高了取样系统的可靠性.取样单元主要由取样装置、清洁装置、保压装置、密封装置以及压力补偿装置这5个部分组成.可将多个模块自由搭配使用(模块也可单独使用)以满足多点位拓展需求,获取宽海域多点位沉积物样品.

多点位保压取样器如图1所示,由2个模块组成,包含4个取样单元,取样单元如图2所示.多点位保压取样器采用蓄能保压一体化结构设计,可以使采集的沉积物样品压力保持在原位压力附近.蓄能器置于保压筒的下部,能有效减小取样器的重量,同时也缩小了取样器的体积,优化了取样器的结构布局,降低了组装难度.紧凑的结构设计和灵活的组装方式为取样器的多点位布局提供了有利条件.为了在高压环境下安全进行取样作业,所有装置都安装在一个特定的框架上.取样器总体为长方体布局,长815 mm,宽475 mm,高756 mm,重约为127 kg,可搭载于载人潜水器上在万米级深海底进行取样作业.

取样器的主体由4组蓄能保压筒组成,每组蓄能保压筒的腔体通过外部的超高压针阀连通,这种外部连通的优势在于避免保压筒与蓄能器之间因沉积物颗粒的漂浮造成堵塞,影响保压效果;而且,在对取样器样品进行转移时,可通过关闭超高压针阀减少保压筒与蓄能器之间的样品相互流动,降低保压筒内物质动态变化.保压腔底部设有与保压室连通的转移阀,可通过取样管上的转移集成对保压筒内的沉积物样品进行保压转移和取样研究.

