

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2019 年 1 月 17 日 (17.01.2019)



(10) 国际公布号
WO 2019/010859 A1

(51) 国际专利分类号:
G06F 17/50 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2017/106883

(22) 国际申请日: 2017 年 10 月 19 日 (19.10.2017)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201710570950.1 2017 年 7 月 13 日 (13.07.2017) CN

(71) 申请人: 山东大学 (SHANDONG UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国山东省济南市历下区经十路
17923 号, Shandong 250061 (CN)。

(72) 发明人: 季忠 (JI, Zhong); 中国山东省济南市历
下区经十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。
刘韧 (LIU, Ren); 中国山东省济南市历下区经
十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。 张纪芝
(ZHANG, Jizhi); 中国山东省济南市历下区经
十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。 生培瑶

(SHENG, Peiyao); 中国山东省济南市历下区经
十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。 邹方坤
(ZOU, Fangkun); 中国山东省济南市历下区经
十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。

(74) 代理人: 济南圣达知识产权代理有限公司 (JINAN
SHENGDA INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY
CO., LTD); 中国山东省济南市历下区经十路
17703 号华特广场 B308, Shandong 250061 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家
保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,
BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,
CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS,
JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,
LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(54) Title: MODELING METHOD FOR HIGH-COMPACTNESS DISCRETE PARTICLE HETEROGENEOUS SYSTEM

(54) 发明名称: 一种高致密度离散颗粒多相体系的建模方法

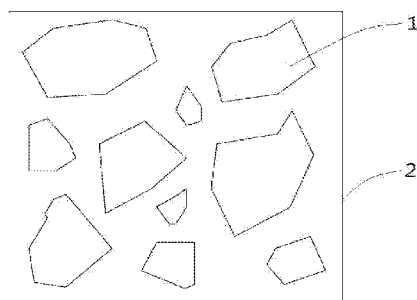


图 1

(57) Abstract: A modeling method for a high-density discrete particle heterogeneous system, comprising the following steps: determining the boundary of a model; programming the volume sum of particle phases within various dimension ranges in the model; generating compacted models of the particle models in all dimension ranges; expanding the particles in the compacted model; and obtaining a high-compactness particle packing model. The method can be used for the modeling microstructures such as particle reinforced composite materials, soft matter particle materials, particle packing materials and the like, and the use of the method further can be expanded to short fiber reinforced composite materials and the like. The method solves a modeling problem generated when particles and the boundary of the model are intersected, and the modeling method can be used in the modeling and the analysis of a composite material specimen of which the edge is subjected to machining.

(57) 摘要: 一种高致密度离散颗粒多相体系的建模方法, 包括以下步骤: 确定模型边界; 拟定所述模型中各尺寸范围内的颗粒相的体积和; 生成所有尺寸范围内的颗粒模型的紧缩模型; 将紧缩模型中各颗粒进行膨胀; 得到高致密度的颗粒堆积模型; 该方法可用于颗粒增强复合材料、软物质系颗粒材料、颗粒堆积材料等细观结构的建模, 也可扩展应用至短纤维增强复合材料等; 方法解决了颗粒与模型边界存在交叉时的建模问题, 能够应用于边缘经过机加工的复合材料试样的建模与分析。

SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

一种高致密度离散颗粒多相体系的建模方法

技术领域

本发明属于计算材料学领域，具体涉及一种高致密度离散颗粒多相体系细观结构的中尺度建模方法，尤其涉及颗粒增强复合材料、软物质系颗粒材料、颗粒堆积材料等细观结构的建模方法，也可扩展应用至短纤维增强复合材料。

背景技术

在颗粒增强复合材料以及颗粒组成的软物质体系如混凝土和泥石流中，材料的性能如力学性能和传输性能，严重依赖于材料的细观结构。因此，针对这类材料的结构进行多尺度建模，对于材料的性能分析和材料结构的优化设计，均具有非常重要的意义。

颗粒材料作为复杂的多尺度离散介质，可以视为由不同尺度的颗粒组成的随机堆积结构。颗粒间的空隙通常充满着基体材料、界面、孔隙、或流体等介质。正确描述离散颗粒多相体系的性能，应首先正确描述该体系的多尺度结构，尤其是颗粒的堆积结构。

