

超高真空度控制技术在三轴仪月壤制样和力学性能测试中的应用

Application of Ultra-High Vacuum Control Technology In Lunar Soil Sample Preparation and Mechanical Properties Test by Triaxial Apparatus

摘要：在当前的各种三轴测试仪中，对月壤和月壤模拟物的样品制备和力学性能测试还无法实现样品的真空制备、测试过程中的可变围压控制和样品的超真空度准确控制。为此本文提出了实现这些功能的解决方案，解决方案采用不同气体流量控制技术以及特殊样品机构来实现月壤样品负压吸膜压实制备和给样品提供高真空环境，采用正压气体压力控制技术实现月壤样品的可变围压控制。此解决方案可用于开发新型真空三轴仪和现有三轴仪的升级改造。

1. 问题的提出

随着我国探月工程的开展，对月球土壤和岩石的研究工作也在进一步深入开展，其中目前迫切需要开展的工作之一是在实验室模拟月球的高真空条件下，测试循环载荷对月壤（或月壤模拟物）密度的影响以及相应的应力-应变-强度特性。这些工作都需要在具有超高真空形成和控制能力的三轴仪上进行，在这种超高真空三轴仪上需要具体开展的研究内容如下：

- (1) 不同真空度条件下的样品压实及其密度变化研究。
- (2) 开发新型高真空型三轴仪或改造现有圆柱形三轴装置，用于在高真空下对压实月球模拟物的应力-应变-强度进行测试。
- (3) 循环压实模拟物的约束和三轴剪切试验。
- (4) 评估原位（围压）应力和高真空对压实模拟物响应的影响，确定变形和强度参数。

为了开展上述研究工作，特别是针对开发新型高真空三轴仪或对现有的三轴仪进行高真空技术改造，本文提出了相应的解决方案，解决方案的核心是设计新型的月壤样品卡具，并增加相应的真空压力配套系统，实现超高真空和正压围压的精密控制。

2. 解决方案

无论是开发新型高真空三轴测试仪，还是对现有三轴设备进行高真空技术改造，都需要实现以下几方面的功能和技术指标：

- (1) 可对月壤样品进行单独的抽真空，使包裹有橡胶膜的月壤样品处于模拟的月球真空环境中，真空度范围为 1×10^{-11} Torr~760Torr（绝对压力），真空度可在此范围内的任意设定点上控制，控制精度由真空计的测量精度确定。
- (2) 在包裹有橡胶膜的月壤样品外部空间内，提供高于一个大气压的气体压力用于形成围压，可在0~400kPa（表压）范围内的任意设定点上控制，控制精度优于1%。

为了实现上述三轴仪功能和技术指标，本文提出了相应的真空压力控制解决方案，解决方案的前提是三轴仪需具备独立的样品抽真空管路、样品顶部和底部的低漏率密封连接件以及密闭型的围压生成腔体。解决方案所设计的三轴仪和真空压力控制系统如图1所示。

