

GH4169 外螺纹滚压过程 ABAQUS 有限元仿真模型建立及验证

吴同一¹, 黎向锋¹, 周玉宝², 梁铖¹, 余浩东¹, 易志东¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 河南航天精工制造有限公司, 河南 信阳 464007)

摘要:为深入揭示 GH4169 外螺纹滚压成型机理, 利用 ABAQUS 建立其外螺纹滚压过程有限元仿真模型并进行实验验证。滚压过程中, 滚丝轮和圆柱形工件间的接触区域不断发生变化, 属于复杂接触类型。为此, 较为详细地介绍有限元模型建立过程中的材料本构模型、求解类型、网格划分及自适应网格、接触及边界条件等关键技术, 利用能量法、外螺纹成型样貌以及最大径向力验证了该仿真模型的有效性。

关键词:外螺纹滚压; 有限元仿真; MJ 螺纹; ABAQUS

中图分类号:TG62 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)06-0077-04

Establishment and Verification of ABAQUS Finite Element Simulation Model for GH4169 External Thread Rolling Process

WU Tongyi¹, LI Xiangfeng¹, ZHOU Yubao², LIANG Cheng¹, YU Haodong¹, YI Zhidong¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Henan Aerospace Precision Manufacturing Co., Ltd., Xinyang 464007, China)

Abstract: In order to reveal the rolling forming mechanism of GH4169 outer thread in depth, the finite element simulation model of rolling process of GH4169 outer thread was established by ABAQUS and verified by experiment. During the rolling process, the contact area between the roller and cylindrical workpiece changes constantly, which belongs to the complex contact type. Therefore, the key technologies such as material constitutive model, solution type, grid partition and adaptive grid, contact and boundary conditions during the establishment of finite element model are introduced in detail. The validity of the simulation model is verified by energy method, external thread shape and maximum radial force.

Keywords: external thread rolling; finite element simulation; MJ thread; ABAQUS

0 引言

外螺纹滚压加工是一种优质、高效、低成本的先进无切削加工方法, 对提高螺纹疲劳寿命有显著效果。GH4169 合金^[1]是一种沉淀强化型镍-铬-铁基高温合金, 在螺纹滚压中属于典型的难加工材料。随着高性能螺栓国产化材料的选用, 亟待对 GH4169 滚压工艺进行系统深入研究。滚压时不确定工艺参数多, 企业现有技术人员对某一规格螺栓摸索出较为合适的滚压工艺参数组合, 但对其深层次原因知之甚少, 故对其他规格螺栓的工艺指导有限; 为此需开展 GH4169 外螺纹滚压过程有限元仿真研究。崔鑫、齐会萍、杨中桂等^[2-4]使用 Deform 建立外螺纹滚压过程有限元仿真模型, 滚丝轮采用解析刚体, 无需划分网格, 虽节省计算时间, 但其仿真精度相对较低, 且其二次开发能力弱。而 ABAQUS 软件接口多, 便于二次开发; 建模功能较强, 可独立完成滚压模型创建; 单元类型多样, 尤其适合滚压过程的复杂接触和非线性变形。程明龙等^[5]利用 ABAQUS 建立矩形板滚压有限元模型, 但不能

用来模拟实际外螺纹滚压过程, 只能用于研究滚轮结构参数对滚压后残余应力的影响规律。高慧峰、梁志强、KUKIELKA 等^[6-8]建立的有限元仿真模型为单匝滚压模型, 工件为圆柱形, 但滚轮只有一道螺纹, 不足以模拟完整且有一定牙距的螺纹滚压。

1 外螺纹滚压原理

外螺纹滚压是圆柱形工件在摩擦力作用下被滚丝轮带着转动, 并在滚丝轮径向挤压力作用下发生塑性变形的一种加工工艺。滚丝轮和工件之间存在着周向旋转和径向进给两种运动。在滚压的过程中, 工件两边的每个滚丝轮沿着工件中心做径向进给运动; 滚丝轮刚接触工件时, 工件材料受到挤压力发生弹性变形; 随着滚丝轮进一步进给, 挤压力持续增大, 工件表面材料发生塑性变形; 当加工至预定尺寸后, 滚丝轮停止径向进给运动, 并持续转动一定时间, 以对滚压出的牙型进行修整; 随后滚丝轮以相反方向的径向运动退出, 工件表面便形成了和滚丝轮牙型相反的螺纹特征。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U20A20293); 河南省紧固件连接技术重点实验室资助项目(JGLJ2104)

