

兰州理工大学

硕士论文

兰州理工大学图书馆

学校代号 10731

学 号 162080503074

分 类 号 TF12

密 级 公 开



兰州理工大学  
LANZHOU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## 硕士学位论文

# 粉末冶金过程的计算机仿真

学位申请人姓名 蒋煜

培 养 单 位 材料科学与工程学院

导师姓名及职称 李旭东 教授

学 科 专 业 材料加工工程

研 究 方 向 计算材料工程学

论文提交日期 2019 年 3 月 14 日

学校代号：10731

学 号：162080503074

密 级：公 开

兰州理工大学硕士学位论文

粉末冶金过程的计算机仿真

学位申请人姓名：蒋煜

导师姓名及职称：李旭东 教授

培 养 单 位：材料科学与工程学院

专 业 名 称：材料加工工程

论文提交日期：2019 年 3 月 14 日

论文答辩日期：2019 年 5 月 18 日

答辩委员会主席：崔敬忠 研究员

# Computer Simulation of Powder Metallurgy Process

by

JIANG Yu

B.E.( Taiyuan Institute of Technology ) 2016

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Materials Processing Engineering

in the

School of Material Science and Engineering

Lanzhou University of Technology

Supervisor

Professor Li Xudong

May, 2019

# 兰州理工大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：蒋煜

日期：2019年5月18日

## 学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权兰州理工大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

- 1、保密□，在\_\_\_\_\_年解密后适用本授权书。
- 2、不保密☒。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：蒋煜

日期：2019年5月18日

导师签名：李旭东

日期：2019年5月18日

## 目 录

摘 要	I
Abstract	III
第一章 绪论	1
1.1 粉末冶金简介	1
1.1.1 粉末冶金工艺	1
1.1.2 粉末冶金发展简史	2
1.1.3 粉末冶金特点	3
1.1.4 粉末冶金应用	3
1.2 课题研究背景	3
1.3 粉末成形数值模拟软件介绍及选择	4
1.3.1 Abaqus 软件	4
1.3.2 MSC.MARC 软件	5
1.3.3 ANSYS 软件	5
1.3.4 DEFORM 软件	5
1.3.5 粉末成形数值模拟软件选择	5
1.4 粉末金属成形建模国内外研究现状	6
1.4.1 基于连续介质力学研究	6
1.4.2 基于非连续介质力学研究	10
1.5 本文的研究意义及主要内容	12
1.5.1 研究意义	12
1.5.2 主要内容	13
第二章 粉末成形数值模拟关键技术	14
2.1 粉末成形的有限元计算方法	14
2.1.1 弹塑性有限元方程的建立	14
2.1.2 几何非线性有限元方程的建立	17
2.2 误差评估与网格重新划分	17
2.3 接触与摩擦处理	18
2.3.1 接触力的计算	18
2.3.2 摩擦现象处理	19
第三章 Python 二次开发生成三维密集球堆积模型	21
3.1 Python 简介	21
3.2 Python 二次开发在有限元模拟中的意义	22
3.3 Python 二次开发在 Abaqus 中的应用	23

3.4 密集堆积球形颗粒模型的生成原理.....	25
3.5 密集堆积球形颗粒模型 Python 脚本的编写.....	25
3.5.1 确定球心坐标 Python 脚本的编写.....	25
3.5.2 球形粉末实体生成 Python 脚本的编写.....	27
3.6 本章小结.....	31
<b>第四章 粉末压制成形的细观模拟分析.....</b>	<b>33</b>
4.1 引言.....	33
4.2 粉末压制成形有限元模型的建立.....	33
4.2.1 粉末压制装置的建立.....	33
4.2.2 材料属性的定义.....	34
4.2.3 有限元计算求解方法.....	35
4.2.4 有限元网格的划分.....	36
4.2.5 接触属性设置.....	37
4.2.6 定义边界条件和载荷.....	38
4.3 数值模拟计算结果分析.....	38
4.3.1 单向压制过程颗粒流动特性分析.....	38
4.3.2 双向压制过程颗粒流动特性分析.....	39
4.3.3 摩擦系数对颗粒流动特性的影响.....	40
4.4 本章小结.....	41
<b>第五章 放电等离子烧结粉末材料的多场耦合分析.....</b>	<b>43</b>
5.1 引言.....	43
5.2 数学模型.....	43
5.2.1 电场算法.....	43
5.2.2 焦耳热生成.....	44
5.2.3 位移场算法.....	44
5.3 放电等离子烧结有限元模型的建立.....	44
5.3.1 放电等离子烧结装置的建立.....	44
5.3.2 材料属性的定义.....	45
5.3.3 分析步设置.....	45
5.3.4 有限元网格的划分.....	46
5.3.5 接触属性设置.....	47
5.3.6 定义边界条件和载荷.....	48
5.4 数值模拟计算结果分析.....	48
5.4.1 放电等离子烧结温度场分布规律.....	48
5.4.2 烧结材料对温度场分布规律的影响.....	49

5.5 本章小结 .....	51
结 论 .....	53
参考文献 .....	55
致 谢 .....	59
附表 A 攻读学位期间发表的学术论文 .....	60



## 摘要

粉末冶金是以金属粉末或者混合粉末(金属粉末与非金属粉末混合而成)为原料,经成形和烧结制备各种类型材料和制品的工艺过程。压制成形是粉末冶金生产的一个重要环节。传统的压制成形工艺设计主要采用“经验性的试错法”,该方法设计周期长、成本高,所以将计算机仿真技术引入粉末压制成形过程是必然的趋势。本文主要针对粉末的压制成型过程进行计算机仿真。作为补充,对放电等离子烧结(SPS)过程也进行简单的模拟。

总结了现阶段粉末成形建模的两种途径,并针对各途径涉及到的力学模型和相关理论做了详细介绍。在综述粉末成形建模各途径国内外研究现状的基础上,分析了粉末成形数值模拟计算的难点。确定了本文采用的建模途径为基于密集堆积球形颗粒的微观力学方法。

综述了当前主流模拟软件(Abaqus、MSC.Marc、ANSYS、DEFORM)在粉末成形领域的应用。通过对4种模拟软件进行综合比对,优选出了适合本研究的模拟软件为Abaqus。

鉴于Abaqus软件给用户提供了Abaqus脚本接口。本研究提出了密集堆积球形颗粒模型的生成原理,并编写了Python脚本,实现了随机分布的三维密集堆积球形颗粒模型的建立。

利用有限元分析软件Abaqus在细观尺度上对粉末的压制成型过程进行了模拟,研究了随机分布的三维密集球堆积松散粉末颗粒的堆积行为,并探讨了摩擦系数、压制方式(单向压制、双冲头双向压制)对粉末堆积行为和压胚密度的影响规律。模拟结果表明:粉末材料堆积过程的实质是减少孔隙,提高密度的过程。粉末堆积过程主要分为两个阶段:(1)粉末颗粒发生位移和弹性变形;(2)粉末颗粒由于挤压发生塑性变形。并且采用双向压制方式和较小的摩擦系数有利于压胚密度的均匀性。此结论对粉末压制成形理论的研究具有一定的指导意义。

放电等离子烧结(Spark Plasma Sintering,简称SPS)是近几年发展起来的一种新型快速烧结技术,具有热压烧结、热等静压烧结等无法比拟的优点。从仿真角度来讲,SPS模拟同时涉及温度场、电场、位移场,模拟过程十分复杂。作为补充,本文利用有限元分析软件Abaqus6.14版本建立了同时具有电场、温度场、位移场的多场耦合模型,针对烧结系统核心部位进行了SPS模拟,并对比了导电粉末和不导电粉末的放电等离子烧结过程。模拟结果表明:(1)烧结终态时刻最高温度位于压头与模具相接触的部位,最低温度位于上电极的上表面和下电极的下表面,其余部位温度介于二者之间;(2)导电粉末材料比不导电粉末材料的升温速率快,

但不导电粉末材料比导电粉末材料温度分布更加均匀。

关键词：Python 二次开发；随机分布；Abaqus；微观力学方法；粉末压制；放电等离子烧结；

## Abstract

Powder metallurgy is a process in which various types of materials and products are prepared by forming and sintering from metallic powder or mixed powder (metallic powder mixed with non-metallic powder). Compacting is an important step in powder metallurgy production. The traditional process design of compacting mainly adopts the "experiential trial and error method", which has a long design cycle and high cost. Therefore, it is an inevitable trend to introduce computer simulation technology into the powder compacting process. In this thesis, the process of powder forming is simulated by computer. As a supplement, the process of spark plasma sintering (SPS) is also simulated.

This thesis summarizes two ways of modeling powder forming at present, and introduces in detail the mechanical models and related theories involved in each way. The difficulties in numerical simulation of powder forming were analyzed on the basis of summarizing the research status of various ways of modeling powder forming at home and abroad. It is determined that the modeling approach adopted in this thesis is based on the micromechanical method of densely packed spherical particles.

The applications of main simulation software (Abaqus, MSC.Marc, ANSYS, DEFORM) in powder forming were reviewed. Through the comprehensive comparison of four simulation software, the optimal simulation software for this study is selected as Abaqus.

Given that Abaqus software provides users with Abaqus script interface. In this study, the generation principle of dense packing spherical particle model was proposed, and Python script was written to realize the establishment of random distribution three-dimensional dense packing spherical particle model.

The finite element analysis software Abaqus was used to simulate the powder compaction process on a microscopic scale. The accumulation behavior of randomly distributed three-dimensional dense spheres of loose powder particles was studied. The friction coefficient and compression method were discussed. The influence law of density of embryos, The effects of friction coefficient and pressing method (one-way suppress, two-way double punch pressing) on powder accumulation behavior and density of pressed embryo were discussed. The simulation results show that the essence of powder material accumulation is to reduce porosity and increase density.

The powder stacking process can be divided into two stages : (1) the powder particles have displacement and elastic deformation; (2) plastic deformation of powder particles due to extrusion. The method of bidirectional pressing and lower friction coefficient are beneficial to the uniformity of the blank density. This conclusion has certain guiding significance to the research of powder compaction forming theory.

Spark Plasma Sintering (SPS) is a new rapid sintering technology developed in recent years. From the perspective of simulation, SPS simulation involves temperature field, electric field and displacement field at the same time, and the simulation process is very complex. As a supplement, this paper established a multi-field coupling model with electric field, temperature field and displacement field by using the finite element analysis software Abaqus 6.14, SPS simulation was conducted for the core parts of the sintering system, and the discharge plasma sintering process of conductive powder and non-conductive powder was compared. The simulation results show that : (1) the highest temperature at the final state of sintering is located at the position where the pressure head contacts the mold, the lowest temperature is located at the upper surface of the upper electrode and the lower surface of the lower electrode, and the other parts are between the two. (2) the heating rate of conductive powder materials is faster than that of non-conductive powder materials, but the temperature distribution of non-conductive powder materials is more uniform than that of conductive powder materials.

**Keywords:** Python Secondary Development; Random Distribution; Abaqus; Micromechanical Method; Powder Compacting; Spark Plasma Sintering

# 第一章 绪论

## 1.1 粉末冶金简介

### 1.1.1 粉末冶金工艺

粉末冶金的基本工艺流程包括3部分：(1)准备或制取原料粉末；(2)利用成形工艺将粉末塑造成为具有某种特定形状的生胚；(3)在一定温度下对生胚进行烧结，使其成为具有所需性能的最终制品。

#### (1)原料粉末的制取

粉末冶金工艺生产的第一步便是原料粉末的制取。伴随着粉末冶金材料和制品的迅猛发展，当今社会不仅要求提供具有更高质量的原料粉末，同时对粉末种类的需求也越来越多。为了生产出适应社会发展的原料粉末，从材料范围、粉末外形、粉末粒度等等方面满足社会发展的要求。越来越多的粉末制备方法应运而生。

但是从粉末形成的实质来看，现阶段主要包括机械法和物理化学法。机械法就是将原材料进行机械性的粉碎，而原材料的化学成分并没有发生改变，主要有机械粉碎和雾化两种生产方法。物理化学法则是需要经过物理或化学方面的反应，通过改变原材料的化学成分或改变其聚集状态制取粉末。现阶段粉末的生产方式多种多样，不同的方式生产出的粉末的形状、粒度、流动性、烧结活性等各方面特性还是有明显差别的，在实际生产应用当中还是根据需求选择相应的生产方法。

#### (2)粉末成形

粉末成形是粉末冶金过程的第二个主要工序，也是仅次于烧结的一个主要工序，主要目的就是使粉末体密实成为具有一定尺寸、形状、密度、孔隙度和强度的坯块。现阶段粉末成形的方式主要有普通模压成形方式和特殊成形方式。普通模压成形方法是将金属粉末或者混合粉末装在压模内，通过模冲对金属粉末或者混合粉末进行加压、卸压后，将压坯从阴模内压出。特殊成形方式则是指各种非模压成形，主要有等静压成形、粉末连续成形、粉浆浇注成形、粉末注射成型、爆炸成形等方式。粉末成形制品虽然不是粉末冶金最终的产品，但其微观结构和质量会对材料烧结动力学产生非常严重的影响，因此也会在很大程度上影响到最终产品的性能。

#### (3)烧结

烧结是粉末冶金过程的最后一道工序，是在适当的温度和气氛条件下，对松装粉末或者粉末压坯加热使颗粒彼此间发生粘结，增强烧结体强度和密度的过程。

对产品的最终性能起着决定性作用。

粉末冶金工艺发展日新月异，早已远远超过此范畴。工艺流程举例如图1.1所示。

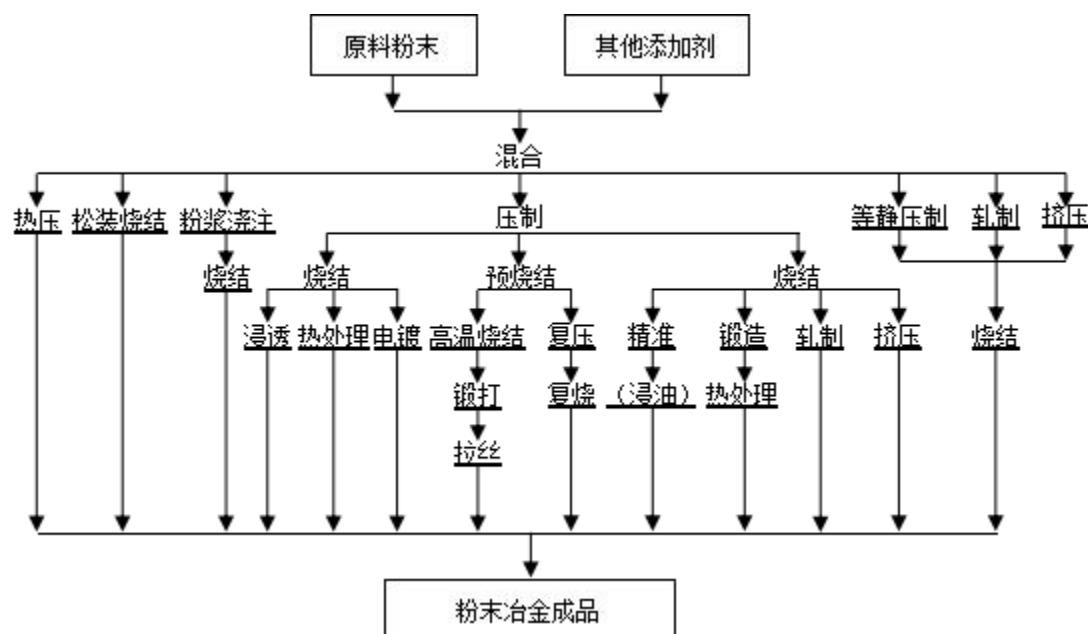


图 1.1 粉末冶金材料和制品的工艺流程举例

### 1.1.2 粉末冶金发展简史

粉末冶金是一项高新技术，同时也是一项非常古老的技术。据考古学资料显示，该技术最早可以追溯到公元前 3000 年左右，古埃及人在当时采用碳还原氧化铁的方式得到了海绵铁，然后再经过高温锻造和捶打将其打造成为了致密的铁器。印度的铁匠在 3 世纪的时候也是同样采用了这种方法成功制造了重量高达 6.5 吨的“德里柱”。后来俄国和英国也在 19 世纪初出现了将海绵铂粉经过冷压、烧结成为铂制品的技术。但粉末冶金技术开始迅猛发展则是在 1909 年，库利奇当时成功制造了电灯钨丝引爆了粉末冶金工艺的发展。现代粉末冶金技术发展有 3 个重要标志<sup>[1,2]</sup>。

(1)攻克了难熔金属在熔铸过程当中产生的困难，成功制造出硬质合金和难熔金属。推动粉末冶金工业发展第一步便是 1909 年库利奇使用粉末冶金技术成功制造出电灯钨丝，该技术也将爱迪生发明的电灯实现了真正意义上的普及。自此以后很多难熔金属(钨、钼等)均采用粉末冶金技术成为唯一生产方式。1923 又同样采用粉末冶金技术成功生产出了硬质合金，硬质合金的出现为机械加工工业注入了鲜活的血液，至此奠定了粉末冶金工艺在材料研究领域的地位。

(2)多空含油轴承的成功制造。采用粉末冶金技术制造的多孔含油轴承在 20 世纪 30 年代横空出世，该轴承一经问世便迅速大范围应用于汽车、纺织以及航天等领域。随后粉末冶金技术凭借其少切削或无切削的特点成功应用于铁基类机械

零件的生产。

(3)更多更高级的粉末冶金新材料和新工艺的不断发展。自 20 世纪 40 年代出现了金属陶瓷和弥散强化材料等新型材料以后,粉末高速钢和和高速合金也相继于 1970 年左右出现。更有新工艺诸如热等静压、粉末热锻等不断出现,无一不彰显了粉末冶金技术发展的光明前景。

### 1.1.3 粉末冶金特点

#### (1)生产具有独特性能的材料

粉末冶金技术能够通过控制制品的孔隙度或者利用不同金属粉末的组合效果生产出具有特殊性能的材料,包括结构材料、功能材料或者复合材料等,像多空含油轴承、金属或非金属组成的摩擦材料、纤维强化复合材料等。

#### (2)能够生产性能优异的材料

现阶段很多难熔金属材料或制品(钨、钼等)均采用粉末冶金作为唯一生产方式,其制品相对普通熔炼法而言晶粒更细,纯度也更高。

(3)少切削甚至无切削的工艺特点决定了粉末冶金是一种高效率、低成本的机械加工工艺。

但粉末冶金依然有其不足之处就是粉末成本较高,鉴于模具成本较高的原因,粉末冶金适合大批量生产。

### 1.1.4 粉末冶金应用

粉末冶金工艺在材料领域占有举足轻重的地位,应用领域非常之广泛。目前主要应用范围有:(1)机械零件和结构材料,比如摩擦材料、减摩材料等;(2)多孔材料,比如泡沫金属、发汗材料等;(3)电工材料,比如集电材料、电触头材料等;(4)工具材料,比如陶瓷工具材料、超硬材料等;(5)粉末磁性材料,比如铁氧体材料、高温磁性材料;(6)耐热材料,比如纤维强化材料、粉末高温合金等;(7)原子能功能材料,比如核燃料元件和屏蔽材料等。

经过60年的飞速发展,粉末冶金技术应用遍布我国的各行各业,取得了非常骄人的成绩,为我国现代化工业的发展作出了不可磨灭的贡献。但目前我国的粉末冶金技术跟国外相比较仍然存在差距。大力发展粉末冶金技术仍然是我国当前材料领域的重点。

## 1.2 课题研究背景

压制成形是粉末冶金生产的一个重要环节。经压制成形的待烧结胚体或零件虽然不是最终的产品,但由于其尺寸、形状、密度、孔隙度和强度在很大意义上决定着粉末冶金最终产品的质量,因此研究压制成形过程是粉末冶金领域的一个

重要研究领域。

对成形制品的质量影响最大的是工艺以及模具分析，现阶段产品工艺以及模具设计通常情况下仍然是以图表、资料、近似公式以及设计人员经验为主要依据，即“经验设计”。该种设计方法通常依据大量经验进行设计，需要以多种工艺方案进行多次试制，不断总结经验，改进设计。这无疑会造成巨大的浪费，导致产品设计以及生产周期延长。随着世界范围内粉末制品行业竞争加剧，各国均在积极采取更为有效的方法，降低生产成本，提高产品质量，缩短产品开发周期。现阶段国外粉末冶金行业已经将计算机仿真技术运用于金属粉末烧结体成形和粉末等静压成形<sup>[3]</sup>。对粉末压制成形过程的数值模拟也在积极研究，但尚未得到有效应用。主要是因为粉末压制过程中的零件实际形状复杂多变，加载条件多样，同时粉末压制成形机理没有定论，现有的数学模型还不能完全正确的描述真实的粉末成形过程。因此很有必要对粉末压制过程进行计算机仿真。欧洲目前在粉末冶金数值仿真领域处于世界领先地位<sup>[4]</sup>。

### 1.3 粉末成形数值模拟软件介绍及选择

市场上现存有很多种数值模拟商业软件，比方我们所熟知的就有 Abaqus、ANSYS、DEFORM 以及 MSC.Marc 等，这些软件都是目前应用率很高、发展很成熟的仿真软件。同时在粉末冶金领域，这些软件也都有所应用并取得了很好的效果。但不同的软件有各自不同的优势领域。为了保证数值模拟结果计算的准确性和高效性，选择合适的仿真软件至关重要。

