

摘 要

随着计算机技术的发展，以有限元法为代表的数值模拟技术广泛应用于金属塑性成形过程分析，基于刚塑性有限元法进行金属塑性成形过程的数值模拟技术取得了较大的成功。在本次模拟过程中，使用比较先进的 3D DEFOEM5.03 金属有限元分析软件对圆柱形棒料锻压过程进行数值模拟，对在 Pro/ENGINEER 中建立的三维模型做热力耦合分析。并利用 3D DEFOEM 的图表输出功能直观地分析锻压过程中棒料及模具的应力场、应变场及温度场等变量。根据这些分析结果，可得到锻压过程的应力、应变及温度各变量变化情况。本次模拟中，分别对圆柱形棒料在平砧间锻压和加垫环锻压过程进行了数值分析，得到了等效应力、等效应变及温度在不同时间内的分布情况，并提取出随时间变化的曲线。通过这些曲线可以研究锻压过程中应力、应变的变化情况，这对锻压工艺的确定、加载速度、压下量的确定提供了重要的依据。

关键词：锻压；数值模拟；温度；应力；应变

Abstract

Along with the development of the computer technology, the numerical simulation technology was used widely in metal forming process, based on rigid-plastic FEM, the numerical simulation technology had got great success. In this simulation, the forging process of cylinder was simulated by the advanced 3D rigid-plastic FEM. The three dimension model of the cylinder built in PRO/ENGINEER was analyzed thermomechanic coupled. And then, the variable as stress, strain and temperature field of cylinder and die in the forging process was analyzed by the exporting function on picture and diagram of 3D rigid-plastic FEM. Based on these results, the variety of the variable as stress strain and temperature in the forging process can be achieved. In this simulation, numerical simulations on the forging process of cylinder between two flat and two underlay loop were done respectively. Distributions of the variables as effective stress effective strain and temperature at different time were got. Curves of these variables changing with time were got. Changes of stress and strain in forging can be studied by these curves, fundamentals on designing forging technique, loading speed and press scale were got .

Keywords: upset; simulation; temperature; stress; strain

目 录

1 文献综述.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 锻造过程数值模拟的发展现状.....	1
1.2.1 有限元软件技术的发展趋势.....	2
1.2.2 有限元软件研究方向.....	2
1.3 本课题研究内容.....	3
1.4 本研究意义.....	3
2 模拟对象及模拟方法.....	5
2.1 模拟对象.....	5
2.2 刚粘塑性有限元法的基本原理.....	7
2.2.1 刚粘塑性材料流动的基本方程.....	7
2.3 在 Pre/ENGINEER 中建模.....	8
2.3.1 圆柱形棒料的建模.....	8
2.3.2 上下砧的建模.....	9
2.3.3 垫环的设计和建模.....	9
2.4 利用 DEFORM5.03 模拟锻压过程.....	10
2.4.1 模拟对象的简化.....	10
2.4.2 模拟材料的选取.....	11
2.4.3 不考虑温度场的坯料锻压过程数值模拟.....	12
2.4.4 考虑温度场影响的坯料锻压过程数值模拟.....	13
2.4.5 加垫环的锻压过程数值模拟.....	15
3 模拟结果分析.....	18
3.1 不加垫环的坯料锻压过程数值模拟结果.....	18
3.1.1 不考虑温度场的坯料锻压过程模拟结果.....	18
3.1.2 考虑温度场影响的锻压过程模拟结果分析.....	21
3.2 加垫环锻压过程模拟结果分析.....	27
4 技术经济分析.....	34

5 结论.....	35
参考文献.....	36
致 谢.....	38

1 文献综述

1.1 研究背景

过去, 由于缺乏科学的预测方法, 锻压工艺设计和模具设计的主要依据是设计人员在长期工作中积累的经验, 以及由对简单模型的实验研究总结出来的多种图表。对于复杂的零件, 按照设计结果制造出工装模具以后, 往往还需要通过反复的实验、修改, 才能最终生产出合格的制品。这样, 不但造成人力、物力、时间的巨大浪费, 也难以保证产品质量^[1]。

随着计算机技术的飞跃发展, 以有限元法为代表的数值模拟技术广泛应用于分析金属塑性成形过程, 运用刚塑性有限元法进行金属塑性成形过程的数值模拟取得了较大的成功。一方面, 高性能的计算机使得在短时间内模拟不同成形条件下的塑性成形过程成为可能, 并且在有限的时间内获得比较全面的模拟结果^[2]。另一方面, 数值模拟方法以图形或动画的形式表达金属的变形过程, 以及各个物理量随时间和空间的变化, 因此具有直观、形象的特点。锻造工艺是体积成形工艺的重要组成部分, 由于锻件的形状、尺寸稳定, 具有良好的综合力学机械性能, 纤维组织合理, 材料利用率高, 因此在机械、航空、航天等工业领域都得到了广泛的应用。锻造过程一般是在高温下完成的一个复杂的物理变化过程, 锻件的成形质量受锻造温度、成形速度、模具表面的摩擦与润滑、坯料形状以及模腔形状和变形程度等因素的影响^[3]。为深入研究锻造过程中金属的流动规律和变形模式, 数值模拟技术的应用已成为一个重要的途径, 本文在刚塑性有限元软件 Deform 3D 平台上对坯料锻压的锻造过程进行了优化分析。

1.2 锻造过程数值模拟的发展现状

2 文献综述

2.1 研究背景

过去, 由于缺乏科学的预测方法, 锻压工艺设计和模具设计的主要依据是设计人员在长期工作中积累的经验, 以及由对简单模型的实验研究总结出来的多种图表。对于复杂的零件, 按照设计结果制造出工装模具以后, 往往还需要通过反复的实验、修改, 才能最终生产出合格的制品。这样, 不但造成人力、物力、时间的巨大浪费, 也难以保证产品质量^[1]。

