

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2025.0616

航空发动机涡轮轴穿轧一体化成形理论与仿真成形质量分析

胡 瑾^{1,2}, 束学道^{1,2*}, 陈 潜^{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: 基于穿轧一体化成形基本理论, 探究轧件稳定轧制的各个相关工艺参数, 通过 simufact 有限元模拟软件建立了穿轧一体化有限元模型, 采用单因素实验设计模拟方案, 研究涡轮轴穿轧一体化中三组轧辊各自的送进角和转速对轧件成形质量的影响规律, 即每个实验组的外径误差、外圆柱度误差和壁厚标准差变化, 找到各个工艺参数的取值范围。

关键词: 航空涡轮轴; 穿轧一体化; 多辊系斜轧; 成形理论; 成形质量

中图分类号: TG335.13

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2026) 01-0084-08

Research on forming theory and quality of aircraft engine turbine shaft through piercing-rolling integration forming

HU Jin^{1,2}, SHU Xuedao^{1,2*}, CHEN Qian^{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: Based on the basic theory of piercing-rolling integration forming, the relevant process parameters for stable rolling with integration forming were explored. The finite element model of piercing-rolling integration forming was established by Simufact software, and the influences of feed angle and rotation speed of three groups of rolls on the forming quality of the rolling parts were studied by using a single-factor experimental design simulation scheme. Consequently, the variations of outer diameter error, outer cylindricity error and wall thickness standard deviation of each experimental group were identified, and the value ranges of all process parameters were determined.

Keywords: aircraft turbine shaft; piercing-rolling integration; multi-roll skew rolling; forming theory; forming quality

作为一种高度复杂和精密的热力机械, 航空发动机被称为航空飞行器的“心脏”。涡轮轴是航空发动机核心传动零件, 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]。目前涡轮轴的加工工艺通常为精锻成形和楔横轧

制, 虽然产品能够满足工程要求, 但工艺具有流程长、将金属流线切断的缺点, 致使我国制造出的涡轮轴存在性能低与寿命短等问题^[3]。

随着有限元理论的日益完善, 国内外对穿轧一体化的研究不断深入。牛旭^[4]运用理论计算、有限元仿真模拟、实验验证三方面结合的方法, 分析了

收稿日期: 2025-06-18

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(52375346)

第一作者: 胡 瑾, 硕士研究生, 主要研究方向为金属塑性成形。E-mail: 2311090117@nbu.edu.cn

*通信作者: 束学道, 教授, 主要研究方向为金属塑性成形与装备。E-mail: shuxuedao@nbu.edu.cn

斜连轧工艺原理, 并对相关工艺参数进行了修正。双远华等^[5-6]根据斜连轧实验样机的结构特点, 为了方便掌握连轧过程中管坯内部所受张力的变化情况, 提出了一种张力检测装置, 并且分析了斜连轧工艺中工艺参数对轧辊轧制力和所得荒管成形质量的影响规律。陈建勋等^[7]运用有限元仿真软件 Deform-3D, 着重研究了斜连轧过程中管材的金属流动规律和应力-应变-速度场的分布规律。王清华等^[8]将金属秒流量相等原理运用于斜轧运动学理论中, 同时采用粒子群算法作为滚动优化方法, 建立了连轧速度关系模型。Zhang 等^[9]建立了三辊斜轧减小等径空心轴直径的有限元模型, 进行了仿真和实验研究, 并且对模拟轧件和实验轧件进行了对比分析。Pater 等^[10]建立了一种新型变辊距三辊斜轧变径工艺, 用以制造空心长轴类和大规格回转件的阶梯外形。Zhang 等^[11]验证了三辊斜轧减径等径空心车轴的可行性, 阐明了其形性协同调控机制。在穿孔方面, Derakola 等^[12-13]研究了斜轧穿孔中摩擦因素对穿孔过程的影响, 以及工艺参数对管件内部裂纹扩展和集合均匀性的影响, 得到壁厚均匀性最佳的工艺参数。Ye 等^[14]建立了三辊斜轧穿孔一体工艺制多台阶空心车轴数值模型, 分析其成形过程及力能参数变化规律, 验证此工艺可行性。Lin 等^[15]建立了法兰螺母三辊斜轧穿孔一体化制坯有限元模型, 结合仿真结果和实验结果的对比, 验证了该制坯工艺的可行性。

本文基于穿轧一体化成形基本理论, 探究轧件稳定轧制的各个相关工艺参数, 并以 GH4169 高温合金涡轮轴毛坯为研究对象, 实现航空发动机涡轮轴短流程柔性成形, 同时分析涡轮轴在不同工艺参数下的成形质量及其影响规律, 找到各个工艺参数的取值范围。