#### 1.3.1 Abaqus 软件

Abaqus 软件自身具备丰富的材料模型和成熟的塑性理论。可用于仿真多种比较典型的材料性能，能满足多种材料需求，像金属材料、复合材料、高分子材料、土壤岩石、橡胶、建筑用材料等等。针对金属粉末和土塑性问题，Abaqus 软件有 Mohr-Coulomb 模型、Cam-Clay 模型、扩展的 Drucker-Prager 模型以及修正的 Drucker-Prager-cap 模型等等，同时结合等向硬化和软化规律，并且通过采取不同的塑性势函数和模型参数从而构成关联流动或者非关联流动能够很好的分析此类问题。另外，Abaqus 软件也具备将与速率无关的塑性模型和蠕变进行耦合的能力，比如修正的 Drucker-Prager-cap 模型，该模型在其剪切失效区域与帽子区域分别耦合了内聚蠕变(Cohesion creep)机制与固结蠕变(Consolidation creep)机制，能够非常有效的分析解决材料的蠕变膨胀与压缩现象。Abaqus 提供了 2 种蠕变-幂函数模型和双曲正弦模型，可以非常方便的分析蠕变与黏塑性问题。针对微观力学问题，Abaqus 给用户提供了 Abaqus 脚本接口(Abaqus Scripting Interface)，用户可以通过对 Python 语言进行代码编写从而实现定制功能的开发。这也为密集堆积



球形颗粒的建立提供一种途径。

### 1.3.2 MSC.MARC软件

MSC.Marc 是一款功能十分齐全的有限元分析软件，它不仅针对非线性问题具有非常强大的处理能力，同时针对粉末材料还有专门特制的 Shima 模型对其进行相应的分析。当粉末体材料发生塑性变形或者是黏性行为时，MSC.Marc 不仅可以针对粉末体的蠕变或者塑性变形进行单独针对性的分析，还可以通过采用统一黏塑性的方法对粉末体存在的两种行为同时进行分析，这样在研究粉末压制的同时就能一并考虑其蠕变行为的影响。现阶段 Marc 凭借其内置的粉末材料 Shima 屈服准则，在粉末压制计算机仿真分析中表现十分亮眼，使用人数非常多。

### 1.3.3 ANSYS软件

作为一款大型通用有限元分析软件，ANSYS 软件最早是由目前全世界最大的仿真设计公司美国的 ANSYS 公司研发的，ANSYS 软件一经推出便迅速被大众所接受成为在全世界使用率增长最快的 CAE 软件。美国 ANSYS 公司分别于 2006 年和 2008 年相继收购了美国 fluent 公司和美国 Ansoft 公司，fluent 软件和 Ansoft 软件分别在流体计算仿真领域和电磁仿真领域处于世界顶尖水平，因此经过整合 ANSYS 软件在处理流体和电磁仿真领域具有非常强大的功能，同时也能进行动力学分析、热分析、声场分析、压电分析、结构静力分析、结构动力分析。应用领域包括航空航天、通信、医疗、电子、车辆、船舶等众多高新领域。虽然 ANSYS 软件也能针对一般的稳态或瞬态结构非线性进行有效的分析，但是粉末压制成形过程是一个高度非线性的过程，ANSYS 软件本身也并没有专门针对粉末体的材料模型。因此目前几乎很少有关于 ANSYS 进行粉末压制成形模拟的研究。

### 1.3.4 DEFORM软件

DEFORM 是一款针对变形分析具有比较不错能力的有限元工艺仿真系统。目前应用较多的领域是金属成型和热处理等方面。但由于 DEFORM 软件只有 3 种内置的屈服条件，当针对各向同性的材料进行分析时，DEFORM 软件默认会使用 Von Mises 屈服准则，而 Von Mises 屈服准则并不适合针对粉末材料进行分析。但该软件在粉末金属成型研究领域依然有所涉及，该软件有内置的多孔体(Porous)模型可以仿真多孔体在压制或烧结过程中的致密化行为。但多孔体的蠕变行为在 DEFORM 软件中无法进行仿真，此外 DEFORM 软件只能通过直接迭代法对多孔体的成形过程进行计算，而直接迭代法由于收敛速率非常慢会造成计算时间过长效率低下。另外，如果粉末体是松散状态，也不能用该软件进行压制模拟。

### 1.3.5 粉末成形数值模拟软件选择

由 1.3.1 至 1.3.4 的内容可知,在粉末压制成形领域方面,目前市场上存在的各主流分析软件都有其优势和局限性。ANSYS 软件由于其处理高度非线性问题的能力较差几乎很少被用于粉末成形计算机仿真领域。DEFORM 软件虽然擅长处理大变形问题,在粉末材料领域也有一些应用,但由于没有内置的适合粉末材料的屈服准则,同时也不能对松散粉末颗粒模型进行压制模拟分析,因此局限性也较大。而 Abaqus 软件和 MSC.Marc 软件都具有极其强大的处理高度非线性问题的能力,在粉末成型领域应用较多,取得成果也非常丰硕。相对比较 Abaqus 二次开发方面能力比 MSC.Marc 软件较好。而 MSC.Marc 软件特别内置的 Shima 模型也是其独特的优势。

## 1.4 粉末金属成形建模国内外研究现状

粉末金属成形过程计算机模拟成功的关键在于描述材料流动的模型的准确性。粉末金属是由大量的颗粒组合而成,同时每个颗粒都可以被视为一个完全致密体,但由于颗粒彼此间存在间隙,因此粉末体又是一个非连续体。非连续体变形问题的研究就要协调好单个颗粒和颗粒整体之间的协调关系,不单要考虑粉末成形的特性(体积变化、静水压力、材料流动应力),同时要考虑粉末颗粒参数和压制工艺的影响,现阶段学术界还没有一个数学模型可以用来完全准确的描述该过程,因此针对粉末压制成形机理的研究目前也没有定论。当前粉末金属成形建模途径基本分为两类:基于连续介质力学和非连续介质力学。

### 1.4.1 基于连续介质力学研究

粉末颗粒在压制初期从本质上来讲是非连续体,但由于现阶段非连续介质力学理论发展还不完善,大多数学者均采用连续介质力学理论对粉末成形过程进行研究,基于连续介质力学就是将粉末体当作“可压缩的连续体”,然后采用连续体塑性力学理论针对粉末体变形行为进行研究。

基于连续介质力学的建模方法目前主要有两种:(1)以粉末金属烧结多孔材料的塑性力学为基础的建模途径;(2)以土塑性力学为基础的建模途径。

#### 1.4.1.1 以粉末金属烧结多孔材料的塑性力学为基础的建模途径

粉末成形过程由于伴随着胚体密度和体积两方面的不断变化而变得非常复杂,但值得我们注意的是粉末体在整个变形过程中的整体变形依然是遵循着我们所熟知的质量不变定律,同时颗粒的变形也是遵循着体积不变的原则。因此,质量不变定律是我们研究粉末体变形的最主要的基础方程之一。

连续性假设,以粉末金属烧结多孔材料的塑性力学为基础的建模途径需要将粉末体假设为“可压缩的连续体”,并以此为基础研究粉末体的变形演化行为。

外力在粉末体颗粒之间进行传递时由于粉末体颗粒之间存在间隙，因此其传递方式是通过颗粒之间的接触点进行传递。但由于粉末体颗粒散乱分布的特性，我们无法准确的定义每个颗粒的位置和由于其散乱分布造成的间隙大小，同时我们也无法准确得知应力的作用方向，因此在进行应力计算时只能通过粉末体中存在的微小面积  $\Delta A$  上的力表示，公式表示为  $\Delta P / \Delta A = \sigma$ 。观察此式，由高等数学知识可知，当  $\Delta A$  趋近于 0 时，此时  $\sigma$  会趋于无穷，在这种情况下，应力传递就会发生间断。为了保证应力的传递在变形体内是连续变化的，因此很有必要针对间断处存在的应力进行补充定义，具体补充定义：

当  $A \neq 0$  时：

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1.1)$$

当  $A = 0$  时：

$$\sigma = q \quad (1.2)$$

式中  $q$  表示孔隙处的应力。

这样保证了应力在粉末体内各点变化是连续后，我们便可以引入弹塑性力学中的一些概念比如应力或者应变对粉末体的变形进行研究。

建立准确的粉末体屈服准则是对粉末体材料的变形行为进行研究的核心理论之一。在一定应力状态条件下，粉末体的屈服准则可以被认为是粉末体由弹性状态转变为塑性状态的力学条件。图 1.2 表示了屈服准则的几何意义。

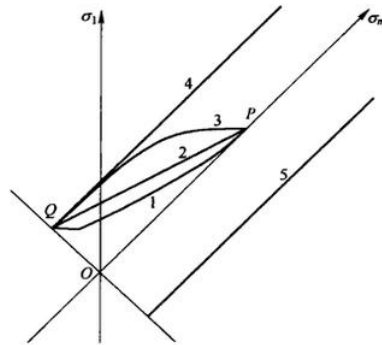


图 1.2 屈服准则的几何意义

完全致密体发生塑性变形时不会涉及到材料的体积变化，此时静水应力对于致密体的屈服没有影响，泊松比为 0.5。可以通过 Von Mises 屈服准则描述完全致密体的屈服：

$$f = 3j_2' - \sigma_0^2 = 0 \quad (1.3)$$

式中  $f$  表示屈服表面函数； $j_2'$  表示应力偏张量第 2 不变量； $\sigma_0$  表示完全致密体的流动应力。

粉末体由于内部空隙的存在被视为可压缩材料，虽然粉末体和传统意义上的

完全致密体的塑性变形行为基本类似，但研究粉末体的屈服准则时，必须考虑体积变化、静水应力对塑性变形的影响。鉴于这种原因，很多学者在建立屈服准则时都将其写成  $J_1$  和  $J_2'$  的函数。材料参数的设置仅仅与相对密度有关，即：

$$f(J_1, J_2', R) = 0 \quad (1.4)$$

式中  $J_1$  代表应力张量第一不变量； $J_2'$  代表应力偏张量第二不变量， $R$  代表相对密度（粉末体密度与理论密度的比值）。

并且，大多数的屈服准则目前都可以采用如下形式表示：

$$AJ_2' + BJ_1' = \delta Y_0^2 = Y_R^2 \quad (1.5)$$

式中  $Y_0$  表示基体材料流动应力； $Y_R = (\delta)^{1/2} Y_0$  表示金属粉末体的流动应力； $A, B, \delta$  表示相对密度的函数。

与式 1.5 相对应的流动本构关系表示为：

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{d\varepsilon_R}{2Y_R} (A\sigma_{ij}' + 2BJ_1'\delta_{ij}) \quad (1.6)$$

通常情况下，式 1.5 需要同时符合两个条件：(1) 当  $\rho \rightarrow 0$  时，应该将多孔可压缩材料屈服准则退化为 Von Mises 屈服准则；(2) 如果变形体在单向均匀应力状态载荷下发生屈服，那么屈服应力的数值上应该等于变形体所受到的单向应力大小，因此可推导出  $A$  和  $B$  的关系式：

$$A = 3(1 - B) \quad (1.7)$$

以粉末烧结体塑性力学方式为基础的建模途径都是在求解完全致密体的基础上进行一定的假设，然后再通过与实验对比进行修正。最早的基于金属塑性力学的模型是由 Kuhn 和 Downey 从烧结铁粉(MH-100)实验得出<sup>[5]</sup>，该模型提出将粉末压制的屈服面当作一椭球面，塑性泊松比设置为相对密度的函数，屈服准则中的参数设置为泊松比的函数。但是屈服函数和基体材料的流动应力没有关系，所以基体材料如果有硬化便不能用该模型处理。尽管该模型是半定量模型，依然对以后的研究产生了深远的影响。Green 以刚塑性材料为研究对象假设了一个厚壁球壳模型，在纯剪切和纯等静压条件下推导出了屈服准则<sup>[6]</sup>。Oyane 以立方体单元胞模型为基础推倒屈服准则<sup>[7]</sup>。Gurson 将多孔体材料假设为一个含孔的刚塑性单元胞，然后通过上限逼近法得到一种屈服准则<sup>[8]</sup>。Doraivelu 等人基于能量守恒原理，制作了一系列具有不同初始相对密度的材料，通过进行压制实验建立了多孔材料屈服准则<sup>[9]</sup>。Kim 通过补充两个实验参数对 Shima-Oyane 准则进行修改建立了自己的准则<sup>[10]</sup>。Lee 修改了粉末流动应力与基体流动应力的关系，在 Doraivelu 模型基础上建立了自己的模型<sup>[11]</sup>。汪俊等为了解决金属塑性力学模型在低密度区域描述不准确的短板，进行了闭模压制实验，通过实验数据在全区域范围内对粉末压制密度变化进行拟合建立了自己的模型<sup>[12]</sup>。S.J.Park 和 C.H.Park 通过修改材料几何参数，在 Lee 模型的基础上建立了自己的模型<sup>[13]</sup>。关于该领域的屈服准则

还有很多，比如 Tabata 屈服准则<sup>[14]</sup>、Hwang 屈服准则<sup>[15]</sup>，但由于理论缺陷或推导公式形式太过复杂，很少被实际应用。

#### 1.4.1.2 以土塑性力学为基础的建模途径

因为粉末体和土体两种材料都含有孔隙，并且在屈服过程中体积都可以发生变化，所以两者在性质方面有着非常重要的相似性。目前国内外已经有很多研究者以土塑性力学理论为出发点，成功建立了粉末体压制成型模型，取得了很多成果。

不论是粉末成形过程还是土体材料的变形过程，研究它们的变形规律都是非常困难的，数值模拟当中为了简化计算需要做出一些假设，主要包括 3 种假设：(1)连续性假设，因为它仍然属于连续介质力学的研究范围；(2)各向同性假设，即假设所研究的材料性质是各向同性的；(3)通常情况下不考虑时间的影响，如果时间较短，可以不考虑蠕变和松弛效应的影响。如果应变率也不太大的话，在研究塑性变形规律时也可以忽略变形率的影响。

典型的土体屈服准则最早就是由 Mohr-Coulomb<sup>[16]</sup>提出，Mohr-Coulomb 屈服准则在三维应力空间当中的表达式为：

$$f(\sigma, h) = \frac{1}{3} J_1 \sin \varphi + (J_2')^{1/2} \cos \theta - \left( \frac{1}{3} J_2' \right)^{1/2} \sin \varphi \sin \theta - C \cos \varphi - h(\varepsilon_v^p) \quad (1.8)$$

式中  $h$  表示硬化模量； $\varphi$  表示内摩擦角； $\theta$  表示膨胀角； $C$  表示黏聚力。

Mohr-Coulomb 屈服表面在主应力空间当中是一个中心轴线与等倾线重合的棱锥面。并且在不同的平面  $(J_2')^{1/2} - \sigma_m$  和  $\pi$  平面上，Mohr-Coulomb 屈服准则的表现形式不一样，在  $(J_2')^{1/2} - \sigma_m$  平面内屈服线表现为两条直线；但在  $\pi$  平面上，Mohr-Coulomb 屈服准则表现形式为一个不等边六边形。具体见图 1.3a、b。

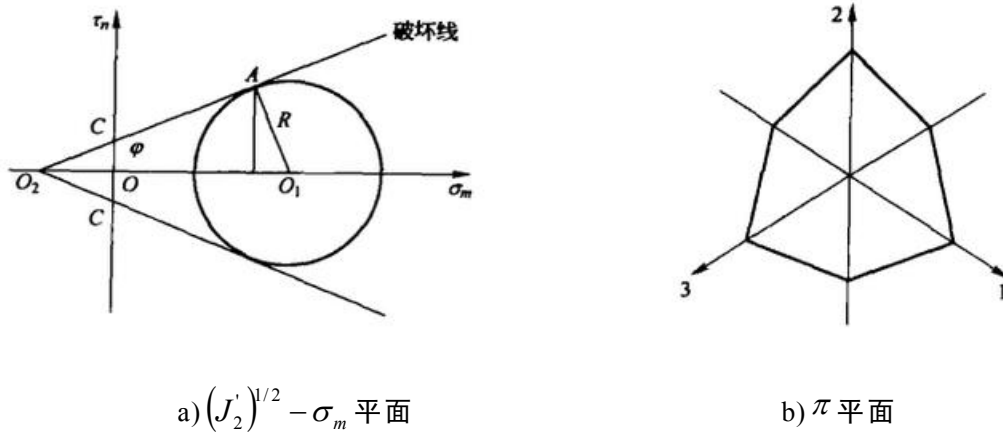


图 1.3 Mohr-Coulomb 模型屈服表面

Drucker 等人则提出屈服表面在主应力空间当中是一个圆锥面，在  $\pi$  平面上，屈服线表现为 Mohr-Coulomb 屈服线内切圆<sup>[17]</sup>，屈服准则表达式为：

$$F = \alpha J_1 + (J_2')^{1/2} - K = 0 \quad (1.9)$$

其中

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{2}\sqrt{3+\sin^2 \varphi}} \quad (1.10)$$

$$K = \frac{\sqrt{3}C \cos \varphi}{\sqrt{3+\sin^2 \varphi}}$$

其后，很多学者通过对系数  $\alpha$ 、 $K$  进行修改提出新的屈服准则，通称为广义 Von Mises 屈服准则。广义 Von Mises 屈服准则在  $\pi$  平面内依然是圆，在主应力空间屈服面表现为一个圆锥体面，中心轴线重合于等倾线。具体见图 1.4。

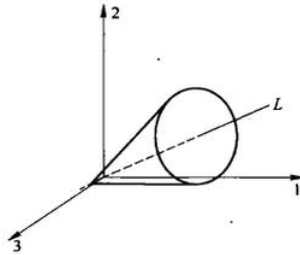


图 1.4 广义 Von Mises 屈服准则

Jenike 和 Shield 选择用平底封闭 Mohr-Coulomb 屈服锥面<sup>[18]</sup>。Suh 提出了一个屈服准则，屈服表面表现为旋转双曲线<sup>[19]</sup>，但由于公式形式过于复杂并且没有考虑相对密度影响，实际应用较少。Sandler 等人在将土体假设为加工硬化材料的基础上提出了 Cam-Clay 模型，后来又经过修改提出了修正的 Cam-Clay 模型，修正以后屈服表面在主应力空间当中表现为一个锥面加上一顶椭球面帽子，随着加工硬化，椭球面帽子向外不断扩大<sup>[20]</sup>。DiMaggio 和 Sandler 共同提出了 DiM.-S 帽子模型<sup>[21]</sup>。

#### 1.4.2 基于非连续介质力学研究

虽然许多专家用连续体理论对粉末压制过程进行了大量研究，在描述粉末体成形宏观行为方面取得了较好的效果，但是，连续体方法不能涉及颗粒特性，如颗粒的几何因素(颗粒的大小以及分布等)、物理因素(颗粒间作用力等)和颗粒表面因素(摩擦和黏性)的影响。为了研究粉末的微观特性对成形性能的影响，就要运用非连续方法。典型的采用非连续方法对粉末压制过程进行研究的是以密集堆积球形颗粒为基础的微观力学方法。

以密集堆积球形颗粒为基础的微观力学方法是把粉末当作颗粒的集合体。2D

情况下粉末颗粒被近似简化为弹性形，3D 情况下则被近似简化为球形，见图 1.5。并且在单个的颗粒行为与粉末集合体的宏观行为之间创建联系。单元之间的作用力通过弹簧阻尼与滑块来表示，见图 1.6。

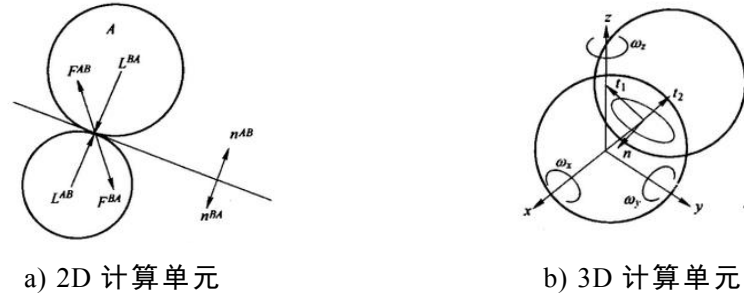


图 1.5 广义 Von Mises 屈服准则

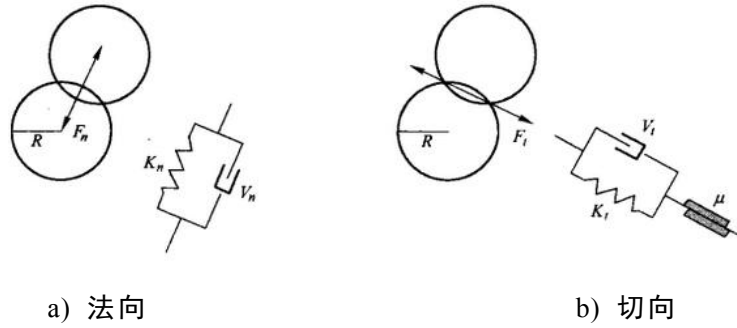


图 1.6 广义 Von Mises 屈服准则

从颗粒彼此间作用力的类型看，可将作用力分为：

(1)接触处法向力。接触处视颗粒的变形，包括弹性和塑性的变形抗力。当颗粒间接触变形非常小时，把电磁力当作主要考虑对象：

$$F_E = 0.733E \sqrt{\frac{R_i R_j}{R_i + R_j}} \delta^{\frac{2}{3}} \quad (\delta \leq \delta_p) \quad (1.11)$$

式中  $F_E = F_n$ ； $E$  为杨氏模量； $R$  为颗粒半径； $i, j$  分别为接触的不同颗粒； $\delta = R_i + R_j - \Delta_{ij}$  为颗粒间因变形而重叠的部分； $\Delta_{ij}$  为颗粒  $i, j$  的中心距离； $\delta_p$  为颗粒塑性变形开始时的临界重叠部分。

