



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 118940586 B

(45) 授权公告日 2025.04.11

(21) 申请号 202411114020.1

G06F 30/28 (2020.01)

(22) 申请日 2024.08.14

G06F 30/13 (2020.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

G06F 119/14 (2020.01)

申请公布号 CN 118940586 A

G06F 111/10 (2020.01)

G06F 113/08 (2020.01)

(43) 申请公布日 2024.11.12

(56) 对比文件

(73) 专利权人 深圳大学

CN 105512354 A, 2016.04.20

地址 518061 广东省深圳市南山区粤海街道南海大道3688号

CN 115935702 A, 2023.04.07

审查员 李邵飞

(72) 发明人 朱建波 孙文斌 马斌文 郑福润  
公维国 孙家鑫 孔骥(74) 专利代理机构 深圳市君胜知识产权代理事务  
所(普通合伙) 44268

专利代理师 陈专

(51) Int. Cl.

G06F 30/23 (2020.01)

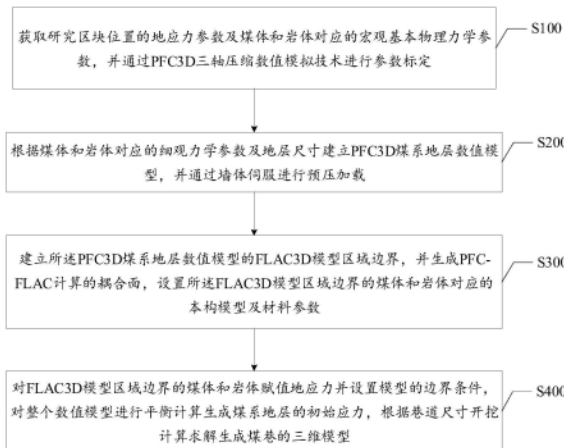
权利要求书2页 说明书11页 附图4页

## (54) 发明名称

一种PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法

## (57) 摘要

本发明公开了一种PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法,包括:获取研究区块位置的地应力参数及煤体和岩体对应的宏观基本物理力学参数,并通过PFC3D三轴压缩数值模拟技术进行参数标定;根据煤体和岩体对应的细观力学参数及地层尺寸建立PFC3D煤系地层数值模型,并通过墙体伺服进行预压加载;建立PFC3D煤系地层数值模型的FLAC3D模型区域边界,并生成PFC-FLAC计算的耦合面,设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的本构模型及材料参数;对FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体赋值地应力并设置模型的边界条件,对整个数值模型进行平衡计算生成煤系地层的初始应力,根据巷道尺寸开挖计算求解生成煤巷的三维模型。本发明实现了煤系地层及巷道的初始应力精准生成。



1. 一种PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法,其特征在于,包括:

获取研究区块位置的地应力参数及煤体和岩体对应的宏观基本物理力学参数,并通过PFC3D三轴压缩数值模拟技术进行参数标定;

根据煤体和岩体对应的细观力学参数及地层尺寸初步建立PFC3D煤系地层数值模型,并通过墙体伺服进行预压加载;

建立所述PFC3D煤系地层数值模型的FLAC3D模型区域边界,并生成PFC-FLAC计算的耦合面,设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的本构模型及材料参数;

对所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体赋值地应力并设置模型的边界条件,对整个数值模型进行平衡计算生成煤系地层的初始应力,根据巷道尺寸开挖计算求解生成煤巷的三维模型。

2. 根据权利要求1所述的PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法,其特征在于,所述研究区块位置的地应力参数包括:第一主应力大小和方位角、第二主应力大小和方位角以及第三主应力大小和方位角;

所述煤体和岩体对应的宏观基本物理力学参数包括:弹性模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度、密度、内摩擦角以及粘结力。

3. 根据权利要求1所述的PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法,其特征在于,所述通过PFC3D三轴压缩数值模拟技术进行参数标定,包括:

根据计算设备的运算能力和计算结果的精度影响因素选用煤体和岩体对应的颗粒粒径;

基于平行粘结的接触本构模型建立所述PFC3D三轴压缩数值模型,并采用试错法和线性回归法得到颗粒粒径对应的宏观和细观参数转化关系;

根据所述宏观和细观参数转化关系确定所述煤体和岩体对应的细观力学参数;其中,所述煤体和岩体对应的细观力学参数包括:有效接触模量、刚度比、平行粘结强度、内摩擦角以及摩擦系数。

4. 根据权利要求2所述的PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法,其特征在于,所述根据煤体和岩体对应的细观力学参数及地层尺寸初步建立PFC3D煤系地层数值模型,并通过墙体伺服进行预压加载,包括:

根据所述地层尺寸生成对应的煤体颗粒和岩体颗粒,并建立所述PFC3D煤系地层数值模型;

通过分组命令分别设置煤层和岩层对应的组名,并根据所述煤体和岩体对应的细观力学参数对所述PFC3D煤系地层数值模型施加胶结,设置所述PFC3D煤系地层数值模型对应的重力加速度参数;

采用所述墙体伺服将所述PFC3D煤系地层数值模型预压加载至所述第三主应力的数值,将所有颗粒的位移和速度清零。

5. 根据权利要求1所述的PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法,其特征在于,所述建立所述PFC3D煤系地层数值模型的FLAC3D模型区域边界,并生成PFC-FLAC计算的耦合面,设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的本构模型及材料参数,包括:

根据计算设备的运算能力和计算结果的精度影响因素划分煤体和岩体对应的结构单元网格,建立煤体和岩体结构单元的FLAC3D模型区域边界;

根据墙体耦合命令在所述PFC3D煤系地层数值模型的球体颗粒与FLAC3D模型区域边界的结构单元表面创建耦合作用媒介,形成所述PFC-FLAC计算的耦合面;

设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的本构模型及材料参数;其中,所述煤体和岩体对应的本构模型及材料参数包括:煤体本构模型、岩体本构模型以及各本构模型对应的杨氏模量、泊松比、内聚力、抗拉强度、内摩擦角和密度。

6. 根据权利要求1所述的PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法,其特征在于,所述对所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体赋值地应力并设置模型的边界条件,包括:

根据初始化命令设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的地应力值,并根据地应力场的分布情况在所述FLAC3D模型区域边界表面施加相同大小的应力边界条件并保持恒定。

7. 根据权利要求1所述的适用于PFC3D中煤系地层初始应力及煤巷三维模型的生成方法,其特征在于,所述对整个数值模型进行平衡计算生成煤系地层的初始应力,根据巷道尺寸开挖计算求解生成煤巷的三维模型,包括:

通过计算平衡命令对整个数值模型进行平衡计算,生成煤系地层的初始应力;

将所有颗粒的位移和速度清零,根据巷道断面形状和尺寸分别删除对应的PFC3D颗粒和FLAC3D单元,通过计算平衡命令对整个数值模型进行平衡计算生成煤巷的三维模型。

8. 一种PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成装置,其特征在于,包括:

参数标定模块,用于获取研究区块位置的地应力参数及煤体和岩体对应的宏观基本物理力学参数,并通过PFC3D三轴压缩数值模拟技术进行参数标定;

数值模型建立模块,用于根据煤体和岩体对应的细观力学参数及地层尺寸初步建立PFC3D煤系地层数值模型,并通过墙体伺服进行预压加载;

耦合面建立模块,用于建立所述PFC3D煤系地层数值模型的FLAC3D模型区域边界,并生成PFC-FLAC计算的耦合面,设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的本构模型及材料参数;

平衡计算模块,用于对所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体赋值地应力并设置模型的边界条件,对整个数值模型进行平衡计算生成煤系地层的初始应力,根据巷道尺寸开挖计算求解生成煤巷的三维模型。

9. 一种终端,其特征在于,包括:处理器以及存储器,所述存储器存储有PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成程序,所述PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成程序被所述处理器执行时用于实现如权利要求1-7中任意一项所述的PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法的操作。

10. 一种计算机可读存储介质,其特征在于,所述计算机可读存储介质存储有PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成程序,所述PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成程序被处理器执行时用于实现如权利要求1-7中任意一项所述PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法的操作。

## 一种PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及数值模拟试验技术领域,尤其涉及的是一种PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法。

### 背景技术

[0002] 基于PFC3D(一种三维颗粒流体模拟软件)的离散元的数值计算方法,能够很好地模拟非连续变形与细观破坏的过程,已被广泛应用于复杂煤岩巷道力学问题。为了使用PFC3D对煤巷工程案例进行计算,首先需要用户进行三维建模和设置模型参数条件,随后根据地应力条件进行模型的初始应力平衡计算,最后进行开挖平衡计算生成煤巷的三维模型。

[0003] 目前,PFC3D通常采用墙体单元的伺服平衡方法计算初始应力的施加过程,该方法在均质材料中初始应力模拟效果较好,但由于实际工程中煤体和岩体的材料参数相差较大,特别是煤体的弹性模量远小于岩体,这将导致煤系地层中煤体和岩体内的初始应力生成结果产生较大差异,进而影响煤巷三维模型生成的精准性。同时,有用户采用颗粒膜方法进行柔性三轴加载,由于颗粒膜的弹性模量比较小,该方法下颗粒膜会出现大的变形,同样达不到初始应力模拟施加的效果,也会影响煤巷三维模型的生成。

[0004] 由于,煤巷三维模型的生成及后续动载扰动等工况分析均以初始应力平衡为前提,如果煤系地层的初始应力生成结果精准性较差,将会严重影响后续煤巷的破坏模式和分析计算的结果。

[0005] 因此,现有技术还有待改进。

### 发明内容

[0006] 本发明要解决的技术问题在于,针对现有技术缺陷,本发明提供一种PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法,以解决现有的PFC3D中应力平衡方法对于煤系地层及巷道的初始应力生成结果准确性差的问题。

[0007] 本发明解决技术问题所采用的技术方案如下:

[0008] 第一方面,本发明提供PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法,包括:

[0009] 获取研究区块位置的地应力参数及煤体和岩体对应的宏观基本物理力学参数,并通过PFC3D三轴压缩数值模拟技术进行参数标定;

[0010] 根据煤体和岩体对应的细观力学参数及地层尺寸初步建立PFC3D煤系地层数值模型,并通过墙体伺服进行预压加载;

[0011] 建立所述PFC3D煤系地层数值模型的FLAC3D模型区域边界,并生成PFC-FLAC计算的耦合面,设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的本构模型及材料参数;

[0012] 对所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体赋值地应力并设置模型的边界条件,对整个数值模型进行平衡计算生成煤系地层的初始应力,根据巷道尺寸开挖计算求解生成煤巷的三维模型。

[0013] 在一种实现方式中,所述研究区块位置的地应力参数包括:第一主应力大小和方位角、第二主应力大小和方位角以及第三主应力大小和方位角;

[0014] 所述煤体和岩体对应的宏观基本物理力学参数包括:弹性模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度、密度、内摩擦角以及粘结力。

[0015] 在一种实现方式中,所述通过PFC3D三轴压缩数值模拟技术进行参数标定,包括:

[0016] 根据计算设备的运算能力和计算结果的精度影响因素选用煤体和岩体对应的颗粒粒径;

[0017] 基于平行粘结的接触本构模型建立所述PFC3D三轴压缩数值模型,并采用试错法和线性回归法得到颗粒粒径对应的宏观和细观参数转化关系;

[0018] 根据所述宏观和细观参数转化关系确定所述煤体和岩体对应的细观力学参数;其中,所述煤体和岩体对应的细观力学参数包括:有效接触模量、刚度比、平行粘结强度、内摩擦角以及摩擦系数。

[0019] 在一种实现方式中,所述根据煤体和岩体对应的细观力学参数及地层尺寸初步建立PFC3D煤系地层数值模型,并通过墙体伺服进行预压加载,包括:

[0020] 根据所述地层尺寸生成对应的煤体颗粒和岩体颗粒,并初步建立所述PFC3D煤系地层数值模型;

[0021] 通过分组命令分别设置煤层和岩层对应的组名,并根据所述煤体和岩体对应的细观力学参数对所述PFC3D煤系地层数值模型施加胶结,设置所述PFC3D煤系地层数值模型对应的重力加速度参数;

[0022] 采用所述墙体伺服将所述PFC3D煤系地层数值模型预压加载至所述第三主应力的数值,将所有颗粒的位移和速度清零。

[0023] 在一种实现方式中,所述建立所述PFC3D煤系地层数值模型的FLAC3D模型区域边界,并生成PFC-FLAC计算的耦合面,设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的本构模型及材料参数,包括:

[0024] 根据计算设备的运算能力和计算结果的精度影响因素划分煤体和岩体对应的结构单元网格,建立煤体和岩体结构单元的FLAC3D模型区域边界;

[0025] 根据墙体耦合命令在所述PFC3D煤系地层数值模型的球体颗粒与FLAC3D模型区域边界的结构单元表面创建耦合作用媒介,形成所述PFC-FLAC计算的耦合面;

[0026] 设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的本构模型及材料参数;其中,所述煤体和岩体对应的本构模型及材料参数包括:煤体本构模型、岩体本构模型以及各本构模型对应的杨氏模量、泊松比、内聚力、抗拉强度、内摩擦角和密度。

[0027] 在一种实现方式中,所述对所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体赋值地应力并设置模型的边界条件,对整个数值模型进行平衡计算生成煤系地层的初始应力,包括:

[0028] 根据初始化命令设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的地应力值,并根据地应力场的分布情况在所述FLAC3D模型区域边界表面施加相同大小的应力边界条件并保持恒定;

