



满足试样内部环境参数测量的试样制备 模具设计

张朝鹏¹, 李怡航², 刘洋^{1*}, 艾婷¹, 任利¹, 刘小玲², 张岚斌²

(1. 四川大学 深地科学与工程教育部重点实验室, 成都 610065; 2. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065)

摘要: 随着深部资源开采和深地空间利用等工程活动的日益普遍, 岩土工程面临越来越多复杂环境下岩石力学问题和挑战, 亟须开展高温高压原位环境下的岩石力学测试研究, 要求岩石力学测试具备更为准确和更多维度的数据测量采集能力。为此, 该文开发设计了一种满足试样内部环境参数测量的试样制备模具, 并形成了一套内置传感器及其信号传输通道的浇筑方法, 最终制备出若干内置温度传感器及其信号传输通道的混凝土试样, 且内置传感器通过导线信号传输正常, 表明该试样制备模具能满足试样内部环境参数测量的试验要求。该试样浇筑模具操作方便简单, 预设传感器位置可调, 且可配套多种内置传感器使用, 具有较强的操作性、可行性和适用性。该装置的开发和使用将有利于更多高精度多维度岩石力学测试的顺利开展。

关键词: 高温高压环境; 内部参数测量; 试样制备模具; 内置传感器; 岩石力学测试

中图分类号: TD823

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220620

Design of Sample Preparation Mold Satisfying the Measurement of Internal Environmental Parameters

ZHANG Zhaopeng¹, LI Yihang², LIU Yang^{1*}, AI Ting¹, REN Li¹, LIU Xiaoling², ZHANG Lanbin²

(1. MOE Key Laboratory of Deep Earth Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. College of Hydraulic and Hydropower Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: With the increasing of engineering activities such as deep resource exploitation and deep space utilization, geotechnical engineering encounters more and more problems and challenges of rock mechanics in complex environments. It is urgent to develop rock mechanics testing research under high temperature and high pressure in-situ environment, and the rock mechanics test is required to have more accurate and more dimensional data measurement and collection capabilities. Therefore, this paper designs a sample preparation mold that meets the requirements of the measurement of the internal environmental parameters in the sample, and provides a pouring method for presetting built-in sensors and signal transmission channels. Finally, several concrete samples with built-in temperature sensors and signal transmission channels are prepared, and the built-in sensors transmit signals normally through the wire, which indicates that the sample preparation mold meet the test requirements for the measurement of internal environmental parameters. The sample pouring mold is easy to operate, the preset sensor position is adjustable, and it can be used with a variety of built-in sensors, which is operability, feasibility and applicability. Application of this device will be conducive to the development of more high-precision and multi-dimensional rock mechanics tests.

Key words: high temperature and high pressure environment; internal parameter measurement; sample preparation mold; built-in sensor; rock mechanics test

向地球深部进军是近期和未来我国科技创新的重要方向, 目前深部开发的基础研究很不充分, 基本规律仍不清楚, 无法考虑不同赋存深度岩石物理力学行为差异, 更无法进行不同深度模拟原

位环境条件下的物理力学的分析、测试与建模, 所以要建立深部原位岩石力学, 就必须真正在还原深部原位环境条件下开展物理力学行为的测试。

然而深地环境处于高温、高孔隙水压、高围

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2024-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(52125402); 四川大学实验技术研究项目(SCU241037)。

作者简介: 张朝鹏(1989-), 男, 博士, 实验师, 主要从事岩石力学与工程方面的研究。

*通信作者: 刘洋(1982-), 女, 博士, 实验师, 主要从事实验室建设与管理、岩石力学方面的研究。E-mail:

liuyangecho@163.com

压的极端环境,施加于试样表面的温度、压力等需要一定时间的传导^[1-2],直至岩石试样内部温压环境完全均匀,才能表征验证参数是否达到要求。但目前普遍的三轴试验并未考虑到这一点,难以保证试样内外温压环境完全一致和试验模拟环境的精准性,同时也缺乏测量手段对三轴仪器中处于高温高压环境的试样内部环境参数进行感知。因此,作为岩石力学测试的关键一环,试样制备阶段亟须一种满足试样内部环境参数测量的试样制备模具。