对于随机堆积的颗粒，目前主要采用的建模方法有随机投放法和 Voronoi 法等。随机投放法亦称蒙特卡洛法，它按照一定的次序在给定的时间和空间内逐一分配颗粒的位置，一旦分配成功，即为投放成功，该颗粒即被固定在所分配的位置上。蒙特卡洛法的执行效率很高，但颗粒的堆积密度却很低。越是投放的后期，随机点的选取空间就越小，投放的难度也越大，从而难以将所有的颗粒都投放到有限的模型空间中，经常发生工程实际中存在某种配比的材料，却无法生成该材料的细观尺度结构模型的情况。而 Voronoi 法虽然可以很容易地生成致密分布的随机颗粒，却无法控制颗粒的级配，即无法控制不同粒径的颗粒的体积比或重量比。另外，Voronoi 法主要适合于凸形颗粒，而不适用于凹形、或凸形和凹形同时分布的情况。

中国专利文件 201510345395.3 公布了一种离散相增强复合材料细观结构的建模方法，该方法首先在一较大的空间中生成随机分布的颗粒，然后把颗粒表面划分为壳单元，并模拟颗粒的自由落体运动，使之下落到一个较小的空间中，从而生成高致密度的颗粒堆积结构。最后，根据颗粒表面的壳单元，生成颗粒的实体单元，最终得到颗粒的有限元模型。该方法能够解决随机投放等方法颗粒相的堆积密度不足，以及 Voronoi 法不能用于凹形颗粒和不能控制颗粒级配等问题，但下落之后堆积体的上表面可能不平整，下落过程的计算也较为耗时，并且需要壳单元和实体单元两次网格划分，计算成本高。另外，当所有颗粒均在某个特定空间内部时，该方法非常有效，但是，当颗粒与模型边界存在交叉时，则需要进行处理。

发明内容

针对现有技术的不足，本发明的目的是提供一种高致密度离散颗粒多相体系的建模方法，

该方法通过缩胀原理，可以对颗粒增强复合材料、软物质系颗粒材料、颗粒堆积材料、短纤维增强复合材料等，进行高致密度细观结构建模，该方法具备中国专利文件 201510345395.3 所述发明的优势，并具有方法简单、适应性广、计算效率高等特点。

为实现上述目的，本发明的技术方案如下：

一种高致密度离散颗粒多相体系的建模方法，包括以下步骤：

(1) 拟定模型的轮廓形状和尺寸，即确定建模空间及其边界；

(2) 根据预定的级配，拟定各尺寸范围内的颗粒的体积和，即设定 $i \sim j$ 尺寸范围内的颗粒相的体积和为 $V_{(i-j)}$ ；

(3) 在所述建模空间内，随机获得在 $i \times \alpha \sim j \times \alpha$ 尺寸范围内的若干个颗粒模型，其中， $\alpha < 1$ ，使各个颗粒模型的体积和为 $V_{(i-j)} \times \beta$ ，各个颗粒均与周围的颗粒之间不发生干涉，由此获了 $i \sim j$ 尺寸范围内的各颗粒的紧缩模型；

(4) 重复步骤 (3)，生成所有尺寸范围内的颗粒的紧缩模型；

(5) 在步骤 (1) 中所述的建模空间中，将步骤 (4) 中各颗粒的紧缩模型进行体积膨胀，即将各颗粒的紧缩模型的尺寸放大 $1/\alpha$ 倍，体积也随之放大 $1/\beta$ 倍，从而将各颗粒的紧缩模型膨胀至符合步骤 (2) 中预定级配的正常尺寸模型，此时得到的颗粒分布模型即为所求的高致密度颗粒结构模型。

与现有技术相比，本发明的技术方案的有益技术效果为：

(1) 由于各颗粒都是在随机点生成的，因此能够保证颗粒空间分布的均匀性。

(2) 由于首先生成的是各颗粒的紧缩模型，因此，容易产生符合条件的随机点，解决了现有随机投放法长时间找不到或根本找不到符合条件的随机点的问题。

(3) 能够按预定的级配生成各种形状颗粒的紧缩模型，解决了 Voronoi 法不能用于凹形颗粒和不能控制颗粒级配等问题。

(4) 解决了颗粒与模型边界存在交叉时的建模问题，能够应用于边缘经过机加工的复合材料试样的建模与分析。

(5) 将紧缩模型膨胀量，可以得到与真实材料一致的颗粒堆积密度，解决了随机投放等方法不能获得高密度模型的问题。

附图说明

构成本发明的一部分的说明书附图用来提供对本发明的进一步理解，本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明，并不构成对本发明的不当限定。

