

叶片精密锻造过程数值模拟技术研究进展

杨舜, 李宏, 刘印刚, 李淼泉
(西北工业大学 材料学院, 西安 710072)

摘要: 介绍了叶片精锻成形的三维有限元数值模拟的过程, 以及固体型塑性有限元法和流动型塑性有限元法的特点, 针对近年来叶片精锻成形的三维有限元数值模拟技术对工艺参数及微观组织演化进行模拟的现状, 进行了详细论述, 在此基础上, 提出了叶片精密锻造的三维有限元数值模拟技术未来发展的方向。

关键词: 叶片; 精密锻造; 数值模拟; 微观组织

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.06.007

中图分类号: TG316

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2015)06-0044-08

A Review on the Numerical Simulation Technology of Aerofoil Blade Precision Forging Process

YANG Shun, LI Hong, LIU Yin-gang, LI Miao-quan

(School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: The 3D numerical simulation process of blade precision forging and the feature of both solid formulation and flow formulation has been introduced. The 3D numerical simulation technology state of technological parameter and microstructural evolution of blade precision forging process in recent years has been summarized. The trend of this technology has been proposed based on the overview.

KEY WORDS: blade; precision forging; numerical simulation; microstructure

在航空发动机、汽轮机和燃气轮机中, 叶片是能量转换的关键部件, 是航空发动机的“心脏”^[1]。叶片的质量直接关系到武器装备的作战能力和发电机的工作效率。在航空发动机中, 叶片是使用最多的零件种类, 一台航空发动机的数千片叶片中, 锻造叶片占 80%, 因此叶片的锻造工艺是十分重要的^[2]。

叶片的锻造工艺性较差^[4], 一是因为叶片的品种多、形状结构较为复杂, 带扭角, 有些内部有空心, 同一截面上各部分厚度也不尽相同, 部分叶片还带有阻尼台; 二是由于叶片工作环境极其恶劣, 对叶片本身材料要求极高, 通常选用价格昂贵的难变形材料, 这使得叶片的加工成本、生产周期和难度都大幅提升;



图1 几种典型叶片^[3]

Fig. 1 Several typical blades

三是出于对目前的新一代高推比发动机和燃气轮机性能提升的要求, 对叶片的成形精度要求很高, 这对叶片成形的模具制造也提出了更高的要求^[2]。

精密锻造技术具有锻件表面质量好、机械加工余

收稿日期: 2015-09-10

作者简介: 杨舜(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为精密塑性加工理论与技术。

量少和尺寸精度高的特点,将计算机强大的三维数值模拟技术与之相结合,成为了解决叶片加工成形的有力手段。文中通过对叶片精密锻造的三维数值模拟技术的方法和对工艺参数及微观组织的模拟现状进行详细论述,在此基础上提出叶片精密锻造的三维数值模拟技术未来发展的方向。

1 叶片精密锻造过程数值模拟方法

目前利用有限元法和相关大型软件在计算机上对叶片成形过程进行数值模拟和分析的方法,已经成为分析叶片塑性成形问题最有力的工具之一,也是应用最广泛的数值分析方法之一。通过模具结构描述、设置动态摩擦条件、动态边界识别与处理、分析对象的网格划分与再划分、二次开发并进行数值模拟运算^[5],可以获得叶片从加压到卸载整个过程的全部数值解,得出精锻过程任意时刻的温度场、应力应变分布、微观组织演变及卸载之后的残余应力和残余应变分布等,还可通过分析模具应力分布、锻造载荷、错模力及变形功等进行叶片模具模型设计和修正^[3]。

目前有限元法在叶片成形领域中应用的主要方法有两种,一种是固体型塑性有限元法(Solid Formulation),包括大变形和小变形弹塑性有限元法。这种方法同时考虑弹性变形和塑性变形,能够有效地计算残余应力和残余应变,从而可以进行回弹计算和缺陷预测,但是效率较低,大变形问题计算时间较长。另一种是流动型塑性有限元法(Flow Formulation),包括刚塑性有限元法和刚粘塑性有限元法。刚塑性有限元法具有应力计算时间短、无累积误差、适应性强、动态边界处理较容易的特点,适合于分析体积成形问题,但是不能计算回弹量、残余应力和残余应变。刚粘塑性有限元法同时考虑材料在热加工及超塑性成形过程中的塑性和粘性特性,计算时矩阵方程组为非线性方程组,计算量非常大,因此采用刚粘塑性有限元法计算时必须处理好迭代的收敛问题。目前针对刚塑性有限元法在计算中的一些问题,提出了Lagrange乘子法、罚函数法和体积可压缩法等,初始速度长的选取、刚塑性交界界面等问题也得到了较好的解决,这些都使得刚塑性有限元法得到了更广泛的应用。