试样制备模具是试样制备成型的关键,其决定了试样的规格、尺寸、制备质量和某些特殊功能需求,对后续岩石力学测试开展产生重要影响。目前,试样制备模具的设计种类丰富,产生了满足不同使用需求和功能的浇筑模具设计。针对现有模具大多是固定不变的状况,文献[3-4]提出了混凝土预制板尺寸可调的设计,适应了多尺寸试样的浇筑制备需求。针对模具操作复杂性和拆卸后试样表面质量难以控制的问题,文献[4-7]设计了便于拆卸的混凝土浇筑模具,提升了模具的操作便捷性和试样表面的制作质量。针对建筑结构的特殊构型的需求,文献[8-9]设计了能一体成型的梁板柱等建筑结构试样制备模具,满足了建筑结构的测试需求。针对某些特殊构型试样精度不高的问题,文献[10-12]设计和制作了满足特殊构型试样制备模具,提升了成型试样的精度。文献[13]提出了一种混凝土变形快速定位测量装置及方法,满足了混凝土应变片的精准定位测量需求。然而,上述制备成型的试样在后续岩石力学试验中仅仅局限于试样表面特性的探索研究,

或者仅能实现在钢筋界面的特性测量,能实现试样内部环境参数感知测量的试样制备模具设计鲜有报道。该试样制备模具可满足试样内部环境参数的可实时探知需求,并为岩石力学试验提供了由表及里的多维度参数测量通道,更准确地反映了岩石受力过程中的变形破坏特征,对于现阶段岩石力学试验研究,特别是亟须感知试样内部环境的深部岩石力学测试研究意义重大。

因此,针对上述问题,根据实验室现有的岩石力学测试系统和复杂试验条件下传感器布置设计经验^[14],本文设计和制作了一种满足试样内部环境参数测量的试样制备模具,并形成了一套内置传感器及其通道的浇筑方法,最终制备出若干内置传感器及其通道的混凝土试样,且内置传感器通过通道信号传输正常,表明该试样制备模具和方法能满足制备内部环境参数测量的试验要求。

1 设计背景

1.1 试验仪器

四川大学 MTS815 Flex Test GT 岩石力学实验系统如图 1 所示,为全数字计算机自动控制系统,轴向荷载 0~4 600 kN,轴向位移 ± 50 mm,轴向和环向变形引伸计量程分别为 $-4.0\sim 4.0$ mm、 $-2.5\sim 12.5$ mm,可完成试样高温高压三轴测试、单轴压缩、直接拉伸、间接拉伸、三点弯曲等多种试验项目,能够实现应力、应变等多种控制手段,该试验系统设备完毕,功能强大,控制精度高,可为制备成型的内置传感器试样提供岩石力学测试。



图 1 MTS815 Flex Test GT 岩石力学实验系统

1.2 现有试样的局限

根据国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics, ISRM)的建议方法^[15],岩石力学测试试样尺寸普遍加工成圆柱形(高度为直径的2~3倍),且岩石试样尽可能避免肉眼可见的缺陷,尽量保持完整。然而,由于要保证试样的完整性,现有岩石试样无法提前预设或后期钻孔设置内部传感器通道,都是在试样表面布置传感器进行力学测试,如图2所示,从而无法满足内部环境参数实时测量的测试需求。因此,有必要开发一套试样浇筑模具,能浇筑制备出内置传感器及其通道的试样,从而满足试样内外多维度参数实时测量的岩石力学测试需求,如试样单轴压缩测试、常规三轴压缩和高温三轴压缩测试等。

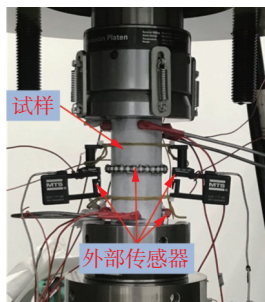


图2 外置传感器的岩石力学测试

2 装置开发

2.1 试样浇筑模具

本文所开发的一套内部预留传感器通道的试样浇筑模具,如图3所示。模具结构主要包括内部呈圆柱形的浇筑壳体、限位机构和限位套件。浇筑壳体可通过螺栓左右均匀拆分成两半,以便拆模取出试样,上下两端均开口,下端口处设置有密封底板。浇筑壳体的内部设置有用形成浇筑孔洞(即传感器通道)的浇筑杆(直径 $D=22\text{ mm}$),可满足大部分传感器尺寸($D\leq 20\text{ mm}$)需求,且避免了传感器尺寸对试样力学性质的影响。同时对浇筑壳体的上端口处设置有用限位固定浇筑杆的限位机构,可调节浇筑杆的位置和角度,进而实现传感器位置的调节。限位机构包括若干水平的定位件,若干定位件的一端均铰接在一起,定位件上设置有向下凸出的定位立柱,该可拆卸的定位立柱固定在浇筑壳体的上端口处,且定位件上设置有用穿设浇筑杆的定位孔,浇筑杆上套

