

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0517

航空发动机涡轮轴穿轧一体化成形工艺及其数值模拟与分析

陈 潜^{1,2}, 束学道^{1,2*}, 李依蔓^{1,2}, 李子轩^{1,2}, 徐海洁^{1,2}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为解决航空涡轮轴成形难、制造流程长、材料利用率低等问题, 提出了一种穿轧一体化成形工艺, 运用多辊系斜轧技术, 在外表面加工上克服阶梯状大断面收缩率的制造难题, 在内孔加工上实现由减材制造到等材制造的转变。采用 Simufact 有限元软件对镍基高温合金 GH4169 涡轮轴坯的成形过程进行数值模拟, 分析其成形过程中轧件金属流动以及应力应变场、力能参数的变化规律, 验证了新工艺的可行性。

关键词: 航空涡轮轴; 穿轧一体化; 多辊系斜轧; 等材制造

中图分类号: TG335.13

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 06-0024-06

作为航空发动机核心传动零件的涡轮轴, 是一种带台阶的深长空心轴, 具有断面收缩率较大的外表面和等径内孔, 在实现机体轻量化的基础上, 还能承受更大的扭矩^[1-2]。目前涡轮轴的加工方式以锻造成形轴坯后深加工内孔技术为主^[3], 不仅制造工序冗长, 而且内部金属流线被切断, 在恶劣的工作环境下极易出现各种失效^[4]。

斜轧工艺常用于管材和轴类件的制造, 近年来在空心轴领域研究成果较多。束学道等^[5]利用 Simufact 有限元软件, 分析了高速列车空心车轴带芯棒的三辊斜轧成形过程的可行性。Xia 等^[6]提出将三辊斜轧运用到多台阶空心轴的制造, 并得到了最优转速组合。李胜祗等^[7]利用有限元工具探究了三辊斜轧过程中送进角对定径减径量的影响。Gryc 等^[8]利用有限元工具探究了三辊斜轧过程中工艺参数对温度场的影响。Pater 等^[9-11]对卡车和汽车车轴进行了有限元仿真和实验研究, 并开发了一台数控斜轧机。王付杰等^[12]首次介绍了无缝钢管的斜连轧工艺及特点, 并研制了一台斜连轧实验机组。随后, 陈建勋等^[13]和毛飞龙等^[14]在该机组上开展实际轧制实验, 并结合有限元仿真应力

变化分析, 验证了无缝钢管的斜连轧工艺的可行性。牛旭等^[15]进一步对工艺参数进行修正, 得到斜连轧各辊组之间的转速关系。但是三辊斜轧工艺主要集中于封闭螺旋孔型中较短回转体或等截面回转体的成形, 并且在加工时要求使用空心轴坯, 导致工序仍然冗长。斜连轧工艺虽然减少了工序, 但是只能成形空心管材, 无法成形阶梯轴。

本文提出了运用多辊系斜轧技术的空心轴穿轧一体化成形新工艺, 并以航空涡轮轴坯为研究对象, 对穿轧一体化成形过程中金属流动进行仿真模拟, 研究了成形过程中轧件应力应变场、力能参数的变化规律, 以期航空涡轮轴穿轧一体化成形提供理论支持。

1 穿轧一体化成形原理

穿轧一体化成形是指初始轴坯在经过多道次斜轧连续变形的同时进行穿孔, 从而最终得到所需的空心阶梯涡轮轴, 其原理如图 1 所示。考虑到涡轮轴大断面收缩率的要求以及材料难加工的特性, 整个轧制过程分 3 部分: 穿孔段、一道次减径段、二道次减径段。其中穿孔成形是使用 2 个送进

收稿日期: 2023-05-22.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52375346); 浙江省自然科学基金重点项目(LZ22E050002); 宁波市重大科技专项(2022Z064)。

第一作者: 陈潜(1997-), 男, 浙江余姚人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 金属塑性成形。E-mail: 2111081039@nbu.edu.cn