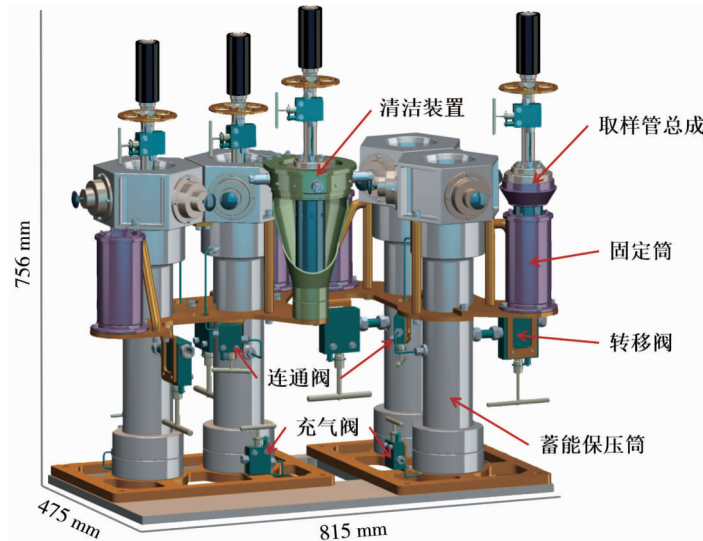


图1 多点位保压取样器三维模型

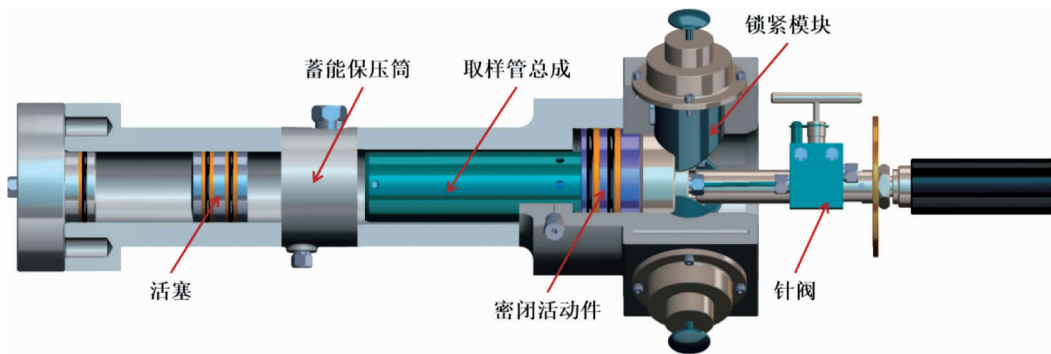


图2 取样单元模型

保压筒上端开口,采用锁紧式密封机构,锁紧式密封机构是在锁紧模块和密封模块配合作用下完成密封任务.锁紧模块主要由拉杆、外罩、锁紧弹簧和止推杆组成,它的3个锁紧结构呈周向均布,当取样管取样完毕,机械手夹持取样管总成插入保压筒的过程中,取样管与止推杆接触,止推杆压缩锁紧弹簧沿拉杆向外移动直到取样管总成的气密件上锥面完全进入,止推杆在锁紧弹簧力的作用下复位,将取样管锁死在保压筒内;取样管总成的气密件下锥面压缩密闭活动件弹簧,整体向下滑动.当锁紧机构锁紧动作完毕,密闭活动件在弹簧力的作用下,与取样管总成的气密件锥面贴合,提供初始密封力,保压筒完成密封.为了确保密封效果,采用如图3所示的密封方式,其中挡圈(1,2)和O型密封圈(1,2)组合密封在密闭活动件与保压筒筒体的接触部分,O型密封圈3设置在密闭活动件与气密件的锥面密封处,建立密封后,可确保取样管总成仅承载轴向载荷且与保压装置密封锥面自主贴合.

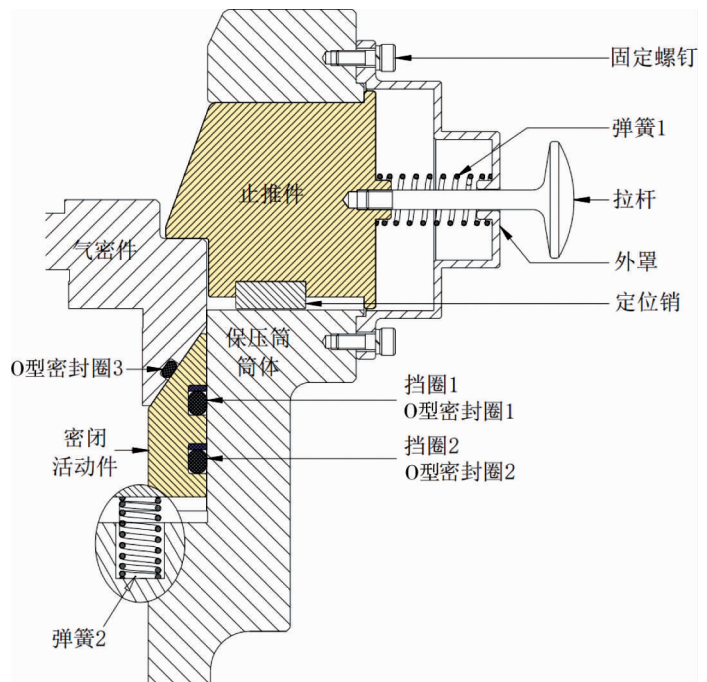


图3 保压筒锁紧式密封机构

建立密封后,可确保取样管总成仅承载轴向载荷且与保压装置密封锥面自主贴合.

## 2 相关参数计算与校核

### 2.1 蓄能保压筒基本参数计算

取样器的任务是在指定地点采集沉积物样品,在保压转移和取样研究之前保持原位压力.在整个过程中,取样器会经历环境压力(0~115 MPa)的变化,并在工作过程中承受 115 MPa 的内外压力差,属于超高压容器;同时考虑到深海作业环境和潜水器工具篮的载重,取样器的材料必须具有优良的耐蚀性、高的比强度以及较小的密度,因此,蓄能保压筒作为该取样器的主体,选取的材料为高强度钛合金 TC4.为保证取样器的强度要求,需先确定取样器结构基本参数.

根据项目要求,多点位取样器的性能指标如表 1 所示.

表 1 多点位取样器性能指标

指标	完成时指标值/状态
最大作业水深	11 000 m
取样点位数	下潜一次可取样品点位数 $\geq 4$
样品容积	单个可取样品容积 $\geq 100$ mL
取样深度	$\geq 100$ mm
保压率	$\geq 80\%$
取样器水中重量	$\leq 200$ kg

为确保保压容器的工作强度,根据《压力容器手册》<sup>[27]</sup>,采用爆破失效准则对蓄能保压筒进行壁厚计算:

$$\delta_b = \frac{D_i}{2} \left[ \exp \frac{\sqrt{3} n_b P_1}{2 \sigma_s (2 - \sigma_s / \sigma_b)} - 1 \right] + C. \quad (1)$$

式中: $\delta_b$ 为保压筒壁厚; $D_i$ 为保压筒内径; $P_1$ 为保压筒设计压力; $n_b$ 为设计安全系数; $\sigma_s$ 为材料的屈服强度; $\sigma_b$ 为材料的抗拉强度; $C$ 为壁厚附加量(包括保压筒外径公差余量和腐蚀余量).

