



岩土力学试验系统传感器密封装置的设计及试验方法

尹荣杰¹, 张忠举², 李怡航¹, 张朝鹏³, 刘洋^{3*}, 张茹¹, 张志龙¹, 高恒¹

(1. 四川大学水利水电学院, 成都 610065; 2. 中国水利水电第十工程局有限公司, 成都 611830;

3. 四川大学深地科学与工程教育部重点实验室, 成都 610225)

摘要: 针对目前地球深部原位环境模拟试验中, 大尺寸试样内部温度、压力参数测量困难的问题, 设计了一种应用于岩土力学试验机的传感器密封装置。通过将装置预埋在试样内部并将传感器元件密封引出, 避免了传感器及后端导线与高温高压环境的直接接触, 可实现试样内部温度、压力参数的实时准确测量。验证试验表明, 添加该装置后, 并未破坏力学试验机三轴腔内部温、压及油液并存的实验环境, 既为大尺寸试样力学实验的稳定测量提供了保障, 又明显提升了测量数据的准确性和可靠性。鉴于该装置良好的密封性以及耐高温高压工况等特点, 稍作改进可用于深海深空等复杂环境中作业, 具有广阔的应用前景。

关键词: 三轴试验系统; 传感器; 岩土力学; 高温高压

中图分类号: TH136

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230331

Design and Test Method of a Sensor Sealing Device for the Geotechnical Mechanics Test System

YIN Rongjie¹, ZHANG Zhongju², LI Yihang¹, ZHANG Zhaopeng³, LIU Yang^{3*},
ZHANG Ru¹, ZHANG Zhilong¹, GAO Heng¹

(1. College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. China Water Resources and Hydropower 10th Engineering Bureau Co., Ltd., Chengdu 611830, China;

3. MOE Key Laboratory of Deep Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to solve the problem that it is difficult to measure the internal temperature and pressure parameters of large size samples in the current in-situ environmental simulation test of deep earth, a sensor sealing device applied to the geotechnical mechanics test system is designed. By prefabricating the device inside the sample and sealing the sensor components, direct contact between the sensor, the back-end wire and the high-temperature and high-pressure environment is avoided, and accurate measurement of temperature and pressure parameters inside the sample can be achieved. The verification test shows that the addition of this device does not disrupt the experimental environment where temperature, pressure, and oil coexist inside the triaxial chamber. The proposed device not only provides a guarantee for stable measurement of large-sized specimen mechanical tests, but also improves the accuracy and reliability of measurement. Due to the good sealing performance and resistance to high temperature and high pressure conditions of the device, slight improvements can be made and it can be used for operations in complex environments such as deep sea and deep space, which has broad application prospects.

Key words: triaxial test system; sensor; geotechnical mechanics; high temperature and high pressure

随着全球自然资源匮乏、地面空间不足等重大人类生存问题日益加剧, 迫切需要人类探索深地矿物资源和空间。“十四五”时期, 我国明确指出将加强深地前沿领域相关部署, 紧抓“向地

球深部进军”这一战略科技问题, 解决制约深部资源勘查开发的重大科技问题。现阶段, 深地科学的基础研究还存在诸多不足, 基本规律仍不清楚, 尚未形成适用于复杂环境下深部能源开发的

