文章编号:1008-1542(2021)03-0311-08

ABAQUS 二次开发在动态剪切挤压连接仿真中的应用

戎　江[1],马世博[1,2],闫华军[1,2],张双杰[1,2],邵海涛[1],张　超[1]

(1.河北科技大学材料科学与工程学院,河北石家庄　050018;2.河北省材料近净成形技术重点实验室,河北石家庄　050018)

摘　要:针对在采用有限元软件分析多参数变化对研究对象的影响时往往需要反复建模、重复定义、修改参数等问题,提出了改进的编程方法和图形用户界面建立方法。以中间坯动态剪切挤压连接为例,基于 Python 语言对 ABAQUS 前处理进行了二次开发,编写了动态剪切挤压连接仿真模拟的内核脚本程序,借助 RSG 插件建立了动态剪切挤压连接的图形用户界面,最后进行了仿真分析。结果表明,用户可根据实际情况输入不同工艺参数、剪具参数、坯料参数,自动完成前处理操作,在有效解决了模型装配时繁琐、易错等问题的同时还提高了模型装配和仿真结果的准确性,验证了所提出的二次开发程序及图形用户界面的可行性。研究结果为后续研究不同压下量、搭接量、刃口宽等参数对中间坯动态剪切连接质量的影响提供了有力工具,同时为 ABAQUS 二次开发在其他领域的应用提供了借鉴。

关键词:特种加工工艺;运动仿真;Python 语言;ABAQUS 二次开发;剪切连接

中图分类号:TG335.19　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.7535/hbkd.2021yx03014

Applied research of secondary development of ABAQUS in the simulation of dynamic shear extrusion connection

RONG Jiang[1], MA Shibo[1,2], YAN Huajun[1,2], ZHANG Shuangjie[1,2], SHAO Haitao[1], ZHANG Chao[1]

(1. School of Material Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. Hebei Key Laboratory of Material Near-net Forming Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: Aiming at the problem that when the finite element software is used to analyze the influence of multi parameter changes on the research object, it is necessary to repeatedly model, define and modify parameters, an improved programming method and graphical user interface establishment method were provided. Taking the dynamic shear extrusion connection of

收稿日期:2021-03-01;修回日期:2021-05-04;责任编辑:冯　民

基金项目:河北省重点研发计划项目 (18211812D)

第一作者简介:戎　江(1995—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事轻量化、点阵结构、动态剪切挤压连接工艺方面的研究。

通讯作者:马世博副教授。E-mail: mashibo1980@163.com

戎江,马世博,闫华军,等.ABAQUS 二次开发在动态剪切挤压连接仿真中的应用[J].河北科技大学学报,2021,42(3):311-318.

RONG Jiang, MA Shibo, YAN Huajun, et al.Applied research of secondary development of ABAQUS in the simulation of dynamic shear extrusion connection[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2021,42(3):311-318.

intermediate billet as an example, the python language was used for secondary development of ABAQUS pretreatment, and the kernel script of dynamic shear extrusion connection simulation was programmed. Then the graphic user interface of dynamic shear extrusion connection was established by using RSG plug-in. Finally, simulation analysis was conducted. The results show that users can input different process parameters, die parameters and blank parameters according to the actual situation to complete the pre-processing operation automatically, which not only effectively solves the problems of complicated and error prone model assembly, but also improves the accuracy of model assembly and simulation results, so the feasibility of the secondary development program and graphical user interface is verified. The study provides a powerful tool for the follow-up study of the influence of different reduction, overlap, edge width and other parameters on the dynamic shear connection quality of intermediate billet, and provides a reference for the secondary development of ABAQUS in other fields.

Keywords: special processing technology; motion simulation; Python language; ABAQUS secondary development; shear connection

ABAQUS作为一款大型通用有限元仿真分析软件,在工程模拟中应用广泛,可以分析大多数工程材料的线性、非线性行为[1-4]。为了满足不同用户的特定需求,ABAQUS软件提供了基于Python语言的脚本接口[5-6],以方便用户开发自定义的前后处理工具,实现参数化建模、数据处理等功能。HUANG等[7]基于ABAQUS二次开发和统计分析软件SPSS,利用Python脚本实现了空心楼板的自动建模、分析和数据处理。TANG[8]以Python作为编程语言对ABAQUS进行二次开发,并以弯辊为例,对其进行了参数分析。YI等[9]在研究分析齿轮箱减振降噪时,运用Python语言对ABAQUS的前后处理进行二次开发,提高了前后处理的分析和计算效率。