此后， $F_E = F_n$ 。但是，式(1)中  $\Delta_{ij}$  难以测定， $R_i, R_j$  都是理想化的尺寸，求解的结果与实际相差较大。

颗粒间的摩擦力。当两个颗粒以切向彼此相向运动时，必然会有摩擦力的产生。最大摩擦力为  $\mu F_n$ ， $F_n$  是接触处法向力， $\mu$  是颗粒间摩擦因子，对于非规则颗粒形状颗粒，难以确定其摩擦因子。

接触处的黏性力。尽管此力很小，但会引起颗粒间的能量消耗。如果不考虑他，接触处动能会随时间增加，黏性力大小由粘度来决定。

重力。在粉末压制成形分析中，一般情况下可以略去。

在进行力学分析时，单元彼此之间的法向、切向接触力为：

$$\begin{aligned}
F_n &= K_n U_n - v_n \dot{U} \\
F_{t1} &= K_t U_{t1} - v_t \dot{U}_{t1} \\
F_{t2} &= K_t U_{t2} - v_t \dot{U}_{t2}
\end{aligned} \tag{1.12}$$

其中：

$$\sqrt{F_{t1}^2 + F_{t2}^2} \leq \mu F_n \tag{1.13}$$

某单元与其相邻单元之间局部接触力矩的总和为：

$$F_g = \sum (F_{t1} \bar{t}_1 + F_{t2} \bar{t}_2 + F_n \bar{n}) \tag{1.14}$$

$$M_g = \sum R F_t \tag{1.15}$$

式中  $\bar{t}_1, \bar{t}_2, \bar{n}$  表示接触面上的切向和法向单位矢量。

这样可得出平衡方程：

$$M\ddot{x} + \eta\dot{x} + F_b + F_g = 0 \tag{1.16}$$

$$I\ddot{\theta} + \eta I\dot{\theta} + M_b + M_g = 0 \tag{1.17}$$

式中  $M$  为单位质量； $\eta$  为总粘度； $F_b$  为体积力。

如果外部存在一加载运动，要求解单元速度、位移的时间历史，只需要将上诉运动方程对时间进行积分便可轻松求解。

Bathurst 假设颗粒间符合 Hooke 定律，将颗粒设为各向同性，采用二维圆盘研究了粉末堆积行为<sup>[22]</sup>。O' Donnell 在二维平面上考虑了孔隙形状对压制的影响<sup>[23]</sup>。Chang 等人针对颗粒的各向异性进行了深入研究<sup>[24]</sup>。谷曼建立了粉末颗粒的二维模型、随机排布颗粒模型，讨论了粉末高速压制过程中接触问题算法和模拟过程中的关键问题<sup>[25]</sup>。孙龙建立了二维对排颗粒模型、三维球形颗粒模型以及二维随机排布颗粒模型，探讨了模壁摩擦、压制方式以及压制力对颗粒的流动性、应变情况以及压坯的密度影响<sup>[26]</sup>。郑珊建立了不同半径的二维随机排布球形颗粒模型，并且对其进行了高速压制成形模拟<sup>[27]</sup>。柏厚义建立了均匀分布的三维球形颗粒模型，讨论了界面摩擦、压制力、压制方式、压制速度等对于制品性能的影响<sup>[28]</sup>。王文涛<sup>[29]</sup>建立了铁粉三维离散元压制模型。Shima 和 Redanz 模拟了二维随机分布的堆积颗粒的压制过程，并探讨了摩擦系数对堆积密度的影响<sup>[30~32]</sup>。

## 1.5 本文的研究意义及主要内容

### 1.5.1 研究意义

由上述内容可知，以连续介质力学为基础是粉末多孔体成形建模的主要途径。很多著名研究者基于该途径也取得了重大的研究成果，但该方法只是在描述压胚



的高密度成形阶段具有较高的准确性，虽然汪俊推导出的屈服准则解决了低密度阶段相对不精确的问题，但是没有考虑到颗粒的大小、制粉的方式对材料加工硬化的影响，因而也在一定程度上限制了该途径的适用范围。

土体与粉末金属的确有很多相似的地方，因而很多专家学者以土塑性力学为基础建立屈服准则也取得了重要成果。但归根结底两者还是有很多不同的特性，包括颗粒的几何因素(颗粒尺寸大小、形状以及分布)、颗粒表面特性(摩擦、黏性)和物理因素(颗粒间作用力)等等均会导致在成形时两者具有不一样的性质。虽然在做了很多的假设之后可以采用土塑性力学途径进行粉末压制成形建模，但势必会有误差，而且该途径建立的屈服准则涉及过多参数均需要从大量实验中获取，因此实际应用还是有较大的困难。

以密集堆积球形颗粒为基础的微观力学方法考虑到了粉末压制过程中粉末具有颗粒性，在这方面弥补了基于连续介质力学建模的不足，具有一定的实际意义。但目前该途径的研究内容非常少，一方面是由于颗粒间作用力比较复杂，需要进一步改善作用力模型。另一方面则是因为密集堆积球形颗粒建模的困难，现在的仿真软件还不具备建立随机分布的三维密集堆积球形颗粒模型的能力，因此可以看到目前大多数学者的研究还是以二维和均匀分布为主，关于三维随机分布颗粒模型的堆积行为研究很少。本文将针对粉末成形建模的短板领域进行研究，基于微观力学方法，在细观尺度用 Abaqus 6.14 软件对粉末压制成形过程进行计算机仿真，以期对该领域的发展提供指导及理论依据。

### 1.5.2 主要内容

(1)用 Python 二次开发工具，生成随机分布的具有 2 种尺寸的三维密集堆积球形松散粉末颗粒模型。

(2)基于密集堆积球形颗粒的微观力学方法进行建模，利用有限元分析软件 Abaqus 6.14 在细观尺度上对粉末的压制成型过程进行模拟,研究随机分布的三维密集堆积球形松散粉末颗粒的堆积行为，并探讨摩擦系数、压制方式(单向压制、双冲头双向压制)对粉末堆积行为和压胚密度的影响规律。

(3)采用连续介质力学理论，基于金属塑性力学方法进行建模。通过 Abaqus6.14 版本软件建立同时具有温度场、电场、位移场的三场直接耦合模型，对导电粉末材料和不导电粉末材料的放电等离子烧结过程进行模拟，探讨烧结终态时刻烧结系统的温度场分布规律，以及烧结材料对温度场分布规律的影响。

## 第二章 粉末成形数值模拟关键技术

### 2.1 粉末成形的有限元计算方法

#### 2.1.1 弹塑性有限元方程的建立

由于在塑性加工过程中，有一部分变形功会转化成热能，因此塑性变形过程是不可逆的，材料最终的性能也取决于应力和变形的加载、卸载历程。因此原则上，增量理论相比形变理论而言，前者更适合用来描述弹塑性变形的本构关系。

当材料从弹性变形阶段进入弹塑性变形阶段后，应变分量  $d\varepsilon_{ij}$  等于弹性应变分量  $d\varepsilon_{ij}^e$  加塑性应变分量  $d\varepsilon_{ij}^p$ ：

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (2.1)$$

塑性应变分量的增量此时满足：

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.2)$$

式中  $d\lambda$  表示正比例函数； $\varepsilon_{ij}$ ， $\sigma_{ij}$  表示应力和应变张量。

利用弹性应力应变关系，可用下式将应力增量表示为：

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e d\varepsilon_{kl}^e = D_{ijkl}^e d\varepsilon_{kl} - D_{ijkl}^e d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.3)$$

式中  $D_{ijkl}$  表示四阶材料本构张量。

通常情况下，屈服函数可表示成应力分量与塑性应变的函数：

$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0 \quad (2.4)$$

微分式为：

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{ij}^p} d\varepsilon_{ij}^p = 0 \quad (2.5)$$

式中  $\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$  为与变形强化相关的物理量。

将式(2.2)和式(2.3)带入式(2.5)，整理后得：

$$d\lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl}^e d\varepsilon_{kl}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl}^e \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{ij}^p} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}} \quad (2.6)$$

将式(2.6)带回式(2.3)得：

$$d\sigma_{ij} = (D_{ijkl}^e - D_{ijkl}^p) d\varepsilon_{kl} = D_{ijkl}^{ep} d\varepsilon_{kl} \quad (2.7)$$

式中  $D_{ijkl}^{ep}$  为弹塑性矩阵。

$$D_{ijkl}^{ep} = D_{ijkl}^e - \frac{D_{ijmn}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} D_{ijkl}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} - \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{ij}^p} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}} \quad (2.8)$$

或将式(2.8)表示成矩阵形式：

$$[D^{ep}] = [D^e] - \frac{[D^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D^e]}{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} - \left\{ \frac{\partial f}{\partial \varepsilon^p} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}} \quad (2.9)$$

在对弹塑性变形进行分析时，通常会将完整的载荷分解成很多个载荷增量，然后针对每一个载荷增量进行单独求解。假定某一时刻  $t$  的位移、应力、应变已知，求解  $t + \Delta t$  时刻的应力、应变和位移。此时载荷和位移边界条件增量可以表示为：

$$\begin{aligned} {}^{t+\Delta t} \overline{F}_i &= {}^t \overline{F}_i + \Delta \overline{F}_i \\ {}^{t+\Delta t} \overline{T}_i &= {}^t \overline{T}_i + \Delta \overline{T}_i \\ {}^{t+\Delta t} \overline{u}_i &= {}^t \overline{u}_i + \Delta \overline{u}_i \end{aligned} \quad (2.10)$$

$t + \Delta t$  时刻的应力、应变和位移表示为：

$$\begin{aligned} {}^{t+\Delta t} u_i &= {}^t u_i + \Delta u_i \\ {}^{t+\Delta t} \varepsilon_{ij} &= {}^t \varepsilon_{ij} + \Delta \varepsilon_{ij} \\ {}^{t+\Delta t} \sigma_{ij} &= {}^t \sigma_{ij} + \Delta \sigma_{ij} \end{aligned} \quad (2.11)$$

此时它们需要符合的方程和边界条件为：

平衡方程(在  $V$  领域内)

$${}^{t+\Delta t} \sigma_{ij,j} + {}^{t+\Delta t} \overline{F}_i = 0 \quad (2.12)$$

几何方程(在  $V$  领域内)

$${}^{t+\Delta t} \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( {}^{t+\Delta t} u_{i,j} + {}^{t+\Delta t} u_{j,i} \right) \quad (2.13)$$

本构关系(在  $V$  领域内)

$$\Delta \sigma_{ij} = {}^\tau D_{ijkl}^{ep} \Delta \varepsilon_{ij} \quad (t \leq \tau \leq t + \Delta t) \quad (2.14)$$

边界条件

$${}^{t+\Delta t} \sigma_{ij} n_j = {}^{t+\Delta t} \overline{T}_{ij} \quad \text{在 } S_T \text{ 上} \quad (2.15)$$

$${}^{t+\Delta t}u_i = {}^{t+\Delta t}\bar{u}_i \quad \text{在 } S_u \text{ 上} \quad (2.16)$$

从以上推导可以看出,除本构关系式(2.14)稍有区别外,针对一个增量步内发生的小变形弹塑性分析与与线弹性分析问题是一致的。

弹塑性有限元方程的获得可以采用建立虚位移原理(增量形式)的方式。当  $t + \Delta t$  时刻的应力、体力和边界条件均满足平衡方程时,此力系的总虚功等于 0,用公式表示为:

$$\begin{aligned} & \int_V ({}^t\sigma_{ij} + \Delta\sigma_{ij}) \delta(\Delta\varepsilon_{ij}) dV - \int_V ({}^t\bar{F}_i + \Delta\bar{F}_i) \delta(\Delta u_i) dV \\ & - \int_{S_T} ({}^t\bar{T}_i + \Delta\bar{T}_i) \delta(\Delta u_i) dS = 0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

将公式(2.14)带入公式(2.17),写成矩阵形式可得:

$$\begin{aligned} & \int_V \delta(\Delta\varepsilon)^T [{}^\tau D^{ep}] \Delta\varepsilon dV - \int_V \delta(\Delta\varepsilon)^T \Delta F dV - \int_{S_T} \delta(\Delta u)^T \Delta \bar{T} ds \\ & = - \int_V \delta(\Delta\varepsilon)^T {}^\tau \sigma dV + \int_V \delta(\Delta u)^T \bar{F} dV + \int_{S_T} \delta(\Delta u)^T \bar{F} ds \end{aligned} \quad (2.18)$$

此式即为增量形式的虚位移原理。公式右端即为引入的修正项,其目的是为了解决在  $t$  时刻,即计算完成终了时刻  ${}^t\sigma_{ij}$ 、 ${}^t\bar{F}_i$ 、 ${}^t\bar{T}_i$  可能不精确需要满足平衡的要求。

通过节点位移增量的插值形式对单元位移增量进行表示得:

$$\Delta u = N \Delta \{a^e\} \quad (2.19)$$

几何方程

$$\Delta\varepsilon = \{B\} \Delta \{a^e\} \quad (2.20)$$

将公式(2.20)带入(2.18),得到有限元系统方程:

$$\{{}^\tau K^{ep}\} \Delta \{a\} = \Delta \{Q\} \quad (2.21)$$

此式中,  $\{{}^\tau K^{ep}\}$  代表系统弹塑性刚度矩阵;  $\Delta \{a\}$  代表增量位移向量;  $\Delta \{Q\}$  代表不平衡力向量。其中

$$\begin{aligned} \{{}^\tau K^{ep}\} &= \sum_e \{{}^\tau K^{ep}\}^e \\ \Delta \{a\} &= \sum_e \{a\}^e \\ \Delta \{Q\} &= \{{}^{t+\Delta t}Q_l\} - \{{}^tQ_l\} = \sum_e \{{}^{t+\Delta t}Q_l\}^e - \sum_e \{{}^tQ_l\}^e \end{aligned} \quad (2.22)$$

其中:

$$\{{}^\tau K^{ep}\}^e = \int_{ve} \{B\}^T \{{}^\tau D^{ep}\} \{B\} dV \quad (2.23)$$

$$\{{}^{t+\Delta t}Q_l\}^e = \int_{ve} \{N\}^T \{{}^{t+\Delta t}\bar{F}\} dV + \int_{S_T^e} \{N\}^T \{{}^{t+\Delta t}\bar{T}\} ds \quad (2.24)$$

$$\{Q_i\}^e = \int_{ve} \{B\}^T \{\sigma\} dv \quad (2.25)$$

以上公式(2.24)中 ${}^{t+\Delta t}Q_i$ 表示外加载荷向量；公式(2.25)中 ${}^tQ_i$ 表示内力向量，因此 $\Delta Q$ 被称为不平衡向量。

### 2.1.2 几何非线性有限元方程的建立

对于几何非线性方程的建立，当前最普遍的做法依旧是以虚功原理为出发点，直接通过使用应力与共轭应变获得。

假设时间间隔为 $\Delta t$ ，初始时刻为0，时刻0、 $\Delta t$ 、 $2\Delta t$ 、 $3\Delta t$ 、 $4\Delta t \cdots$ 、 $t$ 的解均已经获得，目标需要求解时刻 $t + \Delta t$ 的各个未知量。

根据上节内容中所提到的应力和应变共轭对概念的描述，在时刻 $t + \Delta t$ 的虚功计算可以通过 Almansi 应变和 Almansi 应变描述为下式：

$$\int_{t+\Delta t V} \sigma_{ij} \delta^{t+\Delta t} e_{ij} dv = \int_{t+\Delta t V} {}^{t+\Delta t} F_k \delta u_k dv + \int_{t+\Delta t S_T} {}^{t+\Delta t} T_k \delta u_k ds \quad (2.26)$$

## 2.2 误差评估与网格重新划分

在粉末成形过程当中，粉末产生大位移运动是常有的现象，所以在有限元计算求解过程当中，网格极有可能会产生严重的畸变。网格的有效性是计算结果可靠性的保证，当网格畸变严重时甚至会导致计算过程终止。因此需要不断重新划分新的网格，并将已有的应力、应变、位移等场变量信息传送至新网格中。

以有效误差估计为基础的自适应有限元，是计算机通过得到的误差信息判断解是否足够精确，如果误差过大，便自动进行网格改进以满足精度要求。

目前应用的有4类自适应有限元：

***h*-加密 (*h-enrichment*)**：该法通过局部网格加密的方法提高精度，并不改变插值函数的阶次，便于程序实现。

***p*-改进 (*p-refinement*)**：该方法仅增加局部插值函数的阶次，而网格大小布局不变。*p*-法收敛性通常比*h*-法好。

***r*-法(移动节点法)**：该法通过改变单元形状以达到减小离散误差的目的。单元类型和数量并没有发生改变。

**组合法**：像*h-p*法、*r-p*法等等。*h-p*是目前最前沿的自适应方法，该方法同时增加网格密度和插值函数阶次。但很多问题还在研究，较难实现。

Abaqus 使用任意 Lagrangian-Eulerian(ALE)自适应网格技术保证大变形或材料损伤等求解中具有高质量网格，自适应网格仅仅移动节点，网格拓扑方式不会发生变化，允许单元网格独立于材料移动，可使用在“热-位移耦合”、“动力学，显示”、“动力学，热-位移”和“静力，通用”等分析类型上，主要应用于冲压、

轧制等大变形问题。在 Step 功能模块通过菜单 Other → ALE Adaptive Mesh Controls → Create 命令，可进入自适应控制对话框。

## 2.3 接触与摩擦处理

### 2.3.1 接触力的计算

在粉末成形过程中，模具和粉末压胚一定会产生接触，当两者接触时就必须符合无穿约束条件：

$$(u_1 - u_2)n + l_0 \geq 0 \quad (2.27)$$

式中， $u_1$  表示粉末的位移矢量； $u_2$  表示模具表面的位移向量； $n$  表示模具的单位外法线向量； $l_0$  表示粉体压胚和模具的初始间距。

从数学角度方面，对于接触力的计算，目前主要有 3 种基本算法可以选择，它们分别是拉格朗日乘子法、以迭代求解为基础的直接约束法和罚函数法。

#### 2.3.1.1 拉格朗日乘子法

拉格朗日乘子法对接触力的考虑是将其视为附加的自由度，该方法的泛函形式不仅包括一般情况下的能量部分，另外增加了拉格朗日乘子项：

$$\Pi(u, \lambda) = \frac{1}{2} u^T K u - u^T F + \lambda^T (Qu + {}^0D) \quad (2.28)$$

式中  $u$  表示结点位移向量； $K$  表示刚度矩阵； $F$  表示结点力向量； $\lambda$  表示拉格朗日乘子向量； $D = (Qu + {}^0D)$  表示接触点的穿透量向量。

对式(2.28)变分，可以建立有限元方程：

$$\begin{bmatrix} K & Q^T \\ Q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ -{}^0D \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

对方程(2.29)进行求解就可以获得我们所需要的节点位移还有拉格朗日乘子，拉格朗日乘子的分量就是接触点处的法向接触力。

拉格朗日乘子法通常被应用于静态隐式算法，是当能量泛函非常小的情况下符合接触点彼此不穿透的边界条件。因为该方法增加了系统的自由度数目，所以需要迭代的方法来对方程进行求解。

#### 2.3.1.2 以迭代求解为基础的直接约束法

直接约束法是通过追踪物体的运动轨迹来对接触问题进行处理。接触的发生需要有运动约束和节点力，运动约束包括两部分：(1)法向无相对运动；(2)切向可滑动。节点力也包括两部分：(1)法向压力；(2)切向摩擦力。当接触发生时，直接约束法便将这些直接作为边界条件施加在接触的节点。该方法具有对接触搜索的描述精度很高，同时不必要增加特殊的界面单元的优点，因此具有普遍适用性。但直接求解法需要若干次迭代才能求解接触成功，因此计算效率很低。

### 2.3.1.3 罚函数法

使用罚函数法对接触问题进行求解时，允许位于其中一个接触面上的接触点穿透和其发生接触的另一个面，穿透量越大，接触力也越大，两者之间成正比关系，用公式表示为：

$$f_n = -\alpha S \quad (2.30)$$

式中  $\alpha$  表示罚因子； $S$  表示接触点的法向穿透量；负号(-)表示接触力与穿透方向相反。

罚因子( $\alpha$ )的取值在实际选取时应该慎重仔细，取值过小会影响计算精度，过大则会降低计算求解的稳定性。

### 2.3.2 摩擦现象处理

由于摩擦现象非常复杂，涉及到很多特性，像接触表面的硬度、粗糙度、材料种类等，关于摩擦机理目前仍在研究过程当中,至今还不成熟。现阶段关于摩擦的数值仿真采用的都是经过简化的摩擦力数学模型，简化的假设是认为接触表面产生局部位移的前提是切向应力达到某一临界值。主要包括2种：(1)库伦(Coulomb)摩擦模型；(2)剪切摩擦。

#### 2.3.2.1 库伦(Coulomb)摩擦模型

工程实际中现阶段应用最多的摩擦模型是库伦(Coulomb)摩擦模型：

$$\sigma_{fr} \leq -\mu \sigma_n t \quad (2.31)$$

式中  $\sigma_{fr}$  表示切向(摩擦)应力； $\sigma_n$  表示接触节点法向应力； $\mu$  表示摩擦系数； $t$  表示切向单位向量(位于相对滑动速度方向上)

$$t = \frac{v_r}{|v_r|} \quad (2.32)$$

式中  $v_r$  表示相对滑动速度向量。

公式(2.31)同时也可以写成节点合力的形式：

$$f_t \leq -\mu f_n \quad (2.33)$$

式中  $f_t$  表示剪切力； $f_n$  表示法向反作用力。

考虑到颗粒在粉末成形过程当中会发生相对速度很小或着相对速度方向突然发生变化的情况，接触状态也会发生由黏着到滑动相互转变的情况，任何一种情况的发生都会导致计算摩擦力的大小和方向发生突变导致计算不稳定。Kobayashi 提出了修正的库伦摩擦模型：

$$\sigma_{fr} \leq -\mu \sigma_n \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{|v_r|}{v_c}\right) t \quad (2.34)$$