随着计算机技术的飞跃发展, 以有限元法为代表的数值模拟技术广泛应用于分析金属塑性成形过程, 运用刚塑性有限元法进行金属塑性成形过程的数值模拟取得了较大的成功。一方面, 高性能的计算机使得在短时间内模拟不同成形条件下的塑性成形过程成为可能, 并且在有限的时间内获得比较全面的模拟结果^[2]。另一方面, 数值模拟方法以图形或动画的形式表达金属的变形过程, 以及各个物理量随时间和空间的变化, 因此具有直观、形象的特点。锻造工艺是体积成形工艺的重要组成部分, 由于锻件的形状、尺寸稳定, 具有良好的综合力学机械性能, 纤维组织合理, 材料利用率高, 因此在机械、航空、航天等工业领域都得到了广泛的应用。锻造过程一般是在高温下完成的一个复杂的物理变化过程, 锻件的成形质量受锻造温度、成形速度、模具表面的摩擦与润滑、坯料形状以及模腔形状和变形程度等因素的影响^[3]。为深入研究锻造过程中金属的流动规律和变形模式, 数值模拟技术的应用已成为一个重要的途径, 本文在刚塑性有限元软件 Deform 3D 平台上对坯料锻压的锻造过程进行了优化分析。

2.2 锻造过程数值模拟的发展现状

目前,在工业发达国家,材料成型计算机数值模拟技术越来越广泛地在各工业部门中得到应用,产生了明显的经济效益,正在深刻地改变着传统的产品设计、制造方式。在工业需求的推动下,国外已涌现出一批用于锻压成型计算机数值模拟的商业软件。尤其我国在数值模拟技术的实际应用方面与工业发达国家相比还有差距。计算机数值模拟技术有着巨大的发展前景。一方面,人们对于模拟的精度、速度和能力的期望是没有止境的;另一方面,随着各种新材料的发明和应用,必然会出现各种物理的、化学的甚至生物的材料成型新工艺,这将扩展计算机数值模拟的研究领域。随着计算机技术的发展和人们对锻造技术基本规律其中尤其是材料本构关系和边界条件研究的深入,模拟中将采用越来越精确的计算模型。更深刻地结实材料的各种物理性能,力学性能和细观、微观组织性能与成型工艺的关系,以更短的计算时间得到更精确的模拟结果^[4]。

航空航天、重型机械、汽车以及船舶等行业中许多重要零部件都需要经过锻造加工,而传统锻造工艺的制定和模具设计通常需要借助于反复的实物试验,逐步修改直到达到要求为止,这种方法不仅周期长、效率低、成本高,对技术人员和操作人员的技术水平和工作经验要求高,还经常不能达到最佳的产品性能。数值仿真技术由于其强大的运算能力,能够模拟材料流动等异常复杂的锻造过程,而越来越凸显其优越性。锻造是高度非线性的工艺过程需要描述材料极度的变形和模具与工件之间复杂的相互作用。多数情形下,锻造的毛坯形状相对简单,但最终产品的几何形状却非常复杂,达到极度的材料流动通常需要分段进行,由多个锻造道次完成^[5]。

2.2.1 有限元软件技术的发展趋势

有限元软件技术的发展趋势是编制有限元计算分析软件,把理论成果、算法转换为能解决工程实际问题的生产力的主要手段,是把最新的计算机技术、软件工具、算法和工程知识结合在一起的综合性工作。随着金属学、传热学、工程力学、有限元理论和计算机技术等领域的进步,金属成形有限元分析软件也得到了相应的发展,计算精度越来越高,功能也越来越强大。文献[5]指出了锻压生产应用中有限元模拟软件技术的一些研究发展方向:由宏观模拟转向微观模拟;由单一场的模拟转向耦合场的模拟;由共性通用的模拟转向特性专用型的模拟;显式算法和隐式算法结合的求解方法;面向对象的程序设计方法等。

2.2.2 有限元软件研究方向

国内外学者为完善有限元软件技术仍然在进行不懈的努力,近期的研究工作主要集中在以下几个方面^[6]:

1. 边界条件和材料本构关系(热本构、力本构和流体本构等)的准确描述;

2. 成形过程的优化；
3. 反向模拟技术；
4. 动态网格划分与重划；
5. 预测微观组织结构的演化；
6. 误差估计；
7. 并行环境下与生产系统其他技术的集成；
8. 非稳定性和应变集中；
9. 新型数值模拟法，如无网格法、自适应 FEM 法、FBEM 法、基于特征的 FEBM 法等^[7]。

2.3 本课题研究内容

本次研究的主要内容是坯料锻压过程的应力、应变分析，并在模拟中考虑温度场的影响。通过使用 Pro/ENGINEER 软件与 DEFORM 软件，在掌握有限元分析基本原理、塑性变形基础知识及锻造工艺的基础上，采用有限元法对坯料锻压过程进行应力、应变分析。建立简化模型并选取参数，给出变形过程中不同压下量坯料内部的变形情况及应力、应变分布情况，得出合理的坯料锻压过程工艺参数。在坯料锻压过程中必须考虑温度场的影响，否则模拟结果将会有很大误差^[8]。

已经发展的数值模拟方法可以分为两大类：一类是以有限元法为代表，另一类是一有限差分法为代表。在本次研究中主要采用有限元法进行数值模拟。有限元法的特点是将求解域离散为一组有限个形状简单且仅在节点上相互连接的单元的几何体，在每一个单元内满足一定要求的差值函数描述基本未知量在其中的分布^[9]，随着单元尺寸的缩小，近似的数值解将越来越逼近精确解。有限元法适应任意复杂的和变动的边界^[10]。

应当注意的是，有限元分析是针对原问题的离散化模型进行的，分析结果的精确程度与模型反映原问题的准确性密切相关。力学模型的优劣取决于分析人员的知识和经验。在建模中要针对求解目的，正确地选择单元类型和材料模型，获取和输入尽可能准确的材料参数，将原问题的各种约束条件转化为合适的边界条件^[11]。

在工件上的单元可能发生很大的塑性变形，而回弹的影响较小，所以多采用刚塑性有限元进行分析。当然，对有限元分析方法的选择不是一成不变的，而要根据问题本身的特点和分析和决定的^[12]。

