

一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台

技术领域

[0001] 本发明涉及一种固体充填采煤固体充填物料物理力学性质模拟测试实验平台及实验方法，尤其涉及一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台。

背景技术

[0002] 近年来，由于综合机械化固体充填采煤技术在控制覆岩移动，减小地表沉陷，保护地表建筑物等方面具有显著效果，成为解放“三下”压煤最有效的技术途径之一。固体充填采煤中所使用的固体充填物料主要包括矸石、粉煤灰、风积沙等无粘性散体材料，其被充入采空区后经夯实机构夯实成为承受覆岩载荷减小地表沉陷的主体，而夯实过后固体充填物料的抗剪强度、抗变形能力等物理力学性质是决定其承载性能保证充填质量的重要因素。

[0003] 目前对固体充填物料物理力学性质的研究主要集中在通过钢筒侧限压缩实验测试其抗压缩变形能力，而通过直剪实验对其抗剪强度的研究较少，虽然目前岩土工程领域有多种大型直剪实验设备，但却无法模拟固体充填物料在采空区的夯实过程，因此也无法研究固体充填物料经夯实后的抗剪切特性。

[0004] 申请号为 201210527053.X 的发明专利公布了一种固体充填采煤固体物料压实系统模拟实验平台，虽然可以在实验室模拟固体充填开采技术中固体物料的充填夯实过程，研究不同固体充填材料在侧限压缩条件下的应力应变特性以及在持续恒定压力下的蠕变特性，但却无法对经夯实后的固体充填物料进行直剪实验研究，同时也无法全程观察实验过程中物料颗粒的运动、破碎情况及剪切带发育过程。因此目前亟需研发一种不仅可以模拟固体充填物料在采空区的夯实过程而且可以对经夯实后的固体充填物料进行直剪实验研，同时可以观察实验过程中物料颗粒的运动、破碎情况及剪切带发育过程的大型可视化实验平台。

发明内容

[0005] 针对上述问题，本发明提供了一种固体充填采煤固体充填物料直剪实验平台及实验方法。本实验平台不仅可以模拟固体充填物料在采空区的夯实过程，而且可以对夯实过后的固体充填物料进行大型直剪实验和侧限压缩实验，并可以全程观察实验过程中物料颗粒的运动、破碎情况及剪切带发育过程。

[0006] 本发明是通过如下技术方案予以实现的。

[0007] 一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台，包括反力架、夯实机、垂直加载系统、剪切系统和数据监测系统。

[0008] 所述反力架由反力板及平台底座组成，所述反力板由四根立柱支撑于平台底座上方。

[0009] 所述夯实机由两个夯实机油缸、夯实机底座、水平推移油缸、滑道和夯实板组成；所述滑道设置在平台底座上，所述夯实机底座滚动或滑动装配在所述滑道上；所述两个夯实机油缸并排设置在夯实机底座上，夯实机油缸的缸体后端部铰接在夯实机底座上，夯实板固定在夯实机油缸缸杆的前端；所述水平推移油缸设置在两个夯实机油缸之间，水平推移油缸的缸体固定在所述平台底座上，水平推移油缸的杠杆前端连接夯实机底座；两个夯实机油缸均设有调高油缸，所述调高油缸一端铰接在夯实机底座，另一端铰接在夯实机油缸的缸体上，夯实机底座、调高油缸与夯实机油缸构成三角支撑。

[0010] 所述垂直加载系统由一级加载油缸、二级加载油缸、二级加载油缸底座、加载板、装料口油缸和装料板组成；所述一级加载油缸竖向设置在所述反力板的下方，一级加载油缸缸体安装在反力板上；所述二级加载油缸底座安装在一级加载油缸缸杆端部；所述二级加载油缸缸体安装在二级加载油缸底座上并竖直向下；所述二级加载油缸优选四个并呈正方形布置；所述加载板铰接在二级加载油缸缸杆端部；所述装料口油缸缸体安装在二级加载油缸底座上，位于二级加载油缸靠近夯实机的一侧，所述装料板铰接在装料口油缸缸杆端部；所述装料口油缸优选为两个。

[0011] 所述剪切系统由上剪切盒和下剪切盒组成，上剪切盒和下剪切盒均透明材质。

[0012] 所述上剪切盒由方形顶环和若干方形叠环组成。所述方形顶环三个边为整体结构，另一边为可拆卸顶环长条挡板，且顶环长条挡板位于夯实机一侧；所述方形顶环的四角设有套筒，四个套筒分别套装在四根立柱上。所述方形叠环三个边为整体结构，另一边为可拆卸扫尾挡板。方形顶环和各方形叠环依次叠加在一起构成上剪切盒，所述扫尾挡板位于夯实机一侧，各方形叠环与滑道平行的两个边（剪切方向）的上表面开有滚珠滑道，滚珠滑道内设有滚珠。

