

doi: 10. 13624/j. cnki. issn. 1001-7445. 2016. 0460

一种基于 Voronoi 图的多晶体有限元建模方法

郑战光^{1,2}, 汪兆亮¹, 冯强¹, 袁帅¹, 王佳祥¹

(1. 广西大学 机械工程学院, 广西 南宁 530004;

2. 广西制造系统与先进制造技术重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: 建立多晶体的细观有限元模型是研究多晶体材料局部塑性变形不均匀性的前提与基础, 为了灵活地构建高可靠度的材料微结构模型, 在前人研究成果的基础上提出一种基于 Voronoi 图并结合单元编号区域排布特点, 能直接根据模型中得到的单元编号顺序依次求取单元形心坐标的构图方法就显得极为关键。该方法首先是生成特定平面或空间域里的随机点与 Voronoi 图基本信息, 再结合单元编号区域排布特点依次直接求取中心点坐标, 接着判断单元归属于距离最近的晶核所在的晶粒内, 并将所得晶粒编号及单元编号以 set 集合形式添加到 INP 文件的 Part 部分, 进而得到 Voronoi 多晶体有限元模型, 最后以构建含 10 个晶粒的二维和三维多晶体模型为例和文献对比分析来进行实现与验证。结果显示: 该方法可以依据单元编号区域排布特点直接得到单元编号且更加容易实现依次求取单元形心坐标, 并在一定程度上降低了单元形心坐标处理的数据量和单元归属判断的难度。通过对比分析该方法建立的模型精度更接近于文献中的精确模型, 它们之间的最大偏差仅为 25.47 MPa, 较对比文献的简化模型最小偏差还要低 0.07 MPa。表明该方法可为研究人员快速构建多晶材料的 Voronoi 细观有限元模型提供一定的技术参考。

关键词: Voronoi 图; 多晶体建模; 晶体塑性; 有限元;

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1001-7445(2016)02-0460-10

A method of polycrystal finite element modeling based on Voronoi diagram

ZHENG Zhan-guang^{1,2}, WANG Zhao-liang¹, FENG Qiang¹,
YUAN Shuai¹, WANG Jia-xiang¹

(1. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Manufacturing System & Advanced Manufacturing Technology, Nanning 530004, China)

Abstract: The mesoscopic polycrystal finite element (PFE) model is the premise and foundation to study the local plastic deformation of polycrystalline materials. In order to construct a reliable micro-structure model of materials flexibly, a modeling method had been proposed on the basis of Voronoi

收稿日期: 2015-11-05; 修订日期: 2015-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5146002); 广西自然科学基金项目(2012GXNSFBA053145); 广西制造系统与先进制造技术重点实验室项目(14-045-15S04); 玉林市科技攻关项目(玉市科攻1421001)

通讯作者: 郑战光(1975—), 男, 江西临川人, 广西大学副教授, 博士; E-mail: zhenglight@126.com。

引文格式: 郑战光, 汪兆亮, 冯强, 等. 一种基于 Voronoi 图的多晶体有限元建模方法[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(2): 460-469.

diagram and regional distribution characteristics of units. The areal coordinates of the units could be calculated in sequence directly through the units' numbers by the method. Firstly, the random points and the Voronoi information in a specific plane or domain were generated. Then, the coordinates of the centers were directly calculated according to the distribution characteristics of the units' numbers. Secondly, the nearest element was attributed to the nearest grain, the grains' numbers and the units' numbers were added to the part of the ABAQUS INP file by sets. Then, the PFE model was built. Lastly, taking 2D and 3D PFE models of 10 grains as examples, the stress analyses of the PFE models were compared with the results of the literature to verify the modeling method. The results reveal that the modeling method can not only directly get the units numbers and the areal coordinates of the units, but also reduces the data quantity on processing the areal coordinates of the units and the difficulties in determining the ownership of units. With the comparison, it is found that the accuracy of the model is closer to the exact model in the literature. The maximum deviation is only 25.47 MPa between the proposed model and the exact model, and the minimum deviation of the proposed model is lower than the simplified model in the literature by 0.07 MPa. It is indicated that the method can provide some references for building the Voronoi finite element model of polycrystalline materials quickly.

Key words: vonronoi diagram; polycrystal modeling; crystal plasticity; finite element method

