

基于试验测试的超重力离心模拟环境下加载缸 稳压方案研究

邱冰静^{1*} 贾慕华¹ 励音骐¹ 吉刘斌²

1. 浙江大学超重力科学与技术研究院, 杭州, 310058

2. 江苏拓创科研仪器有限公司, 南通, 226600

摘要:为解决超重力离心模拟环境下装置在无外接油源时压力波动过大的问题,对引起压力波动的因素进行了分析,并针对各因素进行了试验测试,在对各因素进行分析的基础上提出蓄能器稳压方案,并通过超重力实验对比了不同试件变形工况下蓄能器工作参数、工作压力及工作介质等参数对稳压性能的影响。试验测试结果表明:油液测试温度36~42.5℃范围内,温度变化引起的压力波动比小于4%;试件变形量是影响压力波动的主要因素,样品1mm的变形量引起的压力波动比可达47%;超重力下蓄能器稳压时的波动比与工作压力及试件变形量成正比,采用2个300mL气体体积的蓄能器可实现20MPa内压力波动小于10%的需求,且与理论计算结果较为吻合。研究结果为超重力环境下高温高压及其他装置的压力波动控制提供了技术支撑。

关键词:超重力离心模拟环境;温度;工作压力;压力波动;蓄能器;工作介质

中图分类号:TH137

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.08.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Pressure Stabilization for Loading Cylinders under Centrifugation Supergravity Environment Based on Experimental Tests

QIU Bingjing^{1*} JIA Muhua¹ LI Yinqi¹ JI Liubin²

1. Institute of Hypergravity Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou, 310058

2. Jiangsu Tuochuang Scientific Instrument Co., Ltd., Nantong, Jiangsu, 226600

Abstract: To solve the problems of excessive pressure fluctuations in the simulation environment of high gravity centrifugal environment without an external oil source, the factors causing pressure fluctuations were analyzed, and experimental tests were conducted on each factor. Based on the analysis of each factor, an accumulator stabilization scheme was proposed, and the effects of accumulator working parameters, working pressure, and working medium parameters on stabilization performance were compared under different deformation conditions of specimens through supergravity experiments. The experimental test results show that within the temperature range of 36~42.5℃, the pressure fluctuation of oil caused by temperature changes is less than 4%. The deformation of the specimen is the main factor affecting pressure fluctuations, with a pressure fluctuation ratio of up to 47% caused by a deformation of 1mm in the samples. The fluctuation ratio of the accumulator during pressure stabilization under supergravity is proportional to the working pressure and the deformation of the specimen. The use of two 300mL gas volume accumulators may achieve the requirement of less than 10% internal pressure fluctuation of 20MPa, which is consistent with theoretical calculations. The test provides technical support for controlling pressure fluctuations in high-temperature and high-pressure devices under supergravity environments.

Key words: high gravity centrifugal environment; temperature; working pressure; pressure fluctuations; accumulator; working medium

0 引言

地球内部物质组成、演化等过程的高温高压实验研究长期以来一直是地球科学的热点领域之

一^[1-3],目前国内多所研究机构及高校,如中科院广州地化所、吉林大学、北京大学、浙江大学及中国地质大学等均利用常重力地面装置进行了相关实验研究,但其整机设备多依赖进口,且国产的设备所采用的重要元部件亦多依赖进口,国产仪器仍与世界先进水平有着不小的差距^[4]。随着超重力技术的发展,与超重力离心机相配套的高温高

收稿日期:2024-08-23

基金项目:国家自然科学基金(51988101);浙江大学实验技术项目(SYB202113)

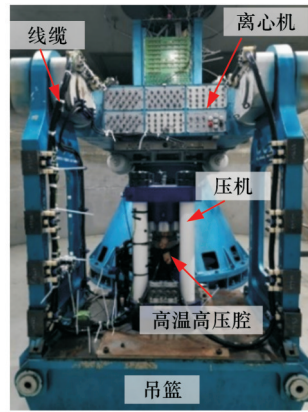
压装置为地球深部物质、合金溶体、地质体等的研究提供了新的实验模拟方案,与常重力相比,超重力实验具有时空缩尺和相物质分离的加速效应,且常重力下大尺度、长历时的测试过程可以通过物理模拟在实验室尺度内重现^[5-6]。

