

多台阶涡轮轴三辊斜轧减径量对轧制过程的影响规律研究

徐永铭^{1,2}, 孙宝寿^{1,2*}, 束学道^{1,2}, 徐焕磊^{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: 运用 Simufact 有限元软件建立了三辊斜轧两道次成形多台阶涡轮轴的仿真模型, 通过数值模拟分析了涡轮轴成形情况, 探究了减径量对轧制过程中轧制力、等效应力-应变以及外圆度误差的影响规律。结果表明: 随减径量的增大, 轧件第1道次和第2道次的径向载荷、等效应力、等效应变和外圆度误差均呈增大趋势。综合比较3种方案下的轧件成形情况, 方案2为最佳的道次减径量分配方案, 即第1道次减径6 mm, 第2道次各台阶减径量分别为2、9和14 mm。

关键词: 三辊斜轧; 多台阶涡轮轴; 两道次; 减径量

中图分类号: TG335.11

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132(2021)04-0055-06

涡轮轴是航空发动机上的核心传动部件, 由于高速、高温、高压的恶劣工作环境, 也是最容易发生故障的部位^[1]。涡轮轴的成形方法和成形质量直接影响着飞机飞行的安全以及大国航空发动机的装备技术水平。目前涡轮轴的加工方式仍多采用传统锻造工艺, 由于工艺特性, 锻造成形的涡轮轴容易出现弯曲、偏心等缺陷, 而且表面存在严重的金属折叠缺陷, 造成后续精加工切削的余量较多, 所以涡轮轴成品率和材料利用率均较低^[2]。

三辊斜轧的概念最早起源于苏联, 随着有限元理论的日益完善, 各国学者通过数值模拟技术对三辊斜轧成形过程进行了深入研究。Pater 等^[3-4]对三辊斜轧成形卡车车轴进行了有限元仿真, 验证了该工艺成形阶梯轴的可行性以及通用性。王付杰等^[5]对管坯在三辊斜轧穿孔过程中的应力-应变分布及轧辊扭矩的变化规律进行了数值模拟分析, 并在实验平台上验证了模拟结果。尹元德等^[6]建立了 Assel 三辊斜轧工艺成形薄壁管过程的有限元模型, 分析了芯棒运动方式、送进角和轧辊带线型对轧件内螺纹缺陷的影响规律。

在现有研究基础上, 本文基于 Simufact 有限元软件建立多台阶涡轮轴三辊斜轧两道次成形的仿

真模型, 通过分析轧制过程中轧制力、等效应力-应变和外圆度误差随减径量的变化规律, 选取最佳的道次减径量分配, 以获得最优的轧件成形方案和成形质量, 为三辊斜轧多道次轧制阶梯轴的减径量分配提供参考依据。

1 有限元模型的建立

1.1 三辊斜轧原理

三辊斜轧即是3个同向旋转的轧辊绕轧制中心线呈120°圆周分布, 并且轧辊轴线相对于轧制中心线偏转一定的角度 α (即为送进角), 故轧件在轧辊的带动下做螺旋式前进运动。在轧制过程中, 轧辊可以沿轧件径向进给, 收缩孔型以达到成形阶梯轴不同直径尺寸的目的。另外, 在实际生产中经常根据减径量的变化, 通过外部动力牵引卡盘带

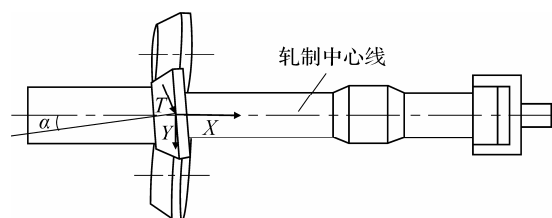


图1 三辊斜轧原理示意图

收稿日期: 2020-06-28.