0 引言

随着计算几何学和计算机图形技术的快速发展以及国内外在细观尺度下研究金属不均匀变形与内部晶粒演变之间关系等热点问题的兴起,学者们纷纷提出了一些方法来模拟多晶体位相分布的方法。目前应用较多的方法有 Voronoi 图方法、蒙特卡罗方法和元胞自动机方法等,其中,Voronoi 图方法可以与有限元方法相耦合来建立多晶有限元模型,所建立的模型能灵活地分析不同材料微结构演变的物理机制,而且存储数据少,计算速度快,因此 Voronoi 图方法在国内外得到了广泛的应用^[1-5]。基于 Voronoi 图的多晶体有限元建模常采用如下两类方法:①先生成 Voronoi 晶胞的基本信息,将其按一定顺序保存为数据文件,然后通过 Python 脚本语言对 ABAQUS 进行二次开发就可以生成 Voronoi 多晶材料的细观有限元模型。如司良英等^[6]通过先在 MATLAB 生成 Voronoi 晶胞,将其按一定的顺序保存为数据文件,然后在 ABAQUS/CAE 中用其与 Python 接口将其读入,调用 ABAQUS/CAE 中 Python 程序接口,最终生成所需的有限元多晶几何模型;樊黎霞等^[7]通过 MATLAB 里的 Voronoi 函数把各晶粒的顶点和晶粒序号存储到文件中,通过 Python 语言读入到 ABAQUS 有限元软件建立的几何模型,按照顺序依次连接晶粒的各顶点,然后采用分割面的功能生成 Voronoi 多晶有限元几何模型;张丰果等^[8]先在区域 R 内生成 Voronoi 晶胞的随机种子点,接着对区域 R 预先划分的每一个网格单元采用最短距离的方法判断其归属于哪个晶粒,将得到的基本信息添加到 Python 脚本文件,最终建立了基于 Voronoi 图的粗糙多晶模型;汪凯^[9]采用 Python 脚本语言 getNodes 命令,先获得每个单元所包含的节点坐标,然后计算每个单元形心与所有种子点的距离,通过排序函数 getMin 得到最小数的编号,就将该单元放到该种子所对应的集合(晶粒)中,即可得到三维 Voronoi 多晶简化模型。②先生成 Voronoi 图的基本信息,再将获得的 Voronoi 几何信息添加到 ABAQUS 预先生成的单晶模型 INP 文件中,最终得到多晶体塑性变形有限元模型。如伊兴华^[10]利用 Voronoi 图表技术,先通过 MATLAB 编程得到多晶的拓扑信息,然后在 ABAQUS 软件的前处理模块 CAE 中建立模型的几何信息部分,并结合 MATLAB 程序得到的 Voronoi 信息,最终

得到晶体塑性模型的 ABAQUS 输入文件。

上述两类方法在获取 Voronoi 图的基本信息时均涉及到对单元形心坐标的处理,这样因选择的参考坐标系不同或因直接采用先求单元节点坐标、再求单元形心坐标的方法均会加大数据的处理量,同时也会对后面单元归属的判断增加一定的难度。据此,本文提出一种基于 Voronoi 图并结合单元编号区域排布特点,直接根据模型中得到的单元编号顺序,并依次求取单元形心坐标的构图方法。该方法是先生成特定平面或空间域里的随机点与 Voronoi 图基本信息,接着结合单元编号区域排布特点依次直接求取中心点坐标,判断单元归属,将所得晶粒编号及单元编号以 set 集合形式添加到 ABAQUS 的 INP 文件 Part 部分,进而得到 Voronoi 多晶体有限元模型。

1 Voronoi 多晶体模型的构建

金属材料晶粒实际上大小不一、形状各不相同,在传统的晶体塑性有限元模拟中常用一个规则的多面体单元代表一个晶粒(单胞),这种模型假设无法真实描述材料的微观织构,且不能够反应晶体内部的不均性变形^[11]。鉴于 Voronoi 图技术算法已经非常成熟,在 MATLAB 的 Multi-Parametric Toolbox (MPT) 工具箱有专门构建 Voronoi 图二维与多维的函数。但是如何通过 MATLAB-MPT 工具箱并结合 MATLAB 编程得到带有边界限制的完整的二维与三维 Voronoi 图的几何拓扑信息是建立 Voronoi 多晶有限元模型最为关键的技术难题;同时晶粒数目较多时,如何将处理好的晶粒编号及所包含的单元信息以建立集合的方式写进 INP 文件中来获得 Voronoi 多晶有限元模型也需要技术攻关。为此,本文提出一种基于 Voronoi 图并结合单元编号区域排布特点,直接根据模型中得到的单元编号顺序,并依次求取单元形心坐标的构图方法,为研究人员在 ABAQUS 平台下进行 Voronoi 多晶材料的细观有限元模型的建模提供一些技术参考。

1.1 Voronoi 图的简介

Voronoi 方法广泛应用于气象学、地理学、图像处理、结晶学、微观结构模拟和城市规划等领域^[1-6]。它是由俄罗斯数学家 Voronoi 于 1908 年提出了 n 维 Voronoi 图的定义,其主要思路是通过临近原则将 n 维空间体进行剖分,使其成为无数多面体的集合体(如二维情况即将空间平面剖分成无数多边形的集合体),每个多面体事实上是依靠其内部的一个核心点控制生成的,每个核心点的影响域是由至该点的距离最近的点组成的集合(临近原则),该核心点的影响域即构成相应的多面体^[1-6]。生成 Voronoi 图的初始点称作 Voronoi 图的发生元。从定义中可以看出,Voronoi 图就是基于距离最近原则对空间划分而成的多边形(二维)或多面体(三维)图形集合,每个多边形内部任意一点到该多边形对应种子的距离都比到其他种子点的距离近,其主要描述了空间点的邻近区域或者影响区域的边界。Voronoi 方法的原理图如图 1 所示。

