

航空发动机环形锻件成形制造过程有限元仿真

Finite Element Simulation on the Deforming Process of Aero-engine Annular Blanks

大连理工大学过程装备与控制工程系 王泽武

[摘要] 基于有限元数值方法建立了 RAW200/160-5 型径轴向轧环机轧制某航空发动机涡轮机匣环形锻件的三维仿真模型,对成形过程进行了虚拟轧制,计算结果与实际生产过程非常吻合,结果还显示了环件轧制实时扩展的过程。

关键词: 环形锻件 环件轧制 数值模拟 有限元法

[ABSTRACT] A three dimensional numerical model of the RAW200/160-5 radial axial ring rolling machine is built based on the finite element method, and then the entire virtual rolling process of a turbine case blank is realized. The simulation results that it keeps good agreement with the practical deforming process, and the real-time expanding of ring is also given out.

Keywords: Annular blanks Ring rolling Numerical simulation Finite element method

轧制成形的环形锻件占 Pratt & Whitney (P&W) 公司研发的第 4 代 F135 联合战斗机所有发动机锻件成本的 12%,是一种量大面广、精度高、载荷大的重要零件。环件原材料主要由重量轻、比强度高、耐高温、抗腐蚀的贵重合金构成,如 Ti-6Al-4V, IN718 合金等。这些环件结构复杂、加工难度大、技术要求高。采用传统的试凑法生产 F135 发动机环形零件的废品率达到 12%~14%,且制造周期长,成本高。为了降低成本、减少材料浪费, P&W 和它的承包商联合美国俄亥俄州大学开发了 PREFORMA-RING 和 UBET-RING 预成形设计和仿真软件工具,并应用到著名的弗斯里克森(Firth Rixso)公司环件轧制成形制造过程中,缩短了 25%的研发周期^[1-2]。

通过以上分析可知,基于传统的试凑法已不再适应现代航空发动机环形零件制造的需要。而我国主要还是采用传统的试凑法生产航空发动机环形零件^[3-4],而且大型轧制设备也主要依赖进口,投资大,数量少,因此如何提高环件轧制效率成为研究的热点和难点。文献 [2] 和 [5] 基于上限单元法(UBET),对两种典型航空环形

零件进行了二维径向轧制(忽略了轴向轧制)进行了数值模拟研究,数值仿真结果和实际生产过程特征比较吻合,对实际生产具有一定指导意义,但由于采用二维轧制,而且对速度场进行了过多简化,其计算精度和应用推广相当有限。为此本课题提出采用三维动力显式有限元数值方法研究某航空发动机涡轮机匣的虚拟轧制成形过程。目前对于此类异形截面环件成形制造全过程三维动态仿真在国内外还鲜有报道。

1 有限元数值建模

1.1 环件轧制技术

环件轧制技术是机械零件制造技术与轧制技术交叉结合而成用来生产无缝环形零件的一种先进制造技术,具有高效、节材、节能、精度高、噪声小等优点。图 1 是 RAW200/160-5 型径轴向轧环机结构示意图^[6],包括主辊、芯辊、锥辊、抱辊、测量辊和环件。主辊为驱动辊,作旋转轧制运动;芯辊(径向机架)作径向直线进给运动,趋近于主辊轮廓面;两个锥辊以环件线速度做同步旋转且上端面锥辊渐渐地向下移动;轴向机架根据环件外径变化作水平运动;两个抱辊从两侧抱住环件,对环件起到定心、防振和归圆作用。当经反复多转轧制使环件直径达到预定值时,芯辊径向进给和锥辊轴向进给运动停止,环件轧制过程结束。