设有防止浇筑杆下落的限位套件,限位套件与定位件的顶部相抵接。限位套件包括第一套筒和第二套筒,如图3所示。第一套筒端口处设置有呈圆台状的外螺纹,该外螺纹的侧面上设置有便于外螺纹端口收缩的开口;第二套筒内设置有与外螺纹相适配的内螺纹,配合拧紧的过程中可以收紧端口,从而夹紧浇筑杆。此外,浇筑壳体的上端口处设置有环形固定板,其沿浇筑壳体上端口的径向凸出,且在周向上设置有若干固定孔,其中定位立柱通过螺栓固定,其拆装方便,且每一个固定孔都是定位件的一个位置调节点。定位立柱的水平截面呈十字形,这样设置使定位立柱结构稳固,不易发生弯曲偏移。浇筑杆的延伸方向上设置有刻度线,有利于观察或计算浇筑杆插入浇筑壳体内部的深度。其结构简单、可靠性强且拆装方便。

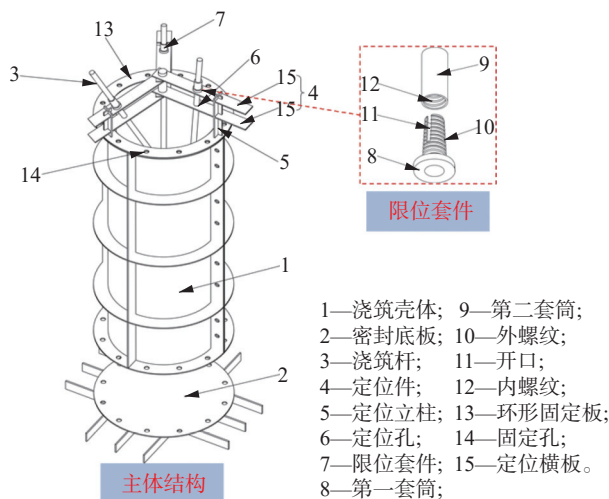


图3 内部预留传感器通道的试样浇筑模具设计

2.2 试样浇筑制备方法

浇筑前确定试样内置传感器的预设位置,一般在试样中心处、轴向1/4处、径向1/4处布置传感器监测效果最全面;再根据传感器的预留位置调节设置限位机构,包括设置水平定位件上浇筑杆所穿定位孔的位置,从而确定浇筑杆的布置角度;然后确定浇筑杆的插入深度,设置好浇筑杆上的刻度线;最后拧紧限位套件来固定浇筑杆。同时为防止试样端部预留孔导致应力集中与强度下降,需保证3个通道在端面的预留孔在直径为 D 的圆周上均匀分布,为此,3个浇筑杆的空间定位设置如图4所示。另外,用螺栓固定拼接密封底板,检查浇筑壳体的密封性。

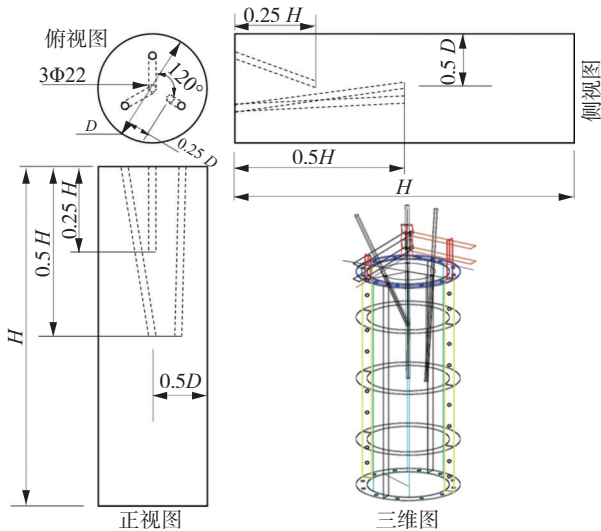


图 4 浇筑杆空间定位三视图和三维图(试样浇筑尺寸: 直径 D 、高度 H , 单位 mm)