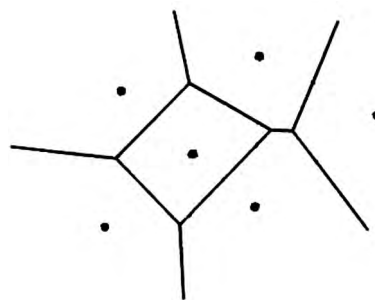


图 1 Voronoi 方法的原理图
Fig. 1 The principle diagram of Voronoi method

1.2 二维 Voronoi 模型的构图方法

按照如图 1 所示的 Voronoi 方法的原理图,在 MATLAB 中先生成种子点的随机坐标,依次求解每个单元的中心点坐标到每个种子点(晶核)的距离,并将该单元归属到距离最短的晶核所在的晶粒内,从而得到每个晶粒的完整拓扑信息,接着将得到的每一个晶粒编号及所对应的单元编号,以 set 集合的形式写进 ABAQUS 的 INP 文件中 Part 部分最终实现整个二维 Voronoi 多晶模型的建立。

二维 Voronoi 多晶模型完整建模的程序流程图如图 2 所示,具体实施步骤如下:

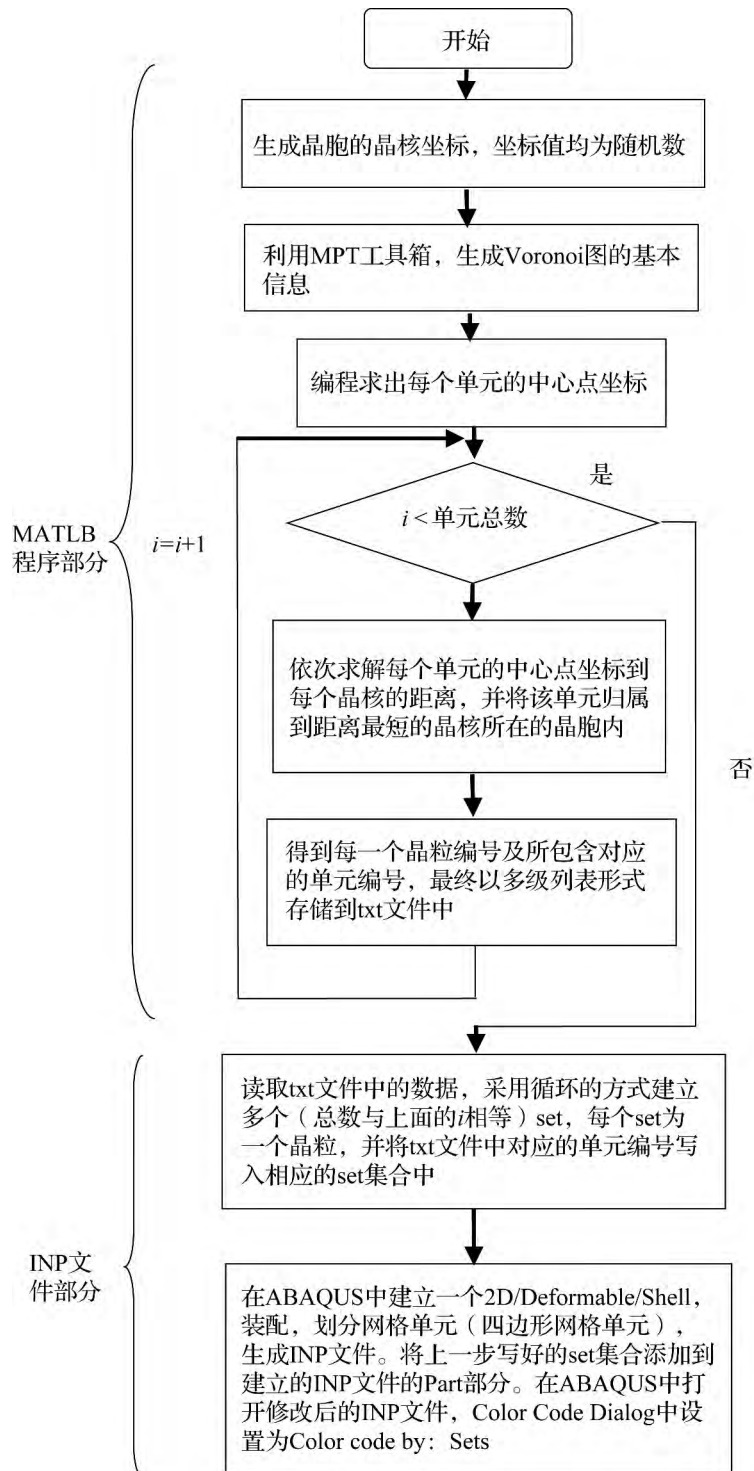


图2 二维 Voronoi 多晶模型建立的流程图

Fig. 2 Flow chart of the two-dimensional Voronoi polycrystalline model

① 先在特定空间剖分得到晶核坐标的随机数, 利用 MATLAB 中 MPT 工具箱提供的 `mpt_voronoi` 命令, 生成所需大小和晶粒数的 Voronoi 图基本信息并画出二维模型图。

