

有芯棒锤面变化的径向缩径数值模拟

赵世淳, 郭 瑞, 童岳凯, 葛 亮, 王 雪

合肥共达职业技术学院电气工程系, 安徽 合肥

收稿日期: 2025年3月30日; 录用日期: 2025年4月23日; 发布日期: 2025年4月30日

摘 要

径向锻造是指通过多个锤头在工件圆周方向进行高频同步锻打, 以实现金属塑性变形的一种锻造工艺, 通常用于加工实心或空心轴类零件。本研究基于前凸、内凹以及线性面三种锤面结构, 进行有限元建模和数值模拟。主要研究了锤面形状对空心棒材径向缩径成形质量的影响。结果表明: 锤面的形状对于径向缩径成形效果有显著的影响。采用线性面进行缩径成形时的工件不仅工作载荷更小, 金属材料的流动分布更加均匀, 同时工件成形的表面质量更佳。

关键词

模具, 径向锻造, 载荷, 缩径

Numerical Simulation of Radial Reduction with Mandrel-Assisted Hammer Surface Variations

Shibo Zhao, Rui Guo, Yuekai Tong, Liang Ge, Xue Wang

Department of Electrical Engineering, Hefei Gongda Vocational and Technical College, Hefei Anhui

Received: Mar. 30th, 2025; accepted: Apr. 23rd, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

Radial forging is a metal forming process that utilizes multiple hammer heads to perform high-frequency synchronous forging along the circumferential direction of a workpiece, achieving plastic deformation of metals. It is commonly employed for manufacturing solid or hollow shaft-like components. In this study, finite element modeling and numerical simulations were conducted based on three hammer surface configurations: forward-convex, concave, and linear geometries, to systematically investigate

the influence of hammer face shape on the forming quality of radial reduction in hollow bars. The results demonstrate that the hammer surface geometry significantly affects the radial reduction forming outcomes. Specifically, when a linear surface is adopted, the forming process not only exhibits a lower working load, ensures a more uniform flow distribution of metal materials, but also significantly enhances the surface quality of the final product forming.

Keywords

Die, Radial Forging, Load, Radial Reduction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

径向锻造是一种兼具冷或热成形特性的高效节材精密锻造成形技术, 利用径向分布两个或多个可动模具, 通过多向径向压力对工件材料进行短程高频率的冲压锻打, 从而实现材料的高效一体化塑性成形[1][2]。随着现代制造业对高精度和高性能成形件的需求日益增长, 径向锻造工艺凭借其独特的技术形式, 相对于传统锻造工艺, 在材料利用率、生产效率和成品性能等方面展现显著优势, 已成为复杂轴管类零件制造的核心技术之一[3]-[5]。目前国外对于径向锻造技术和设备的研发较成熟, 国际上通用的 GFM 型及 SMS 型径向锻机主要由奥地利公司和德国公司自主研发, 而国内精密径向锻机发展较缓慢, 目前仍然是依赖进口设备[6][7]。

近年来, 国内外学者对于径向锻造工艺进行了多方面的研究, Sanjari 等[8]基于上限法研究了径向锻造过程中速度场对结果产生的影响, 并预测了中性面的位置分布机制; Toenjes 等[9]通过改变锤头的几何形状使得工件产生非对称性的材料流动和微观结构变化, 从而改善材料的成形特性; 张雪等[10]制定了以塑性应变阈值为依据的锻透性判断标准, 并在这一基础上, 通过实验成功测定了多种材料的锻造加工参数极限数据, 验证了锻透性判断标准的合理性; Zou 等[11]提出了一种区域化多尺度应变场模型, 用于分析 ZK60 镁合金在径向锻造过程中的组织运动特征。王碧凝等[12]构建了用于预测锻件成形质量的 T-S 模糊神经网络模型, 该模型以径向锤面直径比、咬入比、旋转角度、径向压下速度以及轴向进给速度为变量, 以锻件所受最大载荷和端部凹坑值为质量评判标准进行实验, 研究结果肯定了该模型对于模糊信息的处理能力以及预测结果的准确性。在成形过程中, 锻模下压与工件表面接触使其产生塑性形变, 从而开始进行缩径成形, 因此锻模的入口面设计极大地影响着工件的成形效果, 不同入口面对于成形过程中的材料流动、锻造载荷及成形质量等有着较大的影响。