本文中取样器工作压力为 115 MPa,任务书规定设计压力为工作压力的 1.25 倍,因此设计压力  $P_1$  为 144 MPa,设计保压筒内径  $D_i$  为 53 mm.按照爆破失效准则,选取安全系数  $n_b$  为 2.5.根据壁厚公式和指标要求可计算出蓄能保压筒的基本参数,如表 2 所示.

表 2 蓄能保压筒基本参数

参数	符号	数值	参数	符号	数值
113 材料	Ti-6Al-4V		保压筒腔外径/mm	$D_0$	85
TC4 抗拉强度/MPa	$\sigma_b$	980	保压筒腔内径/mm	$D_i$	53
TC4 屈服强度/MPa	$\sigma_s$	800	保压筒腔有效长度/mm	$L$	160
筒体工作压力/MPa	$P$	0~115	蓄能器腔外径/mm	$D_x$	85
筒体设计压力/MPa	$P_1$	144	蓄能器腔内径/mm	$D_{xi}$	50
筒体设计安全系数	$n_b$	2.5	蓄能器腔有效长度/mm	$L_x$	150

### 2.2 蓄能保压筒结构应力计算

当多点位保压取样器在海底取样作业完成,从海底提升至海面的过程中,由于海水的压力逐渐减小,蓄能保压筒内外压力差逐渐增大,蓄能保压筒在工作过程中产生三向应力,为确保蓄能保压筒满足设计要求,引用弹性失效的强度理论进行理论<sup>[28]</sup>计算与校核.

周向应力  $\sigma_t$ :

$$\sigma_t = \frac{P_i}{K^2 - 1} \left( 1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right); \quad (2)$$

轴向应力  $\sigma_z$ :

$$\sigma_z = \frac{P_i}{K^2 - 1}; \quad (3)$$

径向应力  $\sigma_r$ :

$$\sigma_r = \frac{P_i}{K^2 - 1} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right); \quad (4)$$

最大剪应力理论值(第三强度理论)  $\sigma_{eq1}$ :

$$\sigma_{eq1} = \frac{2P_i K^2}{K^2 - 1} \leq [\sigma]; \quad (5)$$

最大应变能理论值(第四强度理论)  $\sigma_{eq2}$ :

$$\sigma_{eq2} = \frac{\sqrt{3} P_i K^2}{K^2 - 1} \leq [\sigma]. \quad (6)$$

式中:  $r$  为筒壁单元体任意处半径;  $r_0$  为外壁半径;  $P_i$  为筒壁内部压力;  $K$  为外径与内径之比, 保压筒的  $K$  取 1.6;  $[\sigma]$  为材料的许用应力, 保压筒的  $[\sigma] = \sigma_b/n_b = 392$  MPa.

计算结果如表 3 所示, 在工作压力  $P$  为 115 MPa 下, 计算应力均在许用应力范围内, 设计的保压筒结构可以满足强度要求.

表 3 蓄能保压筒结构应力计算结果

应力	筒体内壁( $r=r_i$ )	筒体外壁( $r=r_o$ )
周向应力 $\sigma_t$	261.30	146.30
轴向应力 $\sigma_z$	73.15	73.15
径向应力 $\sigma_r$	-115.00	0
最大剪应力理论值 $\sigma_{eq1}$		376.30
最大应变能理论值 $\sigma_{eq2}$		325.89

为多方位验证此保压筒的结构设计安全性, 按照爆破失效准则, 根据 Faupel 爆破压力公式<sup>[28]</sup>可计算出此保压筒的极限承载力  $P_B$ :

$$P_B = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(2 - \frac{\sigma_s}{\sigma_b}\right) \ln K. \quad (7)$$

将数据代入式(7)计算得极限承载力约为 516.66 MPa, 根据式(8)可推算保压筒的爆破安全系数  $n_b^t$ <sup>[28]</sup>.

$$n_b^t = \frac{P_B}{P_t}. \quad (8)$$

爆破安全系数越大说明保压筒的内压承载能力越强, 发生爆破时的压力越大, 保压筒的结构设计安全性也越高. 由式(8)计算保压筒的爆破安全系数约为 3.6, 大于设计的安全系数 2.5, 进一步证明保压筒的结构设计安全性高.

以上是基于保压筒腔参数计算分析保压筒结构的安全性. 蓄能器腔体结构与保压筒腔体结构类似, 据蓄能保压筒基本参数可计算出蓄能器腔径比为 1.7, 大于保压筒的腔径比 1.6, 说明在同等内外压力差下, 蓄能器腔比保压筒腔的结构设计更能满足强度要求.