2 基于数值模拟的叶片精密锻造成形规律研究

叶片精锻成形主要工艺参数数值模拟,主要依托

大型有限元分析软件如 Deform-3D, Abaqus 等对叶片精锻成形整个过程的各个物理量的变化进行数值计算,并将最后结果直接在计算机屏幕上以动画或图表的形式直观生动地显示出来,从中可以直观清晰地了解到压下量、变形温度、压下速度、摩擦因子、模具和毛坯形状尺寸等工艺参数对叶片成形过程的应力应变场、温度场、整体或典型截面的金属流动的影响规律,通过其显著性分析,获得载荷行程曲线,并据此为工艺参数调整优化和坯料、模具设计改进提供可靠依据。与实际生产工艺试验相比,工艺参数数值模拟成本低、周期短,技术数据齐全,可以根据设计者的意愿随时进行调整,因此近年来国内外许多学者都开展了这方面的研究。

林高用等人模拟了在不同坯料形状下 5083 铝合金法兰盘锻造成形的速度场、流动状态和应力-应变场,在内壁增设了飞边槽以利于锻造成形^[6]。王芳等人对 GH4169 合金叶片制坯过程中的变形温度、压下量对挤杆成形及变形速度、摩擦条件对镦头成形的各场量进行有限元模拟,优化了工艺参数^[4]。

齐广霞等人对 TA11 合金叶片制坯成形工艺过程中,上模压下速度对坯料温度场、等效应变场、载荷-行程曲线的影响进行了数值模拟,并进行了试验验证^[7]。龙丽对 TA15 合金连接件等温锻造过程的变形温度、上模速度、摩擦及圆角半径对连接件成形过程中应力、应变和温升的影响进行了数值模拟,发现上模速度和变形温度对零件成形影响显著。同时模拟了单向成形过程中正向和反向成形过程,结果表明反向成形时零件内部等效应变分布较正向成形更均匀,变形载荷比较正向小,成形效果好^[8]。张杰刚对 TC21 合金大型锻件的非等温锻造过程中变形温度、变形速度、摩擦因子和模具温度对等效应变场、温度场、等效应力场的影响规律进行了数值模拟,并应用在了某型飞机 TC21 钛合金框类零件的锻造工艺中^[9]。牟正君对应用于航空工业的某钛合金锻件和某重型燃机马氏体强热不锈钢叶片锻造过程中,温度场、应力应变场及材料损伤值的分布情况进行模拟,优化了模具尺寸,确定了预锻压下量等工艺参数,通过实际生产进行了验证^[10]。蔡军等人对 TC4 合金叶片的热模锻过程中坯料成形过程中的充填情况、应变场、应力场及终锻温度场的分布规律进行了模拟,并应用了实际生产^[11]。齐广霞等人对 TC11 合金叶片终锻过程的下压速度对叶片温度场、应力场(见图 2、图 3)和应变场的影响进行了模拟,发现压下速度

对金属流动性和成形质量起关键作用^[1]。

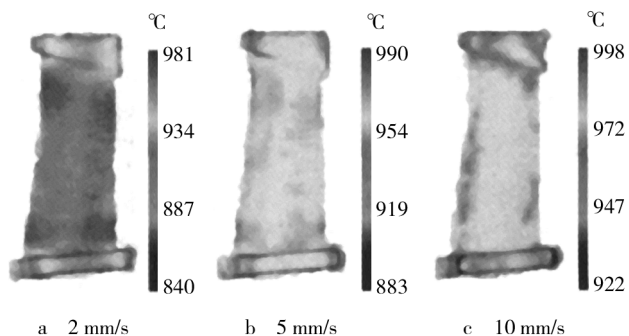


图2 不同压下速度下的温度场^[1]

Fig. 2 temperature field under different deformation rate

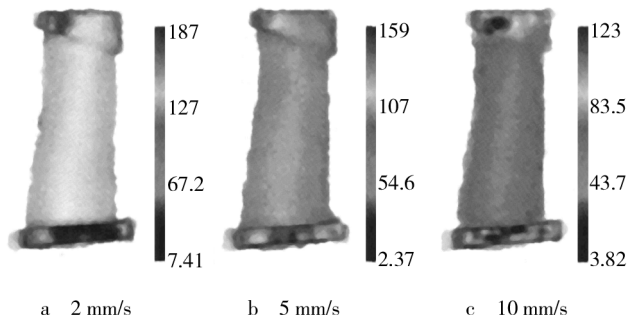


图3 不同下压速度时的等效应力场^[1]

Fig. 3 Equivalent stress under different deformation rate

吕成等人模拟分析了某重型燃机叶片的多工步锻造过程中,金属流线分布及温度场、应力-应变场等工艺参数的影响,并与实际锻造工艺试验进行了对比,吻合良好^[12]。吕成等人分析了某重型燃机压气机静子叶片的预锻和终锻过程金属流动和典型截面的等效应力及温度场变化,并用实际锻造工艺试验进行了验证^[13]。王金吕等分析了汽轮机钛合金叶片锻造过程金属流动充填、典型部位的等效应变、载荷行程结果(见图4)情况,并与实际锻造工艺试验进行对比,结果吻合良好^[14]。