受限于油水气电供给能力,超重力离心模拟设备在高离心加速度时难以提供外接油源以保持稳定的实验压力。一般采用先在地面加载锁压的方式完成压力的加载及保压过程,然后将装置安装于离心机上。某一离心模拟实验过程中,首先在离心加速度达到一定的 g 值后开始对高温高压腔内的样品进行加热实验(样品升温段及样品恒温段),然而加热时高温高压腔内的样品会经历受热膨胀以及熔化被进一步压缩的过程,在此期间样品的尺寸发生变化,引起加载缸加载压力的波动。此外,在离心超重力实验过程中,装置与空气摩擦产生热量也将导致油液温度升高,引起压力增大,在样品变形及温度的综合影响下,样品受到的压力将产生较大的变动。而研究矿物相变、岩石在不同压力下的熔点以及岩石之间不同化学物质反应等地球深部岩石物理化学等过程时,样品所受到的压力是一个重要因素。为了确保实验的精度和准确性,需在高温高压实验过程中保持加载压力的稳定,依据本课题组长期高温高压实验的经验,为确保满足实验需求以及考虑离心模拟环境下稳压技术的可行性,需使油压波动尽量控制在10%以内。若在离心模拟实验中压力控制出现问题,轻者会导致实验测试错误,重者会导致压机中间的压力盘甩出,整个装置在旋转中损坏。然而,目前针对活塞圆筒高温高压装置的研究多是针对地面高温高压装置的国产化及标定测试^[7-8],未见超重力模拟环境下的工作性能研究的报道,且蓄能器常用于常重力工况机械设备的储能或压力波动控制^[9-10],超重力下的性能研究尚处于空白。

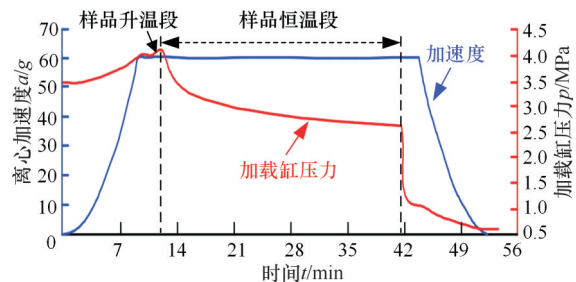
针对以上问题,本研究采用实验方法对超重力无油源工况下影响压力加载的因素进行分析,提出超重力离心模拟环境下的稳压方案并进行实验测试,探究超重力离心模拟环境下无油源加载下装置的稳压特性,为超重力高温高压装置的设计研发提供技术支撑。

1 装置工作原理及受力分析

图1a为离心模拟装置在超重力离心机上的安装图,图1b所示为离心实验过程中的离心加速



(a)离心模拟装置安装图



(b)实验过程中的离心加速度及压力变化

图1 离心实验中压力波动结果示例

Fig.1 Example of pressure fluctuation results in centrifugation experiments

度及压力变化。

压机及高温高压腔组装后的简图见图2,样品安装于上加载缸与下加载缸的中间位置,工作时首先对上加载缸施加压力 p_{b0} ,在部件相互之间压紧之后对下加载缸施加压力 p_{a0} ,油压 p_{a0} 经活塞杆及锥体等部件传送到样品上,给样品施加实验载荷,载荷施加完毕之后关闭加载缸的阀门,使其压力保持。在离心模拟实验时,装置自身受到离心机旋转时产生的离心加速度 G 的影响。在超重力离心机旋转至一定离心加速度后进行高温模拟实验,在样品加温过程中,引起压力变化的主要原

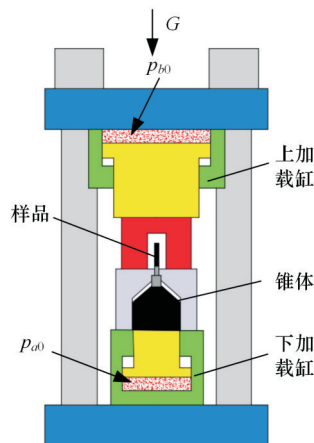


图2 压机及高温高压腔简图

Fig.2 Schematic diagram of compressor and high temperature and high pressure chamber

因如下:①样品在加载缸施加压力(样品内部压力最高可达5 GPa)及图1所示线缆提供电流加热(样品最高温度可达1500 °C)的双重作用下会继续产生变形,从而导致下加载缸活塞杆的移动,此时加载压力产生变化从而导致样品受力的波动;②在长时间的离心模拟实验过程中,由于结构部件与空气摩擦产生较大的热量,热量通过加载装置结构及吊篮传递至加载缸的油液,使其温度产生变化,进而引起压力的变化;③离心模拟环境(机室)温度变化及传热亦会影响到加载缸内压力的波动。