中间坯动态剪切挤压连接技术是将两块搭接在一起的坯料,通过传送带输送至动态剪切挤压连接装置的上、下剪具处,在上、下剪具摆动瞬间完成剪切挤压连接[10-11]。在研究工艺及参数对中间坯连接质量的影响和对工艺进行优化时,往往需要反复建模、重复定义、修改参数等许多繁琐工作[12-13]。基于数值模拟[14-17]及ABAQUS二次开发参数化建模思路,可以减小前处理过程中建模、装配、定义载荷等工作量,提高有限元分析效率。因此,本文拟采用Python语言对ABAQUS进行二次开发,编写动态剪切挤压连接仿真模拟的内核脚本程序,借助RSG插件建立剪切挤压连接的图形用户界面,实现前处理参数化,用户可根据具体输入的工艺参数、模具参数、坯料参数进行动态剪切挤压连接仿真模拟。此外,通过与非参数化模拟进行对比,验证该二次开发程序的可行性。

1 动态剪切挤压连接仿真模型的建立

1.1 剪切挤压连接简介

如图1所示动态剪切挤压连接初末状态,实际生产中上、下剪具在剪切连接装置的作用下,以近椭圆轨迹在竖直面上运动,止料刃与中间坯接触后限制金属沿坯料方向的塑性流动,刃口咬入坯料,在上、下剪具刃口作用下搭接坯料发生剪切-挤压剧烈变形,使中间坯瞬间完成连接[18],去除坯料接头后进入精轧机。

1.2 剪切挤压连接模型的建立与网格划分

动态剪切挤压连接作为一种新工艺,研究其工艺参数、剪具参数、坯料参数等对连接质量的影响尤为重要。仿真模拟时一旦有参数发生变化必将重新建模并装配,这将花费大量的时间和精力,故提出前处理参数化。针对上、下剪具外形轮廓规则,为提高模拟效率将其设置为解析刚体并创建参考点和集合,坯料设置为三维可变形体。上、下剪具为解析刚体无需划分网格,坯料网格采用六面体结构,坯料在剪切连接过程中连接区的网格会发生较大的扭曲,故单元类型选择线性减数积分(C3D8RT)。考虑到连接过程中只是连接区内的网格会发生扭曲,因此将坯料分区为普通区和

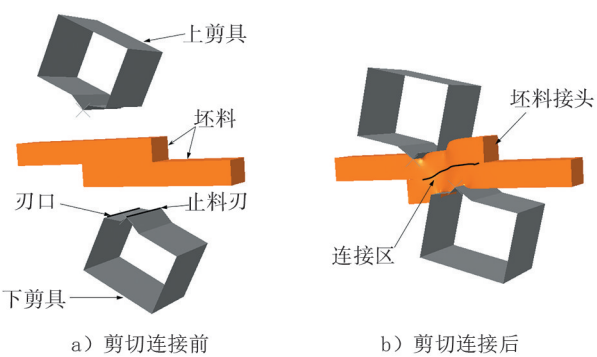


图1 动态剪切挤压连接过程

Fig. 1 Bonding process of dynamic shear extrusion

细分区，并对细分区进行网格细分，这样可在保证仿真精度的同时提高模拟效率。坯料网格划分后如图 2 所示，细分区网格数量为24 000，是普通区的 5 倍。

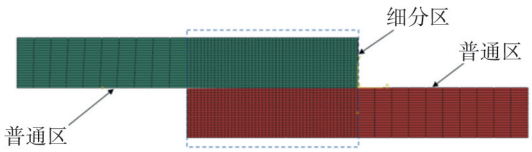


图 2　坯料网格划分模型

Fig. 2　Mesh model of blank

1.3　材料属性

材料属性涉及热传导、比热、弹塑性、膨胀、密度等，其中热传导和比热通过大量试验测得，且任一参数的设置有误都会导致中间坯连接失败，经过反复模拟及实验得到可实现连接的材料参数，部分材料属性见表 1。另外，坯料材料定义中合理的损伤准则可以得到准确的仿真模拟结果，动态剪切挤压连接具有连接速度快、连接区应力应变大、坯料温度高的特点，故采用 Johnson-Cook[19] 损伤模型，见式(1)。