房冬冬等分析了 TC6 合金叶片的锻造过程中,变形温度、摩擦因子、上模速度对叶片加工过程中的温度场、应力应变场的影响和锻后残余应力的分布情况,发现变形温度、摩擦因子和上模速度对叶片的等效应力和温度场有显著影响,对等效应变影响相对较小;叶片锻后边缘部位残余应力较大,内部残余应力较小,锻造过程中应力集中区域在锻后依然容易出现应力集中(见图5、图6)^[15]。齐广霞等人研究了 IN 718 单榫头叶片精锻成形过程中不同摩擦条件对叶片预锻成形温度场、等效应力和时间载荷曲线及终锻

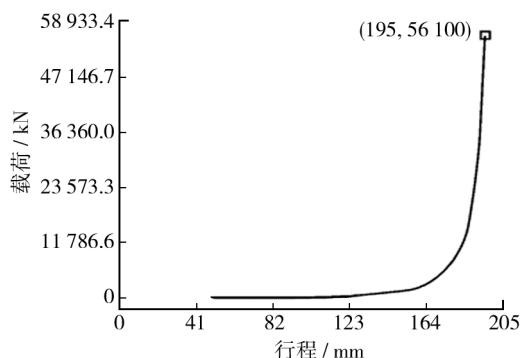


图4 叶片锻造时载荷行程曲线^[14]

Fig. 4 Stroke load curve of forging blade

成形温度场和等效应力的影响规律,并与实际生产情况进行了对比^[16]。

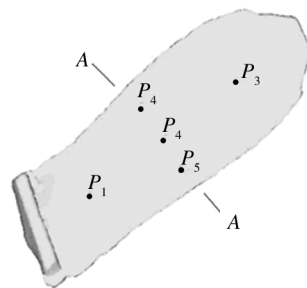


图5 叶片内部特征点及特征截面分布^[15]

Fig. 5 Distribution of characteristic section and characteristic points in forge blade

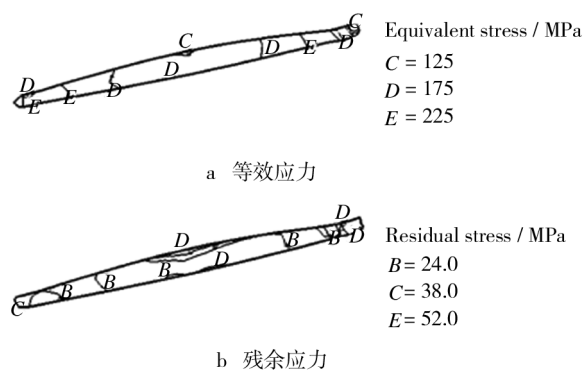


图6 TC6 合金叶片终锻后叶身 A-A 截面等效应力及卸载后残余应力分布^[15]

Fig. 6 Equivalent stress inside section A-A of TC6 alloy airfoil blade after forging and residual stress distribution after unloading

张国新分析了 RL1016R 叶片锻压过程叶片典型截面的金属流动情况,针对叶冠与叶身背弧转接处折叠缺陷对模具结构进行了改进设计并加以验证^[17]。

齐广霞等人选取 GH4169 合金叶片终锻件上的典型截面及追踪预锻件上特征点,模拟了其在整个终锻成形过程中金属流动特点及变化趋势,揭示了不同工艺参数下叶片终锻成形演化规律,并与实际终锻件进行了对比^[18]。邓太庆等人建立了 Ti-47. at% Al 合金的流动应力模型,对 Ti-47. at% Al 合金 V 型件坯料的断裂损伤分布进行模拟,分析了不同预成形坯形状、锻造速度、锻造温度对锻造过程的影响,获得了不同变形工艺参数下的位移载荷曲线。发现提高变形温度和减小锻造速度,成形较均匀,预制坯的形状对锻造过程也有很大影响^[19]。邵勇等人模拟了不同预锻叶身形式、不同扭角位置处的叶身进行终锻过程时的应变和温度场变化,优化了叶片结构(如图 7 所示),最终获得了较为理想的叶片叶身预锻结构^[20]。

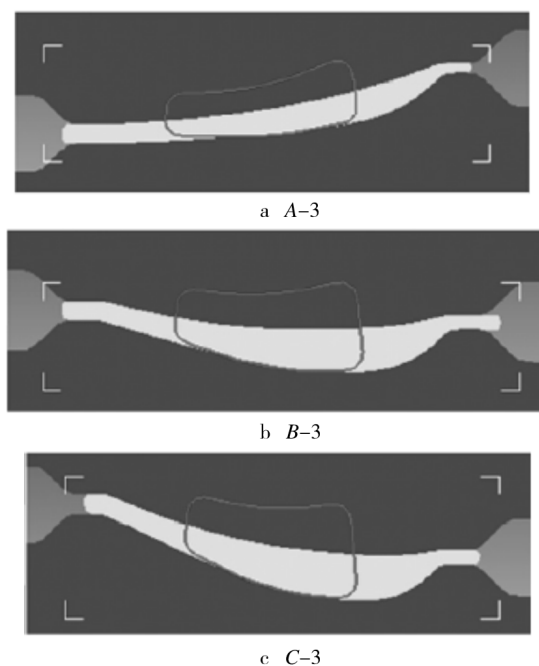


图 7 改进后的防终锻形叶身的终锻模拟结果^[20]