1 穿轧一体化成形基本理论

1.1 穿轧一体化成形原理

穿轧一体化成形是指原始轴坯在经过多道次斜轧连续变形的同时对实心轴进行穿孔, 从而最终得到所需的空心阶梯涡轮轴, 其工艺原理如图 1 所示。考虑到涡轮轴具有大断面收缩率的要求, 同时涡轮轴的材料具有难以加工的特性, 仅使用一组减径轧辊难以一次性完成涡轮轴所需阶梯状外表面。

为了达到短流程的目的, 创新使用连续两组减径轧辊进行轧制, 因此整个轧轧辊组合包括三个部分, 即穿孔轧辊、一道次减径轧辊、二道次减径轧辊。该轧制过程的运动包括以下两部分: (1) 三组轧辊绕自身轴线同向自转运动 (图 1 (b)); (2) 轧件与顶杆相对运动。

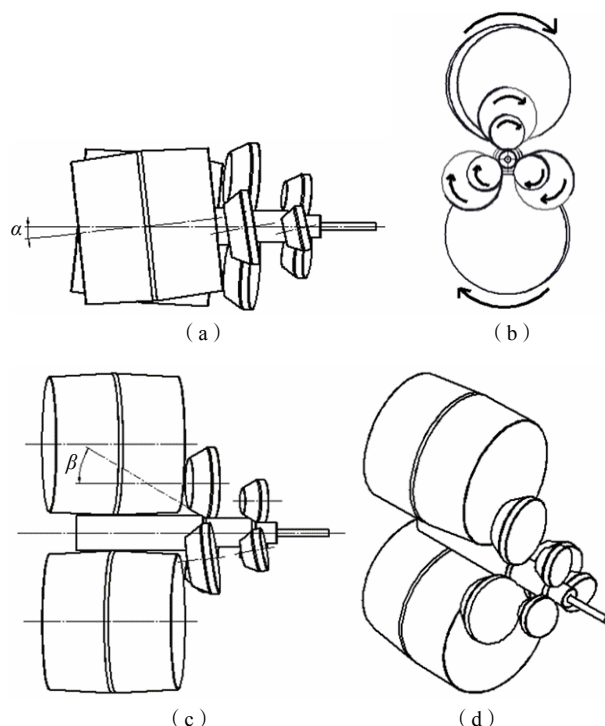
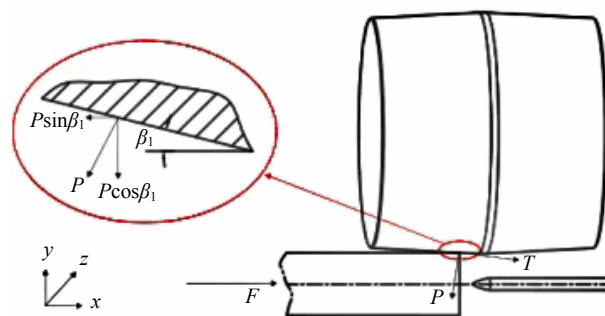


图 1 穿轧一体化成形原理图

1.2 多辊系穿轧一体化成形协同条件

1.2.1 一次咬入条件

为保证坯料顺利进行一次咬入, 建立轧件此时的受力分析图, 如图 2 所示。在坯料和穿孔轧辊的接触点处, 坯料受到穿孔轧辊的压力 P 、表面摩擦力 T 以及推块推力 F 作用, α_1 为穿孔轧辊送进角, β_1 为穿孔轧辊成形角, γ_1 为压力 P 垂直于穿孔轧辊轴向分力方向与穿孔轧辊之间的夹角。



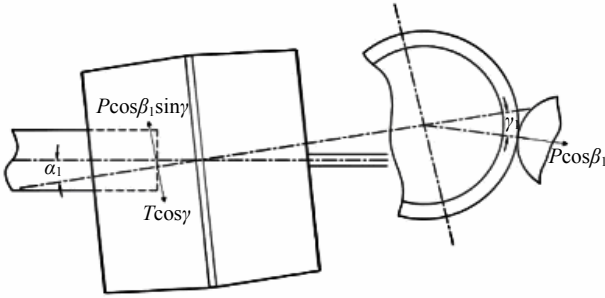


图2 一次咬入时的轧件受力图

为了使轧件顺利咬入,需要使各力在轧件的轴向运动方向上满足受力平衡条件,即三个力在轴向上的投影和为0,故有

$$F + 2(T_x - P_x) = 0 \quad (1)$$

式中:\$F\$为推块提供的推力;\$x\$方向为坯料轴向;\$P_x\$为穿孔轧辊对坯料的压力在轴向上的投影;\$T_x\$为穿孔轧辊对坯料的表面摩擦力在轴向上的投影。各分量为

$$P_x = P \sin \beta_1 \cos \alpha_1 + P \cos \beta_1 \sin \alpha_1 \sin \gamma_1 \quad (2)$$

$$T_x = \mu P \cos \gamma_1 \sin \alpha_1 \quad (3)$$

式中,\$\mu\$为穿孔轧辊和轧件之间的摩擦系数。

将式(2)~(3)代入式(1)可得

$$F = 2P(\sin \beta_1 \cos \alpha_1 + \cos \beta_1 \sin \alpha_1 \sin \gamma_1 - \mu P \cos \gamma_1 \sin \alpha_1) \quad (4)$$