2.4 本研究意义

计算机数值模拟对实际生产中的产品开发设计，模具的设计制造具有十分重要的意义。采用模拟技术，能在锻件成型工艺设计和模具设计初步方案完成后立即对其进行检验，寻求可行的甚至最优的设计方案，然后再完成进行详细设计并制造进行模具制造。这样，在产品开发时，就能使得产品设计、工装模具设计和制造等相关工作同时展开，即实现并行工程，达到降低成本、提高质量、缩短产品交换期的目的^[13]。通过本次实验研究不但可以进一步掌握 Pro/ENGINEER 软件与 DEFORM 软件的使用方法，还可以利用 Pro/ENGINEER 强大的建模功能及 DEFORM 的强大计算功能对坯料锻压工艺进行完善，从而得到用微分方程边值问题来描述的具体锻件成型问题中工件和模具的速度场、应变场、应力场、温度场等，据此预测工件中组织、性能的变化以及可能出现的缺陷^[14]。

锻压是锻件锻造工艺中的重要工序，其意义在于通过锻压工序使其内部缺陷如气孔、裂纹等锻合，以达到高锻件质量的目的。从数值模拟的角度，借助 Pro/E 软件与 DEFORM 软件对坯料锻压过程实施数值模拟。寻求高温锻压锻件中心点区域拉应力消除的工艺条件，进而达到对生产实际中工艺参量的确定提供数值依据的目的。同时也为建立内部裂纹的锻合判据作必要的数值准备^[15]。

3 模拟对象及模拟方法

3.1 模拟对象

本次模拟的对象分别为圆柱体坯料的平砧锻压和加垫环锻压两种情况。平砧锻压过程中，上下模具均为平砧，设计为圆柱形平板即可。其直径 $\Phi 120\text{mm}$ 高度 20mm。锻压开始时，上模以一定速度向下运动，坯料开始变形，直到压下量达到要求时，上模停止运动，棒料被锻压。坯料出炉时要在空气中停留约 10 秒的时间，此时，工件会与周围环境发生热传递。另外，坯料放到下模上要停留大约 5 秒后才能开始锻压，此时，工件也会和周围环境发生热传递。因此，在考虑温度场影响坯料锻压过程数值模拟时，首先要对上述两个热传导过程进行模拟，以保证模拟结果的准确性。图 2.1 为平砧锻压过程中坯料与模具定位后的二维简图^[16]。图中的三个点是为在后续模拟结果分析所取的取样点。三点分别为上端面中心点、侧表面中心点和轴线中点。

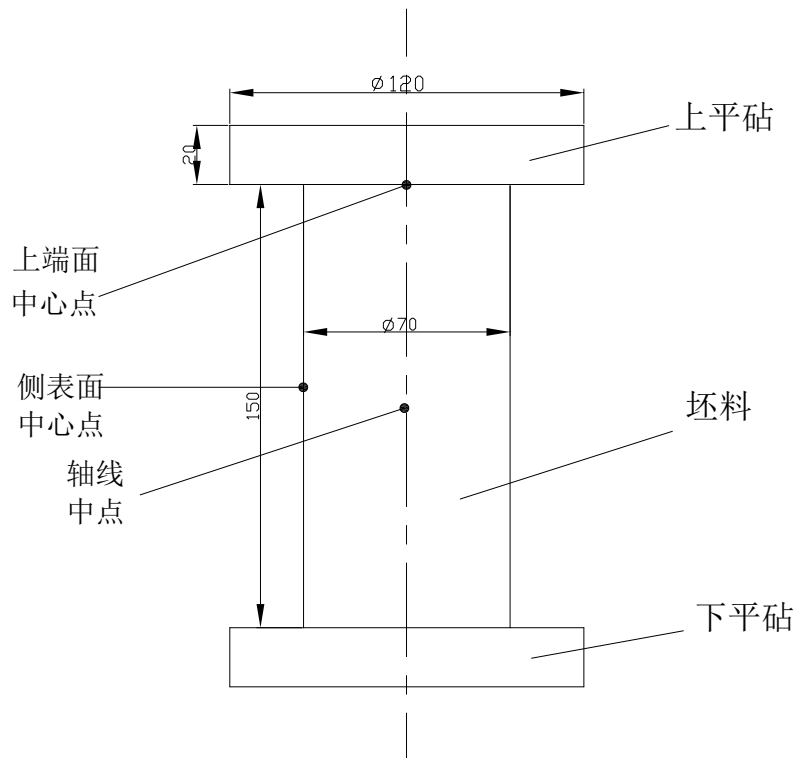


图 2.1 平砧锻压过程中坯料与模具的二维简图

加垫环锻压过程中，在圆柱体棒料与上、下模之间分别加上一个垫环，这种锻压的方法可用于锻造带有双边凸肩的饼类锻件。由于锻件凸肩和高度比较小，采用的坯料直径要大于环孔直径，因此，垫环锻压变形实质属于镦挤。垫环的外直径取 $\Phi 120\text{mm}$ ，内孔直径取 $\Phi 50\text{mm}$ ，圆角半径取 6mm ，高度取 15mm 。图 2.2 为加垫环锻压过程的工件与上下模及上下垫环定位后的二维剖面简图。图中的三个点是为在后续模拟结果分析所取的取样点。三点分别为上端面中心点、侧表面中心点和轴线中点。

