

盘锻件锻造全过程仿真建模与成形规律研究

Research on Simulation and Forming Law of the Whole Forging Process for Aero Engine Disks

■ 朱宇 / 中国航发研究院 郭良刚 罗雪宝 / 西北工业大学 朱帅 / 航空工业宏远

发动机轮盘是传动和承载的关键机械部件。高性能发动机对锻件的尺寸精度和性能要求愈来愈高，通过开展发动机盘锻件锻造全过程仿真建模与成形规律研究，对提前预判零件成形过程中的问题、虚拟验证可制造性、优化工艺具有重要的意义。

轮 盘锻件作为航空发动机重要的传动和承载机械部件，对锻件的尺寸精度和性能要求也愈来愈高^[1-4]。本文研究的轮盘锻件采用TC11钛合金材料，该轮盘锻件锻造过程包含多个工序，各工序之间的变形相互关联。通过建立锻造全过程有限元仿真模型，并考虑变形信息在不同工序中的传递，实现轮盘锻件锻造全过程的建模仿真。通过大量虚拟仿真试验，探究了锻件工艺过程设计的可行性、有效性及准确性，分析了不同工艺参数的影响规律，对提前预判成形过程中的问题、虚拟验证锻件可制

造性、优化工艺具有重要的意义，可以提高效率、降低成本、缩短设计周期，并且可以提供锻造过程中的详细信息（应力应变场、速度场、温度场、网格畸变等），为优化成形工艺参数及模具结构设计提供详细可靠的依据。

轮盘锻件锻造全过程有限元建模

考虑轮盘锻件加工余量、分模面、毛边槽等因素，设计锻件三维模型如图1（a）所示。简化不适于仿真的工序，轮盘锻件的仿真过程为锻荒以及锤上模锻阶段，通过模拟这

两个成形过程，探究锻件工艺过程设计的可行性、有效性及准确性等。锻造过程建模仿真主要基于Simufact软件，将锻荒工艺中坯料、上模、下模导入Simufact软件，锻荒装配模型如图1（b）所示。在锻荒模拟完成后，将坯料成形结果传递给后续锤上模锻工艺，锤上模锻装配模型如图1（c）所示。轮盘锻件材料为TC11钛合金，采用六面体八节点网格（C3D8RT）进行划分，由于锻造过程中模型局部变形显著，会引起部分网格严重变形，采用自适应网格功能，从而保证了网格的高质量与模拟过程的高精度；定义工件与