*通信作者: 束学道(1968-), 男, 安徽舒城人, 教授, 主要研究方向: 金属塑性成形与装备。E-mail: shuxuedao@nbu.edu.cn

角 α (轧辊轴线与轧件轴线偏转角度, 图 1(a)) 的桶形轧辊分布在轧件两侧, 并以相同的速度绕自身轴线同向旋转, 轧件在被轧辊咬入后利用两者之间的摩擦进行轴向运动和自转运动, 再配合顶杆完成内孔成形. 减径成形使用 3 个送进角 α 的盘形轧辊, 其在空间上相对轧件轴线呈 120° 对称分布, 在盘形轧辊自转运动时通过轧辊成形角 β (图 1(c)) 对轧件的作用, 不仅能减径延伸成形阶梯外表面, 还能提供轧件轴向运动的动力, 以加快轧制速度. 在轧制过程中, 相邻 2 组轧辊乃至 3 组轧辊同时作用于轧件形成连续轧制关系, 以实现穿轧一体化. 轧制过程的运动分 2 部分: (1) 3 组轧辊绕自身轴线同向自转运动 (图 1(b)); (2) 轧件与顶杆的相对运动.

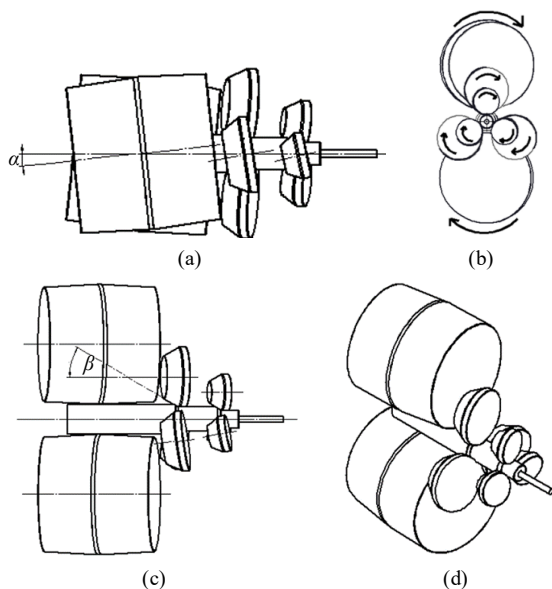


图 1 穿轧一体化成形原理图

2 有限元模型建立

2.1 轧辊设计与建模

结合已有的轧辊尺寸^[16], 各辊组参数见表 1.

表 1 各辊组的尺寸参数

穿孔辊组	第一道次减径辊组	第二道次减径辊组
大径 M_1 为 200 mm	大径 M_2 为 100 mm	大径 M_3 为 60 mm
成形角 β_1 为 3°	成形角 β_2 为 30°	成形角 β_3 为 30°
成形区长度为 6 mm	成形区长度为 12 mm	成形区长度为 12 mm
总长度为 185 mm	减径区长度为 25 mm	减径区长度为 20 mm
送进角 α_1 为 6°	送进角 α_2 为 9°	送进角 α_3 为 12°
转速 v_1 为 $60 \text{ rad} \cdot \text{min}^{-1}$	转速 v_2 为 $90 \text{ rad} \cdot \text{min}^{-1}$	转速 v_3 为 $150 \text{ rad} \cdot \text{min}^{-1}$

本文选取 1:3 航空涡轮轴坯作为研究对象, 尺寸如图 2 所示. 根据等体积原则计算后, 选用外径 50 mm、长度 250 mm 的坯料进行轧制. 同时, 为了方便穿孔, 坯料芯部经过预处理保留 5 mm 的内孔.

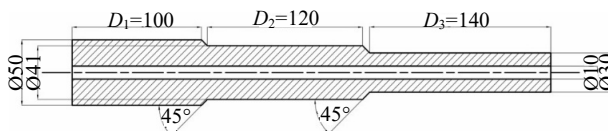


图 2 1:3 航空涡轮轴(单位: mm)

为使 2 组减径辊组同时作用在轧件上时能够有效配合, D_2 、 D_3 、 M_2 和 M_3 须满足以下要求:

$$M_2 > M_3,$$

$$M_2 < 6.5D_2 = 266.5 \text{ mm},$$

$$M_3 < 6.5D_3 = 195 \text{ mm}.$$

通过限定阶梯轴段与对应道次减径辊组的直径关系, 可以有效防止各减径辊组 3 个轧辊在径向上的干涉. 通过优化轧辊的尺寸, 不仅可以提高涡轮轴的成形质量, 降低次品率, 还能够减小生产设备的尺寸, 大大降低加工难度和生产成本. 有限元模型如图 3 所示.