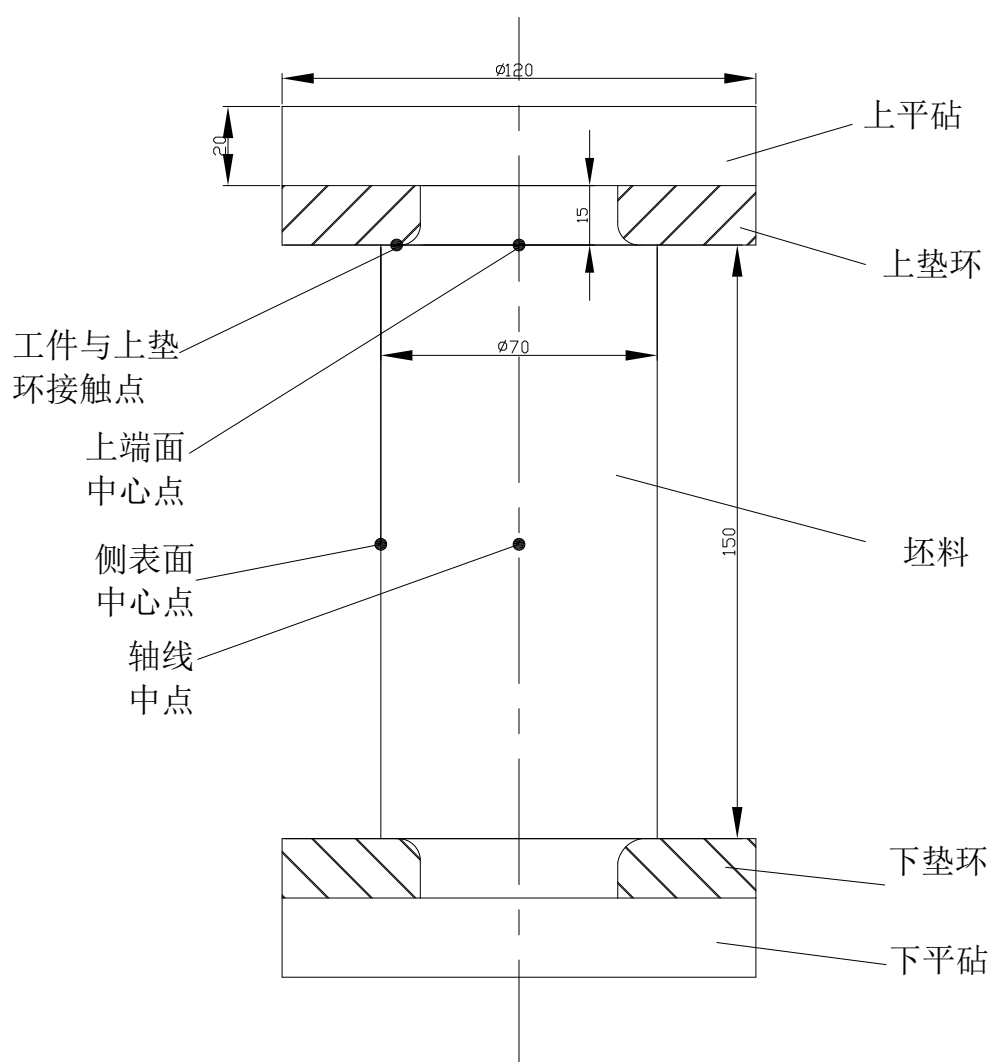


图 2.2 加垫环锻压过程的工件与上下模的二维剖面图

加垫环的锻压过程中，也要考虑温度场的影响，所以，也要先进行两步热传导过程的模拟再进行锻压过程的数值模拟。对锻压过程的模拟时，

上垫环与上模同时以相同速度向下运动，坯料上端开始变形，由金属向垫环内流动，由于垫环的下压，坯料整体开始变形，并且下端开始向下垫环内流动，直到达到压下量要求时，坯料变形停止，棒料被锻压，并产生双凸肩^[7]。

3.2 刚粘塑性有限元法的基本原理

在金属塑性成型过程中，对于大多数体积成型的问题，弹性变形量相对非弹性变形量来说很小，一般情况下是可以忽略不计的，也就是说可以将材料视为刚（粘）塑性材料。

3.2.1 刚粘塑性材料流动的基本方程

设变形体的体积为 V ，在 V 内给定体力 P_i ；表面积为 S ，在 S 内的一部分力面 S_t 上给定面力 q_i ，在 S 的另一部分速度面 S_v 上给定速度 v_i^0 ，则材料在流动过程中满足系列力学基本方程

1. 力平衡方程

$$\sigma_{ij,j} + p_i = 0 \quad (2.1)$$

2. 力边界条件 即在 S_t 上

$$\sigma_{ij,j} n_j = q_i \quad (2.2)$$

3. 几何方程

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (2.3)$$

4. 速度边界条件 即在 S_v 上

$$v_i = v_i^0 \quad (2.4)$$

5. 体积不可压缩方程

$$\varepsilon_v = \delta_{ij} \varepsilon_{ij} = 0 \quad (2.5)$$

6. 屈服准则

采用 Misers 屈服准则和等向强化模型，初始屈服准则为

$$\bar{\sigma} - \sigma_s = 0 \quad (2.6)$$

后续屈服条件，对于静态加载值考虑应变强化

$$\bar{\sigma} - K = 0, K = H(\int d\bar{\varepsilon}) \quad (2.7)$$

式中 H 可以由单向拉伸试验曲线确定。

对于粘塑性材料，加载时应考虑时间因素即变形速度的影响，瞬时屈服条件为

$$\bar{\sigma} - Y = 0, Y = Y(\epsilon, \dot{\epsilon}) \quad (2.8)$$

式中 Y 可以由一维动力试验确定。

通常我们把满足上述所有基本方程的应力场、应变率场、速度场成为真实应力场、应变率场、速度场。满足方程式 (2.1)、(2.2)、(2.6) 即满足应力平衡方程、应力边界条件和屈服条件的应力场成为静力许可应力场；满足 (2.3)、(2.4)、(2.5) 的速度场成为运动许可速度场^[18]。

3.3 在 Pre/ENGINEER 中建模

本次模拟选取圆柱形棒料为分析模型，另外，分别模拟了加垫环和不加垫环两种情况下的锻压过程，其上下模具均为平砧。在 Pro/ENGINEER 软件中做出后模型保存副本为 STL 格式，以便其可以导入 DEFORM 软件中。

3.3.1 圆柱形棒料的建模

圆柱形棒料的建模在 Pro/ENGINEER 软件中很容易实现，即在零件模块中的拉伸特征中进入草绘界面，选取参照后画出圆柱的截面圆形，输入直径值并退出草绘界面，在拉伸高度栏内输入圆柱棒料高度值，完成拉伸特征。图 2.3 为 Pro/E 建立的圆柱形棒料模型。

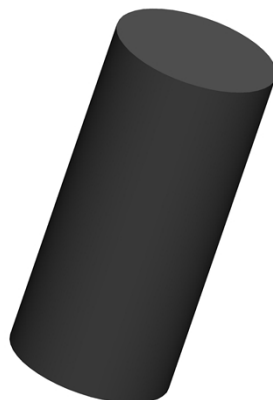


图 2.3 圆柱形棒料模型

3.3.2 上下砧的建模

本次模拟选用的上下砧均为平砧，设计为圆柱形平板即可，直径 $\Phi 100\text{mm}$ 、厚度为 30mm ，图 2.4 为在 Pro/ENGINEER 建立的模型。

