

新能源汽车底盘后上摆臂多道次锻造自动化模拟计算

金 晟¹, 白 玉¹, 张文会², 张广和², 陈守忠², 郝 海^{1,3}

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院 辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 浙江锐泰悬挂系统科技有限公司, 浙江 宁波 315511; 3. 大连理工大学宁波研究院, 浙江 宁波 315016)

摘要: 某新能源汽车底盘后上摆臂采用 30MnVS 非调质钢进行多道次锻造生产, 工艺流程长、研发周期长。为提高锻造工艺的研发效率, 采用数值模拟的方法对辊锻、制坯、预成形、终成形等主要成形道次进行了计算。采用 JMatPro 计算 30MnVS 非调质钢的力学性能参数, 再利用 DEFORM 前处理自动化程序, 对多道次锻造进行自动化模拟计算。通过分析各道次的宏观成形及温度、损伤、等效应力与等效应变场结果, 预测可能产生的缺陷, 得出各道次成形过程中的相对最优运行速度。通过对比实际产品的成形效果和缺陷, 验证了模拟的可靠性。证明了采用 JMatPro 计算材料参数及锻造模拟自动化的可行性, 该方法可以进一步提高锻造工艺的研发效率。

关键词: 后上摆臂; JMatPro; 30MnVS 非调质钢; 自动化模拟; 多道次锻造

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.002

中图分类号: TG316.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 01-0012-11

Automatic simulation calculation on multi-pass forging for rear upper swing arm for new energy vehicle chassis

Jin Sheng¹, Bai Yu¹, Zhang Wenhui², Zhang Guanghe², Chen Shouzhong², Hao Hai^{1,3}

(1. Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology (Liaoning Province), School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Zhejiang Ruitai Suspension System Technology Co., Ltd., Ningbo 315511, China; 3. Ningbo Research Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315016, China)

Abstract: The rear upper swing arm of a new energy vehicle chassis is produced by multi-pass forging using 30MnVS non-quenched and tempered steel, which requires a long process flows and long research and development cycle. Therefore, in order to improve the research and development efficiency of forging process, the main forming passes such as roll forging, billet making, pre-forming and final forming were calculated by numerical simulation method, and the mechanical performance parameters of 30MnVS non-quenched and tempered steel were calculated by JMatPro. Then, the DEFORM pre-processing automation program was used to perform the automated simulation calculations for multi-pass forging. Furthermore, by analyzing the macro-forming as well as temperature, damage, equivalent stress and equivalent strain field results of each pass, the potential defects were predicted, and the relative optimal operating speed during the forming process of each pass was obtained. The reliability of the simulation was verified by comparing the forming effect and defects of actual product. The result shows that the feasibility of material parameter calculation using JMatPro and automated forging simulation is proved, and this method can further improve the research and development efficiency of forging process.

Key words: rear upper swing arm; JMatPro; 30MnVS non-quenched and tempered steel; automatic simulation; multi-pass forging

随着新能源汽车市场的不断发展, 相关配套零部件的结构、性能需求变化较快。零部件的锻造大

多采用传统的经验-试错法进行研究, 研发周期较长。为满足不断变化的市场需求, 企业需要采用新的数值模拟方法以提高研发效率。基于 DEFORM-3D 软件对各类锻造工艺进行有限元分析已经得到广泛的应用, 可靠性与适用性也得到证明。赵顺治等^[1]基于 DEFORM-3D 对 42CrMo4 钢风机主轴空心轴预制坯锻造进行成形优化, 验证了新型模具成形的可行性。李月超等^[2]对带齿轴套的多级锻造工艺进行了分析, 提出了组合式冲头结构实现一次锻造

收稿日期: 2023-08-24; 修订日期: 2023-11-20

基金项目: 科技创新 2025 重大专项 (宁波市重大科技任务攻关项目) (2022Z048)

作者简介: 金 晟 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: js32005035@mail.dlut.edu.cn