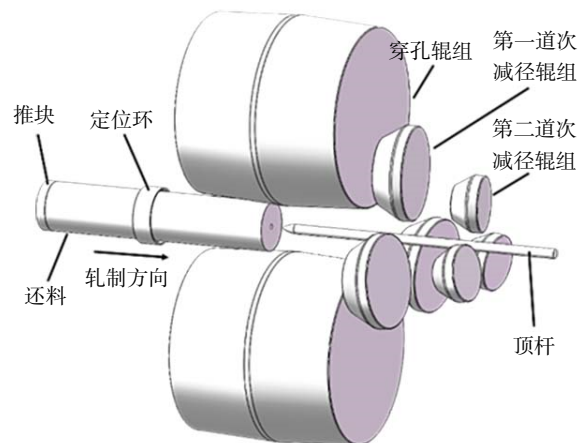


图 3 穿轧一体化成形的有限元模型

2.2 材料属性及网格划分

涡轮轴材料采用镍基高温合金 GH4169, 该材料的本构方程为^[17]:

$$\dot{\epsilon} = 2.46748 \times 10^{18} (\sinh(0.00346\sigma))^{4.95225} \cdot \exp(-505649 / (RT)),$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为塑性应变速率, s^{-1} ; σ 为流变应力, MPa; R 为理想气体常数, 数值 $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$; T 为绝对温度, K.

查阅已有资料^[18]得到有限元仿真中需要提供

的材料参数有: 镍基高温合金 GH4169 的泊松比 ν 为 0.29, 密度 ρ 为 $8\,190\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 热膨胀系数 α 为 $1.3\times 10^{-5}\text{ K}^{-1}$, 热导率 λ 为 $11.4\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$, 比热容 c 为 $0.435\text{ J}\cdot(\text{g}\cdot\text{K})^{-1}$.

在 Simufact 软件中, 选用六面体单元类型对轧件进行网格划分, 考虑到目标轴的最小壁厚尺寸, 将网格单元尺寸设置为 2.5 mm , 将内表面粗糙水平设置为 1, 最终创建初始网格单元 20 736 个.

2.3 初始条件和边界条件

在穿轧一体化过程中轧件主要发生塑性变形, 弹性变形量较小, 因此将轧件定义为塑性体. 将 3 组轧辊、顶杆、定位环和推块等模具定义为刚性体.

在实际生产中, 为了更顺利完成轧制过程, 需要增大轧件和轧辊之间的摩擦力, 通常会选择在轧辊表面打出细小的凹坑来减小相对滑动, 所以在模拟设置时可适当增大摩擦比例因子来表示类似措施的效果. 摩擦类型选择自动模式, 轧件与 3 组轧辊之间的摩擦比例因子均设置为 0.9, 与顶杆、定位环和推块之间的摩擦比例因子均设置为 0.1.

轧件的初始预热温度设置为 $1\,050\text{ }^{\circ}\text{C}$, 各模具的初始温度均为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 环境温度设置为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3 有限元仿真结果与分析

3.1 仿真过程及结果对比

涡轮轴穿轧一体化过程中轧件主要变形阶段的应变如图 4 所示. 在推块的匀速推动下, 轧件得到一定初速度, 并在定位环的约束中沿着自身轴线进行轴向运动, 直至与穿孔辊组和顶杆接触(图 4(a)). 与轧辊的摩擦力为轧件克服顶杆阻力积累足够的轴向力, 推动轧件旋转前进, 轧件芯部金属受顶杆施加的轴向和径向的挤压, 沿着顶杆表面流向轧辊与顶杆之间, 在轧件长度变长的同时, 轧件的壁厚逐渐变薄(图 4(b)). 在顺利突破通过穿孔辊组后, 轧件以稳定的轴向速度和圆周速度进入第一道次减径辊组中, 此时穿孔辊组与第一道次减径辊组同时作用在轧件上形成连续变形, 轧件外径进一步减小, 实现第一道次减径(图 4(c)). 随着轧件继续轴向运动, 与第二道次减径辊组接触, 此时 3 组轧辊同时作用在轧件上形成多辊系连轧, 轧件外径进一步收缩, 实现第二道次减径(图 4(d)), 实现短流程效果. 在第三阶梯轴段的长度满足要

求后, 第二道次减径辊组离开轧件, 此时再次出现穿孔辊组与第一道次减径辊组同时作用在轧件上的情况(图 4(e)). 内孔完全成形后, 穿孔辊组离开轧件, 第一道次减径辊组继续加工第二阶梯轴段(图 4(f)). 当完全满足目标轴尺寸后, 第一道次减径辊组离开轧件, 即可得到所需目标轴.