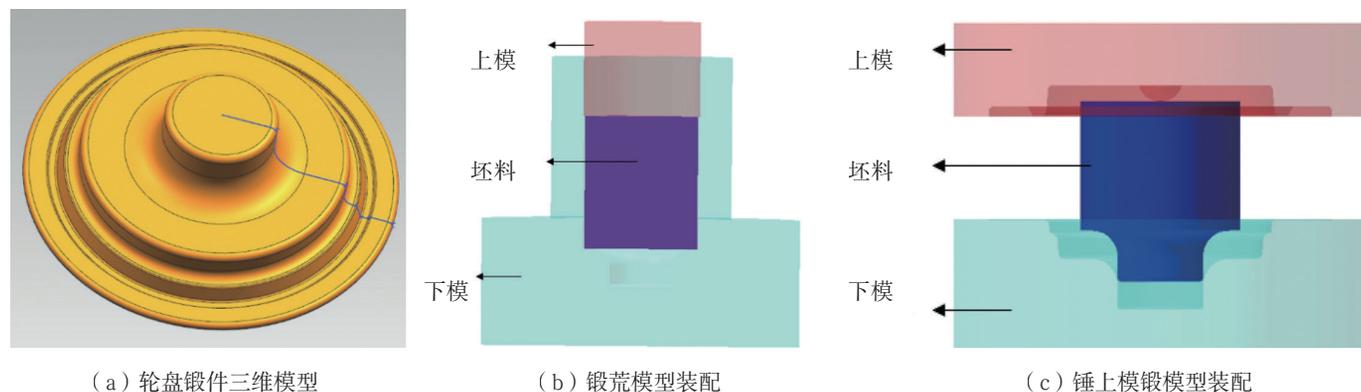


图1 盘锻件及各工序装配模型

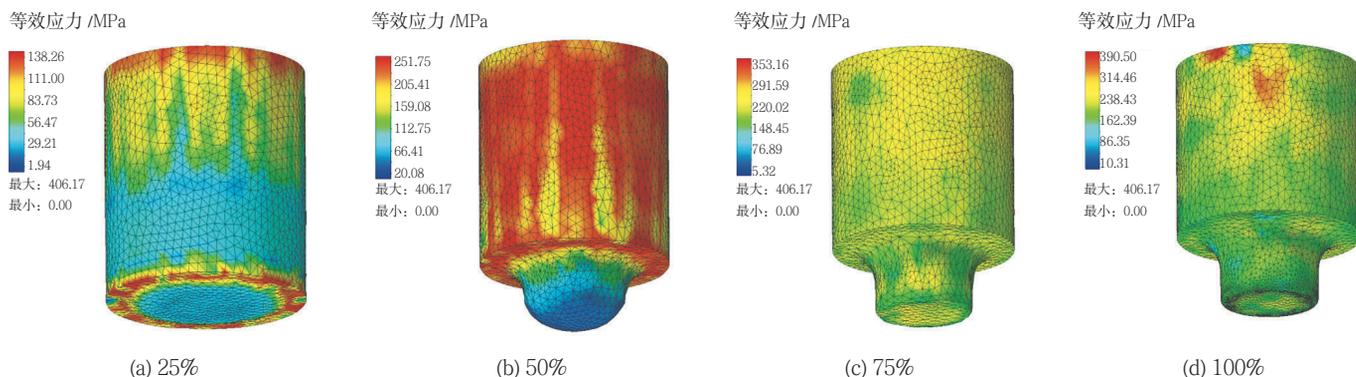


图2 锻荒工序等效应力分布云图

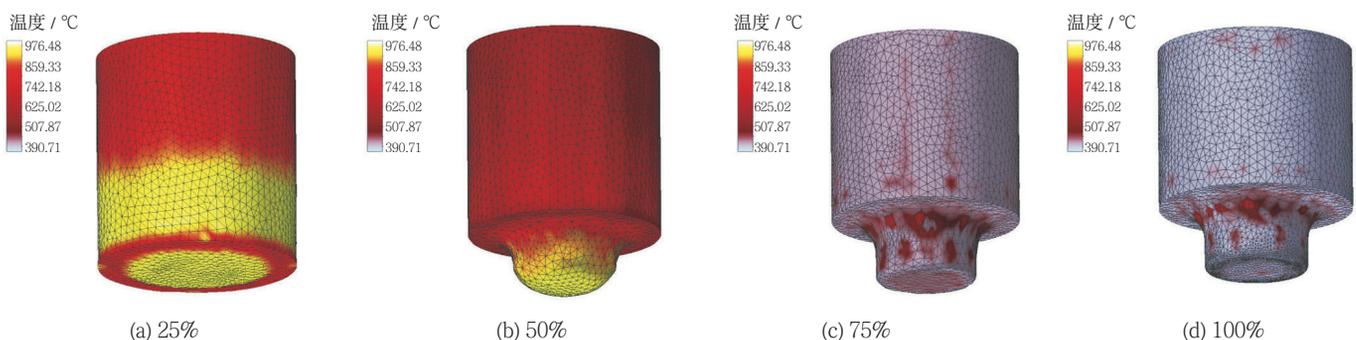


图3 锻荒工序温度分布云图

模具、模具之间相对关系及可能产生的接触关系，采用修正的Coulomb摩擦模型来描述接触对之间的切向关系；设置热边界条件，主要包括坯料与模具之间热传导、坯料与周围环境之间对流换热以及热辐射、模具与坯料之间摩擦产热、锻造过程中塑性变形产热等；根据实际生产设备及过程定义工艺边界条件，锻荒工序设置上模下压100mm，下压速度5.0mm/s；锤上模锻工序设置锻锤的击打次数为4次，最大冲击能量为630kJ，锻锤4次击打的能量分