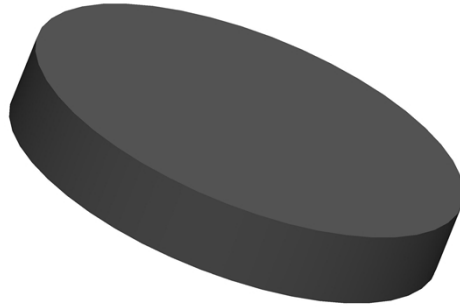


图 2.4 上、下平砧模型

3.3.3 垫环的设计和建模

加垫环锻压模拟过程的关键在于垫环的形状、尺寸设计的合理性。由于锻件的凸肩和高度比较小，采用的坯料直径要略大于垫环直径，因此，垫环锻压变形实质属于镦挤。在本次模拟中，上、下垫环是相同的。为使金属流动容易，垫环与棒料接触处应有过度圆角，本例取 $R6\text{mm}$ 。图 2.5、2.6 为在 Pro/ENGINEER 建立的上、下垫环模型（为观察方便取其四分之一）^[19-28]。

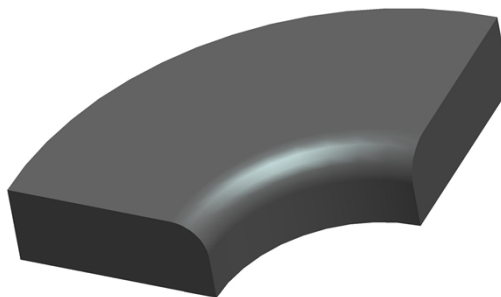


图 2.5 上垫环模型

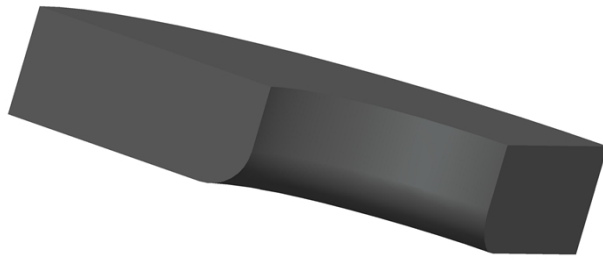


图 2.6 下垫环模型

3.4 利用 DEFORM5.03 模拟锻压过程

在材料成型、热处理和机械加工领域中，采用有限元方法开发和设计模具、刀具的产品已达 70% 以上，有限元分析已成塑性加工中广泛使用的工具。20 世纪 70 年代后期位于美国加州伯克利的加利福尼亚大学小林研究所在美国军方的支持下开发出了有限元软件 ALPID，1990 年在此基础上开发出 DEFORM-2D 软件。该软件的开发者的独立出来成立了 SFTC 公司，并推出了 DEFORM-3D 软件，DEFORM-3D 是集成了原材料、成型、热处理和机加工的软件。

DEFORM-3D 是模拟 3D 材料流动的理想工具。它不仅鲁棒性好，而且易于使用。DEFORM-3D 强大的模拟引擎能够分析金属成型过程中多个关联对象耦合作用的大变形和热特性。系统中集成了在任何必要时能够自行出发自动网格重划生成器，生成优化的网格系统。在要求精度较高的区域，可以划分较细密的网格，从而降低问题的运算规模，并显著提高计算效率。典型的 DEFORM-3D 应用包括锻造，墩头、挤压、轧制、自由锻、弯曲和其他成型加工手段。

3.4.1 模拟对象的简化

圆柱形棒料属于旋转对称，锻造中经常遇到这样的零件，对模拟来讲，只要可能，应尽量利用问题的对称性，这可节省计算时间，提高解题精度。DEFORM-3D 可创建作为一新对象的刚性面来定义辅助对称平面，并约束所有的对称面节点仅能在该平面上运动。这样，对于对称体来讲，模拟其成型过程，就可以取整体的 1/2、1/4、1/8 或者更小的体积来模拟真实情况。本例中选用圆柱形棒料的 1/4 模型进行分析，如图 2.7。

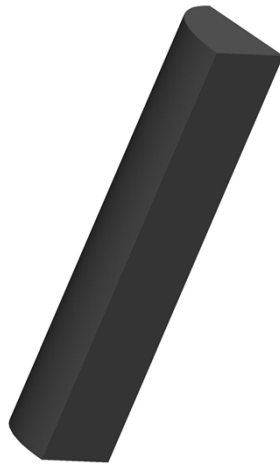


图 2.7 圆柱形棒料的 1/4 模型

3.4.2 模拟材料的选取

本次模拟中选用的坯料材料为 40Cr, 该材料为合金结构钢, 在美制钢牌号中的表示方法为 AISI-5140^[29]。工件的力学性能在表 2.1 中给出。该材料的应力-应变关系曲线见图 2.8。

表 2.1 工件的力学性能参数

变量	值
热传导率 $\lambda/W \cdot (m \cdot ^\circ C)$	35.5
热容 $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$	611
工件与模具间的传热系数 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$	11
环境对流系数	0.02
发射率	0.2
弹性模量(GPa)	2.1
泊松比	0.3

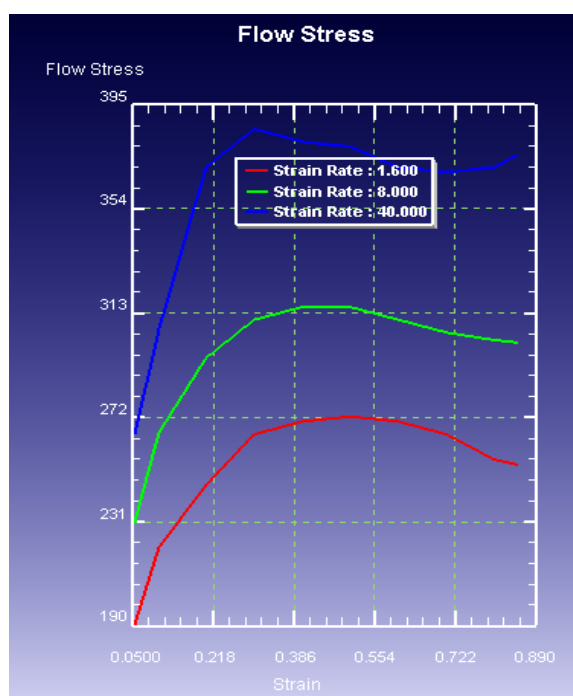


图 2.8 40Cr 应力-应变关系曲线

3.4.3 不考虑温度场的坯料锻压过程数值模拟

在不考虑温度场影响的情况下对坯料锻压过程做一个简单的模拟。分析坯料在无温度、摩擦因素影响情况下的应力、应变分布情况。并以此来熟悉 DEFORM-3D 软件的模拟类型设定、输入对象数据、模拟控制设定、对象关系设定、生成数据库和模拟后处理等功能。