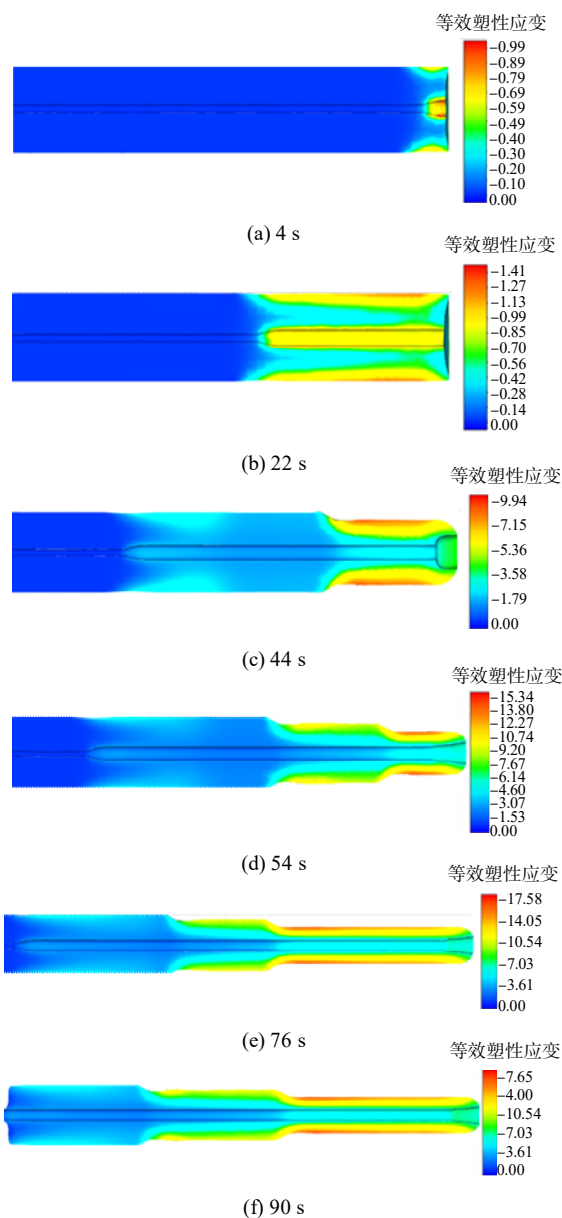


图 4 涡轮轴穿轧一体化成形过程

仿真结果与目标轴形状对比如图 5 所示, 整体形状尺寸均符合目标轴设计要求, 轧件没有出现扭转、断裂、塌陷等缺陷, 表明穿轧一体化成形拥有良好的成形效果.

作为一个新工艺, 也存在一些不尽完美的地

方, 如在仿真结果中可见, 第二阶梯轴段外表面存在轻微堆料, 头部内孔存在不等径, 尾部存在凸起, 这些都将是穿轧一体成形后期需要去除的加工余量。

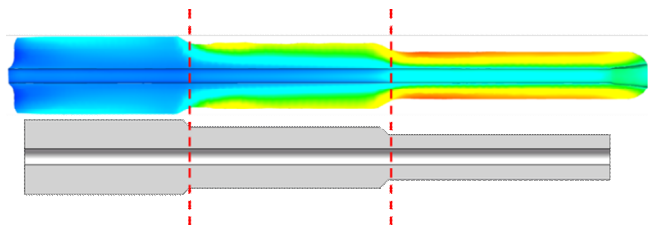


图5 仿真结果与目标轴形状对比

对于第二阶梯轴段外表面的堆料问题进行受力分析, 结果如图6所示。在三辊组阶段(图4(d))时, 该处金属受到第一道次减径辊组的推力 F_1 向左流动, 而穿孔辊组阻挡了金属进入成形区, 向左流动的金属在遇到穿孔辊组后受到向右的阻力 F_2 , 同时轧件芯部存在顶杆的阻力 F_3 , 金属无法向内流动。在3个力的共同作用下, 金属向外表面凸起, 出现堆料现象。