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(51975301); 浙江省自然科学基金(LZ17E050001); 宁波市“科技创新2025”重大专项(2020Z110)。

第一作者: 徐永铭(1995-), 男, 江苏南通人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 塑性成形工艺与装备, E-mail: 15162855534@163.com

*通信作者: 孙宝寿(1960-), 男, 江苏泰兴人, 副教授, 主要研究方向: 塑性成形工艺与装备, E-mail: sunbaoshou@nbu.edu.cn

动轧件轴向运动,从而协调轧辊的轧制速度.图1即为三辊斜轧原理示意图.

1.2 毛坯材料及网格划分

如图2所示,仿真模型由3个相同轧辊、芯棒、卡盘以及管坯组成.

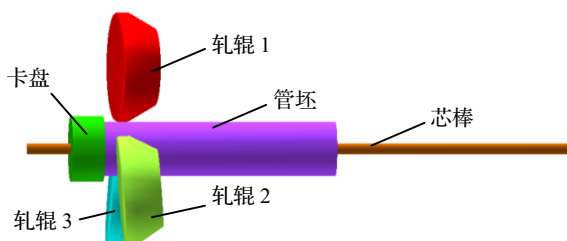


图2 多台阶涡轮轴三辊斜轧有限元模型

为了后期开展实验验证的需要,选取1:3的多台阶涡轮轴作为研究对象,尺寸如图3所示,即选用外径50 mm、内径10 mm、长度230 mm的管坯进行轧制,材料为镍基高温合金GH4169,本文采用的本构方程如下^[7]:

$$\dot{\varepsilon} = 2.46748 \times 10^{18} (\sinh(0.00346\sigma))^{4.95225} \times \exp(-505649 / (RT)), \quad (1)$$

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

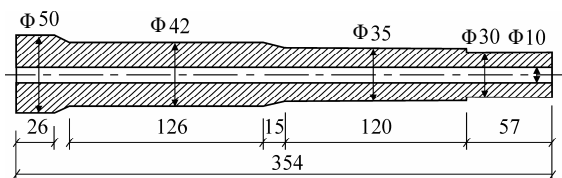


图3 1:3 多台阶涡轮轴(单位: mm)

由 Simufact 材料库数据可知, GH4169 合金泊松比 $\nu = 0.29$, 密度 $\rho = 8.19 \times 10^3 kg \cdot m^{-3}$, 热膨胀系数 $\alpha = 1.3 \times 10^{-5} K^{-1}$.

坯料网格采用六面体自由网格进行划分, 网格尺寸设置为 3 mm, 另外通过网格细化功能对轧件断面收缩率较大的 $\Phi 30$ mm 台阶部分进行区域细化, 细化等级选择 1 级, 即细化区域网格大小为正常区域 1/8, 最终坯料网格数确定为 11 608.

1.3 初始条件和边界条件

在多台阶涡轮轴三辊斜轧成形过程中, 轧件主要发生塑性变形, 弹性变形量较小, 为了缩短有限元仿真时间, 故采用刚塑性有限元法^[8], 将轧件定义为塑性体, 其初始预热温度为 $1050^\circ C$; 将轧

辊、芯棒和卡盘定义为恒温刚性体, 其温度均设定为 $150^\circ C$; 另外设置环境温度为 $20^\circ C$.

为了在数值模拟时方便设置细化区域, 根据相对运动原理, 将装有卡盘的一端固定, 以轧辊的轴向运动代替轧件的轴向运动. 定义轧件与卡盘的接触类型为粘结, 忽略两者间的摩擦. 另外实际生产中常通过在轧辊表面设置沟槽来增大轧件与轧辊间的摩擦力, 减小相对滑动^[9], 所以在模拟时可适当增大摩擦因子. 摩擦类型选择系统默认(自动)模式, 轧件与轧辊间的摩擦比例因子设置为 0.9, 与芯棒间的摩擦比例因子设置为 0.1.

轧制过程中传热现象非常复杂, 主要存在热传导、热对流和热辐射 3 种类型的热边界条件^[10]. 根据文献[11], 设定轧件对环境的热传导系数为 $0.05 kW \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$, 与环境的热辐射率为 0.25; 模型其他组件对环境的热传导系数为 $0.05 kW \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$, 对轧件的热传递系数为 $20 kW \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$, 与环境的热辐射率为 0.25.

