

锻造

大轴径比工件辊锻过程宽展变形研究

张宏昱^{1,2}, 阮金华^{1,2}, 林继彬^{1,2}, 相博洋^{1,2}, 赵三星^{1,2}, 郭万富^{1,2}, 代 奥^{1,2}

(1. 武汉科技大学 冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081;

2. 武汉科技大学 精密制造研究院, 湖北 武汉 430081)

摘要: 针对现有的塔尔诺夫斯基宽展模型在设计辊锻模具过程中无法获得重剑等大轴径比锻件的辊锻宽展系数的问题, 开展了大轴径比锻件平锻实验研究, 解析了平锻实验宽展数据, 并补充了塔尔诺夫斯基宽展模型。基于扩展后的模型设计了某型重剑剑条 14 道次的辊锻拔长模具, 建立了剑条辊锻拔长过程的塑性有限元模型, 模拟了第 5 道次剑身辊锻拔长过程, 并采用应变分析和应力分析得到了辊锻变形区的金属流动规律。结果显示: 宽展主要来源于锻件高度方向的压缩变形区, 有限元模型预测的宽展量与平锻实验得到的等效宽展量吻合较好。该研究成果可用于指导大轴径比锻件辊锻模具设计及辊锻工艺优化。

关键词: 塔尔诺夫斯基宽展模型; 辊锻; 宽展; 大轴径比; 金属流动

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.001

中图分类号: TG335.62

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 10-0001-07

Research on wide stretching deformation of large shaft-to-diameter ratio workpiece during roll forging process

Zhang Hongyu^{1,2}, Ruan Jinhua^{1,2}, Lin Jibin^{1,2}, Xiang Boyang^{1,2}, Zhao Sanxing^{1,2}, Guo Wanfu^{1,2}, Dai Ao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of

Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. Precision Manufacturing Institute, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: For the problem that the existing Tarnovsky wide stretching model cannot obtain the roll forging wide stretching coefficient of forgings with large shaft-to-diameter ratio such as epee swords during the design process of roll forging mold, an experimental study on flat forging of forgings with large shaft-to-diameter ratio was carried out, the experimental wide stretching data of flat forging was analyzed, and the Tarnovsky wide stretching model was supplemented. Based on the supplied model, a 14-pass roll forging stretching mold for a certain type of epee sword bar was designed, the plastic finite element model of the roll forging stretching process of sword bar was established, and the roll forging stretching process of the 5th pass of sword body was simulated. Finally, the metal flow law in the roll forging deformation zone was obtained by strain analysis and stress analysis. The results show that the wide stretching mainly comes from the compression deformation zone in the height direction of forgings, and the wide stretching predicted by the finite element model is in good agreement with the equivalent wide stretching obtained in the flat forging experiment. Thus, the research results can be used to guide the design of roll forging molds and the optimization of roll forging process for forgings with large shaft-to-diameter ratio.

Key words: Tarnovsky wide stretching model; roll forging; wide stretching; large shaft-to-diameter ratio; metal flow

近年来, 我国击剑运动员在国际、国内比赛中表现出色, 击剑运动在我国迅速发展, 市场对剑条的需求量不断增加。某型重剑剑条长为 1100 mm, 最小横截面的等效直径为 $\Phi 6.2$ mm, 其轴径比高达

177, 是非典型的大轴径比变截面工件, 不适合采用车削等加工方式生产。传统上常采用自由锻造和手工打磨方式生产, 其生产效率低、成品尺寸精度差、成本高、噪音和粉尘污染严重, 不能满足市场需求。本文提出了一种辊锻拔长制坯+模锻成形技术来生产此类大轴径比变截面重剑剑条, 以期实现自动化或半自动化生产。前期设计并优化了大轴径比剑条的模锻模具, 研究了模锻模具的几何参数对模锻过程中金属流动均匀性的影响规律^[1]。

在体积不变的条件下, 辊锻拔长制坯过程中金属

收稿日期: 2023-02-17; 修订日期: 2023-05-22

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51701145)

作者简介: 张宏昱 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: zhanghongyu@wust.edu.cn