此外,在常重力下加载部件的自重可忽略不计,而在超重力下,由于物体的自重成百倍或千倍地增加,重力的影响也是压力变化的影响因素之一。部件受力如图3所示。

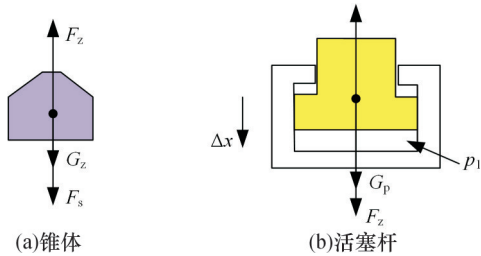


图3 部件受力图

Fig.3 The force on components

图3a中, F_z 表示活塞对锥体的支撑力, G_z 表示样品、锥体及中间过渡块等的重力, F_s 表示样品反作用力; G_p 表示活塞自重, F_a 表示下加载缸的油液压力,有

$$F_a = G_p + G_z + F_s \quad (1)$$

其中,超重力引起的重力因素 $G_p + G_z$ 可以根据离心加速度确定,而油液的压力影响因素较多,其中:

$$F_a = [p_{a0} - \frac{(V_a - V_{a1})\beta}{V_{a0}}] A_a \quad (2)$$

$$V_a = V_{a0} (1 + a\Delta t)$$

$$V_{a1} = A_a (1 + a\Delta t)$$

式中: β 为油液的弹性模量; A_a 为无杆腔活塞杆的面积; a 为油液体积膨胀系数,一般取 $(6\sim 8) \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$; V_{a0} 为初始的油液体积; V_a 为温度升高 Δt 后等压膨胀后的体积; V_{a1} 为高温试验试件变形后下加载缸油液的体积。

式(1)可表示为

$$F_s = p_{a0} A_a + a\Delta t \beta_a A_a + \Delta x \frac{\beta_a A_a}{x_{a0}} - (G_p + G_z) \quad (3)$$

由上式可知,样品受到的力与油液初始压力、温度、弹性模量及样品的压缩量都有很大的关系,而油液的弹性模量 β_a 又受介质温度、工作压力 p_{a0} 及油液成分的影响^[11],这些参数之间互相耦合影响,难以有准确的值用于理论分析,在工程中一般

采用一定范围的估算值,从而导致理论计算结果与实际测试结果差异较大,故有必要通过试验测试的方式了解各因素对压力变化的影响以及稳压方案的可行性。

2 压力波动因素的分析

1)温度对压力波动的影响。为分析油液温度对油液的压力变化的影响,实验时在下加载缸外部增加加热套,通过加热套对下加载缸进行加热,并通过温度传感器测量内部油液的温度。在实验时分别设定初始压力为2.94、4.7、6.4 MPa,对加载缸进行加热测试,加载缸压力随温度的变化如图4所示,可见在加载腔油液体积不变的情况下,压力随温度的升高而增大,基本成线性关系。为便于对比温度变化下的压力变化关系,取温度变化范围36~42.5 °C时的压力变化进行分析(表1),可见初始压力越大,单位温升引起的压力变化量越大,这与压力越高时液压油的弹性模量越大、单位体积膨胀引起的压力变化也越大的情况相符,但相对而言对压力波动比的影响差异不明显,温度变化引起的压力波动比小于4%。

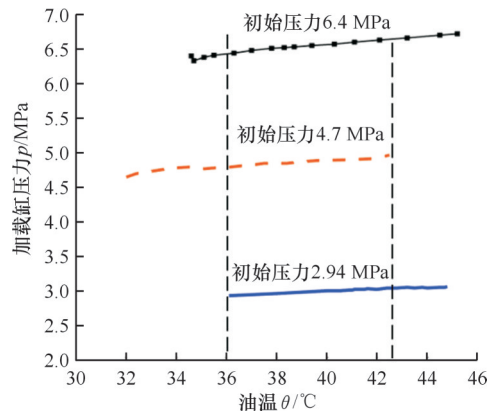


图4 温度压力变化实验测试结果

Fig.4 The variations of temperature and pressure based on experimental test

表1 温度变化范围36~42.5 °C时压力的波动

Tab.1 Pressure fluctuations within temperature 36~42.5 °C

$p_{a0}(36\text{ }^\circ\text{C})/$ MPa	$p_{a0}(42.5\text{ }^\circ\text{C})/$ MPa	单位温升的压力 变化/(MPa·K ⁻¹)	压力波动/ %
6.43	6.64	0.0323	3.27
4.79	4.97	0.0277	3.76
2.94	3.05	0.0169	3.74