2 涡轮轴成形方案

表1为多台阶涡轮轴三辊斜轧模型的主要工艺参数.

表1 模型工艺参数

参数	数值
管坯外径/mm	50
管坯内径/mm	10
管坯长度/mm	230
送进角/(°)	5
轧辊大径/mm	100
减径区锥角/(°)	30
减径区长度/mm	25
成形区长度/mm	12
芯棒直径/mm	10

由于 GH4169 属于典型的难加工材料, 工艺塑性差^[12-13], 经仿真试验后发现所研究的涡轮轴一道次成形的质量较差, 而多道次轧制降低了生产效率, 增加了生产消耗, 故采用两道次成形多台阶涡轮轴, 选取第 1 道次转速 $80 r \cdot min^{-1}$, 第 2 道次转速 $60 r \cdot min^{-1}$, 轴向速度均为 $20 mm \cdot s^{-1}$, 其涡轮轴轧制成形过程如图4所示. 在总减径量一定的情况下, 具体各道次分配方案见表2.

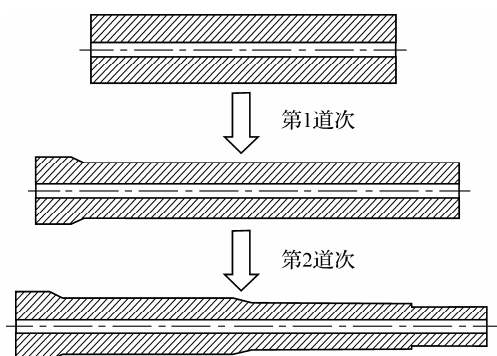


图4 多台阶涡轮轴成形过程

表2 减径量分配方案 mm

方案	第1道次减径量	第2道次减径量 ¹⁾
方案1	4	4, 11, 16
方案2	6	2, 9, 14
方案3	8	0, 7, 12

注: 1) 该列所示各方案所对应的3个数据分别为第2道次三段台阶成形直径42、35和30 mm的减径量。

3 仿真结果及分析

3.1 减径量对径向载荷的影响

三辊斜轧是以轧辊压缩轧件进行的塑性变形, 故主要针对轧件所受径向载荷进行分析。图5为轧件在轧制过程中所受单个轧辊的径向载荷变化情况。从图中可以看出, 轧辊的每次径向进给均伴随着载荷的急剧增加, 并以特征峰形式呈现。在第1道次等径段轧制时, 受固定端牵引作用的影响^[14], 径向轧制力随轧辊沿轧制方向的移动平缓上升; 第2道次每段等径段的长度相比第1道次明显减小, 所以等径段的径向轧制力变化并不明显。第2道次轧制时, 因为轧辊只需对方案3中 $\Phi 42$ mm台阶的少量回流金属进行减径, 所以该段的径向载荷相对较小。另外, 在2个道次之间存在一段轧辊移动