由于穿孔轧辊选用的是桶形轧辊,其\$\alpha_1\$、\$\beta_1\$、\$\gamma_1\$均较小,因此可以将式中三者的余弦值取为\$\cos \alpha_1 \approx 1\$, \$\cos \beta_1 \approx 1\$, \$\cos \gamma_1 \approx 1\$。在没有推块推力的情况下,等式右侧括号内的值应小于等于0。此时可简化式(4)并经过变换后得到穿孔段一次咬入条件:

$$\frac{\sin \beta_1}{\sin \alpha_1} + \sin \gamma_1 \leq \mu \quad (5)$$

$$\tan \gamma_1 = b / D_n \quad (6)$$

式中:\$b\$为轧件与穿孔轧辊接触表面的宽度;\$D_n\$为穿孔轧辊在接触位置的直径。

1.2.2 二次咬入条件

为保证轧件顺利进行二次咬入,建立轧件此时的受力分析图,如图3所示。在轧件和穿孔轧辊的接触点处,轧件受到穿孔轧辊的压力\$P_1\$、表面摩擦力\$T_1\$作用;在轧件与顶杆端部的接触点处,轧件受到顶杆端部的压力\$P_2\$、表面摩擦力\$T_2\$作用,\$\delta\$为顶杆端部锥角。

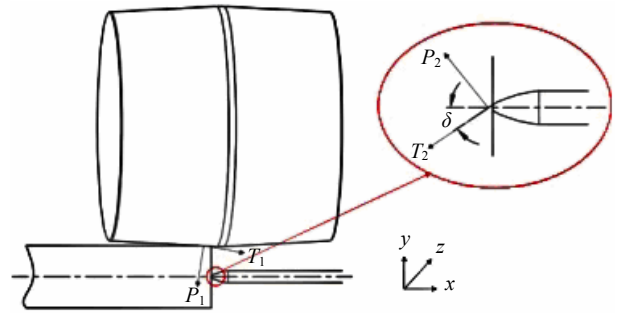


图3 二次咬入时的轧件受力图

在二次咬入时,为了使轧件在多个力的作用下进行轴向运动,需要满足\$x\$正向力大于等于\$x\$反向力的条件,因此由图可列出以下轧件二次咬入的受力条件不等式:

$$2(T_{1x} - P_{1x}) \geq P_{2x} + T_{2x} \quad (7)$$

式中各分量为

$$P_{1x} = P_1(\sin \beta_1 \cos \alpha_1 + \cos \beta_1 \sin \alpha_1 \sin \gamma_1) \quad (8)$$

$$T_{1x} = \mu P_1 \sin \alpha_1 \cos \gamma_1 \quad (9)$$

$$P_{2x} = P_2 \sin \delta \quad (10)$$

$$T_{2x} = P_2 \cos \delta \quad (11)$$

将式(8)~(11)代入式(7),并简化变换后得到穿孔段二次咬入条件的关系式:

$$\frac{2P_1(\mu \sin \alpha_1 - \sin \beta_1 - \sin \alpha_1 \sin \gamma_1)}{P_2(\sin \delta + \cos \delta)} \geq 1 \quad (12)$$

1.2.3 连轧段轧制条件

在完成轧件穿孔段的咬入后,为了保证穿孔轧一体化成形过程的稳定进行,还需要对连轧段中轧件的受力情况进行分析,这里选择轧制过程中最复杂的情况,即三组轧辊同时作用在轧件上时的状态。为了方便研究,将轧件在轧制过程中的轴向运动和旋转运动视为匀速运动,即施加在轧件上的各力在轴向满足受力平衡和力矩平衡条件。首先考虑不存在顶杆的作用,即让轧件在进行轧制时不被顶杆阻力所影响,建立轧件此时的受力分析图,如图4所示。在穿孔轧辊的入口处,轧件受到轧辊的压力\$P_1\$、表面摩擦力\$T_1\$作用,轧件半径为\$R_1\$;在一道次减径轧辊的入口处,轧件受到轧辊的压力\$P_2\$、表面摩擦力\$T_2\$作用,轧件半径为\$R_2\$;在二道次减径轧辊的入口处,轧件受到穿孔轧辊的压力\$P_3\$、表面摩擦力\$T_3\$作用,轧件半径为\$R_3\$;在二道次减径轧辊的出口处,轧件半径为\$R_4\$。