通信作者: 阮金华 (1985-), 男, 博士, 副教授

E-mail: Ruan_Jinhua@wust.edu.cn

的横向流动直接影响工件的拔长, 过大的横向宽展导致锻件拔长困难, 预测并控制辊锻过程中的金属流动是开发大轴径比工件辊锻拔长新工艺的关键。随着计算机资源和商用有限元平台的发展, 采用实验结合有限元法解析金属塑性流动规律已成为塑性加工领域的主流研究手段^[2]。董冠求等^[3]利用多道次立辊调整带钢边部的形状, 精确控制宽展量, 严格控制平面形状及截面形状, 改善了轧制状况, 提升了板凸度和板形精度且减少了头尾偏差。马后梁等^[4]通过分析带轮冷辗扩成形过程的等效应力场和等效塑性应变场演变规律, 认为适当地增加带轮第 2 道次冷辗扩精整阶段的时间, 可有效消除环件端面的宽展缺陷。张梦^[5]运用辊轧工艺生产差厚特征一体化板壳件, 分析了辊轧过程中宽展产生的两种不同情况, 对于宽展不均采用了改变辊径、板宽和板厚的方法进行改善。徐峰杰^[6]采用辊锻成形加工方式加工折叠式套管, 运用了 Deform-3D 有限元软件分析每道次的金属流动速度场、等效应力值以及各道次辊锻后的锻件延伸量和绝对宽展。唐俊琦^[7]利用 ABAQUS 软件对变截面钢板弹簧的辊锻工艺进行了仿真分析, 研究了宽度预压与厚度成形过程中的应变、接触面积、轧制压力和尺寸的变化, 并分析了产生宽度误差的主要原因。徐皓等^[8]在平板锻模型的型腔四周增加半圆形阻力槽, 增加了边角方向的金属流动均匀性, 提高了材料的利用率。常彬彬等^[9]通过数值模拟研究了 TC4 钛合金棒材在三辊连轧过程中金属塑性应变和辊缝区域金属流动的规律, 结合孔型宽展计算公式, 进一步完善了不同孔型系统辊缝区域金属质点的自由宽展流动模型。李启尧等^[10]研究了摩擦力在粗轧过程中对强制宽展的影响, 结果表明, 摩擦因数越小, 轧制力越小, 相反, 摩擦因数增大会使宽展增大。王振华等^[11]以热连轧粗轧矩形板为研究对象, 得到了板坯宽展及速度场中的加权系数模型, 并且验证了该模型的准确性。彭俊华等^[12]借助数据分析方法拟合公式, 使热轧精轧的宽展预测更加精准。可见, 温度、模具型腔、锻件形状和规格、模具/锻件摩擦等是影响辊锻过程中金属横向流动的主要因素。

本文开展了大轴径比工件的平锻实验研究, 扩展了塔尔诺夫斯基宽展模型^[13]。基于扩展后的模型, 设计了某型大轴径比重剑剑条的 14 道次辊锻模具, 在商用有限元平台上建立起大轴径比剑条辊锻拔长过程的塑性有限元模型, 模拟了第 5 道次椭圆形孔型的辊锻过程, 解析了辊锻过程的中金属流动规律, 并比较了扩展后的塔尔诺夫斯基宽展模型的预测宽展和有限元模型的解析宽展。

1 大轴径比工件平锻实验研究

某型重剑的剑条轴径比高达 177, 其辊锻拔长过程中坯料变形区的平均高度和平均宽度很小, 超出了塔尔诺夫斯基宽展模型的预测范围。因此, 现有的塔尔诺夫斯基宽展模型无法指导大轴径比重剑剑条辊锻拔长模具的设计优化。针对大轴径比重剑剑条辊锻工艺参数范围, 设计了如表 1 所示的平锻实验方案。

表 1 平锻实验参数设置及宽展量

Table 1 Process parameters and wide stretching of flat forging experiment

编号	锻件高度/mm	锻件宽度/mm	宽高比	压下率/%	宽展量/mm	宽展系数	轧后标距/mm
1	14.50	14.50	1.00	42	5.70	0.93	64.05
2	16.98	8.56	0.50	39	3.66	0.55	59.53
3	9.90	9.90	1.00	41	4.83	1.18	57.67
4	11.88	6.08	0.51	36	2.79	0.65	55.06
5	7.46	7.40	0.99	37	3.47	1.27	54.67
6	9.10	4.44	0.49	40	2.59	0.71	54.27
7	5.70	5.70	1.00	12	0.55	0.78	52.36

1.1 实验方案

在 GD500 辊锻机上进行大轴径比工件辊锻宽展实验研究。实验材料为 60Si₂Mn 弹簧钢, 长方体锻件的长度为 100 mm, 横截面宽厚比近似于大轴径比重剑剑条辊锻设计的宽厚比, 在锻件两侧中间位置沿长度方向上以 50 mm 为间隔进行标记, 便于锻后评价试样伸长率。锻件通过感应加热至 1100 ℃ 左右, 送入辊锻机, 锻后冷却至室温并测量宽展量。相同规格的锻件重复 3 次辊锻实验, 以消除测量、操作等误差, 图 1 为平锻后锻件。