### 2.3 蓄能保压筒端面密封结构应力校核

由于蓄能保压筒两端开口, 其端面密封也是保压功能非常关键的一环. 为了实现安全可靠的密封效果, 保压筒腔上端采用锁紧式密封机构, 蓄能器腔下端采用法兰端盖密封.

#### 2.3.1 止推杆强度校核

阀芯整体在保压筒内压工况下与止推件紧密结合, 止推件承受阀芯整体的较大的剪切力. 止推件受力分析如图 4 所示.

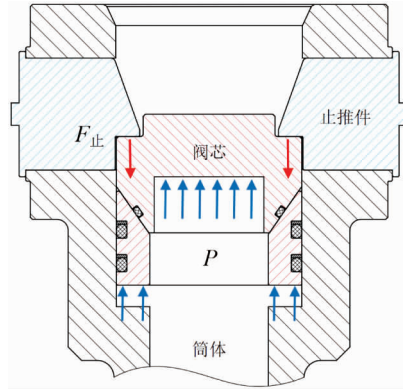


图4 止推件受力分析

为验证止推件设计的合理性,需先求得在工作压力  $P$  为 115 MPa 下,单个止推杆底面受到的压力  $F$ ,其压力公式为<sup>[29]</sup>

$$F = \frac{1}{3}PS. \quad (9)$$

式中: $S$  为阀芯截面积.

浮动阀芯外径为 83 mm,由式(9)计算单个止推杆底面受到的压力  $F$  为  $2.07 \times 10^5$  N.为防止止推杆因受力过大而变形,现对止推杆进行强度校核.

止推杆受到的剪切应力  $\sigma_{ca}$  应不大于材料的许用应力  $[\sigma]$ ,即

$$\sigma_{ca} = \frac{F}{A} \leq [\sigma]. \quad (10)$$

单个止推杆与气密件的接触面积  $A$  为  $585.68 \text{ mm}^2$ ,则由式(10)可计算出止推杆的剪切应力  $\sigma_{ca}$  为 353.44 MPa,小于材料许用应力  $[\sigma]$ ,满足设计要求.

### 2.3.2 法兰端盖螺栓强度校核

本文设计的蓄能器下端由法兰端盖密封,如图5所示,当蓄能器内外压力差为 115 MPa 时,根据压力公式得蓄能器与法兰盖之间的螺栓所承受的总拉力为  $2.258 \times 10^5$  N.

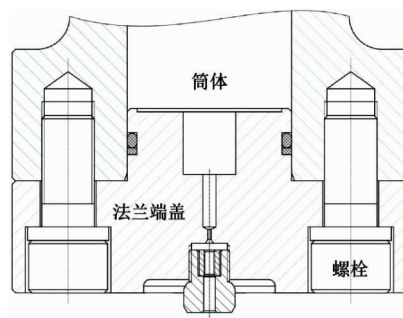


图5 法兰端盖与筒体连接模型

蓄能器与法兰盖之间由 8 个 M16×38 的 10.9 级高强度螺栓连接,螺栓的公称屈服强度  $\sigma_{0.2} = 900$  MPa,许用应力  $[\sigma] = 360$  MPa,由式(9)和式(10)计算出单个 M16 螺栓所受的轴向应力为 189.43 MPa.证明法兰端盖螺栓强度满足设计需求.

## 3 保压元件有限元分析

为确保设计的安全性和合理性,采用 Ansys/Workbench 软件对多点位保压取样器保压元件进行有限元分析.首先对保压元件进行三维建模,其次将模型导入 Ansys/Workbench 软件并进行网格划分和应力分析,最后通过应力评估,分析保压元件强度设计的可靠性.

### 3.1 有限元模型

为了便于仿真分析,首先对保压元件模型进行简化,保压元件有限元模型由 3 338 358 个节点和 114 852个单元组成,如图 6 所示.考虑到本文设计的密封式锁紧机构呈三面周向分布,为提高分析的精确性并避免自动生成网格的不均匀性,采用分区网格划分.该模型主要由圆柱、圆环以及少量不规则结构构成,针对规则的圆环和圆柱形端面构件采用六面体网格划分,不规则结构采用四面体网格划分,得到每个零件的高质量网格并进行组合装配,形成高质量的取样器三维网格模型.钛合金界面接触设置为 Frictional,摩擦系数取 0.12.为防止筒体发生刚性位移,在取样器底面施加固定边界条件.115 MPa 的压力施加于筒体的内表面.最后,利用 Ansys/Workbench 软件对建立的模型进行有限元分析.