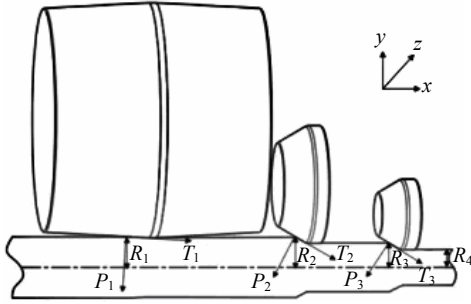


图4 无顶杆作用下的轧件受力图

此时可以得到三组轧辊对轧件所施加的力和作用效果, 由图可得

$$R_0 = 2(T_{1x} - P_{1x}) + 3(T_{2x} - P_{2x}) + 3(T_{3x} - P_{3x}) \quad (13)$$

$$M_0 = 2R_1(T_{1x} - P_{1x}) + 3R_2(T_{2x} - P_{2x}) + 3R_3(T_{3x} - P_{3x}) \quad (14)$$

式中: R_0 为轧件受到的轴向合力; M_0 为轧件受到的轴向合力矩。各分量的计算公式与式(8)、式(9)相同, 不再赘述。

$$R_0 - Q = 0 \quad (15)$$

$$M_0 - Qr = 0 \quad (16)$$

式中: Q 为顶杆阻力; r 为顶杆半径。

在实际生产过程中, 很难达到完美的受力平衡和力矩平衡, 因此只要在轧制时满足 $R_0 \geq Q$ 以及 $M_0 \geq Qr$, 就可以保证穿轧一体化工艺稳定进行。

1.3 连轧段速度协调关系

在穿轧一体化过程中, 影响连轧段稳定轧制的另一个重要因素是相邻两组轧辊之间的速度关系, 如果速度不能做到合理协调, 轧件很容易出现譬如扭转、断裂、金属堆积等问题, 将严重影响轧件的轧制情况和最终的零件质量^[16]。因此分析研究相邻两组轧辊之间的速度关系非常重要。

这里同样选择最复杂的三轧辊阶段进行分析, 建立轧件各变形区的速度矢量分析图, 如图5所示。 α_1 为穿孔轧辊的送进角, α_2 为一道次减径轧辊的送进角, α_3 为二道次减径轧辊的送进角。取各个轧辊表面任意一点的圆周速度为 W , 其矢量方向垂直于各个轧辊的旋转中心轴, 则穿孔轧辊的圆周速度为 W_1 , 一道次减径轧辊的圆周速度为 W_2 , 二道次减径轧辊的圆周速度为 W_3 。在轧辊送进角的影响下, 每个圆周速度都可以分解成与轧制方向平行的轴向分量 W_x 和与轧制方向垂直的切向分量 W_z 。

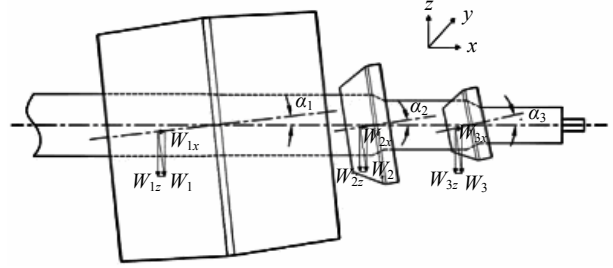


图5 轧件各变形区速度矢量图

首先分析单组轧辊速度的影响因素。根据斜轧运动学, 各个轧辊表面上任意一点的圆周速度为

$$W_i = \frac{\pi D_i v_i}{60} \quad (17)$$

式中: D_i 为任意一个轧辊的直径; v_i 为对应轧辊的转速, i 取值为 1, 2, 3。

各个轧辊表面上任意一点处圆周速度的轴向分量和切向分量分别为

$$W_x = W \sin \alpha \quad (18)$$

$$W_z = W \cos \alpha \quad (19)$$

根据各个轧辊的具体数据, 将式(17)代入式(18)和(19), 可得各个轧辊表面上任意一点圆周速度的轴向分量和切向分量:

$$W_{ix} = \frac{\pi D_i v_i}{60} \sin \alpha_i \quad (20)$$

$$W_{iz} = \frac{\pi D_i v_i}{60} \cos \alpha_i \quad (21)$$

由式(20)可得, 各个轧辊表面上任意一点的轴向圆周速度分量受到轧辊自身送进角和转速的影响, 两者中任意一个值的增大都会使轴向圆周速度增大。因此为了提高轧制速度, 减少轧制时间, 以达到提高轧制效率的目的, 最好尽量选取较大的轧辊送进角和转速。