本文基于有限元数值模拟分析方法, 对于锻模斜面锻造区域的形状样式进行改变, 并建立了有芯棒径向锻造有限元模型进行仿真分析, 研究锤面形状对于径向锻造成形过程中的载荷情况、材料的流动现象、应力变化以及工件最终成形质量的影响。

2. 理论分析及有限元模型建立

2.1. 成形原理

如图 1 所示为工件径向缩径的成形简化图, 其中径向锻造装置主要由夹具、工件、芯棒以及锻锤模具组成。在径向锻造工艺中, 夹具对工件和芯棒施加轴向推力, 使其以速度 V 的速度稳定移动。同时,

在径向对称分布四个锻锤模具放置在工件四周，以特定的频率进行往复下压 - 回升动作，并作用于工件成形。其成形原理为夹具夹持并支撑住工件与芯棒进行轴向进给，模具通过机器主轴控制移动从而实现对于工件的缩径成形。

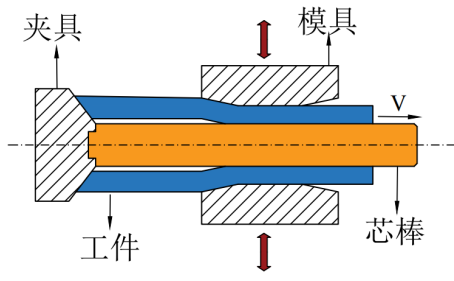


Figure 1. Simplified diagram of radial reduction forming
图 1. 径向缩径成形简化图

图 2 为锻模入口面的几种不同形状，分别为(a) 前凸面、(b) 线性面、(c) 内凹面这三种类型。在工件的成形过程中，其缩径产生的形变大都在入口斜面区域，不同的锻锤面形状对于工件成形后的质量也不一样，良好的锻锤面能够实现更平稳且有效的变形。

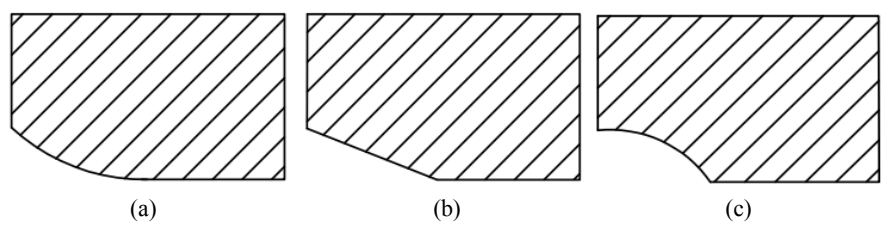


Figure 2. Shape diagrams of different forged hammer surfaces: (a) Front convex surface; (b) Linear surface; (c) Internal concave surface
图 2. 不同锻锤面形状图: (a) 前凸面; (b) 线性面; (c) 内凹面

图 3 则为锻造工艺示意图，按照工艺流程可分为三个区域，即未锻造区、锻造区和成形区，其中锻造区又可分为一次弯曲成形即未锻造区过渡到锻造区、二次成形即锻造区过渡到成形区的形状变化两个阶段。