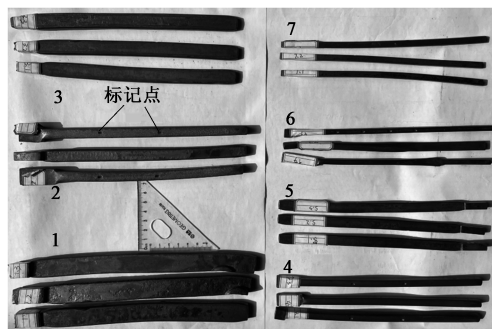


图 1 平锻后的锻件

Fig. 1 Forgings after flat forging

1.2 实验结果

平锻后锻件的横截面均为图 2 中所示的单鼓形,

平锻后的坯料宽度 $b_1 = (b_{11} + 2b_{12}) / 3$ 。采用图 2 中的方法测量辊锻前后的锻件宽度，测量锻件两侧的标记长度，测量结果如表 1 所示。比较 1、3 和 5 组实验，在宽高比近似等于 1、压下率近似等于 40% 的条件下，锻件的初始高度越大，宽展系数越小，锻件伸长率也随之增大；比较 2、4 和 6 组实验，在宽高比近似为 0.5、压下率近似等于 40% 的条件下，也能得出上述结论。比较 1~6 组实验可知，压下率近似等于 40% 条件下，宽高比大则宽展系数大。第 6 组实验中锻件的宽高比近似为 0.5，锻件的宽度仅为 4.44 mm，在 40% 压下率条件下平锻过程中锻件的稳定性差导致其沿轧向扭转，锻后很难准确测量其宽展量。采用塑性有限元法模拟第 6 组实验锻件的辊锻过程，并利用有限元模拟结果修正实验测量的宽展量。

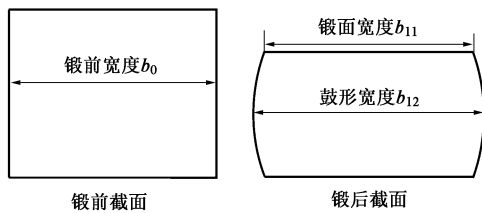


图 2 平锻实验的宽度测量方法

Fig. 2 Measurement method of width in flat forging experiment

将表 1 中的实验结果补充至图 3 所示的塔尔诺夫斯基宽展模型中。其中， h_p 为坯料在变形区的平均高度，mm， $h_p = (h_0 + h_1) / 2$ ； h_0 为辊锻前的坯料高度，mm； h_1 为辊锻后的坯料高度，mm； b_p 为坯料在变形区的平均宽度，mm， $b_p = (b_0 + b_1) / 2$ ； l 为变形区长度，mm， $l = \sqrt{R_g \Delta h}$ ； R_g 为锻辊的工作半径，mm； Δh 为坯料高度变化量，mm。拟合出 $h_p/l = 0.225$ 和 $h_p/l = 0.275$ 两条曲线，如图 3 所示。其

中， $h_p/l = 0.275$ 散点拟合曲线位于原曲线 $h_p/l = 0.300$ 和 $h_p/l = 0.250$ 之间； $h_p/l = 0.225$ 散点拟合曲线位于原曲线 $h_p/l = 0.250$ 左侧。可以看出，拟合曲线与原模型曲线具有相似的变化趋势。

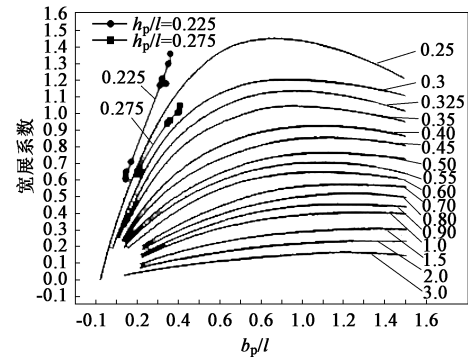


图 3 扩展后的塔尔诺夫斯基宽展模型

Fig. 3 Tarnovsky width stretching model after extension

2 大轴径比工件辊锻过程热力耦合刚塑性有限元模型

基于扩展后的塔尔诺夫斯基宽展模型，设计了图 4 所示的某型大轴径比重剑剑条的 14 道次辊锻型槽，其中，1~4 道次为剑柄辊锻型槽，5~14 道次为剑身辊锻型槽，上、下模具的外径 R 均为 $\Phi 620$ mm，内径 r 均为 $\Phi 500$ mm，宽度 L 均为 680 mm。剑柄型槽为椭圆/圆交替形状，第 5 道次剑身型腔为椭圆，第 14 道次型腔为圆，中间道次形状为椭圆/方形交替形状。在商用有限元平台上建立第 5 道次剑身辊锻过程的热力耦合塑性有限元模型，根据辊锻模具、坯料和辊锻过程的对称性，选取 1/4 (半径 $r' = 7$ mm) 锻件和 1/2 上模模具建立图 4 所示的第 5 道次辊锻过程热力耦合塑性有限元模型，以提高