浇筑过程中, 通过对浇筑壳体进行浇筑, 待试样浇筑完成后进行振捣, 初凝后抽出浇筑杆, 在浇筑杆预留的孔洞内放置传感器, 并始终保持传感器信号导线露头; 再对孔洞进行二次浇筑(相同配比), 期间用细杆在孔洞中间振捣尽可能排除

气泡; 然后拆卸浇筑壳体的固定螺栓, 对混凝土试样进行拆模和后期养护成型; 最终为内外多维度参数测量的岩石力学试验提供了可行的测试试样。

3 结果与分析

3.1 试样浇筑成型

基于这套试样浇筑模具, 采用配套的浇筑制备方法, 设置好限位机构和 3 个浇筑杆的空间位置, 通过泵送的方式将混凝土浇筑至该套模具中成型, 采用 C30 混凝土, 其成分及配比如表 1 所示。需要注意的是, 待试样浇筑完成初凝后, 抽出 3 个浇筑杆, 并在 3 个浇筑杆预留的孔洞内放置耐高压的温度传感器, 且保证其信号导线露头, 如图 5 所示, 再对孔洞进行二次浇筑, 从而实现将传感器设置在试样的内部, 且不影响试样的结构强度。整个试样浇筑制备过程如图 6 所示, 最终制备成型若干内置传感器及其信号传输通道的直径为 450 mm、高度为 1 400 mm 的圆柱形混凝土试样。

表 1 C30 混凝土成分及配比

成分	厂商	型号					
水泥	生产商: 四川峨胜水泥集团有限公司	注册商标: 峨胜					
	品种及强度等级: 普通硅酸盐水泥 12.5R	实测强度: —					
	产地: 广汉	表观密度: 2 560 kg/m ³					
细骨料	品种: 机制砂 细度模数: 2.8	含泥量/石粉含量: 1.9%					
	堆积密度: 1 480 kg/m ³	空隙率: 12%					
粗骨料	产地: 广汉	表观密度: 2 620 kg/m ³					
	品种: 碎石	最大粒径: 10.0 mm					
外加剂	堆积密度: 1 560 kg/m ³	空隙率: 40%					
	产品名称: 聚羧酸高性能减水剂	规格型号: SSJS-缓凝型					
掺合料	生产厂: 常青藤科技发展有限公司	掺量: 1.6%					
	产品名称: 粉煤灰	规格型号: F-11					
施工要求	生产厂: 四川嘉莱多矿产品销售有限公司	掺量: 16%					
	坍落度: 150~210 mm	拌合及捣鼓方式: 机拌机振					
	适用温度: 15~25 °C	输送方式: 泵送					
配合比	水胶比: 0.46	砂率: 46%					
	材料名称	水	水泥	细骨料	粗骨料	外加剂	掺合料
	单位 kg/m ³	172	315	853	1 001	6.0	69
重量比	0.16	0.81	2.28	2.68	0.016	0.16	

试样制备成型后, 将露出的传感器导线接入信号接收系统进行读取, 如图 7 所示, pt100 电阻

信号转化为电信号, 信号检测正常, 表明内置传感器及其信号传输通道可以正常工作。制备的试

样可在 MTS815 岩石分析系统等常用岩石力学测试设备上使用, 后续将端部传输导线通过自制垫片结构连接至仪器系统或独立连接至输出端, 从而满足了亟须感知试样内部环境变化的深部岩石力学测试等需求。

3.2 装置功能与效果

1) 目前岩石力学测试试样制备无法内部预设传感器及其信号传输通道, 从而无法有效满足试样内外环境参数同步实时测量的试验要求。而本文所开发的试样浇筑制备模具可加工出内置传感器及其信号传输通道的试样, 满足了试样内部环境参数的可实时探知需求, 并为岩石力学试验提供了由表及里的多维度参数测量通道, 可在岩石