2)试件变形对压力的影响。由于样品在高高高压腔内部,难以直接测量其试件的变形量,以支撑稳压方案的设计,故需对现有设备进行改进以间接获得样品的变形量。如图5所示,在锥块上安装试件变形量测量标的,通过激光位移计对

下加载缸活塞的位移进行测量,获得整个实验过程中下加载缸活塞位移随加载时间的变化,如图6a所示(即样品被压缩的过程),压力及温度加载的工况如图6b所示。为获得样品的最大变形量,在加温测试时保持油源压力恒定供给,可见随着下加载缸压力的增大,试件首先经历了无加热时的预压缩后达到稳定预压缩量,随后在外接油源压力一定的情况下对样品进行预加温,此时样品经历了先膨胀后又被压缩的过程,随着实验温度的进一步升高,样品内部逐渐熔化且在压力的作用下进一步压缩,在高温实验过程中样品压缩量约1.075 mm。

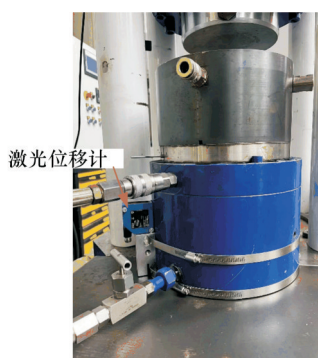
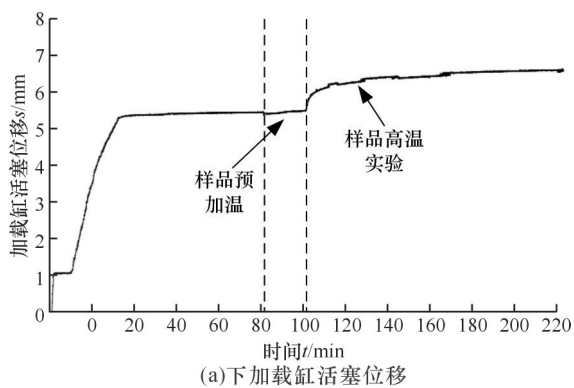
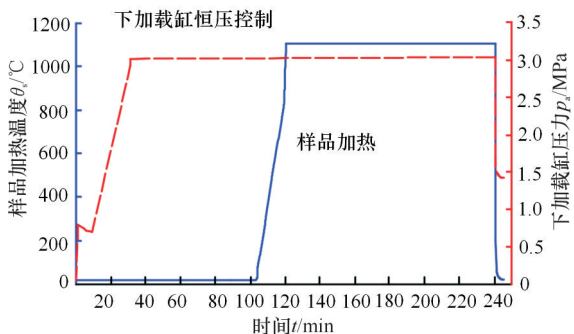


图5 样品变形测量

Fig. 5 The measure of sample deformation



(a)下加载缸活塞位移



(b)下加载缸压力及样品加热流程

图6 试件变形测量

Fig.6 Measurement of sample deformation

由于油液弹性模量随压力的非线性变化关系,油液的体积变化较大时难以对油液的压力变化进行计算,故采用实验方法测试变形对压力的

影响。液压缸加压前,在图2所示下加载缸的活塞杆与锥体之间预放置一块1 mm厚的钢片,将压力加载到6.5 MPa,后撤去该钢片,上加载缸重复加载至原位。为避免误差,对试样进行两次重复测试,测试结果如下:当初始压力为6.5 MPa时,第一次1 mm厚的试件变形后的压力降为3.4 MPa;第二次1 mm厚的试件变形后的压力降为3.21 MPa,压力波动量达47%,可见试件变形对压力的影响远大于温度变化所引起的压力变化。

3 稳压方案超重力离心模拟实验

由上述分析可见,相比温度的影响,试件变形的影响较大,试件变形导致压力减小为主,温度的升高有利于补偿压力的减小,但补偿能力有限。为满足试件变形后的加载压力稳定需求,需针对实验时的压力降低较大的问题提出补偿措施,本文提出采用无外控的蓄能器方案进行稳压可行性测试。

图7所示为采用两个蓄能器并联方式,蓄能器安装于吊篮底板上,通过阀门的启闭对采用单个蓄能器及多个蓄能器的稳压性能进行实验研究,蓄能器的预充压为7 MPa,体积300 mL。受限于现有模拟装置的功能,仅进行液体注入使液体容积产生压缩的测试分析。