② 结合单元编号区域排布特点, 尤其是单元区域分布及编号顺序, 编程直接求取每一个单元的中心点坐标, 单元是通过在 ABAQUS/CAE 中建立一个与二维模型图相同尺寸的 2D/Deformable/Shell 模型划分网格之后所得, 单元具体信息可以在生成的 INP 文件中查看。

③ 根据 ABAQUS/CAE 中划分网格后实体模型的单元空间排布特点,依次求解每个单元的中心点坐标到每个晶核的距离,并将该单元归属到距离最短的晶核所在的晶胞内。

④ 将得到的每一个晶粒编号及其对应的所有单元编号,最终以多级列表形式保存到 txt 文件中。

通过以上 MATLAB 编程,本文仅得到的是二维 Voronoi 图完整的拓扑信息。下面还需要在 ABAQUS 的 INP 文件中的 Part 部分编写多个 set 集合,其中每个 set 集合为一个晶粒,将 txt 文件中对应的单元编号依次写入相应的 set 集合实现建模。利用 INP 文件进行二维模型建立的过程如下:

① 在 ABAQUS/CAE 中建立一个 2D/Deformable/Shell 装配,划分网格单元(四边形网格单元),并在 Job 模块中生成 INP 文件。

② 将上一步写好的 set 集合添加到建立的 INP 文件中的 Part 部分。在 ABAQUS 中打开修改后的 INP 文件,并在 Color Code Dialog 中设置为 Color code by: Sets。

1.3 三维 Voronoi 模型的构图方法

以上建立的二维 Voronoi 模型中每个晶粒为一个多边形,所以二维 Voronoi 多晶模型的几何拓扑构图方法相对简单,而三维模型是一个多面体,并且金属多晶材料是由多个不规则晶粒的空间构成,因而其拓扑结构比二维情况要复杂得多,更为糟糕的是在三维模型下单元按晶粒分组和拓扑数据处理在 MATLAB 中均没有函数直接实现。为此,本文紧紧围绕 Voronoi 图是由一组由连接两邻点直线的垂直平分线组成的连续多边形,并根据 ABAQUS/CAE 中划分网格后实体模型的单元编号空间排布特点,在 MATLAB 中编程依次求解每个单元的中心点坐标到每个晶核的距离,并将该单元归属到距离最短的晶核所在的晶胞内,从而得到每个晶粒的完整拓扑信息,接着将得到的每一个晶粒编号及对应的所有单元编号,以 set 集合的形式写入 ABAQUS 的 INP 文件中的 Part 部分,最终实现整个三维 Voronoi 模型的建立。

三维 Voronoi 多晶模型完整建模的程序流程图如图 3 所示,具体实施步骤如下:

① 先在特定空间剖分得到晶核坐标的随机数,利用 MATLAB 中 MPT 工具箱提供的 `mpt_voronoi` 命令,生成所需大小和晶粒数的 Voronoi 图基本信息并画出三维模型图。

② 结合单元编号区域排布特点,尤其是单元区域分布及单元编号顺序,编程直接求取每一个单元的中心点坐标,单元是通过在 ABAQUS/CAE 中建立的一个与三维模型图相同尺寸的 3D/Deformable/Shell 模型划分网格后所得,单元具体信息可以在生成的 INP 文件中查看。

③ 根据 ABAQUS/CAE 中划分网格后实体模型的单元空间排布特点,依次求取每个单元的中心点坐标到每个晶核的距离,并将该单元归属到距离最短的晶核所在的晶胞内。

④ 将上一步得到的每一个晶粒编号及其对应的所有单元编号,最终以多级列表形式存储到 txt 文件中,以供后续修改 INP 文件的调用。

通过以上 MATLAB 编程,本文仅得到了三维 Voronoi 图完整的拓扑信息。下面还需要在 ABAQUS 的 INP 文件中 Part 部分编写多个 set 集合,每个 set 集合为一个晶粒,并将 txt 文件中对应的单元编号写入相应的 set 集合实现建模。利用 INP 文件进行三维模型建立的过程如下:

① 在 ABAQUS/CAE 中建立一个 3D/Deformable/Shell 装配,划分网格单元(四边形网格单元),并在 Job 模块中生成 INP 文件。

② 将上一步写好的 set 集合添加到建立的 INP 文件中的 Part 部分。在 ABAQUS 中打开修改后的 INP 文件,并在 Color Code Dialog 中设置为 Color code by: Sets。