第一作者简介:吴同一(1996—), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 研究方向为抗疲劳制造, 2530718504@qq.com。

2 外螺纹滚压仿真模型建立

2.1 模型简化

对双滚丝轮径向滚压米制航空外螺纹(MJ)的成形过程,做以下简化:1)假设滚压过程中工件与滚丝轮间摩擦因数恒定;2)假设滚丝轮为完全刚性体;3)假设滚压过程中工件温度恒定;4)假设工件为完全塑性体;5)只对滚丝轮和工件进行建模仿真。

2.2 几何模型及装配

MJ14×1.5 螺栓有限元仿真模型包括 3 个部件,即 2 个滚丝轮和 1 个圆柱形工件。工件轴向长度设为 6 mm,以保证工件表面至少能被滚压出一圈完整螺纹。

实际滚压中滚丝轮直径比较大,其中径约 180 mm,将其内部材料挖去,只保留其外表面螺纹特征。滚丝轮螺旋升角与被滚压螺纹的螺旋升角相等,即两者螺纹头数之比等于直径之比。滚丝轮采用多头,以提高其运动平稳性、滚压速率及使用寿命。

装配时 2 个滚丝轮以及工件的中心位置共线,且左、右两个滚丝轮在轴向上错开半个螺距,以便工件旋转一周后左、右滚丝轮压痕重合。装配后有限元仿真模型如图 1 所示。

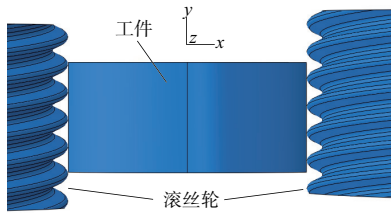


图 1 滚丝轮及工件装配

2.3 材料属性定义

对 GH4169 镍基高温合金进行拉伸实验,以获得其应力-应变曲线;实验测得的应力、应变为名义应力-应变。为了更为精确地模拟塑性变形过程中材料性能的变化,须将其转化为真实应力和塑性应变。塑性分析问题中大应变的真实塑性应变和名义应变间差值较大,转化公式分别为式(1)、式(2)。

$$\varepsilon_{\text{true}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma_{\text{nom}}(1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (2)$$

式中: ε_{nom} 为名义应变; σ_{nom} 为名义应力; $\varepsilon_{\text{true}}$ 为真实应变; σ_{true} 为真实应力。

材料拉伸实验数据中的应变不仅包含材料的塑性应变,而且还包括材料的总体应变。要将总体应变分解为弹性应变分量和塑性应变分量。弹性应变等于真实应力与弹性模量的比值,从总体应变中减去弹性应变,就得到塑性应变,其关系为

$$\varepsilon^{\text{pl}} = \varepsilon^{\text{t}} - \varepsilon^{\text{el}} = \varepsilon^{\text{t}} - \frac{\sigma}{E} \quad (3)$$

式中: ε^{pl} 是真实塑性应变; ε^{t} 是总体真实应变; ε^{el} 是真实弹性应变。通过拉伸实验可获得名义应力-应变数据,再通过式(1)一式(3)转换为真实应力-应变数据(图 2)。

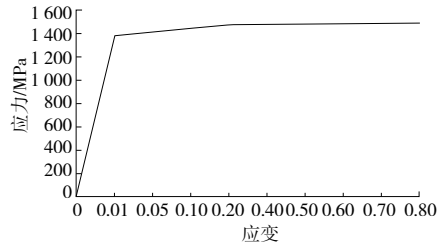


图 2 GH4169 材料真实应力-应变曲线图

2.4 求解类型

选择 ABAQUS/Explicit 显式动力学模块进行求解。用显式动力学方法求解准静态问题,一般需要上百万个时间增量,计算时间将会很大。对此,可考虑两种方法。

1)在模拟过程中人为提高加载过程的速度。但加载速度提高之后,静平衡问题就演化为动平衡问题,惯性力影响就会增加。准静态分析目标是在惯性力影响较小前提下尽量缩短计算时间周期,但针对实际滚压工艺的模拟,无法改变其加载速度。