在此模拟中，选用的材料为 40Cr，物体的初始温度为室温 20℃，上模的下移速度设为 20mm/s，方向为 (0, 0, -1)，下模是固定的，上、下模间的圆柱形棒料，在上模向下的移动过程中被锻压。设定模拟步数为 20，这意味着模拟计算未被中止，整个过程将分 20 步完成。设上模具为主模具。将圆柱形棒料、上模、下模分别作为模拟对象输入后，对棒料进行划分网格，此例接受系统默认值即可，网格数为 5000。利用 DEFORM 软件的测量工具来测量网格单元尺寸，我们可以用最短单元尺寸的 1/3 来去定模拟计算步长。接下来设定对象间关系，最后一步为生成数据库文件。FEM 引擎利用该数据库文件来储存该问题的有限元解算数据。以上为模拟过程的前处理阶段，退出前处理后进行模拟计算。计算结束后，可进入后处理模块进行锻压过程的分析。

3.4.4 考虑温度场影响的坯料锻压过程数值模拟

在锻压过程中存在热传到现象，为了准确地模拟其成型过程不仅要模拟锻造过程，也要模拟任何热传到过程，其整个模拟过程可分为三个阶段进行模拟。

第一个模拟过程是，工件出炉后到下垫环上与 10 秒的时间间隔，在这 10 秒内，工件与外界环境由热传导现象。因此，这个模拟过程仅是一个热传导模拟。

第二个模拟过程是，工件在锻压之前，在下垫环上要停留 5 秒。在这个过程中也发生热传导现象。第三个模拟过程是锻压过程。

工件与外界的热传导模拟

在 FEM 的前处理窗口选择模拟控制设定按钮，设定单位制为国际单位制（整个模拟过程中均为国际单位制），由于工件与外界环境的热传导仅是一个热传导分析，所以要选中热传导按钮，关闭变形按钮。模拟步定义与时间有关而与模具无关。因此，模拟总步取 50 步，相应的每步就为 0.2 秒。第一模拟过程中，工件从加热炉中取出的温度大约为 1100℃。在第一模拟过程中仅有工件与外界环境发生热传递，因此对工件要进行网格划分，图 2.9 为划分网格后的工件。

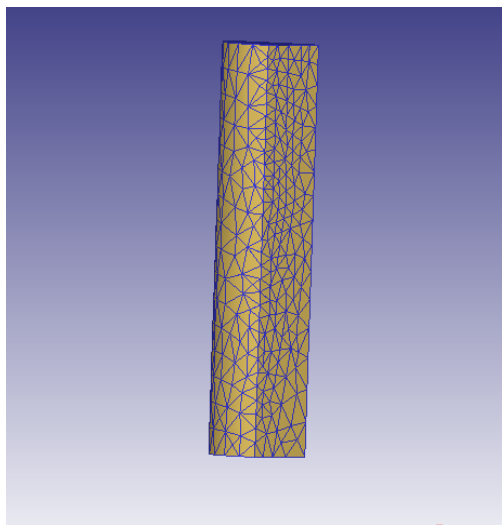


图 2.9 划分网格后的工件

对于第一模拟过程，只需对工件设定传热边界条件，变形边界条件和模具的传热边界条件待下几个模拟过程需要时再设定。

给工件加载材料时，由于 FEM 软件的材料库中的材料表示方法为美制的，需要查找中美钢牌号对照表。其中 40Cr 的美制表示方法为 AISI-5140。打开材料库，为工件加载材料。

接下来保存模拟文件生成数据库，退出前处理窗口，打开运算菜单，向 FEM 运算器提交计算任务。

当模拟任务结束后，进入后处理，选取温度作为分析对象。选取第 1 和第 50 步时，工件上的温度分布情况，如图 2.10 所示。

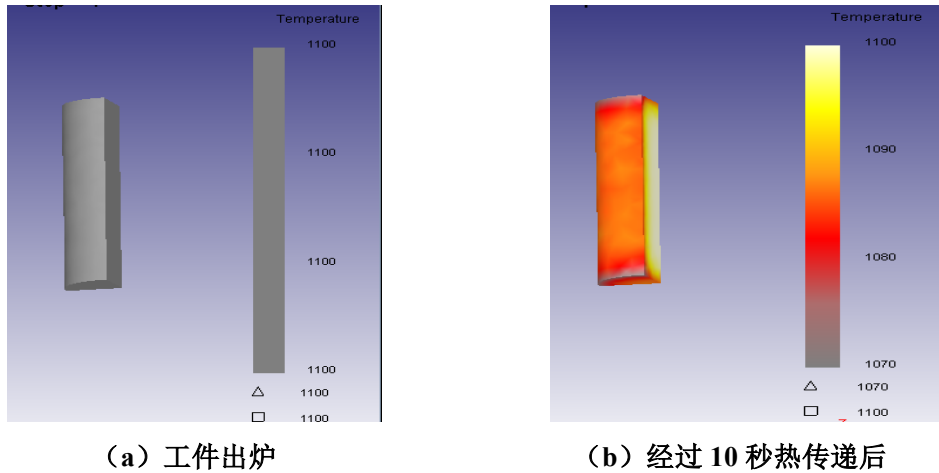


图 2.10 工件出炉后发生热传导前后的温度分布情况

1. 工件与下模的热传递模拟

上一节模拟了工件与环境之间的热传递，由于工件发生了热损失，所以温度有所降低。本节模拟的是工件在锻压前，要在下模上停留 5 秒的热传递过程。上节模拟的最后一个序列步将被调入本节模拟的前处理中。