Fig. 7 Final forging simulation results of improved near finished-forging section shapes

张睿等人基于响应面法和数值模拟构造了表征叶片各部分应变和温度均匀性的目标函数,并据此对带阻尼台的钛合金叶片成形过程进行数值模拟和坯料优化,并经实际锻造试验后获得了满意的成形效果和组织均匀性^[21]。邵勇等人对精锻镍基合金叶片成形后出现的叶身型面偏差问题,采用型面直接补偿的方法对模具进行了优化,建立了二权重优化补偿算法^[22]。王敬针分析了不同预制坯形状的高压导叶片锻造过程中不同典型截面的金属流线和应变-应力分

布情况,优化了预制坯外形,避免了应力集中^[23]。KOCANDA 等通过涡轮叶片锻造过程的数值模拟,发现型腔中存在会引起上下模错位的侧向压力,翻腔模 x 方向的侧向压力很低,但上下模存在扭转力矩,上模存在拉应力,应为锻造近净成形匹配合适的止口镶嵌的方式^[24]。王鹏对 TC4 单榫头叶片预成形毛坯的形状和工艺参数进行优化设计,得到的最佳工艺参数:摩擦因子 $m=0.12$,模具压下速度 $v=25 \text{ mm/s}$,获得了精确充满型腔的叶片终锻件^[25]。闵慧娜分析了航空发动机二级转子 TA11 合金叶片精锻成形工艺过程中,不同上模压下速度、摩擦因子对温度场、等效应变场、等效应力场和载荷行程曲线的影响规律,解决了预锻模拟过程型腔充不满的现象,模拟结果与实际生产试验结果基本一致^[26]。

蔡旺等人在解决了三维畸变网格重新划分、由于离散的模具网格的法矢不连续造成的“死锁”问题,并采用准静态迭代法简化了速度场和温度场耦合计算过程的基础上,开发了面向叶片精锻过程的三维刚粘塑性热力耦合有限元模拟分析系统(3D-CTM),并通过圆柱体锻造试验进行了验证^[27]。Gao 等人研究了逆向追踪关键技术,逆向追踪的初速度场通过颠倒结合 N-R 迭代法直接迭代出的速度场方向获得。所提出的追踪-适应-修正的函数可以确定在逆向追踪数值模拟过程中节点是否从模具上分离,所有节点从模具上都分离时,逆向追踪数值模拟即行停止。基于该技术开发了可应用于叶片精密锻造成形的预锻设计及其他复杂的大变形过程模拟三维逆向追踪系统,应用该系统获得了无缺陷并完全充满型腔的预制坯^[28]。

3 叶片精密锻造过程中微观组织演变数值模拟

叶片的微观组织在很大程度上决定了叶片的综合力学性能,预测和控制微观组织的演化和最终结构是十分重要的。在加工过程中,叶片坯料的变形、传热和微观组织演变之间存在着复杂的耦合交互作用,还存在加工硬化和软化机制,如动态回复和静态回复、动态再结晶和静态再结晶,以及亚动态再结晶、晶粒长大等,要精确模拟叶片微观组织演变过程,需要建立能准确描述叶片变形-传热-微观组织演变过程的数学模型。目前,国内外学者建立了很多相关数学模型,如 Yada、蒙特卡罗法、自动元胞机等数学模型,并进行了相关应用,取得了许多成果^[29-30]。

史延沛等人采用钛合金高温变形时内变量微观组织模型,分析了 TC4 合金叶片在等温锻造过程中变形温度、上模速度和变形程度对 α 相的分布及晶粒尺寸的变化^[31]。李晓丽等人建立了耦合微观组织参数的金属材料高温变形流动应力模型,模拟分析了 TC6 合金叶片在等温锻造过程中变形工艺参数(压下量、

变形温度、变形速度和摩擦因子)对叶片内部初生 α 相晶粒尺寸的影响^[32-33]。齐广霞等建立了 TC6 合金的动态再结晶模型,模拟分析了变形温度和变形速度对叶片预锻成形时晶粒尺寸及分布的影响(如图 3,4 所示),获得了较合适的工艺参数^[34]。