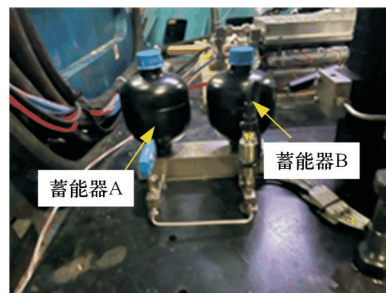


图7 蓄能器稳压性能超重力离心测试

Fig.7 The stabilization performance of energy storage device based on supergravity centrifugal testing

3.1 单个蓄能器稳压效果分析

单个蓄能器测试时采用水作为介质,图8、图9所示为水介质分别设定初始压力为10 MPa和20 MPa,待离心机达到150g时,第一次压缩10 mL的液体体积,随后继续压缩20 mL液体体积的测试过程,以模拟1 mm及2 mm样品变形量下蓄能器的稳压效果。由于瞬间压缩的影响,每次液体快速压缩时因蓄能器和液体之间的动态响应过程而出现压力先突变后回稳的现象,但实际的样品变形是一个较为缓慢的过程,故分析时仅考虑压缩前和压缩后的压力变化关系。

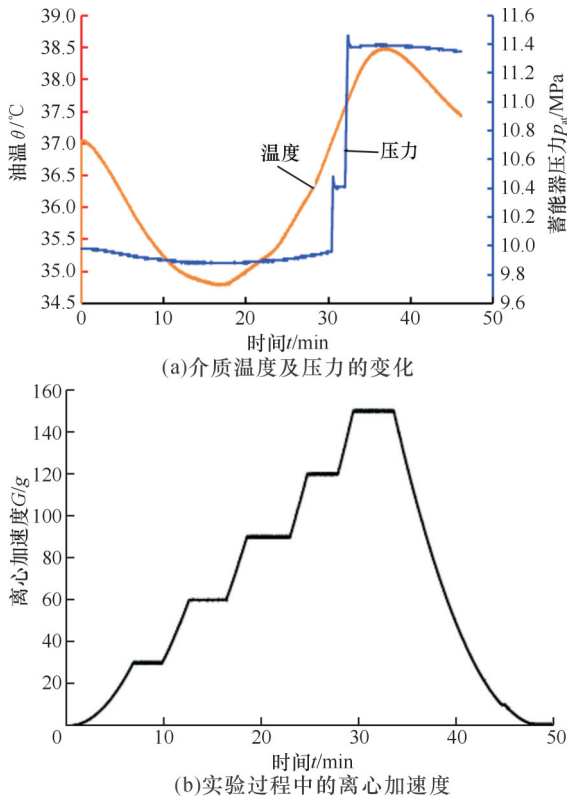


图8 单蓄能器水介质 ($p_{a0}=10\text{ MPa}$)

Fig.8 Single accumulator with water ($p_{a0}=10\text{ MPa}$)

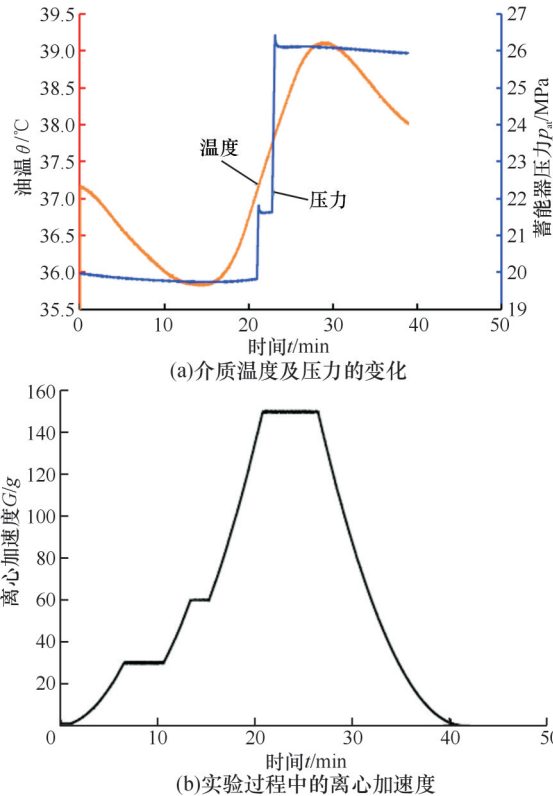


图9 单蓄能器水介质 ($p_{a0}=20\text{ MPa}$)

Fig.9 Single accumulator with water ($p_{a0}=20\text{ MPa}$)

