



成绩

# 中国农业大学

## 课程论文

(2022-2023 学年春季学期)

论文题目：基于 ABAQUS 的轧铝模型中材料间  
摩擦系数对轧制结果影响的有限元分析

课程名称： 大型软件应用

任课教师： 张亮亮

班 级： 工力 201

学 号： 2020310020119

姓 名： 张家瑞



# 基于 ABAQUS 的轧铝模型中材料间摩擦系数对轧制结果影响的有限元分析

**摘要:** 轧制模型作为一种工业上常见的模型, 研究其摩擦参数对轧制结果影响等有着重要的意义。在本文中, 我们利用 ABAQUS 软件, 通过有限元法, 利用显式动力学分析, 研究了轧铝模型中材料间摩擦系数与被轧制材料的厚度、残余应力、轧辊转动角度的关系, 并给出了关系曲线, 并且考虑了上下轧辊非对称时的情况, 对于工业应用中调整合适的摩擦系数等有着潜在的应用价值。

**关键词:** 轧铝模型, 摩擦系数, 有限元分析, 显式动力学

## 1 题目背景及意义

轧制是一种金属加工工艺, 指的是将金属坯料通过一对旋转轧辊的间隙, 因受轧辊的压缩使材料截面减小, 长度增加的压力加工方法, 在工业领域中有着非常多的应用。而在轧制时, 轧制的温度、上下轧辊的滚速, 轧辊与材料间的摩擦系数、轧制线高度、轧辊的偏移、轧辊径的大小等对整个轧制过程有着很大的影响。

摩擦系数作为其中一个重要的影响参数, 并且几乎所有工艺参数 (轧制温度、金属性质、压下制度、润滑剂等) 和设备参数 (辊径、辊面光洁度、轧机速度等) 的变化都会影响变形区内摩擦状况的改变, 从而引起摩擦系数变化, 而摩擦系数的变化将导致轧制生产所需力能参数 (轧制压力、力矩)、轧件最小厚度、产品质量等发生变化。此外, 对变形区摩擦系数变化规律的研究还关系到能源节约、设备设计和使用以及计算机有效控制等重要问题<sup>[1]</sup>。因此有必要研究轧制后被轧制材料的厚度、残余应力、轧辊转动角度等参数与摩擦因数的关系。

在本文中考虑的模型为以大型软件应用习题 3.9 为基本模型, 如图 1 所示。

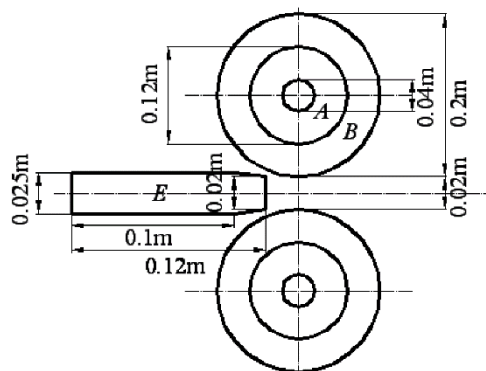


图 1 轧制模型

考虑该模型为平面应力模型, 厚度统一为 0.02m。被轧制材料:  $E = 70GPa$ ,  $\nu = 0.33$ ,  $\sigma_{s1} = 150MPa$ ,  $E_t = 3.5GPa$ 。轧辊轴和轧辊材料:  $E = 210GPa$ ,  $\nu = 0.28$ 。图中圆环 A、C 为轧辊轴截面, 在轧制过程中固定; 圆环 B、D 为轧辊截面, 在轧制过程中转动, 内圆和轧辊轴