式中  $v_c$  代表滑动发生时接触体间的临界相对速度。

### 2.3.2.2 剪切摩擦

库伦(Coulomb)摩擦模型适用于接触力或者法向应力不太大的情况,很多实验情况下有必要采用基于剪应力的摩擦模型来解决预测的摩擦应力大于材料流动应力或者失效应力的情况。基于剪应力的摩擦模型与经典库伦(Coulomb)摩擦模型的不同之处在于前者将摩擦应力视为材料等效剪应力的一个部分:

$$\sigma_{fr} \leq -m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} t \quad (2.35)$$

式中,  $m$  表示剪应力摩擦模型的摩擦系数;  $\bar{\sigma}$  表示等效应力。

仿照修正的库伦定律式,静-动摩擦间的突变采用反正切函数进行平滑处理:

$$\sigma_{fr} \leq -m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \times \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{|v_r|}{v_c}\right) t \quad (2.36)$$

不论是库伦摩擦还是剪切摩擦,两者都属于非常经典的摩擦定律。经典摩擦定律的适用范围从最初的刚体到广泛应用于变形体的前提是遵循一个假设,即仅当切向应力达到某一临界值,接触表面才会产生局部位移。但实验证明,只要有切向力存在就会有相对滑移现象的产生。因此也有很多科研学者提出非线性摩擦定律。但非线性摩擦定律模型数学推导过程太过复杂,甚至某些系数很难通过实验获得,并没有广泛应用于解决工程实际问题。



## 第三章 Python 二次开发生成三维密集球堆积模型

### 3.1 Python 简介

Python 语言创立于 20 世纪 90 年代,是由 Guido van Rossum 开发的一种脚本解释程序,诞生至今,经过大概 20 余年的发展,Python 语言由于它所独有的简洁性、易用性和可扩展性已然成为当今世界受欢迎程度和使用率最高的程序设计语言之一。

Python 语言编程主要有八大特征:面向对象性(object-oriented)、简单性(easy)、健壮性(powerful)、可扩展性(extension)、动态性(dynamic)、内置的数据结构(built-in data structure)、跨平台性(cross-platform)、强类型(type coercion)。下面分别对八大特征做简要的介绍:

(1)面向对象性(object-oriented):众所周知程序化结构设计非常复杂,而 Python 很强的面向对象性就是为了解决这一问题应运而生的。具体来说就是 Python 语言在程序化结构设计的过程当中消除了保护类型、抽象类、接口等很多复杂繁琐的元素,使得程序化设计过程更加的直接简单,让我们感觉整个设计编写过程就如同我们在现实生活中说话办事一样方便。

(2)简单性(easy): Python 语言相对其它编程语言来说具有更好的可读性,主要是因为 Python 语言的编写代码十分简单不花俏,另外它保留字的数量相比较其他编程语言来说也比较少。比如 Python 语言进行代码分割的方式是通过空格或制表键进行缩进,而 C 语言中则包含 begin、and、(;)等标记,两者对比 Python 语言的简单性显而易见。

(3)健壮性(powerful):在程序运行过程中当中我们经常会遇到很多异常情况,比方程序逻辑方面的错误或大小写方面的错误等均会导致程序中断,这时候就需要迅速找出出错的地方并找到解决的方法。而 Python 语言的健壮性就体现在它具有这种很强大的处理异常情况突发的能力。当程序出现异常情况中止运行时,Python 能够迅速检测到出错的位置并提出具有针对合理性的建议帮助我们解决问题。

(4)可扩展性(extension): Python 语言因为它的可扩展性在业内被很多专业人士称为“胶水语言”。众所周知,Python 语言的基础是 C 语言,没有 C 语言就没有 Python 语言,因此我们可以利用 C 语言来扩充 Python 语言,赋予它新的模块和功能使它变得更加强大;而 Python 二次开发也可以帮助很多软件实现新的功能,即 Python 语言既可以被动扩展,也可以主动扩展,集各语言之所长。

(5)动态性(dynamic): JavaScript 和 Perl 等编程语言在创建新变量时均不需要

进行单独的声明，而是采用直接赋值的方法便可以迅速创建。在 Python 语言中，新变量的创建方式是类似的，这种操作简单、迅速、动态性极强，因此 Python 也是一种高级动态编程语言。

(6)内置的数据结构(built-in data structure): 对于任何一种编程语言来说，内置的数据结构是简化程序设计的重要法宝之一。而在 Python 语言当中就有多种内置数据结构供我们使用，像比较常见常用的元组(tuple)、列表(list)、字典(dictionary)、序列(sequence)等类型，我们可以利用这些内置数据结构高效有序的生成和管理我们所需要的数据类型达到简化程序设计的目的。

(7)跨平台性(cross-platform): Python 语言编写的代码从一种操作平台转换到另一种操作平台仅需要对代码做很细微的变更和编译之后便可以轻松实现，这样 Python 语言编写的代码便可以在多平台上编写而不仅仅依赖于某种单一的作业系统。

(8)强类型(type coercion): 作为一种强类型语言，在 Python 语言当中存在变量和数据类型一一对应的关系，Python 语言自带的内部变量管理机制会自动有效管理设置好的变量，如果在同一表达式中出现了两种甚至多种不同类型的变量，内部变量机制会进行类型转换。

### 3.2 Python 二次开发在有限元模拟中的意义

有限单元法，作为当今世界公认的一种解决数学问题的高效方法，其概念第一次正式被提出是在 20 世纪 60 年代，当时 Ray W. Clough 教授在他发表的文章《The Finite Element in Plane Stress Analysis》中第一次提出了有限单元法这样一个概念。从那以后，关于此概念的理论飞速发展，关于有限单元法各方面的论文和报道也层出不穷、越来越多。有限单元法的解题步骤主要包括建立积分方程、区域单元剖分、确定单元基函数、单元分析、总体合成、边界条件的处理、解有限元方程七大部分。

随着有限单元法理论的不断发展和完善，许多研究人员和学者虽然可以利用有限单元法很好的解决很多困难的工程实际问题，但其繁琐的人工计算工作不仅耗时，还经常出错，给科研工作者带来了极大的困扰。伴随着计算机水平的飞速发展，人们开始尝试用计算机的高效准确性来取代解决这一繁琐工作，于是各国工作人员竞先开发了很多有限元软件，将这些困难复杂的运算集成到软件中自动运算求解以达到高效准确的目的。当今世界目前已成功开发并应用效果显著的有限元分析软件有很多，像我们所熟知的主要有 Abaqus、ANSYS、Nastran、ADINA、MSC、Marc 等，其中最著名的有限元分析软件之一就是 Abaqus。

作为当今世界使用人数最多的一款有限元分析软件，Abaqus 以其强大的功能著称于世，尤其是在解决高度非线性问题上表现尤为突出。但目前的界面功能并

不能满足用户的所有需要，为了解决目前界面功能所无法实现的问题，这时便需要介绍 Abaqus 相对其他分析软件所拥有的另一大优势便是它所提供的二次开发接口。Abaqus 给用户提供了用户子程序接口(User Subroutine)和 Abaqus 脚本接口(Abaqus Scripting Interface)两种接口。其中 Abaqus 脚本接口就是通过用 Python 语言进行代码编写从而实现定制功能的开发。基于 Python 语言的二次开发可以用于我们整个 CAE 分析的所有阶段来帮助我们快速实现界面所能实现和不能实现的功能。在 Abaqus 软件中现阶段用得比较多发展比较成熟的 Python 二次开发通常用于实现以下功能：自动执行重复任务；进行参数分析；创建和修改模型；访问输出数据库(ODB 文件)；定制 Abaqus 环境文件；创建 Abaqus 插件程序。

当我们使用 Abaqus 软件进行有限元分析时，所有界面功能的实现均是由 Abaqus 的内核(Kernel)对由 Python 语言编写而成的命令进行翻译实现的，所有界面功能设置都对应其特制的代码。因此一个完整的 CAE 分析过程亦可通过对 Python 脚本的编写实现。二者之间的通信关系可由图 3.1 表示。

从图 3.1 中可知 Abaqus/CAE 执行命令(command)的方式有 3 种，包括在图形用户界面(GUI)相应操作完成后点击对应按键自动生成脚本命令、命令衔接窗口输入或粘贴命令后点击 enter 自动运行和直接编写 Python 脚本。但不论是采取以上哪种方式，都需要经过 Python 解释器对命令进行翻译后才能传送命令至 Abaqus/CAE，Abaqus/CAE 会自动根据传送的命令生成对应的 input 文件后选择合适的隐式或显式求解器提交求解，完成后便可以在 ODB 文件中进行我们需要的后处理操作得到相应的云图、动画、X-Y 曲线。

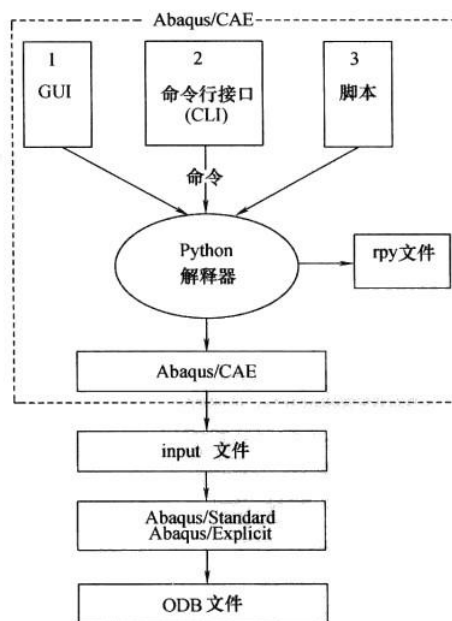


图 3.1 Abaqus 脚本接口与 Abaqus/CAE 的通信关系

### 3.3 Python 二次开发在 Abaqus 中的应用

兰州理工大学静厚新课题组的王国梁硕士在二次开发的基础之上,实现二维和三维多晶体材料微结构的自定制用户程序的开发。通过对话框中参数区参数的不同选择,可以实现参数化有限元模型驱动和分析流程。在整套自定制应用之余,针对后续的后处理程序,将后处理程序与图形用户界面结合起来,实现了嵌入式后处理程序的开发,极大地丰富和扩充了的前后处理的功能<sup>[33]</sup>。该方法和开发平台在工程设计中具有广阔的应用前景。

兰州理工大学静厚新课题组的周兰硕士通过 Python 语言的编写对 Abaqus 进行二次开发,实现了编织型材料的微结构设计并开发了图形用户界面,用户可以根据自己的需求进行相关参数的设置构建自己所需要的编织型微结构材料 CAD 模型,解决了编织型材料的微结构在 Abaqus 现有界面构建的繁琐和困难<sup>[34]</sup>。

大连理工大学的张文娣通过对 Python 语言的编写实现了悬臂梁结构的参数化建模并对其进行参数优化,使用控制变量法,控制梁截面面积不变,通过更改梁截面长和宽的比例,确定了使梁变形最小的最优长宽比,降低了生产成本和时间成本,对工程实际的生产具有一定的指导意义<sup>[35]</sup>。

南京航空航天大学的龚智鹏通过 Python 语言编程,读取 UG 数控铣削刀轨并进行离散化处理,结合六参数立铣刀模型,运用基于高斯映射的刀具扫描体建模原理,建立刀具扫描体微元集,有效地解决了物理仿真与几何仿真结合性差的问题<sup>[36]</sup>。

南京理工大学的陈学义基于有限元软件及其二次开发技术,以某多管火箭炮为依托,编制弹管祸合发射模型和整炮系统发射模型,的参数化建模、模态分析和动力学分析插件,实现两种模型的快速参数化建模、模态验证和动力学仿真分析<sup>[37]</sup>。

西安建筑科技大学的马川针对常用的框架结构利用 Python 语言对 Abaqus 进行二次开发,成功设计出基于 Abaqus 的框架结构设计平台,在该平台上可以实现参数化建模、截面配筋、以及内里提取与组合等功能<sup>[38]</sup>。

北京工业大学的叶红玲等人用 Python 二次开发工具针对空间可展单簧片结构弯曲过程专门建立了一套十分简便、快捷的分析系统,用户可以通过该系统设置几何和材料参数直接进行相关力学性能分析,不需要每次分析都对模型进行建模和网格划分等重复工作<sup>[39]</sup>。

北京航空航天大学的郭霞、关志东等人用 Python 二次开发工具开发了针对复合材料层压板单面贴补修理的快速建模及后处理程序,该程序能够针对单面贴补修理母板的长度、宽度、单层厚度、层数和铺层顺序,补片层数、直径和铺层顺序,以及复合材料单向预浸料和胶膜的性能等参数进行设计分析。用该程序计算得到的易破坏位置和破坏模式与试验结果的误差小于 10%,证明该程序可行<sup>[40]</sup>。

沈阳航空航天大学的陈彦海、秦运海、姜春英、康玉祥、叶长龙通过二次开发得到连续锤铆过程自动分析的软件,在保证铆头成型要求情况下极大地提高了

锤铆仿真分析的效率，为后续研究工艺参数优化与铆接质量评价等问题带来指导与便利<sup>[41]</sup>。

### 3.4 密集堆积球形颗粒模型的生成原理

假定要在指定三维投放区域范围内生成两种尺寸的球形粉末颗粒，球形粉末颗粒的球心坐标为 $(x,y,z)$ ，Python 建模算法如下：

导入 Python 的 random 模块,定义球心坐标列表 $[(x,y,z)]$ ，并定义大尺寸球形粉末颗粒的半径为  $R_1$ 。

指定随机生成 $(x,y,z)$ 的三维投放区域范围。比方为一个长方体，X、Y、Z 则为长方体的长、宽、高， $x = \text{random.uniform}(-50,50)$ 代表长方体的长为 100，即所有生成的球心坐标的 x 值在指定范围 $(-50,50)$ 内随机生成，同样方法定义 Y、Z 的随机投放范围。这样便可以保证随机生成的所有球形粉末颗粒的球心坐标位于此长方体内。

判断半径为  $R_1$  的球心坐标 $(x,y,z)$ 的有效性：为了保证所有半径为  $R_1$  的球形粉末颗粒彼此不发生重叠，需要保证任意两个球心坐标之间的距离不小于  $2R_1$ ，即

$$\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \geq 2R_1$$

。若新生成的坐标 $(x,y,z)$ 满足此条件，则添加到坐

标列表里，否则舍弃继续循环直到达到所要求的坐标数量。

定义小尺寸的球形粉末颗粒的半径为  $R_2$  ( $R_2 < R_1$ )，继续生成新的半径为  $R_2$  的球心坐标，同样为了保证所有生成的粉末颗粒之间不发生重叠，需要保证任意两

个球心坐标之间的距离不小于  $(R_1 + R_2)$ ，即 
$$\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \geq (R_1 + R_2)$$
，若

新生成的坐标 $(x,y,z)$ 满足此条件，则添加到坐标列表里，否则舍弃继续循环直到达到所要求的坐标数量。

将第三步和第四步所生成的大尺寸球形颗粒和小尺寸球形颗粒的坐标列表信息和半径信息代入已编好的脚本运行即可生成具有 2 种尺寸的三维密集球堆积松散粉末颗粒模型。

### 3.5 密集堆积球形颗粒模型Python脚本的编写

#### 3.5.1 确定球心坐标Python脚本的编写

```
# -*- coding:UTF-8 -*-
```

```
import random
```

```
xyz = [(0,0,0)]
```

```
#导入随机生成点程序#
```

```
#确定 xyz 的坐标原点
```

num = 0	#给 num（点个数）赋值为 0
dis_list=[]	#声明数组 list
R1 = 4	#给半径 r1 赋值为 4
def func(x, y, z, x_i, y_i, z_i):	#定义函数 func：求两点之间的距离。
return	
pow((x-x_i)**2+(y-y_i)**2+(z-z_i)**	
2,0.5)	
while True:	#while 循环，且为真，开始循环
if num == 100: break	#if 条件语句：控制在点在 100 以内
	#if 语句如果成立，则退出
x = random.uniform(-45,45)	#x 的取值范围为（-45,45）
y = random.uniform(-40,40)	#y 的取值范围为（-40,40）
z = random.uniform(-50,50)	#z 的取值范围为（-50,50）
dis_list = [func(x, y, z, x_i, y_i,	
z_i) for x_i, y_i, z_i in xyz]	#将随机生成的点保存到：list 数组
if min(dis_list) < float(2*R1):	#如果生成点的距离小于直径继续生
continue	成
else:	#大于或等于半径时，记录点的坐标且
xyz.append((x,y,z))	将点的个数加 1
num = num + 1	
print(len(xyz))	#输出 xyz 的点
num1 = 0	#确定 xyz 的坐标原点
dis_list1=[]	#声明数组 list1
R2 = 2	#给 num（点个数）赋值为 0
def func(x, y, z, x_i, y_i, z_i):	#定义函数 func：求两点之间的距离。
return	
pow((x-x_i)**2+(y-y_i)**2+(z-z_i)**	
2,0.5)	
while True:	#while 循环，且为真，开始循环
if num1 == 100:	#if 条件语句：控制在点在 100 以内
break	#if 语句如果成立，则退出

```

x = random.uniform(-45,45)          #x 的取值范围为 (-45,45)
y = random.uniform(-40,40)          #y 的取值范围为 (-40,40)
z = random.uniform(-50,50)          #z 的取值范围为 (-50,50)
dis_list1 = [func(x, y, z, x_i, y_i, z_i)
for x_i, y_i, z_i in xyz]           #将随机生成的点保存到: list 数组

    if min(dis_list1) < float(R1+R2):
        continue
    else:
xyz.append((x,y,z))                  #大于或等于半径时,记录点的坐标且
    num1 = num1 + 1                  将点的个数加 1
print(len(xyz))

XYZ_1 = xyz[0:num+2]
XYZ_2 = xyz[num1+2::]

```

### 3.5.2 球形粉末实体生成Python脚本的编写

```

#!/user/bin/python
# -*- coding:UTF-8 -*-

import time                          #导入时间的模块
from random import*                  #导入随机生成点程序
from abaqus import*                  #导入 ABAQUS 模块
from abaqusConstants import *        #导入 ABAQUS 边界条件模块
import assembly                       #导入装配模块
import math                           #导入函数库
import displayGroupMdbToolset as    #导入显示 mbd 组模块
dgm

start_time =time.clock()             #开始
x0 = 100                             #给 xo 赋值为 100
y0 = 100                             #给 yo 赋值为 100
z0 = 100                             #给 zo 赋值为 100
vf = 0.6
n = 440
R1 = 8                               #半径 R1 为 8
R2 = 4                               #半径 R2 为 4

```

```

Mdb()
s=mdb.models['Model-1'].Constrained
Sketch(name='__profile__',                                #创建草图
sheetSize=8*max(x0,y0,z0))
s.rectangle(point1=(0.0, 0.0),                            #创建一个 100X100 的矩形
point2=(x0, y0))
p=mdb.models['Model-1'].Part(name='                        #进入 part 模块
Part-base', dimensionality=THREE_D,
    type=DEFORMABLE_BODY)
p=mdb.models['Model-1'].parts['Part-b
ase']
p.BaseSolidExtrude(sketch=s,                              #拉伸一个 100X100X100 的立方体
depth=z0)
del
mdb.models['Model-1'].sketches['__pr                      #将草图定义为函数
ofile__']
#####

s1=mdb.models['Model-1'].Constraine
dSketch(name='__profile__',                                #构建基础特性草图画圆
    sheetSize=10*R1)
s1.ConstructionLine(point1=(0.0, -R1),
point2=(0.0, R1))                                         #画一条直线距离为 r1 的直线
s1.ArcByCenterEnds(center=(0.0, 0.0),
point1=(0.0, R1), point2=(0.0, -R1),
direction=CLOCKWISE)
s1.Line(point1=(0.0, R1), point2=(0.0,                    #两点之间画一条直径
-R1))
p=mdb.models['Model-1'].Part(name='                        #建立名字'Part-base', 选择三维实体
Part-s', dimensionality=THREE_D,                          #创建模型
    type=DEFORMABLE_BODY)
p=mdb.models['Model-1'].parts['Part-s']
p.BaseSolidRevolve(sketch=s1,angle=                       #以原点为中心旋转成球
360.0, flipRevolveDirection=OFF)

```



```

delmdb.models['Model-1'].sketches['__          #将形成的一个球的过程定义为函数
profile__']
a1=mdb.models['Model-1'].rootAssem          #进入根目录装配模块
bly
a1.DatumCsysByDefault(CARTESIA)
p=mdb.models['Model-1'].parts['Part-s']      #调用'Part-s'即生成球模块
a1.Instance(name='Part-s-2', part=p,        #Part-s-2 实体化.
dependent=ON)
a1.translate(instanceList=('Part-s-2', ),
vector=(XYZ_1[0][0],XYZ_1[0][1],
XYZ_1[0][2]))                                #进行位移
ins_oldname='Part-s-2'                      #实体化命名
#####
for i in range(1,len(XYZ_1)):                #for 循环来实现小半径球粉末的生成
    p_particles='Part-s'+str(i+1)           #微粒加一
    ins_name='Part-s'+str(i+1)+'-1'         #实体化命名
ps=mdb.models['Model-1'].parts['Part-
s']                                          #进入'Part-s'模块
a1.Instance('Part-s-1', part=ps,
dependent=ON)                             #实体化
a1.translate(instanceList=('Part-s-1', ),   #平移
vector=(XYZ_1[i][0],XYZ_1[i][1],
XYZ_1[i][2]))
a1=mdb.models['Model-1'].rootAssem
bly
a1.InstanceFromBooleanMerge(name=
p_particles,
instances=(a1.instances['Part-s-1'],
a1.instances[ins_oldname], ),
keepIntersections=ON,
    originalInstances=DELETE,
domain=GEOMETRY)                          #合并模块
    ins_oldname=ins_name
for i in range(1,len(XYZ_1)-1):            #通过 for 循环将每个球体定义为函数
    p_del='Part-s'+str(i+1)               形式