[0029] 通过计算平衡命令对整个数值模型进行平衡计算,生成煤系地层的初始应力。

[0030] 在一种实现方式中,根据巷道尺寸开挖计算求解生成煤巷的三维模型,包括:

[0031] 将所有颗粒的位移和速度清零,根据巷道断面形状和尺寸分别删除对应的PFC3D

颗粒和FLAC3D单元,通过计算平衡命令对整个数值模型进行平衡计算生成煤巷的三维模型。

[0032] 第二方面,本发明提供一种PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成装置,包括:

[0033] 参数标定模块,用于获取研究区块位置的地应力参数及煤体和岩体对应的宏观基本物理力学参数,并通过PFC3D三轴压缩数值模拟技术进行参数标定;

[0034] 数值模型建立模块,用于根据煤体和岩体对应的细观力学参数及地层尺寸初步建立PFC3D煤系地层数值模型,并通过墙体伺服进行预压加载;

[0035] 耦合面建立模块,用于建立所述PFC3D煤系地层数值模型的FLAC3D模型区域边界,并生成PFC-FLAC计算的耦合面,设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的本构模型及材料参数;

[0036] 平衡计算模块,用于对所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体赋值地应力并设置模型的边界条件,对整个数值模型进行平衡计算生成煤系地层的初始应力,根据巷道尺寸开挖计算求解生成煤巷的三维模型。

[0037] 第三方面,本发明提供一种终端,包括:处理器以及存储器,所述存储器存储有PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成程序,所述PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成程序被所述处理器执行时用于实现如第一方面所述的PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法的操作。

[0038] 第四方面,本发明还提供一种介质,所述介质为计算机可读存储介质,所述介质存储有PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成程序,所述PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成程序被处理器执行时用于实现如第一方面所述的PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法的操作。

[0039] 本发明采用上述技术方案具有以下效果:

[0040] (1) 本发明通过耦合建模兼顾了计算效率和建模精细度,保证了内嵌颗粒体模型和外部有限差分网格模型变形协调,为三维煤层巷道建模方法提供了新的建模思路。

[0041] (2) 本发明通过对颗粒模型的预压加载和对单元模型设置地应力值并在模型表面施加应力边界的方法,能够快速有效实现煤系地层初始应力的平衡模拟。

[0042] (3) 本发明通过耦合面的不均匀变形,可以实现煤体和岩体内的初始应力分布均匀,实现PFC3D中煤系地层的初始应力场精准生成,更符合实际深埋煤矿工程的应力模拟。

[0043] (4) 本发明生成的煤巷三维模型可以实现局部应力集中、不连续变形与破坏的效果,可去除颗粒模型的边界效应。

## 附图说明

[0044] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图示出的结构获得其他的附图。

[0045] 图1是本发明中PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法的流程图。

[0046] 图2是本发明中煤体岩体参数标定曲线图的示意图。

[0047] 图3是本发明中传统墙体伺服加载的煤系地层初始应力监测数据示意图。

- [0048] 图4是本发明中三维煤系地层的几何模型剖面示意图。
- [0049] 图5是本发明中煤系地层初始应力监测数据的示意图。
- [0050] 图6是本发明中煤巷的几何模型示意图。
- [0051] 图7是本发明的一种实现方式中终端的功能原理图。
- [0052] 本发明目的实现、功能特点及优点将结合实施例,参照附图做进一步说明。

### 具体实施方式

[0053] 为使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚、明确,以下参照附图并举实施例对本发明进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

#### [0054] 示例性方法

[0055] 目前,PFC3D通常采用墙体单元的伺服平衡方法计算初始应力的施加过程,该方法在均质材料中初始应力模拟效果较好,但由于实际工程中煤体和岩体的材料参数相差较大,特别是煤体的弹性模量远小于岩体,这将导致煤系地层中煤体和岩体内的初始应力生成结果产生较大差异,进而影响煤巷三维模型生成的精准性。同时,有用户采用颗粒膜方法进行柔性三轴加载,由于颗粒膜的弹性模量比较小,该方法下颗粒膜会出现大的变形,同样达不到初始应力模拟施加的效果,也会影响煤巷三维模型的生成。

[0056] 由于,煤巷三维模型的生成及后续动载扰动等工况分析均以初始应力平衡为前提,如果煤系地层的初始应力生成结果精准性较差,将会严重影响后续煤巷的破坏模式和分析计算的结果。针对以上的技术问题,本发明实施例中提供了一种PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法,该方法通过获取研究区块位置的地应力参数及煤体和岩体对应的宏观基本物理力学参数,并通过PFC3D三轴压缩数值模拟技术进行参数标定;根据煤体和岩体对应的细观力学参数及地层尺寸初步建立PFC3D煤系地层数值模型,并通过墙体伺服进行预压加载;建立所述PFC3D煤系地层数值模型的FLAC3D模型区域边界,并生成PFC-FLAC计算的耦合面,设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的本构模型及材料参数;对所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体赋值地应力并设置模型的边界条件,对整个数值模型进行平衡计算生成煤系地层的初始应力,根据巷道尺寸开挖计算求解生成煤巷的三维模型;因此,本发明实施例可以实现煤体和岩体内的初始应力分布均匀,实现PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力精准生成,更符合实际深埋煤矿工程的应力模拟。

[0057] 如图1所示,本发明实施例提供一种PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法,包括以下步骤:

[0058] 步骤S100,获取研究区块位置的地应力参数及煤体和岩体对应的宏观基本物理力学参数,并通过PFC3D三轴压缩数值模拟技术进行参数标定。

[0059] 在本实施例中,基于PFC3D(一种三维颗粒流体模拟软件)实现煤系地层及巷道的初始应力精准生成,在通过PFC3D进行三维建模之前,需要收集研究区块位置的地应力参数以及煤体和岩体的宏观基本物理力学参数。

[0060] 由于地应力状态的复杂性和多变性,同一矿井不同点地应力的状态存在差异,研究区块位置煤巷的地应力资料包括但不限于:最大主应力大小和方位角(即第一主应力大小和方位角)、中间主应力大小和方位角(即第二主应力大小和方位角)及最小主应力大小

和方位角(即第三主应力大小和方位角)。

[0061] 作为一个示例,本实施例中的研究区块的最大主应力为水平应力,其值大小约为26MPa,方向为 $79.98^{\circ} \sim 82.87^{\circ}$ ;中间主应力的方位角集中在 $327.25^{\circ} \sim 347.94^{\circ}$ ,其值大小约为17MPa;最小主应力的方位角集中在 $169.85^{\circ} \sim 175.78^{\circ}$ ,应力值大小在14MPa;垂直应力大小为17MPa。

[0062] 在本实施例中,对于煤体和岩体对应的宏观基本物理力学参数,主要是获取研究区块顶底板岩层和煤层的宏观力学参数,包括但不限于:弹性模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度、密度、内摩擦角和粘结力。