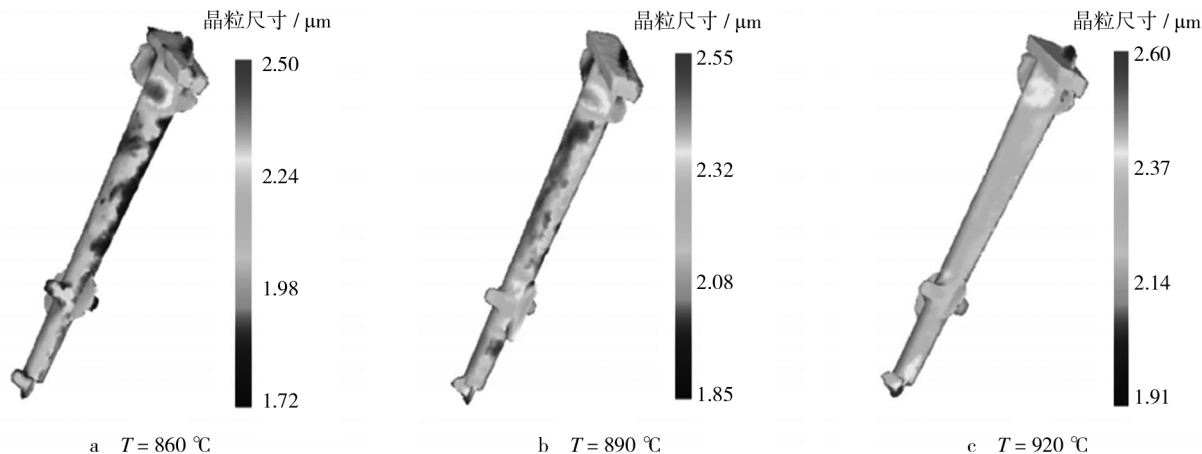


图8 不同变形温度下晶粒尺寸的分布^[34]

Fig.8 Grain size distribution of different deformation temperatures

刘君等人采用能反映微观组织演变对材料流动应力影响的本构关系和 Yada 形式的微观组织模型,对 TC4 合金叶片精锻过程进行变形-传热-微观组织演变耦合数值模拟,分析了变形温度对晶粒尺寸和体积分数的影响,发现叶身部位的晶粒尺寸分布与温度场分布类似,晶粒尺寸和 β 相体积分数随变形温度升高而增大^[35]。蔡旺等人对单榫头叶片精锻过程的晶粒尺寸进行了计算,发现晶粒尺寸随变形程度增加不断细化,叶身部位晶粒尺寸较榫头部位小;晶粒尺寸受温度和变形的双重影响,最大最小晶粒尺寸的差值随变形的进行出现了先升后降的变化^[36]。李森泉等人对 TC6 合金叶片在等温锻过程中初生 α 相晶粒尺寸进行数值模拟,发现压下量、变形温度和打击速度对初生 α 相尺寸影响显著,模具与工件之间的摩擦对初生 α 相尺寸影响较小^[37]。Na 等人对 IN 718 合金叶片微观组织进行数值模拟,IN 718 合金叶片预锻和终锻微观组织模拟结果与实际工艺试验后叶片的微观组织进行了比对(见图 9),吻合良好^[38]。

张杰刚对 TC21 合金锻件某型飞机框结构特征部分晶粒尺寸进行预测,揭示了变形工艺参数对该零件晶粒尺寸分布的影响规律^[9]。李金华利用自动元胞机方法建立了动态再结晶二维元胞自动机模型,初步实现了 TC21 合金在 β 单相区变形时的动态再结晶过

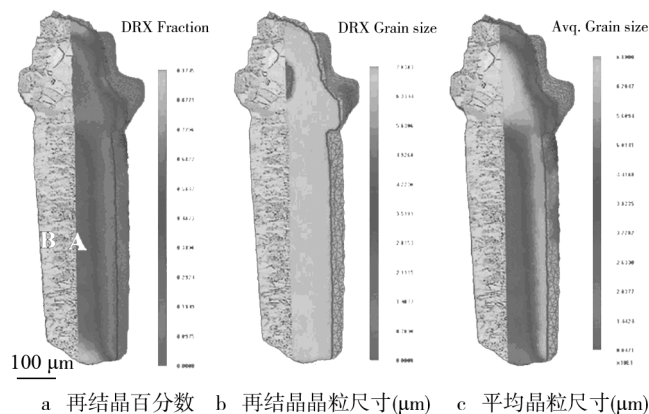


图9 终锻件实际金相组织与模拟微观结构对比^[38]

Fig.9 Actual grain structure and simulated microstructure contour of the finish forging

程的模拟,得到了动态再结晶演变的微观组织图、平均位错密度随应变变化曲线、再结晶分数随时间变化的曲线^[39]。万晶晶对某型号单榫头 GH4169 合金精锻成形过程中不同变形温度、变形速度、压下量对挤杆微观组织影响,进行了变形-传热-微观组织耦合数值模拟,优化了工艺参数,实现了整体晶粒细化^[40]。李晓丽以位错变化率为内变量建立了金属高温变形时的微观组织模型,以位错强化机制和晶界强化机制为基础建立了钛合金塑性变形本构方程,建立了变

形-传热-微观组织的有限元耦合模拟系统,分析了带阻尼台的 TC6 合金叶片精锻过程中的变形温度、变形速度、变形程度与摩擦条件对锻件内部微观组织的影响,计算了精锻过程的晶粒尺寸,并与实际叶片定量金相分析结果对比,结果吻合良好^[41]。周盛对汽轮机 1Cr12Mo 马氏体型不锈钢叶片模锻成形过程的微观组织演变进行了数值模拟,实现了动态再结晶在晶界处形核及其长大过程的模拟,分析了应变速率、温度对动态再结晶的及其形核的影响;通过对叶片在不同初始锻造温度下的微观组织演变结果进行分析,发现较高的始锻温度有利于锻后获得细化晶粒,并使得各区域晶粒尺寸趋于一致^[42]。