此模拟过程中，由于工件与下模间有接触，所以工件与模具的热传递必须考虑。由此下模的温度也需设定。

首先，对下模进行网格划分和边界条件设定。下模的参考温度与截止温度分别为 20℃ 和 400℃。温度设定完毕后划分网格，此网格划分的方式选择相对划分网格方式接受系统默认值即可。待网格划分完毕后，设定边界条件。下模的边界为顶面、底面和外圆柱面。上模的设定与上述条件相同。

接下来为模具加载材料，打开 FEM 材料库，选取 AISI-H-13 为模具材料。此材料为工具钢，是一种常用的模具材料。

下模与工件之间是接触关系，本例中只涉及传热问题，不涉及摩擦问题，因此只设定它们之间的传热系数。在传热系数栏内选择常数系数，此系数为 1，设定完对象关系后，就可以设定接触容差值，此例的接触容差值为 0.123。

在模拟控制设定时，仅选中热传导选项，工件与下垫环的热传导时间共为 2s。因此，模拟总步数取 10 步，相应的每步就为 0.5s。信息设定完毕后，保存项目文件生成数据库进行模拟计算。

当模拟任务结束后，进入后处理。选取应力、应变及温度为分析对象。

2. 锻压过程的模拟

前面两个模拟过程是关于工件在环境中和接触下模的热损失问题。下面的模拟将进入坯料的锻压过程。锻压过程的模拟总步数的确定与工件的最小网格和上模压下量有关。此模拟的上模压下量为 75mm，每步压下量取 3mm。知道了计算步长，则用上模的总压下量除以计算步长得到总模拟步数，经计算总模拟步数为 25 步。

首先，需要模具与工件接触，在第二热传导模拟过程中工件与下模已定位好，所以采取移动上模的定位方式来定位。前两个模拟过程已经定义了热传递边界条件，所以此模拟过程不再定义。此模拟过程涉及工件的变形。因此，所有的变形边界条件都应该被定义。

其次，对下模对称面进行定义。由于下模是刚体，它的对称面设定就与变形体不同。变形体的对称面是定义在网格划分的基础上，而刚体的对称面是定义在几何形状上的。最后，定义上模的对称面，其设定方法同上。

接下来定义模具的运动，上模的运动方向和运动速度均为-Z 轴，运动速度为 15 mm/s。再次定义对象间关系，锻压过程涉及工件的变形，因此需要设定工件与模具间的摩擦系数。同时，前面定义的热传递信息也需要修改，由原来的自由接触传热系数改为成型传热系数。摩擦系数的定义选取热成型类型，则系统默认的摩擦系数为 0.3。接着，在传热系数的设定中，选取成型选项，则系统默认的传热系数为 1。然后设定接触容差值，本例的接触容差值为 0.123mm。

信息设定完毕后，保存文件，生成数据库进行模拟计算。当模拟任务结束后，进入后处理窗口。对锻压过程中的温度、应力、应变进行分析。

3.4.5 加垫环的锻压过程数值模拟

在加垫环的锻压过程中同样存在热传到现象，为了准确地模拟其成型过程不仅要模拟锻造过程，也要模拟任何热传导过程。其整个模拟过程同样分为三个阶段进行模拟。第一步的具体做法与 2.2.3 中的相同，在此不再赘述。其中较上例多出的上下垫环，其边界条件及温度的设定均与上下模相同。主要的不同点在第三步的锻压过程的模拟。

在 FEM 中划分网格的方式有两种，一种是相对划分网格方式，一种是绝对划分网格方式。相对网格划分方式，使用相对网格设置方式，用户仅需指定固体单元的数量，无论物体的形状多么复杂，单元的数量必须恒定。绝对网格划分方式，使用绝对网格设置方式，系统决定网格划分的总数，随着物体形状的复杂，单元的数量也随之增加。不论相对网格方式还是绝对网格划分方式，两者都依靠划分网格权重来分配物体上各部分的单元大小。相对网格划分方式是系统默认设定，用绝对网格划分方式目的在于增加模拟的正确性，这是因为网格尺寸经设定后自始至终不变。随着物体形状越来越复杂，单元数量的增加可以更好地描述物体的表面[19]。

本例对工件使用绝对网格划分方式，为了决定网格划分的最小尺寸，需要通过测量模具的最小特征尺寸，这个最小特征必须满足的条件是成型过程中它的形状会反应在工件上，也就是说由工件材料要流过此特征。最小特征的选取是指整个模拟过程的最小特征。发现本例中下垫环的过度圆角最小。其圆角半径值为 6mm，金属要很好的流过此圆角，工件单元尺寸必须小于这个值的一般 3mm，才能达到工件上的网格很好地流过此处。本例，3mm 为工件划分网格的最小绝对尺寸。图 2.11 为工件及模具划分网格后的三维结构图。

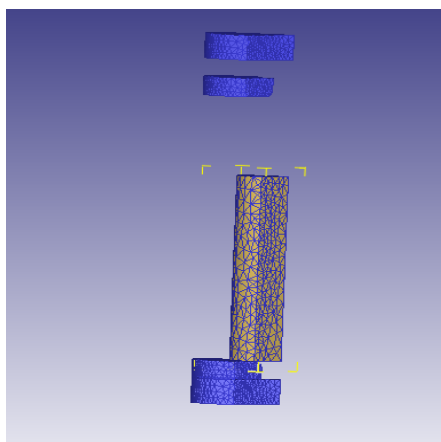


图 2.11 工件及模具划分网格后的三维结构图

前面两个模拟过程是关于工件在环境中和接触下垫环的热损失问题。下面的模拟将进入坯料的锻压过程。锻压过程的模拟总步数的确定与工件的最小网格和上模压下量有关。此模拟的上模压下量为 100mm，工件的最小网格平均尺寸为 3mm，故取最小网格尺寸的 1/3 做为计算步长。知道了计算步长，则用上模的总压下量除以计算步长得到总模拟步数，经计算总模拟步数为 100 步。

首先，需要模具与工件接触，在第二热传导模拟过程中工件与下模和下垫环已定位好，所以采取移动上模的定位方式来定位。前两个模拟过程已经定义了热传递边界条件，所以此模拟过程不再定义。此模拟过程涉及工件的变形。因此，所有的

变形边界条件都应该被定义。

其次，对下模和下垫环的对称面进行定义。由于下模和下垫环是刚体，它的对称面设定就与变形体不同。变形体的对称面是定义在网格划分的基础上，而刚体的对称面是定义在几何形状上的。