收稿日期: 2023-07-07; 修回日期: 2023-12-16

基金项目: 四川大学“试验技术研究项目”(SCU1068); 四川省自然科学基金(2022NSFSC0005)。

作者简介: 尹荣杰(2000-), 男, 硕士生, 主要从事岩土工程方面的研究。

*通信作者: 刘洋(1982-), 女, 博士, 高级实验师, 主要从事岩石力学方面的研究。E-mail: liuyangecho@163.com

变革性理论和技术^[1]。地球深部岩体的物理力学特性仍然处在“黑箱”或“灰箱”状态，难以进行不同深度原位环境下物理力学性能的分析、测试和建模^[2-4]。

在岩土工程领域内，岩土力学室内试验在边坡稳定性、冲击地压、隧道围岩支护、深部原位环境模拟等研究中发挥着举足轻重的作用，因此室内岩土力学试验的开展十分普遍且意义重大^[5-8]。在岩土力学室内试验中，力学实验系统是开展相关室内试验的重要仪器。以四川大学深地科学与教育部重点实验室的 MTS 815 岩石力学测试系统为例，该设备可开展单轴压缩、常规三轴、高温三轴、渗透等多种试验。特色功能是实现 THM(温度-渗流场-应力场)耦合试验以及实现不同渗透介质(液体/气体)的渗透测试。自 2015 年投入使用以来，该设备服务了大量科研项目、本科教学及本科创新实验项目，在高校人才培养、科学研究以及解决工程问题等方面做出了重要贡献，是实验室的核心设备之一^[9]。

传感器作为岩土力学试验系统的重要测量元件，承担着准确获取试验中相关参数的任务，所得数据是科学研究和工程设计的重要依据。其原理是通过敏感元件和转换元件把被测信号，如温度、压力等参数，按照一定规律转换成可用输出电信号^[10]，从而为试验提供依据和参考。

1 研发背景

随着深部工程日益增多，研究者对准确获取试件，尤其是大尺寸试件内部温压等环境的研究也逐渐增多^[6]。现有深部原位环境模拟试验大多依托岩石力学三轴试验系统进行，典型的岩石力学试验系统如图 1 所示。岩石力学三轴试验系统通过将温度、应力等设置成深部原位参数，实现深部原位环境模拟。为了更好地探索深部原位环境下岩石的物理力学特征，减小尺寸效应带来的误差影响，需要使用大尺寸试样。试验中，试样置于三轴腔内进行加温加压，为了确保实验数据的准确性，须保证试样内部的温压参数而非三轴腔的温压参数达到实验设定值。

针对大型混凝土等试样内部温度测量方面的研究，部分学者已进行了相关探索。文献 [11] 为了克服混凝土试样内部温度测量定位难、测量结果误差大的缺点，发明了一种混凝土内部温度传感器的精确安装定位装置及采集系统，提高了测

温试验的准确性和可操作性。文献 [12] 利用分布式温度传感系统，提出了大体积混凝土结构裂缝控制框架，提高了大体积混凝土施工中温度调节的效率。文献 [13] 利用准分布式 FBG 应变传感器实时监测不同龄期大型混凝土试样温度应变的空间分布和变化情况，掌握了混凝土试样浇筑后温度应力场的分布规律。文献 [14] 在高标号、大体量的混凝土中放置了温度传感器，从混凝土浇筑到冷凝阶段连续进行温度测量，并进行裂缝观测分析，以此解决了大体积、高标号混凝土裂缝的问题，同时研究了裂缝发育和内部温度之间的关系。文献 [15] 提出了一种压电埋入式混凝土温度传感器，减小了传感器在混凝土试样中工作时由于应力-温度交叉传感导致的测量误差。文献 [16] 为了克服混凝土凝固过程中温度监测人工测量误差以及实时性差的缺陷，发明了一种绝缘隔热的网状温度传感器保护罩，保证了温度传感器的性能，提高了温度传感器的可靠性。上述研究实现了大尺寸混凝土试样内部温度的准确测量，但是针对大尺寸试样在高温高压液体环境中内部温压参数准确测量的方法仍存在不足之处。



图 1 MTS 815 岩石力学测试系统

现有的传感器大多放置在混凝土、岩土等试样表面，少数置于试样内部，岩土力学试验系统通过加温系统和围压系统对传递介质进行加温加压，从而实现对接岩样的间接加温加压。传递介质一般为围压油或水等液体。对于小尺寸试样，温度传导较快，试样内外温度均匀时长相对较短，可以直接测量三轴仪器的温度作为目标温度，也可以采用细线定位法测量小尺寸试样内部的温度^[17]。

但对于大尺寸试样，三轴仪器的温度传递到试样内部需要很长的时间，所以当三轴腔外部达到目标温度时，并不能代表岩土试样内部也达到了目标温度。因此，精确测量试样内部的温压环