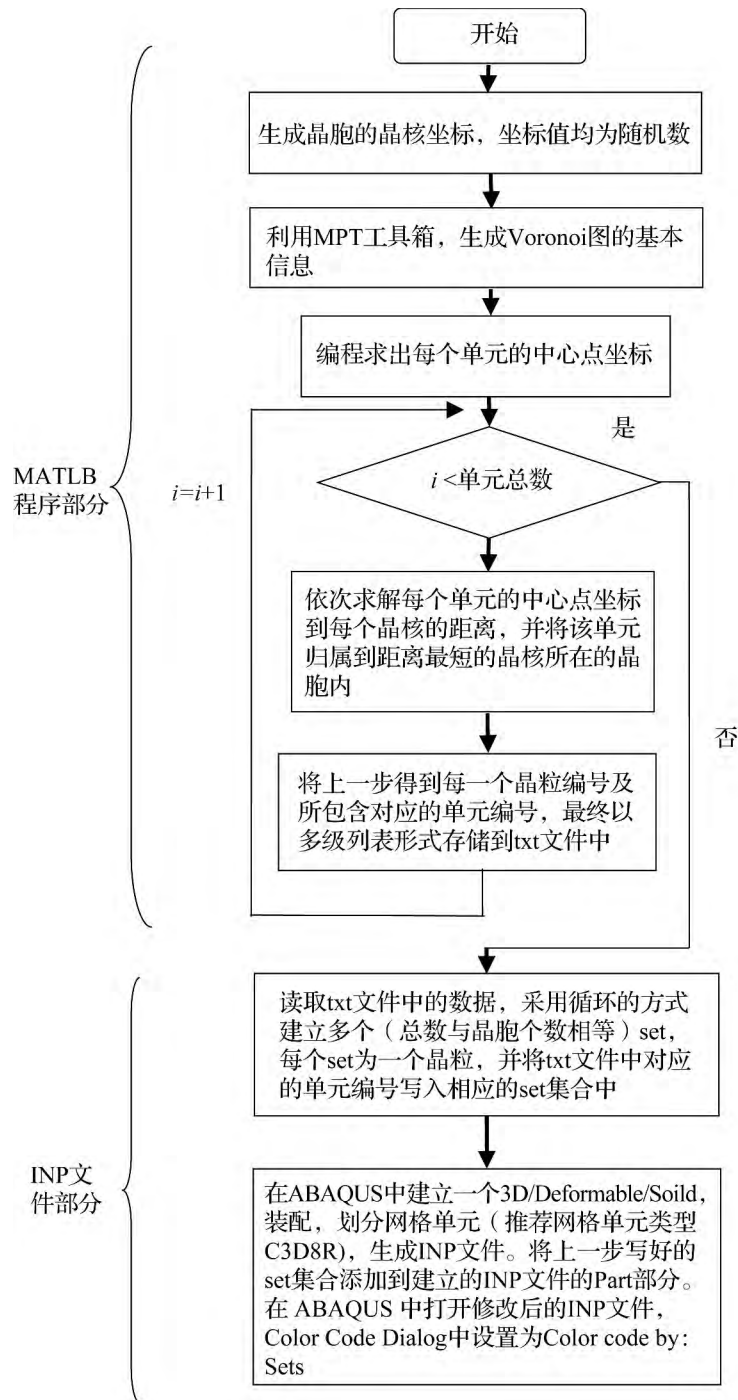


图3 三维 Voronoi 多晶模型建立的流程图

Fig. 3 Flow chart of the three-dimensional Voronoi polycrystalline model

2 案例分析

鉴于工程中使用最多的是金属材料,而金属材料又大多是晶粒的集合,即多晶体;并且多晶体材料的微观组织结构复杂,因此在建立 Voronoi 多晶有限元模型时,很难完全真实地反映出晶粒的各个方面的特征,必须对其进行合理假设^[12-43]。本文考虑到多晶材料在晶粒大小、形状上均具有很大随机性的特点,基于 Voronoi 图原理通过 MATLAB-MPT 工具箱结合 MATLAB 编程,分别得到带有边界限制的完

整的二维、三维 Voronoi 图几何拓扑信息,并以建立集合的方式将处理好的晶粒编号及其包含的所有单元信息写入 ABAQUS 的 INP 文件中实现模型的建立。该模型不仅能够十分形象真实地反映实际多晶体的构成形态,而且还为后续的材料参数、取向的赋予、实施不同类型的加载等^[14]以编写 INP 文件的方式实现及其细观尺度下金属变形与内部晶粒演变的关系分析提供前期的数据准备。下面分别以二维和三维多晶体有限元模型构建为例对本文所提出的方法进行实现与验证。

2.1 建立二维多晶体有限元模型

为了实现多晶体晶粒呈不同形态与尺寸大小的二维 Voronoi 图,根据图 2 所示的二维 Voronoi 多晶模型建立的流程图,本文首先在 MATLAB 中随机生成任意分布类型的种子点,再根据随机种子点生成二维 Voronoi 图。MATLAB 中的二维 Voronoi 图如图 4 所示。

通过 MATLAB 编程虽然得到了二维 Voronoi 图完整的拓扑信息,并实现了二维 Voronoi 图,但它仅仅是带有二维 Voronoi 图完整拓扑信息的多晶体示意图,并不是一个带有完整边界限制的二维 Voronoi 多晶体有限元模型。同样,根据图 2 所示流程图的 INP 文件部分的分析流程,本文以建立的一个包含 10 个晶粒的二维多晶体有限元模型为例,其多晶体晶粒的相关参数与图 4 所示在 MATLAB 中生成的二维 Voronoi 图尺寸及晶粒位置、个数均相同,并通过编写 ABAQUS 的 INP 文件的形式进行实现,最终结果如图 5 所示。