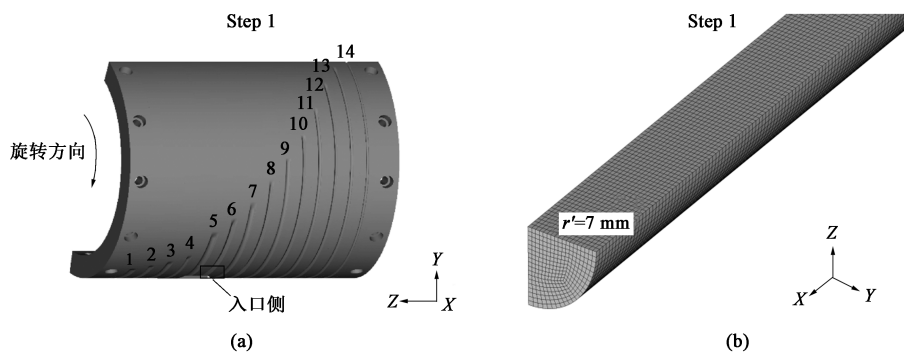


图 4 大轴径比锻件的辊锻过程有限元模型

(a) 上模模具 (b) 锻件 1/4 模型

Fig. 4 Finite element model of roll forging process for forgings with large shaft-diameter ratio

(a) Upper die (b) Quarter model of forging

模拟精度和节约计算资源。

剑条材料为 60Si2Mn 弹簧钢, 其流变应力模型用双曲正弦 Arrhenius 函数表示为^[14]:

$$\dot{\varepsilon} = 2.94 \times 10^3 [\sinh(0.003\sigma)]^{1.6820} \exp\left(-\frac{85151.58}{8.314T}\right)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为等效应变速率, s^{-1} ; σ 为等效应力, MPa; T 为变形温度, K。

在 Hypermesh 中采用六面体网格划分坯料单元, 并导入 Deform-3D 前处理模块, 网格数量为 181500 个, 网格最小边缘长度为 0.26 mm。坯料初始温度为 1100 °C, 模具初始温度为 300 °C, 设置坯料 (0, -1, 0) 和 (0, 0, 1) 两个对称面, 模具/坯料设为剪切摩擦, 摩擦因数取 0.6, 模具/坯料接触导热系数设置为 $5000 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$, 模具绕其轴线做旋转运动, 角速度为 $0.2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 每步计算的时间为 0.001 s, 坯料靠摩擦力咬入模具并实现稳定辊锻。

3 辊锻过程有限元模拟结果及宽展分析

采用上述大轴径比锻件的辊锻过程热力耦合塑性有限元模型, 模拟了剑身第 5 道次的辊锻过程, 解析了辊锻过程中金属的流动规律。

图 5 为第 5 道次辊锻过程中锻件在宽度方向上的位移分布, 在锻件辊锻完成处均匀选取 20 个点

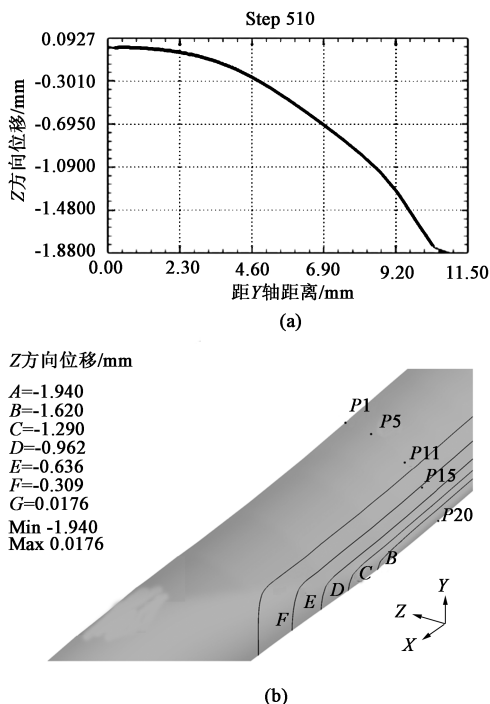


图 5 锻件宽度方向 (Z 方向) 的位移分布曲线 (a) 和分布图 (b)

Fig. 5 Displacement distribution curve (a) and diagram (b) of forgings along width direction (Z direction)