境就显得尤为重要。但是目前大多岩土力学试验机并未考虑到这一点。若采用传统的细线定位法,因细线材质细软,很容易出现细线的变形与错动,导致传感器定位不准确^[18];若直接用现有传感器元件在试样内部进行测量,传感器将长期处于腔内高温高压的环境中,产生应力腐蚀,导致导线材料劣化变脆,最终造成测量数据波动、引入较大误差,并影响传感器的使用寿命^[19]。

针对上述问题,本文设计了一种适用于大尺寸试样的传感器密封装置,对传感器及导线做了铠装,防止传感器及导线受到三轴腔内高温、高压、油液环境的损坏。改进后的装置可以较好地适应岩土力学室内试验高温、高压、油液并存的工况要求,在试验中稳定、可靠地开展试样内部参数测量。

2 传感器密封装置的结构设计

设计的传感器密封装置结构示意图如图2所示,装置实物图如图3所示,装置主要包括3个部分:

- 1) 限位螺栓,包括限位螺栓、通孔、锥面和限位腔;
- 2) 传感器部分,包括测量端、导线段、限位接头、锥头和延伸杆;
- 3) 密封加固部分,包括外螺纹、加固螺母和紧固螺母。

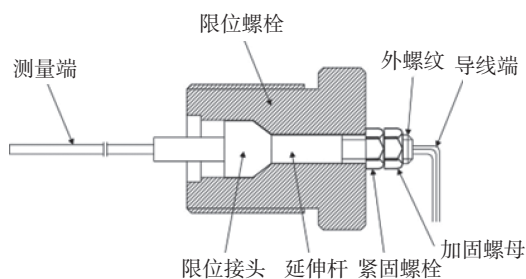


图2 传感器密封装置结构示意图

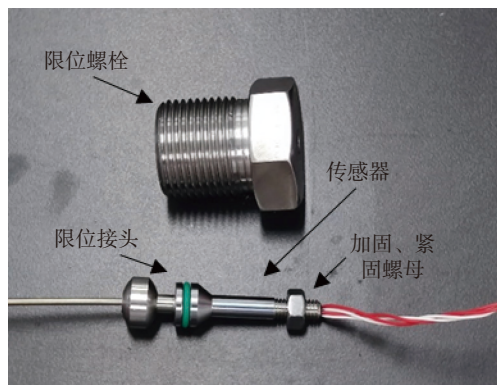


图3 传感器密封装置实物图

2.1 限位螺栓

限位螺栓结构包括限位螺栓、通孔、锥面和限位腔,作用是将传感器密封固定在试样内部,以实现试样内部参数的测量和保护传感器及导线的目的,所以限位螺栓贯穿且密封固定在试样内,限位螺栓结构如图4所示。

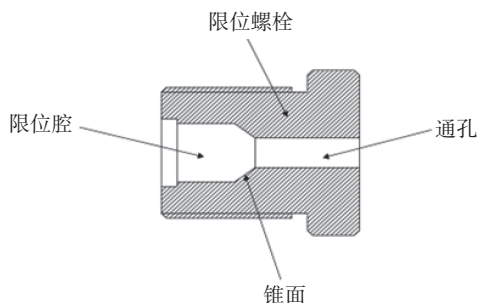


图4 限位螺栓结构示意图

2.2 传感器部分

装置的传感器部分结构示意图如图5所示。该部分两端分别为测量端和导线端,测量端用来测量试样内部的温度、压力等参数,导线端负责把测量的数据传送到外界被接收。二者之间设置延伸杆和限位接头,限位接头一端为外观呈圆台状的锥头。通过传感器锥头、延伸杆和限位螺栓锥面、通孔的配合,使得本装置整体性和密封性更佳。此外,延伸杆的直径小于限位接头的直径,可防止限位接头穿过通孔。