外圆接触，无摩擦可有限滑动； $E$  为被轧制材料，在轧制过程中  $x$  方向向右移动，轧辊外圆与被轧制材料接触。

## 2 建模及模拟计算过程

### 2.1 模型建立

为了后续研究上下接触面不对称因素对轧制过程的影响<sup>[2]</sup>，因此，在本模型中，我们不采用建立一半模型的方式。整个模型建立如图 2 所示。

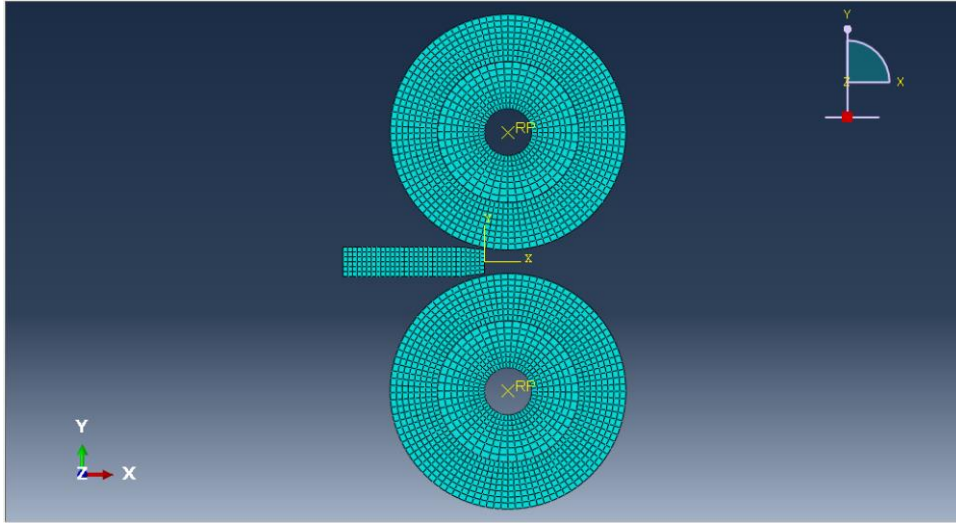


图 2 有限元分析模型

### 2.2 计算过程

整个过程分为三大部分：前处理、加载与求解、查看结果。下面是 ABAQUS 建模与计算过程中的逐步介绍。

#### 1、部件

在这里，我们考虑二维模型，用二维的壳单元建立模型。根据模型要求，建立三部分模型：铝条、轧辊、轧辊轴。

创建部件，（自动）分别命名为 Part-1、Part-2、Part-3。

2D Planar, Deformable, Shell，图形范围选为 0.2(m)，利用折现或圆绘制出三个模型。在这里，为了方便后续移动圆环结构，可以通过工具栏中 Tools 中的 Reference Points 建立参考点。

完成 Done。

#### 2、性质

创建材料：根据铝、轧辊和轧辊轴的材料分别建立。在铝材料中，需要建立弹性与塑性参数，而轧辊和轧辊轴只需建立弹性参数，其中需要注意在 ABAQUS 中输入塑性参数时的格式。

创建截面：建立截面，类型选择 Solid，厚度为 0.02m。注意建立两种截面，分别赋予不

同的材料参数。

将两种截面的性质附加到对应的部件上。

### 3、组装

创建计算实体，选择 **Parts**，注意由于有两个轧辊和轧辊轴，需要生成两次轧辊和轧辊轴模型。之后将其分别移动到对应位置。注意，由于需要建立轧辊和轧辊轴的接触对，因此可以先不将轧辊和轧辊轴放在一起，先错开一定距离，在后续建立好接触后再移动到对应的位置。

### 4、分析步

创建分析步，命名为 **Step-1**，类型 **General**，算法 **Dynamic Explicit**，非线性开关打开，做几何非线性计算。之后我们可以在场输出和历史输出中，调整一下输出频率，这样让最终输出动画的帧率更高。

### 5、接触

创建相互作用属性，由于轧辊与铝之间是有摩擦，而轧辊与轧辊轴之间是无摩擦可有限滑动，因此需要建立两种相互作用属性，而在考虑上下非对称因素时，则需建立三种相互作用属性，其中设立摩擦系数为：**Tangential Behavior** 中摩擦设置为 **Penalty**，输入所需要的摩擦因数即可。

创建接触对，选在 **Initial** 步中，选择面面接触，注意轧辊与铝接触中，轧辊为主面，铝上、下表面为从面。轧辊与轧辊轴接触中，轧辊内圆为主面，轧辊轴为从面。

最后回到组装，移回轴。

### 6、载荷

约束轧辊轴内圆的  $u_1$ 、 $u_2$ 。为了让铝更好的进入轧辊中，在 **Initial** 中给铝一个预速度，水平向右  $2\text{m/s}$ ，在 **Step-1** 中给铝的最右边位移边界条件，来实现铝条进入轧辊。

### 7、网格

对 **Part-1**、**Part-2**、**Part-3** 分别进行，在这里根据情况选取撒种子的间距，利用四边形单元，划分网格。注意在轧辊和轧辊轴划分网格的时候，为了划出的网格更加规整，在 **Mesh Controls** 中调整 **Algorithm** 为 **Medial axis**。在画好网格后，需要对每一个 **Part** 设置单元类型，选用显式计算。

### 8、建立项目

在这里，为了加快运算速度，可在 **Parallelization** 中设置多线程运算。在分析步中也可以利用 **Mass scaling** 加快运算，但在这里不推荐使用这个，因为该问题是平面问题，单元较少。