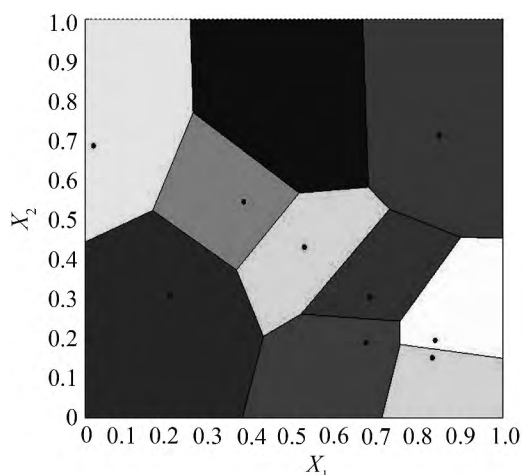


图 4 MATLAB 中生成的二维 Voronoi 多晶体示意图

Fig. 4 Two dimensional Voronoi polycrystalline model generated in MATLAB

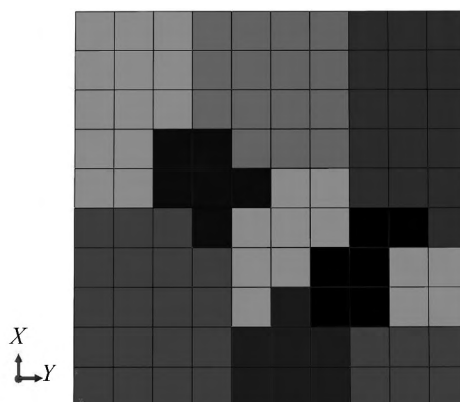


图 5 ABAQUS 中生成的二维 Voronoi 多晶体模型

Fig. 5 Two dimensional Voronoi multi crystal model generated in ABAQUS

2.2 建立三维多晶体有限元模型

根据图 3 所示的三维 Voronoi 多晶模型建立的流程图,本文首先在 MATLAB 中随机生成三维空间任意分布类型的种子点,再根据随机种子点生成的三维 Voronoi 图。MATLAB 中的三维 Voronoi 图如图 6 所示。

同样,通过 MATLAB 编程得到的三维 Voronoi 图也仅仅是带有三维 Voronoi 图完整拓扑信息的多晶体示意图,并不是一个带有完整边界限制的三维 Voronoi 多晶体有限元模型,因此本文还需要再根据图 3 所示流程图中的 INP 文件部分的分析流程进行三维 Voronoi 多晶体有限元模型构建。本文以建立的一个包含 10 个晶粒的三维多晶体有限元模型为例,其多晶体晶粒的相关参数与图 6 所示在 MATLAB 中生成的三维 Voronoi 图尺寸及晶粒位置、个数均相同,并通过编写 ABAQUS 的 INP 文件的形式进行实现,最终结果如图 7 所示。

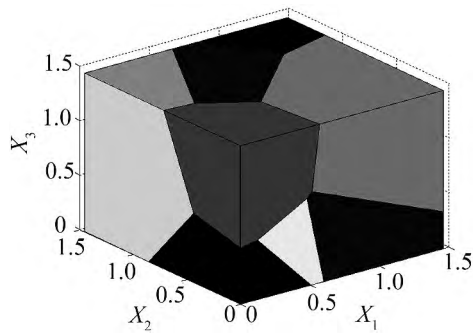


图 6 MATLAB 中生成的三维 Voronoi 多晶体示意图

Fig. 6 The three dimensional Voronoi generated in MATLAB

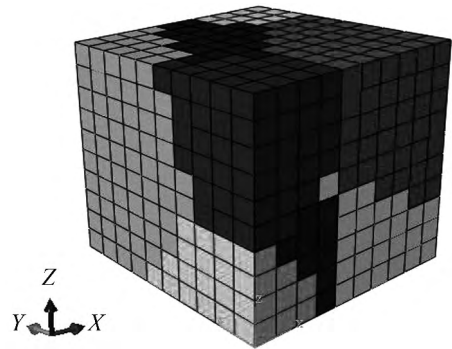


图 7 ABAQUS 中生成的三维 Voronoi 多晶体模型

Fig. 7 Three dimensional Voronoi multi crystal model generated in ABAQUS

3 验证与讨论

为了验证本文建模方法的正确性, 本文建立了与文献[9]相同晶粒数 100 个、相同网格类型 C3D8I, 相同基本尺寸 $1000 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的 Voronoi 多晶有限元模型, 并采用相同的本构关系、相同的约束与相同的加载方式如图 8 所示, 还采用了相同的文献[15]中所提供的材料参数, 进行了 10% 拉伸量的拉伸有限元模拟, 结果如图 9 与图 10 所示。