```

```

delmdb.models['Model-1'].parts[p_del]
del a1.features[ins_oldname]          #定义特性函数
end_time =time.clock()
print 'Run time: ', end_time-start_time  #输出运算时间
#####
s1=mdb.models['Model-1'].Constrained
Sketch(name='__profile__',
          sheetSize=10*R1)             #构建基础特性草图画圆
s1.ConstructionLine(point1=(0.0, -R2),
point2=(0.0, R2))                     #画一条直线距离为 r1 的直线
s1.ArcByCenterEnds(center=(0.0, 0.0),
point1=(0.0, R2), point2=(0.0,
          -R2),
direction=CLOCKWISE)
s1.Line(point1=(0.0, R2), point2=(0.0,
-R2))                                #两点之间画一条直径
p=mdb.models['Model-1'].Part(name='
Part-b', dimensionality=THREE_D,
          type=DEFORMABLE_BODY)
p=mdb.models['Model-1'].parts['Part-b
']                                   #进入'Part-s'模块
p.BaseSolidRevolve(sketch=s1,
angle=360.0,
flipRevolveDirection=OFF)           #以原点为中心旋转成球
delmdb.models['Model-1'].sketches['__
profile__']                         #将形成的一个球的过程定义为函数
#####
a1=mdb.models['Model-1'].rootAssem
bly                                #进入根目录装配模块
a1.DatumCsysByDefault(CARTESIAN)    #建立坐标系
p =                                #调用'Part-s'即生成球模块
mdb.models['Model-1'].parts['Part-b']
a1.Instance(name='Part-b-2', part=p,
dependent=ON)                       #实体化
a1.translate(instanceList=('Part-b-2', ), #进行平移

```

```

vector=(XYZ_2[0][0],XYZ_2[0][1],
XYZ_2[0][2]))
ins_oldname='Part-b-2'
for i in range(1,len(XYZ_2)):           #for 循环来实现小半径球粉末的生成
    p_particles='Part-b'+str(i+1)       #微粒加一
    ins_name='Part-b'+str(i+1)+'-1'     #实体化命名
ps=mdb.models['Model-1'].parts['Part-
b']                                     #进入'Part-s'模块
    a1.Instance('Part-b-1', part=ps,
dependent=ON)                          #实体化
    a1.translate(instanceList=('Part-b-1', ),
vector=(XYZ_2[i][0],XYZ_2[i][1],
XYZ_2[i][2]))                          #进行平移
a1=mdb.models['Model-1'].rootAssem
bly
a1.InstanceFromBooleanMerge(name=
p_particles,
instances=(a1.instances['Part-b-1'],
a1.instances[ins_oldname], ),
keepIntersections=ON,
originalInstances=DELETE,
domain=GEOMETRY)                       #合并模块
    ins_oldname=ins_name
for i in range(1,len(XYZ_2)-1):         #通过 for 循环将每个球体定义为函数
    p_del='Part-b'+str(i+1)             形式
    del
mdb.models['Model-1'].parts[p_del]
del a1.features[ins_oldname]             #定义特性函数
end_time =time.clock()
print 'Run time: ', end_time-start_time

```

### 3.6 本章小结

本章对 Python 语言进行了基本的阐述，描述了 Python 二次开发在有限元模拟中的意义以及在 Abaqus 中的应用。描述了随机分布的三维密集堆积球形颗粒

模型的生成原理并编写了 Python 脚本。用 Python 对 Abaqus 进行二次开发成功生成了随机分布的具有 2 种尺寸的三维密集堆积球形颗粒。已生成的模型见图 3.2，其中大尺寸球形粉末颗粒粒径为 3.6 微米，数量为 382 颗；小尺寸球形粉末颗粒粒径为 2.2 微米，数量为 620 颗。混合粉末总颗粒数为 1002 颗。

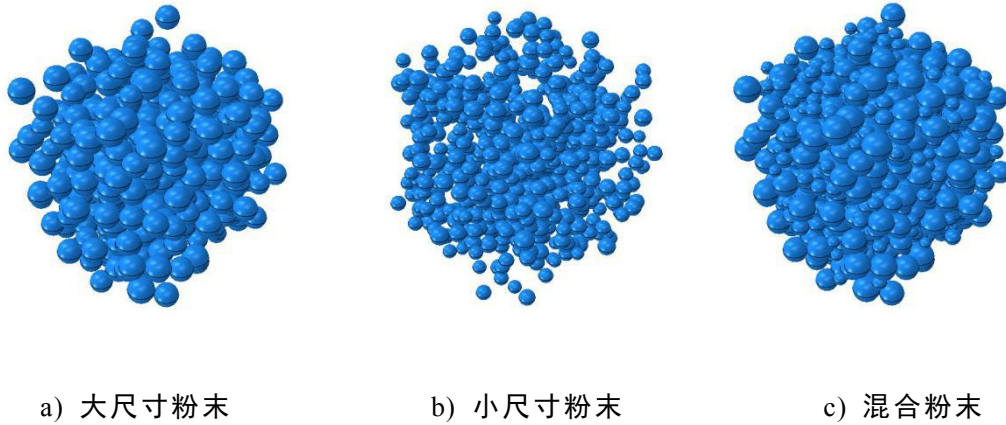


图 3.2 三维密集堆积球形颗粒

## 第四章 粉末压制成形的细观模拟分析

### 4.1 引言

本章基于密集堆积球形颗粒的微观力学方法进行建模,利用有限元分析软件 Abaqus 在细观尺度上对粉末的压制成型过程进行模拟,研究随机分布的三维密集球堆积松散粉末颗粒的堆积行为,并探讨摩擦系数、压制方式(单向压制、双冲头双向压制)对粉末堆积行为和压胚密度的影响规律。

### 4.2 粉末压制成形有限元模型的建立

#### 4.2.1 粉末压制装置的建立

Abaqus 软件针对有限元问题进行求解的完整的三个阶段,主要包括:(1)前处理阶段;(2)分析计算阶段;(3)后处理阶段。

在前处理阶段首先必须进行的第一步是几何有效模型的建立。在 Abaqus/CAE 中有自带的 Part 模块可以给我们提供创建、编辑和管理模型中存在的各个部件。具体功能的实现依赖于 Part 模块中存在的 Part 主菜单、Shape 主菜单、Feature 主菜单和 Tools 主菜单。虽然随着 Abaqus 版本的更新发展,现阶段 Abaqus 软件已具备基本的建模功能,并且其建模功能在市场上现存的有限元软件当中已经属于领先的。但是作为一款有限元分析软件,CAD 建模能力跟专业的 CAD 软件(CATIA、Solidworks、maya 等)还是有很大的差别,典型的缺点主要有 2 个:(1)只能建立简单模型,建立复杂模型相对比较困难耗时;(2)在处理多部件模型时需要在 Abaqus/CAE 的 Assembly 模块调整各部件位置进行装配。尤其是模型部件数量较多时,这一操作过程相当繁琐、耗时。

Abaqus 为了解决 CAD 建模能力有限的缺点,从 Abaqus/CAE 6.8 版本开始,专门创建了 CATIA V5 交互式接口,该接口同时兼容 CATIA V5 R18、CATIA V5 R19、CATIA V5 R20、CATIA V5 R21 四个 CATIA 软件版本。通过该接口,用户可以非常方便的将在 CATIA V5 软件中创建的 CAD 模型导入 Abaqus/CAE 中。具体的导入方式有交互式导入和直接导入 2 种方法供用户根据自身需要选择。直接导入方式只需要将 CATIA V5 软件创建的几何模型导出为 stp 或 iges 等标准格式文件,然后便可以直接导入 Abaqus/CAE 中。

因为本文要探讨不同压制方式,包括单向压制和双向压制,对粉末堆积行为的影响。因此直接建立如图 4.2 所示的双压头压制模型。有限元模型由上冲头、下冲头、阴模和粉末 4 部分组成。

上、下压头和阴模 3 个部件均是在 CATIA V5 R20 软件中建立,然后将部件

导出为 stp 格式文件后导入 ABAQUS/CAE 的 Part 模块中。使用 CATIA 软件建模的好处是导入 Abaqus/CAE 中的各个部件位置已经固定好,这样便省去了 Abaqus/CAE 中 Assembly 装配模块调整各部件的位置。各部件几何模型如图 4.1 所示。

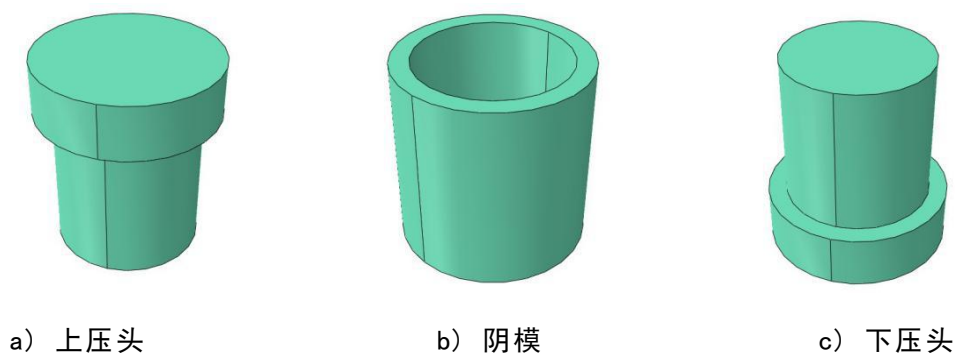


图 4.1 各部件几何模型

粉末体模型是由第 3 章详细讲述的 Python 二次开发方法在 Abaqus/CAE 中直接生成。

各部件导入生成以后,将 Abaqus/CAE 由 Part 模块切换至 Assembly 装配模块,使用平移功能将粉末移至模腔内即可。完整粉末压制有限元模型如图 4.2 所示:

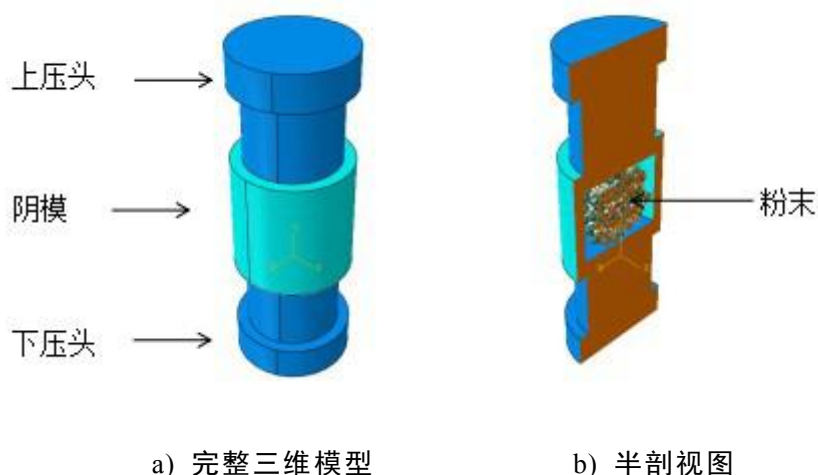


图 4.2 粉末压制有限元模型

#### 4.2.2 材料属性的定义

本研究不针对任何一种具体材料,只是建立一种模拟粉末压制成形过程的平台,为该领域的模拟研究提供一些参考,后续研究者如果对此方向感兴趣可参照本研究工作进行材料属性方面的设置,以免遗漏某种材料属性的设置导致计算出错或不能运行。

材料属性的设置也是 Abaqus 前处理阶段至关重要的一个步骤,在 Part 功能模块创建部件完成以后必须对部件设置材料属性,并且针对不同的分析类型所需

设置的材料属性也不一样。为了保证模拟计算能够运行并且计算结果准确，必须设置完整的材料参数。在 Abaqus/CAE 中有专门的特性(Property)模块可以用来定义我们所需要的材料参数、截面属性，并且把已经定义好的截面属性赋予到相应的部件上后使部件成为一种真正的具有某种特定属性的材料。

整个粉末压制成形模拟过程设置 MoJu、FenMo 两种材料，其中上、下冲头和阴模共用一种材料 MoJu，粉末用一种材料 FenMo，各材料参数见表 4.1。

表 4.1 各部分材料属性表

材料名称	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量 E (MPa)	泊松比	屈服应力 (MPa)
MoJu	8.03E-009	27000	0.3	
FenMo	7.8E-009	20000	0.28	210

### 4.2.3 有限元计算求解方法

有限元计算求解方法设置是在 Abaqus/CAE 中的 Step 功能模块完成。在 Step 功能模块用户主要需要完成的工作包括：

#### (1)分析步设置

Step 功能模块中提供了多种分析步类型供用户选择，比如 general analysis step、Static, General、Dynamic, Implicit、Dynamics, Explicit 等等，具体选择要根据分析问题的类型。分析部类型设置完成后就需要对 Incrementation 进行设置。

(2)设定输出数据 输出数据就是我们需要在后处理中获得的有用的信息，像应力、应变、位移。过多的输出信息肯定会耗费大量的计算资源并且导致结果 odb 文件太大。实际操作时需要根据个人要求进行设置。

#### (3)自适应网格设定

很多分析情况都会涉及到大变形或者材料损伤。为了保证模型在发生大变形或者材料损伤的过程中始终保持网格的高质量性，保证计算能够顺利完成并且具有较高的可靠性。Abaqus 创建了“任意 Lagrangian-Eulerian(ALE)”分析技术，也被称为自适应网格技术。ALE 分析技术在重新划分网格的过程中只移动节点，并没有改变网格的拓扑方式，因此单元网格是独立于材料移动的，而纯拉格朗日分析必须要求网格跟随材料移动。ALE 分析技术往往会使分析更加地稳定、精确、高效。ALE 分析技术被广泛应用于显式分析(Abaqus/Explicit)。

由于粉末压制过程中，粉末颗粒的运动情况极其复杂，在由松散变为致密体的过程中不仅有沿 XYZ 三个方向的平移，还会涉及到复杂的转动，粉末必定会发生非常大的位移。因此粉末压制过程被认定为一项高度非线性的求解过程。在 Abaqus/CAE 中求解高度非线性问题有隐式(Standard)和显示(Explicit)两种方法供用户选择，显式算法相对隐式算法而言最大的优势就是前者不需要迭代便能准确

确定动态平衡方程，所以显式算法在一定程度上能够节省大量计算时间，大大提高求解效率。

本研究在 Abaqus/CAE 的 Step 模块设置采用动态显示分析步(Dynamic, Explicit), Time period 设置为 1, 该分析步默认开启几何非线性对粉末压制过程进行计算机模拟, 同时设置增量步类型为自动(Automatic)控制增量步大小。本研究对模型划分了足够细密的网格提交求解未发现收敛问题, 考虑到自适应网格求解耗时, 暂不设置采用自适应网格。具体 Step 设置见图 4.3。

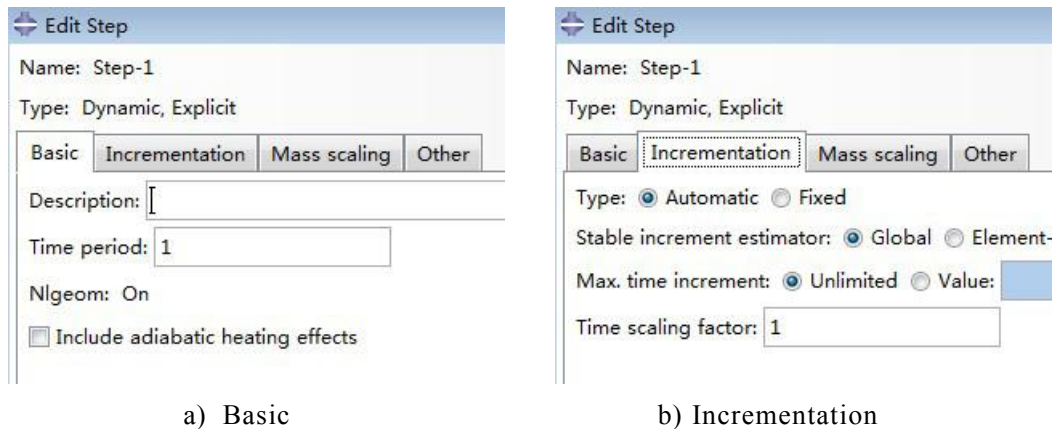


图 4.3 Step 设置

#### 4.2.4 有限元网格的划分

网格的划分是整个有限元分析计算前处理阶段至关重要的一步, 为了对部件进行有效的网格划分, 在 Abaqus/CAE 中有专门的 Mesh 模块完成这一步骤, 在 Mesh 模块中用户需要完成的主要工作有:

##### (1)对网格进行种子的布置

主要是对全局种子尺寸进行设置。尺寸设置过大会影响计算精度; 尺寸设置过小会导致单元数量急剧增加从而影响整个分析的计算速度。因此应根据具体模型和分析需要设置合适的种子尺寸控制网格的密度。

##### (2)选择合适的单元形状

对于三维模型 Abaqus/CAE 可供我们选择的单元形状类型有: 四面体、楔形、六面体为主和六面体 4 种类型; 对于二维模型有三角形、四边形和四边形为主 3 中单元形状。同种模型选择不同的单元形状可能会导致单元数量有较大的差异从而影响网格密度, 对计算速度会有一定的影响, 因此也需要选择合适的单元形状。

##### (3)选择合适的网格划分技术

在 Mesh Controls 中提供给我们的划分技术有结构化划分技术(Structured)、扫描划分技术(Sweep)、自由网格划分技术(Free)。不同的网格划分技术对应不同的单元形状, 相对来说 Structured、Sweep 两种技术由于划分的网格单元形状比较规整因此求解速率和可靠性均比 Free 高, 但 Free 技术对模型的适应性更强, 也更



加适合对复杂模型进行高质量网格划分。

#### (4)单元类型的匹配。

单元类型的选择是要与所模拟的分析类型相匹配的，不同的分析类型有不同的单元类型供我们选择。比如热电耦合分析有专门匹配的热电耦合分析单元，热力电耦合分析有专门匹配的热力电耦合单元。如果选择的单元类型与所模拟的分析类型不匹配，在提交 Job 求解阶段就会导致作业运行出错停止计算。

高质量的有效网格划分是模拟计算结果可靠性的保证。在粉末压制过程中，鉴于球形颗粒模型和颗粒运动的复杂性，有限元网格可能会发生畸变影响计算结果的精确性，同时考虑到分析步设置为动态显式分析步。因此本文所有部件网格单元类型均采用匹配动态显式分析步的 4 节点线性四面体单元 C3D4，同时采用对复杂模型适应性更强的自由(Free)网格划分技术，对上、下冲头和阴模设置种子尺寸  $5\text{ }\mu\text{m}$ ，网格划分数量分别为 4668、4668、2785，对粉末设置种子尺寸为  $1\text{ }\mu\text{m}$ ，大尺寸粉末和小尺寸粉末网格划分数量分别为 75892、94633。所有部件网格总数为 182646。有限元计算网格如图 4.4a, b, c 所示。

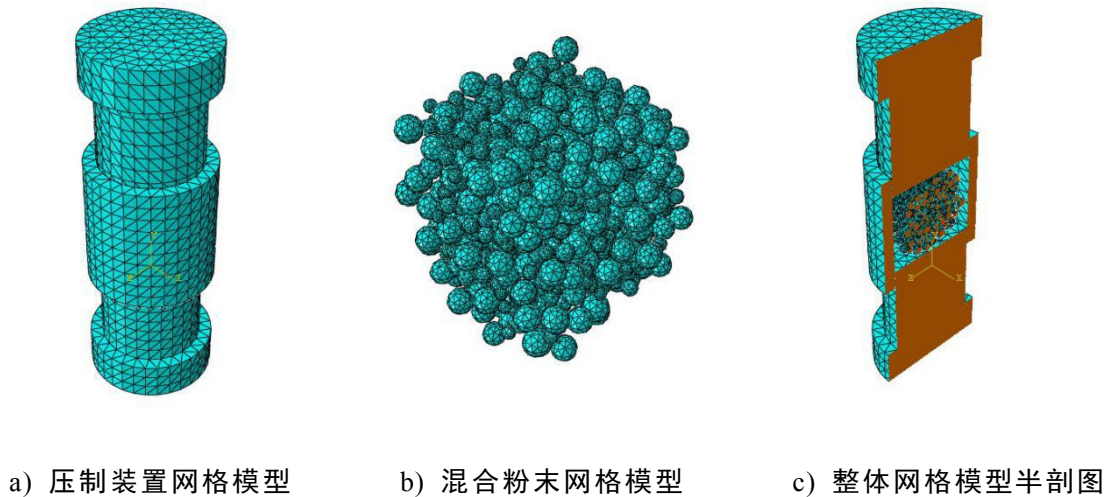


图 4.4 有限元网格

#### 4.2.5 接触属性设置

在 Abaqus/CAE 的 Interaction 功能模块可以定义相互作用。当两个实体或者一个装配体的两个部件在实际空间当中互相接触时，Abaqus/CAE 并不会自动认为它们是彼此接触的，必须在 Interaction 功能模块定义某种接触关系才能成立。在 Interaction 功能模块用户不仅可以定义装配体各部分之间的相互作用(摩擦条件等)，还可以定义模型与外部环境之间的相互作用(热辐射、热传导、电传导等)。