[0013] 所述下剪切盒为有底无顶盖的箱体，其三个侧面为整体，另一面由若干可拆卸的下剪切盒长条挡板叠加构成，下剪切盒长条挡板位于夯实机一侧。下剪切盒与滑道平行的两个面的顶部设滚珠滑道，滚珠滑道内设有滚珠。下剪切盒底部沿滑道方向设有滚轮。

[0014] 所述数据监测系统，包括安装在各夯实机油缸、二级加载油缸和装料口油缸上的压力传感器，安装在二级加载油缸底座与加载板之间的垂直位移传感器、安装在二级加载油缸底座与装料板之间的垂直位移传感器，以及安装在下剪切盒与夯实机相对的一面中部的水平位移传感器、上剪切盒各方形叠环与夯实机相对的一面的水平位移传感器组成。

[0015] 所述方形顶环、各方形叠环及下剪切盒间设有便捷卡扣，打开所有便捷卡扣，可取

消相互间的约束，并通过增减叠环的数量，可对不同高度固体充填物料进行大型直剪实验，关闭所有便捷卡扣，可启动相互间的约束，可对不同高度固体充填物料进行大型侧限压缩实验。

[0016] 固体充填采煤固体充填物料大型可视化直剪实验方法，包括以下步骤：

准备好本发明固体充填物料大型可视化直剪实验平台。

[0017] 步骤 1. 启动一级加载油缸使二级加载油缸底座下降，当最下面方形叠环的滚珠滑道与下剪切盒顶面的滚珠接触时停止，打开一级加载油缸限位保险栓，关闭下剪切盒与相邻方形叠环间的便捷卡扣，使上剪切盒与下剪切盒连接成稳定的整体结构。

[0018] 步骤 2. 启动二级加载油缸使加载板下降至指定高度。

[0019] 步骤 3. 按设计要求进行第 1 轮装料，之后将夯实机移近下剪切盒，对夯实机底座限位，按设计夯实角度及夯实力对固体充填物料进行第 1 轮夯实，直至物料顶部接触加载板。

[0020] 步骤 4. 重复步骤 3，进行第 2、3、4...轮装料和第 2、3、4...轮夯实，并随着装料的进行，夯实机逐步后退，同时从下到上适时安装下剪切盒长条挡板、扫尾挡板和顶环长条挡板，以防物料流出并保证夯实效果，当物料装满填平之后，所有挡板安装完毕，启动装料口油缸，使装料板下降，当装料板底面与加载板底面达到同一水平时停止。

[0021] 步骤 5. 开启所有压力传感器和垂直位移传感器，然后启动并协同控制装料口油缸和二级加载油缸，以位移控制的方式使装料板和加载板同步下降对固体充填物料进行加载，当垂直应力达到设定值时停止加载。

[0022] 步骤 6. 调整夯实机油缸达到水平状态，并移动夯实机底座使夯实机处于最佳加载位置，打开限位装置，通过连接器连接夯实机夯实板与下剪切盒，打开下剪切盒、各方形叠环及方形顶环间的便捷卡扣，取消相互间的约束，准备对固体充填物料进行大型直剪实验。

[0023] 步骤 7. 启动水平位移传感器，然后开启夯实机，以位移控制加载方式推动下剪切盒对固体充填物料进行剪切，上剪切盒与下剪切盒分界处固体充填物料受剪切力运动时依次带动上部叠环中的物料运动，当下剪切盒位移达到 20cm 时停止加载。

[0024] 步骤 8. 关闭所有传感器，收缩夯实机油缸将下剪切盒拉回原位，并人工辅助各方形叠环对齐，同时收缩二级加载油缸和装料口油缸将加载板和装料板拉回原位，关闭下剪切盒、各叠环及顶环间的便捷卡扣，再次启动相互间的约束，自上而下依次拆除顶环长条挡板、扫尾挡板和下剪切盒长条挡板，在侧面进行卸料，当物料被压实紧密不易卸料时可启动二级加载油缸对其施加冲击力以致松散。