表 1　坯料材料属性

Tab.1　Blank material properties

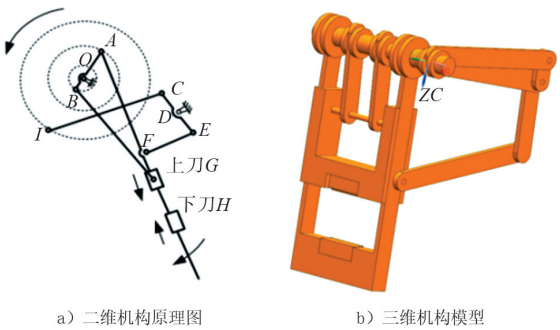
密度/(kg·mm^{-3})	杨氏模量/MPa	泊松比	膨胀系数/K^{-1}
7.85×10^{12}	210 000	0.3	1.2×10^{5}

$$\varepsilon_f=[D_1+D_2\exp(D_3\eta)\,](1+D_4\ln\varepsilon_{eq}^{*})(1+D_5T^{*}),\tag{1}$$

式中：D_1，D_2，D_3是受应力三轴度影响的材料参数；D_4是应变率敏感参数；D_5是温度影响参数；η 是应力三轴度，$\eta=S_m/S_{eq}$，其中 S_m是平均应力（3 个主应力的平均值），S_{eq}是等效应力；ε_{eq}^{*}是无量纲化应变率，$\varepsilon_{eq}^{*}=\varepsilon_{eq}/\varepsilon_0$，其中 ε_{eq}和 ε_0分别为等效塑性应变率和参考应变率；T^{*} 为无量纲温度，$T^{*}=(T-T_r)/(T_m-T_r)$，其中 T，T_r和 T_m分别为材料的当前温度、参考温度和熔点。

1.4　载荷施加

动态剪切挤压连接过程中无法通过简单的加载力和速度实现上、下剪具的复杂运动，因此本文采用幅值加载轨迹，可更准确地模拟剪具真实运动状态。为此，根据图 3 a)所示动态剪切挤压连接的机构原理图[20]设计出如图 3 b)所示的曲柄摇杆和曲柄摆杆机构，通过 UG 软件对机构进行运动仿真分析得到如图 4 所示上、下剪具的运动轨迹。上、下剪具的运动轨迹可分为挤压连接行程、退刀行程、空行程，为了节约模拟时间，在 ABAQUS 中取轨迹的挤压连接行程进行加载。



a）二维机构原理图　　b）三维机构模型

图 3　动态剪切挤压连接机构

Fig. 3　Mechanism of dynamic shear extrusion connection

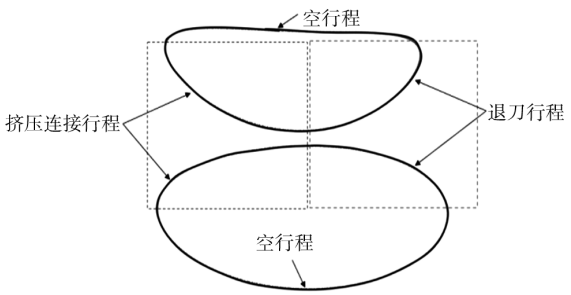


图 4　上、下剪具轨迹图

Fig. 4　Track diagram of upper and lower shears

为了更真实地模拟实际生产线中的中间坯动态剪切挤压连接过程，在有限元仿真软件 ABAQUS 中将坯料设置为随动，即坯料与上、下剪具在水平方向上的速度相同，竖直方向上可随剪具压力发生移动。上、下剪具除了设置水平、竖直方向的运动，还有绕 Z 轴的公转和绕止料刃的自转。图 5 所示为剪切挤压连接过程部分重要片段。初始时上下剪具前断面与水平方向呈 14°夹角，上、下剪具在水平、竖直方向运动的同时绕止料刃逆时针自转。止料刃与坯料接触后限制变形区金属在水平运动方向上的塑性流动，剪具在竖直方向继续剪切，刃口开始切除料头，完成连接后剪具与坯料分离，剪具前断面与水平方向夹角变为 0°。

2　动态剪切挤压连接仿真模型的参数化

由于动态剪切挤压连接仿真的前处理建模及其他模块的参数设置比较复杂，无论是录制宏文件还是修改“.rpy”[21]文件，得到的程序繁琐陈杂，不易修改。因此本文采用手动编程，图 6 为动态剪切挤压连接仿真界面的创建流程。通过定义 RSG(really simple GUI)对话框构造器开发所需要的 function 函数，借助 RSG