图 1 是在建模空间内随机生成各颗粒的紧缩模型的示意图；

图 2 是紧缩模型中的各颗粒膨胀并重新分布后得到的高致密度模型的有限元网格图；

图 3 是紧缩模型与膨胀后模型比较示意图。

其中，1-紧缩颗粒模型，2-模型边界，3-膨胀后得到的正常尺寸颗粒的有限元网格，4-膨胀后的正常尺寸颗粒模型。

具体实施方式

应该指出，以下详细说明都是示例性的，旨在对本发明提供进一步的说明。除非另有指明，本文使用的所有技术和科学术语具有与本发明所属技术领域的普通技术人员通常理解的含义。

需要注意的是，这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式，而非意图限制根据本发明的示例性实施方式。如在这里所使用的，除非上下文另外明确指出，否则单数形式也意图包括复数形式，此外，还应当理解的是，当在本说明书中使用术语“包含”和/或“包括”时，其指明存在特征、步骤、操作和/或它们的组合。

正如背景技术所介绍的，现有技术中关于随机堆积的颗粒的建模方法存在一定的不足，为了解决如上的技术问题，本发明提出了一种高致密度离散颗粒多相体系的建模方法，包括以下步骤：

(1) 拟定模型的轮廓形状和尺寸，即确定建模空间及其边界；

(2) 根据预定的级配，拟定各尺寸范围内的颗粒的体积和，即设定 $i \sim j$ 尺寸范围内的颗粒相的体积和为 $V_{(i-j)}$ ；

(3) 在所述建模空间内，随机获得在 $i \times \alpha \sim j \times \alpha$ 尺寸范围内（包括 $i \times \alpha$ 和 $j \times \alpha$ 尺寸）的若干个颗粒模型，其中， $\alpha < 1$ ，使各个颗粒模型的体积和为 $V_{(i-j)} \times \beta$ ，各个颗粒均与周围的颗粒之间不发生干涉，由此获了 $i \sim j$ 尺寸范围内的各颗粒的紧缩模型；

(4) 重复步骤 (3)，生成所有尺寸范围内的颗粒的紧缩模型；

(5) 在步骤 (1) 中所述的建模空间中，将步骤 (4) 中各颗粒的紧缩模型进行体积膨胀，即将各颗粒的紧缩模型的尺寸放大 $1/\alpha$ 倍，体积也随之放大 $1/\beta$ 倍，从而将各颗粒的紧缩模型膨胀至符合步骤 (2) 中预定级配的正常尺寸模型，此时得到的颗粒分布模型即为所求的高致密度颗粒结构模型。

对于颗粒增强复合材料或软物质系颗粒材料等，颗粒之间的空隙作为第二相，并由此生成多相模型。

其中，步骤 (5) 中，各颗粒紧缩模型的膨胀方法，包括如下步骤：

a、将步骤 (1) 中建模空间的边界（称为模型边界）划分有限元网格，并赋予材料属性；

b、将步骤 (4) 中所述的颗粒划分有限元网格，并赋予材料属性；

c、定义颗粒之间以及颗粒与建模空间的边界之间的接触判断方式，使之不发生相互穿透；

d、用有限元方法，对颗粒施加温度或热流载荷，使之产生热膨胀；热膨胀 $1/\alpha$ 倍后，尺寸由为 $i \times \alpha \sim j \times \alpha$ 的颗粒变为尺寸 $i \sim j$ ，各颗粒的体积和也随之膨胀 $1 \times \beta$ 倍，由 $V_{(i-j)} \times \beta$ 变为 $V_{(i-j)}$ 。

优选的，步骤 a 中，模型边界为与温度无关的刚性材料。

优选的，步骤 b 中，颗粒为热弹性材料或热弹塑性材料，进一步优选的，所述颗粒为热弹性材料。

优选的，步骤 a~b 中，将各个颗粒模型划分为实体单元，模型边界为实体元或壳单元。

优选的，步骤 c 中，所述接触方式为面-面接触，或点-面接触，或点-点接触。

优选的，步骤 (3) 中，所述 $\alpha=0.5 \sim 0.9$ ， $\beta=\alpha^3$ ，经验证，选取的 $\alpha=0.5 \sim 0.9$ 能够使得模型具有更加真实的特点。