### 9、观察结果

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 对称情况下不同摩擦系数的影响

我们考虑了摩擦系数从 0 到 0.8 共 9 种情况，给出了不同情况下，在铝出轧辊时候的 **Mises** 应力云图，以及铝最左端上下两点处的位移随时间变化情况。

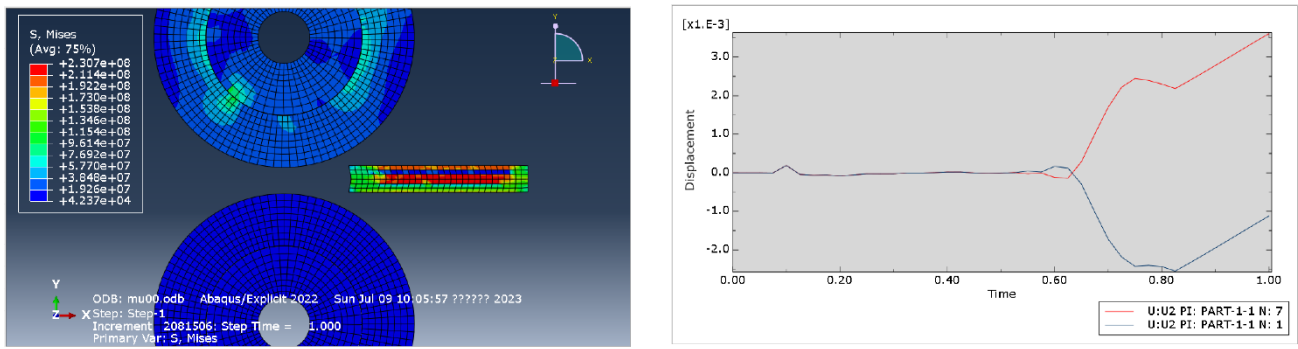


图 3 摩擦因数 0 对应的应力云图及上下表面位移图

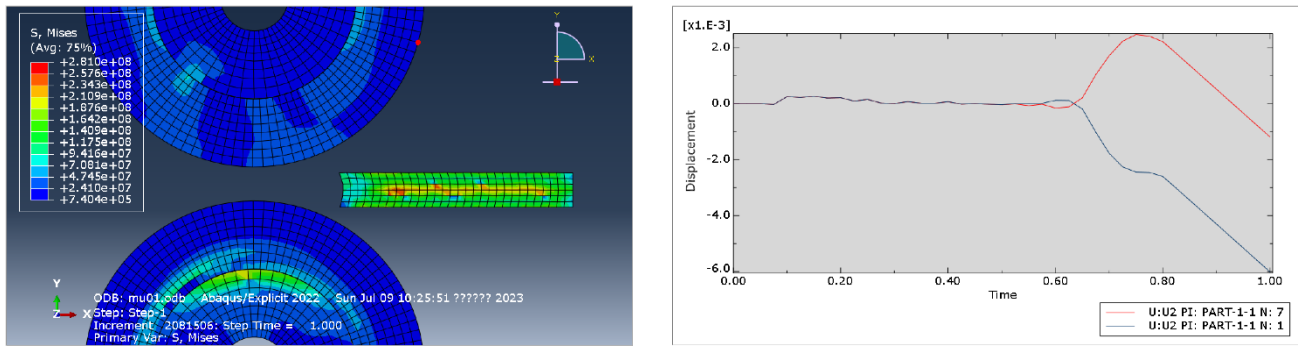