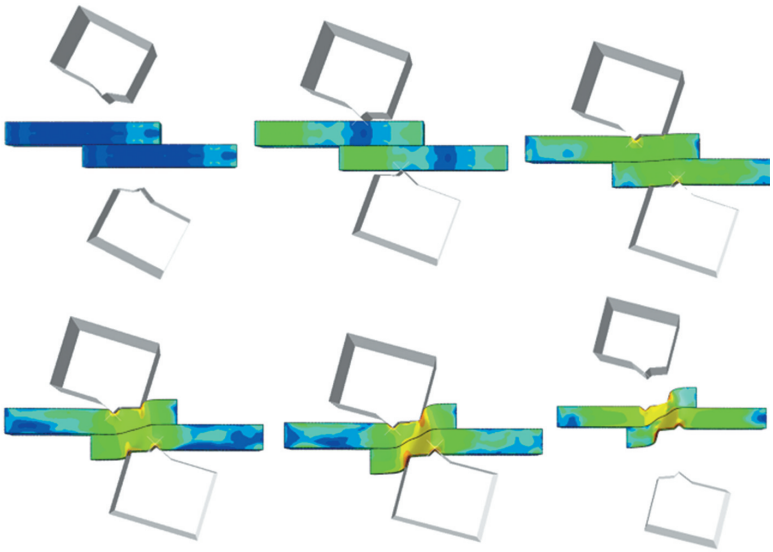


图 5 动态剪切挤压连接过程重要片段

Fig. 5 Important segments of dynamic shear extrusion bonding process

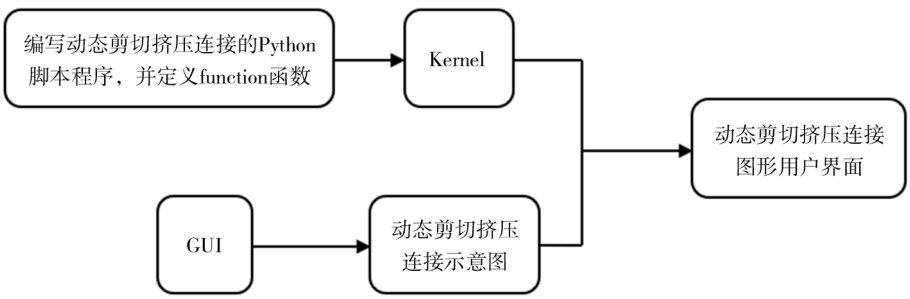


图 6 动态剪切挤压连接仿真界面的创建流程

Fig. 6 Creating process of simulation interface for dynamic shear extrusion connection

中的 GUI 创建图形用户界面。在 Kernel 页面加载该脚本程序，并使脚本中的参数与 GUI 窗体控件中的 keywords 保持一致，从而产生关联，注册生成动态剪切挤压连接仿真插件程序。

2.1 模型参数化

实际生产中中间坯的厚度、宽度等尺寸往往是变化的，这就要求设计不同的剪具来适应生产，其中对连接质量起主要作用的模具参数是止料刃的高度和刃口宽。需要将中间坯的厚度(thickness—t)、宽度(width—$w1$)以及剪具止料刃的高度(height—h)和刃口宽(width—$w2$)设置为变量以供用户选择。表 2 为本文参数化模拟的相关物理量及含义。

表 2 参数化模拟的相关物理量及含义

Tab.2 Related physical quantities and meanings of parametric simulation

参数类型	参数名称	英文名称	关键词	单位
坯料参数	坯料宽度	billet width	$w1$	mm
	坯料厚度	billet thickness	t	mm
	坯料温度	billet temperature	$T1$	℃
剪具参数	刃口宽	blade width	$w2$	mm
	止料刃高度	height of stop edge	h	mm
	剪具温度	shear temperature	$T2$	℃
工艺参数	搭接量	lap amount	L	mm
	压下量	reduction	R	%
其他参数	环境温度	sink temperature	$T3$	℃
	摩擦系数	friction coeff	f	
	膜层散热系数	film coefficient	fc	

坯料宽度、厚度，止料刃高度和刃口宽的脚本代码如下：

```
#中间坯厚度
s.ObliqueDimension(vertex1=v[0],vertex2=v[1],textPoint=(-100.374,-10.051),value=t)
#中间坯宽度
p.BaseSolidExtrude(sketch=s,depth=w1)
#止料刃高度
s.DistanceDimension(entity1=g[3],entity2=v[0],textPoint=(150.881,33.315),value=h)
#刃口宽
s.ObliqueDimension(vertex1=v[1],vertex2=v[2],textPoint=(70.158,-22.01),value=w2)
```

2.2　工艺参数的参数化

在动态剪切挤压连接过程中搭接量(lap amount—L)、压下量(reduction—R)是影响连接质量的 2 个关键工艺参数，如图 7 所示。本文研究搭接量和压下量对中间坯连接质量的影响时，二者无法直接用参数替换。根据装配关系分析得出二者由上、下剪具的初始位置所控制，因此将搭接量、压下量与上、下剪具的初始位置关联。根据装配关系进行方程求解，将其转化为可参数化的变量。