在连轧过程中, 不仅要分析单组轧辊速度的影响因素, 更重要的是分析三组轧辊之间的速度协调关系, 并且在连轧关系中, 只要相邻两组轧辊达到速度协调状态, 即可顺利完成轧制, 因此这里以穿孔轧辊与一道次减径轧辊之间的速度协调关系为例进行分析。

在实际轧制工艺生产中, 轧辊的形态及其间孔型的变动, 对变形区内轧件的截面产生显著影响, 导致截面面积发生较大波动, 进而引发不同轧制阶段金属流动速度的显著差异, 在轧件与轧辊接触的

表面总会发生或多或少的滑移现象。因此不能简单地将轧辊表面的速度与轧件的运动速度设为相等,而是需要在计算时加入相应的滑移系数。

取轧件表面的运动速度为 V , 则其轴向速度分量为 V_x , 切向速度分量为 V_z 。

$$V_x = \eta_x W_x \quad (22)$$

$$V_z = \eta_z W_z \quad (23)$$

式中: η_x 为轧件上任意一处截面的轴向滑移系数; η_z 为轧件上任意一处截面的切向滑移系数。较大的滑移现象会对轧制效率产生不利影响, 导致轧辊磨损加速, 缩短其使用寿命, 进而严重损伤轧件表面, 降低其成形质量。根据经验, 滑移系数的取值范围应该为 0.5~1.3。

取穿孔轧辊出口处的轧件速度为 V_1 , 其轴向速度分量为 V_{1x} , 切向速度分量为 V_{1z} , 轧件转速为 v_n , 可得

$$\begin{cases} V_{1x} = \eta_{1x} \frac{\pi D_1 v_1}{60} \sin \alpha_1 \\ V_{1z} = \eta_{1z} \frac{\pi D_1 v_1}{60} \cos \alpha_1 \\ v_n = \eta_{1x} \frac{D_1}{2R_2} v_1 \cos \alpha_1 \end{cases} \quad (24)$$

式中: D_1 为穿孔轧辊直径; R_2 为穿孔轧辊出口处的轧件半径 (图 4)。

取一道次减径轧辊入口处的轧件速度为 V_2 , 其轴向速度分量为 V_{2x} , 切向速度分量为 V_{2z} , 轧件转速为 v_m , 可得

$$\begin{cases} V_{2x} = \eta_{2x} \frac{\pi D_2 v_2}{60} \sin \alpha_2 \\ V_{2z} = \eta_{2z} \frac{\pi D_2 v_2}{60} \cos \alpha_2 \\ v_m = \eta_{2x} \frac{D_2}{2R_2} v_2 \cos \alpha_2 \end{cases} \quad (25)$$

式中, D_2 为一道次减径轧辊直径。

由连轧关系可知, 为了使相邻两组轧辊协调轧制, 必须满足前一轧辊出口处的轧件轴向速度与后一轧辊入口处的轧件轴向速度相等, 即穿孔轧辊出口处的轧件轴向速度 V_{1x} 与一道次减径轧辊入口处的轧件轴向速度 V_{2x} 相等, 可得以下等式:

$$\eta_{1x} \frac{\pi D_1 v_1}{60} \sin \alpha_1 = \eta_{2x} \frac{\pi D_2 v_2}{60} \sin \alpha_2 \quad (26)$$

简化变换可得到连轧段的轴向速度协调关系式:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{v_2 \sin \alpha_2}{v_1 \sin \alpha_1} \quad (27)$$

在保证连轧段的轴向速度协调后, 还要考虑轧件的扭转问题, 即满足连轧段的转速协调关系。此时由连轧关系可知, 必须满足前一轧辊出口处的轧件转速与后一轧辊入口处的轧件转速相等, 即穿孔轧辊出口处的轧件转速 v_n 与一道次减径轧辊入口处的轧件转速 v_m 相等, 可得以下等式:

$$\eta_{1x} \frac{D_1}{2R_2} v_1 \cos \alpha_1 = \eta_{2x} \frac{D_2}{2R_2} v_2 \cos \alpha_2 \quad (28)$$

简化变换可得到连轧段的转速协调关系式:

$$\frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} = \frac{D_2 v_2}{D_1 v_1} \quad (29)$$

由式 (27) 和 (29) 可知, 当各个轧辊的尺寸参数固定不变时, 相邻两组轧辊之间的送进角关系和转速关系会直接影响连轧段的速度协调状态, 进而影响轧制质量。因此分析速度协调关系也有利于仿真模拟中可变工艺参数的确定, 为后续研究提供理论依据。