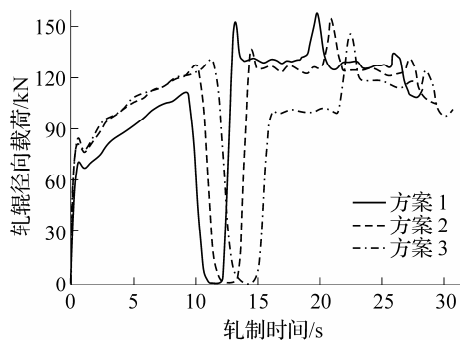


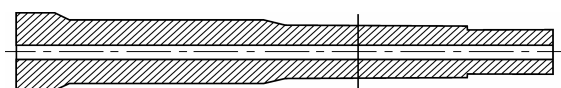
图5 减径量对轧辊径向载荷的影响分布曲线

时间, 该段时间内轧件不与轧辊接触, 其不受任何负载的影响。

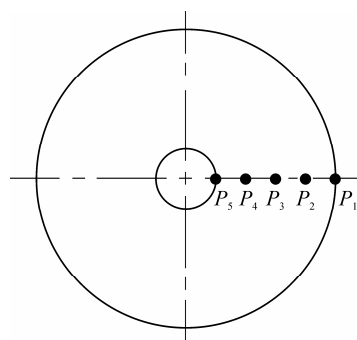
对比图5中3种方案曲线后可以发现, 减径量越大, 轧件第1道次和第2道次的径向轧制力越大, 但是增大幅度却随减径量的增加而明显减小。在两道次轧制时, 若保证成形过程中的轧制力变化相对均匀, 则有利于轧机工作周期的运行平稳, 延长轧机部件的寿命^[15], 这也是道次减径量分配的重要依据。

3.2 减径量对等效应力-应变的影响

利用软件点位追踪功能探究减径量对轧制过程中等效应力和等效应变变化的影响规律, 即在轧件上选取节点(图6), 分别用 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_5 表示, 其中 P_1 为轧件外表面点, P_5 为轧件内表面点, P_2 、 P_3 、 P_4 分别为 P_1 与 P_5 之间的等分点。



(a) 横截面截取位置



(b) 横截面节点选取位置

图6 等效应力-应变追踪节点位置分布

图7为所选横截面上5个节点的等效应力变化曲线。从图中可以看出, 随着轧辊咬入轧件, 节点的等效应力开始缓慢增大, 当截面进入轧辊减径区时, 各节点的等效应力急剧增大, 并在截面离开轧辊减径区时达到第1道次的峰值, 而后快速减小, 并且第2道次的等效应力变化规律与第1道次基本一致。但是轧件内外表面金属轴向变形的不均匀导致第1道次轧件尾端出现凹陷现象^[16], 从而在轧制时造成轧件上靠近内表面区域的等效应力突然增大。对比截面上5个节点的曲线可以发现, P_1 、 P_2 和 P_3 点间的等效应力变化不大, P_4 和 P_5 点由于芯棒对轧件内的表面作用, 使其等效应力大于其

余3个节点,并且越靠近轧件内表面,芯棒的作用越明显。

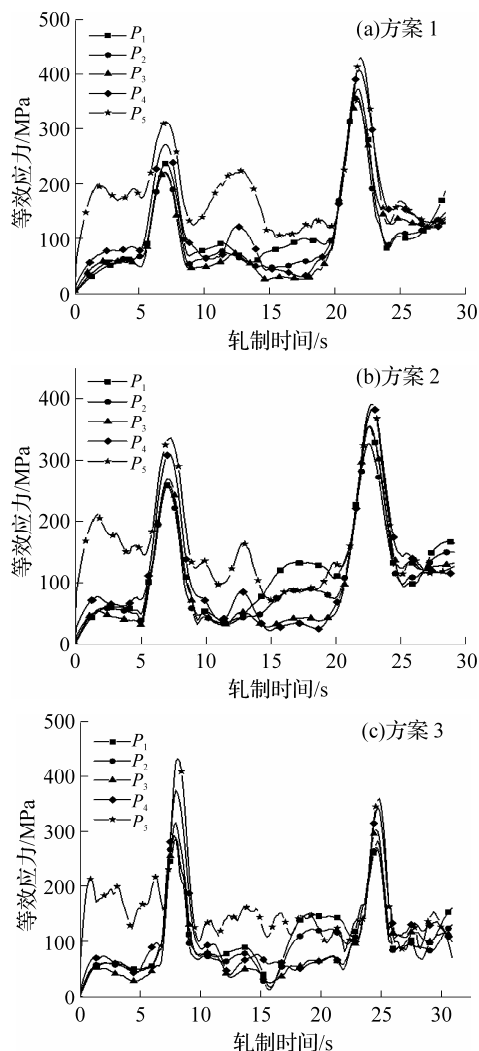


图7 减径量对等效应力的影响分布曲线

对比图7中3种方案曲线还可以发现,方案1第1道次等效应力最大值为317.2 MPa,第2道次最大值为436.1 MPa;方案2第1道次等效应力最大值为337.3 MPa,第2道次最大值为393 MPa;方案3第1道次等效应力最大值为444.1 MPa,第2道次最大值为370.6 MPa。由此可知,轧制过程中各节点的等效应力与减径量成正比关系,即减径量越大,轧件的等效应力越大。