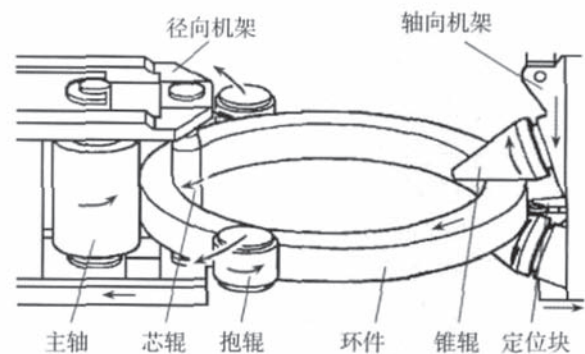


图 1 径轴向轧环机示意图

Fig.1 Schematic diagram of the radial-axial ring rolling machine

由以上描述可以看出,环件轧制技术不仅具有普通的平板轧制、异步轧制、多道次轧制的性质,而且还涉及到直线进给运动、旋转轧制运动、导向运动以及环件自身的转动和直径扩大运动,这使得精确控制环件轧制成形过程变得尤为复杂。而且环件轧制过程同时具有材料非线性、几何非线性、边界条件非线性等复杂问题,因此使得数值模拟也变得更加困难^[7-8]。

1.2 计算软件的选取

动力显式有限元能够有效解决高度非线性问题并具有很高的计算效率,几乎成为分析金属塑性成形问题的首选方法。环件轧制也是一个复杂动力学过程,因此采用动力显式有限元方法分析环件轧制过程成为可能,并且已经有文献对此进行了探讨^[9-10]。LS-DYNA 是一个通用动力显式有限元软件,在求解几何非线性、材料非线性以及接触非线性问题中具有非常强大的计算能力,具有计算精度高、效率高等特点,适合于求解金属加工、接触-碰撞、穿甲和爆炸等问题,而且其质量缩放技术能够有效减少计算时间^[7]。为此本文采用 LS-DYNA 软件建立如图 2 所示 RAW200/160-5 型径轴向轧环机轧制某航空发动机涡轮机匣环形锻件有限元模型。

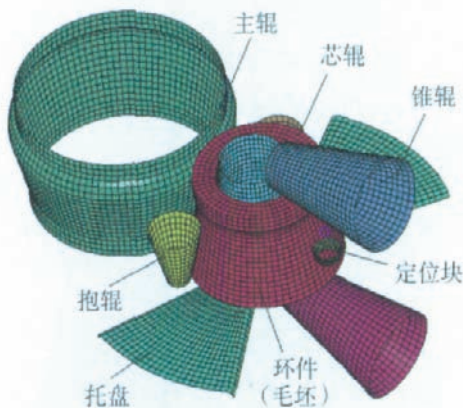


图 2 轧制有限元模型

Fig.2 Finite element model of the rolling process

模型由主辊、芯辊、环件、抱辊、测量辊和托盘组成。确各轧辊和托盘在环形锻件轧制过程中的变形非常小,为了减少计算时间,均假设为刚体,简化为壳单元,其结构参数按径轴向轧环机实际结构参数给定。工件采用 Solid165 体单元,并用等分六面体自动扫描划分网格,生成 4 080 个单元和 5 712 个节点。工件材料取 Ti-6Al-4V 合金,轧制温度为 950℃,其材料性能参数为:弹性模量 $E=1.0 \times 10^{10}$ Pa,密度 $\rho=4.20 \times 10^3$ kg/m³,泊松比 $\mu=0.36$,屈服应力 $\sigma_s=2.0 \times 10^7$ Pa,切向模量

$E_{tm}=5 \times 10^7$ Pa。材料本构关系取双线性同向强化模型,整个轧制时间大约 28s。根据生产经验,环件在轧制过程中温度下降比较小(约 50℃),而且合金材料在温度超过 800℃以后,表现出很好的塑性,屈服应力在一定温度范围几乎为常数,因此忽略温度梯度对金属流动的影响。辊与环件接触采用 LS-DYNA 软件面面自动接触,摩擦采用库仑摩擦模型,摩擦系数取 0.4^[5,11]。

2 毛坯结构和轧制工艺

2.1 毛坯结构

图 3 是某航空发动机涡轮机匣环形锻件结构参数示意图,图 4 是按文献[3]提供的参数确定的毛坯初始结构参数,锻件体积为 0.050 628m³,初始毛坯体积为 0.051 957m³,留 2.6%的加工余量。