[0063] 由于,煤矿开采领域中常常构建五层岩层模型,即基本顶、直接顶、煤层、直接底和基本底,因此,本实施例需要获取这五层岩层的宏观基本物理力学参数,该区块代表性煤岩的宏观力学参数如表1所示。

[0064] 表1代表性煤岩的宏观力学参数

| [0065] |     | 单轴抗压<br>强度/MPa | 抗拉强度<br>/MPa | 弹性模量<br>/GPa | 粘聚力<br>/MPa | 内摩擦角<br>/ $^{\circ}$ | 泊松比  | 密度   |
|--------|-----|----------------|--------------|--------------|-------------|----------------------|------|------|
|        | 基本顶 | 34.8           | 1.9          | 19           | 20.8        | 26.4                 | 0.24 | 2500 |
|        | 直接顶 | 39.6           | 1.7          | 14.4         | 10.1        | 35.8                 | 0.2  | 2500 |
|        | 煤层  | 33.9           | 2.0          | 1.9          | 8.5         | 35.6                 | 0.2  | 1500 |
|        | 直接底 | 34.8           | 1.9          | 19           | 20.8        | 26.4                 | 0.24 | 2500 |
|        | 基本底 | 41.3           | 1.7          | 4.1          | 3.6         | 30.9                 | 0.1  | 2500 |

[0066] 在本实施例中,在获取研究区块位置的地应力参数及煤体和岩体对应的宏观基本物理力学参数后,即可通过PFC3D三轴压缩数值模拟技术进行参数标定,从而实现煤体和岩体对应的宏观参数与细观参数之间的转换。

[0067] 具体地,在本实施例的一种实现方式中,步骤S100包括以下步骤:

[0068] 步骤S101,根据计算设备的运算能力和计算结果的精度影响因素选用煤体和岩体对应的颗粒粒径;

[0069] 步骤S102,基于平行粘结的接触本构模型建立所述PFC3D三轴压缩数值模型,并采用试错法和线性回归法得到颗粒粒径对应的宏观和细观参数转化关系;

[0070] 步骤S103,根据所述宏观和细观参数转化关系确定所述煤体和岩体对应的细观力学参数。

[0071] 在本实施例中,在通过PFC3D三轴压缩数值模拟技术进行参数标定的过程中,首先需要综合考虑计算机的运算能力和计算结果的精度影响因素,选用合理的颗粒粒径,其中,所述颗粒粒径包括煤体颗粒和岩体颗粒对应的颗粒粒径;如果颗粒过小会降低计算效率,如果颗粒过大则会降低计算结果的精度。

[0072] 对此,本实施例中基于平行粘结的接触本构模型建立PFC3D三轴压缩数值模型,采用试错法和线性回归法得到颗粒粒径对应的宏观与细观参数转化关系;进而,根据所述宏观与细观参数转化关系即可确定所述煤体和岩体对应的细观力学参数;其中,所述煤体和岩体对应的细观力学参数包括但不限于:有效接触模量、刚度比、平行粘结强度、内摩擦角以及摩擦系数。

[0073] 具体地,通过PFC3D三轴压缩数值模拟技术模拟分析的重点是煤岩巷道周边的情况,PFC3D煤系地层只需要建立三层围岩数值模型,因此,PFC3D参数标定只需要考虑直接顶

底板岩层和煤层的细观参数即可。

[0074] 作为一个示例,综合考虑计算机的运算能力和计算结果的精度影响,本实施例颗粒最小半径为0.1m,半径比为1.5。基于平行粘结的接触本构模型建立PFC3D三轴压缩数值模型,采用试错法和线性回归法得到颗粒粒径对应的宏细观参数转化关系,具体的煤岩颗粒细观参数如表2所示,煤体岩体参数标定曲线如图2所示。

[0075] 表2煤岩标定细观参数

| 序号 | 细观参数                               | 顶板岩层 | 煤层   | 底板岩层 |
|----|------------------------------------|------|------|------|
| 1  | 颗粒有效接触模量 $E_c/\text{GPa}$          | 12   | 1.5  | 17   |
| 2  | 颗粒法向-切向刚度比 $k_n/k_s$               | 1.2  | 1.2  | 1.3  |
| 3  | 平行黏结有效接触模量 $\bar{E}_c/\text{GPa}$  | 12   | 1.5  | 17   |
| 4  | 平行黏结法向-切向刚度比 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ | 1.2  | 1.2  | 1.3  |
| 5  | 平行黏结法向强度 $Pb\_ten/\text{MPa}$      | 40.5 | 33.0 | 36.0 |
| 6  | 平行黏结切向强度 $Pb\_coh/\text{MPa}$      | 27.0 | 22.0 | 24.0 |
| 7  | 内摩擦角 $Pb\_fa$                      | 30   | 30   | 30   |
| 8  | 颗粒摩擦系数 $\mu$                       | 0.5  | 0.5  | 0.5  |

[0077] 通过对比表1和标定曲线可知,标定出的煤岩力学特性均符合煤岩宏观参数,表明了数值模拟细观参数的合理性。

[0078] 如图1所示,本发明实施例提供一种PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法,包括以下步骤:

[0079] 步骤S200,根据煤体和岩体对应的细观力学参数及地层尺寸初步建立PFC3D煤系地层数值模型,并通过墙体伺服进行预压加载。

[0080] 在本实施例中,在标定得到煤体和岩体对应的细观力学参数后,根据煤岩地层尺寸生成煤体颗粒和岩体颗粒,建立煤系地层三维数值模型,并通过墙体伺服进行预压加载。

[0081] 具体地,在本实施例的一种实现方式中,步骤S200包括以下步骤:

[0082] 步骤S201,根据所述地层尺寸生成对应的煤体颗粒和岩体颗粒,并初步建立所述PFC3D煤系地层数值模型;

[0083] 步骤S202,通过分组命令分别设置煤层和岩层对应的组名,并根据所述煤体和岩体对应的细观力学参数对所述PFC3D煤系地层数值模型施加胶结,设置所述PFC3D煤系地层数值模型对应的重力加速度参数;

[0084] 步骤S203,采用所述墙体伺服将所述PFC3D煤系地层数值模型预压加载至所述第三主应力的数值,将所有颗粒的位移和速度清零。

[0085] 在本实施例中,根据所述地层尺寸生成对应的煤体颗粒和岩体颗粒,并初步建立所述PFC3D煤系地层数值模型,然后,使用group命令(即分组命令,用于创建组)对煤层和岩层设置不同组名,根据煤体和岩体对应的细观力学参数对所述PFC3D煤系地层数值模型施加胶结。