图8为所选横截面上5个节点的等效应变变化曲线。从图中可以看出,等效应变曲线呈现两段式阶梯状。轧件每道次等效应变急剧增大的时间节点与等效应力基本一致,但是5个节点的等效应变均随半径的减小呈递减趋势,这是因为轧件与芯

棒间存在热传导现象,导致轧件温度下降,并且越接近内表面,温度下降越严重,最终导致 P_4 、 P_5 点的等效应变小于其余3个节点。

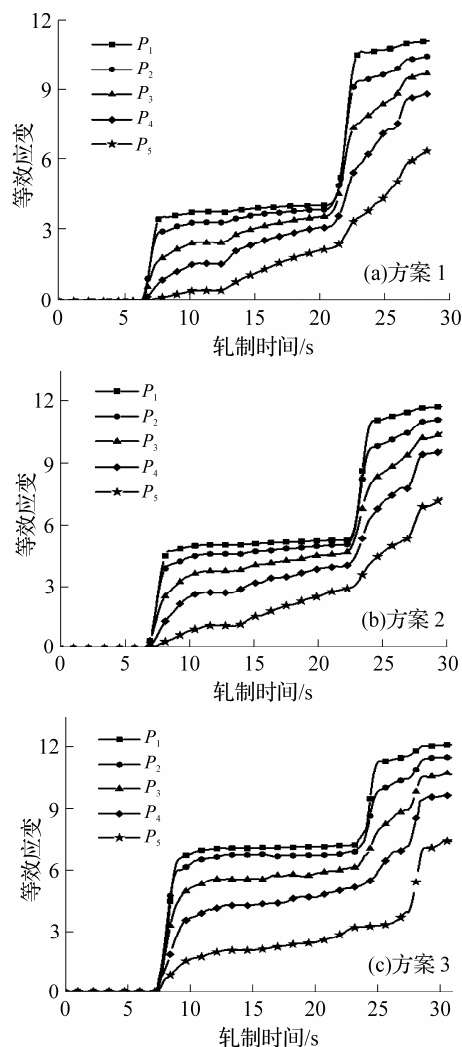


图8 减径量对等效应变的影响分布曲线

对比图8中的3种方案曲线还可以发现,各点的等效应变随减径量的增大而增大,这与等效应力的变化规律相符。在两道次轧制时,轧制过程中的等效应变均匀性也是选取方案的重要指标。其中,方案1第1道次等效应变增大幅度为3.91,第2道次增大幅度为7.28;方案2第1道次等效应变增大幅度为5.20,第2道次增大幅度为6.49;方案3第1道次等效应变增大幅度为7.09,第2道次增大幅度为5.09。