图 4 摩擦因数 0.1 对应的应力云图及上下表面位移图

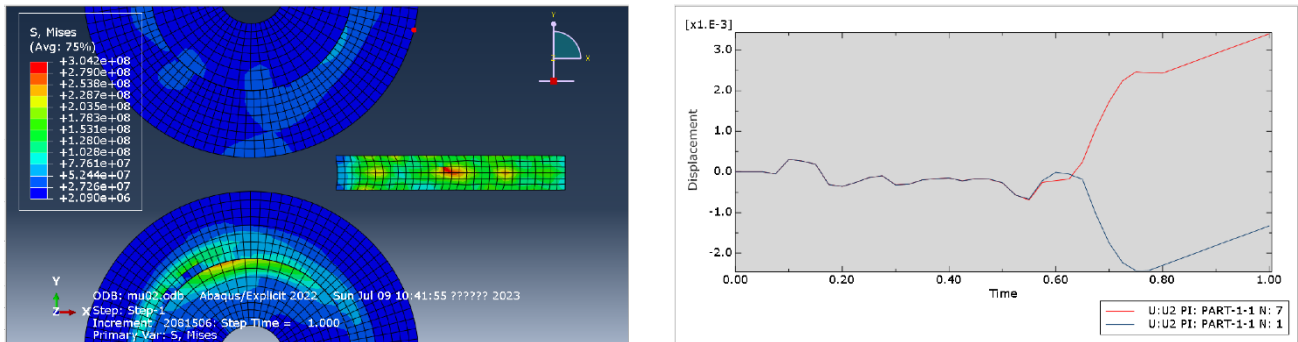


图 5 摩擦因数 0.2 对应的应力云图及上下表面位移图

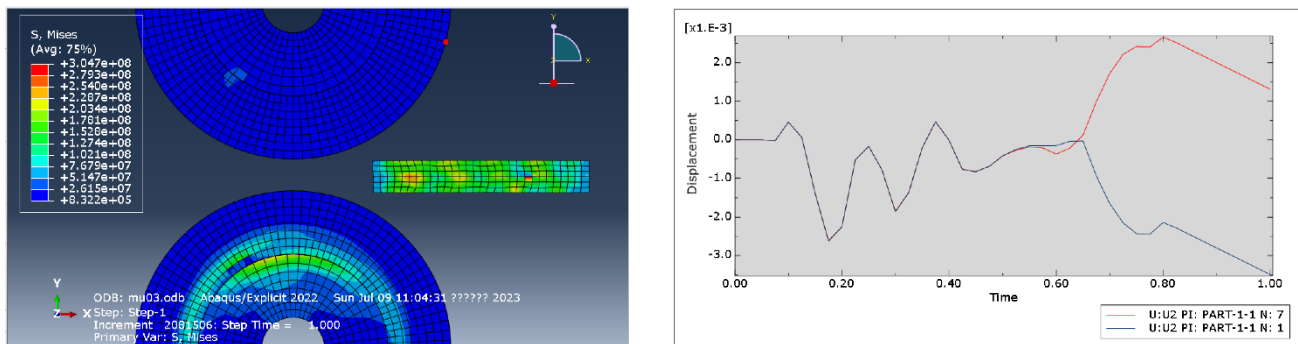


图 6 摩擦因数 0.3 对应的应力云图及上下表面位移图

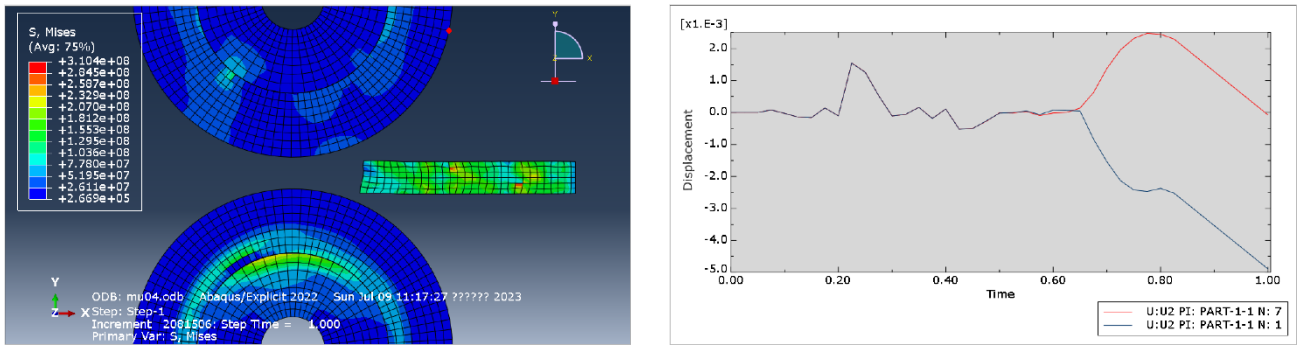


图 7 摩擦因数 0.4 对应的应力云图及上下表面位移图

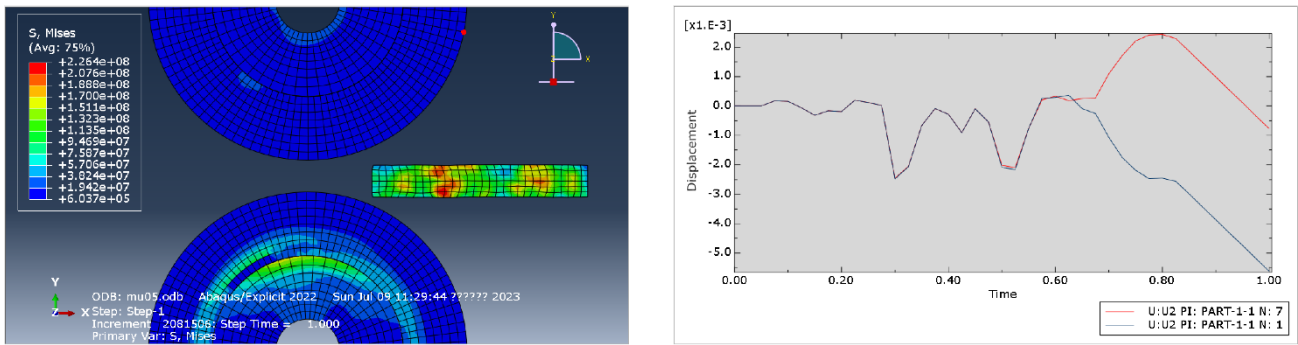