图 9 为进行了拉伸有限元模拟之后的变形图, 其表面出现了较为明显凹凸现象, 这是由于晶体塑性本构关系中考虑了晶体的随机取向而导致的材料塑性变形不均匀性。

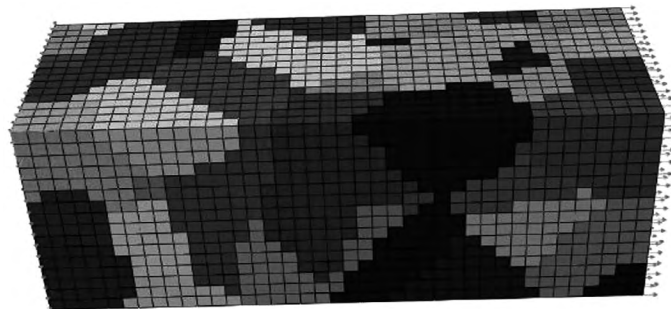


图 8 ABAQUS 中生成的 100 个晶胞的 Voronoi 多晶模型

Fig. 8 Voronoi polycrystalline model of 100 cell unit generated in ABAQUS

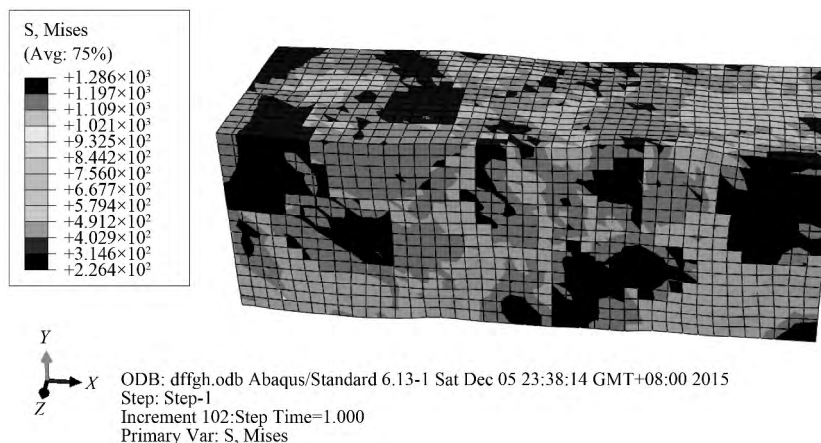


图 9 ABAQUS 中有限元模拟后的 Voronoi 多晶模型变形图

Fig. 9 Figure of Voronoi polycrystalline model deformation after finite element simulation in ABAQUS

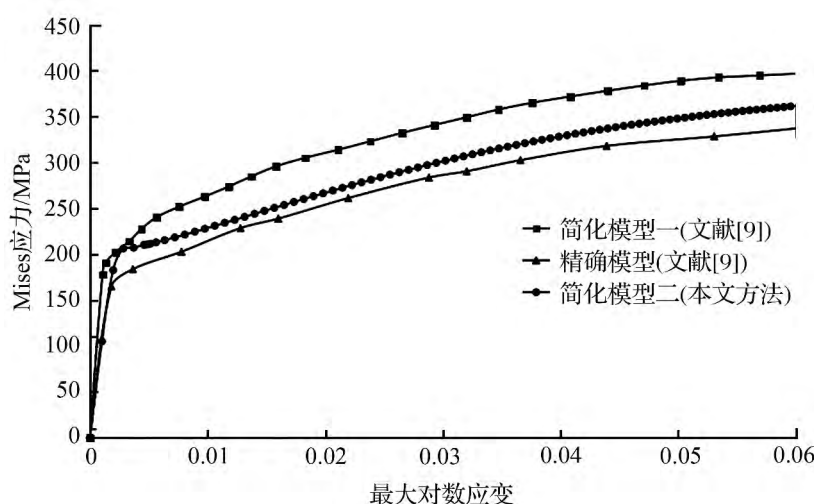


图 10 相同拉伸量下不同模型单元应力—应变曲线对比

Fig. 10 Curve contrast of different models with the parts' unit under the same stretching elongation

图 10 为不同模型单元应力—应变曲线对比图。其中简化模型一的应力—应变曲线与精确模型的应力—应变曲线均出自于文献 [9], 而简化模型二的应力—应变曲线即为本文建模方法所建立的如图 8 所示模型, 并在相同拉伸量下进行有限元模拟所得应力—应变曲线。从图 10 中可以看出, 本文所建立的 Voronoi 多晶简化模型整体应力水平居于文献 [9] 中简化模型一与精确模型之间, 在弹性区域与精确模型大部分重合但屈服点较高, 并且拉伸曲线整体偏向精确模型。为了进一步深入了解本文拉伸曲线的偏向程度, 本文分别在横坐标上取 0.002、0.002 84、0.008、0.016、0.032、0.044、0.05 与 0.06 等最大对数应变所对应的 Mises 应力值来做偏差分析。本文假设以精确模型为参考标准, 以简化模型与精确模型的差值进行偏差分析来评估本文建模方法的优劣。

表 1 相同应变下不同模型单元 Mises 应力数据对比

Tab. 1 The comparison of Mises stress data of different models' units under the same strain