[0086] 可以理解的是,本实施例中的坐标系规定为:约定z轴为铅锤方向,垂直于巷道走向的x方向为水平切向,平行于巷道走向的y方向为水平径向。对PFC3D煤系地层数值模型施加胶结后,设置颗粒的重力加速度沿水平方向的分量为0,沿铅锤方向的分量为 $9.8\text{m/s}^2$ ,方向指向下方。

[0087] 作为一个示例,在初步建立PFC3D煤系地层数值模型时,可在PFC3D中建立一个三维的三层煤岩模型,从上至下三层岩层的组名分别是immediate roof(直接顶)、coal(煤层)和immediate floor(直接底);所述PFC3D煤系地层数值模型的整体尺寸为10m×10m×10m,从上至下的厚度分别是4m、3m和3m,颗粒最小半径为0.1m,半径比为1.5,模型共包含99422个颗粒。

[0088] 根据上述步骤S103标定的煤体和岩体对应的细观力学参数,对PFC3D煤系地层数值模型施加胶结,同时设置对应颗粒的重力加速度沿铅锤方向的分量为 $9.8\text{m/s}^2$ ,方向指向下方。根据获取的研究区块位置煤巷的地应力参数可知,研究区块位置的最大主应力为垂直于巷道走向,初始应力应为26MPa,中间主应力为垂直应力,初始应力应为17MPa,最小主应力平行于巷道走向,初始应力应为14MPa。

[0089] 进一步地,在设置所述PFC3D煤系地层数值模型对应的重力加速度参数后,采用墙体单元伺服预压加载至最小主应力(即第三主应力)的数值,该方法既可以释放模型内部的较大内应力,也可以减少后续初始应力加载平衡的时间。为避免颗粒速度对后续耦合产生影响,模型预压加载平衡后需要将颗粒位移和速度清零。

[0090] 作为一个示例,本实施例通过墙体伺服进行预压加载的过程中,首先采用传统墙体伺服方法,由于PFC3D模型应力监测通常采用测量球进行监测,本实施例测量球半径为0.4m,分别在顶底板岩层和煤层中心位置设置三个测量球,模型平衡后测量球的煤系地层中煤体和岩体初始应力监测数据如图3所示,其中1、2和3号测量球分别为顶板岩层、煤层和底板岩层的测量球。从图3中可以看出煤体和岩体只有垂直应力生成符合实际地应力条件,岩体内的水平应力远高于煤体。

[0091] 如图1所示,本发明实施例提供一种PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法,包括以下步骤:

[0092] 步骤S300,建立所述PFC3D煤系地层数值模型的FLAC3D模型区域边界,并生成PFC-FLAC计算的耦合面,设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的本构模型及材料参数。

[0093] 在本实施例中,采用PFC3D嵌入的FLAC3D软件(一种仿真计算软件)建立有限差分网格,在PFC3D颗粒模型的外围生成zone(FLAC3D软件的基本单元)单元作为区域边界,保证内嵌颗粒体模型尺寸和有限差分网格内部空域尺寸匹配。在建立有限差分网格时,同时综合考虑计算机的运算能力和计算结果的精度影响因素,选用合理的网格尺寸;如果网格划分过小会降低计算效率,如果网格划分过大则会降低计算结果的精度。

[0094] 由于,PFC3D始终以大应变模式运行,因此需要激活结构元素的大应变模式,即打开model largestrain on命令(即模型大应变命令)。特别的,简单的网格划分可以通过FLAC3D生成zone单元后,删除内部的PFC3D颗粒计算区域直接实现,复杂的网格划分则可以通过第三方软件建模后,导入FLAC3D软件实现。

[0095] 具体地,在本实施例的一种实现方式中,步骤S300包括以下步骤:

[0096] 步骤S301,根据计算设备的运算能力和计算结果的精度影响因素划分煤体和岩体对应的结构单元网格,建立煤体和岩体结构单元的FLAC3D模型区域边界;

[0097] 步骤S302,根据墙体耦合命令在所述PFC3D煤系地层数值模型的球体颗粒与FLAC3D模型区域边界的结构单元表面创建耦合作用媒介,形成所述PFC-FLAC计算的耦合

面;

[0098] 步骤S303,设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的本构模型及材料参数;其中,所述煤体和岩体对应的本构模型及材料参数包括:煤体本构模型、岩体本构模型以及各本构模型对应的杨氏模量、泊松比、内聚力、抗拉强度、内摩擦角和密度。

[0099] 本实施例中采用FLAC3D建立煤系地层的区域边界,具体为,PFC3D是主控制程序,调用FLAC3D的函数库实现平台整合,从而为连续-非连续耦合分析技术提供了统一化分析平台,因此首先需要通过用户界面中的tools load flac3d (FLAC3D嵌入工具)菜单项加载。

[0100] 考虑到本实施例的网格划分较为简单,可以直接依次创建三维的五层岩层模型,从上至下五层岩层的组名分别是main roof (基本顶)、immediate roof (直接顶)、coal (煤层)、immediate floor (直接底)和main floor (基本底),模型整体尺寸为20m×20m×20m,从上至下的厚度分别是5m、4m、3m、3m和5m,生成整体网格单元后删除内部PFC颗粒计算区域尺寸的单元,保证内嵌颗粒体模型尺寸和有限差分网格内部空域尺寸匹配。

[0101] 在本实施例中,在建立PFC-FLAC计算的耦合面的过程中,通过wall-zone create命令(即墙体耦合命令,媒介创建命令)在球体颗粒和zone单元表面创建耦合作用媒介wall(墙体)来进行数据交换传输,形成所述PFC-FLAC计算的耦合面,耦合面能够实现煤岩不均匀变形加载。特别的,为避免无法形成连续的耦合面,可以增加skip-errors命令(错误跳过命令)来忽略耦合面产生的错误。本实施例中的三维煤系地层的几何模型如图4所示,图4中为能看清内部模型结构,该处采用了剖面视角。

[0102] 进一步地,在设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的本构模型及材料参数时,选择煤体和岩体对应的本构模型,考虑到FLAC3D计算区域不存在较大破坏,故岩体均采用弹性本构,其参数根据表1岩体宏观参数直接输入;具体地,各本构模型的参数包括杨氏模量、泊松比、内聚力、抗拉强度、内摩擦角和密度。

[0103] 本实施例通过耦合建模兼顾了计算效率和建模精细度,保证了内嵌颗粒体模型和外部有限差分网格模型变形协调,为三维煤层巷道建模方法提供了新的建模思路。

[0104] 如图1所示,在本发明实施例的一种实现方式中,PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法还包括以下步骤:

[0105] 步骤S400,对所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体赋值地应力并设置模型的边界条件,对整个数值模型进行平衡计算生成煤系地层的初始应力,根据巷道尺寸开挖计算求解生成煤巷的三维模型。

[0106] 在本实施例中,可通过initial命令(即初始化命令,初始状态的设置命令)设置模型地应力值并在模型表面施加应力边界,能够有效实现构造应力场的应力施加模拟。