图 8 摩擦因数 0.5 对应的应力云图及上下表面位移图

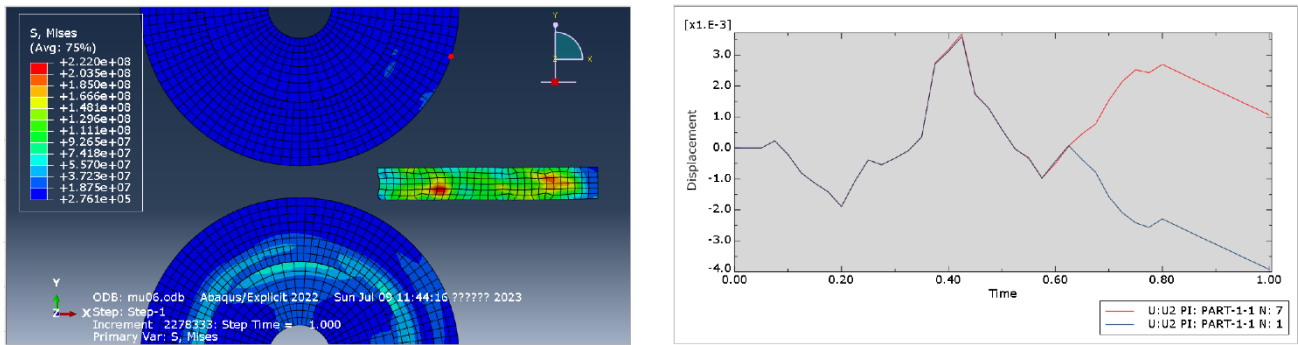


图 9 摩擦因数 0.6 对应的应力云图及上下表面位移图

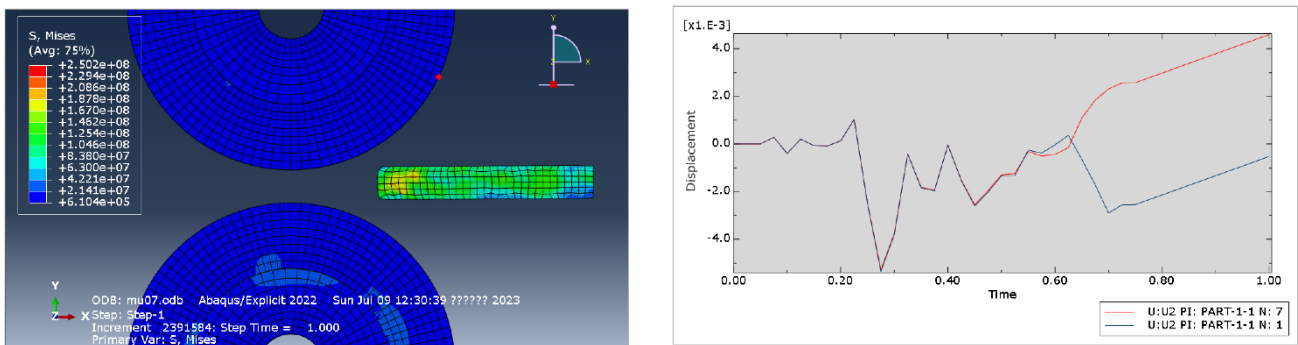


图 10 摩擦因数 0.7 对应的应力云图及上下表面位移图

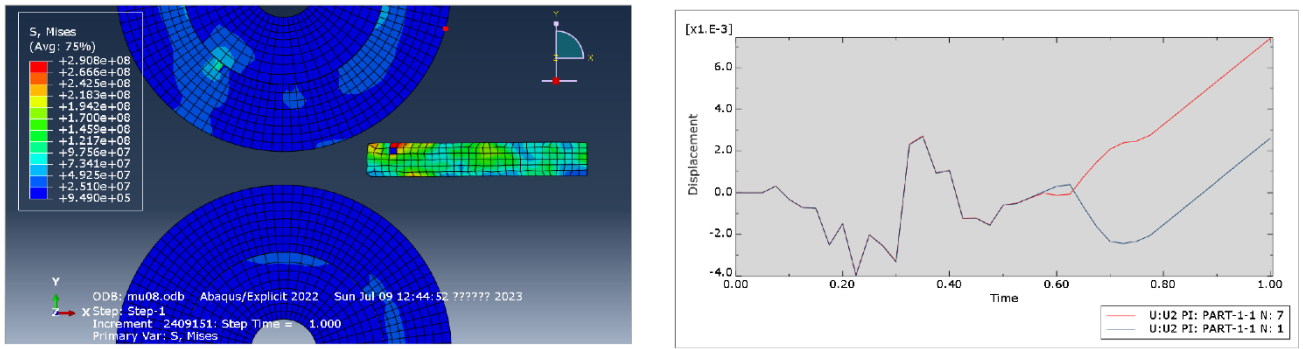


图 11 摩擦因数 0.8 对应的应力云图及上下表面位移图

为了方便表述轧辊转动的角度，图中红点即为上轧辊在初始时种最下面的点。对于上述的 9 种情况，我们发现对于不同摩擦参数下，最大残余应力、轧后厚度等都不同。