优选的，所述高致密度离散颗粒多相体系为颗粒增强复合材料、软物质系颗粒材料（如混凝土或泥石流组成的软物质系颗粒材料）、颗粒堆积材料或短纤维增强复合材料。

优选的，步骤 (1) ~ (3) 中， $i \times \alpha \sim j \times \alpha$ 尺寸范围内的若干个颗粒模型的获得方法，包括如下步骤：

a、在所述建模空间内，随机产生一个点，以该点为中心，生成一个直径在 $i \times \alpha \sim j \times \alpha$ 尺寸范围内的球；

b、判断步骤 a 中所生成的球是否与周围已生成的颗粒发生干涉，若发生干涉，则删除已生成的球，并重复步骤 a；

c、在所述球内生成内接多面体，任选该多面体的几个顶点，使之沿球的半径方向内移，形成内凹和外凸的表面，以得到逼近真实颗粒形状的颗粒模型；

d、判断所生成的颗粒是否与模型边界发生干涉，若发生干涉，则删除颗粒在模型边界外的部分；

e、计算步骤 d 中得到的颗粒模型的体积；

f、重复步骤 a~e，将得到的各个颗粒模型的体积求和，得到 ΣV ；

g、判断 ΣV 是否达到 $V_{(i-j)} \times \beta$ ，若不是，则重复步骤 a~f。

步骤 a 中，生成的模型的形状为球形或椭球型或其他类似球形的形状。

如果颗粒的形状能够直接用数学方程描述，则在上述步骤 a~c 中，直接通过数学方程生成颗粒模型，并省略步骤 c。

步骤 (5) 中，各颗粒紧缩模型的膨胀方法，也可通过离散元等数值方法进行求解。

上述建模方法在二维细观结构建模上的应用，其特点是：将上述建模方法中的体积用面积代替，将在随机点生成的球用圆代替，将内接多面体用圆内接多边形代替， $\beta=\alpha^2$ 。

上述建模方法在纤维增强复合材料建模上的应用，其特点是：将上述建模方法中随机点生成的球用柱代替，并由柱生成纤维模型。

为了使得本领域技术人员能够更加清楚地了解本发明的技术方案，以下将结合具体的实施例和附图详细说明本发明的技术方案。

实施例 1

一种高致密度二维离散颗粒多相体系的建模方法，包括以下步骤：

(1) 拟定模型的轮廓形状和尺寸，即确定建模空间及其边界，如图 1 中的模型边界，2 为模型边界；

(2) 根据预定的级配，生成各颗粒的紧缩模型，如图 1 中各颗粒的紧缩模型，1 为颗粒紧缩模型；

(3) 将各颗粒的紧缩模型划分为二维平面单元，并赋予热弹性材料属性；

(4) 将模型边界划分为二维平面单元，并赋予与温度无关的刚体材料属性；

(5) 定义颗粒之间以及颗粒与模型边界之间的接触为面—面接触方式，使之不发生相互穿透；

(6) 在步骤 (1) 所拟定的建模空间中，通过有限元方法，将步骤 (4) 中各颗粒的紧缩模型施加温度或热流载荷，使之产生面积膨胀，即将各颗粒的紧缩模型的尺寸放大 $1/\alpha$ 倍， $\alpha=0.5\sim 0.9$ ，面积也随之放大 $1/\beta$ 倍。膨胀 $1/\alpha$ 倍后，尺寸为 $i\times\alpha\sim j\times\alpha$ 的颗粒，尺寸变为 $i\sim j$ ，如图 3 所示，是紧缩模型与膨胀后模型的比较示意图，1 为颗粒紧缩模型，4 为膨胀后的正常尺寸颗粒模型。各颗粒的面积和也随之膨胀 $1/\beta$ 倍，由 $S_{(i-j)}\times\beta$ 变为 $S_{(i-j)}$ ，从而将各颗粒的紧缩模型膨胀至符合步骤 (2) 中预定级配的正常尺寸模型。