在粉末压制成形过程当中，施加于粉末体上的载荷不全部是用于使粉末体发生变形，还有一部分载荷被消耗是由于粉末与模壁之间存在着摩擦。因此对粉末成形过程进行仿真时必须设置摩擦条件。目前大多数粉末成形建模均采用库伦摩

擦定律，实际过程当中由于受诸多影响因素摩擦系数并不是固定的，但有很多对比研究指出采用固定的摩擦系数比变动的摩擦系数的模拟结果与实验结果更加相符。本文要探讨摩擦系数对颗粒流动性能的影响，因此在 Interaction 功能模块设置如图 4.5 所示固定摩擦系数( $\mu$ )分别 0.1、0.05、0.01。

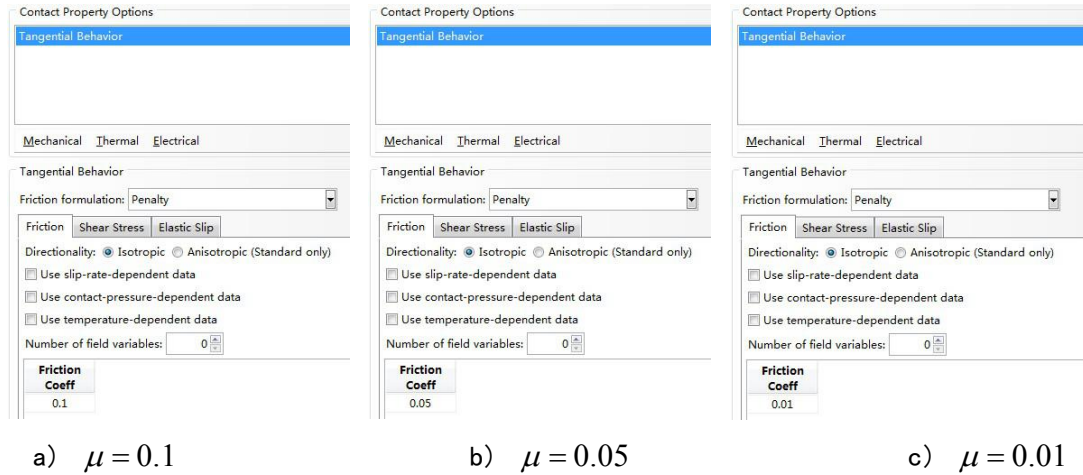


图 4.5 接触属性设置

#### 4.2.6 定义边界条件和载荷

在 Abaqus/CAE 的 load 功能模块用户可以根据实际工况需要定义载荷和边界条件，包括力学、热学、电学及耦合场等。但是载荷设置和边界条件施加与分析步设置有关，用户必须指定载荷和边界条件作用的分析步，并且载荷和边界条件过多或过少均引起计算出错。

本文要探讨不同压制方式,包括单向压制、双冲头双向压制对粉末堆积行为的影响，该分析采用动态显示分析步(Dynamic, Explicit)只涉及到力学。因此在 Abaqus/CAE 的 load 模块施加位移、固定约束边界条件。单向压制时给上压头施加沿 y 轴向下的位移  $25\ \mu\text{m}$ ，给模具和下冲头施加固定约束边界条件；双向压制时给上冲头施加沿 y 轴向下的位移  $12.5\ \mu\text{m}$ ，给下冲头施加沿 y 轴向上的位移  $12.5\ \mu\text{m}$ ，给模具施加固定约束边界条件。

### 4.3 数值模拟计算结果分析

#### 4.3.1 单向压制过程颗粒流动特性分析

模拟计算条件：单向压制；摩擦系数  $\mu$  为 0.1；压制时间 1s。

压实过程中球形颗粒的流动特性如图 4.6a, b, c, d, e, f 所示。考虑最后压胚形状为圆柱体，为了更好的显示粉末堆积过程中内部颗粒的流动特性，选用半剖视图展示。

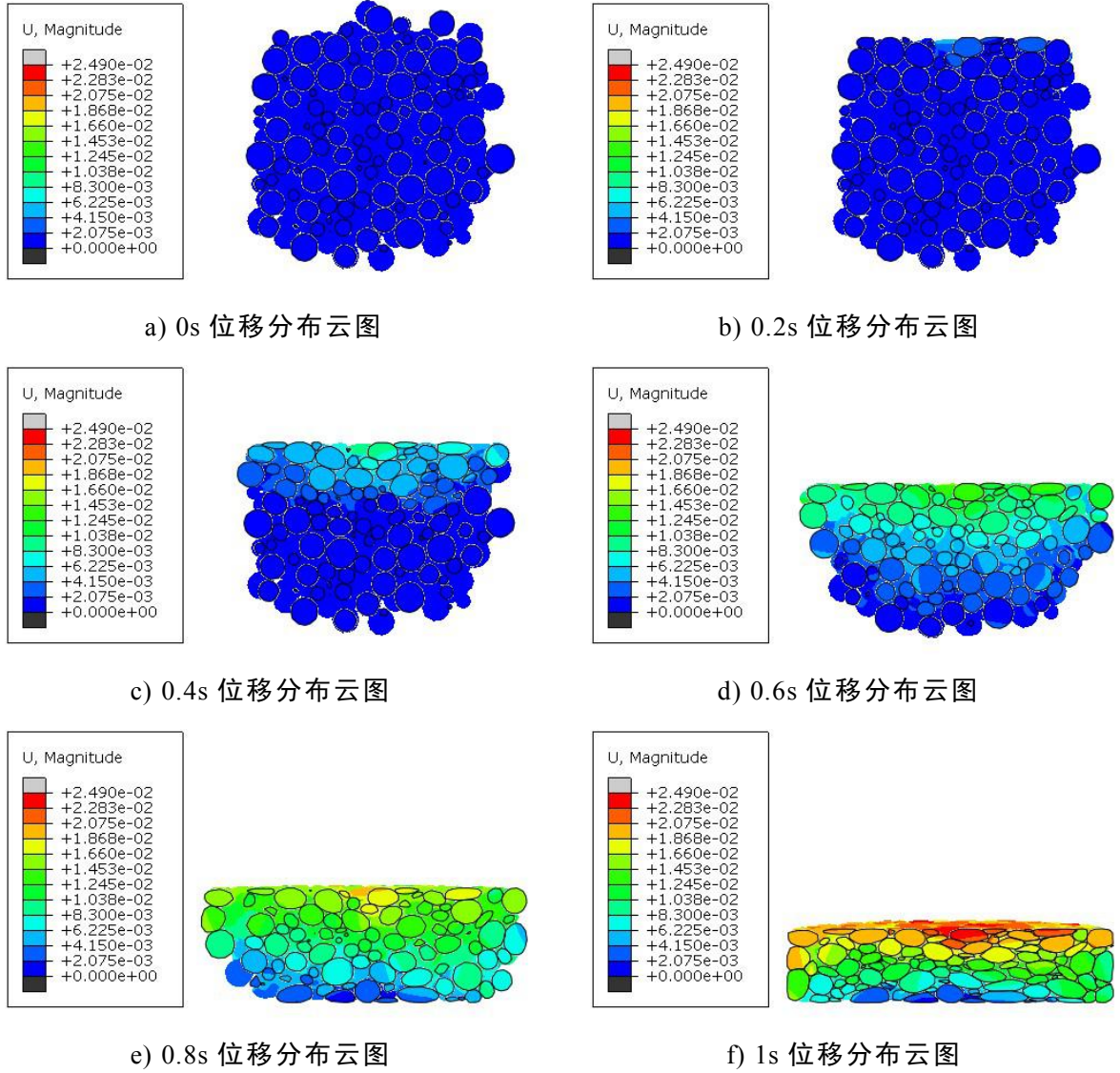


图 4.6 不同时刻位移分布云图

观察图 4.6a-f 可知，粉末材料堆积过程的实质是减少孔隙,提高密度的过程。

压制初期，由于颗粒比较松散，靠近上压头的粉末率先发生运动填充间隙，粉末体致密化的过程主要是由于颗粒发生较大的位移导致颗粒间间隙减小，此阶段仅有部分粉末颗粒发生微小的弹性变形；随着压制过程的继续进行，粉末体越来越密实，粉末颗粒之间的接触也由最初的点接触变为面接触，此时粉末体密度的增加主要是由于挤压颗粒发生塑性变形进一步填充间隙。

#### 4.3.2 双向压制过程颗粒流动特性分析

模拟计算条件：双向压制；摩擦系数  $\mu$  为 0.1；压制时间 1s。

压实过程中球形颗粒的流动特性如图 4.7a, b, c, d, e, f 所示。



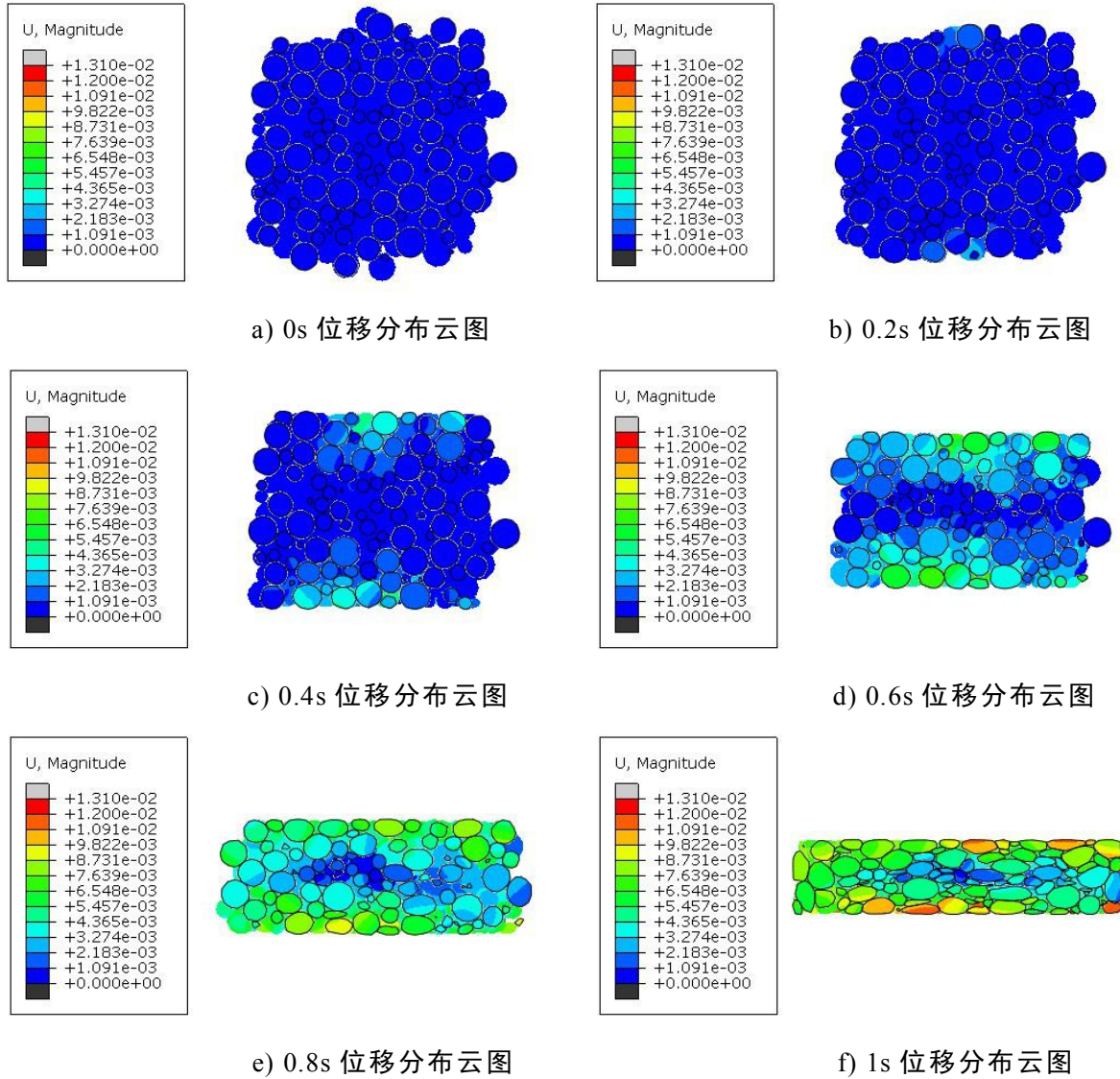


图 4.7 不同时刻位移分布云图

观察图 4.7 可知，双向压制和单向压制过程粉末颗粒具有同样的流动规律，压制初期是两端靠近压头的粉末颗粒先发生运动填充颗粒间隙以提高粉体密度，压制后期由于粉末颗粒挤压发生塑性变形进一步填充间隙。

对比图 4.6 和图 4.7，可知单向压制上、下两部分颗粒流动性差异较大。而双向压制上、下两部分颗粒流动性较大，中间部分则较小，并且上、下两部分颗粒流动性差异很小，有利于压胚密度的均匀性。

### 4.3.3 摩擦系数对颗粒流动特性的影响

模拟计算条件：单向压制；分别取摩擦系数  $\mu$  为 0.1、0.05、0.01；压制时间 1s。终态时刻球形颗粒的流动特性如图 4.8a, b, c 所示

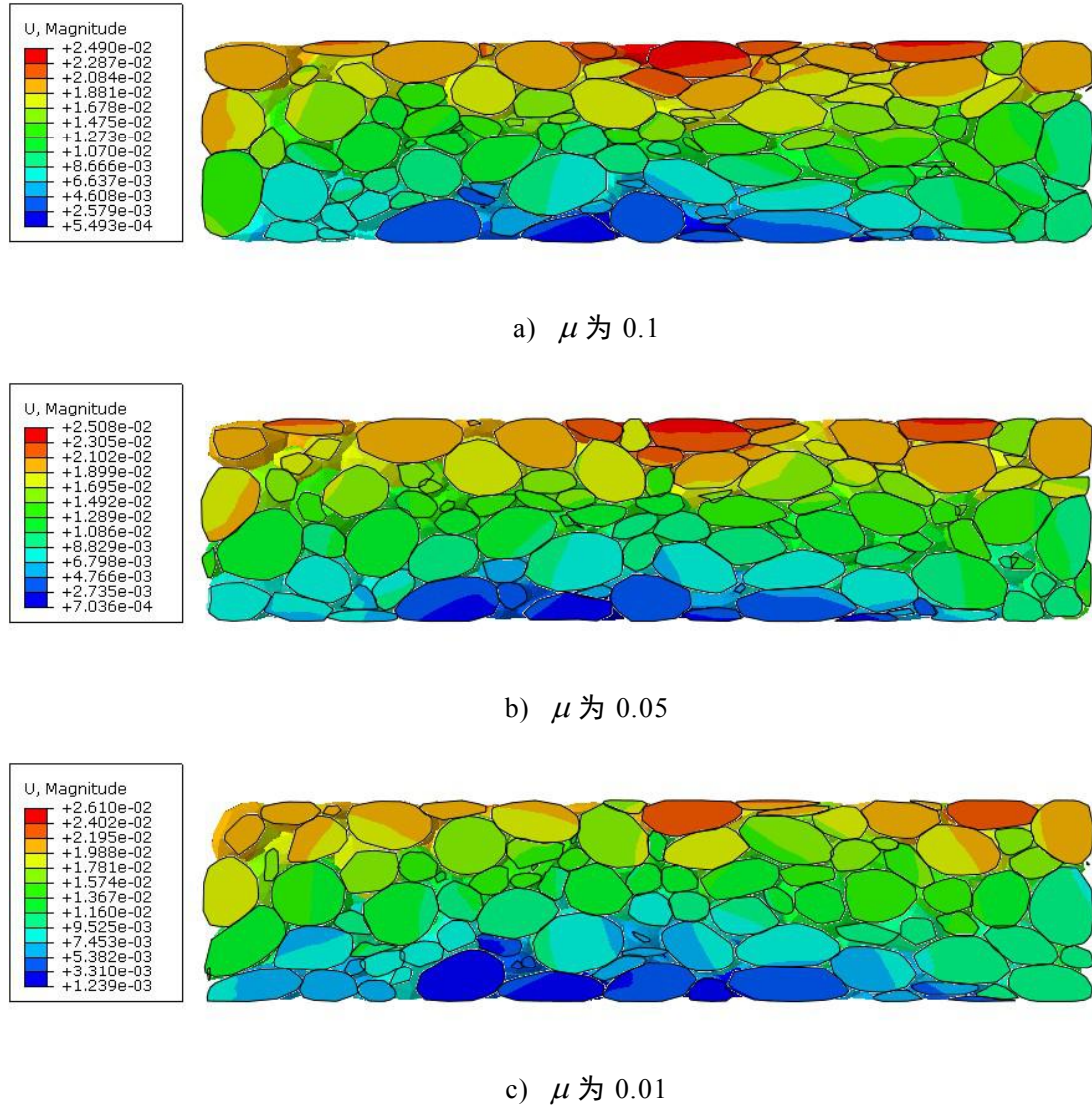


图 4.8 不同摩擦系数下的终态时刻位移分布云图

由图 4.8 可知, 当  $\mu$  为 0.1 时, 终态时刻粉末体的最小位移为  $5.493\text{e-}4$ , 最大位移为  $2.490\text{e-}2$ ; 当  $\mu$  为 0.05 时, 终态时刻粉末体的最小位移为  $7.036\text{e-}4$ , 最大位移为  $2.508\text{e-}2$ ; 当  $\mu$  为 0.01 时, 终态时刻粉末体的最小位移为  $1.239\text{e-}3$ , 最大位移为  $2.610\text{e-}2$ , 即在粉末压制过程中, 随着摩擦系数  $\mu$  的减小, 粉末颗粒的整体流动量逐渐增大。因此在实际压制过程中可以通过改善润滑条件, 比如加润滑油, 改善压胚密度分布。

#### 4.4 本章小结

用 Python 对 Abaqus 进行二次开发, 生成了随机分布的具有 2 种尺寸的三维密集球堆积松散粉末颗粒模型。从细观角度对粉末压制过程进行了模拟, 结果证明:

(1) 粉末材料堆积过程的实质是减少孔隙, 提高密度的过程。粉末堆积过程主要分为两个阶段: a. 粉末颗粒发生位移和弹性变形; b. 粉末颗粒由于挤压发生塑性

变形。

(2)采用双向压制方式和较小的摩擦系数有利于压胚密度的均匀性。

上述粉末堆积过程的 2 个阶段仅仅是理想的假设状态，实际当中在第一阶段会有塑性变形的发生，第二阶段也会有位移和弹性变形的发生，但仅仅是少量。此结论依然对粉末压制成形理论的研究具有一定的指导意义。

## 第五章 放电等离子烧结粉末材料的多场耦合分析

### 5.1 引言

放电等离子烧结(Spark Plasma Sintering, 简称 SPS)是将导电或者不导电的松装粉末或者粉末压胚放入模具中,并同时施加一定的电流和压力使烧结材料快速致密与成形的新型烧结技术<sup>[42]</sup>,具有热压烧结、热等静压烧结等无法比拟的优点<sup>[43]</sup>。一般认为,SPS 过程除具有热压烧结的焦耳热和加压造成的塑性变形促进烧结过程外,还在粉末颗粒间产生直流脉冲电压,并有效利用了粉体颗粒间放电产生的自发热作用,因而产生了一些 SPS 过程所特有的有利于烧结的现象。当前 SPS 过程可以看作是颗粒放电、导电加热和加压综合作用的结果<sup>[44]</sup>。该技术由于操作简单、烧结温度低、升温速度快、烧结时间短、安全可靠、节能环保等一系列特点,已成为近几年发展起来的一项新型快速烧结技术。现已广泛用于硬质金属、特种陶瓷、纳米材料、非晶块材、复合材料、功能梯度材料等一系列新型材料的制备<sup>[45]</sup>。

烧结材料包括导电粉末材料和不导电粉末材料。在其它烧结条件一致的情况下,烧结材料的属性对 SPS 过程中的温度场分布有着无法忽视的影响。现阶段 SPS 模拟研究大多数以导电材料为主,对不导电材料的研究很少<sup>[46~55]</sup>。

从仿真角度来讲,SPS 模拟同时涉及温度场、电场、位移场,模拟过程十分复杂。在 Abaqus6.12 版本之前,Abaqus 软件针对电-热-力分析没有对应的单元类型,虽然 Abaqus6.12 版本之后提供了支持电-热-力直接耦合对应的单元类型,但初始版本分析能力相对较弱。故本章选择使用有限元分析软件 Abaqus6.14 版本针对烧结系统核心部位进行 SPS 模拟,并对比导电粉末材料和不导电粉末材料的放电等离子烧结过程中温度场的变化。

### 5.2 数学模型

#### 5.2.1 电场算法

图 4.2 为铜粉在电传导材料中,电场遵循麦斯威尔(Maxwell)方程的电荷守恒,假设电传导为稳态直流电时,方程为

$$\int_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS = \int_V r_c dV \quad (5.1)$$

式中, $V$ 表示任一控制体积,其面为 $S$ ; $\mathbf{n}$ 表示 $S$ 的向外法向; $V$ 表示内部体积电流; $\mathbf{J}$ 表示电流密度,且遵循欧姆定律(Ohm' Law):

$$J = \sigma^E \cdot E = -\sigma^E \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial X} \quad (5.2)$$

式中， $E(X)$  表示电场密度； $\varphi$  表示电势； $\sigma^E(\theta, f^a)$  表示电传导矩阵， $\theta$  表示温度， $f^a$  表示预定义场变量。