[0025] 步骤 9. 卸料完成后，所有油缸及部件归复原位，以待下次实验。

[0026] 步骤 10. 对数据监测系统采集与存储的数据进行处理, 得到夯实后固体充填物料的剪切强度参数。

[0027] 本发明的有益效果是:

本实验平台通过各系统相互配合不仅可以模拟固体充填物料在采空区的夯实过程, 而且可以对夯实过后的固体充填物料进行大型直剪实验和侧限压缩实验, 得到夯实后固体充填物料的抗剪强度参数、应力应变特性以及蠕变特性等结果, 同时可以全程观察实验过程中物料的运动、破碎情况及剪切带发育过程。该平台构造简单、功能多样, 是深入研究夯实后固体充填物料力学性能及夯实工艺对充填物料力学性能影响的重要实验平台, 研究结果对指导固体充填材料选取、优化固体充填采煤工艺具有重要意义, 可在采矿工程及岩土工程技术领域广泛应用。

附图说明

[0028] 图 1 是本发明一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台初始状态整体结构示意图。

[0029] 图 2 是本发明一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台上料夯实过程示意图。

[0030] 图 3 是本发明一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台直剪实验过程示意图。

[0031] 图 4 是本发明一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台剪切系统整体结构示意图。

[0032] 图 5 是本发明一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台夯实机俯视图。

[0033] 图 6 是本发明一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台二级加载油缸及装料口油缸分布仰视图。

[0034] 图 7 是本发明一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台滚珠滑道平面图。

[0035] 图 8 是本发明一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台滚珠槽平面图。

[0036] 图 9 是本发明一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台扫尾挡板结构示意图。

[0037] 图 10 是本发明一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台便捷卡扣结构示意图。其中: a 图是主视图, b 图是侧视图。

[0038] 图中: 1、立柱; 2、反力板; 3、平台底座; 4、夯实机; 5、夯实机底座; 6、调高油缸; 7、水平推移油缸; 8、滑道; 9、一级加载油缸; 10、二级加载油缸; 11、二级加载油缸底座; 12、加载板; 13、装料口油缸; 14、装料板; 15、上剪切盒; 16、下剪切盒; 17、压力传感器; 18、垂直位移传感器; 19、方形叠环; 20、水平位移传感器; 21、方形顶环; 22、滚珠; 23、滚珠槽; 24、滚珠滑道; 25、下剪切盒长条挡板; 26、扫尾挡板; 27、顶环长条挡板; 28、套筒; 29、便捷卡扣; 30、固体充填物料; 31、连接器; 32、夯实板; 33、夯实机油缸; 34、数据传输线; 35、信号转换器; 36、计算机。

具体实施方式

[0039] 下面结合附图和具体实施方式对本发明进行详细说明。

[0040] 一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台，主要由反力架、夯实机、垂直加载系统、剪切系统和数据监测系统六大系统构成；反力架包括分布于平台四角的 4 个立柱 1、顶部的反力板 2 及平台底座 3，其相互间为高强度刚性连接。夯实机 4 包括夯实机底座 5、调高油缸 6、水平推移油缸 7、滑道 8。垂直加载系统包括一级加载油缸 9、二级加载油缸 10、二级加载油缸底座 11、加载板 12、装料口油缸 13 和装料板 14；剪切系统主要包括上剪切盒 15 和下剪切盒 16；数据监测系统包括压力传感器 17、垂直位移传感器 18、水平位移传感器 20、数据传输线 34、信号转换器 35、计算机 36；液压系统为各油缸提供动力。

[0041] 夯实机的 2 个夯实机油缸 33 并排固定在夯实机底座 5 上，夯实机底座 5 放置在滑道 8 上，滑道 8 和水平推移油缸 7 固定于平台底座 3。水平推移油缸 7 位于 2 个夯实机油缸中间，缸杆的端头通过销轴与夯实机底座 5 连接，能推移夯实机底座 5 在滑道 8 上移动。夯实机底座 5 具有限位装置，夯实机油缸加载前，打开限位装置将夯实机底座 5 固定于平台底座 3 上。调高油缸 6 一端铰接于夯实机底座 5，一端铰接于夯实机油缸 33 的缸体，可控制夯实机油缸 33 的摆动，摆角范围可实现其对固体充填物料 30 的全高度夯实。夯实机 4 在直剪实验开始时作为下剪切盒 16 水平推力的加载机构。