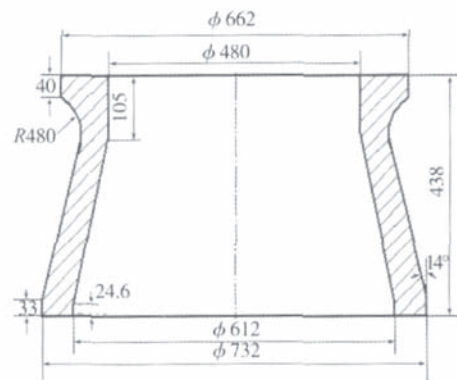


图 3 成品锻件结构示意图

Fig.3 Structure of the finished blank

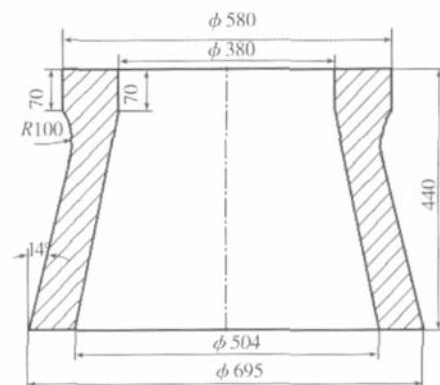


图 4 初始毛坯结构示意图

Fig.4 Structure of the initial blank

2.2 主辊、芯辊进给速度

主辊转速恒定,取 1.4m/s,轧制过程分为 3 个阶段:初始辗压、稳定辗压和精整辗压。初始辗压阶段,压下量变化为 0 → 1mm/s;稳定辗压期间,坯料充满了孔型型

腔,进给速度不变,压下量为 2.5mm/s;停止进给后,精整辗压阶段开始,到辗压结束,压下量变化为 1 → 0mm/s,总的进给量为 30mm。

2.3 锥辊和抱辊的运动控制

抱辊和锥辊在环件轧制过程中起着非常重要的作用,它的运动轨迹也非常复杂。在数控轧环机中,抱辊和锥辊的运动轨迹是通过位移和力传感器实时检测数据,再反馈到控制台并进行实时修正给定的。由于传统有限元软件求解模型中要求不含未知变量,因此,一些文献^[8-9,12]就简化了数值仿真模型,直接忽略了抱辊或者锥辊的影响,仅仅获得一些粗略的结果。为了实现抱辊和锥辊运动轨迹的实时修正,本文提出通过 ANSYS 软件的 APDL (参数化语言)编写一个用户子程序,把 LS-DYNA 作为一个有限元计算模块,对每个轧制时间同步的金属变形过程进行计算,然后读取该时刻的计算结果并为下一时间步的轧辊运动进行修正,从而实现一个重复调用不间断的计算过程,直到轧制时间达到最终轧制时间(t_{last}),结束计算。其计算模型如图 5 所示。

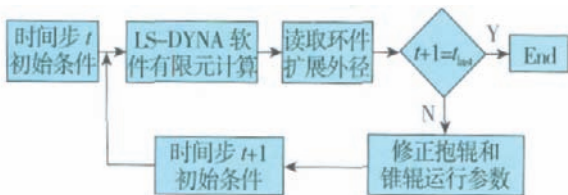


图 5 控制各轧辊计算模型

Fig.5 Computational model for controlling of the rollers

图 6 所示是环件扩展外径检测模型,模型中 C 点是毛坯外径扩展检测点。同时规定锥辊与毛坯外圆端面相对位置(A 点)始终不变,在轧制过程中测量块随着毛坯同步后退,再通过测量块位移值(B 点)控制锥辊作同步后退,从而使得上下锥辊转动线速度始终与毛坯外径