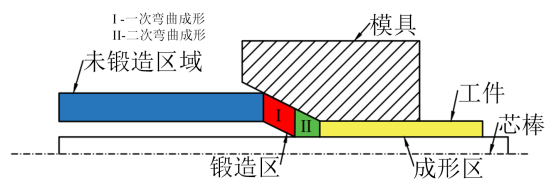


Figure 3. Division of work piece radial reduction area
图 3. 工件缩径区域划分

2.2. 模具运动分析

图 4 所示为锻锤模具的运动轨迹图，假设滚柱与锻锤、滚柱与外壳之间的运动为纯滚动运动，即三者之间运行的线速度相同，滚柱以相对速度 n_1 进行旋转。

可知锤头的轨迹方程为：

$$h_1 = R \cos \theta_1 - \sqrt{(R_h + r)^2 - R^2 \sin^2 \theta_1} \quad (1)$$

锻锤的轨迹行程为最高点与最低点之间的距离，当 $\theta' = \theta/2$ 时，锻锤处于最高处，而 $\theta' = 0$ 时则是处于最低点，因此锻锤的行程为：

$$S = h_1|\theta/2 - h_1|0 = R \cos(\theta/2) - \sqrt{(R_h + r) - R^2 \sin^2(\theta/2)} - (R - R_h - r) \quad (2)$$

因此由上式可知，对于锻锤的径向锻压行程的影响参数有滚柱半径 r 、锻锤顶部的圆弧半径 R_h 以及锻锤底部与顶部的内径 R 。且随着锻锤顶部圆弧半径的减小，锻压的形成也会因此增大。

锻锤的径向行程也可近似为一正弦函数：

$$H = S/2(\sin 2\pi ft) \quad (3)$$

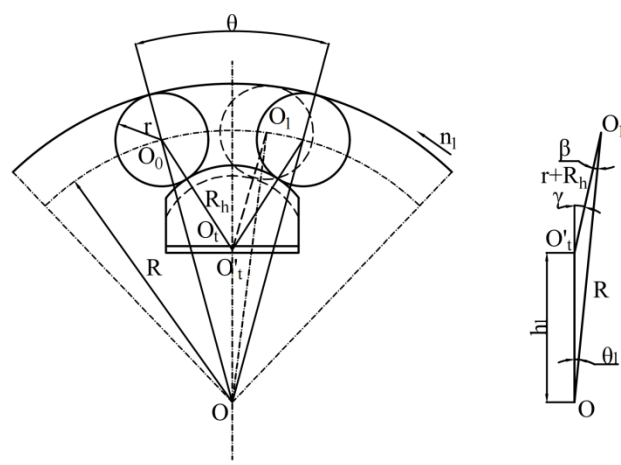


Figure 4. Movement trajectory diagram of the forging hammer
图 4. 锻锤运动轨迹图

2.3. 有限元模型建立

如图 5 则是工件缩径成形的有限元模型简化示意图，其中工件采用的是 6061 铝合金管件，由于模具与芯棒在实际成形过程中不会有形状的变化，所以采用径向分布四块模具，并将其与芯棒设置为刚体，在数值模拟过程中，忽略两者的形变，并将进给的速度、下压距离、摩擦系数等工艺参数施加在相应接触点上。如表 1 即为有限元模拟中的相关工艺参数。