2 有限元模型的建立与可靠性评估

在 SolidWorks 建模软件中绘制涡轮轴坯料、三组轧辊、顶杆、推块和定位环的三维几何模型, 确定各配合条件, 组成装配模型, 再将 stl 格式导入 simufact 有限元仿真软件, 完成如图 6 所示的涡轮轴穿轧一体化有限元仿真模型的建立。

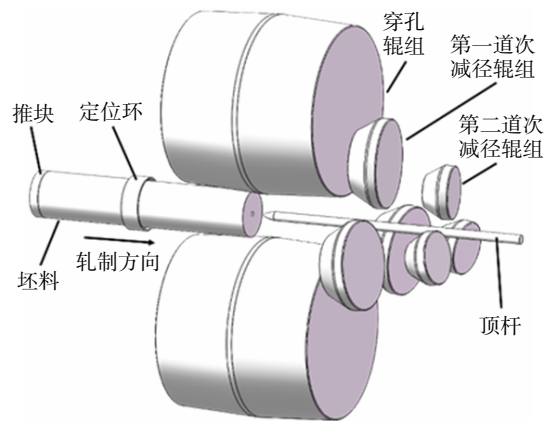


图6 有限元仿真模型

仿真结果与目标轴的形状对比如图 7 所示, 整体形状尺寸均符合目标轴设计要求, 并且轧件没有出现扭转、断裂、塌陷等缺陷, 表明穿轧一体化成形拥有良好的效果^[17]。

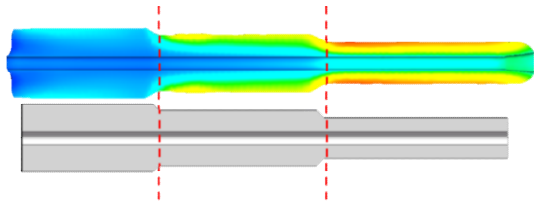


图 7 仿真结果与目标轴的形状对比

3 涡轮轴穿轧一体化成形质量的影响因素

3.1 工艺参数的确定

根据对穿轧一体化过程中轧件轧制条件和速度协调关系的分析,三组轧辊的送进角和转速对轧制效果和成形质量的影响最大,因此设置调整这六个工艺参数来进行单因素实验,研究工艺参数对轧件各成形段成形质量的影响,为后续找到最佳工艺参数提供分布范围参考,为实际实验打下理论基础。表 1 为具体工艺参数设置组合。

3.2 穿孔轧辊工艺参数对成形质量的影响

从图 8 (a) 和 (b) 中可以得到穿孔轧辊送进角和轧辊转速对轧件第一阶梯轴段外径误差、外圆柱度误差以及壁厚标准差的影响。综合图 8 (a) 三条曲线的变化趋势来看,在穿孔段成形过程中,三种指标的最小值均在送进角为 8°时出现,因此想

要得到第一阶梯轴段的最佳成形质量,穿孔轧辊送进角的取值应该在 6°~10°的范围之内。综合图 8 (b) 三条曲线的变化趋势来看,在穿孔段成形过程中,尽管外圆柱度误差和壁厚标准差均在 100 rad/s 处取到最小值,但相比外径误差有明显的变化趋势,其影响可以忽略不计,因此想要得到第一阶梯轴段的最佳成形质量,穿孔轧辊转速的取值应该在 40~80 rad/s 的范围之内。

从图 8 (c) 和 (d) 中可以得到一道次减径轧辊送进角和轧辊转速对轧件第二阶梯轴段外径误差、外圆柱度误差以及壁厚标准差的影响。综合图 8 (c) 三条曲线的变化趋势来看,在一道次减径段成形过程中,改变轧辊送进角,外圆柱度误差和壁厚标准差的变化趋势都很平稳,对成形结果的影响不大,可以忽略不计,主要由外径误差的变化趋势来决定送进角的取值范围。因此想要得到第二阶梯轴段的最佳成形质量,一道次减径轧辊送进角的取值应该在 7°~11°的范围之内。综合图 8 (d) 三条曲线的变化趋势来看,在一道次减径段成形过程中,想要得到第二阶梯轴段的最佳成形质量,一道次减径轧辊转速的取值应该在 90~130 rad/s 的范围之内。