此时得到的颗粒分布模型即为所求的高致密度颗粒结构模型。对于颗粒增强复合材料或软物质系颗粒材料等，颗粒之间的空隙作为第二相，并由此生成多相模型。

步骤 (1) ~ (2) 中， $i\times\alpha\sim j\times\alpha$ 尺寸范围内的若干个颗粒模型的获得方法，包括如下步骤：

a、在所述建模空间内，随机产生一个点，以该点为中心，生成一个直径在 $i\times\alpha\sim j\times\alpha$ 尺寸范围内的圆；

b、判断步骤 a 中所生成的圆是否与周围已生成的颗粒发生干涉，若发生干涉，则删除已生成的圆，并重复步骤 a；

c、在所述圆内生成内接多边形，任选该多边形的几个顶点，使之沿圆的半径方向内移，形成内凹和外凸的表面，以得到逼近真实颗粒形状的颗粒模型；

d、判断所生成的颗粒是否与模型边界发生干涉，若发生干涉，则删除颗粒在模型边界外

的部分;

e、计算步骤 d 中得到的颗粒模型的面积;

f、重复步骤 a~e, 将得到的各个颗粒模型的面积求和, 得到 ΣS ;

g、判断 ΣS 是否达到 $S_{(i-j)} \times \beta$, 若不是, 则重复步骤 a~f。

实施例 2

一种高致密度颗粒增强复合材料三维细观结构的建模方法, 包括以下步骤:

(1) 拟定模型的轮廓形状和尺寸, 即确定建模空间及其边界;

(2) 根据预定的级配, 拟定各尺寸范围内的颗粒的体积和, 即设定 $i \sim j$ 尺寸范围内的颗粒相的体积和为 $V_{(i-j)}$;

(3) 在所述建模空间内, 随机获得在 $i \times \alpha \sim j \times \alpha$ 尺寸范围内的若干个颗粒模型, 其中, $\alpha=0.8$, 使各个颗粒模型的体积和为 $V_{(i-j)} \times \beta$, 各个颗粒均与周围的颗粒之间不发生干涉, 由此获了 $i \sim j$ 尺寸范围内的各颗粒的紧缩模型;

$i \times \alpha \sim j \times \alpha$ 尺寸范围内的若干个颗粒模型的获得方法, 包括如下步骤:

a、在所述建模空间内, 随机产生一个点, 以该点为中心, 生成一个直径在 $i \times \alpha \sim j \times \alpha$ 尺寸范围内的球;

b、判断步骤 a 中所生成的球是否与周围已生成的颗粒发生干涉, 若发生干涉, 则删除已生成的球, 并重复步骤 a;

c、在所述球内生成内接多面体, 任选该多面体的几个顶点, 使之沿球的半径方向内移, 形成内凹和外凸的表面, 以得到逼近真实颗粒形状的颗粒模型;

d、判断所生成的颗粒是否与模型边界发生干涉, 若发生干涉, 则删除颗粒在模型边界外的部分;

e、计算步骤 d 中得到的颗粒模型的体积;

f、重复步骤 a~e, 将得到的各个颗粒模型的体积求和, 得到 ΣV ;

g、判断 ΣV 是否达到 $V_{(i-j)} \times \beta$, 若不是, 则重复步骤 a~f。

(4) 重复步骤 (3), 生成所有尺寸范围内的颗粒的紧缩模型;

(5) 在步骤 (1) 中所述的建模空间中, 将步骤 (4) 中各颗粒的紧缩模型进行体积膨胀, 即将各颗粒的紧缩模型的尺寸放大 $1/\alpha$ 倍, 体积也随之放大 $1/\beta$ 倍, 从而将各颗粒的紧缩模型膨胀至符合步骤 (2) 中预定级配的正常尺寸模型, 此时得到的颗粒分布模型即为所求的高致密度颗粒结构模型。

其中, 各颗粒紧缩模型的膨胀方法, 具体包括如下步骤:

a、将步骤 (1) 中建模空间的边界 (称为模型边界) 划分有限元网格, 并赋予与温度无

关的刚体材料属性；

b、将步骤（4）中所述的颗粒划分有限元网格，并赋予热弹性材料属性；

c、定义颗粒之间以及颗粒与建模空间的边界之间的接触为点-面接触方式，使之不发生相互穿透；

d、用有限元方法，对颗粒施加温度或热流载荷，使之产生热膨胀；热膨胀 $1/\alpha$ 倍后，尺寸由为 $i \times \alpha \sim j \times \alpha$ 的颗粒变为尺寸 $i \sim j$ ，各颗粒的体积和也随之膨胀 $1 \times \beta$ 倍，由 $V_{(i-j)} \times \beta$ 变为 $V_{(i-j)}$ 。