2)质量缩放法,即通过改变物体质量来改变计算时间。其原理为:

$$\Delta t = \frac{L}{C_d} \quad (4)$$

$$C_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

式中: L 为最小的特征单元长度; C_d 为材料的膨胀波速; Δt 为稳定极限值(稳定时间增量); E 为弹性模量; ρ 为材料密度。同时,波速比 i 等于单元变形速度与材料膨胀波速的比值,其值要小于 1,否则会报错。

a) 材料密度

由式(5)可知:材料密度 ρ 越大,材料膨胀波速 C_d 就越小;假定单元变形速度不变,则波速比 i 就越容易接近或者大于 1,从而导致计算中断。如果假定材料膨胀波速 C_d 不变,要想让波速 i 越小,就必须让单元变形速度越小,相应最小特征单元长度 L 就会越大,即有限元网格中最小尺寸也会随之增大,则 Δt 就会越大,相应的计算速度也就越快。故可采用缩放一定质量来提高计算速度,但是过大缩放,会增大动态分析的惯性效应,如同增加加载速度,从而导致结果报错。

b) 材料特性

对于线弹性材料, E 是常数,波速也为常数;对于非线性弹性(如塑性)材料来说,在其屈服阶段,相应刚度会减小,由式(5)可知其波速也就相应减小;在最小特征单元长度 L 不变情况下,稳定时间增量 Δt 就会随之增大,但波速比 i 也会随之增大,当 i 接近或大于 1,就会容易导致有限元仿真计算的异常中断,故对于非线性(如塑性)材料来说,要使其最小特征单元长度 L 尽可能小,以使波速比 $i < 1$ 。

c) 单元网格

由式(4)可知: Δt 与 L 成正比, L 是最小单元尺寸,故

单元各个尺寸要尽可能均匀;单个网格尺寸太小,会严重降低整体计算速度;所以网格也不能过于细化,如过于细化不仅增加网格数量,而且因网格尺寸减小会导致计算速度变慢,但相应计算精度会变高。

如以 f^2 方式人为增加材料密度:膨胀波速会以 f 倍方式减小,并且稳定时间增量以 f 倍增加。通过质量缩放人为增加稳定时间,质量缩放对惯性效应具有同样的影响。过多质量缩放将会导致非真实解。后续将会采用能量法对模型进行验证,以保证缩放后模型的正确性。

2.5 网格划分及网格自适应

外螺纹滚压过程中伴有复杂接触和较大变形,模型中工件形状规则,为变形体,采用一阶六面体 (C3D8R) 单元;滚丝轮形状不规则,不好切分及网格划分,用修正的二阶四面体 (C3D10M) 单元;具体划分结果如图 3 和图 4 所示。

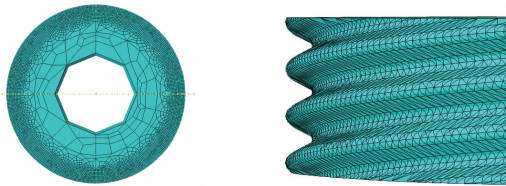


图 3 工件网格划分结果 图 4 滚丝轮网格划分结果

采用自适应网格技术来周期性减少网格过度扭曲。图 5 和图 6 为未使用 ALE 自适应网格的仿真效果。可以明显发现,当径向滚压到一定深度时,未使用 ALE 自适应网格的模型发生了穿透和网格畸变过度扭曲现象;而使用 ALE 自适应网格就可以很好地解决这一问题。如图 7 所示,滚压较大变形后仍能保持良好的网格形状。