### 3.2 结果分析

我们将上一节种的结果进行整理，分别得到轧制后残余应力、被轧制材料的厚度、轧辊转动角度等参数与摩擦系数的关系曲线。分别如图 12、13、14 所示。

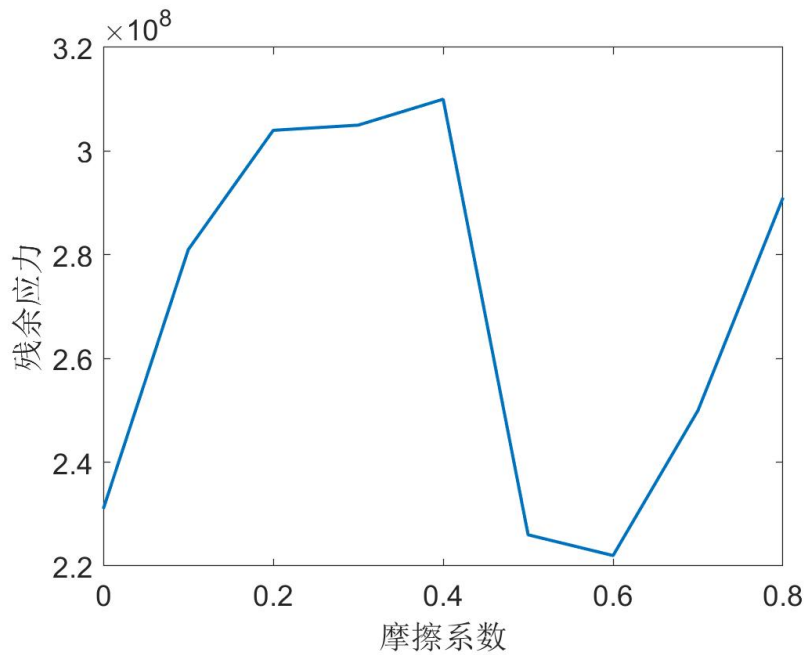


图 12 铝条中最大残余应力与摩擦系数关系曲线

我们发现，随着摩擦系数的增加，铝条中残余应力先增加后减小再增加。因此，为了尽可能减少其残余应力<sup>[3]</sup>，我们可以调整轧辊与铝条的接触摩擦系数在 0.5 到 0.7 之间，来取得一个最小的残余应力。