此时得到的颗粒分布模型即为所求的高致密度颗粒结构模型。对于颗粒增强复合材料或软物质系颗粒材料等，颗粒之间的空隙作为第二相，并由此生成多相模型。

以上所述仅为本发明的优选实施例而已，并不用于限制本发明，对于本领域的技术人员来说，本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内，所作的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1. 一种高致密度离散颗粒多相体系的建模方法，其特征是，包括以下步骤：

(1) 拟定模型的轮廓形状和尺寸，即确定建模空间及其边界；

(2) 根据预定的级配，拟定各尺寸范围内的颗粒的体积和，即设定 $i \sim j$ 尺寸范围内的颗粒相的体积和为 $V_{(i-j)}$ ；

(3) 在所述建模空间内，随机获得在 $i \times \alpha \sim j \times \alpha$ 尺寸范围内的若干个颗粒模型，其中， $\alpha < 1$ ，使各个颗粒模型的体积和为 $V_{(i-j)} \times \beta$ ，各个颗粒均与周围的颗粒之间不发生干涉，由此获了 $i \sim j$ 尺寸范围内的各颗粒的紧缩模型；

(4) 重复步骤 (3)，生成所有尺寸范围内的颗粒的紧缩模型；

(5) 在步骤 (1) 中所述的建模空间中，将步骤 (4) 中各颗粒的紧缩模型进行体积膨胀，即将各颗粒的紧缩模型的尺寸放大 $1/\alpha$ 倍，体积也随之放大 $1/\beta$ 倍，从而将各颗粒的紧缩模型膨胀至符合步骤 (2) 中预定级配的正常尺寸模型，此时得到的颗粒分布模型即为所求的高致密度颗粒结构模型。

2. 如权利要求 1 所述的建模方法，其特征是：所述高致密度离散颗粒多相体系为颗粒增强复合材料、软物质系颗粒材料、颗粒堆积材料或短纤维增强复合材料。

3. 如权利要求 1 所述的建模方法，其特征是：步骤 (5) 中，各颗粒紧缩模型的膨胀方法，包括如下步骤：

a、将步骤 (1) 中建模空间的边界划分有限元网格，并赋予材料属性；

b、将步骤 (4) 中所述的颗粒划分有限元网格，并赋予材料属性；

c、定义颗粒之间以及颗粒与建模空间的边界之间的接触判断方式，使之不发生相互穿透；

d、用有限元方法，对颗粒施加温度或热流载荷，使之产生热膨胀；热膨胀 $1/\alpha$ 倍后，尺寸由为 $i \times \alpha \sim j \times \alpha$ 的颗粒变为尺寸 $i \sim j$ ，各颗粒的体积和也随之膨胀 $1/\beta$ 倍，由 $V_{(i-j)} \times \beta$ 变为 $V_{(i-j)}$ 。

4. 如权利要求 3 所述的建模方法，其特征是：步骤 a 中，模型边界为与温度无关的刚性材料；

步骤 b 中，颗粒为热弹性材料或热弹塑性材料，优选的，所述颗粒为热弹性材料；

步骤 a~b 中，将各个颗粒模型划分为实体单元，模型边界为实体元或壳单元；

步骤 c 中，所述接触方式为面-面接触，或点-面接触，或点-点接触。

5. 如权利要求 1 所述的建模方法，其特征是：步骤 (1) ~ (3) 中， $i \times \alpha \sim j \times \alpha$ 尺寸范围内的若干个颗粒模型的获得方法，包括如下步骤：

a、在所述建模空间内，随机产生一个点，以该点为中心，生成一个直径在 $i \times \alpha \sim j \times \alpha$ 尺寸范围内的球；