4 结论与展望

1) 进一步改进材料变形-传热-微观组织演变的数学模型,综合考虑变形过程中的回复与再结晶机制,建立反映变形和微观组织变化相互作用的新型本构关系,进一步提高模拟的准确性和可靠性。深入探讨分析组织变化和综合性能之间的关系,一方面结合热处理中相变情况预测和控制叶片的综合力学性能,另一方面进一步优化变形过程中的工艺参数,获得更好的微观组织。

2) 结合精密锻造和扩散连接工艺,深入研究分析各类工艺参数对叶片成形过程的影响规律和微观组织演化规律。深入研究摩擦条件,根据实际情况建立更加适合的摩擦模型。

3) 针对航空发动机叶片锻造工艺的特殊性,开发适合于各类叶片的综合软件平台,并于企业叶片锻造工艺信息平台集成使用,提高叶片数值模拟效率。

参考文献:

- [1] 齐广霞,王中原,徐培培. TC11 钛合金叶片终锻过程三维有限元模拟[J]. 热加工工艺, 2012, 41(17): 122—125.
QI Guang-xia, WANG Zhong-yuan, XU Pei-pei. 3D FEM Simulation of TC11 Alloy Blade Precision Forging Process[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(17): 122—125.
- [2] 詹梅,刘郁丽,杨合. 航空叶片的精锻工艺与模拟技术[J]. 重型机械, 1999(6): 1—8.
ZHAN Mei, LIU Yu-li, YANG He. Precise Forging and Numerical Simulation Technology of Aeronautical Blade, 1999(6): 1—8.
- [3] 邵然,徐看. 基于 Deform-3D 的叶片锻模模具设计研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(5): 148—153.
SHAO Ran, XU Kan. Study on Blade Forging Die Design Based on Deform-3D[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(5): 148—153.
- [4] 王芳,齐广霞,曹娜. GH4169 合金叶片制坯成形工艺数值模拟优化[J]. 锻压技术, 2012, 37(2): 148—153.
WANG Fang, QI Guang-xia, CAO Na. Numerical Simulation Optimization of Blocking Forming Process for GH4169 Alloy Blade[J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37(2): 148—153.
- [5] 孙曙宇,傅建. 锻造成形数值模拟中的关键技术[J]. 有色金属加工, 2008, 37(2): 46—49.
SUN Shu-yu, FU Jian. Key Techniques about Numerical Simulation in Forging Process[J]. Nonferrous Metals Processing, 2008, 37(2): 46—49.
- [6] 林高用,冯迪,孙利平,等. 5083 铝合金法兰盘锻造过程的数值模拟[J]. 金属铸锻焊技术, 2008(7): 54—58.
LIN Gao-yong, FENG Di, SUN Li-ping, et al. Numerical Simulation of Forging Process for 5083 Aluminum Alloy Flange[J]. Hot Working Technology, 2008, 37(13): 54—58.
- [7] 齐广霞,闵慧娜,陈小峰. TA11 钛合金叶片制坯过程三维热力耦合数值模拟[J]. 锻压技术, 2009, 34(2): 124—128.
QI Guang-xia, MIN Hui-na, CHEN Xiao-feng. 3D Thermal Couple Numerical Simulation of TA11 Titanium Alloy Blade Blank Making[J]. Forging & Stamping Technology, 2009, 34(2): 124—128.
- [8] 龙丽. TA15 合金锻造过程的数值模拟[D]. 西安:西北工业大学, 2005.
LONG Li. Research on Numerical Simulation of TA15 Alloy Forging Process[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
- [9] 张杰刚. TC21 钛合金锻造工艺数值模拟研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.
ZHANG Jie-gang. Research on Numerical Simulation of TC21 Titanium Alloy Forging Technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [10] 牟正君. 航空零件和重型燃机叶片锻造过程数值模拟[D]. 大连:大连理工大学, 2005.
MOU Zheng-jun. Numerical Simulation for Forging Process of Some Aeronautic Workpiece and a Gas Turbine Compressor Blade[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [11] 蔡军,李付国,任东升,等. TC4 合金叶片热模锻过程的数值模拟[J]. 宇航材料工艺, 2008(6): 15—25.
CAI Jun, LI Fu-guo, REN Dong-sheng, et al. Numerical Simulation of Hot Forging Process for TC4 Blade[J]. Aero-