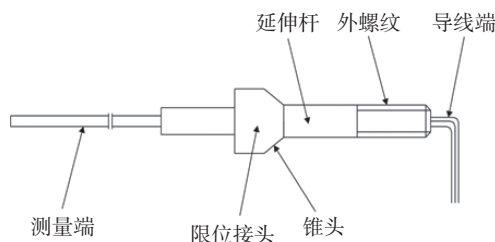


图5 传感器结构示意图

2.3 密封加固部分

密封加固部分包括外螺纹、加固螺母和紧固螺母(见图2)。外螺纹左侧位于通孔内部,右侧凸出通孔,凸出的一侧装配有紧固螺母和加固螺母,二者相互抵接。

通过拧紧紧固螺母在延伸杆上产生一个拉力,拉力会使得限位接头和限位腔的贴合更加紧密,有效防止了三轴腔内部高温高压环境被破坏。该过程中加固螺母防止紧固螺母发生松动,进一步保证了设备的整体性和可靠性。

最后本装置与试样腔体螺纹配合并通过焊接

密封固定, 让装置整体更加稳固和安全, 从而实现大尺寸试样内部温压参数的精确测量。

3 装置的使用

该装置结构可靠, 操作简单, 可重复使用, 具体使用步骤如下。

1) 准备工作

安装前, 检查相关组件、安装工具及待组装的传感器和混凝土试样。

2) 安装传感器

将传感器导线端和测量端之间的限位接头、延伸杆和限位螺栓内的限位腔、通孔紧密贴合, 完成传感器的安装。

3) 密封

在外螺纹上装配好加固和紧固螺母并拧紧, 使得传感器的导线端和测量端分隔密封。

4) 焊接固定

限位螺栓和试样腔体螺纹配合且通过焊接密封固定, 让装置整体更加稳固和安全。

5) 引出导线

安装完毕后, 传感器导线通过限位螺栓从高温高压的三轴腔体中密封引出并接入力学试验机, 避免其接触腔体内部的高温高压环境, 随后即可开展试验。

6) 维修更换

使用完毕后, 对焊接处进行解除, 然后拧卸紧固螺母、加固螺母及限位螺栓, 即可对传感器进行更换、维修。

4 装置的特点

本传感器密封装置在不破坏岩土力学试验系统三轴腔内高温高压、油液并存的密封环境的情况下, 将试件内置传感器密封引出, 对传感器及引线具有保护作用, 同时实现了大尺寸试样内部温压环境的稳定、准确测量, 具有以下 4 个优点。

1) 稳定性和整体性良好

本装置中, 外螺纹、加固螺母、紧固螺母、圆台状锥头的限位接头、锥面限位腔等特殊结构设计, 方便了传感器的拆装、更换和维修, 并可重复使用。同时限位螺栓与试样腔体配合且通过焊接固定, 提高了装置的稳定性和整体性。

2) 结构简单且操作性强

本装置由限位螺栓、传感器部分和密封加固

部分组成, 结构简单, 保证功能性的同时安装和操作相对简单。该装置的使用可实现对传感器的密封和将内置传感器的导线从高温高压的试样内部密封引出的双重功能。

3) 密封性良好

本装置中, 限位螺栓和试样腔体配合, 并通过焊接密封固定, 且锥头锥面配合的设计, 保证了装置整体的密封性。

4) 适用性较强

本装置通过更换传感器的种类和调整内置腔的尺寸, 可将传感器的种类拓展到压力传感器、温度传感器等多种, 具有较强的适用性。

5 应用实例

5.1 试样准备

结合实验室的研究项目, 选择直径 450 mm, 高 1400 mm 的圆柱形试样进行装置验证试验, 试样由 C30 混凝土浇筑而成(用混凝土试样代替岩样是因为二者之间具有良好的物理力学相似性, 且大型混凝土试样便于制造, 易于成型)。安装好试样及内部传感器后, 将其放置在直径 500 mm, 高 2000 mm, 壁厚 115 mm 的三轴腔内进行加温试验, 如图 6 所示。



图 6 混凝土试样图

混凝土试样在浇筑时, 需在其轴线二分之一处预留放置传感器密封装置的通道, 如图 7 所示。

5.2 试验过程

本装置的验证实验中, 内置传感器选择的是温度传感器, 也可根据研究需要更换为其他传感

器。装置按照前述装置使用方法安装完成。试验时,用与三轴腔外壁紧密贴合的外部传感器连续测量1~5号加热带所处位置的温度(即三轴腔外壁5个不同位置的温度,且加热带沿试样轴向间距300 mm等距分布,如图8所示),并在加热带外部包裹保温棉,以减少热量损失。同时,将本装置置于试样内,测量试样内部温度,以便与三轴腔外壁温度进行对比。验证试验目标温度设置为150℃,试验用时17.5 h,数据采集间隔为10 s。实验中发现3号加热带加热异常,实验结束后检查原因为传感器自身故障,故将其数据舍弃。