b、判断步骤 a 中所生成的球是否与周围已生成的颗粒发生干涉，若发生干涉，则删除已生成的球，并重复步骤 a；

c、在所述球内生成内接多面体，任选该多面体的几个顶点，使之沿球的半径方向内移，形成内凹和外凸的表面，以得到逼近真实颗粒形状的颗粒模型；

d、判断所生成的颗粒是否与模型边界发生干涉，若发生干涉，则删除颗粒在模型边界外的部分；

e、计算步骤 d 中得到的颗粒模型的体积；

f、重复步骤 a~e，将得到的各个颗粒模型的体积求和，得到 ΣV ；

g、判断 ΣV 是否达到 $V_{(i-j)} \times \beta$ ，若不是，则重复步骤 a~f；

优选的，步骤 a 中，生成的模型的形状为球形或椭球型或其他类似球形的形状；

优选的，如果颗粒的形状能够直接用数学方程描述，则在上述步骤 a~c 中，直接通过数学方程生成颗粒模型，并省略步骤 c。

6. 如权利要求 1 所述的建模方法，其特征是：将颗粒之间的空隙作为第二相，并由此生成多相模型。

7. 如权利要求 1 所述的建模方法，其特征是：步骤（3）中，所述 $\alpha=0.5\sim 0.9$ ， $\beta=\alpha^3$ 。

8. 如权利要求 1 所述的建模方法，其特征是：步骤（5）中，各颗粒紧缩模型的膨胀方法，能够通过离散元数值方法进行求解。

9. 权利要求 1~8 中任一项所述的建模方法在二维细观结构建模上的应用，其特征是：将所述建模方法中的体积用面积代替，将在随机点生成的球用圆代替，将内接多面体用圆内接多边形代替， $\beta=\alpha^2$ 。

10. 权利要求 1~8 中任一项所述的建模方法在纤维增强复合材料建模上的应用，其特征是：将所述建模方法中随机点生成的球用柱代替，并由柱生成纤维模型。

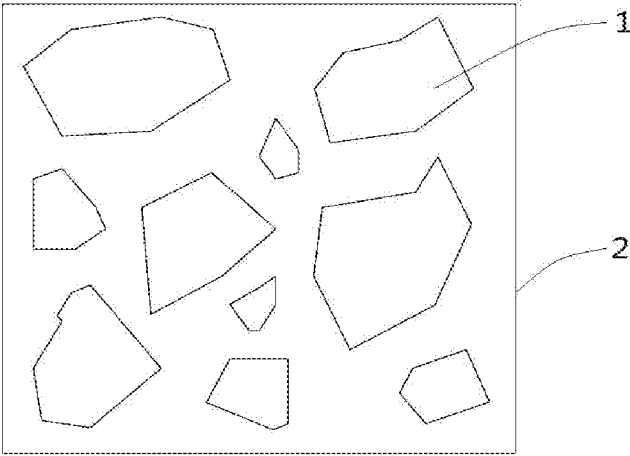


图 1

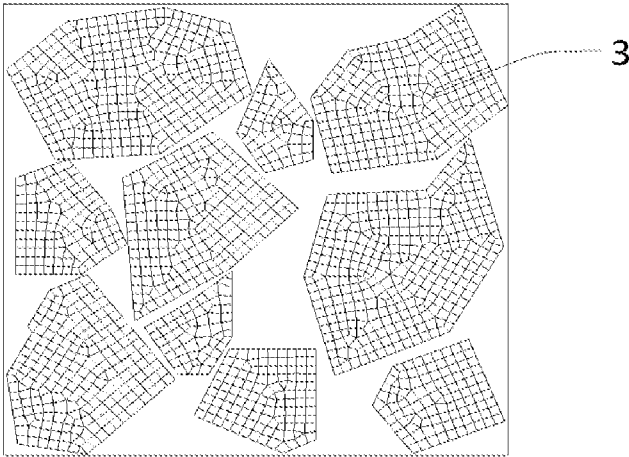


图 2

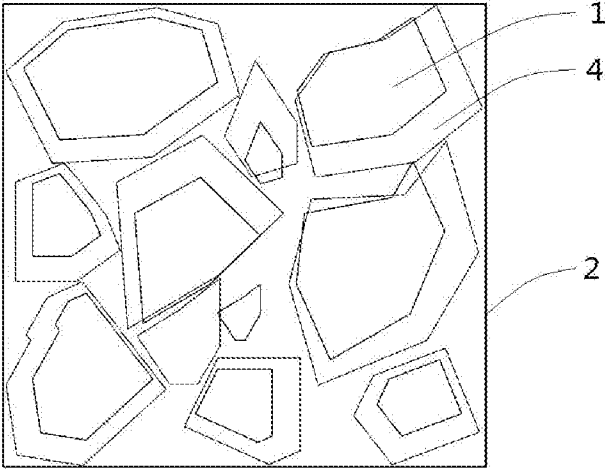


图 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/106883

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/50 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F 17/50;; G06F 17/10;; G06F 17/00;; G01N 9/00;; G06F 19/00;; G06F 9/455;; G06G 7/48

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI, CPRSABS, CNABS, CNKI: 建模; 颗粒; 离散; 密度; 致密; 体积; 和; 紧缩模型; 膨胀; 堆积模型; 边界; 交叉; modeling; granule; discrete; density; felsites; volume; summation; expand; boundary; across; compact model; expansion model