接下来查看铝条轧制后厚度与摩擦系数的关系。



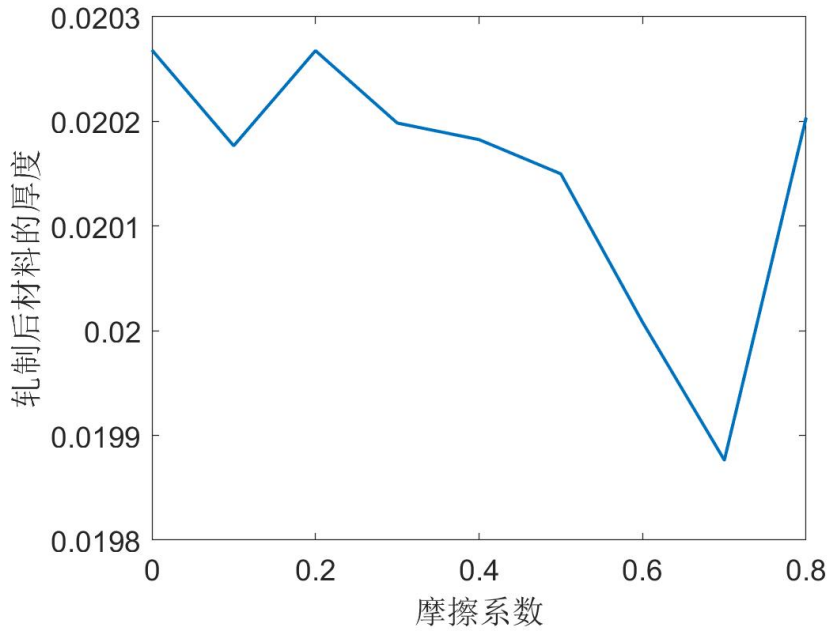


图 13 铝条轧制后厚度与摩擦系数关系曲线

我们发现，随着摩擦系数的增加，铝条轧制后厚度先减小后增加，由于轧制过程中，铝达到了塑性变形强度，在约束去除后，铝条厚度会发生一定的回弹，因此其厚度普遍是大于 0.02m 的，为了取得理想的轧制厚度，我们可以调整摩擦系数在 0.6 到 0.8 之间。

接下来查看铝条轧制后轧辊转动角度与摩擦系数的关系。

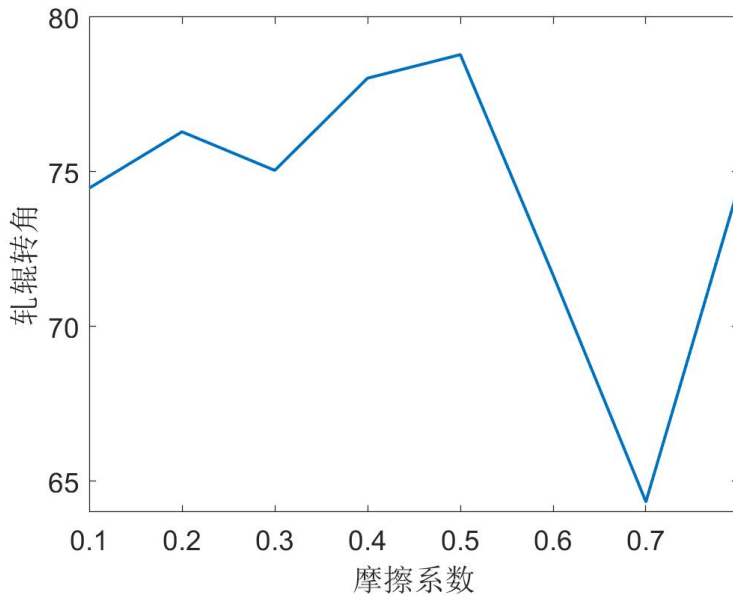


图 14 轧制后轧辊转动角度与摩擦系数的关系

当假设轧辊与杂铝条不发生打滑时，由于铝条长度为 0.12m，轧辊半径为 0.1m，我们可以得到此时轧辊的理想转动角度为 68.75 度，我们可以发现，随着摩擦系数的增加，轧辊转动角度先增加后减小再增加。