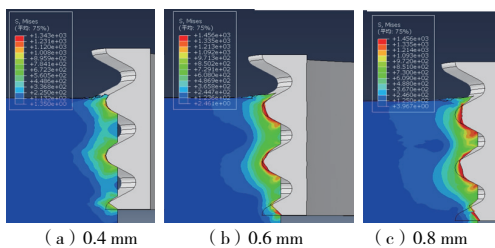


图 5 不同径向滚压深度的穿透效果

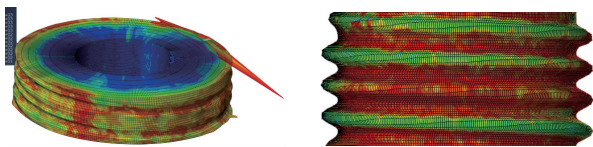


图 6 网格畸变过度扭曲 图 7 使用 ALE 技术仿真结果

ALE 自适应网格设置中有两个基本参数频率和网格扫略次数,默认值分别是 10 和 1。但典型的 ALE 过程在每 5~100 个增量步就需要一次重划分,根据实际变形需要,可适当调高该值,但重划分的频率越高其计算成本就会越大。而 MeshSweeps 值为 n 时,相当于每一个重划分过程再对网格进行 n 次扫略,这个参数可以理解为对整个自适应网格过程的每一个子过程强度进行控制。根据实

际仿真问题的不同,其具体参数值需要不断调试,以获得合适值。

2.6 接触和边界条件

首先对 2 个滚丝轮和工件这 3 个部件分别设置参考点,将工件耦合到其对应参考点上,将 2 个滚丝轮分别约束为刚体,后续载荷都将施加在这些参考点上。随后,接触属性中的法向行为设置为“硬”接触,可有效防止发生穿透;其切向行为设置库仑摩擦为罚函数,摩擦因数 0.2。接触类型为面与面接触,其中滚丝轮外表面设置为主表面,工件圆周面为从表面。

整个滚压过程分为 3 个过程:进给滚压、静滚压、退出。进给滚压时滚丝轮自转且向工件进给运动,到达预定尺寸后,滚丝轮不再进给,开始静滚压,即滚丝轮只旋转,不进给,以光滑工件表面,最后滚丝轮反向退出。在载荷模块中,由于工件是被滚丝轮接触摩擦带着转动的,且没有发生任何方向的移动,故只释放工件轴向旋转自由度;同时释放工件两端面的变形约束。根据实际情况在每个分析步中的加载方式不同,以分析步 1(进给滚压过程)为例,滚丝轮自转的同时沿工件径向进给,所以对其施加一个转动自由度和一个进给方向的自由度,注意 2 个滚丝轮进给方向相反,旋转方向相同。如有需要也可设置幅值来改变其速度变化。

本文中螺纹滚压过程有限元模拟参数设置见表 1。

表 1 螺纹滚压模拟参数

参数名称	参数值	
	工件	滚丝轮
材料	GH4169	501
密度/(t/mm^3)	8.24×10^{-9}	7.93×10^{-9}
弹性模量/GPa	210	210
泊松比	0.3	0.3
外径/mm	13.0	182.5
长度/mm	6	10
进给速度/(mm/s)	—	0.4
进给转速/(rad/s)	—	3.14
进给量/mm	—	0.8
静滚压时间/s	—	0.2
摩擦因数	—	0.2

3 模型验证

3.1 能量评估

评估模拟是否产生了合理的准静态响应,最具有普遍意义的方式是研究模型中各种能量的变化。在 ABAQUS/Explicit 中,如果模拟的是准静态过程,那么外力所做的功几乎等于系统内部的能量。由 ABAQUS 官方文档可知:作为一般性的规律,大多数过程中,变形材料动能将不会

超过其内能一个小比例(典型为5%以内),伪应变能和内能比值要小于1%~2%^[9]。图8为本模型动能与伪应变能和内能的百分比值随时间的变化曲线。由图可知,动能内能比值除了开始比较大,后期一直很小。该比值开始较大是因为工件和滚丝轮还没有接触,工件内能很小,导致其比值较大。由此可知本模型动能和内能的比值符合一般性规律。伪应变能和内能的百分比值,除去一开始未接触时,后期一直保持一个很小值,符合一般性规律。