P1~P20, 其中 A~G 分别为沿 Z 方向的等值线。可见, 辊锻过程中金属发生了明显的横向流动, 从锻件宽度方向对称面到其自由宽展边, 宽展量从 0 mm 增加至 1.88 mm。图 6 为采用相应矩形法^[15] 计算第 5 道次锻件在辊锻前后的相应矩形尺寸, 其中, a 和 b 分别为辊锻后椭圆截面的长、短轴, a' 和 b' 分别为相应矩形的长度、宽度, a'' 和 b'' 分别为相应方形的边长。在保持长短轴比值和横截面面积相等的条件下, 辊锻前相应矩形的长宽均为 12.40 mm, 辊锻后相应矩形的长宽分别为 16.44 和 7.98 mm, 通过有限元法解得第 5 道次的辊锻宽展系数为 0.91; 相同工艺条件下计算得到 $h_p/l = 0.275$, $b_p/l = 0.39$, 从图 3 扩展后的塔尔诺夫斯基宽展模型读得的第 5 道次宽展系数为 0.94, 与扩展后的塔尔诺夫斯基宽展模型预测的宽展系数相差 3.3%, 满足工程应用的精度要求。

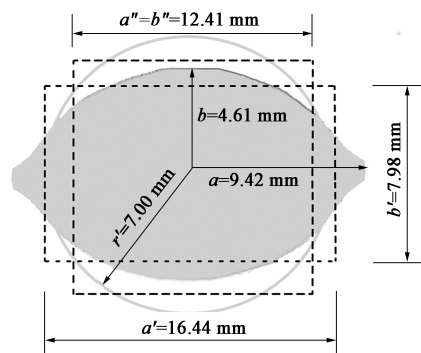


图 6 第 5 道次辊锻前后的相应矩形尺寸

Fig. 6 Corresponding rectangle sizes before and after the fifth pass of roll forging

图 7 为第 5 道次辊锻过程中锻件在长度方向上的位移分布, 从锻件宽度方向对称面到其自由宽展边, 长度方向的位移从 134.90 mm 减小至 133.66 mm。

图 8 为辊锻过程中锻件主变形区宽展速度分布。基于辊锻过程中最小阻力法则, 锻件厚度方向上的被压下金属在长度和宽度方向上同时流动, 锻件宽度方向对称面区域的被压下金属主要沿其长度方向流动, 而靠近锻件自由边区域的被压下金属更易于沿其宽度方向流动。

图 9 为辊锻过程中锻件等效应变速率分布情况, 可见, 金属流动主要发生在辊缝之间的锻件区域, 位于辊缝外的锻件区域未发生塑性变形, 前后变形区刚端的存在抑制了变形区金属的横向流动。

图 10 为辊锻变形区第二主应变速率分布, 图中显示的主变形区的部分区域为第二主应变速率小于 0 的区域, 其他区域为第二主应变速率大于 0 的区

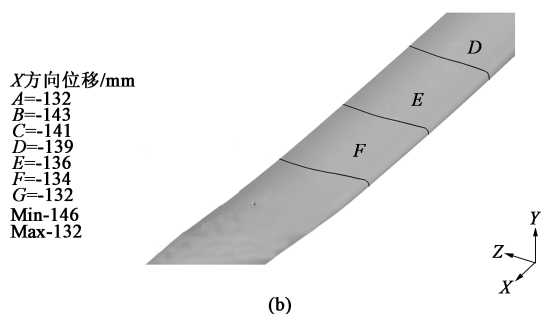
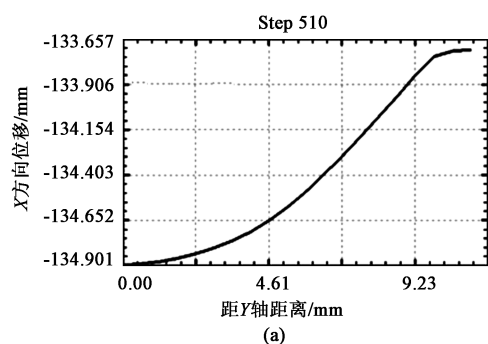


图 7 锻件长度方向 (X 方向) 位移分布曲线 (a) 和分布图 (b)

Fig. 7 Displacement distribution curve (a) and diagram (b) of forgings along length direction (X direction)