表 1 单因素实验工艺参数设置

实验 组号	穿孔轧辊		一道次减径轧辊		二道次减径轧辊		实验 组号	穿孔轧辊		一道次减径轧辊		二道次减径轧辊	
	送进 角/(°)	转速/ (rad·min ⁻¹)	送进 角/(°)	转速/ (rad·min ⁻¹)	送进 角/(°)	转速/ (rad·min ⁻¹)		送进 角/(°)	转速/ (rad·min ⁻¹)	送进 角/(°)	转速/ (rad·min ⁻¹)	送进 角/(°)	转速/ (rad·min ⁻¹)
1	2	60	9	90	12	150	16	6	60	9	50	12	150
2	4						17				70		
3	6						18				90		
4	8						19				110		
5	10						20				130		
6	6	20	9	90	12	150	21	6	60	9	90	8	150
7		40					22					10	
8		60					23					12	
9		80					24					14	
10		100					25					16	
11	6	60	5	90	12	150	26	6	60	9	90	12	110
12			7				27						130
13			9				28						150
14			11				29						170
15			13				30						190

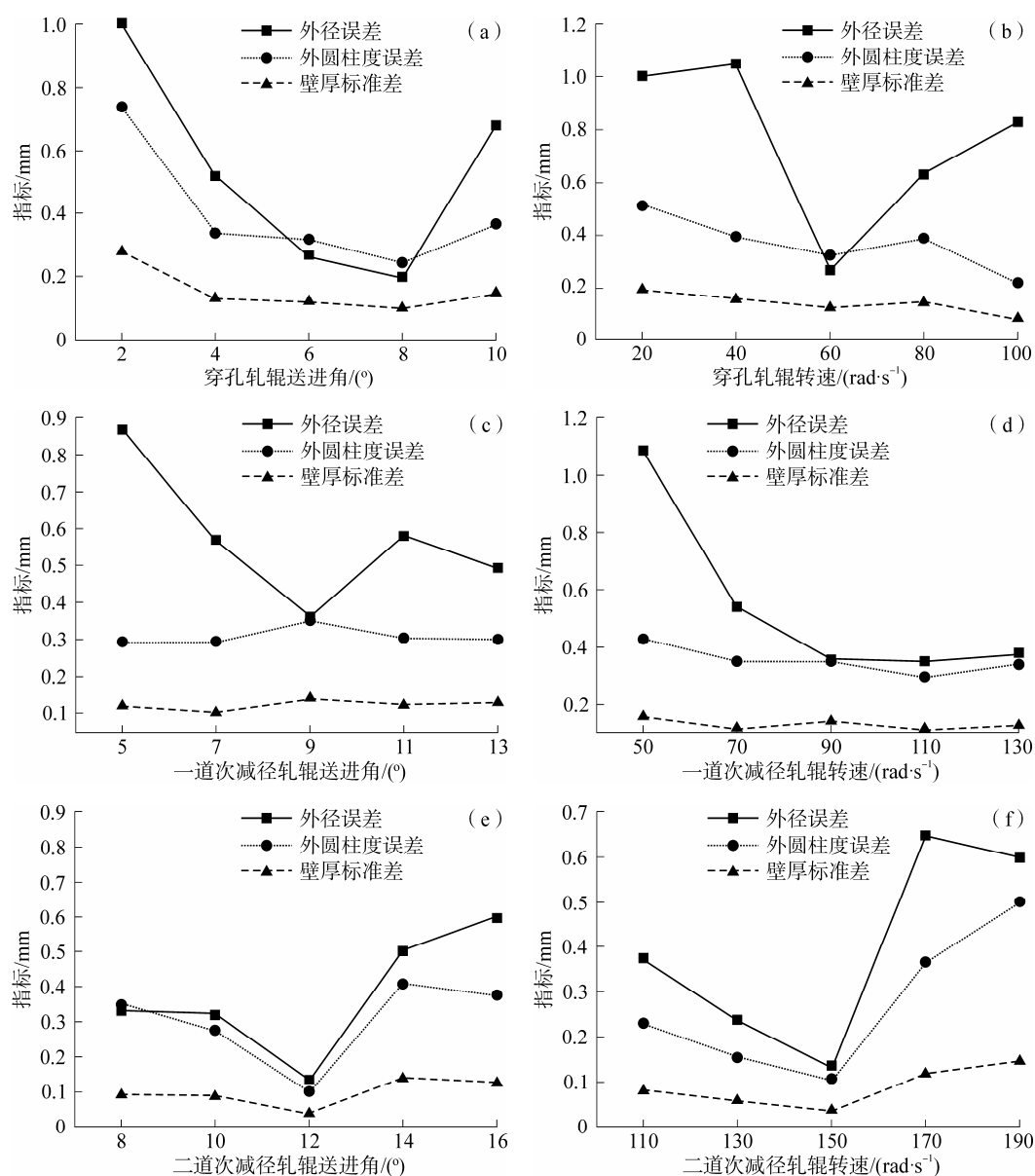


图8 工艺参数对成形质量的影响

从图 8 (e) 和 (f) 中可以得到二道次减径轧辊送进角和轧辊转速对轧件第三阶梯轴段外径误差、外圆柱度误差以及壁厚标准差的影响。综合图 8 (e) 三条曲线的变化趋势来看, 在二道次减径段成形过程中, 尽管三条曲线的最小值都在送进角为 12° 的条件下出现, 但可以看到外径误差和外圆柱度误差在之后都出现了飞跃式的提高, 并且其值远大于前面所有的值, 说明在送进角为 14° 时的成形质量较差, 因此想要得到第三阶梯轴段的最佳成形质量, 二道次减径轧辊送进角的取值应该在 $8^\circ \sim 12^\circ$ 的范围之内。综合图 8 (f) 三条曲线的变化趋势来

看, 在二道次减径段成形过程中, 想要得到第三阶梯轴段的最佳成形质量, 二道次减径轧辊转速的取值应该在 $110 \sim 150 \text{ rad/s}$ 的范围之内。

4 结论

(1) 从轧件的穿孔段两次咬入条件和连轧段速度协调关系的角度计算分析穿孔一体化的成形过程, 得到了影响其稳定轧制的各个相关工艺参数, 经过筛选后确定了后续仿真模拟和实验研究所需要的单因素, 即三组轧辊各自的送进角和转速。

(2) 分析涡轮轴在不同工艺参数下的成形质

量及其影响规律, 找到各个工艺参数的取值范围。在穿孔段中, 送进角的取值范围为 $6^{\circ}\sim 10^{\circ}$, 转速的取值范围为 $40\sim 80$ rad/s; 在一道次减径段中, 送进角的取值范围为 $7^{\circ}\sim 11^{\circ}$, 转速的取值范围为 $90\sim 130$ rad/s; 在二道次减径段中, 送进角的取值范围为 $8^{\circ}\sim 12^{\circ}$, 转速的取值范围为 $110\sim 150$ rad/s。

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] BOVSUNOVSKY A, ZHAO W Y. Estimation of fatigue crack growth at transverse vibrations of a steam turbine shaft[M]//DIMITROVOVÁ Z, BISWAS P, GONÇALVES R, et al. Recent trends in wave mechanics and vibrations: proceedings of WMVC 2022. Cham, Switzerland: Springer, 2023:233-240.