单轴、常规三轴、高温高压三轴等岩石力学测试中应用。同时, 试样浇筑模具操作方便简单, 预设传感器位置可调, 具有较强的操作性和可行性。

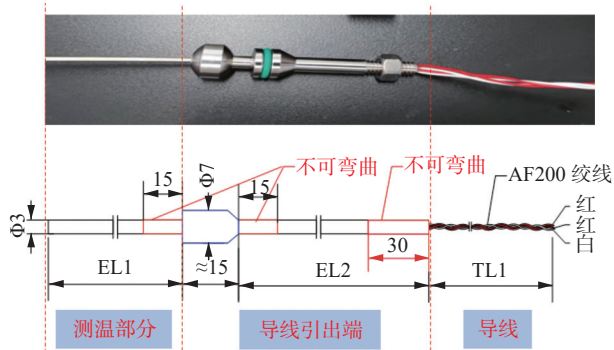


图5 内置温度传感器



图6 试样浇筑制备

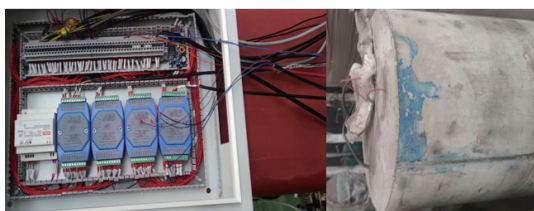


图7 信号传输检测

2) 内置温度传感器可耐高压环境, 避免了在挤压过程中失效, 保证了试样在变形破坏过程中温度传感器始终能正常工作。此外, 内置温度传感器的空间布局保证了内部温度多层次多点的全面监测。除了温度传感器, 还可以埋设压力、变形、湿度等尺寸合适的传感器, 满足更多测试需求。

3) 试样浇筑模具的壳体可根据所需试样尺寸进行更换调整, 满足多尺寸试样制备的需求。而其固定螺栓孔和对接螺栓孔尺寸均保持统一不变, 保证其能共用同一套限位机构和限位套件, 提高了零部件的利用效率。

4 结束语

随着深部资源开采和深地空间利用等工程活动日益普遍, 多维度多角度地采集实验参数数据对岩石力学测试技术发展意义重大。

本文开发设计的试样浇筑制备模具, 能成功制备内置传感器及其信号传输通道的试样, 有效满足了试样内外环境参数同步实时测量的需求, 为岩石力学测试提供了由表及里的多维度参数测

量通道, 不仅适用于简单试验条件下的岩石力学测试(如岩石单轴压缩和常规三轴压缩测试), 更能满足复杂环境下岩石力学多维度参数测量需求(如高温高压环境下渗透测试等)。另外, 这种内部埋深传感器实现内部参数同步测量的设计方式, 可拓展应用到均匀完整度较高的大尺寸天然岩石力学测试中。该装置的开发和使用将有利于更多高精度多维度岩石力学测试的顺利开展。

参考文献

- [1] 马立强, 李奇奇, 曹新奇, 等. 煤岩受压过程中内部红外辐射温度变化特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(3): 331-336.
- [2] 苗社强, 李和平, 陈刚. 高温高压下岩石热扩散系数的测量: 以玄武岩为例[J]. 高压物理学报, 2014, 28(1): 11-17.
- [3] 徐国凤. 一种混凝土浇筑模具: 213055286U[P]. 2021-04-27.
- [4] 傅振寰, 于德腾, 栾滢莹. 一种新型便于调节的混凝土浇筑模具: 212578844U[P]. 2021-02-23.
- [5] 王学亮. 一种便于拆卸的建筑混凝土浇筑模具: 212554331U[P]. 2021-02-19.
- [6] 郭荣鑫, 王越, 林志伟, 等. 易拆卸可快速调节尺寸的混凝土浇筑模具: 219054756U[P]. 2023-05-23.
- [7] 梁卫林. 一种混凝土浇筑模具: 209817422U[P]. 2019-12-20.
- [8] 郑超友, 曾仙明. 小箱梁混凝土浇筑模具: 2037-12840U[P]. 2014-07-16.
- [9] 林仁辉, 滕群, 蒋荣城, 等. 混凝土墙板的浇筑模具: 209408826U[P]. 2019-09-26.
- [10] 陈志勇, 杨国兵, 韩爱民, 等. 一种混凝土试件的成型模具: 202805387U[P]. 2013-03-20.
- [11] 徐亮. 模块化混凝土浇筑模具拼接结构: 2115-66293U[P]. 2020-09-25.
- [12] 陈前彬, 田红云, 杨菲. 构造柱混凝土浇筑模具及其浇筑方法: 113605688B[P]. 2023-04-07.
- [13] 朱田生, 刘长顺, 张成银, 等. 一种测量混凝土轴向拉伸变形的电阻应变片快速定位装置: 217954070U[P]. 2022-12-02.
- [14] 肖坤, 张朝鹏, 刘洋, 等. 适用于复杂试验条件下的声发射传感器布置装置设计[J]. 实验科学与技术, 2021, 19(3): 140-145.
- [15] ULUSAY R. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2015.

编辑 张俊