如图8、图9所示,在离心机加速过程中,由于蓄能器无绝热措施,在机室内风的作用下首先出现介质温度降低的现象,继而随着离心机转动时间的增加,其表面摩擦产生的热量传递至水介质

产生温升,最大温度变化约 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,离心加速度升高过程中 10 MPa 初始压力时的压力波动量最大,约 0.02 MPa , 20 MPa 初始压力时的最大波动量为 0.22 MPa 。而随着温度的回升,压力基本恢复至初始压力,可见此蓄能器在 $150g$ 可正常工作。图8、图9中第一次的压力突变为给定 10 mL 体积压缩量时的压力变化,第二次的压力突变为 20 mL 体积压缩量时的压力变化。为便于比较不同初始压力及压缩变化量对稳压性能的影响,试验过程中压力及温度变化见表2,其中 p_{a1} 为液体体积压缩前的初始压力, p_{a2} 为体积压缩后的压力。可见,当初始压力一定时,体积压缩量引起的压力波动比 λ 与体积压缩量成正比,且在相同体积压缩量下, λ 与 p_{a0} 成正比。假设液体不可压缩,基于理想气体方程对压力变化对应的蓄能器气体变化量进行理论分析,分析结果表明,气体体积理论变化量 V_{ac} 与试验体积压缩量较相符。

表2 超重力下单蓄能器压力变化(水介质)

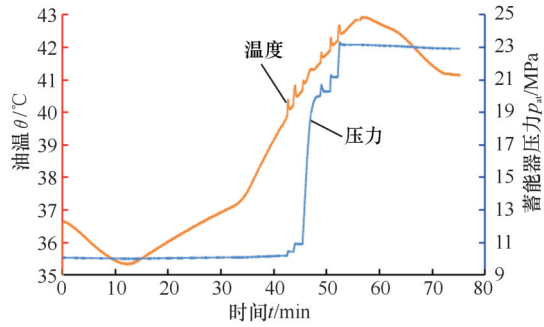
Tab.2 Pressure variation of single accumulator under high gravity (water medium)

体积压缩量/mL	p_{a0}/MPa	p_{a1}/MPa	$\lambda/\%$	V_{ac}/mL
10	9.96	10.41	4.52	9.14
10	19.82	21.62	9.08	8.82
20	10.41	11.38	9.32	17.20
20	21.63	26.11	20.71	16.66

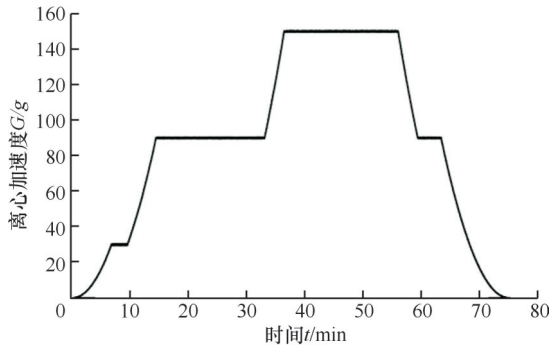
3.2 双蓄能器稳压效果分析

采用双蓄能器时的稳压实验结果如图10所示,实验过程如下:首先在 10 MPa 初始压力下将离心机 G 值升高至 $150g$,依次进行 10 mL 及 20 mL 的体积压缩测试;随后将压力增大并稳定至 20 MPa ,再依次进行 10 mL 及 20 mL 体积压缩测试。可见在 G 值升高的过程中,液体的温度都经历了先减小后增大的过程,这与离心机的风阻摩擦有较大的关系,但温度的影响对压力的影响相对较小。此外,可见在瞬间体积压缩时瞬间的液体流动摩擦产生了热量,使得温度产生了突变,但随着压力的稳定,温度逐渐回稳。

为便于比较双蓄能器时压力波动与初始压力的关系,不同体积压缩量和初始压力时的压力波动见表3,可见变形量相同时,压力越大引起的压力波动比越大,初始压力一定时,压力波动比与体积压缩量成正比,这与单蓄能器时压力的波动规律类似,且假设水介质不可压缩时计算的气体理论变化量与实际值相接近。对比表2及表3的参数,可见相比单蓄能器时的稳压性能,同等初始压力 p_{a0} 下、相同体积压缩量时双蓄能器的压力波动



(a) 介质温度及压力的变化



(b) 实验过程中的离心加速度

图 10 双蓄能器水介质 ($p_{a0}=10\text{ MPa}, 20\text{ MPa}$)