别按照50%、50%、50%、100%设置。针对锻荒以及锤锻过程进行仿真，分析锻造过程中的坯料填充、应力应变、温度分布等变化情况和成形特点。

仿真结果分析与验证 锻荒过程仿真结果分析

轮盘锻件锻荒过程中，随着上模下压坯料，坯料在压力作用下充满模腔。锻荒成形过程中等效应力及温度在上模加载行程25%、50%、75%以及完全合模时的分布情况如

图2~图3所示。从模拟结果可以看到，在变形过程中，坯料下端变形大，坯料表面的等效应力在中间变形阶段较大，但等效应力分布较均匀，无明显的应力集中；由于金属材料在上模具的压力下不断充满模腔，金属材料与模具的接触面越来越大，由于模具的温度要比锻件的温度低，使得热量不断向模具表面上传递，金属材料的温度会降低。此外，在整个模拟过程中TC11合金坯料表面位置的温度不断下降，但中间部位温度升高，这是由于金属内部流动产生的热效应集中在中心部位，金属产生了较为复杂的温度耦合效应，成形后可以发现锻件的温度整体分布较均匀，说明成形性良好。

锤上模锻过程仿真结果分析

轮盘锻件锻造成形过程中锻锤

表1 盘件几何尺寸对比

	理论值	试验值	模拟平均值	模拟与试验偏差
盘件高度/mm	137	139.6	136.0	-2.58%
盘件最大直径/mm	430	433.4	431.1	-0.53%