项目		最大对数应变							
		0.002	0.002 84	0.008	0.016	0.032	0.044	0.05	0.06
Mises 应力 / MPa	简化模型一	201.15	208.32	255.00	295.70	349.23	378.12	389.03	397.10
	简化模型二	182.62	206.25	221.39	251.74	307.75	337.12	348.92	362.08
	精确模型	170.00	180.78	205.72	238.83	290.45	317.99	328.00	339.71
偏差	简化模型一	31.15	27.54	49.28	56.87	58.78	60.13	61.03	57.39
	简化模型二	12.62	25.47	15.67	12.91	17.30	19.13	20.92	22.37

从表 1 中可以得到本文所建立的 Voronoi 多晶简化模型的应力水平与精确模型的偏差基本分布在 20 MPa 左右, 最小偏差达为 12.91 MPa, 最大偏差仅为 25.47 MPa, 平均偏差值为 18.3 MPa; 而文献 [9] 的简化模型一与精确模型的偏差基本分布在 50 MPa 左右, 最小偏差达到 27.54 MPa (比本文所建立的简化模型最大偏差 25.47 MPa 还大 0.07 MPa), 同时其最大偏差达到 60.13 MPa, 平均偏差值为 50.27 MPa。因此, 说明本文建立的 Voronoi 多晶有限元模型更接近于文献 [9] 的精确模型, 可以用来作为金属微观结构有限元分析模型。

4 结 语

① 本文提出了一种基于 Voronoi 图并结合单元编号区域排布特点的方法, 该方法可以依据单元编号区域排布特点直接得到单元编号, 且更加容易实现依次求取单元形心坐标。

② 二维与三维 Voronoi 多晶体有限元模型在判断单元归属时,均采用单元距离最近的晶核所在晶粒内的原则,可以通过改变随机数所在的区域大小,灵活地改变 Voronoi 多晶体有限元模型的大小。

③ 一旦种子点的随机坐标生成无论其顺序怎样排列,最终得到的 Voronoi 多晶体有限元模型均完全相同;并可以通过改变随机数的个数及分布类型,灵活地改变 Voronoi 多晶体有限元模型晶粒的数目及分布形态,一般晶粒数目大于 50 个,能够较为真实描述材料的微观组织结构。

④ 在相同条件下通过有限元数值分析与文献[9]的单调拉伸曲线对比,结果显示本文所建立的 Voronoi 多晶简化模型整体应力水平居于文献[9]中简化模型一与精确模型之间,在弹性区域与精确模型大部分重合但屈服点比较高,并且拉伸曲线整体偏向精确模型,其平均偏差值仅为 18.3 MPa,而文献[9]中简化模型一的平均偏差值却高达 50.27 MPa,甚至连其最小偏差也比本文所建立的简化模型最大偏差还要高 0.07 MPa。从而说明本文所提出的建模方法有较高的精度与可靠度。

参考文献:

- [1] 赵昊,丁淑兰. ABAQUS 二次开发在金属微观组织模拟中的应用[J]. 热加工工艺, 2014, 43(24): 87-90, 97.
- [2] 王克廷,陈忠家,郭煜泽,等. 温度对合金塑性变形行为影响的蒙特卡罗模拟[J]. 有色金属加工, 2014, 43(1): 9-11, 40.
- [3] 陈飞,崔振山,董定乾. 微观组织演变元胞自动机模拟研究进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(4): 30-39.
- [4] 闻瑶,薛克敏,李萍,等. TA15 钛合金高温变形多晶体塑性有限元模拟[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(6): 86-90, 101.
- [5] 万朔,何力军,张伟,等. 多晶钎焊弹性失配行为的数值分析[J]. 稀有金属, 2015, 39(8): 764-768.
- [6] 司良英,邓关宇,吕程,等. 基于 Voronoi 图的晶体塑性有限元多晶几何建模[J]. 材料与冶金学报, 2009, 8(3): 193-197, 216.
- [7] 樊黎霞,赵轲,董雪花. 身管径向精密锻造的塑性应变分析与锻造比研究[J]. 精密成形工程, 2014, 1(1): 1-8.
- [8] 张丰果,董湘怀,章海明,等. 微锻粗过程晶体塑性模型研究[J]. 塑性工程学报, 2011, 3(3): 5-8.
- [9] 汪凯. 多晶体材料加工的细观塑性有限元模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [10] 伊兴华. 面心立方多晶体塑性变形有限元模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [11] 谢韶,唐斌,韩逢博,等. 材料微结构三维建模及其晶体塑性有限元模拟[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(1): 65-70.
- [12] QUEY R, DAWSON P R, BARBE F. Large-scale 3D random polycrystals for the finite element method: Generation, meshing and remeshing[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2011, 200(17-20): 1729-1745.
- [13] FRITZEN F, BÖHLKE T, SCHNACK E. Periodic three-dimensional mesh generation for crystalline aggregates based on Voronoi Tessellations[J]. Computational Mechanics, 2009, 43(5): 701-713.
- [14] 胡桂娟,张克实,莫智莉. 45 号钢后继屈服与塑性流动试验的 Chaboche 模型分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(1): 171-179.
- [15] HUANG Y G. A user-material subroutine incorporating single crystal plasticity in the ABAQUS finite element program [D]. Cambridge: Harvard University, 1991.

(责任编辑 梁 健)