[0042] 垂直加载系统的一级加载油缸 9 一端通过螺栓固定于反力板 2，一端通过螺栓连接二级加载油缸底座 11。加载油缸 10 共四个，一端通过螺栓固定于二级加载油缸底座 11，一端通过销轴铰接于加载板 12，四个二级加载油缸 11 相对加载板 12 呈正方形对称分布，且工作时动作完全同步。装料口油缸 13 共两个且并排布置，一端通过螺栓固定于二级加载油缸底座 11，一端通过销轴铰接于装料板 14，两个装料口油缸 13 工作时动作完全同步。加载板 12 与装料板 14 同为 5cm 厚的高强度钢板加工而成，加载板 12 长×宽为 150cm×200cm，装料板 14 长×宽为 49.5cm×200cm，两者间在剪切方向留设 0.5cm 缝隙。

[0043] 剪切系统的上剪切盒 15 和下剪切盒 16 均由 5cm 厚的高强度透明钢化玻璃板加工而成，下剪切盒 16 为有底无盖的箱体，内部尺寸长×宽×高为 200 cm×200 cm×150 cm；上剪切盒 15 为方形框体，内部整体尺寸长×宽×高为 200 cm×200 cm×155.5 cm，由 50cm 高的方形顶环 21 和 10 个 10cm 高的方形叠环 19 组成。

[0044] 方形顶环 21、各方形叠环 19 及下剪切盒 16 间沿剪切方向的两侧均设有滚珠 22 以减小剪切过程中相互间的摩擦力，下剪切盒 16 与各方形叠环 19 上表面开有安装滚珠 22 的滚珠槽 23，各方形叠环 19 与方形顶环 21 的下表面开有滚珠滑道 24，滚珠槽 23 与滚珠滑道

24 与滚珠 22 尺寸相匹配,各部件间开封距离为 0.5cm。

[0045] 上剪切盒 15 与下剪切盒 16 靠近夯实机 4 的一面,下剪切盒 16 侧面在垂直方向上分解为四块 30cm 高的可拆卸下剪切盒长条挡板 25 和顶部 1 块 30cm 高的“L”型可拆卸扫尾挡板 26,下剪切盒长条挡板 25 两端开设有螺纹孔,可通过螺栓固定于箱体两侧。方形叠环 19 侧面为 10cm 高“L”型扫尾挡板 26,扫尾挡板 26 两端开设有螺纹孔,通过螺栓固定于叠环 19;方形顶环 21 侧面在垂直方向上分解为 2 块 25cm 高的可拆卸顶环长条挡板 27,顶环长条挡板 27 两端开设有螺纹孔,通过螺栓固定于方形顶环,方形顶环 21 通过四角的套筒 28 套住四个立柱 1 并用螺栓固定于二级加载油缸底座 11,使方形顶环 21 只能以立柱 1 为轨道在竖直方向运动。

[0046] 方形顶环 21、各方形叠环 19 及下剪切盒 16 间设有便捷卡扣 29,打开所有便捷卡扣 29,可取消相互间的约束,并通过增减叠环 19 的数量,可对不同高度固体充填物料 30 进行大型直剪实验,关闭所有便捷卡扣 29,可启动相互间的约束,可对不同高度固体充填物料 30 进行大型侧限压缩实验。

[0047] 数据监测系统,在每个夯实机油缸 33、二级加载油缸 10、装料口油缸 13 均安装有压力传感器 17,在二级加载油缸底座 11 与加载板 12 之间安装 4 个垂直位移传感器 18、二级加载油缸底座 11 与装料板 14 之间安装 2 个垂直位移传感器 18,在夯实机 4 对面下剪切盒 16 中部与平台底座 3 之间安装 1 个水平位移传感器 20,在夯实机(4)4 对面各方形叠环 19 中部与二级加载油缸底座 11 之间安装 10 个水平位移传感器 20,各传感器通过数据传输线 34 经信号转换器 35 与计算机 36 相连接,计算机 36 可对各传感器数据进行实时显示并存储。

[0048] 使用本发明实验平台进行固体充填物料大型可视化直剪实验,包括以下步骤:

a. 启动一级加载油缸 9 使二级加载油缸底座 11 下降,当最下面方形叠环 19 的滚珠滑道 24 与下剪切盒 16 的滚珠 22 接触时停止,打开一级加载油缸 9 限位保险栓,关闭下剪切盒 16 与相邻方形叠环 19 间的便捷卡扣 29,使上剪切盒 15 与下剪切盒 16 连接成稳定的整体结构。

[0049] b. 启动二级加载油缸 10 使加载板 12 下降至指定高度。

[0050] c. 按设计要求进行第 1 轮装料,之后将夯实机 4 移近下剪切盒 16,开启夯实机底座限位装置,按设计夯实角度及夯实力对固体充填物料 30 进行第 1 轮夯实,直至物料顶部接触加载板 12。