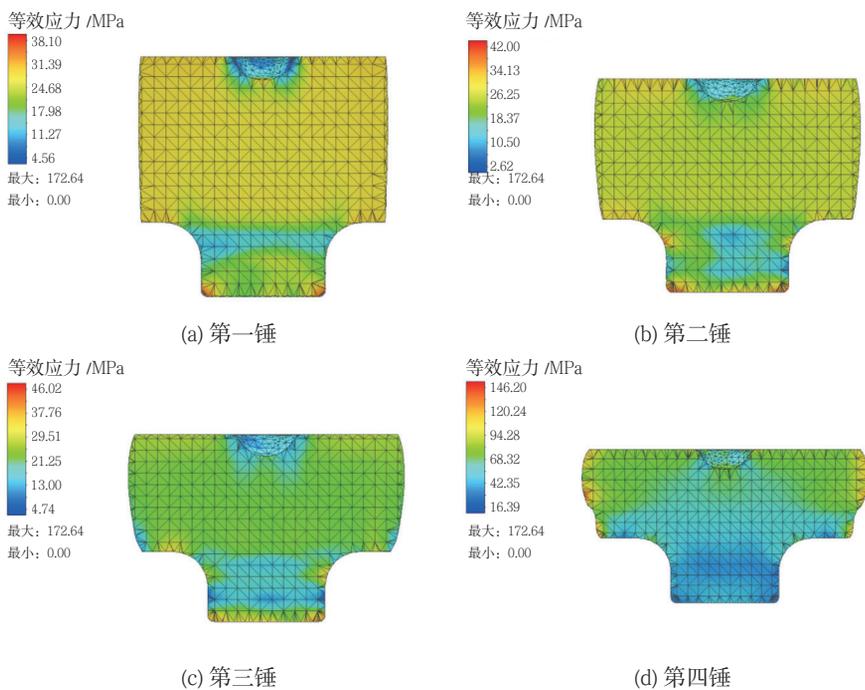


图4 锤锻工艺等效应力分布云图

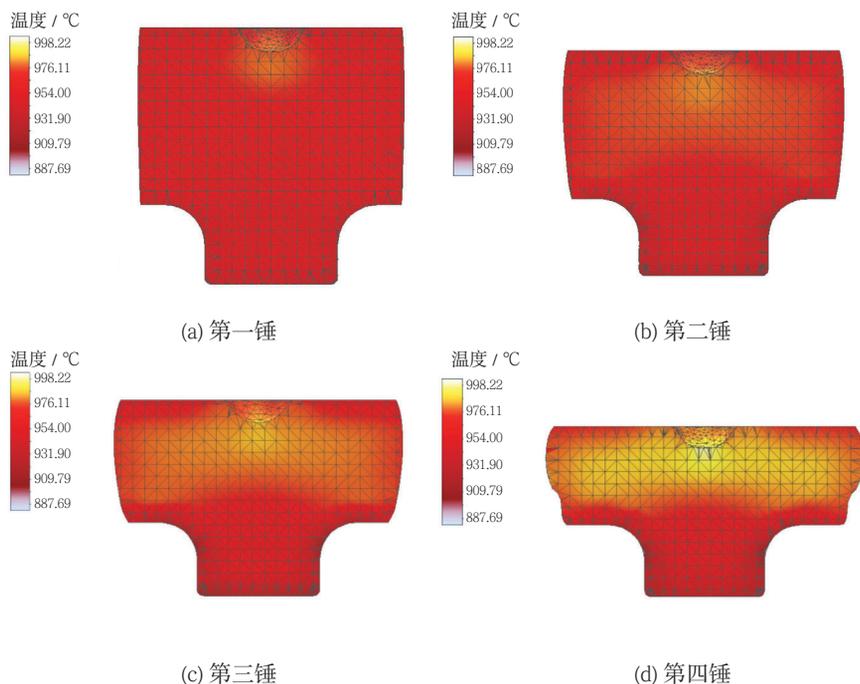


图5 锤锻过程温度分布云图

打击次数为4次，随着锻锤的每次打击，坯料在压力作用下充满模腔，相比于锻荒过程，锤锻打击速度快，成形时间短，可改善金属组织状况，

提升锻件的致密度，提高其机械加工性能。锤上模锻成形过程中等效应力及温度分布情况如图4和图5所示。从模拟结果可以看出，盘件主

要以上部分变形为主，锻件与模具接触部分等效应力较大，整个成形过程等效应力分布均匀，没有明显的应力集中，不易产生锻造缺陷；温度分布特点与锻荒类似，随着热量不断向模具表面上传递，锻件表面的温度会降低，但由于锤锻时间远小于锻荒，热损耗低，锻件的温度不会下降很多，这也是锤锻模拟的特点之一。

通过开展工艺试验进行验证，模拟结果形状变化特征与试验基本相符，如图6所示。将盘件关键尺寸参数模拟结果、试验结果与目标值进行对比，对比结果如表1所示，可以看到模拟结果与试验结果相近，最大相对误差为2.58%，模拟效果较好，具备较高的模拟精度。

锻造成形规律及优化探究 锻荒参数对成形的影响

为探究锻荒参数的影响规律，基于建立的有限元模型，对液压机速度分别选取2mm/s、5mm/s、8mm/s、10mm/s进行有限元模拟分析，重点探究不同速度对锻荒后盘件等效塑性应变、温度、等效应力的影响规律。随着下压速度的增大，锻件的等效塑性应变减小；锻件的温度逐渐升高，这是由于下压速度越快，锻件与环境进行热交换减少，同时成形过程中塑性变形热增多，故锻件温度越来越高；锻件的等效应力趋于变大，这是由于下压速度越大，锻件单位时间变形量增大，故等效应力越来越大。综合上述分析，当液压机下压速度为5mm/s时，锻件等效塑性应变较小，锻件温度处于合理范围，且等效应力取得最小值，故取5mm/s为液压机下压速度的最优值。