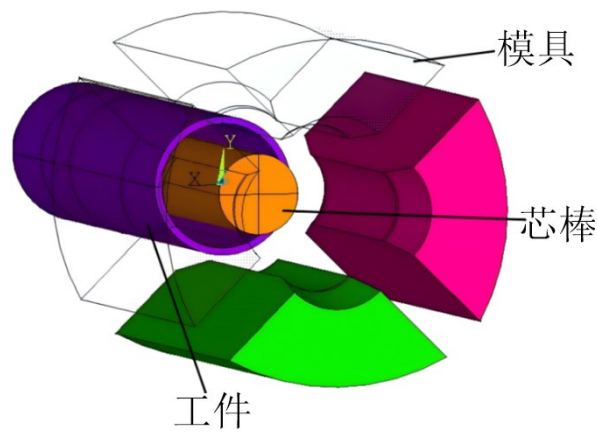


Figure 5. Radial reduction finite element model diagram
图 5. 径向缩径有限元模型图

Table 1. Process parameters
表 1. 工艺参数

参数	工件直径	厚度	密度	泊松比	进给速度	下压距离
数值	20 mm	1 mm	2.7 g/cm ³	0.33	20 mm/s	3 mm

3. 数值模拟分析

3.1. 锤面形状对于载荷的影响

在成形过程中，管件与受锻锤塑性接触发生形变时，由于入口面的形状不同，其所受的载荷也会因此而发生改变，如图 6 为不同入口面下的径向与轴向载荷随时间变化的示意图。从径向载荷和轴向载荷分布图可以看到，在成形前期，线性面与前凸面曲线都是随着成形时间的递增逐渐缓慢增大，而内凹面则是由于锤面向内凹陷而与工件前端没有直接接触直到进给距离增大后载荷开始增大。在某一刻锤面与工件完全接触后，前凸面与线性面的径向载荷依旧在以较大速率增加，只有线性面则开始逐渐放缓增长趋势，而轴向载荷由于工件需要一直送进，故三者均以一种较稳定的趋势增大。

由图中也可看到，锻锤入口面的形状不同对于载荷分布有着一定的影响，其中入口为线性面的锻锤模具在载荷方面相对来说要优于其他形状。

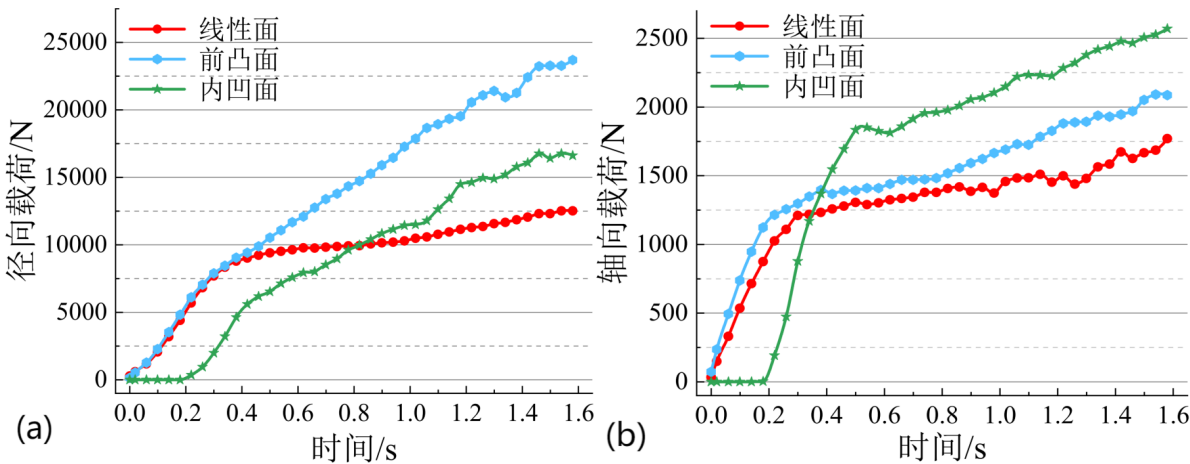


Figure 6. Load distribution of different inlet surfaces: (a) Radial load; (b) Axial load
图 6. 不同入口面的载荷分布: (a) 径向载荷; (b) 轴向载荷

3.2. 速度场分布的影响

如图 7 为工件进给到与锻锤面完全接触时的速度场分布图。从图中可以看到，在入口面完全成形的时刻，线性面的瞬时最大速率为 420、前凸面为 970、内凹面则是 686，其中在斜面锻造区的二次成形处分布一中性面，此时的金属流速方向刚好垂直轴线且两侧的金属分别朝轴向反方向移动。

从图中可以看到，线性面与前凸面在成形部分的金属整齐地沿轴向方向分布，而内凹面则是分布方向较为混乱无序，且流速最大区域是集中分布在工件的前端成形部分，整体来看线性面与前凸面的流速分布情况较好，但是前凸面的斜面锻造区域并没有出现中心面的分布，而且最大流速也是集中出现在了前端的成形面，在进给速度较大的情况下，容易引起材料流速过快使得工件前端出现翘起现象。