- [4] 牛旭. 斜连轧过程关键工艺技术的研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2016.
- [5] 双远华, 王付杰, 王清华. 无缝钢管连续斜轧工艺与设备的探索[J]. 机械工程学报, 2017, 53(10):18-24.
- [6] 双远华, 赖明道, 张中元. 斜轧穿孔过程金属流动的有限元模拟[J]. 机械工程学报, 2004(3):140-144, 149.
- [7] 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.
- [8] 王清华, 双远华. 斜连轧轧制过程中速度设定模型及控制研究[J]. 自动化仪表, 2017, 38(4):13-18.
- [9] ZHANG S, SHU X D, XU C, et al. Simulation and experiment of reduction of equal-diameter hollow shafts with three-roll skew rolling[J]. Procedia manufacturing, 2020, 50:183-186.
- [10] PATER Z, TOMCZAK J, BULZAK T. Numerical analysis of the skew rolling process for rail axles[J]. Archives of metallurgy and materials, 2015, 60(1):415-418.
- [11] ZHANG S, SHU X D, XU C, et al. Research on wall thickness uniformity of hollow axles by three-roll skew rolling[C]//ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2019:V02AT02A029.
- [12] DERAKOLA H A, GARCIA E, MURILLO-MARRODÁN A. Effects of skew rolling piercing process friction coefficient on tube twisting, strain rate and forming velocity[J]. Journal of materials research and technology, 2023, 25:7254-7272.
- [13] DERAKOLA H A, GILL E G, MURILLO-MARRODÁN A. Analysis of super Cr13 stainless-steel internal fracture growth effects during skew mill piercing process[J]. Results in engineering, 2024, 21:101682.
- [14] YE C Q, SHU X D, XIA Y X, et al. Mechanism of integrated forming of shape and inner hole of hollow axle[J]. Metalurgija, 2022, 61(1):167-170.
- [15] LIN F, SHU X D, YE C Q, et al. Numerical analysis of integrated forming process of diagonal rolling and piercing of flange nuts[J]. Metalurgija, 2023, 62(1):81-84.
- [16] 双远华, 胡建华, 赵春江, 等. 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] 陈潜, 束学道, 李依蔓, 等. 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[J]. 宁波大学学报(理工版), 2023, 36(6):24-29.

(责任编辑 韩 超)