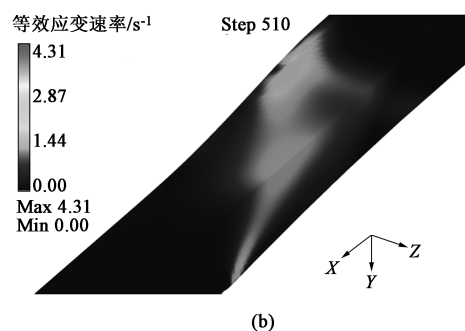
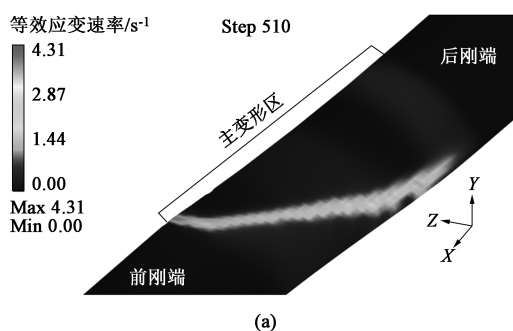


图 9 辊锻过程的等效应变速率分布

(a) 锻件外侧视图 (b) 锻件内部视图

Fig. 9 Equivalent strain rate distribution during roll forging process

(a) External view of forging (b) Internal view of forging

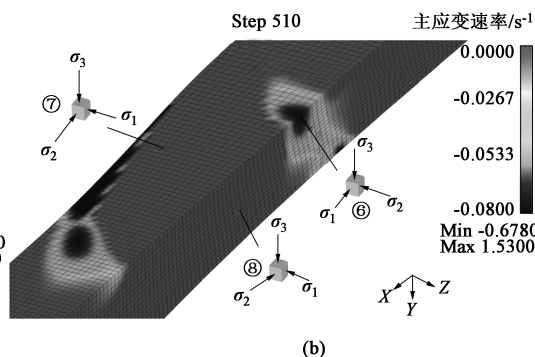
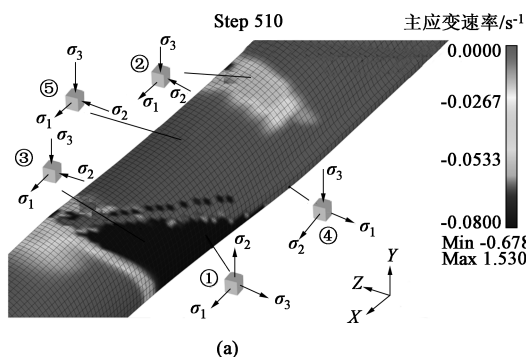


图 10 辊锻变形区的第二主应变速率分布

(a) 锻件外侧视图 (b) 锻件内部视图

Fig. 10 Distributions of the second principal strain rate in deformation zone during roll forging

(a) External view of forging (b) Internal view of forging

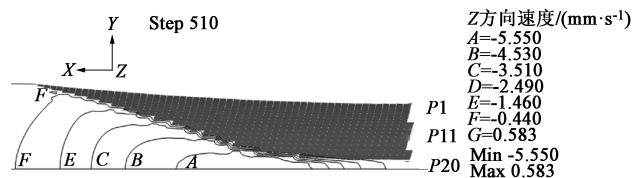


图 8 锻件主变形区的宽展速度分布

Fig. 8 Distribution of wide stretching speed in main deformation zone for forgings

域。第二主应变速率小于 0 的区域主要位于前、后刚端与主要变形区域之间。

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、第二、第三主应力。第二主应变速率大于 0 的区域, 其第一主应变速率大于 0 且第三主应变速率小于 0, 该点处于沿第三主应力方向压缩变形状态; 第二主应变速率小于 0 的区域, 其第一主应变速率大于 0 且第三主应变速率小于 0, 该点则处于沿第一主应力方向拉伸变形状态。

表 2 列出了图 10 中主变形区内 8 个代表性位置的应力、应变状态, 其中等效应变速率反映了该时刻各单元变形的快慢。

表 2 辊锻变形区应力、应变状态

Table 2 Stress and strain states in deformation zone of roll forging

位置	区域变形状态	第一主应力/MPa	第二主应力/MPa	第三主应力/MPa	等效应变速率/ s^{-1}
①	X 向拉伸	52.86	11.54	4.50	0.33
②	X 向拉伸	50.63	-54.57	-138.54	0.54
③	X 向拉伸	32.84	-5.42	-6.24	0.39
④	Y 向压缩	41.25	28.79	-62.32	0.99
⑤	Y 向压缩	8.55	-64.19	-145.21	0.33
⑥	X 向拉伸	-132.61	-187.12	-220.72	0.58
⑦	Y 向压缩	-4.68	-28.41	-89.27	1.27
⑧	Y 向压缩	-56.78	-63.37	-147.93	0.95

④号单元位于辊缝内非接触的自由变形区, 第三主应力沿 Y 轴方向且小于 0, 另外两个主应力大于 0, 该单元第三主偏量应力沿 Y 轴方向且小于 0, 第一主偏量应力和第二主偏量应力大于 0, 故④号单元处于 Y 轴方向压缩变形状态, 其第一主应变速率沿 Z 轴方向且大于 0 ($0.530 s^{-1}$), 第二主应变速率沿 X 轴方向且大于 0 ($0.400 s^{-1}$), 导致该区域金属横向流动形成宽展。