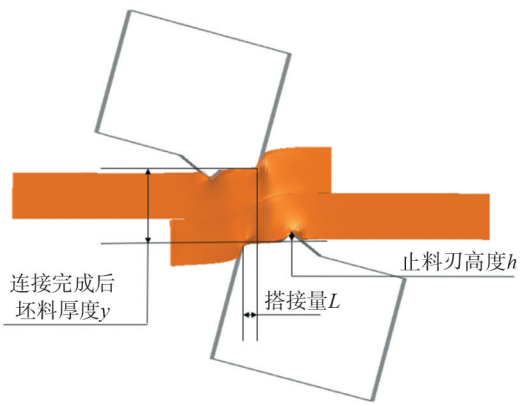


图 7　关键工艺参数

Fig. 7　Key process parameters

压下量[10](R)计算式为

$$R=\frac{s}{t}\times 100\%=\frac{2t-y}{t}\times 100\%, \tag{2}$$

式中：s 为坯料下压量，mm；t 为中间坯厚度，mm；y 为剪切完成后坯料连接区的垂直距离，mm。

$$Y_{上}=52+\frac{52}{102}y, \tag{3}$$

$$Y_{下}=50-\frac{50}{102}y, \tag{4}$$

式中：$Y_{上}$ 为上剪具的初始纵坐标；$Y_{下}$ 为下剪具的初始纵坐标；上剪具在剪切连接过程中竖直方向的行程是 52 mm；下剪具在剪切连接过程中竖直方向的行程是 50 mm。

搭接量(L)为刃口之间的重叠区域，搭接量越大参与变形的坯料越多。剪切连接过程中认为整体在水平方向上具有相同的速度，故上、下剪具在水平方向上的相对位移是 0。如此便可通过装配经验先确定下剪具的初始横坐标，再根据式(5)确定上剪具的初始横坐标。

$$X_{上}=X_{下}-28\times 2+2L, \tag{5}$$

式中：$X_{上}$ 为上剪具的初始横坐标；$X_{下}$ 为下剪具的初始横坐标；L 为搭接量，mm；28 是刃口到止料刃的距离，mm。

确定模型初始位置的部分脚本代码如下：

```
#下剪具初始位置
a1.translate(instanceList=('xiamo-1',),vector=(-25.0,-50-0.98 * t+0.0049 * t * R,0.0))
#上剪具初始位置
a1.translate(instanceList=('shangmo-1',),vector=(-25-56+L,52+1.02 * t-0.0051 * t * R,0.0))
```

2.3　其他前处理参数化

轨迹加载的部分程序代码如下：

```
#上剪具运动轨迹
DisplacementBC(name='S-X',createStepName='Step-1',region=region,u1=1.0,u2=UNSET,
u3=UNSET,ur1=UNSET,ur2=UNSET,ur3=UNSET,amplitude='X',fixed=OFF,distributionType=UNIFORM,fieldName='',localCsys=None)
DisplacementBC(name='S-Y',createStepName='Step-1',
region=region,u1=UNSET,u2=1.0,u3=UNSET,ur1=UNSET,ur2=UNSET,ur3=UNSET,amplitude='S-Y',fixed=OFF,distributionType=UNIFORM,fieldName='',localCsys=None)
DisplacementBC(name='S-jiaodu',createStepName='Step-1',region=region,u1=UNSET,u2=
```

UNSET,u3=UNSET,ur1=UNSET,ur2=UNSET,ur3=-0.017,amplitude='jiaodu',fixed=OFF,distributionType =UNIFORM,fieldName='',localCsys=None)

#材料属性定义的部分程序代码如下:

JohnsonCookDamageInitiation (table=((0.101,1.68,-2.353,-0.634,-0.255,1425.0,717.0,100.0),))

2.4 图形用户界面

通过 RSG 对话框构造器构建图形用户界面。在 Kernel 标签页中选择刚刚保存的程序文件,function 函数选择程序文件中定义的函数。在 GUI 标签页中对关键字进行定义,并与脚本文件中的关键字相对应。为了便于用户理解,还在对话框中添加了动态剪切挤压连接模型的图形文件,使整个对话框显得直观形象,生成如图 8 所示的图形用户界面。