3.3. 应力分布的影响

如图 8 为工件成形时的等效应力分布图，从图中可以看到三者的最大应力均为 310 Mpa，而最小应

力则是线性面最小为 14.55、前凸面与内凹面分别为 110.1 和 81.53。在锻模入口面为线性面下成形的工件呈现锻造斜面区域应力集中分布最大，并沿轴线向下逐级递减，整体分布较为均匀；而前凸面与内凹面虽然也是应力集中分布在锻造区，但是成形区内依然有着最大的应力集中分布，两者的锻造区顶部也出现了压弯现象，而过大的应力集中也容易引起工件的失稳现象，进而影响最终成形效果。

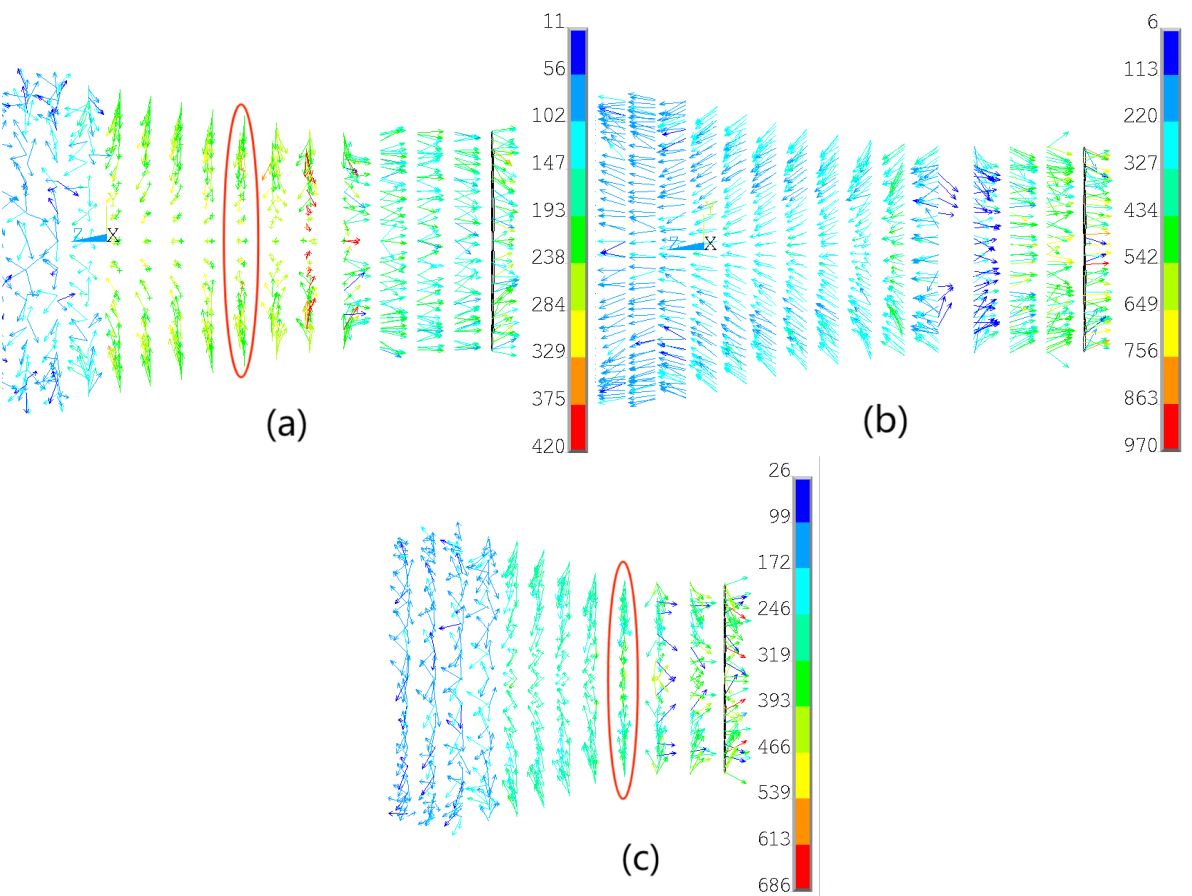


Figure 7. Speed field distribution of different inlet surfaces: (a) Linear surface; (b) Front convex surface; (c) Internal concave surface
图 7. 不同入口面的速度场分布: (a) 线性面; (b) 前凸面; (c) 内凹面