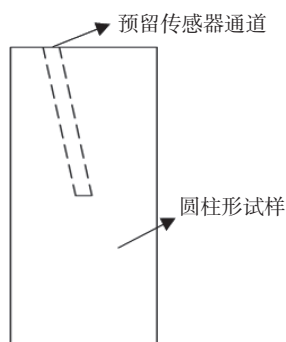


图7 预留传感器通道

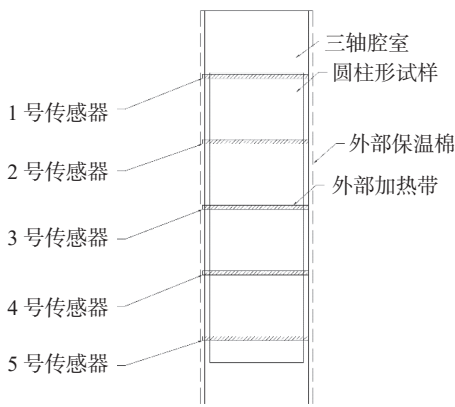


图8 外部传感器分布示意图

5.3 试验结果

测试结果显示,在升温过程中4个正常加热带处的温度(三轴腔外壁温度)和本装置测量的温度(试样内部温度)存在明显差异。4个加热带处温度经过大约7 h便达到目标温度150℃,而试样内置传感器温度上升缓慢,此时温度约为75℃,仅为设定温度的1/2。试验进行17.5 h后,试样内部温度达到130℃,如图9所示,距离温度设定值存在20℃的温差,表现出明显的温度滞后性。深部原位环境模拟实验中,亟须准确测量的是试样内部的温压等参数,而非三轴腔外壁温度,若

直接采用加热带温度可能造成明显的误差。因此本装置的使用,能够准确测量出试样内部环境。经过多次试验,试样内部的温度参数均能通过该装置稳定、准确输出,该装置的使用并未对三轴腔的密封环境造成破坏。此外,本装置对传感器及其导线做了铠装,有效避免了传感器元件及引线与高温高压、油液并存的腔体环境直接接触,延长了传感器的服役寿命,提高了测量数据的准确性。

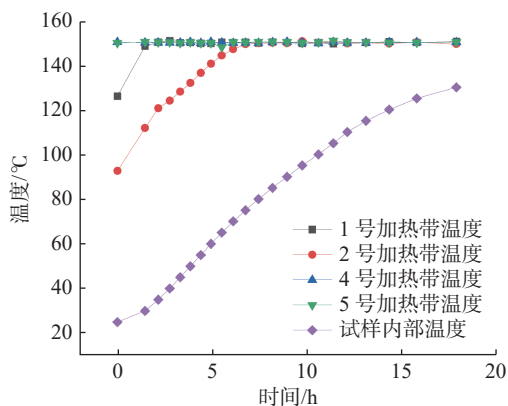


图9 三轴腔外壁和试样内部温度变化图

5.4 装置效果

验证试验显示,该装置能有效测量试样,尤其是大尺寸试样内部温压参数,为大尺寸试样内部环境检测提供了一种有效的测试手段,使得深地模拟实验更加逼近真实赋存环境。同时实现了加载实验中试样由内到外多维度参数测量。该装置亦可拓展到土体、岩石、混凝土多种试样的单轴、三轴等力学加载实验中。

其次,该装置对内置传感器及引线进行了密封铠装,避免了传感器及导线与三轴腔内部高温高压、油液并存环境直接接触,一定程度上保障了传感器及导线的稳定输出,延长了服役寿命,降低了实验成本。