3.3 减径量对外圆度误差的影响

分别截取第1道次和第2道次轧件上经轧辊成形的等径段中心横截面为研究对象,通过 Simufact

软件定义截面外表面上 20 个取样节点(图 9),并导出每个点坐标,利用最小二乘圆法^[17]计算得出 3 种方案成形截面的外圆度误差。

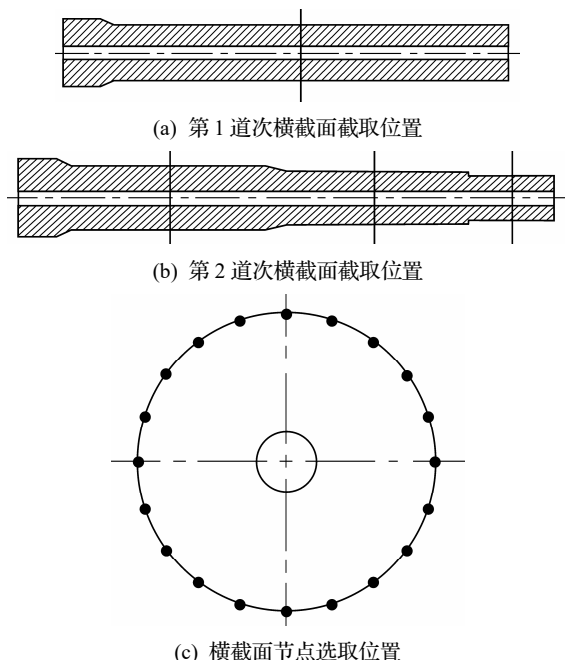


图9 外圆度误差追踪节点位置分布

图 10 为 3 种方案的外圆度误差曲线。从图 10(a)中可以看出,轧件第 1 道次外圆度误差随减径量的增大而增大,但增大幅度随减径量的增加而减小。由图 10(b)可知,轧件外圆度误差随横截面直径的减小而减小,即在轧制过程中,所成形涡轮轴台阶直径越小,轧件的外圆度误差越小,轧件横截面外表面形状越接近圆形。这是因为轧辊转速一定时,轧件成形直径越小,单位面积上轧辊轧制的次数越多,轧件外圆度误差越小。由于第 2 道次轧制是在第 1 道次基础上进行,第 1 道次的外圆度误差会对最终成形轧件的外圆度误差有重要影响。图 10(c)为最终成形轧件的外圆度误差与第 1 道次的差值,即为第 2 道次外圆度误差相对第 1 道次的减小幅度,该数值越大,说明第 2 道次的外圆度误差越小。由图 10(c)可知减径量越大,轧件第 2 道次外圆度误差越大,但增大幅度减小。

4 仿真结果及分析

(1)轧辊径向进给时,径向载荷均以特征峰形式变化;随减径量的增大,轧辊各道次径向载荷增大,但是增大幅度减小明显。

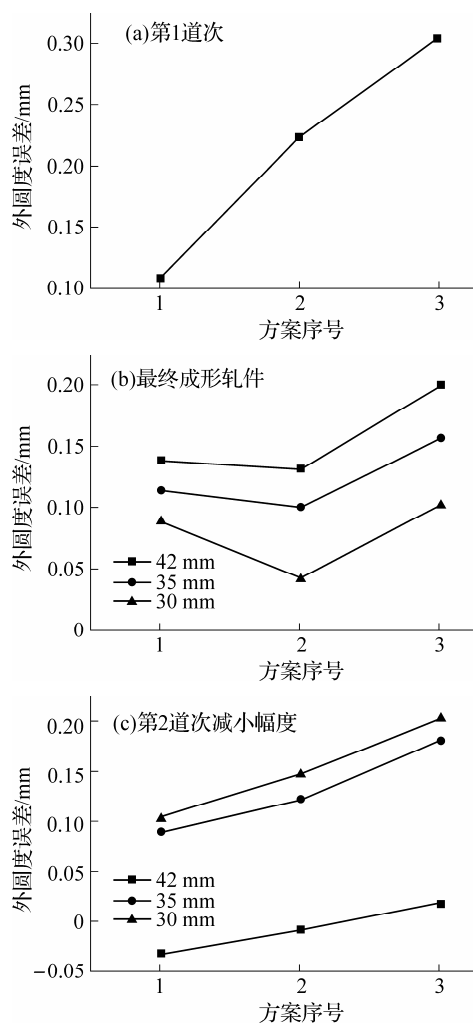


图10 减径量对外圆度误差的影响分布曲线

(2)轧制过程中芯棒对轧件等效应力和等效应变的变化有重要影响;随减径量的增大,轧件各道次的等效应力和等效应变均呈增大趋势。

(3)轧件各道次的外圆度误差随减径量的增大而增大,但是增大幅度减小;轧件第 2 道次外圆度误差随横截面直径的减小而减小。

(4)综合比较 3 种方案,选取方案 2 作为多台阶涡轮轴三辊斜轧成形方案,即第 1 道次减径 6 mm,第 2 道次各台阶减径量分别为 2、9 和 14 mm。该方案下的轧制力和等效应力-应变变化最为均匀,外圆度误差最小,最终成形轧件的各台阶外圆度误差分别为 0.13、0.10 和 0.04 mm。

参考文献:

- [1] 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.