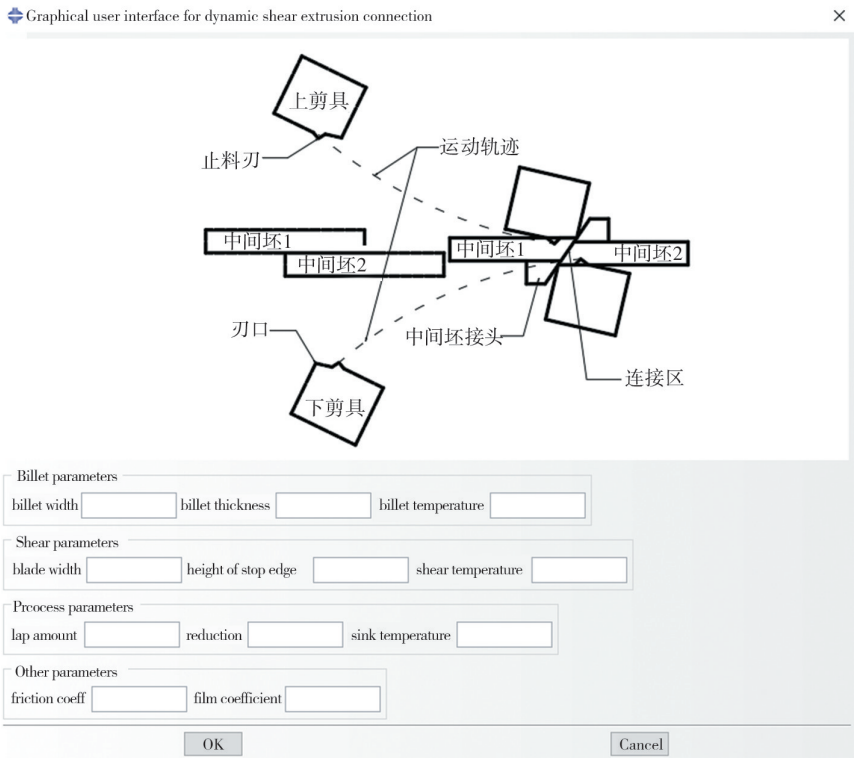


图 8 动态剪切挤压连接仿真图形用户界面

Fig. 8 Graphical user interface for dynamic shear extrusion joint simulation

3 仿真结果对比

用上述开发的图形用户界面,输入与非参数化模拟相同的参数,图 9、图 10 所示分别为参数化模拟和非参数化模拟的应力、应变曲线,从中可以看出二者变形基本一致,测量应变云图中二者连接后的坯料厚度,代入式(3)得出参数化模拟的结果更接近理论压下量的值。经多组参数模拟对比得出表 3 所示结果。从表 3 可以看出参数化模拟有效降低了模拟时间,提高了仿真效率,同时提高了仿真结果的准确性。

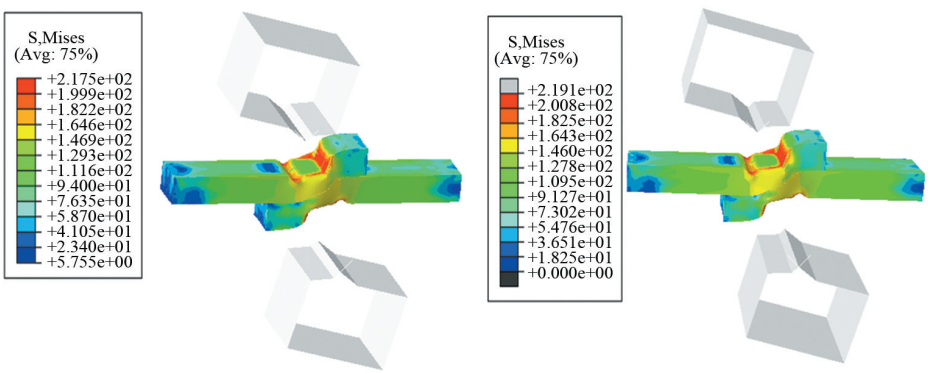


图 9 应力云图

Fig. 9 Stress nephogram

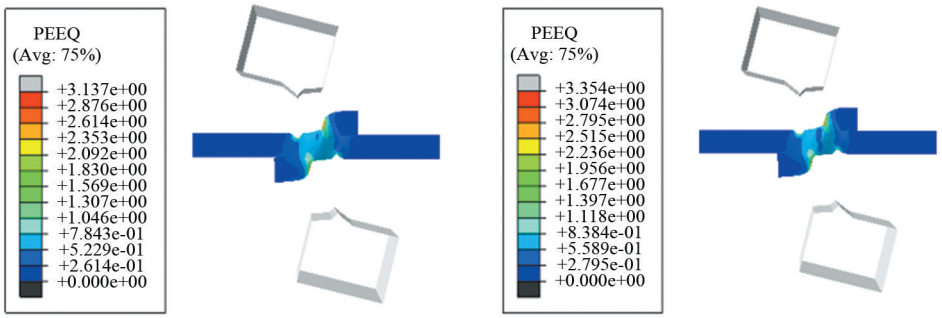


图 10　应变云图

Fig. 10　Strain nephogram

表 3　参数化建模与传统建模的效率及仿真结果对比

Tab.3　Comparison of efficiency and simulation results between parametric modeling and traditional modeling