把式(2)带入式(1)，并且变换形式则表示为：

$$\int_V \frac{\partial \delta \varphi}{\partial X} \cdot \sigma^E \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial X} dV = \int_S \delta \varphi J dS + \int_V \delta \varphi r_c dV \quad (5.3)$$

式中， $J$  表示通过表面  $S$  进入控制体积的电流密度。

### 5.2.2 焦耳热生成

电流通过导体产生焦耳热，即电能  $P_{ec}$  转化为热能  $Q$ ，则

$$Q_v = \eta_v \cdot P_{ec} = \eta_v (J \cdot E) = \frac{\partial \varphi}{\partial X} \cdot \sigma^E \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial X} \quad (5.4)$$

式中， $\eta_v$  为能量转换系数，Abaqus 默认为 1.0，即电能百分之百转换为热能，转换后的热能同步进行热传。

此耦合操作可在 Abaqus/CAE 的 step 模块调用：Create Step→General: Coupled Thermal-electric。

### 5.2.3 位移场算法

采用连续介质力学理论，基于金属塑性力学方法进行建模。Abaqus 内置有符合 Mises 屈服准则的各向同性塑性模型，具体数学模型第一章和第二章已有详细介绍，此处不再赘述。

## 5.3 放电等离子烧结有限元模型的建立

### 5.3.1 放电等离子烧结装置的建立

目前关于放电等离子烧结技术的研究应用和报导最多的国家是日本，大多数科研工作者目前采用的放电等离子烧结设备几乎都来自日本的住友石炭矿业株式会社<sup>[56]</sup>。其完整的放电等离子烧结系统由垫块、压头、试样、模具、夹层真空室、电流电压测量系统、水冷系统与脉冲发生器等部分组成，本文主要针对烧结核心部位，包括电极、压头、试样、模具，进行 SPS 模拟。

上电极、下电极、压头、模具、粉末体 5 个部件同样是在 CATIA V5 R20 软件中建立，然后将部件导出为 stp 格式文件后导入 ABAQUS/CAE 的 Part 模块中。完整放电等离子烧结有限元模型如图 5.1 所示



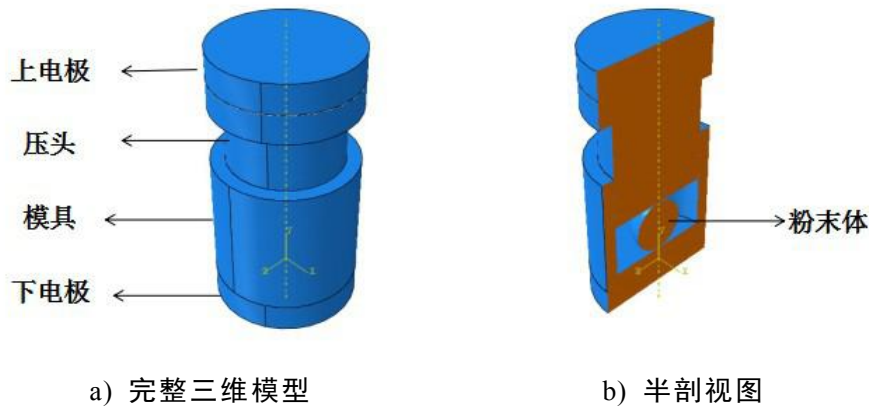


图 5.1 SPS 有限元模型

### 5.3.2 材料属性的定义

由于 SPS 模拟过程是热、力、电三场耦合模型，因此必须对每种材料设置足够的材料属性，采用 Abaqus 软件进行热力电三场耦合模型需要设置的完整材料属性包括：弹性模量(Young's Modulus)、泊松比(Poisson' Ratio)、密度(Density)、热传导系数(Thermal Conductivity)、电传导系数(Electrical Conductivity)、电热转换系数(Joule Heat Fraction)、热膨胀系数(Expansion)。如果材料发生塑性变形还需要设置应力应变曲线。

整个 SPS 模拟过程设置 MoJu、FenMo、DianJi 三种材料。其中上、下电极共用一种材料 DianJi，压头和模具共用一种材料 MoJu，粉末体用一种材料 FenMo。由于粉末体在 SPS 过程当中会发生塑形变形，因此对粉末体增设应力应变曲线。并且实际烧结过程中电极、压头和模具受热变形程度很小可以忽略不计，因此只对粉末材料设置热膨胀系数，各材料参数见表 5.1。

表 5.1 各部分材料属性表

材料名称	MoJu	DianJi	FenMo
弹性模量 (MPa)	270000	270000	200000
泊松比	0.25	0.25	0.3
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1500	1500	7.8e-9
热传导系数 W/(mm℃)	0.19	0.19	0.19
电传导系数/(Ωmm)	906.25	36100	9500
电热转换系数	1	1	1
热膨胀系数			2e-5
屈服应力 (MPa)			210

### 5.3.3 分析步设置

放电等离子烧结过程涉及到温度场、位移场、电场 3 种场的完全耦合分析。

Abaqus 从 6.12 版本开始有了热力电直接耦合分析步，但初始版本的分析能力相对较弱，因此本研究使用 Abaqus6.14 版本在 Step 功能模块设置热力电直接耦合分析步(Coupled thermal-electrical-structural)，采用稳态分析，Time period 设置为 0.1，该分析步默认开启几何非线性，同时设置增量步类型为自动(Automatic)控制增量步大小。为了保证计算收敛，设置最大增量步数为 10000，初始增量步、最小增量步、最大增量步大小分别为 0.001、1e-015、0.01。具体 Step 设置见图 5.2。

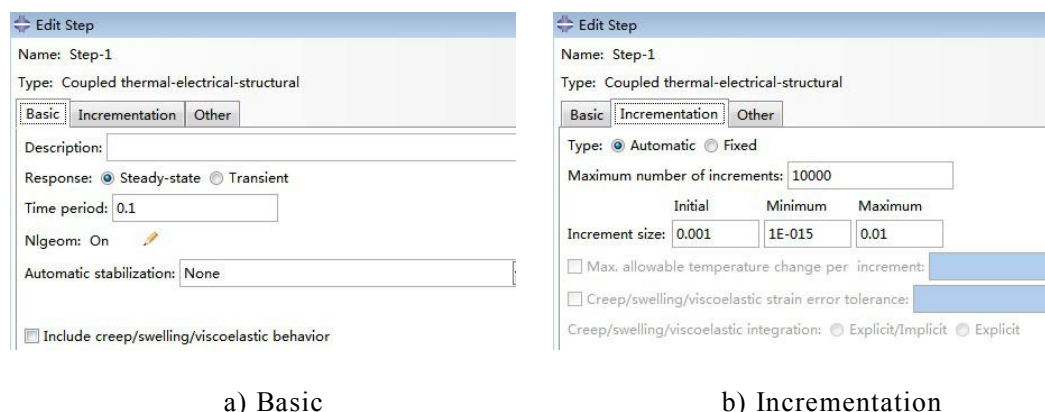
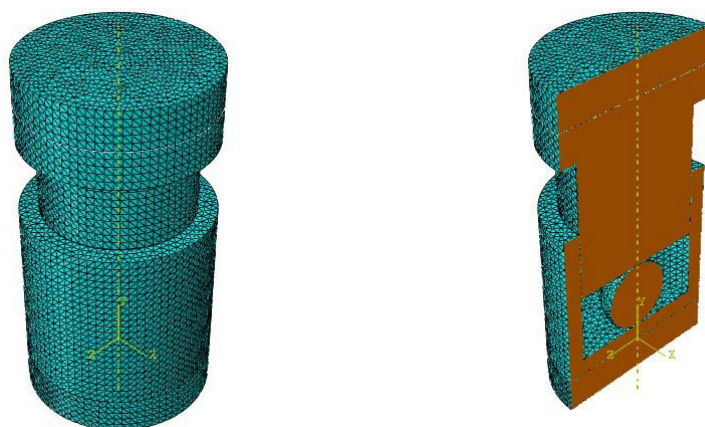


图5.2 Step设置

### 5.3.4 有限元网格的划分

网格的单元类型设置必须与分析步匹配，考虑到放电等离子烧结过程分析步设置为热力电直接耦合分析步(Coupled thermal-electrical-structural)。因此所有部件网格单元类型均采用 4 节点四面体热力电耦合单元 Q3D4，同时采用自由(Free)网格划分技术，对上电极、下电极、模具、压头和粉末设置种子尺寸  $2\ \mu\text{m}$ ，网格划分数量分别为 18706、18706、34129、5007。所有部件网格总数为 73548。有限元计算网格如图 5.3a，b 所示。



a) 烧结装置网格模型

b) 整体网格模型半剖图

图 5.3 有限元网格

### 5.3.5 接触属性设置

放电等离子烧结系统涉及多个部件相互接触，必须设置彼此间的相互作用。针对导电粉末材料，本研究在 Interaction 功能模块，设置各部件 contact 接触属性的摩擦系数为 0.1、接触热传导系数为 1220W/(mm℃)、接触热生成系数为 1、接触电传导系数为 20/(Ωmm<sup>2</sup>)。针对不导电粉末材料，只需在此基础上增设另一种不含接触电传导系数的接触属性，并用于粉末体与压头和模具的接触部位，以控制电流不流经粉末体。具体设置如图 5.4 所示。

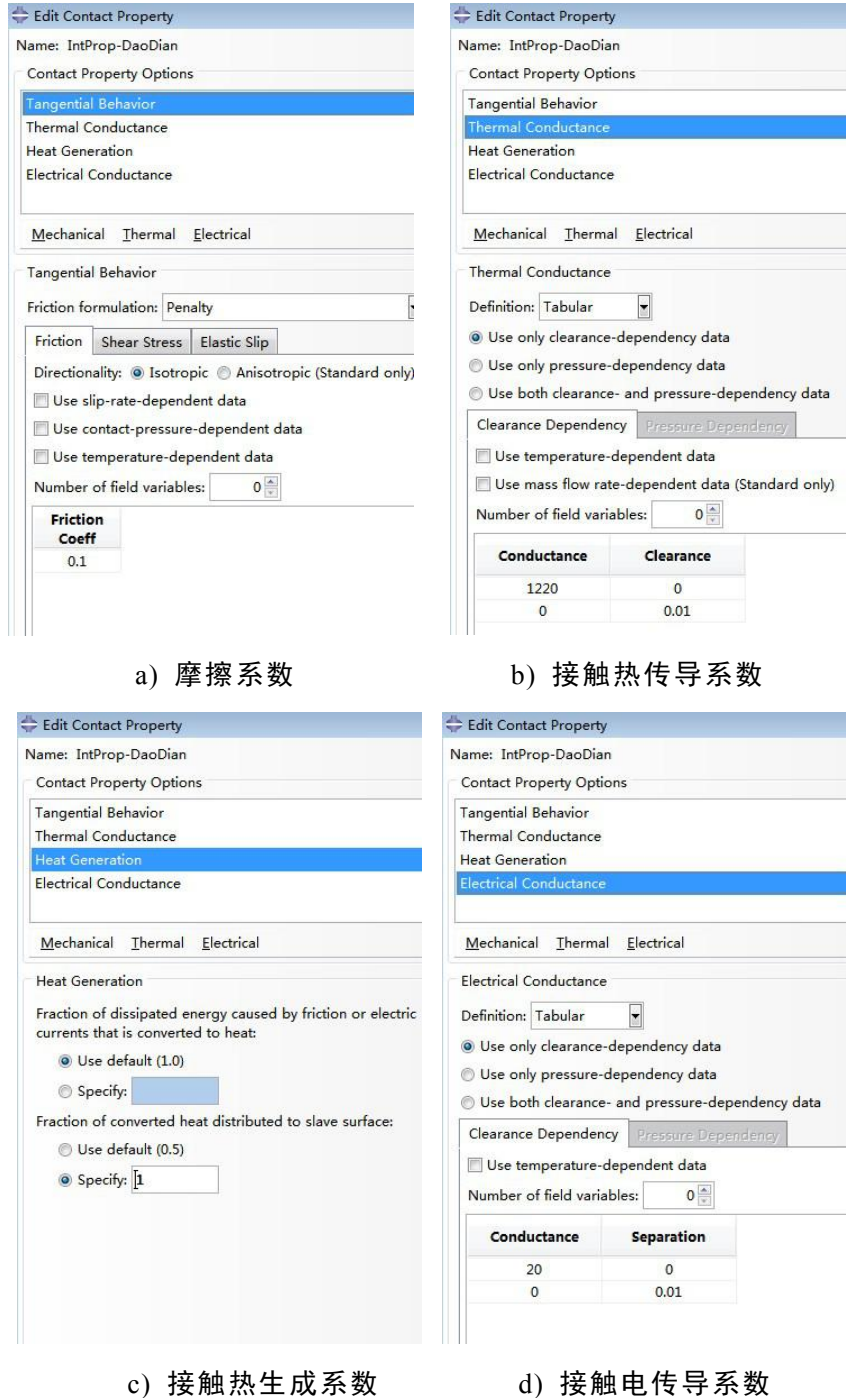
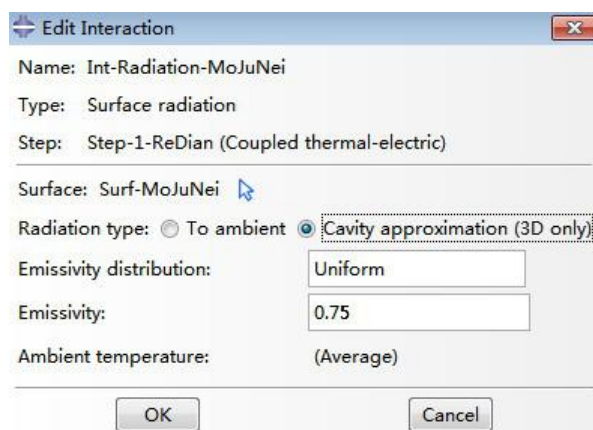
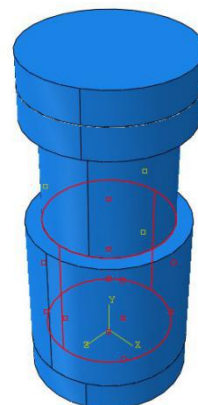


图 5.4 接触属性设置

在 Abaqus/CAE 的 Interaction 功能模块，还可以定义模型与外部环境之间的相互作用(热辐射、热传导、电传导等)。由于在烧结过程中，整个系统会被抽真空，所以不考虑烧结系统与周围空气的对流和传导散热，只考虑烧结腔内壁的热辐射。具体设置如图 5.5 所示



a) 接触热生成系数



b) 接触电传导系数

图 5.5 接触属性设置

### 5.3.6 定义边界条件和载荷

(1)电场：在上电极的上表面施加电流载荷，Abaqus/CAE 的 Load 功能模块可以施加的电流载荷有集中电流、面电流、体电流，由于面电流更加符合实际情况，设置施加面电流载荷 200A。电流载荷施加以后需要设置零电势边界条件以控制电流的方向，因此选择下电极的下表面施加 0 电势边界条件。

(2)温度场：整个烧结系统一开始处于常温环境中，因此通过 Load 功能模块的预定义场(Create Predefined Field)对整个模型施加初始温度即室温 25℃，如果不设置初始温度 Abaqus/CAE 会自动默认初始温度为 0℃。另外考虑到水冷系统带来的对流效应对整个烧结过程的影响，需要对上电极的上表面和下电极的下表面设置温度热沉边界条件，以保证热沉面在整个烧结过程中温度始终维持 25℃不变。

(3)位移场：对由上电极和压头组成的组合施加沿 y 轴向下的位移 0.012 mm；对模具和下电极组成的组合施加固定约束边界条件。

## 5.4 数值模拟计算结果分析

### 5.4.1 放电等离子烧结温度场分布规律

导电粉末放电等离子烧结系统终态时刻温度场分布云图，如图 5.6 所示



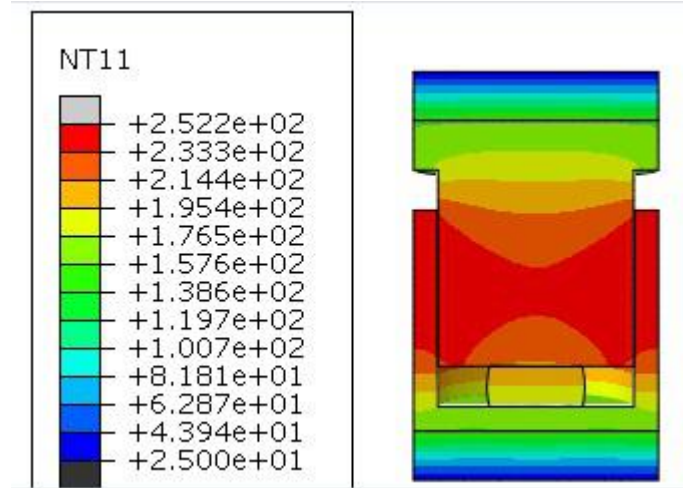
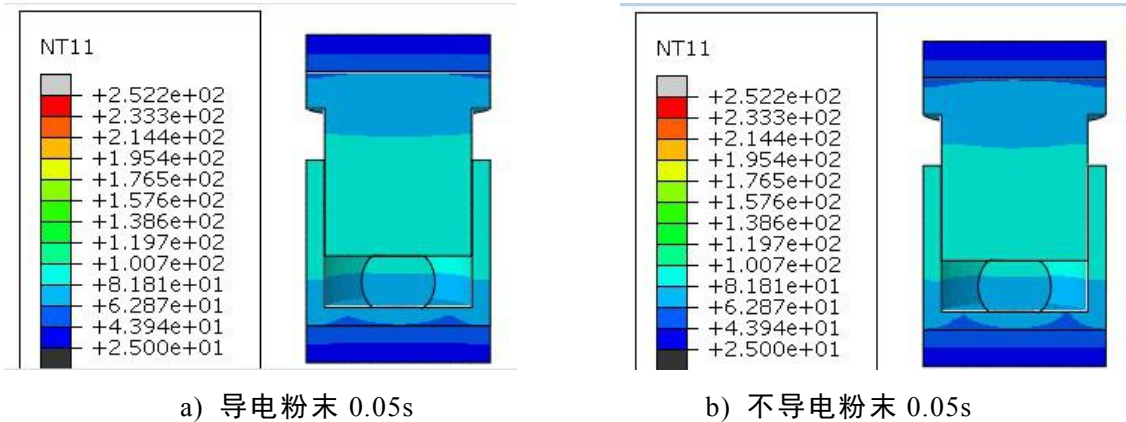


图 5.6 导电粉末烧结终态时刻温度场分布云图

由图可知在烧结终态时刻整个烧结系统压头与模具相接触的部位温度最高，最高温度达到  $252.2^{\circ}\text{C}$ ，而上电极的上表面和下电极的下表面温度则最低，保持在  $25^{\circ}\text{C}$  不变，其余部位的温度介于两者之间，并且从压头与模具相接触部位到上、下电极外表面温度呈现递减趋势。出现这种温度分布规律的原因主要是在整个烧结过程中压头与模具的接触部位产生的焦耳热最多，是整个烧结过程主要的热源。而考虑到水冷系统带来的对流效应，即上电极的上表面和下电极的下表面与水冷系统会发生对流换热和热传导，因此对上电极的上表面和下电极的下表面设置了热沉边界条件，即温度不变边界条件，所以上电极的上表面和下电极的下表面温度最低。