### 3.3 非对称情况的考虑

在得到上述结果后，我们考虑一种摩擦系数非对称情况，即上下轮毂和铝条的摩擦系数不同的情况，即摩擦因数上表面 0.6，下表面 0.2。结果如图 15 所示。

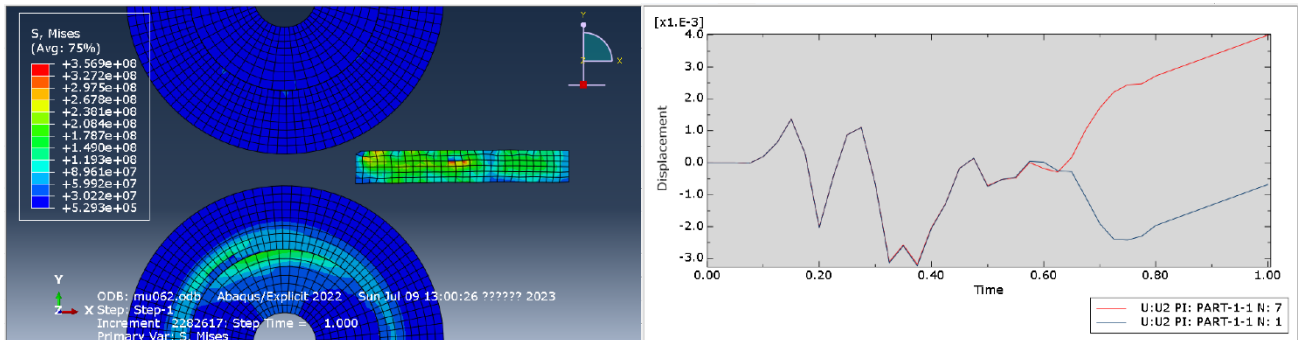


图 15 摩擦因数上表面 0.6，下表面 0.2 对应的应力云图及上下表面位移图

我们发现此时的残余应力和轧制后的铝条厚度相较于对称情况都大了一些。

## 4 结论

利用 ABAQUS 软件，通过有限元法，利用显式动力学分析，研究了轧铝模型中材料间摩擦系数与被轧制材料的厚度、残余应力、轧辊转动角度的关系，并给出了关系曲线，并且考虑了上下轧辊非对称时的情况，得到如下结论：

(1) 随着摩擦系数的增加，铝条中残余应力先增加后减小再增加。因此，为了尽可能减少其残余应力，我们可以调整轧辊与铝条的接触摩擦系数在 0.5 到 0.7 之间，来取得一个最小的残余应力。

(2) 随着摩擦系数的增加，铝条轧制后厚度先减小后增加，为了取得理想的轧制厚度，我们可以调整摩擦系数在 0.6 到 0.8 之间。

(3) 随着摩擦系数的增加，轧辊转动角度先增加后减小再增加。

(4) 当轧辊与铝条上下表面摩擦系数不同时，即非对称情况下，残余应力和轧制厚度都相较于对称情况偏大。

本文研究的不足：

- (1) 模型的简化偏简单，并未考虑传热等因素的影响。
- (2) 未考虑轧辊与轧辊轴之间的摩擦。
- (3) 缺少相关理论研究的支撑。

## 5 心得与收获

笔至于此，突然回想起来 2020 年秋季力学工程课上，徐春晖老师给我们讲解了她的研究方向：利用有限元法，在软件里面对复杂的事物进行模拟，把复杂的事物拆分后进行简化，比如在墙上钉钉子的过程中，钉子所受的力、漏斗中物体的流下过程中所受的力、土堆坍塌的过程中各部分所受的力，离散单元法 DEM 的相关介绍等。这也许就是我第一次接触到连续体

离散化的思想，当时就给刚进入大学的我不小的震撼，原来问题还能这样解决。

先说说这篇报告吧，从构思，到想好题目（然后发现该模型竟然是老师的习题册中的一道题目），再到模拟运算，遇到了种种问题，也逐一解决，相较于网络上很多现成的程序，他们的是考虑轧辊是刚体，可以把角速度边界条件直接加在轧辊上，而当我也考虑这样的的时候，发现轧辊不会转动。后来转换思路，把位移边界条件加在了铝条上，也算是解决了这个问题。最大的收获吧，是研究了问题？感觉问题虽小，却是个探索的过程，自己选定研究方向，初定模型，遇到问题通过搜索，不断尝试去解决吧。最初还把约束加错位置，导致所有都重新算了一遍，这个过程也历练了我的耐性（?）。

再回到这门课吧，感受到了有限元法的强大，熟练（?）掌握了软件，这个课程的学习，也让我更明白了一个道理：课堂上的学习是不够的，还需要课下多去练习。当然也知道自己有很多的不足之处，之后继续努力，学习永无止境。从计算方法的学习，到有限元法，再到有限元程序设计，再到大型软件应用，这些课程串联起来，构成了力学中的强大解决问题的方法。希望在后续学习中，利用好有限元这门独门绝技（徐老师说的），运用好大型软件这把利剑（我说的），在力学的道路上，一路披荆斩棘！

最后，感谢张老师的教导！

## 参考文献

- [1] 宋冀生, 王曼星. 轧制时摩擦系数的研究. 中南矿冶学院学报, 1980 (01): 35-44
- [2] 黄金磊, 臧勇, 等. 热轧过程中摩擦系数非对称性对轧机振动及稳定性的影响. 工程科学学报, 2019, 41 (11): 1465-1472
- [3] 尚国涛. 轧制纯铜热处理残余应力释放行为研究\_尚国涛. 大连理工大学硕士 学位论文, 2020