- [2] 申秀丽, 张辉, 宋满祥, 等. 航空燃气涡轮发动机典型制造工艺[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- [3] Pater Z, Tomczak J, Bulzak T. Numerical analysis of the skew rolling process for main shafts[J]. *Metallurgy*, 2015, 54(4):627-630.
- [4] Pater Z, Bulzak T, Tomczak J. Numerical analysis of a skew rolling process for producing a stepped hollow shaft made of titanium alloy Ti6Al4V[J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2016, 61(2):677-682.
- [5] 王付杰, 双远华, 胡建华, 等. 三辊斜轧穿孔工艺的数值模拟与实验分析[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(9):95-98; 105.
- [6] 尹元德, 李修叶, 黄浩, 等. Assel 轧机轧制薄壁管壁厚螺旋性不均研究[J]. *钢铁研究学报*, 2018, 30(7):542-547.
- [7] 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.
- [8] Key S W, Krieg R D, Bathe K J. On the application of the finite element method to metal forming processes: Part I[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 1979, 17/18:597-608.
- [9] 李立敏, 臧勇, 张占柱, 等. 摩擦状况对铜管行星轧制过程的影响[J]. *塑性工程学报*, 2009, 16(1):115-119.
- [10] 李胜祗, 孙中建, 李连诗. 实心坯二辊斜轧过程三维热-力耦合分析[J]. *北京科技大学学报*, 2000, 22(1):52-55.
- [11] 尹元德, 杨青青, 王纯凯, 等. 薄壁无缝钢管顶管过程拉凹缺陷研究[J]. *钢铁研究学报*, 2019, 31(5):460-467.
- [12] 李淼泉, 王小津, 苏少博, 等. GH4169 合金塑性变形行为及加工图[J]. *中国机械工程*, 2008(15):1867-1870.
- [13] 朱德彪, 束学道. 工艺参数对楔横轧 GH4169 合金轴类件力能参数的影响[J]. *塑性工程学报*, 2018, 25(1):52-59.
- [14] 许畅, 束学道, 朱颖. 高铁空心车轴三辊斜轧成形仿真及分析[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2018, 31(4):16-19.
- [15] 徐春国, 任广升. 楔横轧工艺两次轧制时断面缩减率的分配[J]. *塑性工程学报*, 1999(4):102-105.
- [16] 曾健, 徐春国, 任伟伟, 等. 不同端部形状下工艺参数对楔横轧轧件凹心深度的影响[J]. *塑性工程学报*, 2017, 24(2):111-117.
- [17] 陈英, 夏昀, 边翔, 等. 铝合金精密锻件图像测量的方法[J]. *塑性工程学报*, 2010, 17(6):77-81.

Numerical simulation of multi-step turbine shaft in three-roll screw rolling on its influence by diameter reduction

XU Yongming^{1,2}, SUN Baoshou^{1,2*}, SHU Xuedao^{1,2}, XU Huanlei^{1,2}

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

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

Abstract: The simulation model of multi-step turbine shaft in three-roll screw rolling with two-pass forming was established by using finite element software Simufact. The turbine shaft forming was numerically simulated to explore the influences of the diameter reduction on rolling force, equivalent stress-strain and external roundness error during the rolling process. The results show that with the increase of the diameter reduction, the radial load, equivalent stress, equivalent strain and external roundness error of the first and second pass also increase. The comprehensive comparison of the rolling forming conditions under the three schemes indicates that scheme 2 is the best pass diameter reduction distribution scheme. In this scheme, the diameter reduction in the first pass is 6 mm, and those of each step in the second pass are 2 mm, 9 mm and 14 mm respectively.

Key words: three-roll screw rolling; multi-step turbine shaft; two-pass; diameter reduction

(责任编辑 章践立)