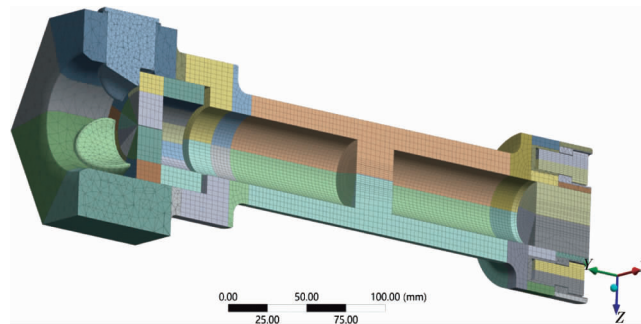


图 6 保压元件网格划分

### 3.2 仿真结果

为确保取样器结构安全,对保压元件进行分析,图 7 为保压元件的等效应力图.从图 7 可观察到,在保压腔中压力作用下,应力集中主要出现在气密件与止推件的接触处,应力最大值为 678.53 MPa,出现在气密件上.此外,止推件阶梯处的应力也较大,等效应力达 471.15 MPa,该值未超过材料的屈服极限 800 MPa,但超过了许用应力 392 MPa.虽然这并不会影响取样器的使用,但在后续工作中,可以优化气密件和止推件阶梯贴合处的倒角边长度,并重新设计圆角,可减少此处的应力集中.

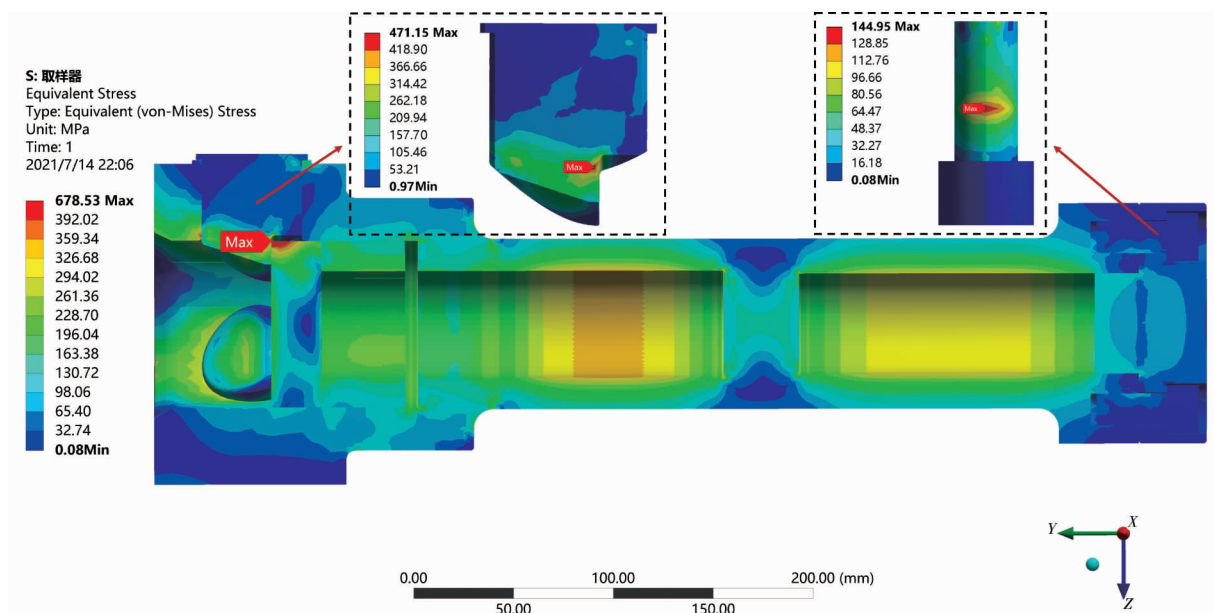


图 7 保压元件等效应力

蓄能保压筒作为取样器的主体,其强度分析是本设计实现保压功能的基础.

图 8 为蓄能保压筒的应力云图.如图 8a 和图 8b 所示,应力峰值出现在保压筒腔体内中部,等效应力与应力强度分别为 335.82 MPa 和 381.69 MPa;图 8c 中,筒体受内压向外膨胀,在圆周方向上产生拉伸,同时筒体内壁受到径向压缩,周向应力和径向应力分别为 267.90 MPa 和 -113.77 MPa;图 8d 中,筒体受内部

高压膨胀,轴向应力由中部向两端扩张,最大轴向应力出现在筒体端部,为 73.72 MPa.