最后,该装置可根据实际工况和测试目标差异,灵活调整传感器内置舱尺寸和形状,有望实现多种传感器的内置,满足更多的测试需求。

6 结束语

该传感器密封装置为岩土、混凝土等大尺寸试样内部温、压等参数的实时准确测量提供了一种可供选择的方法。该装置在使用过程中能够方便地实现传感器的密封引出,有效防止了实验过

程中高温高压等环境对实验数据测试的干扰,减少了实验过程中可能存在的安全隐患并延长了传感器及导线的使用寿命,降低了实验成本。本文设计的传感器密封装置具有以下 4 个优点。

1) 有效避免了高温高压、油液并存的三轴腔体环境对传感器元件及引线的不良影响,实现了将传感器元件从高温高压大尺寸试样内部密封引出。

2) 对比试验数据发现,该装置实现了大尺寸岩土试样内部温压参数的精准测量,更能满足深部原位模拟试验所需。

3) 对传感器及导线的铠装,有效保护了传感器元件,延长了其使用寿命并对传感器的测量精度提供了保障。

4) 本装置在保证了主设备密封性、稳定性、耐高温高压环境和精度的同时,拆装、使用方便,能够有效提高试验效率。

该装置结构易于安装拆卸,且能够承受高温高压等严苛工况,在优化材质并微调结构后也可用于深海深空等复杂环境,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 谢和平,李存宝,高明忠,等.深部原位岩石力学构想与初步探索[J].岩石力学与工程学报,2021,40(2):217-232.
- [3] 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):1283-1305.
- [4] XIE H P, LU J, LI C B, et al. Experimental study on the mechanical and failure behaviors of deep rock subjected to true triaxial stress: A review[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(5): 915-950.
- [5] 屈国亮.岩石三轴试验设备的研制改装应用研究[J].江西建材,2022(2):58-59.
- [6] 周火明,张宜虎.岩体原位试验新技术在水工复杂岩体工程中的应用综述[J].长江科学院院报,2020,37(4):1-6.
- [7] 刘泉声,何璠,邓鹏海,等.3D打印技术在岩石物理力学试验中的应用[J].岩土力学,2019,40(9):3397-3404.
- [8] 孙金海,明建.CT三维扫描与3D打印技术的矿山岩石力学与工程实验教学中的应用研究[J].实验科学与技术,2023,21(1):20-24.
- [9] 刘洋,艾婷,张朝鹏,等.基于MTS 815岩石力学试验机的直接剪切测试夹具设计[J].实验科学与技术,2020,18(5):85-90.
- [10] 邢明录,赵增辉,尹延春,等.基础力学自主创新设计案例与教学实施[J].实验科学与技术,2023,21(2):102-105.
- [11] 徐港,罗强,丁超,等.混凝土内部温度传感器的精确安装定位装置及采集系统:CN111024255B[P].2021-04-20.
- [12] OUYANG J S, CHEN X M, HUANGFU Z H, et al. Application of distributed temperature sensing for cracking control of mass concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 778-791.
- [13] 谭晓晶,许国山,宋军,等.基于FBG传感器技术的大体积混凝土温度应力监测与分析[J].低温建筑技术,2020,42(7):27-30.
- [14] 朱绍培,李代伟,吴利红.温度传感器在大体积高强混凝土施工中的应用体会[J].建井技术,2014,35(S1):70-73.
- [15] 陈雨,文玉梅,李平,等.压电埋入式混凝土应力及温度传感器[J].微纳电子技术,2007,44(S1):203-206.
- [16] 杨祖林,帅永建,王华.绝缘隔热的网状温度传感器保护罩:CN205679322U[P].2016-11-09.
- [17] 刘志海,杨军,居剑,等.用于混凝土内部的光纤应变传感器及其埋入方法[J].哈尔滨工程大学学报,2001,22(3):82-85.
- [18] 冯君,王磊,孙巍巍,等.一种在混凝土中埋设双端FBG传感器的方法:CN109822719A[P].2019-05-31.
- [19] 朱伟,王斐,唐洪奎,等.反应堆控制棒坐标位置传感器导线失效分析[J].核动力工程,2012,33(S2):132-135.

编辑 王燕