Fig.10 Double accumulators with water

($p_{a0}=10\text{ MPa}, 20\text{ MPa}$)

比 λ 约为单蓄能器的 1/2。可见采用 2 个 300 mL 气体体积的蓄能器可实现 20 MPa 内压力波动小于 10% 的需求。

表 3 超重力下双蓄能器压力变化(水介质)

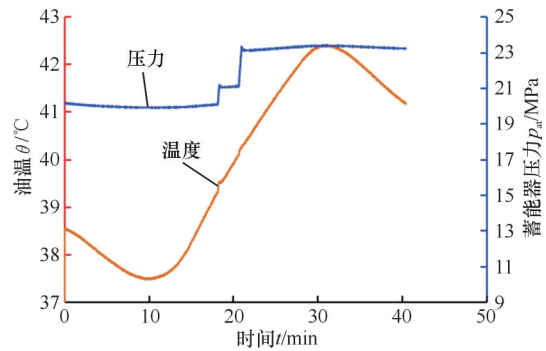
Tab.3 Pressure variation of double accumulator under high gravity (water medium)

体积压缩量/mL	p_{a0}/MPa	p_{at}/MPa	$\lambda/\%$	V_{ac}/mL
10	10.20	10.44	2.35	9.464
10	20.30	21.19	4.38	8.674
20	10.44	10.92	4.60	17.68
20	21.17	23.19	9.54	17.28

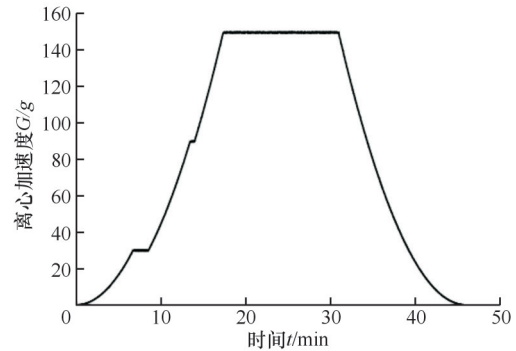
3.3 不同工作介质对稳压效果的影响

为对比不同工作介质下的稳压性能以选择较优的工作介质,对采用水和液压油两种介质时的稳压效果进行对比。本次试验采用液压油双蓄能器进行测试(图 11),初始压力 20 MPa,待达到稳定离心加速度后依次进行 10 mL 及 20 mL 的压缩量测试,可见液压油的稳压性能良好。为定量对比液压油和水作为工作介质时稳压性能的区别,液压油介质双蓄能器时的压力变化见表 4,与表 3 中约 20 MPa 时水介质的压力变化相比,液压油作为介质时稳压效果与水介质相比差异不大,但由于水的质量热容较大,温度对水介质的影响相对较小,有利于减小温度对蓄能器稳压性能的影响,但考虑到样品压缩后系统的整体压力减小,温度

的升高反而有利于降低压力的减少量,故以液压油作为工作介质更有利于减小压力波动。



(a) 介质温度及压力的变化



(b) 实验过程中的离心加速度

图 11 双蓄能器液压油介质 ($p_{a0}=20\text{ MPa}$)

Fig. 11 Double accumulators with oil ($p_{a0}=20\text{ MPa}$)

表 4 超重力下双蓄能器压力变化(液压油)

Tab.4 Pressure variation of double accumulator under high gravity (oil)

体积压缩量/mL	p_{a0}/MPa	p_{at}/MPa	$\lambda/\%$	V_{ac}/mL
10	20.10	21.07	4.83	9.62
20	21.12	23.13	9.56	17.28

4 结论

本文针对超重力离心模拟实验中实验装置在无外接油源时压力波动过大的问题,对影响压力波动的因素进行试验研究,并通过超重力离心模拟试验探究了无外控蓄能器稳压方案的可行性。结论如下:

1) 随着工作压力的增大,单温温升引起的压力变化量越大,但对压力波动比的影响不大。

2) 试件变形量是影响压力波动的主要因素,初始压力 6.5 MPa 时,样品变形 1 mm 引起的压力波动比达 47%。

3) 采用蓄能器进行稳压时,所采用蓄能器可在 150g 下稳定工作,压力波动比与工作压力及试件变形量成正比,假设工作介质不可压缩,超重力离心模拟实验工况下的压缩量与超重力理论计算值较为吻合。

4)蓄能器稳压产生的波动比与蓄能器的气体体积成反比,300 mL蓄能器可实现20 MPa内压力波动在10%以内,2个300 mL蓄能器可实现20 MPa内压力波动在10%以内。