- space Materials & Technology, 2008(6):15—25.
- [12] 吕成,张立文,牟正君,等. 重型燃机叶片锻造过程的三维热力耦合有限元模拟[J]. 塑性工程学报,2006,13(4):54—58.
- LYU Cheng,ZHANG Li-wen,MU Zheng-jun,et al. 3D Coupled Thermal Mechanical FEM Simulation of Forging Process of A Gas Turbine Compressor Blade[J]. Journal of Plasticity Engineering,2006,13(4):54—58.
- [13] 吕成,张立文,牟正君,等. 压气机静子叶片锻造过程的三维刚粘塑性有限元模拟[J]. 重型机械,2006(1):30—42.
- LYU Cheng,ZHANG Li-wen,MU Zheng-jun,et al. 3D Rigid-Viscoplastic FEM Simulation of Forging Process of A Compressor Stator Blade[J]. Heavy Machinery,2006(1):30—42.
- [14] 王金吕,吴静. 汽轮机钛合金叶片锻造过程的三维刚粘塑性有限元数值模拟[J]. 发电设备,2008(10):64—69.
- WANG Jin-lv,WU Jing. Numerical Simulation on Forging Process of Titanium-Alloyed Turbine Blades Based on 3D Rigid-Viscoplastic Finite Element Technology[J]. Power Equipment,2008(10):64—69.
- [15] 房冬冬,李森泉,罗皎. 工艺参数对 TC6 合金叶片锻造变形的影响[J]. 锻压技术,2010,35(4):160—165.
- FANG Dong-dong,LI Miao-quan,LUO Jiao. Effect of Processing Parameters on TC6 Alloy Airfoil Blade During Forging Process[J]. Forging & Stamping Technology,2010,35(4):160—165.
- [16] 齐广霞,邓华红,庞红. 航空发动机叶片精锻成形过程的热力耦合数值模拟[J]. 沈阳理工大学学报,2009,28(4):56—60.
- QI Guang-xia,DENG Hua-hong,PANG Hong. The Coupled Thermomechanical Simulation on Precision Forging Process of Blade for Aeroengine[J]. Transactions of Shenyang Ligong University,2009,28(4):56—60.
- [17] 张国新. RL1016R 叶片模锻成型及其有限元分析[J]. 热加工工艺,2012(1):106—110.
- ZHANG Guo-xin. RL1016R Blade's Die Forging Shaping and Its Finite Element Analysis[J]. Hot Working Technology,2012,41(1):106—110.
- [18] 齐广霞,曹娜,史丽坤. GH4169 合金叶片终锻成形宏观场量规律数值模拟[J]. 锻压技术,2011,36(5):155—162.
- QI Guang-xia,CAO Na,SHI Li-kun. Laws of Macro-field Numerical Simulation in GH4169 Alloy Blade Final Forging[J]. Forging & Stamping Technology,2011,36(5):155—162.
- [19] 邓大庆,胡连喜. Ti-47. at% Al 合金的等温锻造模拟[J]. 材料科学与工艺,2013,21(4):89—94.
- DENG Tai-qing,HU Lian-xi. Simulation of Isothermal Forging of Ti-47. at% Al Alloy[J]. Materials Science & Technology,2013,21(4):89—94.
- [20] 邵勇,郭平义. 基于 Deform 的叶片叶身预锻结构形式优化设计[J]. 锻压技术,2012,37(5):12—17.
- SHAO Yong,GUO Ping-yi. Optimal Pre-forging Shape Design of Blade Body Based on Deform Software[J]. Forging & Stamping Technology,2012,37(5):12—17.
- [21] 张睿,刘东,赵兴东,等. 钛合金叶片坯料的响应面(RSM)优化方法[J]. 热加工工艺,2012,41(13):18—25.
- ZHANG Rui,LIU Dong,ZHAO Xing-dong,et al. Method on Optimization of Titanium Alloy Blade Perform by Using RSM[J]. Hot Working Technology,2012,41(13):18—25.
- [22] 邵勇,陆彬,Hengan Ou,等. 精锻叶片模具三维面优化技术[J]. 上海交通大学学报,2012,46(10):1616—1621.
- SHAO Yong,LU Bin,OU Hengan et al. 3D Die Shape Optimization Technology for Net-Shape Forging of Aerofoil Blade[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2012,46(10):1616—1621.
- [23] 王敬. 预制坯形状对高压导叶片锻造成形过程中金属流动的影响[J]. 锻压装备与制造技术,2014(3):60—62.
- WANG Jing. The Impact of Pre-Blocking Shape on the Metal Flow in Forging Process of High Pressure Guide Blade[J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology,2014(3):60—62.
- [24] KOCANĀDA A,CZYŻEWSKI P,KHEDHEYER H. MEHDI. Numerical Analysis of Lateral Forces in a Die for Turbine Blade Forging[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering,2009(4):49—54.
- [25] 王鹏. 基于数值模拟的叶片精锻过程优化设计[D]. 西安:西北工业大学,2005.
- WANG Peng. Optimal Design of Precision Forging Process of Blade Based on Numerical Simulation[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2005.
- [26] 闵慧娜. 钛合金二级叶片精锻过程数值模拟研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2009.
- MIN Hui-na. Numerical Simulation on Precision Forging Process of TA11 Alloy Second-Class Blade[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University,2009.
- [27] 蔡旺,刘郁丽,杨合,等. 叶片精锻三维刚粘塑性热力耦合有限元模拟系统[J]. 上海交通大学学报,2005,39(1):1—5.
- CAI Wang,LIU Yu-li,YANG He,et al. Investigation in 3D-CTM Software for Simulating Precision Forging Process of Aero-Engine Blade[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2005,39(1):1—5.