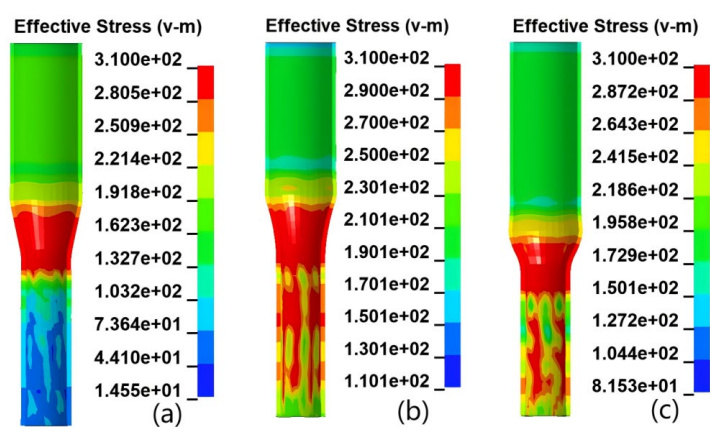


Figure 8. Stress distribution of different inlet surfaces: (a) Linear surface; (b) Front convex surface; (c) Internal concave surface
图 8. 不同入口面的应力分布: (a) 线性面; (b) 前凸面; (c) 内凹面

3.4. 成形质量的影响

在径向锻造成形过程中，工件锻前的外直径为 20 mm，厚度为 1 mm，芯棒的直径为 11.6 mm，而锻后所需工件的直径为 14 mm，计算可得锻后的壁厚理论上应为 1.2 mm，因此以圆周厚度变化作为工件成形质量评估指标。如图 9 为在锻造完成后选取的成形区域截面的周向方向的厚度变化图，表 2 则是不同形状入口面下工件成形区截面的厚度均值。从图中可以看到，锻锤线性面的厚度变化曲线紧密环绕在刻度 1.2 mm 边缘，而前凸面与内凹的厚度则分布在 1.2~1.3 mm 之间徘徊。由表 2 也可看到线性面的厚度均值为 1.1955 mm，而前凸面与内凹面则分别是 1.2515 mm、1.2518 mm。

由此也可知，锻锤入口面形状不同，则工件成形后的表面质量也会随之改变，线性面下工件成形表面更加平直，厚度分布更加均匀；而前凸面与内凹面下两者由于锻造斜面区的接触面积相较于线性面是更大的，容易增大锻造载荷出现轴向厚度的分布不均现象，从而加剧工件的震动，影响成形的质量。