⑤号单元是主变形区内的接触单元, 第一主应力是沿 X 方向的拉应力, 其余两个主应力小于 0, ⑤号单元第三主偏量应力沿 Y 轴方向且小于 0, 第一主偏量应力和第二主偏量应力大于 0, 故⑤号单元处于 Y 轴方向压缩变形状态, 其第二主应变速率沿 Z 轴方向且大于 0 ($0.003 s^{-1}$), 其第一主应变速率沿 X 轴方向且大于 0 ($0.240 s^{-1}$), Y 轴方向压下金属主要沿 X 轴方向延伸, Z 轴方向的宽展量很小。

⑦号单元位于锻件主变形区高度方向 (Y 轴方向) 对称面上, 处于三向压应力状态, ⑦号单元第三主偏量应力沿 Y 轴方向且小于 0, 第一主偏量应力和第二主偏量应力大于 0, 故⑦号单元处于 Y 轴方向压缩变形状态, 其第一主应变速率沿 Z 轴方向且大于 0 ($0.830 s^{-1}$), 大于沿 X 轴方向的第二主应变速率 ($0.370 s^{-1}$), ⑦号单元所在区域是辊锻宽展的主要贡献区。

⑧号单元位于锻件主变形区宽度方向 (Z 轴方向) 对称面上, 处于三向压应力状态, ⑧号单元第三主偏量应力沿 Y 轴方向且小于 0, 第一主偏量应力和第二主偏量应力大于 0, 故⑧号单元处于 Y 轴方向压缩变形状态, 其第一主应变速率沿 Z 轴方向且大于 0 ($0.520 s^{-1}$), 大于沿 X 轴方向的第一主应

变速率 ($0.300 s^{-1}$), 可见⑧号单元所在区域对 Z 轴方向的宽展有很大贡献。

可见, ④号单元、⑤号单元、⑦号单元和⑧号单元代表的区域是辊锻过程中宽展发生的主要区域。

①号单元位于前刚端和主变形区域之间, 处于三向拉应力状态, 该单元第一主偏量应力是 X 方向的拉应力, 第二主偏量应力和第三主偏量应力小于 0, 故该单元处于 X 方向拉伸变形状态, 其第三主应变速率沿 Z 轴方向且小于 0 ($-0.260 s^{-1}$), 有利于减小金属的横向流动形成宽展。

③号单元与①号单元同处前刚端和主变形区域之间, 是辊缝内非接触单元, 其第一主应力沿 X 方向且大于 0, 其余两个主应力小于 0, 该单元第一主偏量应力沿 X 方向且大于 0, 第二主偏量应力和第三主偏量应力小于 0, 故该单元同处于 X 方向拉伸变形状态, 其第二主应变速率沿 Z 轴方向并小于 0 ($-0.180 s^{-1}$), 同样有利于减小金属的横向流动形成宽展。

②号单元是主变形区内的接触单元, 靠近后刚端, 与③号单元具有相同的应力状态, 故该单元同处于 X 方向拉伸变形状态, 其第二主应变速率沿 Z 轴方向并小于 0 ($-0.017 s^{-1}$), 该接触单元的摩擦力抑制了变形速率, 但其应力、应变状态有利于减小金属的横向流动形成宽展。

⑥号单元位于锻件主变形区两个对称面的交线上, 靠近后刚端, 处于三向压应力状态, 第一主偏量应力大于 0 且沿 X 轴方向, 第二主偏量应力和第三主偏量应力小于 0, 故⑥号单元处于 X 轴方向拉伸变形状态, 其第二主应变速率沿 Z 轴方向且小于 0 ($-0.080 s^{-1}$), 有利于减小金属的横向流动形成宽展。

可见, ①号单元与③号单元代表的区域位于前刚端和主变形区域之间, ②号单元与⑥号单元代表的区域靠近后刚端, 这两个 X 方向上的拉伸变形区均有利于减少宽展。在锻件两端添加张力, 可以增大这两个区域的范围, 可能有效减少宽展, 提高拔长效率。

4 结论

(1) 大轴径比锻件的平锻实验结果表明, 在给定宽高比和压下率下, 锻件初始高度越大, 宽展系数越小, 伸长率随之增大; 在压下率不变的条件下, 宽高比大则宽展系数大。扩展后的塔尔诺夫斯基宽展模型可用于大轴径比锻件的辊锻模具设计。