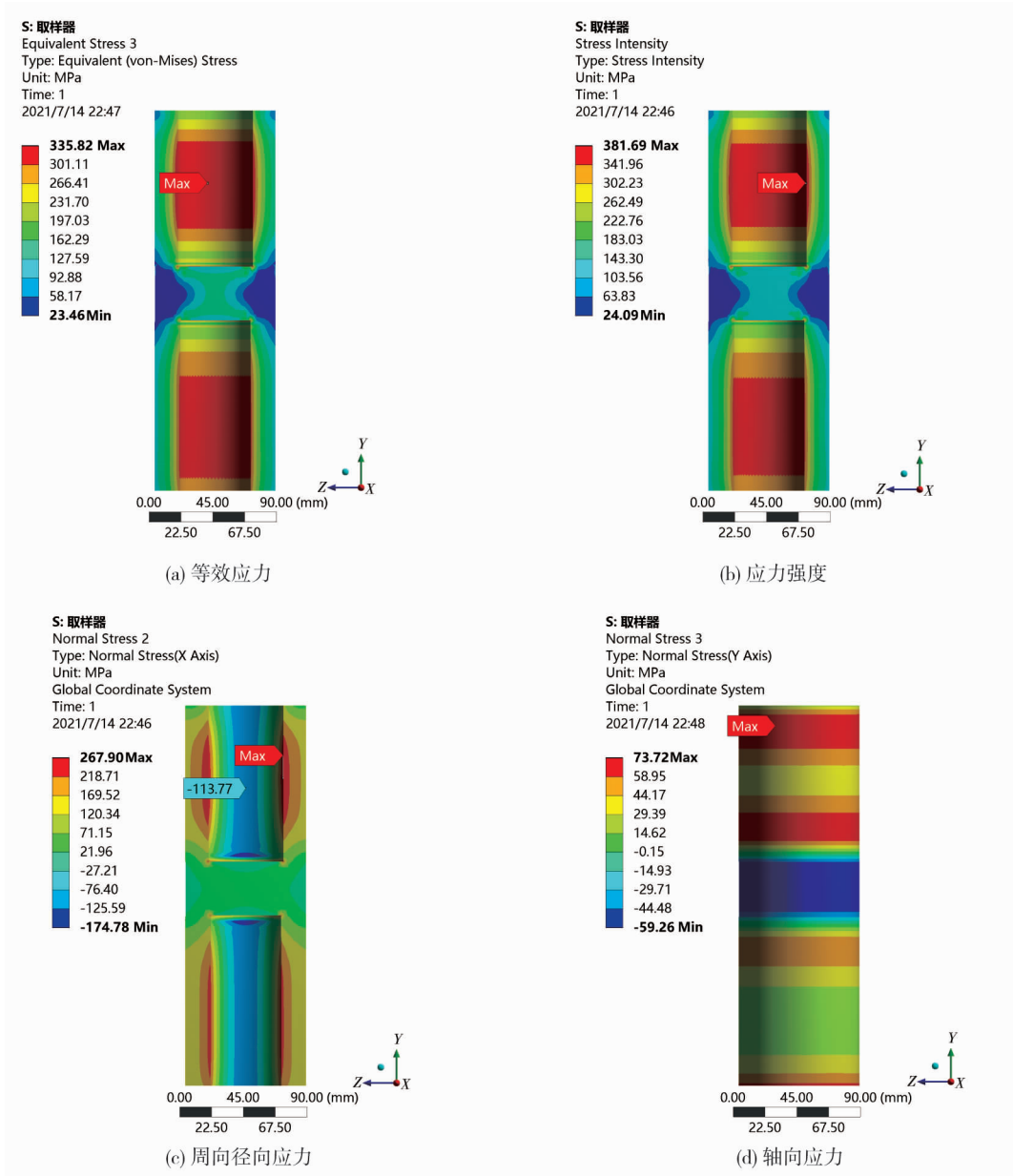


图 8 蓄能保压筒应力云图

### 3.3 计算数据对比与讨论

为了验证计算的准确性,将蓄能保压筒结构强度应力的理论计算值与有限元结果进行对比,有限元分析结果减去理论计算值的差值除以理论计算值得到偏差率,比较结果如表 4 所示.最大剪应力理论(第三强度理论)的有限元分析结果是 381.69 MPa,为最大应力值;最大应变能理论(第四强度理论)的偏差率是 3.05%,为最大偏差率,但筒体应力理论计算值与有限元分析结果均小于材料的许用应力 392 MPa,满足强度控制标准要求.说明多点位取样器的强度设计是合理的.