图6 工艺试验结果

锤锻参数对成形的影响

为探究锤锻参数的影响规律，基于建立的锤锻有限元模型，在温度等因素不变的情况下，通过改变锻锤最大打击能量设置分布来探究

盘件成形的影响规律。随着锻锤最大打击能量发生阶段的延后，锻件的等效塑性应变、等效应力和温度都有增加趋势，图7给出了不同锤锻参数对等效应力影响规律。综合分

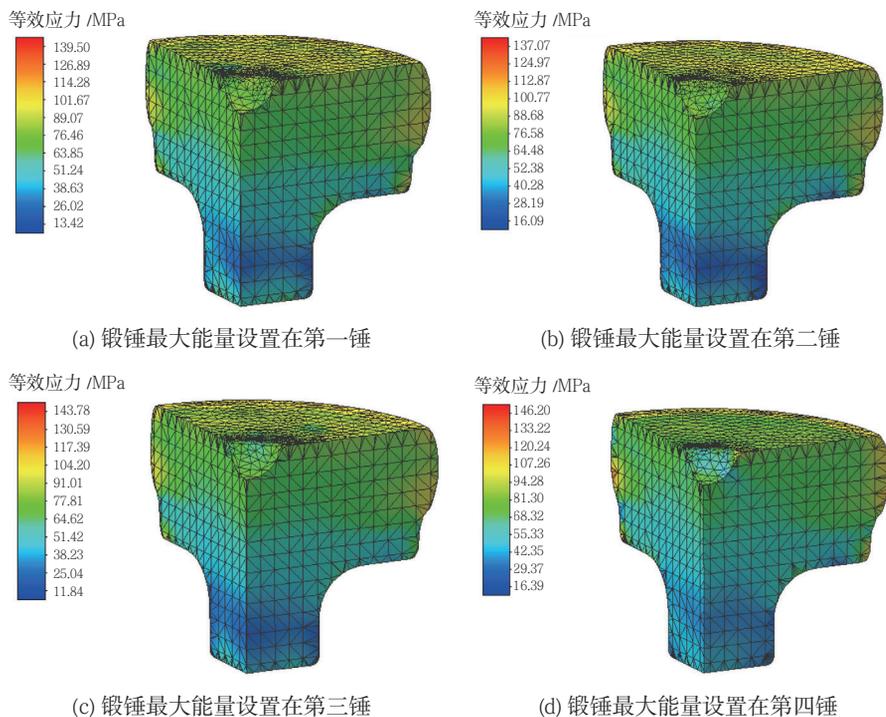


图7 不同锤锻参数对等效应力的影响

析，当主要变形发生在前期，即锤锻第二锤打击能量最大时，锻件的等效塑性应变较小，温度处于合理范围，且等效应力取得最小值，此时锤锻成形效果最好，传递到后续加工工序的残余应力最小，有利于后续加工顺利开展、减小残余应力引起的加工变形。

结束语

基于有限元方法建立发动机盘锻件锻造过程多个工序的仿真模型，实现了面向锻造全过程的系统性分析和优化，解决了传统锻造仿真多局限在单个工序、较难达到全局工艺设计与优化的问题，有利于减少物理试验、缩短工艺准备周期，对进一步实现锻件产品制造短周期、快速迭代验证具有重要的意义，也为达到航空发动机关键锻件的形性精确调控和高性能制造提供了基础。

航空动力

(朱宇，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机先进工艺与仿真技术研究)

参考文献

- [1] 郭良刚,王凤琪,梁磊,等.高性能环件轧制成形智能仿真优化新思路与研究进展[J].精密成形工程,2017,9(04):1-11.
- [2] 陈巍,徐学春,熊炜.基于数值仿真的整体叶盘锻造变形规律分析[J].模具技术,2017,(03):1-4.
- [3] 翟江波,张国伟,舒睿昶.某Ti60合金盘锻件成形工艺研究[J].热加工工艺,2021,50(11):1-5.
- [4] 朱帅,杨合,郭良刚,等.TA15环件径向轧制成形全过程组织演变模拟研究[J].航空学报,2014,35(11):3145-3155.