#### 5.4.2 烧结材料对温度场分布规律的影响

本章在控制其它烧结条件一致的情况下模拟计算了导电粉末材料与不导电粉末材料的温度场分布。结果如图 5.7 所示：



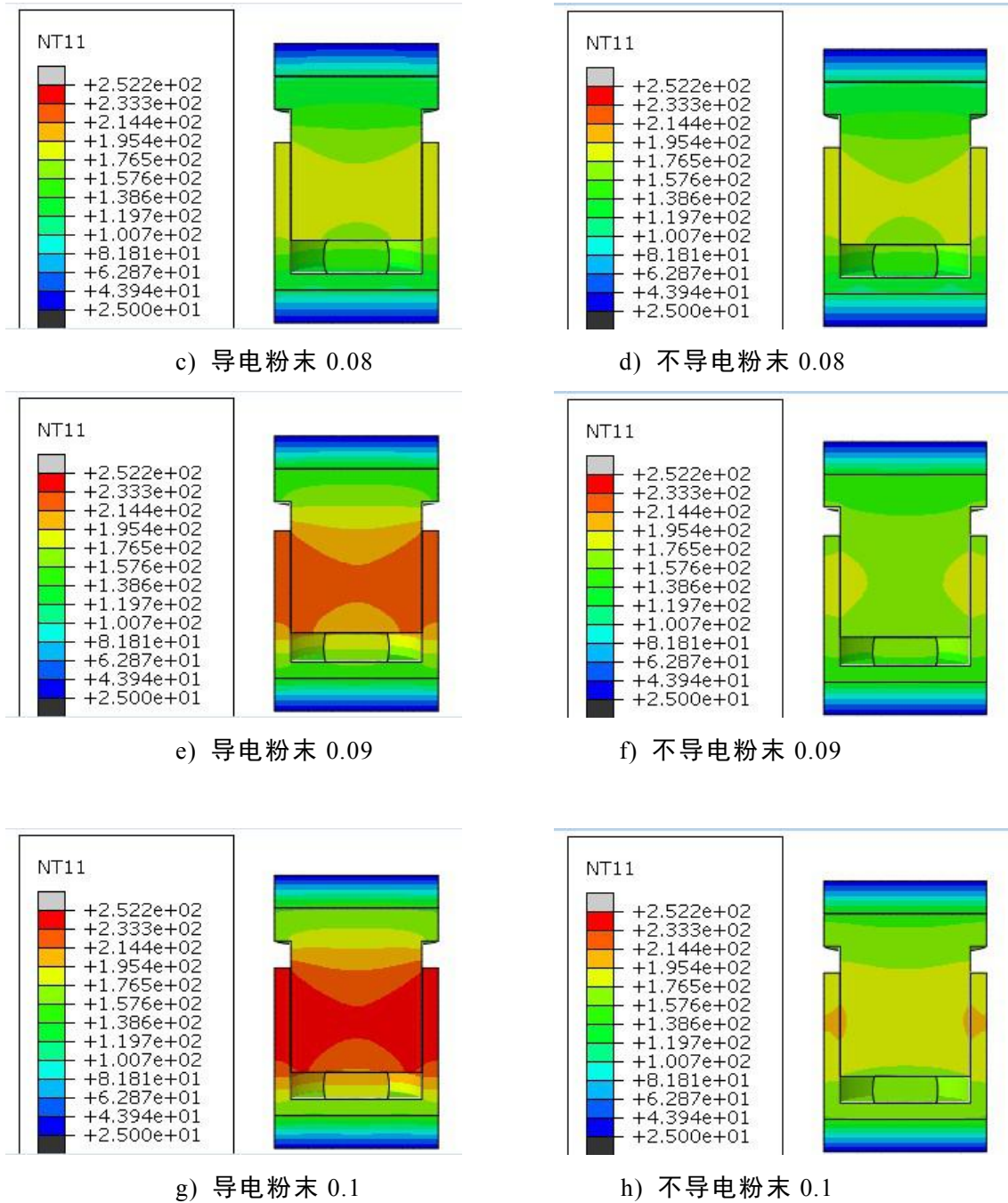


图 5.7 不同材料不同时刻温度场分布云图

由图可知不导电粉末材料和导电粉末材料的烧结系统温度场分布规律既有相同的地方也有不同的地方。相同点：最高点温度均位于压头与模具接触的部位，最低点温度均位于上、下电极材料的外表面，并且其余部位温度同样介于两者之间。不同点：导电材料烧结系统的升温速率明显高于不导电材料烧结系统的升温速率，但不导电材料烧结系统的温度场分布比导电材料更加均匀。在其它烧结条件相同的情况下，导电材料烧结系统的最高温度由最初的  $25^{\circ}\text{C}$  上升到  $252.2^{\circ}\text{C}$ ，上升了  $227.2^{\circ}\text{C}$ 。而不导电材料烧结系统的最高温度由最初的  $25^{\circ}\text{C}$  上升到  $197.9^{\circ}\text{C}$ ，上升了  $172.9^{\circ}\text{C}$ 。导电材料烧结系统的最高温度比不导电材料烧结系统高  $54.3^{\circ}\text{C}$ 。

单独显示烧结终态时刻粉末材料的温度场等值线图如图 5.8 和 5.9 所示：

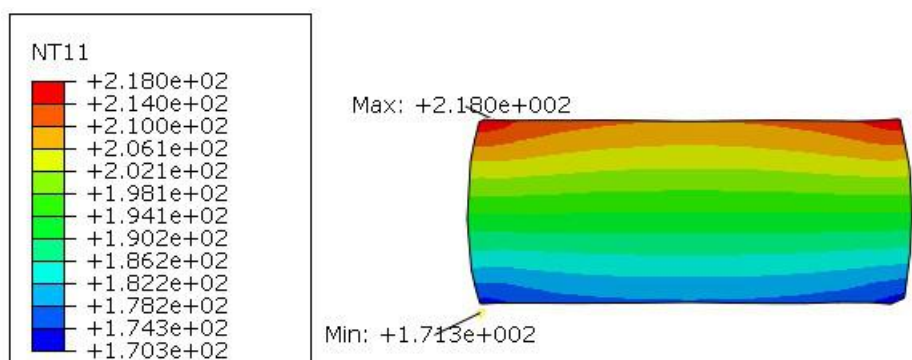


图 5.8 导电粉末烧结终态时刻温度分布云图

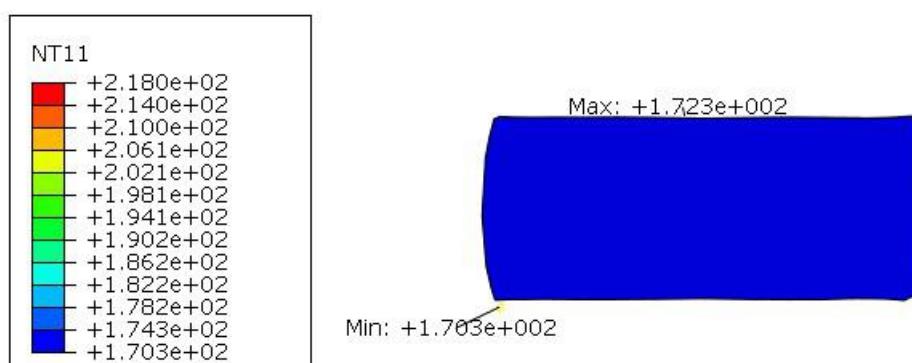


图 5.9 不导电粉末烧结终态时刻温度分布云图

由图 5.8 和图 5.9 可知，在其它烧结条件一致的情况下，不导电粉末材料比导电粉末材料的温度场分布更加均匀。烧结终态时刻导电粉末材料的最低温为  $171.3^{\circ}\text{C}$ ，最高温度为  $218^{\circ}\text{C}$ ，温差为  $46.7^{\circ}\text{C}$ ；不导电粉末材料的最低温为  $170.3^{\circ}\text{C}$ ，最高温度为  $172.3^{\circ}\text{C}$ ，温差仅为  $2^{\circ}\text{C}$ 。但两者也有相同的地方，最高温度均位于烧结制品的上表面，即与压头接触的表面，最低温度均位于烧结制品的下表面。造成这种温度场分布规律的原因主要跟电流的流向有关。对于导电粉末材料，电流经上电极的上表面输入以后，主要经压头→导电粉末材料→模具底部→下电极流出，只有少部分电流会流经模具；对于不导电粉末材料，电流主要经压头→模具→下电极流出，没有电流流过粉末内部。而 SPS 技术当电流经过粉末体的时候，粉末体会瞬间产生火花放电现象，即产生高温等离子体促进烧结进程，因此导电粉末材料比不导电粉末材料的升温速率快，而不导电材料比导电材料温度分布更加均匀。

## 5.5 本章小结

本章利用有限元分析软件 Abaqus6.14 版本建立了同时具有电场、温度场、位移场的多场耦合模型，针对烧结系统核心部位进行了 SPS 模拟，并对比了导电粉末材料和不导电粉末材料的放电等离子烧结过程，模拟结果表明：

(1) 烧结终态时刻烧结系统最高温度位于压头与模具相接触的部位，最低温度位于上电极的上表面和下电极的下表面，其余部位温度介于二者之间；

(2)导电粉末材料比不导电粉末材料的升温速率快，但不导电粉末材料比导电粉末材料温度分布更加均匀。

结论对 SPS 机理研究具有一定指导意义。



## 结 论

采用基于密集堆积球形颗粒的微观力学方法进行粉末成形建模,是当前粉末成形建模途径的薄弱区域,尤其是关于随机分布的三维密集堆积球形颗粒的研究更是少之又少。

本文基于密集堆积球形颗粒的微观力学方法,用 Python 对 Abaqus 进行二次开发,生成了随机分布的具有 2 种尺寸的三维密集堆积球形颗粒模型,在细观尺寸上对粉末的压制成形过程进行了计算机仿真。作为补充,利用 Abaqus6.14 软件成功建立了模拟放电等离子烧结过程的有限元模型。主要成果和结论如下:

(1)编写了 Python 脚本,并对脚本进行了详细的注释。成功生成了随机分布的具有 2 种尺寸的三维密集堆积球形颗粒模型。解决了现有仿真软件无法建立密集堆积球形颗粒的困难。后续研究者如有兴趣,可参考此脚本编写新脚本,或者对此脚本进行部分修改。本文编写的 Python 脚本可以控制球形粉末颗粒的投放区域、球形粉末颗粒的半径、球形粉末颗粒的数量以及生成多种粒径的混合球形粉末。

(2)采用 Abaqus 软件建立了完整的模拟粉末压制过程的有限元模型,通过对 Property、Step、Mesh、Load、Interaction 等关键模块进行设置,成功解决了计算过程中出现的收敛性问题。研究了随机分布的三维密集球堆积松散粉末颗粒的堆积行为,并探讨了摩擦系数、压制方式(单向压制、双冲头双向压制)对粉末堆积行为和压胚密度的影响规律。得出结论:粉末材料堆积过程的实质是减少孔隙,提高密度的过程。粉末堆积过程主要分为两个阶段:a. 粉末颗粒发生位移和弹性变形;b. 粉末颗粒由于挤压发生塑性变形。并且采用双向压制方式和较小的摩擦系数有利于压胚密度的均匀性。此结论对粉末压制成形理论的研究具有一定的指导意义。

(3)采用 Abaqus 软件建立了同时具有电场、温度场、位移场的多场完全耦合模型,针对烧结系统核心部位进行了 SPS 模拟,并对比了导电粉末材料和不导电粉末材料的放电等离子烧结过程,得到了烧结过程中的温度场变化。模拟结果表明:烧结终态时刻最高温度位于压头与模具相接触的部位,最低温度位于上电极的上表面和下电极的下表面,其余部位温度介于二者之间。另外,导电粉末材料比不导电粉末材料的升温速率快,但不导电粉末材料比导电粉末材料温度分布更加均匀。

计算机仿真已经成为当前研究粉末冶金过程理论的有效手段。在详细了解了现阶段粉末成形建模途径和现有仿真软件在该领域的应用以后,深感还有一些工作非常值得做进一步的研究。因此对计算机仿真在粉末冶金领域的发展应用做一

些展望：

(1)建立更加完整的描述粉末成形过程的力学体系。现有的建模途径均存在一定的假设基础，因此计算精度并不是很高。需要从不同角度、针对不同类型的粉末材料对粉末成形机理作更深一步的研究，建立精确的数学模型。

(2)加强三维模拟能力和多物理场耦合技术。现有仿真软件在处理二维模拟和单物理场分析问题上已经发展的很成熟，但涉及到多物理场分析问题时通常不能得到很好的模拟结果，不仅计算耗时，还很难收敛。但分析粉末冶金过程经常涉及到多种场的耦合，比如热压烧结就是热力耦合分析问题，放电等离子烧结就是热力学耦合分析问题。

(3)软件二次开发。现阶段基于非连续介质力学途径进行粉末成形建模的研究很少，原因之一就是离散的颗粒模型建模极其困难，现有仿真软件还不具备建立如此复杂模型的能力。二次开发能帮我们实现定制功能。

总体来说，提高数值模拟的精确性、高效性是未来计算机仿真在粉末冶金领域发展的主要方向。

## 参考文献

- [1] 黄伯云,易健宏.现代粉末冶金材料和技术发展现状(一)[J].上海金属,2007(03):1-7.
- [2] 黄伯云,易健宏.现代粉末冶金材料和技术发展现状(二)[J].上海金属,2007(04):1-5.
- [3] PM Modnet Research Group.Numerical Simulation of Powder Compaction for Two Multilevel Ferrous Parts, Including Powder Characterization and Experimental Validation[J]. Powder Metallurgy, 2002,45(4):335-344.
- [4] 何世文. 钛基合金温压成形技术研究[D].中南大学,2004.
- [5] H A Kuhn, C L Downey. Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Materials[J]. Int. J. of Powder Metallurgy, 1971, 7(1): 15-25.
- [6] R J Green. A Plasticity Theory for Porous Solids[J]. Mech.Sci., 1972, 14(3): 215-224.
- [7] M Oyane, S Shima, Y.Kono. Theory of plasticity for porous metals[J]. Bull. JSME ,16,1254,1977.
- [8] A L Gurson. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth:Part1-Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media[J]. ASME, J. Eng. Mater. Technol., 1977, 99: 2.
- [9] S M Doraivelu, H L Gegel, J S Gunasekera, et al. A new Yield Function for Compressible P/M Materials[J]. Mech.Sci., 1984, 26(9/10): 527-535.
- [10] K T Kim, J S Kim. Stage 1 compaction behavior of tool steel powder under die pressing[J]. Powder Metallurgy, 1998, 41(3): 199-204.
- [11] D N Lee, H S Kim. Plastic Yield Behavior of Porous Metals[J]. Powder Metallurgy, 1992, 35(4): 275-279.
- [12] 汪俊, 李从心. 粉末金属压制过程建模方法( I ):金属塑性力学方法[J]. 精密成形工程, 2000, 18(2): 1-2.
- [13] S J Park,C H Park. Modeling for uniaxial compaction of ceramic powders[J]. Powder Metallurgy, 1999, 42(3): 269-274.
- [14] T Tabata, S Masaki, Y Abe. A Yield Criterion for Porous Materials and Analysis of Axisymmetric Compress of Porous Disks[J]. Jap. Soc. Tech. Plast. 1977, 18(196): 373-380.
- [15] Hwang B B, Kobayashi S. Deformation characterization of powdered metals in compaction[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1990,

- 30(2): 309-323.
- [16] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.
  - [17] D C Drucker, R E Gibson, D J Henkel: Trans. of America Society Civil Engineering, Vol.122, 1957.
  - [18] Jenike A W, Shield R T. On the Plastic Flow of Coulomb Solids Beyond Original Failure[J]. J. appl. mech. trans. asme, 1959, 26: 599-602.
  - [19] N P Suh. A Yield Criterion for Plastic Friction, Work-hardening Granular Materials[J]. International Journal of Powder Metallurgy, 1969, 5(1): 69-78.
  - [20] I S Sandler, F L DiMaggio, G Y Baladi. Generalized Cap Model for Geological Materials[J]. J. of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1976, 102: 683-699.
  - [21] F L DiMaggio, I S Sandler. Material Models for Granular Soils[J]. J. of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1971, 97: 935-950.
  - [22] Bathurst R J, Rothenburg L. Micromechanical Aspects of Isotropic Granular Assemblies With Linear Contact Interactions[J]. Journal of Applied Mechanics, 1988, 55(1): 17.
  - [23] T P O'Donnell, P S Steif. Elastic-Plastic Compaction of A Two-Dimensional Assemblage of Particles, Transaction of ASME, 1989, 111: 404-408.
  - [24] Chang T P, Chen B H. Orthotropic elastic response of granular materials[J]. Computers & Structures, 1997, 64(1-4): 667-675.
  - [25] 谷曼. 铁基粉末高速压制过程中粉体摩擦行为及致密化机理[D]. 合肥工业大学, 2015.
  - [26] 孙龙. 铁基粉末颗粒压制的细观模拟研究[D]. 合肥工业大学, 2013.
  - [27] 郑珊. 离散单元法及其在粉末高速压制成形模拟中的应用[D]. 中南大学, 2008.
  - [28] 柏厚义. 界面摩擦对铁粉压制成形影响的细观模拟研究[D]. 合肥工业大学, 2009.
  - [29] 王文涛. 基于离散元法的铁粉模压成形数值仿真研究[D]. 中北大学, 2014.
  - [30] Bathurst R J, Rothenburg L. Micromechanical aspects of isotropic granular assemblies with linear contact interactions[J]. Journal of Applied Mechanics, 1988, 55(1): 17.
  - [31] Shima S, Kotera H. Constitutive equations for granular materials undergoing compaction with internal friction[J]. Metal Powder Report, 1994, 49(10), 41.
  - [32] Pia Redanz, Norman A. Fleck. The compaction of a random distribution of metal cylinders by the discrete element method[J]. Acta

- Materialia,2001,49(20):4325-4335.
- [33] 王国梁. ABAQUS GUI二次开发技术在材料领域的研究与应用[D].兰州理工大学,2009.
- [34] 周兰. ABAQUS二次开发技术在编织型材料微结构设计中的应用[D].兰州理工大学,2010.
- [35] 张文娣. 基于ABAQUS的混凝土梁优化程序的设计与实现[D].大连理工大学,2015.
- [36] 龚智鹏. 基于Abaqus的铣削仿真前处理关键技术研究及二次开发[D].南京航空航天大学,2017.
- [37] 陈学义. 基于ABAQUS二次开发的多管火箭炮参数化建模与仿真研究[D].南京理工大学,2012.
- [38] 马川. 基于ABAQUS二次开发的框架结构设计平台研究[D].西安建筑科技大学,2018.
- [39] 叶红玲,胡腾,赵春华,肖燕妮.基于Python的Abaqus二次开发在空间可展单簧片结构仿真分析中的应用[J].计算机辅助工程,2016,25(01):50-54.
- [40] 郭霞,关志东,刘遂,陈萍,刘佳,王欣晶,邱太文.基于Python的Abaqus二次开发在层压板修理模拟中的应用[J].计算机辅助工程,2013,22(04):34-39.
- [41] 陈彦海,秦运海,姜春英,康玉祥,叶长龙.基于Python的Abaqus二次开发在飞机蒙皮锤铆中的应用[J].航空制造技术,2018,61(16):96-101.
- [42] 申江龙. 放电等离子烧结及挤压成形规律仿真与试验研究[D].燕山大学,2014.
- [43] 刘雪梅,宋晓艳,张久兴.放电等离子烧结过程中粉末颗粒内部温度场的模拟及颈部演变[J].金属学报,2006(07):757-762.
- [44] 季必发,田长安,谢劲松.国内放电等离子烧结技术的研究进展及展望[J].广东化工,2013,40(15):85-86+79.
- [45] 张久兴,刘科高,周美玲.放电等离子烧结技术的发展和应[J].粉末冶金技术,2002(03):128-133.
- [46] 江磊. Sialon/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>纳米陶瓷SPS烧结和超塑性成形热-电-力耦合分析[D].燕山大学,2013.
- [47] 宋毅,周照耀,赖燕根,陈志成.放电等离子烧结粉末材料的多场耦合有限元模型及其数值模拟[J].热加工工艺,2011,40(21):1-4+8.
- [48] 孙燕. 放电等离子烧结工艺温度场分布规律热电耦合分析[D].燕山大学,2012.
- [49] 李明. 放电等离子烧结合成TiC复合材料过程的数值模拟[D].南昌航空大学,2012.

- [50] 周亦彤,王明昱.放电等离子烧结微胞结构复合材料有限元模拟[J].长春工业大学学报,2015,36(03):245-248.
- [51] 刘雪梅,宋晓艳,张久兴,赵世贤,魏君.放电等离子烧结制备WC-Co硬质合金温度分布的数值模拟[J].中国有色金属学报,2008(02):221-225.
- [52] 陈小安,尚福军,宋顺成.放电等离子体烧结W粉数值模拟[J].粉末冶金技术,2010,28(04):256-261.
- [53] 贾建波,刘文超,刘海亮,鹿超,徐岩,杨越,骆俊廷.粉末冶金Ti-22Al-25Nb合金的放电等离子烧结工艺数值模拟与实验研究[J].中国机械工程,2018,29(19):2377-2383.
- [54] 郭世柏,肖勇,郑洲顺,蔡春波,刘健康,张勇强.钛合金放电等离子烧结温度分布和电流密度的数值模拟[J].热加工工艺,2013,42(08):31-34.
- [55] Temperature evolution during field activated sintering. Zavaliangos A,Zhang J,Krammer M. Materials Science and Engineering . 2004.
- [56] 冯海波,周玉,贾德昌.放电等离子烧结技术的原理及应用[J].材料科学与工艺,2003(03):327-331.

## 致 谢

行文至此，意味着三年硕士生涯即将结束，也意味着我即将离开这块培育了我三年的土地——兰州理工大学。回首三年时光，感慨良多。在此向所有在这段人生历程中曾经帮助过我的人致以本人诚挚的感谢。

感谢我的导师——李旭东教授，谢谢李旭东教授三年以来对我的谆谆教诲。从我 2016 年 9 月进入学校的那一刻起，李旭东教授便成为了我在兰州理工大学的第一责任人，从科研到生活无处不关心着我。李旭东教授具有渊博的专业知识、精益求精的工作态度以及诲人不倦的高尚师德，不仅仅是我的科研导师，也是我的人生导师。严于律己、宽以待人、专心致志、精益求精是我在老师身上学到的最宝贵的财富。在此，谨向李旭东教授致以我本人崇高的敬意和由衷的感谢。

感谢我的同门张江溯和韩思宇两位硕士。三年以来我们三个人成为了在这个学校最亲近的人，生活中我们无话不谈，科研上我们互相帮助。是你们无私的帮助和陪伴让我的科研生活进行的更加顺利。

感谢静厚新课题组的兄弟姐妹们，感谢王犇师兄、李芳婷师姐、廖军龙师弟、安康师弟、王创师弟对我生活和科研上的帮助。也感谢课题组以前的师兄师姐，为课题组留下了宝贵的工作积累，是你们让我的三年时光更加完美。

感谢我的父母、哥哥和女友的陪伴。是你们一直以来对我无私的奉献和默默的支持，才能让我拥有如此美好的学习环境，生活才会如此的轻松、美好、快乐。

感谢各位参与本论文开题、中期、审阅，以及答辩的各位评审专家、老师、同学，谢谢你们对本论文的顺利完成所做出的贡献。

最后，由于本人学术水平有限，书中若有错误或不足之处，敬请各位学者批评指正，也谢谢你们对本论文的包容。

蒋煜

2019 年 3 月 14 日

## 附表 A 攻读学位期间发表的学术论文

- [1] 蒋煜, 李旭东. 粉末压制成形的细观模拟分析. 甘肃科学学报, 已录用, 待发表, 文章编号 20190057