最后，定义上模和上垫环的对称面，其设定方法同上。

接下来定义模具的运动。由于上垫环与上模必须同时下压，所以上模和上垫环的运动方向和运动速度均为-Z轴，运动速度为15mm/s。

在此定义对象间关系，锻压过程涉及工件的变形，因此需要设定工件与模具间的摩擦系数。同时，前面定义的热传递信息也需要修改，由原来的自由接触传热系数改为成型传热系数。摩擦系数的定义选取热成型类型，则系统默认的摩擦系数为0.3。接着，在传热系数的设定中，选取成型选项，则系统默认的传热系数为11。然后设定接触容差值，本例的接触容差值为0.106mm。

信息设定完毕后，保存文件，生成数据库进行模拟计算。当模拟任务结束后，进入后处理窗口。对锻压过程中的温度、应力、应变进行分析。

4 模拟结果分析

按照第 2 章所介绍的模拟方法，对加垫环和不加垫环的坯料锻压过程的温度场、应力/应变场的分布进行了数值分析，其中不加垫环锻压过程的数值模拟中，模拟过程分别按考虑温度场和不考虑温度场两种情况进行。

4.1 不加垫环的坯料锻压过程数值模拟结果

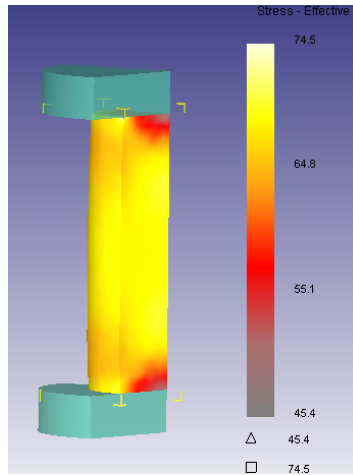
不加垫环的坯料锻压过程是在上下平砧间进行的，下模固定不动，工件安放在下模上，通过上模的向下移动压在工件上，使工件发生变形。本次模拟分考虑温度场和不考虑温度场两种情况，对坯料的锻压过程中的工件应力场、应变场和温度场分布进行分析。

4.1.1 不考虑温度场的坯料锻压过程模拟结果

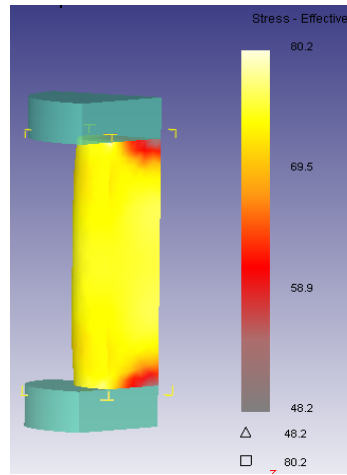
本节模拟过程中不考虑温度场及摩擦在锻压过程中对坯料变形的影响，可根据从 FEM 后处理软件中提取的图表、曲线及数据对锻压过程中的温度场、等效应力、等效应变进行数值分析^[30]。

图 3.1 为锻压过程中，在不同压下量时，工件上等效力分布情况。根据图示的模拟结果，在锻压过程中，坯料与砧座接触端触面上，等效应力较小的区域在心部，等效应力在接触面的边缘部位的值较大。沿坯料的轴向，中部的等效应力较大，两端的等效应力较小。

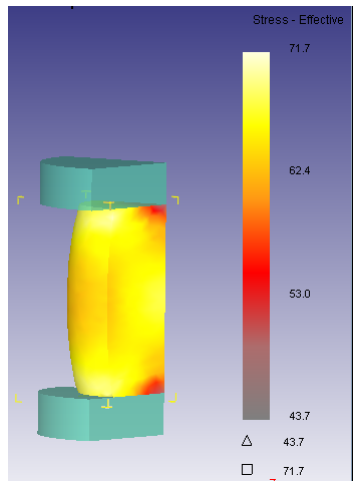
图 3.2 为锻压过程中，在不同压下量时，工件上等效应变分布情况。根据图示的模拟结果，在锻压过程中，坯料与砧座接触端触面上，等效应变较小的区域在心部，等效应变在接触面的边缘部位的值较大。沿坯料的轴向，中部的等效应变较大，两端的等效应变较小。



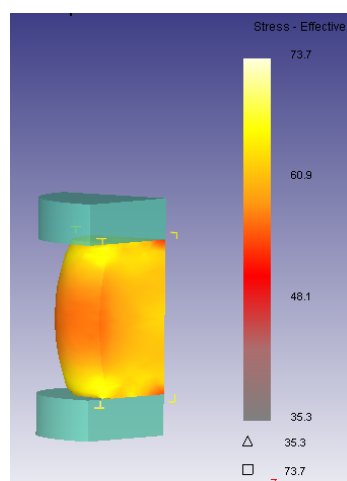
(a) 压下量 10mm



(b) 压下量 30mm

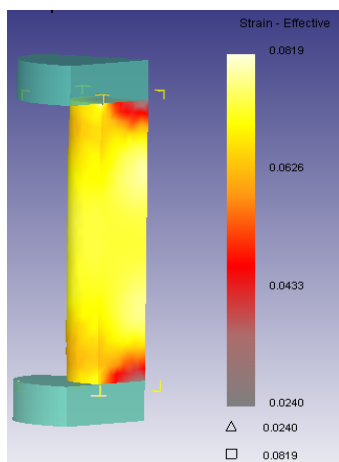


(c) 压下量 60mm

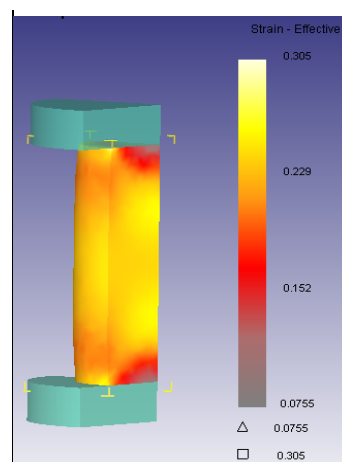


(d) 压下量 75mm

图 3.1 不同压下量时等效应力分布



(a) 压下量 10mm



(b) 压下量 30mm

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/458137117076006051>