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 104899393 A (SHANDONG UNIVERSITY), 09 September 2015 (09.09.2015), claims 1-10	1-10
A	CN 105740532 A (CHONGQING JIAOTONG UNIVERSITY), 06 July 2016 (06.07.2016), entire document	1-10
A	CN 106777807 A (BEIHANG UNIVERSITY), 31 May 2017 (31.05.2017), entire document	1-10
A	US 2010211330 A1 (NEW YORK UNIVERSITY), 19 August 2010 (19.08.2010), entire document	1-10
A	WO 2012131372 A1 (DEM SOLUTIONS LTD.), 04 October 2012 (04.10.2012), entire document	1-10
A	EP 2509009 A1 (JAPAN AGENCY FOR MARINE - EARTH SCIENCE AND TECHNOLOGY), 10 October 2012 (10.10.2012), entire document	1-10
A	JP 2006259910 A (FUJI XEROX CO., LTD.), 28 September 2006 (28.09.2006), entire document	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“&” document member of the same patent family
“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 03 April 2018	Date of mailing of the international search report 16 April 2018
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer WU, Quanwei Telephone No. (86-10) 53962948

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2017/106883

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 104899393 A	09 September 2015	None	
CN 105740532 A	06 July 2016	None	
CN 106777807 A	31 May 2017	None	
US 2010211330 A1	19 August 2010	US 8315821 B2	20 November 2012
WO 2012131372 A1	04 October 2012	US 8560286 B2	15 October 2013
		US 2014039858 A1	06 February 2014
		AU 2012235962 A1	17 October 2013
		EP 2691892 A1	05 February 2014
		AU 2012235962 B2	18 August 2016
		US 2012253756 A1	04 October 2012
		US 9472020 B2	18 October 2016
EP 2509009 A1	10 October 2012	None	
JP 2006259910 A	28 September 2006	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/106883

A. 主题的分类

G06F 17/50(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06F17/50;; G06F17/10;; G06F17/00;; G01N9/00;; G06F19/00;; G06F9/455;; G06G7/48

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

WPI, CPRSABS, CNABS, CNKI: 建模; 颗粒; 离散; 密度; 致密; 体积; 和; 紧缩模型; 膨胀; 堆积模型; 边界; 交叉; modeling; granule; discrete; density; felsites; volume; summation; expand; boundary; across; compact model; expansion model

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 104899393 A (山东大学) 2015年 9月 9日 (2015 - 09 - 09) 权利要求1-10	1-10
A	CN 105740532 A (重庆交通大学) 2016年 7月 6日 (2016 - 07 - 06) 全文	1-10
A	CN 106777807 A (北京航空航天大学) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 全文	1-10
A	US 2010211330 A1 (NEW YORK UNIVERSITY) 2010年 8月 19日 (2010 - 08 - 19) 全文	1-10
A	WO 2012131372 A1 (DEM SOLUTIONS LTD.) 2012年 10月 4日 (2012 - 10 - 04) 全文	1-10
A	EP 2509009 A1 (JAPAN AGENCY FOR MARINE-EARTH SCIENCE AND TECHNOLOGY) 2012年 10月 10日 (2012 - 10 - 10) 全文	1-10
A	JP 2006259910 A (FUJI XEROX CO., LTD.) 2006年 9月 28日 (2006 - 09 - 28) 全文	1-10

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2018年 4月 3日

国际检索报告邮寄日期

2018年 4月 16日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

吴全伟

电话号码 (86-10)53962948

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2017/106883

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	104899393	A	2015年 9月 9日	无			
CN	105740532	A	2016年 7月 6日	无			
CN	106777807	A	2017年 5月 31日	无			
US	2010211330	A1	2010年 8月 19日	US	8315821	B2	2012年 11月 20日
WO	2012131372	A1	2012年 10月 4日	US	8560286	B2	2013年 10月 15日
				US	2014039858	A1	2014年 2月 6日
				AU	2012235962	A1	2013年 10月 17日
				EP	2691892	A1	2014年 2月 5日
				AU	2012235962	B2	2016年 8月 18日
				US	2012253756	A1	2012年 10月 4日
				US	9472020	B2	2016年 10月 18日
EP	2509009	A1	2012年 10月 10日	无			
JP	2006259910	A	2006年 9月 28日	无			

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)