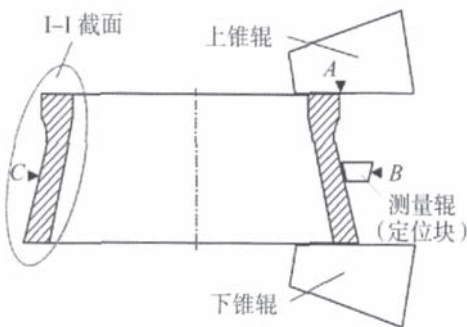


图 6 环件扩展外径检测模型

Fig.6 Measure model of expanded out-diameter of the ring

转动线速度一致,实现上下锥辊始终与环件作同步协调运动。

3 仿真结果分析与讨论

整个仿真过程在 Petium 3GB,内存 1GB 的个人计算机上执行,运算时间大约 84 个小时。图 7 (a)是环件在轧制结束时的截图,图 7 (b)是在环件轧制结束时的图 6 中的 I-I 环件截面图,反映了环件在轧制过程中金属流动及轴径向孔型轧制成形情况。图 8 显示的是环件轧制成品锻件和模拟锻件横截面对比图。可以看出成品锻件和实际产品规格非常吻合,但是轧制成品环件向左侧略有倾斜,这是由于环件呈锥形结构,存在斜向轧制。因此,在毛坯结构设计时尽量与成品保证相同的斜度,并在轧制完成后对模具进行热态校正。

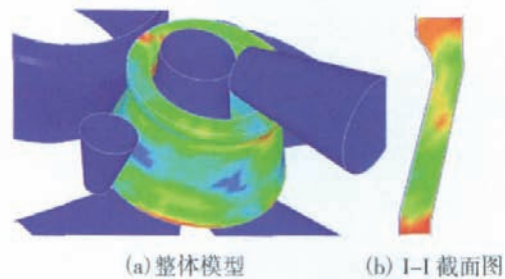


图 7 轧制结束时整体模型

Fig.7 Graph of the ring and rollers at the final state

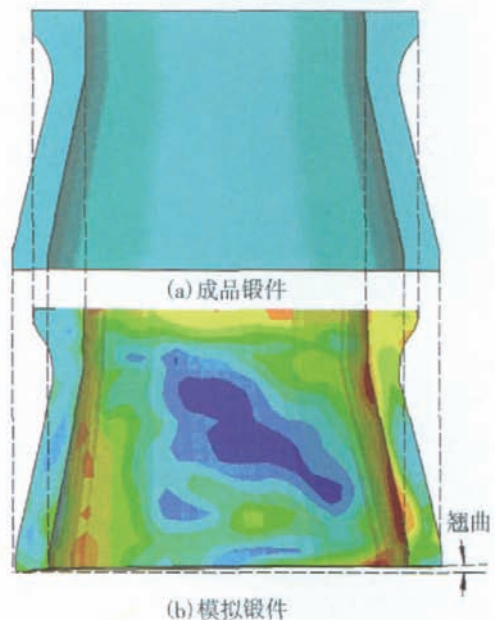


图 8 成品锻件和模拟锻件对比图

Fig.8 Comparison between the finished blank and simulated blank

图9显示了图6中环件I-I截面C点外径随着轧制时间位移扩展的曲线图,该位移值直接反映了环件直径的增长规律。从图中可以看出,在轧制初期,环件处于咬入孔型状态,环件直径扩展缓慢,在14~24s,环件稳定快速增长,到轧制后期环件外径趋于稳定轧制,直径不再扩展。

图10是图6中环件上的A点X向和Z向随时间变化的位移值。从这些周期性变化的位移值可知,毛坯在轧制过程中扩展均匀,增长稳定,这些现象与实际轧制过程中现象均比较吻合^[3,13]。同时通过A点X向、Z向位移值周期性变化还可以识别环件在轧制过程中的转动情况。