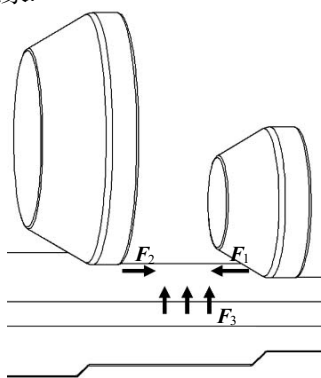


图6 第二阶梯轴段受力示意图

对于头部内孔不等径和尾部凸起的问题, 对内孔及轧辊进行受力分析, 结果如图7所示。穿孔时, 轧件芯部受到顶杆的冲击向内发生变形, 由于顶杆直径远小于轧件外径, 在轧件芯部出现了应力集中, 并且由内向外逐渐减小, 导致轧件头部金属变形伸长量不同, 形成一个“喇叭状”的凹坑(如图4(b)轧件最右端面所示), 该凹坑有利于顶杆锥部对准轧件中心, 减小壁厚不均问题。当凹坑接触减径轧辊时, 轧件外表面金属受到压力 F_4 被逐渐压下, 被压下的金属沿径向流动, 而轧件内表面金属在顶杆摩擦的作用下受到推力 F_5 沿轴向流动, 在2个力的作用下凹坑先后2次变大, 直至形成轧

件头部内孔不等径问题(图4(c)和(d))。同理, 当轧件完成内孔成形时, 轧件内表面金属在推力 F_5 的作用下轴向流动, 导致只在尾部芯部出现凸起问题, 不影响外径的尺寸。

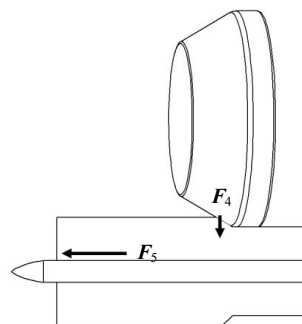


图7 内孔及轧辊受力示意图

3.2 应力应变场分布

在整个穿轧一体化过程中, 三辊组阶段是最能体现成形特点的阶段, 因此专门对该阶段进行分析。

三辊组同时轧制时, 轧件的纵截面以及变形区各典型变形横截面的应力场分布如图8所示。

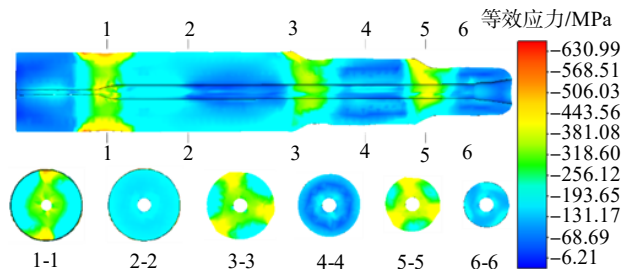


图8 三辊组阶段轧件以及各截面的应力分布

在穿孔时(截面1-1), 轧件与穿孔辊组以及顶杆锥部同时接触, 接触应力分别从外表面的辊组与轧件接触点向内渗入, 以及从内表面向四周扩散, 此时呈现对向的径向压应力与单一的轴向压应力。随着轧件离开穿孔辊组(截面2-2), 应力值逐渐减小, 内表面应力减小至几乎为0, 外表面相对稳定, 维持在193 MPa上下。在轧件进入第一道次减径辊组后(截面3-3), 接触应力从轧件外表面与辊组接触的3个点向内渗入, 轧件内表面则受到顶杆的影响产生向外的阻力以保证内孔尺寸不变。轧件继续轴向前进(截面4-4), 轧件内外表面应力维持在70 MPa上下, 且轴壁中心应力极小。在轧件进入第二道次减径辊组后(截面5-5), 情况与截面3-3类似, 但内表面应力会随着压下量的增加而

变大. 截面 6-6 为完全脱离模具部分, 其应力逐渐变小直至为 0. 总体看, 穿轧一体化过程中应力集中分布在穿孔段和两段减径段的变形区内, 与轧辊和顶杆同时工作的接触变形区的应力大于其他自由变形区, 各阶段的最大应力值出现在轧辊成形区拐角处.