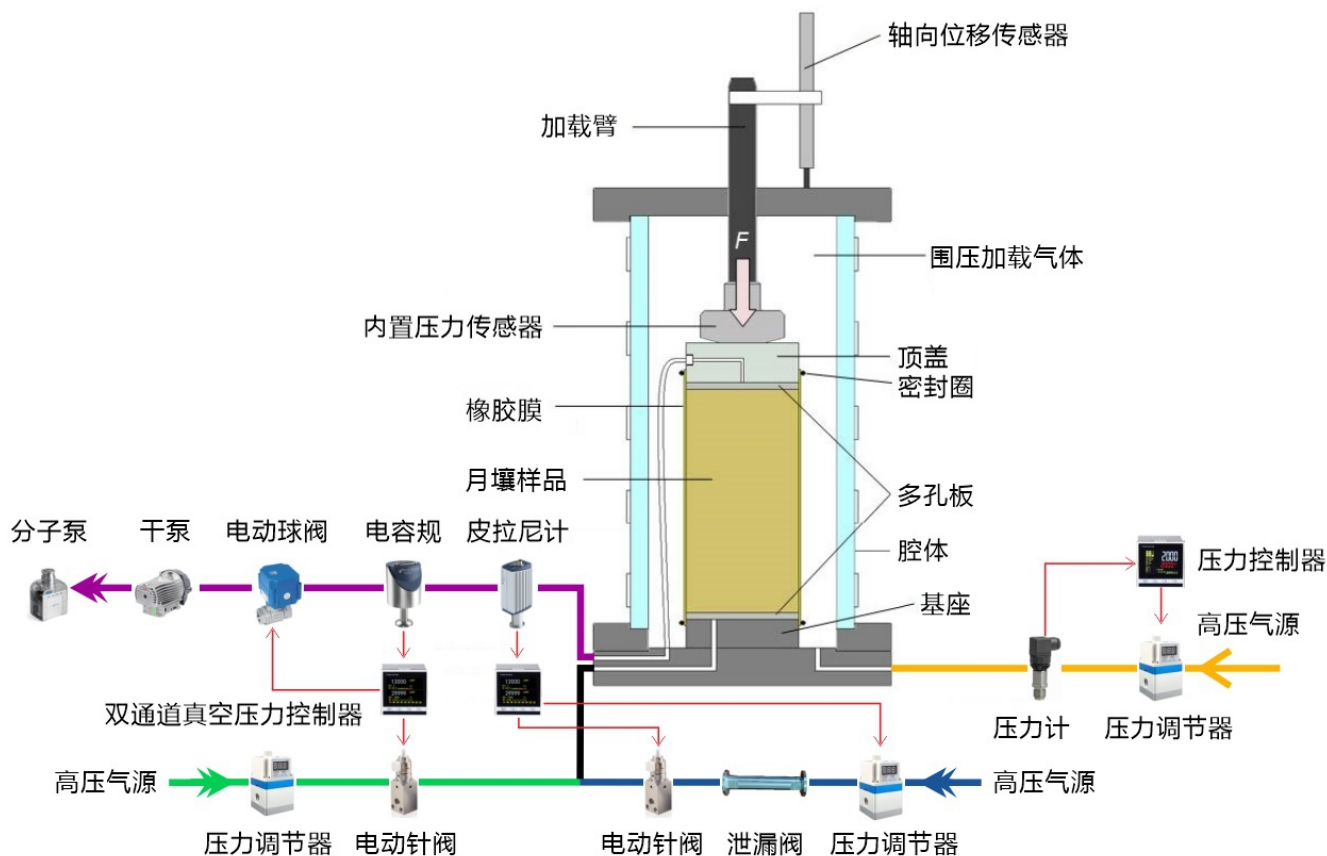


图1 三轴仪真空压力控制系统结构示意图

如图1所示，月壤样品通过外侧的橡胶膜、密封顶杆和基座、以及上下密封圈形成独立的真空密闭环境。在真空度控制过程中，由顶盖管路进行抽真空排气，由底部基座管路进气，通过排气和进气速率达到不同的动态平衡状态实现相应设定真空度的控制。

月壤样品上下两端的真空管路都经过三轴仪底部基座与外部的真空控制管路连接，所连接的真空排气控制管路用紫色线表示，排气控制管路上连接有由皮拉尼计、电容规、电动球阀、干泵和分子泵。

真空进气分为低真空和高真空两个控制管路，这两个管路并联且共用三轴仪底部基座的进气口，以分别负责大流量进气和微小流量进气。其中低真空进气控制管路用绿线表示，此管路中连接有电动针阀、压力调节器、高压气源和双通道真空压力控制器。高真空微量进气控制管路用蓝线表示，此管路中连接有电动针阀、泄漏阀、压力调节器、高压气源和双通道真空压力控制器。

为了给月壤样品四周提供可变的围压，需要在图1中的腔室内形成充气正压，即处于真空状态下的月壤样品被放置在一个气体压力可控的密闭腔室内。正压腔室同样也经过三轴仪底部基座通道与黄线所代表外部正压控制管路连接，此管路中连接有压力计、压力调节器、高压气源和双通道真空压力控制器。

(1) 低真空控制

所谓低真空是指仅靠干泵抽气所能达到的真空能力，一般是0.01~760Torr绝对真空度范围。在此低真空范围内的控制时，使用到了紫线所示的抽气管路和绿线所示的低真空控制管路，此时分子泵和蓝线高真空管路处于关闭状态。

在此低真空0.01~760Torr范围内，一般需要配置两个不同量程的电容规才能覆盖。因此，低真空范围内的控制，采用了双通道真空压力控制器，其中第一通道连接1000Torr量程的电容规和电动球阀，用来控制1~760Torr范围内的真空度；第二通道连接1Torr量程的电容规和电动针阀，用来控制0.01~1Torr范围内的真空度。

(2) 高真空控制

所谓高真空是指在低真空基础上还需分子泵继续抽气所能达到的真空能力，一般是指绝对真空度范围 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-11}$ Torr。在此高真空范围内的控制时，使用到了紫线所示的抽气管路和蓝线所示的高真空控制管路，此时干泵和绿线低真空管路处于关闭状态。

在此高真空范围内，可以根据精度要求选择不同的真空计，另外还需分别控制电动针阀和压力调节器。高真空范围内的控制同样也采用了双通道真空压力控制器，其中第一通道连接真空计和压力调节器进行真空度自动调节；第二通道连接电动针阀用于高真空控制管路的打开和关闭。

(3) 正压压力控制

正压压力控制是提供0~400kPa（表压）范围内的自动控制，使用了黄线所示的压力管路，并可以根据控制精度要求选择相应的压力计，同时采用了单通道真空压力控制器。在正压控制过程中，压力计、压力调节器和真空压力控制器组成闭环控制回路，可自动根据压力设定点或设定程序对进气压力进行减压定点控制或可编程控制。

3. 总结

综上所述，通过此解决方案可很好的实现三轴测试仪在高真空环境和可变围压条件下的测试，但在实际应用中还需注意以下两个方面：

(1) 通过上述真空控制功能，也可以进行圆柱形月壤样品的压实制作。即在颗粒状样品压实制作时，先将橡胶膜管放置在一个侧壁透气的金属圆管内，然后把低真空控制管路连接到腔体正压接口对腔体抽真空，通过橡胶膜外部的真空作用使橡胶膜紧密吸附在金属圆管内壁上，由此可方便的倒入颗粒月壤并进行压实，最终制作出非常规整的外部套有橡胶膜的圆柱状月壤样品。

(2) 在此方案中，仅指定了高真空度的有限范围和一路高真空控制管路。如果需要进一步扩展到更高真空度，还需根据所扩展的真空度选择不同的真空泵，由此还需改变高真空控制中的泄漏阀技术指标，或增加高真空控制管路数量，这样才能满足不同高真空度范围内的准确控制。

(3) 此解决方案所涉及的真空压力控制技术，结合流量测量技术后，也可拓展应用到月壤和各种土壤的渗透性能测试。