4 结论

(1)航空发动机环形零件是一个应用非常广泛的高精度重要零件,本课题采用数值模拟技术在计算机上再

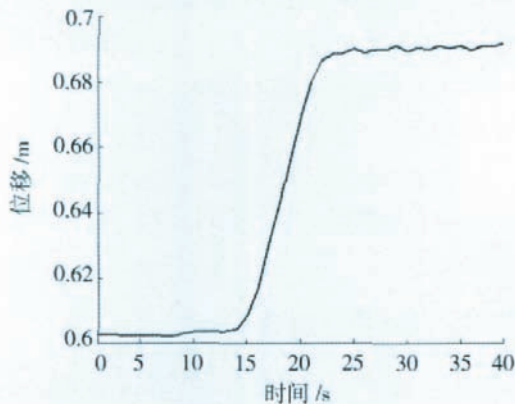


图9 环件外径扩展变化曲线图

Fig.9 Expanded curve of out-diameter of the ring

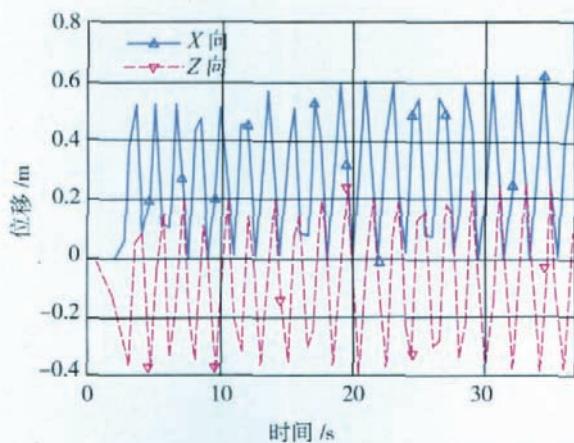


图10 环件A点随时间变化的X、Z位移值

Fig.10 Displacement of A point on the ring changing with time in the X, Z directions

现环形锻件动态成形制造过程,探讨轧制成形机理,可避免费时耗资的重复实验,有利于缩短研发周期,降低成本。

(2)本课题根据文献[3]提供的某涡轮机匣结构参数,基于通用动力有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立了 RAW200/160-5 型径轴向轧环机动态轧制三维计算机仿真模型,并进行了数值模拟研究,仿真结果展现了该环件轧制实时扩展的动态过程。

(3)计算机仿真结果与涡轮机匣环形锻件实际生产过程比较吻合,证明用计算机模拟方法基本符合实际,可用于指导制定涡轮机匣环形锻件成形制造工艺,而且该数值模拟研究方法也适用于其它航空发动机用异形截面环件的轧制工艺研究。

参 考 文 献

- [1] Nary Metalworking center. (2008-9-10) [2009-04-10]. <http://www.ncemt.ctc.com/useruploads/file/publications/ACF56.pdf>.
- [2] Alfozan A. Development and validation of UBET for forward and backward ring rolling process [D]. OH: The Ohio University, 2003.
- [3] 张华. 环形锻件精化工艺研. 机械加工(热加工), 2002 (1): 56-57.
- [4] 王华. 镍基高温合金轧环件锻造缺陷分析. 红旗技术, 2002 (4): 19-21.
- [5] Ranatunga P V. Modeling of profile ring rolling with upper bound elemental technique [D]. OH: The Ohio University, 2002.
- [6] Szabo Z J, Dittrich E. Manufacturing systems for the production seamless rolled rings. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 60:67-72.
- [7] Wang Z W, Zeng S Q, Yang X H, et al. The key technology and realization of virtual ring rolling. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182: 374-381.
- [8] Davey K, Ward M J. An ALE approach for finite element ring rolling simulation of profiled rings. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139: 559-566.
- [9] Xie C L, Li S J, Huang S H. Rigid-viscoplastic dynamic explicit FEA of the ring rolling process. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 81-93.
- [10] 王泽武,袁海伦,曾青,等. 大型锥形环件成型制造新工艺及数值模拟研究. 核动力工程, 2007, 8 (2): 69-72.
- [11] 中国机械工程学会锻压分会. 锻压手册(锻造). 北京: 机械工业出版社, 2002: 33, 75, 597.
- [12] Forouzan M R, Salimi M, Gadala M S. Guide rolls simulation in FE analysis of ring rolling. Journal Materials Processing Technology, 2003, 142: 213-223.
- [13] 华林,黄兴高,朱春东. 环件轧制理论和技术. 北京: 机械工业出版社, 2001: 72-100.

(责编 阳光)