建模手段	前处理时间	建模效率	理论压下量与模拟压下量偏差/%	理论搭接量与模拟搭接量偏差/%	适用场合
参数化建模	2 min	高	±3	±2	变参数多因素
非参数化模拟	2 h	低	±10	±5	定参数单因素

4　结　语

1）基于 ABAQUS 有限元软件前处理模块进行二次开发，编写了动态剪切挤压连接仿真模拟的内核脚本程序，借助 RSG 插件建立了动态剪切挤压连接的图形用户界面，使用户可以根据实际参数快速建立仿真模型进行模拟，有效解决了模型装配时繁琐、易错等问题，提高了模拟分析效率。

2）运用 UG 软件建立了动态剪切机构的三维模型，并装配进行了运动仿真。通过调整刀块的装配位置得到了剪切连接所需的合理轨迹，将其运用到 ABAQUS 中完成了中间坯动态剪切挤压连接的模拟分析。

3）针对工艺参数中搭接量、压下量无法直接用参数替换的问题，根据装配关系将二者与上、下剪具的初始位置关联，进行方程求解，转化为可参数化的变量。通过与非参数化模拟结果进行对比，验证了该方法的正确性，且模拟结果与静态试验中的变形规律具有一致性。

4）本文主要对 ABAQUS 的前处理进行二次开发，实现了中间坯动态剪切挤压连接仿真模拟的参数化，后续将对坯料的组织模拟及后处理进行相应开发，以实现整个过程及结果的参数化。

参考文献/References：

[1] WU Jian，HUANG Xiaochuan.Parametric modeling of CFRP steel tube concrete based on Abaqus secondary development[J].Journal of Progress in Civil Engineering，2020，2(7)：25-28.

[2] 吴泽兵，张帅，郭龙龙，等.ABAQUS 二次开发在 PDC 单齿破岩仿真中的应用[J].西安石油大学学报(自然科学版)，2020，35(1)：104-109.
WU Zebing，ZHANG Shuai，GUO Longlong，et al.Application of ABAQUS secondary development in rock breaking simulation of PDC cutter[J].Journal of Xi′an Shiyou University (Natural Science Edition)，2020，35(1)：104-109.

[3] 程可慧.基于 Python 的 ABAQUS 在特征值屈曲分析上的应用[J].山西建筑，2020，46(19)：196-198.
CHENG Kehui.In the eigenvalue buckling analysis application of ABAQUS based on Python[J].Shanxi Architecture，2020，46(19)：196-198.

[4] 张春会，郑晓明，田英辉，等.组合荷载作用下平板锚承载能力的数值预测[J].河北科技大学学报，2016，37(3)：283-287.
ZHANG Chunhui，ZHENG Xiaoming，TIAN Yinghui，et al.Numerical prediction of the bearing capacity of plate anchors subjected to combined loads[J].Journal of Hebei University of Science and Technology，2016，37(3)：283-287.

[5] SHIY L，LI H W，WANG W D，et al.A fiber model based on secondary development of ABAQUS for elastic-plastic analysis[J].International Journal of Steel Structures，2018，18(5)：1560-1576.

[6] 朱兆华，黄菊花，张庭芳，等.ABAQUS 前、后处理模块二次开发的应用[J].组合机床与自动化加工技术，2009(1)：30-33.
ZHU Zhaohua，HUANG Juhua，ZHANG Tingfang，et al.Application of Second-developed on ABAQUS pre-precess and post-process [J].Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique，2009(1)：30-33.

[7] HUANGC T，WANG Z J，QU Y Y.Parameters analysis with regard to the hollow floor based on the ABAQUS secondary development [J].Advanced Materials Research，2012，446/447/448/449：1337-1342.

[8] WEI T. Application of ABAQUS secondary development in finite element analysis of the bend roller [J]. Advanced Materials

Research,2011,187:609-613.

[9] YIG L,SUI Y K,DU J Z.Application of python-based Abaqus preprocess and postprocess technique in analysis of gearbox vibration and noise reduction[J].Frontiers of Mechanical Engineering,2011,6(2):229-234.