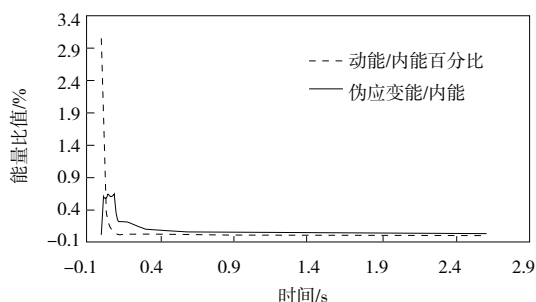


图8 能量比值随时间变化曲线

3.2 成型形貌分析

图9是外螺纹滚压仿真成形图,由于工件两侧端面无轴向位移约束,受较大挤压力时两侧端面沿轴向变形位移较大,故在观察外螺纹成型牙型时只关注其中间的2—3牙。图10是滚压成型的工件形貌,通过图9和图10对比可看出,仿真的外螺纹牙型成型效果十分良好,与实际滚压得出的牙型基本一致,且仿真外螺纹表面整洁光滑,无凸起或凹陷。

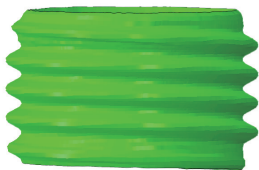


图9 仿真工件成型图

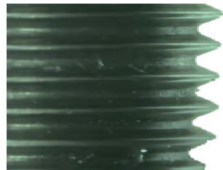


图10 滚压成型的工件形貌

3.3 最大径向分析

同样工艺参数情况下,仿真得到的径向力最大值为37kN,实际滚压得到的径向力最大值为41kN,误差为10.8%,可以接受。通过以上3个方面验证了该有限元模型的有效性。

4 结语

1)通过GH4169高温镍基合金拉伸实验,将其工程应力-应变转换为真实应力-应变,以获得其本构关系。

2)本文面向外螺纹滚压过程仿真,针对复杂接触和较大变形等非线性准静态问题,详细介绍了ABAQUS仿真软件的求解器选择、质量缩放法、网格单元类型和ALE自适应网格技术。

3)通过ABAQUS仿真软件建立MJ14×1.5外螺纹滚压过程仿真模型,并利用能量法和螺纹形貌对比说明了所建仿真模型的可靠性。基于ABAQUS仿真软件建立的双滚丝轮径向进给外螺纹滚压模型,为后续进一步深入研究奠定了基础。

4)本研究只是针对外螺纹滚压过程建立ABAQUS有限元仿真模型,并未对仿真结果展开讨论。滚压过程中,对成型结果影响因素众多,如进给速度、进给转速、静滚压时间、摩擦系数等,后续将继续研究这些工艺因素对滚压成型应力的影响规律,以期通过有限元仿真揭示外螺纹滚压机理。

参考文献:

- [1] 许磊,雷旭升. GH4169 高温合金材料的力学性能实验研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):32-34.
- [2] 崔鑫,赵永强. 外螺纹的冷滚压成型工艺研究[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版),2019,35(4):22-27,45.
- [3] 齐会萍,李永堂,蒋文涛,等. 径向螺纹冷滚压过程中的相对运动[J]. 锻压技术,2014,39(4):133-136.
- [4] 杨中桂,刘萍,王建楹,等. 圆弧螺纹滚压过程仿真研究[J]. 机电工程技术,2019,48(10):62-64,119.
- [5] 程明龙,贾延奎,张德远. 高强螺纹滚压工艺的有限元模拟及试验研究[J]. 工具技术,2017,51(5):18-22.
- [6] 高慧峰,吕彩琴,刘思蓉,等. 扭杆表面材料本构关系及滚压仿真分析研究[J]. 热加工工艺,2017,46(24):170-174.
- [7] 梁志强,陈一帆,栾晓圣,等. 超高强度钢强力滚压残余应力仿真与试验研究[J]. 表面技术,2021,50(1):413-421,431.
- [8] KUKIELKA K, KUKIELKA L, BOHDAL Ł, et al. 3D numerical analysis the state of elastic/visco-plastic strain in the external round thread rolled on cold [J]. Applied Mechanics and Materials,2014,474:436-441.
- [9] 王雨,谢丹,何珞玉,等. 大型异形环件径-轴向轧制芯辊运动自适应控制[J]. 塑性工程学报,2021,28(12):81-89.

收稿日期:2022-06-07