三辊组同时轧制时, 轧件的纵截面以及变形区各个重要横截面的应变场分布如图 9 所示. 在第一阶梯轴段上(截面 1-1 和截面 2-2), 应变从外表面开始逐渐向内渗入, 内表面应变较小, 整体应变基本一致; 在第二阶梯轴段上(截面 3-3 和截面 4-4), 外表面应变随减径变形而快速变大, 应变达到 4.60 后不再继续增大, 内表面由于顶杆的阻力导致变化过程相对缓慢; 在第三阶梯轴段上(截面 5-5 和截面 6-6), 外表面应变继续变大达到最大值 15.34, 而内表面应变保持不变. 总体看, 穿轧一体化过程中外表面应变比内表面大, 说明在轧制时金属由外表面向内流动, 减径段应变比穿孔段应变大, 且轧件横截面应变呈较为规则的环状分布.

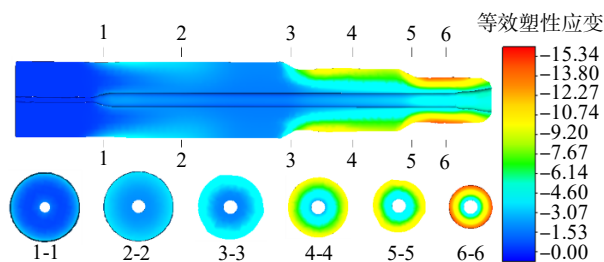


图 9 三辊组阶段轧件以及各截面的应变分布

3.3 力能参数变化

穿轧一体化成形过程中, 各辊组轧制力与顶杆轴向力的变化曲线如图 10 所示. 当只进行穿孔成形时(2~25 s), 穿孔辊组的轧制力在 80~100 kN 范围内, 顶杆轴向力在 40 kN 上下, 且两者在成形初始阶段都是线性增大. 当轧件进入第一道次减径辊组时(25~44 s), 穿孔辊组的轧制力受到减径辊组的影响出现减小趋势, 减径辊组的轧制力维持在 105 kN 上下; 同时由于减径辊组对轧件的径向压力, 使得轧件与顶杆的摩擦变大, 顶杆轴向力也随之增大至 57 kN. 在三辊组同时轧制时(44~80 s), 穿孔辊组的轧制力再次减小至 80 kN, 而第一道次减径辊组的轧制力增加至 110 kN, 远大于第二道次减径辊组的轧制力(85 kN); 顶杆的轴向力小幅

度增大, 稳定在 60 kN. 随后各辊组先后离开轧件表面, 各轧制力随之快速降低至 0, 但由于顶杆与轧件之间始终存在摩擦, 因此完成穿孔后(90~100 s)仍然存在一定的轴向力.

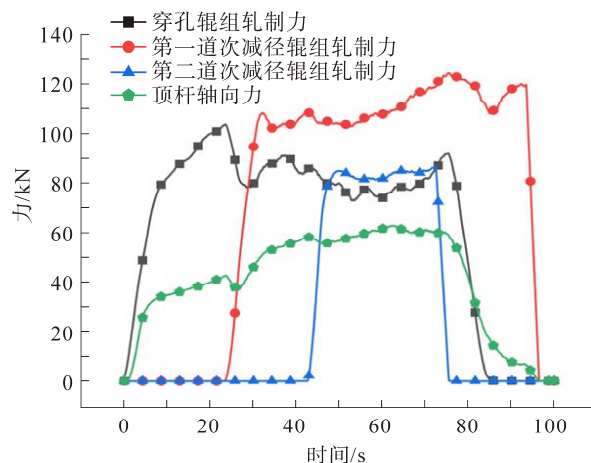


图 10 穿轧一体化成形的力能参数曲线

4 结论

(1)提出了一种航空涡轮轴的穿轧一体化成形工艺, 利用有限元软件, 研究了轧件成形过程中各阶段的变形情况, 仿真结果与目标轴形状尺寸的对比表明, 新工艺拥有良好的成形效果. 模拟结果中的堆料、凹坑、凸起等缺陷是变形过程中金属流动规律形成的力学行为的共同作用结果.

(2)分析了穿轧一体化过程中三辊组阶段轧件的应力应变场的分布和力能参数的变化规律. 最大等效应力为 630.99 MPa, 集中分布在各辊组的变形区内; 3 个阶梯轴段的最大等效应变分别为 4.60、10.74、15.34, 且轧件横截面应变呈现规则的环状分布. 外表面应力应变高于内表面的原因是辊组对轧件的作用远大于顶杆, 外表面的形变程度比内表面更剧烈. 三辊组同时轧制时, 穿孔轧制力为 80 kN, 第一道次减径辊组轧制力为 110 kN, 第二道次减径辊组轧制力为 85 kN, 顶杆轴向力为 60 kN, 以上数据可为后续的参数优化提供参考.