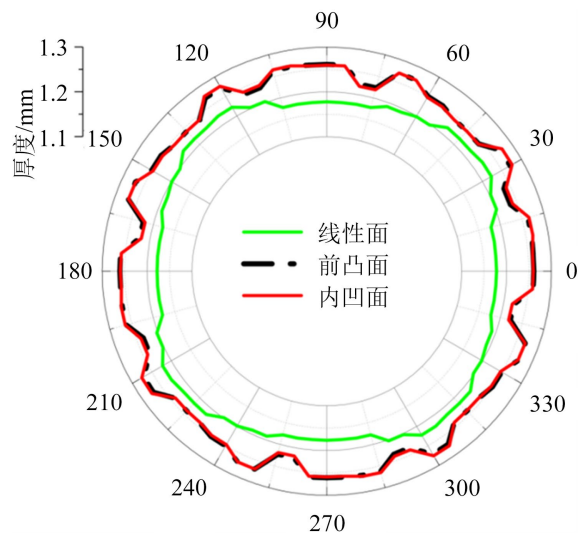


Figure 9. Weekly directional thickness variation plot
图 9. 周向厚度变化图

Table 2. Mean value table of weekly directional thickness
表 2. 周向厚度均值表

参数	线性面	前凸面	内凹面
数值	1.1955	1.2515	1.2518

4. 总结

- 1) 不同形状的锻锤入口面也会影响工件所受的载荷，线性面相对于前凸面与内凹面来说接触面积更小，其径向的受载就更小，也能缓解机器工作时的压力。
- 2) 金属材料的流动在内凹面下成形时较为混乱，在线性面与前凸面成形下的工件则分布整齐有序。但是前凸面成形下的管件却并没有出现材料流动的中性面，且金属的流速也相对较大，在进给速度较大时，容易出现前端翘起现象。
- 3) 线性面下的工件应力分布要更加整齐，没有出现应力集中引起的失稳压弯现象；要使得成形件厚度分布均匀且成形质量更好，锻锤面与工件的接触面积就要减小，进而也能减小机器的受载，提升成形的质量。

参考文献

- [1] Darki, S. and Raskatov, E.Y. (2020) Analysis of the Hot Radial Forging Process According to the Finite Element Method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **110**, 1061-1070. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05852-3>
- [2] Tian, T., Cao, M., Xu, H., Zhang, Q. and Han, B. (2022) Processing and Microstructure Analysis on the Precision Rotary Swaging of Inner-Stepped Aero-Engine Shaft. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **122**, 3199-3216. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10118-1>
- [3] Wu, Y., Dong, X. and Yu, Q. (2015) Upper Bound Analysis of Axial Metal Flow Inhomogeneity in Radial Forging Process. *International Journal of Mechanical Sciences*, **93**, 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.01.012>
- [4] 袁海兵, 杨益, 陈博文, 等. 浅谈中空轴锻件的径向锻造[J]. 锻造与冲压, 2025(1): 35-38.
- [5] Sanjari, M., Karimi Taheri, A. and Ghaei, A. (2007) Prediction of Neutral Plane and Effects of the Process Parameters in Radial Forging Using an Upper Bound Solution. *Journal of Materials Processing Technology*, **186**, 147-153. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.12.029>
- [6] 王祺浩. 叶片毛坯径向锻造成形过程数值模拟及工艺优化研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2024.
- [7] 袁海兵, 杨益, 陈博文, 等. 浅谈中空轴锻件的径向锻造[J]. 锻造与冲压, 2025(1): 35-38.
- [8] Sanjari, M., Karimi Taheri, A. and Ghaei, A. (2007) Prediction of Neutral Plane and Effects of the Process Parameters in Radial Forging Using an Upper Bound Solution. *Journal of Materials Processing Technology*, **186**, 147-153. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.12.029>
- [9] Toenjes, A., Ishkina, S., Schenck, C., von Hehl, A., Zoch, H. and Kuhfuss, B. (2018) Eccentric Rotary Swaging Variants. *MATEC Web of Conferences*, **190**, Article No. 15003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819015003>
- [10] 张雪, 樊黎霞, 张鹤词. 身管线膛精密径向锻造的锻透性分析[J]. 兵工学报, 2019, 40(3): 473-479.
- [11] Zou, J., Ma, L., Zhu, Y., Jia, W., Han, T., Yuan, Y., *et al.* (2021) Deformation Mechanism of ZK60 Magnesium Bars during Radial Forging: Mathematical Modeling and Experimental Investigation. *Materials Characterization*, **179**, Article ID: 111321. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111321>
- [12] 王碧凝, 王新宝, 周亚宁, 等. 基于 T-S 模糊神经网络和田口法的热径向锻造端部凹坑预测[J]. 锻压技术, 2018, 43(5): 6-10.