[0107] 具体地,在本实施例的一种实现方式中,步骤S400包括以下步骤:

[0108] 步骤S401,根据初始化命令设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的地应力值,并根据地应力场的分布情况在所述FLAC3D模型区域边界表面施加相同大小的应力边界条件并保持恒定。

[0109] 作为本实施例中的一个示例,首先采用initial命令设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的地应力值,其中,x方向初始应力应为26MPa,y方向初始应力应为14MPa,z方向初始应力应为17MPa;然后根据地应力场的分布情况,在所述FLAC3D模型区域边界表面施加相同大小的应力边界条件并保持恒定,在此过程中本构模型不设速度边界条

件,因此在本构模型表面施加的应力边界可以认为是本构模型最外层单元受到的应力,最后设置单元的重力加速度沿水平方向的分量为0,沿铅直方向的分量为 $9.8\text{m/s}^2$ ,方向指向下方。

[0110] 具体地,在本实施例的一种实现方式中,步骤S400还包括以下步骤:

[0111] 步骤S402,通过计算平衡命令对整个数值模型进行平衡计算,生成煤系地层的初始应力;

[0112] 步骤S403,将所有颗粒的位移和速度清零,根据巷道断面形状和尺寸分别删除对应的PFC3D颗粒和FLAC3D单元,通过计算平衡命令对整个数值模型进行平衡计算生成煤巷的三维模型。

[0113] 在本实施例中,对整个模型进行平衡计算具体包括:采用model solve命令(即计算平衡命令,模型求解命令)对整个模型进行平衡计算,平衡结果可以认为是构造应力场和自重应力场相叠加的结果,从而实现煤系地层初始应力场的生成。由于FLAC3D模型没有位移边界条件,区域边界在平衡过程中可能会产生较大的位移,因此需要在模型达到平衡后将所有节点速度清零。特别的,当颗粒和单元数量超过一定量时,会使平衡变得困难,所以可以降低平衡条件,不平衡力达到 $1 \times 10^{-4}$ 即可认为达到平衡停止条件。模型平衡后测量球的煤系地层中煤体和岩体初始应力监测数据如图5所示,通过对比传统墙体伺服方法可知,本发明方法可以实现煤体和岩体内的初始应力分布均匀,水平应力和垂直应力均符合实际初始应力条件。

[0114] 进一步地,本实施例中根据巷道尺寸开挖计算求解具体包括:根据巷道断面形状和尺寸采用ball delete命令和zone delete命令分别删除PFC3D颗粒和FLAC3D单元实现巷道开挖,然后对整个模型进行平衡计算生成煤巷的三维模型。

[0115] 本实施例中巷道断面形状为矩形,断面尺寸大小为 $3\text{m} \times 3\text{m}$ ,首先为避免颗粒速度对开挖产生影响,模型需要将颗粒位移和速度清零,然后采用ball delete命令(即球颗粒删除命令)和zone delete命令(即单元删除命令)分别删除PFC3D颗粒和FLAC3D单元实现巷道开挖,最后对整个模型进行平衡计算,生成的煤巷三维模型如图6所示。

[0116] 本实施例通过上述技术方案达到以下技术效果:

[0117] (1) 本发明通过耦合建模兼顾了计算效率和建模精细度,保证了内嵌颗粒体模型和外部有限差分网格模型变形协调,为三维煤层巷道建模方法提供了新的建模思路。

[0118] (2) 本发明通过对颗粒模型的预压加载和对单元模型设置地应力值并在模型表面施加应力边界的方法,能够快速有效实现煤系地层初始应力的平衡模拟。

[0119] (3) 本发明通过耦合面的不均匀变形,可以实现煤体和岩体内的初始应力分布均匀,实现PFC3D中煤系地层的初始应力场精准生成,更符合实际深埋煤矿工程的应力模拟。

[0120] (4) 本发明生成的煤巷三维模型可以实现局部应力集中、不连续变形与破坏的效果,可去除颗粒模型的边界效应。

[0121] 示例性设备

[0122] 基于上述实施例,本发明还提供一种PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成装置,包括:

[0123] 参数标定模块,用于获取研究区块位置的地应力参数及煤体和岩体对应的宏观基本物理力学参数,并通过PFC3D三轴压缩数值模拟技术进行参数标定;

[0124] 数值模型建立模块,用于根据煤体和岩体对应的细观力学参数及地层尺寸初步建立PFC3D煤系地层数值模型,并通过墙体伺服进行预压加载;

[0125] 耦合面建立模块,用于建立所述PFC3D煤系地层数值模型的FLAC3D模型区域边界,并生成PFC-FLAC计算的耦合面,设置所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的本构模型及材料参数;

[0126] 平衡计算模块,用于对所述FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体赋值地应力并设置模型的边界条件,对整个数值模型进行平衡计算生成煤系地层的初始应力,根据巷道尺寸开挖计算求解生成煤巷的三维模型。

[0127] 本实施例通过上述技术方案达到以下技术效果:

[0128] (1) 本发明通过耦合建模兼顾了计算效率和建模精细度,保证了内嵌颗粒体模型和外部有限差分网格模型变形协调,为三维煤层巷道建模方法提供了新的建模思路。

[0129] (2) 本发明通过对颗粒模型的预压加载和对单元模型设置地应力值并在模型表面施加应力边界的方法,能够快速有效实现煤系地层初始应力的平衡模拟。

[0130] (3) 本发明通过耦合面的不均匀变形,可以实现煤体和岩体内的初始应力分布均匀,实现PFC3D中煤系地层的初始应力场精准生成,更符合实际深埋煤矿工程的应力模拟。

[0131] (4) 本发明生成的煤巷三维模型可以实现局部应力集中、不连续变形与破坏的效果,可去除颗粒模型的边界效应。

[0132] 基于上述实施例,本发明还提供一种终端,其原理框图可以如图7所示。

[0133] 该终端包括:通过系统总线连接的处理器、存储器、接口、显示屏以及通讯模块;其中,该终端的处理器用于提供计算和控制能力;该终端的存储器包括存储介质以及内存储器;该存储介质存储有操作系统和计算机程序;该内存储器为存储介质中的操作系统和计算机程序的运行提供环境;该接口用于连接外部设备;该显示屏用于显示相应的信息;该通讯模块用于与云端服务器或其他设备进行通讯。

[0134] 该计算机程序被处理器执行时用以实现PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法的操作。

[0135] 本领域技术人员可以理解的是,图7中示出的原理框图,仅仅是与本发明方案相关的部分结构的框图,并不构成对本发明方案所应用于其上的终端的限定,具体的终端可以包括比图中所示更多或更少的部件,或者组合某些部件,或者具有不同的部件布置。

[0136] 在一个实施例中,提供了一种终端,其中,包括:处理器和存储器,存储器存储有PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成程序,PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成程序被处理器执行时用于实现如上的PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法的操作。