[0051] d. 重复 c 步骤,进行第 2、3、4...轮装料和第 2、3、4...轮夯实,并随着装料的进行,夯实机 4 逐步后退,同时从下到上适时安装下剪切盒长条挡板 25、扫尾挡板 26 和顶环长条

挡板 27，以防物料流出并保证夯实效果，当物料装满填平之后，所有挡板安装完毕，启动装料口油缸 13，使装料板 14 下降，当装料板 14 底面与加载板 12 底面达到同一水平时停止。

[0052] e. 开启所有压力传感器 17 和垂直位移传感器 18，然后启动并协同控制装料口油缸 13 和二级加载油缸 10，以位移控制的方式使装料板 14 和加载板 12 同步下降对固体充填物料 30 进行加载，当垂直应力达到设定值时停止加载。

[0053] f. 调整夯实机油缸 33 达到水平状态，并移动夯实机底座 5 使夯实机 4 处于最佳加载位置，打开限位装置，通过连接器 31 连接夯实机夯实板 32 与下剪切盒 16，打开下剪切盒 16、各方形叠环 19 及方形顶环 21 间的便捷卡扣 29，取消相互间的约束，准备对固体充填物料 30 进行大型直剪实验。

[0054] g. 启动水平位移传感器 20，然后开启夯实机油缸 33，以位移控制加载方式推动下剪切盒 16 对固体充填物料 30 进行剪切，上剪切盒 15 与下剪切盒 16 分界处固体充填物料 30 受剪切力运动时依次带动上部方形叠环 19 中的物料运动，当下剪切盒 16 位移达到 20cm 时停止加载。

[0055] h. 关闭所有传感器，收缩夯实机油缸 33 将下剪切盒 16 拉回原位，并人工辅助各方形叠环 19 对齐，同时收缩二级加载油缸 10 和装料口油缸 13 将加载板 12 和装料板 14 拉回原位，关闭下剪切盒 16、各方形叠环 19 及方形顶环 21 间的便捷卡扣 29，再次启动相互间的约束，自上而下依次拆除顶环长条挡板 27、扫尾挡板 26 和下剪切盒长条挡板 25，在侧面进行卸料，当物料被压实紧密不易卸料时可启动二级加载油缸 10 对其施加冲击力以致松散。

[0056] j. 卸料完成后，所有油缸及部件归复原位，以待下次实验。

[0057] k 对数据监测系统采集与存储的数据进行处理，得到夯实后固体充填物料 30 的剪切强度参数。

1. 一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台，包括反力架、夯实机、垂直加载系统、剪切系统和数据监测系统；其特征是：

所述反力架由反力板及平台底座组成，所述反力板由四根立柱支撑于平台底座上方；

所述夯实机由两个夯实机油缸、夯实机底座、水平推移油缸、滑道和夯实板组成；所述滑道设置在平台底座上，所述夯实机底座滚动或滑动装配在所述滑道上；所述两个夯实机油缸并排设置在夯实机底座上，夯实机油缸的缸体后端部铰接在夯实机底座上，夯实板固定在夯实机油缸缸杆的前端；所述水平推移油缸设置在两个夯实机油缸之间，水平推移油缸的缸体固定在所述平台底座上，水平推移油缸的缸杆前端连接夯实机底座；两个夯实机油缸均设有调高油缸，所述调高油缸一端铰接在夯实机底座，另一端铰接在夯实机油缸的缸体上，夯实机底座、调高油缸与夯实机油缸构成三角支撑；

所述垂直加载系统由一级加载油缸、二级加载油缸、二级加载油缸底座、加载板、装料口油缸和装料板组成；所述一级加载油缸竖向设置在所述反力板的下方，一级加载油缸缸体安装在反力板上；所述二级加载油缸底座安装在一级加载油缸缸杆端部；所述二级加载油缸缸体安装在二级加载油缸底座上并竖直向下；所述加载板铰接在二级加载油缸缸杆端部；所述装料口油缸缸体安装在二级加载油缸底座上，位于二级加载油缸靠近夯实机的一侧，所述装料板铰接在装料口油缸缸杆端部；