(3)验证了穿轧一体化制造航空涡轮轴坯的可行性, 为进一步开展相关研究奠定了基础.

参考文献:

- [1] 王世威. 高温合金涡轮后轴加工工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.

- [2] 崔平亮. 航空发动机低压涡轮轴疲劳寿命计算分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [3] 杨程, 路星星, 孙跃, 等. 空心轴成形技术研究现状[J]. 锻压技术, 2018, 43(1):1-8.
- [4] Bovsunovsky A, Zhao W Y. Estimation of fatigue crack growth at transverse vibrations of a steam turbine shaft[C]//Dimitrovová Z, Biswas P, Gonçalves R, et al. International Conference on Wave Mechanics and Vibrations. Cham: Springer, 2023:233-240.
- [5] 束学道, 王吉泰, 徐海洁, 等. 一种直角阶梯轴的三辊斜轧成形方法: CN114653748B[P]. 2022-10-11.
- [6] Xia Y X, Shu X D, Shi J N, et al. Forming quality research on the variable-diameter section of the hollow axle in three-roll skew rolling[J]. Materials, 2022, 15(16): 5614.
- [7] 李胜祗, 王世宏, 尹元德. 送进角对三辊斜轧定径减径量的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(1):155-158.
- [8] Gryc A, Bajor T, Dyja H. The analysis of influence of the parameters of rolling process in three high skew rolling mill of AZ31 magnesium alloy bars on temperature distribution[J]. Metalurgija, 2016, 55(4):772-774.
- [9] Pater Z, Bulzak T, Tomczak J. Numerical analysis of a skew rolling process for producing a stepped hollow shaft made of titanium alloy Ti_6Al_4V [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2016, 61(2):677-682.
- [10] Pater Z, Tomczak J, Bulzak T. Problems of forming stepped axles and shafts in a 3-roller skew rolling mill[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 10434-10446.
- [11] Tomczak J, Pater Z, Bulzak T, et al. Design and technological capabilities of a CNC skew rolling mill[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21(2):1-17.
- [12] 王付杰, 双远华. 短流程生产无缝钢管的斜连轧工艺[J]. 钢铁, 2016, 51(4):44-48.
- [13] 陈建勋, 毛飞龙, 双远华, 等. 管材斜连轧过程有限元模拟与实验研究[J]. 锻压技术, 2019, 44(10):101-108.
- [14] 毛飞龙, 王小亮, 双远华, 等. 管材斜连轧过程应力分析及实验研究[J]. 锻压技术, 2022, 47(5):128-134.
- [15] 牛旭, 双远华, 王清华, 等. 斜连轧工艺中轧辊组之间转速协调关系的探讨[J]. 钢管, 2016, 45(2):54-58.
- [16] 双远华, 胡建华, 赵春江. 无缝钢管轧制工艺及其数值模拟[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [17] 吴昊, 孔祥伟, 罗平. GH4169 合金高温变形过程本构方程[J]. 机械设计与制造, 2020(8):163-167.
- [18] 宫润燕. GH4169 合金高温塑性变形行为及组织演变规律研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.

Piercing-rolling integrated forming process of aero-engine turbine shaft and its numerical simulation and analysis

CHEN Qian^{1,2}, SHU Xuedao^{1,2}, LI Yiman^{1,2}, LI Zixuan^{1,2}, XU Haijie^{1,2}

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo 315211, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: To solve the problems of difficult forming, long process, and low material utilization of aviation turbine shafts, a piercing and rolling integrated forming method is proposed, which utilizes multi roll diagonal rolling technology to overcome the manufacturing problem of stepped large section shrinkage in outer surface processing and achieve a transformation from reduced material manufacturing to equal material manufacturing in inner hole processing. The forming process of nickel based high-temperature alloy GH4169 turbine shaft blank was numerically simulated using simulation finite element software. The metal flow law of the rolled piece during the forming process, as well as the changes in stress-strain field and force energy parameters, were analyzed. The feasibility of the new process was verified, providing theoretical support for the research of the new process.

Key words: aviation turbine shaft; integrated threading and rolling; multi-roll skew rolling; equal material manufacturing

(责任编辑 史小丽)