(2) 大轴径比重剑条辊锻过程的宽展主要来源于主变形区域锻件高度方向上的压缩变形,宽展量从锻件宽度中心位置到自由宽展边逐渐增大;前、后刚端与主变形区域之间均存在辊锻方向上的拉伸变形区域,该区域的拉伸变形有利于减小辊锻过程中的宽展。

参考文献:

- [1] 余归城,阮金华,张健民,等.细长变截面非轴对称工件模锻模具优化设计[J].锻压技术,2022,47(10):229-235.
Yu G C, Ruan J H, Zhang J M, et al. Optimization design of die forging die for slender variable section non-axisymmetric workpiece[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(10): 229-235.
- [2] 姜雪琦,樊晓光,詹梅,等.金属材料热变形中的塑性流动失稳研究进展[J].塑性工程学报,2020,27(7):33-51.
Jiang X Q, Fan X G, Zhan M, et al. Research progress on plastic flow instability in thermal deformation of metallic materials[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(7): 33-51.
- [3] 董冠求.热轧窄带钢高效生产实践[J].天津冶金,2022,(3):47-49.
Dong G Q. Efficient production practice of hot-rolled narrow strip steel[J]. Tianjin Metallurgy, 2022, (3): 47-49.
- [4] 马后梁,孙宝寿,束学道,等.汽车发动机带轮的冷辗扩成形机理[J].锻压技术,2022,47(9):145-151.
Ma H L, Sun B S, Shu X D, et al. Cold rolling and forming mechanism of automobile engine pulley[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(9): 145-151.
- [5] 张梦.带差厚特征一体化板壳件的辊轧成形新工艺研究[D].重庆:重庆大学,2019.
Zhang M. Research on New Roll Forming Process of Integrated Plate and Shell Parts with Differential Thickness Characteristics[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [6] 徐峰杰.折叠式连续套管辊锻成形工艺技术研究[D].成都:西南石油大学,2018.
Xu F J. Research on Folding Continuous Casing Roll Forging Technology[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [7] 唐俊琦.变截面钢板弹簧力学分析及辊锻成形仿真分析[D].武汉:武汉理工大学,2015.
Tang J Q. Mechanical Analysis of Variable Section Leaf Spring and Simulation Analysis of Roll Forging[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [8] 徐皓,刘江.基于Deform的平板锻模型腔四周增加半圆形阻力槽的研究实践[J].锻压技术,2021,46(5):179-184.
Xu H, Liu J. Research practice of adding semicircular resistance grooves around the cavity of flat forging die based on deform[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(5): 179-184.
- [9] 常彬彬,帅美荣,刘鑫.棒材三辊孔型自由宽展流动模型[J].锻压技术,2021,46(11):207-214.
Chang B B, Shuai M R, Liu X. Flow model of free spread in three-roll passes of rod[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(11): 207-214.
- [10] 李启尧,胡玉坤.粗轧过程中摩擦系数对强迫宽展的影响[J].现代制造技术与装备,2020,56(10):139-141.
Li Q Y, Hu Y K. Effect of friction coefficient on forced broadening in roughing[J]. Modern Manufacturing Technology & Equipment, 2020, 56(10): 139-141.
- [11] 王振华,刘元铭,王涛,等.粗轧过程中轧制力和宽展的预测与分析[J].钢铁,2022,57(9):95-102.
Wang Z H, Liu Y M, Wang T, et al. Prediction and analysis of rolling force and width in rough rolling process[J]. Iron and Steel, 2022, 57(9): 95-102.
- [12] 彭俊华,樊日倩,赵金凯.基于数据分析的热轧精轧宽展预测性改进[J].冶金自动化,2022,46(S1):175-178.
Peng J H, Fan R Q, Zhao J K. Prediction improvement of wide spread in hot finishing rolling based on data analysis[J]. Metallurgical Automation, 2022, 46(S1): 175-178.
- [13] 洪慎章.辊锻及横轧成形实用技术[M].北京:化工工业出版社,2013.
Hong S Z. Practical Technology of Roll Forging and Cross Rolling Forming[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [14] 孙伟,谢广平,吴波.60Si2Mn弹簧钢热变形行为研究[J].轧钢,2013,30(3):29-31,37.
Sun W, Xie G P, Wu B. Study on hot deformation behavior of 60Si2Mn spring steel[J]. Steel Rolling, 2013, 30(3): 29-31, 37.
- [15] 田平.基于数值模拟的大型大变截面连杆锻件辊锻制坯工艺研究[D].重庆:重庆理工大学,2010.
Tian P. Research on Roll Forging Process of Large and Large Variable Section Connecting Rod Forging Based on Numerical Simulation[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2010.

请关注更加新颖的公众号

www.qctester.com