所述剪切系统由上剪切盒和下剪切盒组成；

所述上剪切盒由方形顶环和若干方形叠环组成；所述方形顶环三个边为整体结构，另一边为可拆卸顶环长条挡板，且顶环长条挡板位于夯实机一侧；所述方形顶环的四角设有套筒，四个套筒分别套装在四根立柱上；所述方形叠环三个边为整体结构，另一边为可拆卸扫尾挡板；方形顶环和各方形叠环依次叠加在一起构成上剪切盒，所述扫尾挡板位于夯实机一侧，各方形叠环与滑道平行的两个边的上表面开有滚珠滑道，滚珠滑道内设有滚珠；

所述下剪切盒为有底无顶盖的箱体，其三个侧面为整体，另一面由若干可拆卸的下剪切盒长条挡板叠加构成，下剪切盒长条挡板位于夯实机一侧；下剪切盒与滑道平行的两个面的顶部设滚珠滑道，滚珠滑道内设有滚珠；下剪切盒底部沿滑道方向设有滚轮；

所述数据监测系统，包括安装在各夯实机油缸、二级加载油缸和装料口油缸上的压力传感器，安装在二级加载油缸底座与加载板之间的垂直位移传感器、安装在二级加载油缸底座与装料板之间的垂直位移传感器，以及安装在下剪切盒与夯实机相对的一面中部的水平位移传感器、上剪切盒各方形叠环与夯实机相对的一面的水平位移传感器组成。

2. 根据权利要求 1 所述一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台，其特征是：所述二级

加载油缸优选四个并呈正方形布置。

3. 根据权利要求 1 所述一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台，其特征是：所述装料口油缸优选为两个。

4. 根据权利要求 1 所述一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台，其特征是：所述方形顶环与相邻方形叠环间、各方形叠环之间及最下部方形叠环与下剪切盒间均设有便捷卡扣。

5. 根据权利要求 1 所述一种固体充填物料大型可视化直剪实验平台，其特征是：所述，上剪切盒和下剪切盒均透明材质。

6. 一种使用权利要求 1-5 之一所述固体充填物料大型可视化直剪实验平台进行固体充填物料大型可视化直剪实验的方法，包括以下步骤：

步骤 1. 启动一级加载油缸使二级加载油缸底座下降，当最下面方形叠环的滚珠滑道与下剪切盒顶面的滚珠接触时停止，关闭下剪切盒与相邻方形叠环间的便捷卡扣，使上剪切盒与下剪切盒连接成整体结构；

步骤 2. 启动二级加载油缸使加载板下降至指定高度；

步骤 3. 按设计要求进行第 1 轮装料，之后将夯实机移近下剪切盒，对夯实机底座限位，按设计夯实角度及夯实力对固体充填物料进行第 1 轮夯实，直至物料顶部接触加载板；

步骤 4. 重复步骤 3，进行第 2、3、4…轮装料和第 2、3、4…轮夯实，并随着装料的进行，夯实机逐步后退，同时从下到上适时安装下剪切盒长条挡板、扫尾挡板和顶环长条挡板，当物料装满填平之后，所有挡板安装完毕，启动装料口油缸，使装料板下降，当装料板底面与加载板底面达到同一水平时停止；

步骤 5. 开启所有压力传感器和垂直位移传感器，然后启动并协同控制装料口油缸和二级加载油缸，以位移控制的方式使装料板和加载板同步下降对固体充填物料进行加载，当垂直应力达到设定值时停止加载；

步骤 6. 调整夯实机油缸达到水平状态，通过连接器连接夯实机夯实板与下剪切盒，打开下剪切盒、各方形叠环及方形顶环间的便捷卡扣，取消相互间的约束，准备对固体充填物料进行大型直剪实验；

步骤 7. 启动水平位移传感器，然后开启夯实机，以位移控制加载方式推动下剪切盒对固体充填物料进行剪切，上剪切盒与下剪切盒分界处固体充填物料受剪切力运动时依次带动上部叠环中的物料运动，当下剪切盒位移达到 20cm 时停止加载；

步骤 8. 关闭所有传感器，收缩夯实机油缸将下剪切盒拉回原位，并将各方形叠环对齐，同时收缩二级加载油缸和装料口油缸将加载板和装料板拉回原位，关闭下剪切盒、各方形叠环

及方形顶环间的便捷卡扣，再次启动相互间的约束，自上而下依次拆除顶环长条挡板、扫尾挡板和下剪切盒长条挡板，在侧面进行卸料；

步骤 9. 卸料完成后，所有油缸及部件归复原位，以待下次实验；

步骤 10. 对数据监测系统采集与存储的数据进行处理，得到夯实后固体充填物料的剪切强度参数。