[10] 张双杰,李云匣,马世博,等.金属快速剪切挤压连接变形的关键参数优化[J].塑性工程学报,2017,24(3):69-77.
ZHANG Shuangjie,LI Yunxia,MA Shibo,et al.Optimization on key parameters for the metal deformation of rapid shear extrusion bonding[J].Journal of Plasticity Engineering,2017,24(3):69-77.

[11] 何阳.金属快速剪切挤压连接的关键参数研究[D].石家庄:河北科技大学,2015.
HE Yang.Research on the Key Parameters of Metal Fast Shear Extrusion Connections[D].Shijiazhuang:Hebei University of Science and Technology,2015.

[12] 陈春城,胡亚辉,郑清春,等.基于 Python 的 ABAQUS 二次开发在骨钻削仿真中的应用[J].现代制造工程,2018(6):54-57.
CHEN Chuncheng,HU Yahui,ZHENG Qingchun,et al.Secondary development of ABAQUS in the simulation of bone drilling based on Python[J].Modern Manufacturing Engineering,2018(6):54-57.

[13] 陈博伟,胡亚辉,杨翠蕾,等.ABAQUS 二次开发在切削钛合金仿真中的应用[J].现代制造工程,2017(7):105-108.
CHEN Bowei,HU Yahui,YANG Cuilei,et al.Secondary development of ABAQUS in the simulation of cutting of titanium alloy[J].Modern Manufacturing Engineering,2017(7):105-108.

[14] 李争,程立源,高梦海,等.鹦鹉螺等角螺线型风力机数值模拟及建筑扰流分析[J].河北科技大学学报,2020,41(6):551-556.
LI Zheng,CHENG Liyuan,GAO Menghai,et al.Numerical simulation of nautilus equiangular spiral wind turbine and analysis of building turbulence[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2020,41(6):551-556.

[15] 张苏英,郭宝樑,赵国花,等.智能疏散系统导向标志计算及疏散路径仿真[J].河北科技大学学报,2020,41(1):40-49.
ZHANG Suying,GUO Baoliang,ZHAO Guohua,et al.Intelligent evacuation system guidance sign calculation and evacuation path simulation[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2020,41(1):40-49.

[16] 刘东辉,王金豪,孙晓云,等.Z 字形飞机建模与半实物仿真研究[J].河北科技大学学报,2019,40(6):520-525.
LIU Donghui,WANG Jinhao,SUN Xiaoyun,et al.Modeling and hardware-in-the-loop simulation of Z-shaped aircraft[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2019,40(6):520-525.

[17] 吴复涛,王娟,李鑫,等.AlSi9Mg 变速箱下壳低压铸造工艺模拟及优化[J/OL].河北科技大学学报.[2020-12-25].http://xuebao.hebust.edu.cn/hbkjdx/ch/reader/create_pdf.aspx? file_no=b2020yx008&flag=1&journal_id=hbkjdx&year_id=.
WU Futao,WANG Juan,LI Xin,et al.Simulation and optimization of low pressure casting process for AlSi9Mg gearbox shell[J/OL].Journal of Hebei University of Science and Technology.[2020-12-25].http://xuebao.hebust.edu.cn/hbkjdx/ch/reader/create_pdf.aspx? file_no=b2020yx008&flag=1&journal_id=hbkjdx&year_id=.

[18] 马世博,侯瑞东,邵明杰,等.固态金属剪切连接组织及界面演变研究[J].塑性工程学报,2017,24(2):204-211.
MA Shibo,HOU Ruidong,SHAO Mingjie,et al.Microstructure and interface evolution of solid metal shear bonding[J].Journal of Plasticity Engineering,2017,24(2):204-211.

[19] 许鑫.基于快速剪切挤压变形 Q345 钢本构关系研究[D].石家庄:河北科技大学,2015.
XU Xin.Based on the Rapid Shear Extrusion Deformation Q345 Steel Constitutive Relation Research[D].Shijiazhuang:Hebei University of Science and Technology,2015.

[20] 姚云峰,李岭冲,张双杰,等.中间坯快速剪切挤压连接机构特性分析与优化[J].机械设计,2016,33(12):85-89.
YAO Yunfeng,LI Lingchong,ZHANG Shuangjie,et al.Characteristic analysis and optimization of fast shear-extrusion joining mechanism for intermediate billets[J].Journal of Machine Design,2016,33(12):85-89.

[21] LUO L L,ZHAO M Y.The secondary development of ABAQUS by using python and the application of the advanced GA[J].Physics Procedia,2011,22:68-73.