表 4 理论计算值与有限元结果数据比较

计算方法	内壁应力/MPa			外壁应力/MPa			最大剪应力 理论值/MPa	最大应变能 理论值/MPa
	周向	轴向	径向	周向	轴向	径向		
理论计算	261.30	73.15	-115.00	146.30	73.15	0	376.30	325.88
有限元分析	267.90	73.72	-113.77	150.59	73.72	0	381.69	335.82
差值	6.60	0.57	1.23	4.29	0.57	0	5.39	9.94
偏差率/%	2.52	0.78	1.07	2.93	0.78	0	1.43	3.05



## 4 试验

理论计算与有限元分析表明,本文设计的多点位保压取样器在理论上是安全合理的,为了验证该取样器结构强度的可靠性,对其进行内压试验,内压试验压力为  $P_T = \eta P = 127 \text{ MPa}$ ,式中  $\eta$  为内压试验系数,试验中取  $\eta$  为 1.10.

多点位保压取样器结构强度可靠性的试验装置如图 9a 所示.试验时,首先将多点位保压取样器内压快速增压至 90 MPa,然后慢慢逐渐增压至 105,115,127 MPa,内压为 90,105,115 MPa 时观察 60 min,内压为 127 MPa 时观察 180 min,试验压力数据如图 9b 所示.在每个压力阶段的测试过程中,可以测得筒体内的压力随时间的增加会有一些下降,但在 45 min 后基本保持不变,这应为加压过程中温度升高导致压力发生了变化.试验结果表明多点位保压取样器的强度满足要求,同时也证实了锁紧式密封结构设计是可行的.

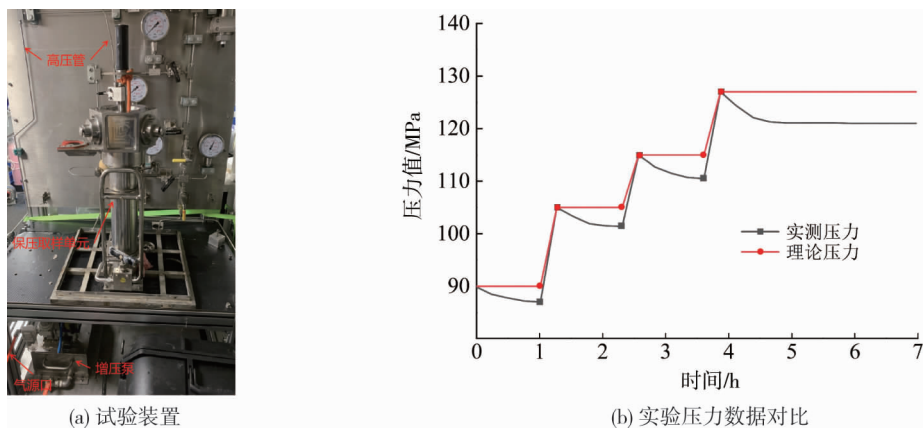


图 9 多点位保压取样器内压试验及测试结果

## 5 结论

1) 提出的蓄能保压一体式模块化结构设计,能有效降低多点位保压取样器的重量和体积.独立取样单元的设计可以有效降低取样作业的容错率,更便于宽海域多点位沉积物取样,可满足多点位拓展需求.

2) 多点位保压取样器的蓄能保压筒结构的弹性失效理论值与有限元分析结果均小于材料的许用应力,两者偏差率均小于 3.04%;同时蓄能保压筒的结构强度校验结果也表明万米级多点位保压取样器的结构强度满足技术要求.

3) 锁紧式密封机构以及单筒试验样机的密封性能试验结果验证了锁紧式密封机构的保压密封性能和结构强度均满足设计技术要求.

### 参考文献:

- [1] 秦华伟.海底表层样品低扰动取样原理及保真技术研究[D].杭州:浙江大学,2005.
- [2] HARRISON C G A, FUNNELL B M. Relationship of palaeomagnetic reversals and micropalaeontology in two late Cenozoic cores from the Pacific Ocean[J]. Nature, 1964, 204:566.
- [3] HARRISON C G A. The paleomagnetic record from deep-sea sediment cores[J]. Earth-Science Reviews, 1974, 10(1):1-36.
- [4] HARRISON C G A. The paleomagnetism of deep sea sediments[J]. Journal of Geophysical Research, 1966, 71(12):3033-3043.
- [5] 王喆.海洋地球磁场矢量测量系统关键技术研究[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2020.
- [6] ZHOU M X, DONG B B, SHAO Z Z. Complete genome sequence of Marinobacter sp. LQ44, a haloalkaliphilic phenol-degrading bacterium isolated from a deep-sea hydrothermal vent[J]. Marine Genomics, 2020, 50:100697.