- [28] GAO Tao, YANG He, LIU Yu-li. Backward Tracing Simulation of Precision Forging Process for Blade Based on 3D FEM[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16: s639—644.
- [29] 侯会喜. 钛合金锻造模拟成形技术发展现状[J]. 长沙航空职业技术学院学报, 2008, 8(1): 55—58.
HOU Hui-xi. Present Situations of Simulation Forming Technology for Titanium Alloy Forging[J]. Changsha Aeronautical Vocational and Technical College Journal, 2008, 8(1): 55—58.
- [30] 周盛, 傅建, 王涛, 等. 叶片模锻过程的微观组织数值模拟研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2008(3): 63—66.
ZHOU Sheng, FU Jian, WANG Tao, et al. Research on Numerical Simulation about Blade Microstructure in Die-Forging[J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2008(3): 63—66.
- [31] 史延沛, 李森泉, 罗皎. TC4 钛合金叶片锻造过程中晶粒尺寸的数值模拟[J]. 锻压装备与制造技术, 2009(2): 101—104.
SHI Yan-pei, LI Miao-quan, LUO Jiao. Finite Element Simulation of Grain Size During Isothermal Forging Process of the TC4 Aerofoil Blade[J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2009(2): 101—104.
- [32] 李晓丽, 李森泉, 李锋, 等. TC6 合金等温锻造过程中晶粒尺寸的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(9): 1332—1337.
LI Xiao-li, LI Miao-quan, LI Feng et al. Numerical Simulation of Grain Size During Isothermal Forging of TC6 Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(9): 1332—1337.
- [33] 李晓丽, 李森泉. TC6 钛合金叶片等温锻造过程中晶粒尺寸的数值模拟. 第九届全国塑性工程学术年会论文摘要集: 253—256.
- [34] 齐广霞, 李晔, 陈晓峰. TC6 合金叶片预锻过程中微观组织的数值模拟[J]. 锻压技术, 2010, 35(5): 142—147.
QI Guang-xia, LI Ye, CHEN Xiao-feng. Numerical Simulation of Microstructure Evolution During TC6 Alloy Blade Final Forging Process[J]. Forging & Stamping Technology, 2010, 35(5): 142—147.
- [35] 刘君, 刘郁丽, 杨合, 等. 基于多场耦合分析的 TC4 叶片精锻成形的微观组织模拟[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(4): 64—68.
LIU Jun, LIU Yu-li, YANG He, et al. Microstructure Simulation of TC4 Blade Precision Forging Process Based on Multiple Field Coupling Analysis[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(4): 64—68.
- [36] 蔡旺, 杨合, 李从心. 热力耦合作用下叶片锻造晶粒尺寸的预测[J]. 锻压技术, 2004(6): 67—69.
CAI Wang, YANG He, LI Cong-xin. Prediction of Grain Size in the Forging Process of Blade under the Action of Coupled Thermo-Mechanical Forming[J]. Forging & Stamping Technology, 2004(6): 67—69.
- [37] 李森泉, 薛善坤, 陈胜晖, 等. 钛合金叶片等温精锻晶粒尺寸的数值模拟[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(11): 1380—1386.
LI Miao-quan, XUE Shan-kun, CHEN Sheng-hui, et al. Finite Element(FE) Simulation of Grain Size During Isothermal Forging of Airfoil Blade[J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(11): 1380—1386.
- [38] YOUNG Sang-na, JONG Taek-yeom, NHO Kwang-park, et al. Simulation of Microstructures for Alloy 718 Blade Forging Using 3D FEM Simulator[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141: 337—342.
- [39] 李金华. TC21 钛合金热加工过程的微观组织演变及模拟研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
LI Jin-hua. Research on the Microstructure Evolution and Simulation of TC21 Titanium Alloy in the Hot Working Process[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [40] 万晶晶. 高温合金叶片经锻成形过程中微观组织的数值模拟[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2009.
WAN Jing-jing. Numerical Simulation of Microstructure Evolution During Superalloy Blade Forging[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2009.
- [41] 李晓丽. 钛合金高温变形时跨层次模型及数值模拟[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
LI Xiao-li. Multi-scale Modeling and FE Simulation During High Temperature Deformation of Titanium Alloys[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
- [42] 周盛. 叶片模锻过程中微观组织演变的数值模拟研究[D]. 成都: 西华大学, 2009.
ZHOU Sheng. Research on Numerical Simulation about Turbine Blade Microstructure Evolution in Die-Forging[D]. Chengdu: Xihua University, 2009.
- [42] 张岩, 莫蓉, 常智勇. 航空发动机叶片锻造多态信息模型构建及应用方法研究[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(6): 877—882.
ZHANG Yan, MO Rong, CHANG Zhi-yong. Research on Multi-status Information Model Construction and Application Method of Aero Engine Blade Forging[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(6): 877—882.