5)采用液压油或水作为介质时蓄能器的稳压效果差异不大,但油的质量热容小于水的质量热容,温度的升高有利于降低试件变形引起的压力的减小量,故在实际使用中以液压油作为工作介质更有利于减小压力的波动。

参考文献:

- [1] 谢鸿森. 地球深部物质科学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
XIE Hongsen. Introduction to Deep Earth Material Science[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [2] HAYDEN L A, WATSON E B. Rutile Saturation in Hydrous Siliceous Melts and Its Bearing on Ti-thermometry of Quartz and Zircon[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 258(3/4): 561-568.
- [3] 李家掀, Aleksandr Stepanov, 蒋少涌. 长英质熔体中钛铁矿扮演的角色作用: 来自活塞圆筒实验的探索[C]//第十届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会. 西安, 2023: 293-295.
LI Jiaxian, ALEKSANDR S, JIANG Shaoyong. The Role of Ilmenite in Long-ingot Melting: Explorations From piston Cylinder Experiments [C] // The 10th National Academic Symposium on Mineralisation Theory and Prospecting Methods. Xian, 2023: 293-295.
- [4] 程鹏, 饶建华, 刘东升. 高温高压活塞-圆筒式装置控制系统的设计研究[J]. 机械与电子, 2021, 39(1): 52-55.
CHENG Peng, RAO Jianhua, LIU Dongsheng. Design of Control System for High Temperature and High Pressure Piston-cylinder Apparatus [J]. Machinery & Electronics, 2021, 39(1): 52-55.
- [5] 陈云敏. 离心超重力实验: 探索多相介质演变的革命性手段[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(4): 631-632.
CHEN Yunmin. Centrifugal Hypergravity Experiment: a Revolutionary Means to Explore the Evolution of Multiphase Media[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2020, 54(4): 631-632.
- [6] CHEN Yunmin, TANG Yao, LING Daosheng, et al. Hypergravity Experiments on Multiphase Media Evolution[J]. Science China Technological Sciences, 2022, 65(12): 2791-2808.
- [7] 夏莹, 丁兴, 宋茂双, 等. 活塞圆筒装置压力盘样品组装的温度测定和热结构分析[J]. 高压物理学报, 2014, 28(3): 262-272.
XIA Ying, DING Xing, SONG Maoshuang, et al. Temperature Determination and Thermal Structure Analysis on the Pressure Assembly of a Piston-cylinder Apparatus[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2014, 28(3): 262-272.
- [8] 程志康, 张清, 刘勋, 等. 双向活塞圆筒装置19 mm外径样品组装的压强和温度标定[J]. 高压物理学报, 2022, 36(1): 79-85.
CHENG Zhikang, ZHANG Qing, LIU Xun, et al. Pressure and Temperature Calibrations of End-loaded Piston-cylinder 19 mm Outer Diameter Sample Assembly [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(1): 79-85.
- [9] 晋超, 权龙, 夏连鹏, 等. 储能液压缸协同驱动重型机械臂系统研究与优化[J]. 中国机械工程, 2022, 33(11): 1287-1293.
JIN Chao, QUAN Long, XIA Lianpeng, et al. Study and Optimization of Energy Storage Hydraulic Cylinders Synergistically Driving Heavy Manipulator Systems[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(11): 1287-1293.
- [10] 王益群, 杨阳, 韩松杉, 等. 油源动态特性及伺服阀前蓄能器对轧机控制精度影响的实验研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(3): 375-379.
WANG Yiqun, YANG Yang, HAN Songshan, et al. Experimental Research on Influences of Dynamic Characteristics of Oil Source and Accumulator at Inlet of Valve on Mill Control Precision[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(3): 375-379.
- [11] 冯斌. 液压油有效体积弹性模量及测量装置的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
Study on Effective Fluid Bulk Modulus and Measurement in Hydraulic System [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.

(编辑 陈勇)

作者简介: 邱冰静, 女, 1989年生, 博士研究生。研究方向为超重力液压元件。E-mail: qbj@zju.edu.cn。

本文引用格式:

邱冰静, 贾慕华, 励音骐, 等. 基于试验测试的超重力离心模拟环境下加载缸稳压方案研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(8): 1651-1657.

QIU Bingjing, JIA Muhua, LI Yinqi, et al. Research on Pressure Stabilization for Loading Cylinders under Centrifugation Supergravity Environment Based on Experimental Tests[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(8): 1651-1657.