- [7] 霍颖异. 近海细菌多相分类和基因组研究以及深海沉积物宏基因组分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [8] 徐辉, 赵晶, 曾润颖. 深海沉积物宏基因组文库中产蛋白酶克隆 CAPRO2 的筛选及酶学性质分析[J]. 台湾海峡, 2011, 30(4): 522-527.
- [9] THOMPSON C, MAYOR D, FONES G, et al. Across the sediment-water interface. Biogeochemical cycling in coastal and shelf seas[J]. Continental Shelf Research, 2019, 185:1-2.
- [10] SANTIAGO RAMOS D P, MORGAN L E, LLOYD N S, et al. Reverse weathering in marine sediments and the geochemical cycle of potassium in seawater: insights from the K isotopic composition ( $^{41}\text{K}/^{39}\text{K}$ ) of deep-sea pore-fluids[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 236:99-120.
- [11] 瞿瑗汝, 吕逸文, 刘盛邀. 海洋沉积物的锌同位素地球化学及其应用[J]. 地球科学, 2021, 46(11): 4097-4106.
- [12] HUNTER W, PARKIN D W. Cosmic dust in recent deep-sea sediments [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1960, 255(1282): 382-397.
- [13] VOCKENHUBER C, FELDSTEIN C, PAUL M, et al. Search for live  $^{182}\text{Hf}$  in deep-sea sediments[J]. New Astronomy Reviews, 2004, 48(1/2/3/4): 161-164.
- [14] SHARMA R. Deep-sea mining: economic, technical, technological, and environmental considerations for sustainable development[J]. Marine Technology Society Journal, 2011, 45(5): 28-41.
- [15] 高峰, 王辉, 王凡, 等. 国际海洋科学技术未来战略部署[J]. 世界科技研究与发展, 2018, 40(2): 113-125.
- [16] 陈鹰. 海洋技术定义及其发展研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 1-7.
- [17] 刘德顺, 金永平, 万步炎, 等. 深海矿产资源岩芯探测取样技术与装备发展历程与趋势[J]. 中国机械工程, 2014, 25(23): 3255-3265.
- [18] TANG G Y, WANG J J. A comparative study of energy performance of hydrostatic seafloor sediment samplers and a new high-efficiency sampler[J]. Applied Ocean Research, 2019, 83:1-8.
- [19] CHEN J W, FAN W, BINGHAM B, et al. A long gravity-piston corer developed for seafloor gas hydrate coring utilizing an *in situ* pressure-retained method[J]. Energies, 2013, 6(7): 3353-3372.
- [20] KUBO Y, MIZUGUCHI Y, INAGAKI F, et al. A new hybrid pressure-coring system for the drilling vessel Chikyu [J]. Scientific Drilling, 2014, 17: 37-43.
- [21] WU S J, SUN H, YANG C J, et al. Development of a gas-tight serial sampler for seawater and hydrothermal fluids[C]//2012 Oceans-Yeosu. IEEE, 2012: 1-5.
- [22] SHILLITO B, HAMEL G, DUCHI C, et al. Live capture of megafauna from 2300 m depth, using a newly designed Pressurized Recovery Device[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2008, 55(7): 881-889.
- [23] CHEN J W, GE H, FU M G. Structure modify of high-pressure chamber in pressure-retaining sampler for deep-sea sediment [J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series C, 2017, 98(5): 619-624.
- [24] KRISTOFFERSEN Y, LIEN E, FESTERVOLL K, et al. The hydrostatic corer Selcore: a tool for sediment sampling and geophysical site characterization[J]. Marine Geology, 2006, 229(1/2): 101-112.
- [25] JIN Y P, WAN B Y, LIU D S, et al. Dynamic analysis of launch & recovery system of seafloor drill under irregular waves [J]. Ocean Engineering, 2016, 117: 321-331.
- [26] 崔爽, 陈瑜. “奋斗者”号全海深载人潜水器项目通过综合绩效评价[J]. 科技传播, 2021, 13(14): 8.
- [27] 张康达, 洪起超. 压力容器手册[M]. 修订本. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2000.
- [28] 邵国华, 魏兆灿. 超高压容器[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [29] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.