[0137] 在一个实施例中,提供了一种存储介质,其中,存储介质存储有PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成程序,PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成程序被处理器执行时用于实现如上的PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法的操作。

[0138] 本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分流程,是可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成,计算机程序可存储于一非易失性存储介质中,该计算机程序在执行时,可包括如上述各方法的实施例的流程。其中,本发明所提供的各实施例中所使用的对存储器、存储、数据库或其它介质的任何引用,均可包括非易失性和易失性存储器。

[0139] 综上,本发明提供了一种PFC3D中煤系地层及巷道的初始应力生成方法,包括:获取研究区块位置的地应力参数及煤体和岩体对应的宏观基本物理力学参数,并通过PFC3D三轴压缩数值模拟技术进行参数标定;根据煤体和岩体对应的细观力学参数及地层尺寸初步建立PFC3D煤系地层数值模型,并通过墙体伺服进行预压加载;建立PFC3D煤系地层数值模型的FLAC3D模型区域边界,并生成PFC-FLAC计算的耦合面,设置FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体对应的本构模型及材料参数;对FLAC3D模型区域边界的煤体和岩体赋值地应力并设置模型的边界条件,对整个数值模型进行平衡计算生成煤系地层的初始应力,根据巷道尺寸开挖计算求解生成煤巷的三维模型。本发明实现了煤系地层及巷道的初始应力精准生成。

[0140] 应当理解的是,本发明的应用不限于上述的举例,对本领域普通技术人员来说,可以根据上述说明加以改进或变换,所有这些改进和变换都应属于本发明所附权利要求的保护范围。

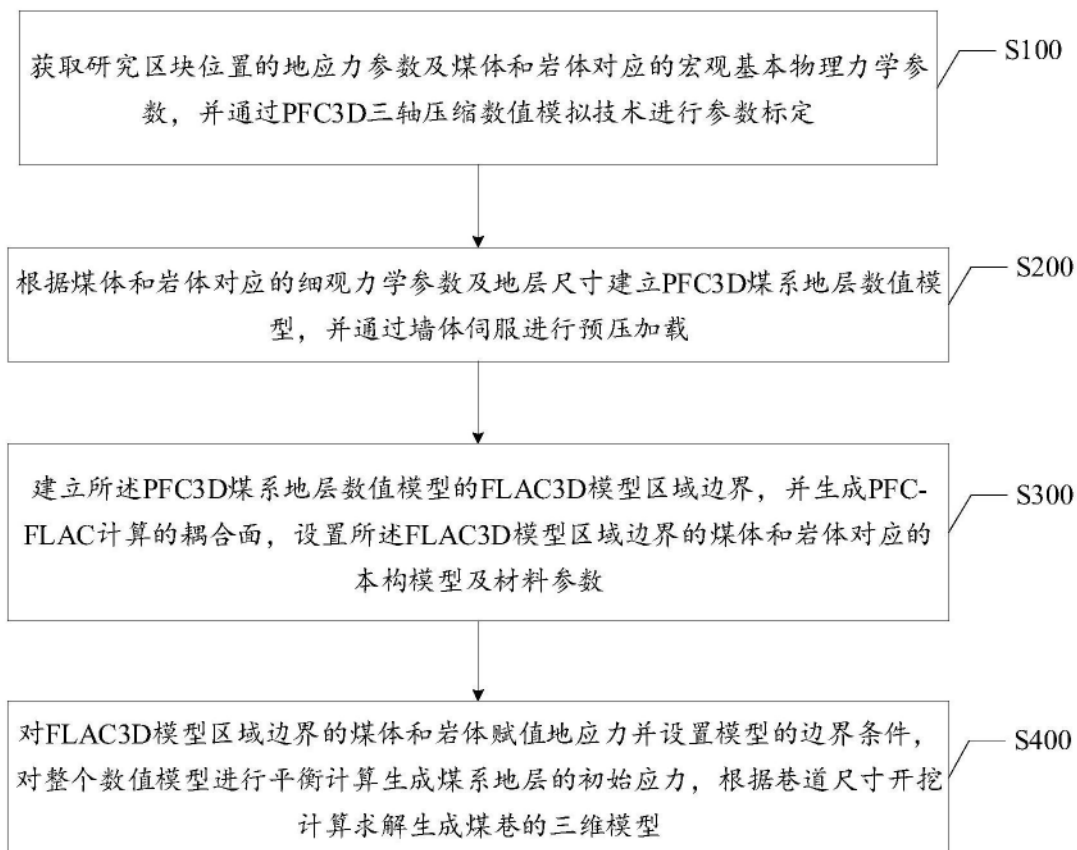


图1

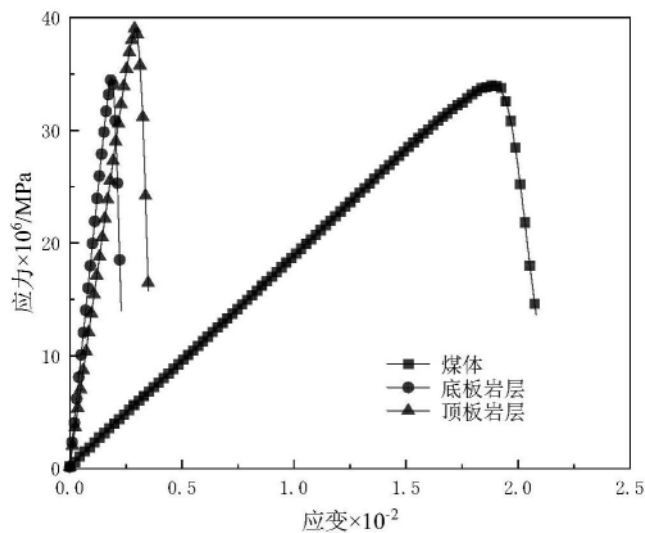


图2

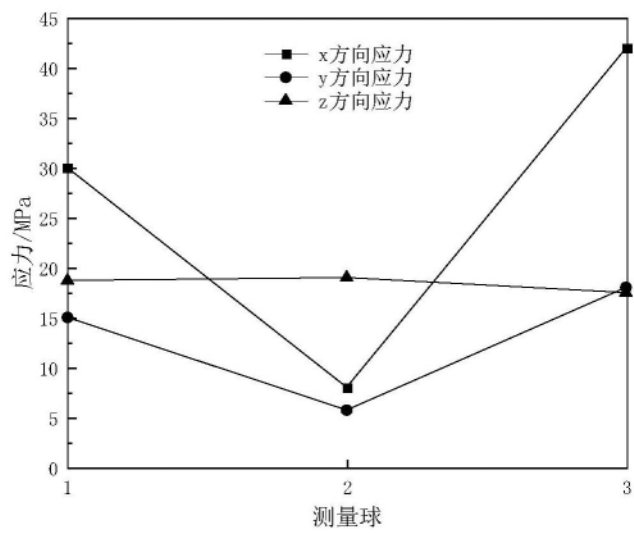


图3

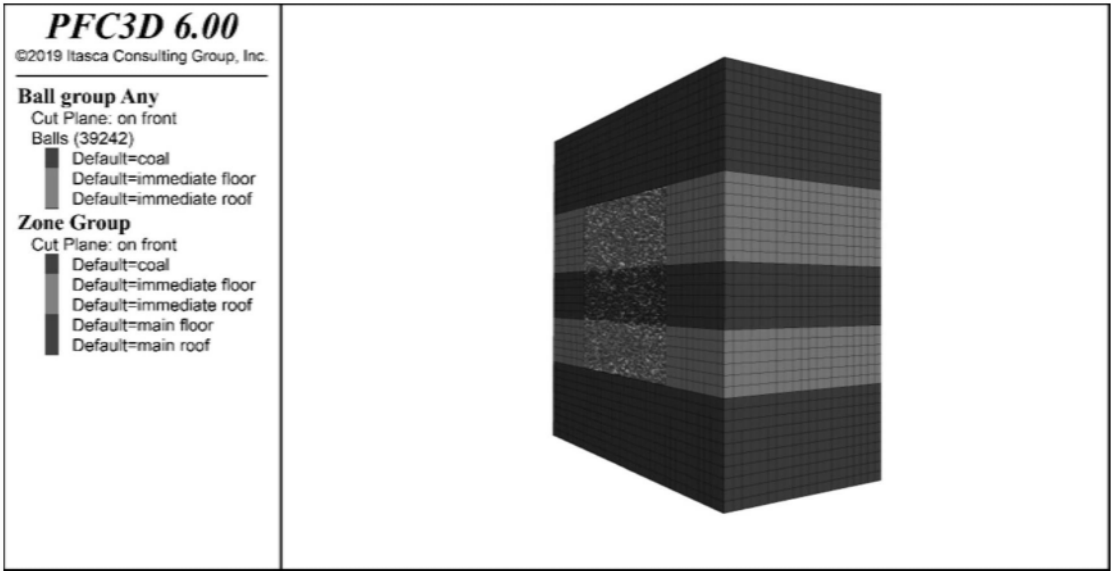


图4

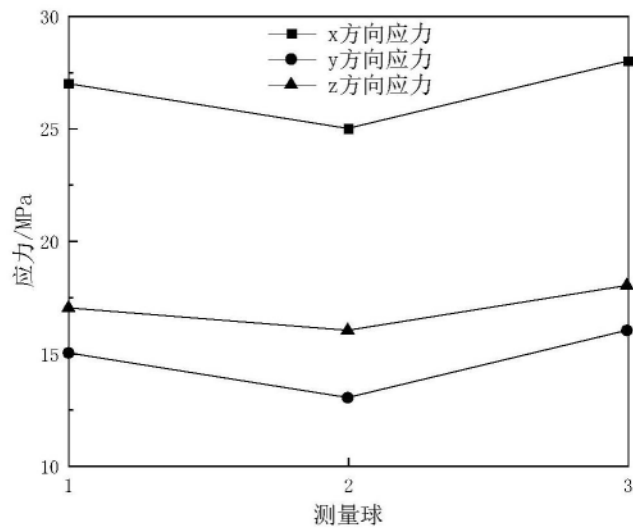


图5

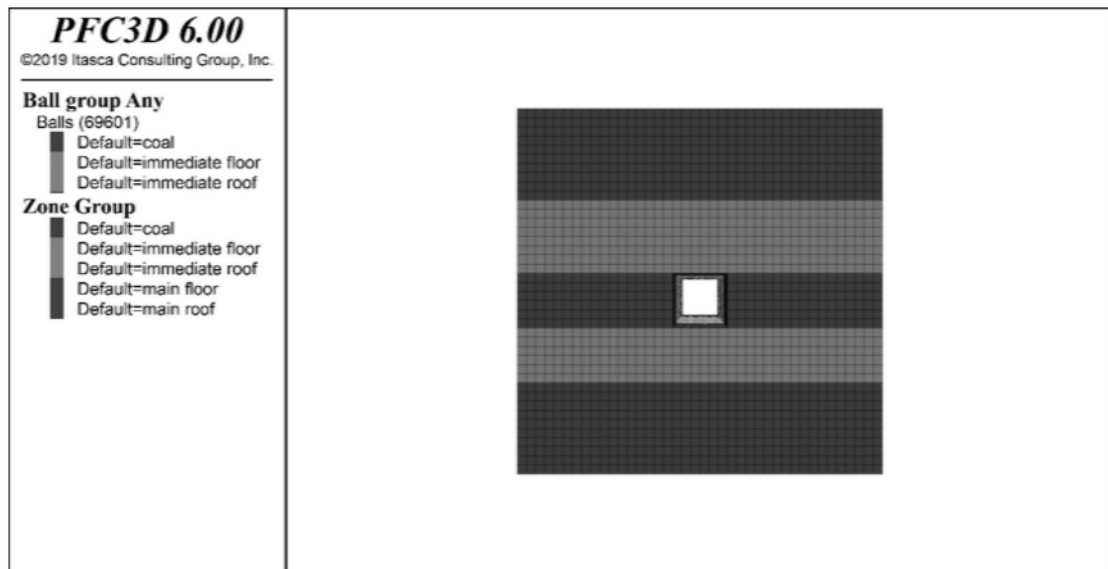


图6

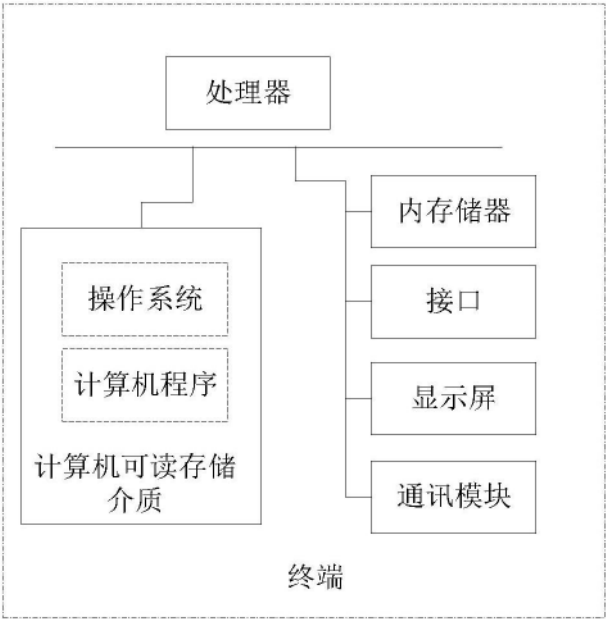


图7