通信作者: 白 玉 (1985-), 女, 博士, 副教授

E-mail: ybai@dlut.edu.cn

成形，利用 DEFORM-3D 软件进行了有限元分析，证实了新工艺的可靠。刘大海等^[3]利用 DEFORM-3D 软件对 GH5188 高温合金卡箍热模锻过程进行了模拟计算，分析了锻造变形过程中的等效应变、温度、平均晶粒尺寸及再结晶体积分数，验证了工艺参数及模具设计的合理性。黄晶晶^[4]基于 DEFORM-3D 软件，对汽车法兰盘零件的锻造成形工艺进行模拟，分析了锻造过程中的温度与模具磨损状况，得到了符合性能要求的法兰盘成形最佳工艺。杨兴旺等^[5]利用 DEFORM-3D 软件对 7055 铝合金飞机轮毂锻造工艺进行了优化，确定了最优的锻造工艺参数。陆建明等^[6]基于 DEFORM-3D 软件，进行了铝合金汽车转向节的锻造成形分析，计算出了成形过程中的最大温度、最大等效应力位置，研究了摩擦因数与最大等效应力、最大成形载荷的相关关系。赵玉琳等^[7]使用 DEFORM-3D 软件，针对钢质活塞塑性成形过程进行了模拟计算，预测了成形中可能出现的缺陷问题。目前，使用 DEFORM-3D 软件对锻造生产进行模拟计算已经得到了认可，然而，软件的固有计算模块很难满足实际生产中部分材料在成形模拟上的需求，因此软件功能的二次开发成为新的研究热点。

DEFORM-3D 软件的二次开发主要集中在对微观组织、力学性能等材料参数模型的自定义上，从而实现了锻造过程中微观组织演变的模拟计算。杨阳^[8]基于 DEFORM-3D 进行了二次开发，构建了 38MnVS6 非调质钢的微观组织演变模型，计算了偏心轴和曲轴锻造过程中的晶粒变化。李馨家^[9]基于 DEFORM-3D 软件开发了热锻成形多尺度模拟软件，计算了长方体钢试件在双道次拔长过程中的空洞缺陷演化，验证了坯料锻后组织的不均匀性。骆俊廷等^[10]基于 DEFORM-3D 软件的二次开发和 BP 神经

网络建模，实现了对 TA15 钛合金多向锻造变形的微观组织仿真，并证实了模拟计算和神经网络模型的组织预测效果基本一致。上述二次开发可以实现对锻造过程中材料晶粒组织、缺陷变化的精确模拟，而对如何实现数值模拟的自动化计算、提高研发效率的研究较少，需要进行相关的方法研究。

本文基于浙江锐泰悬挂系统科技有限公司现有某插电式混合动力汽车底盘后上摆臂的多道次热锻工艺，采用 JMatPro 软件计算 30MnVS 非调质钢的力学性能参数，基于 IMGUI 界面框架构建程序，调用脚本实现 DEFORM-3D 软件前处理 Key 文件进行自动化工艺参数修改与流程运算，节省了模拟设置步骤，实现了对多道次锻造的模拟自动化。

1 30MnVS 非调质钢材料力学性能计算

后上摆臂生产采用 30MnVS 非调质钢，具有省去调质工序，避免淬火开裂、变形及脱碳的优点。DEFORM-3D 软件数据库中不包含该钢种，进行锻造模拟需用户自定义 30MnVS 非调质钢在不同温度下的流变应力、杨氏模量和泊松比等相关力学性能参数曲线。采用实验的方式得到的力学性能结果的难度较大、成本较高，因此本文采用 JMatPro 计算材料力学参数。

使用 JMatPro 软件进行材料力学性能计算，可以得出 30MnVS 非调质钢的力学性能参数，为后续 DEFORM-3D 模拟锻造加工过程提供数据模型。根据 GB/T 15712—2016^[11]规定的 30MnVS 非调质钢的材料成分范围，选定如表 1 所示成分进行力学性能计算。将 JMatPro 计算的力学性能结果作为后续锻造过程模拟的材料参数。

表 1 30MnVS 非调质钢的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of 30MnVS non-quenched and tempered steel（%，mass fraction）

C	Si	Mn	S	Al	V	Ti	P	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
0.32	0.6	1.50	0.075	0.04	0.11	0.02	0.025	0.25	0.05	0.17	0.4	余量

2 后上摆臂多道次锻造模拟自动前处理

新能源汽车底盘后上摆臂的三维数模如图 1 所示。由于后上摆臂的结构复杂，难以一次成形，所以采用圆棒料经过一次加热后辊锻、制坯、预成形、

切边、弯形、终成形等多道次热锻方式生产，成形过程如图 2 所示。后上摆臂的多道次锻造成形流程较长，采用传统试错方式的研发成本较高；而选择模拟仿真计算，可以有效地提高研发效率，现使用 DEFORM-3D 软件进行多道次锻造过程模拟。

参考实际生产过程与企业现行工序卡片，依次进行各道次锻造过程模拟。在 DEFORM-3D 软件的



图 1 后上摆臂的三维模型

Fig. 1 3D model of rear upper swing arm

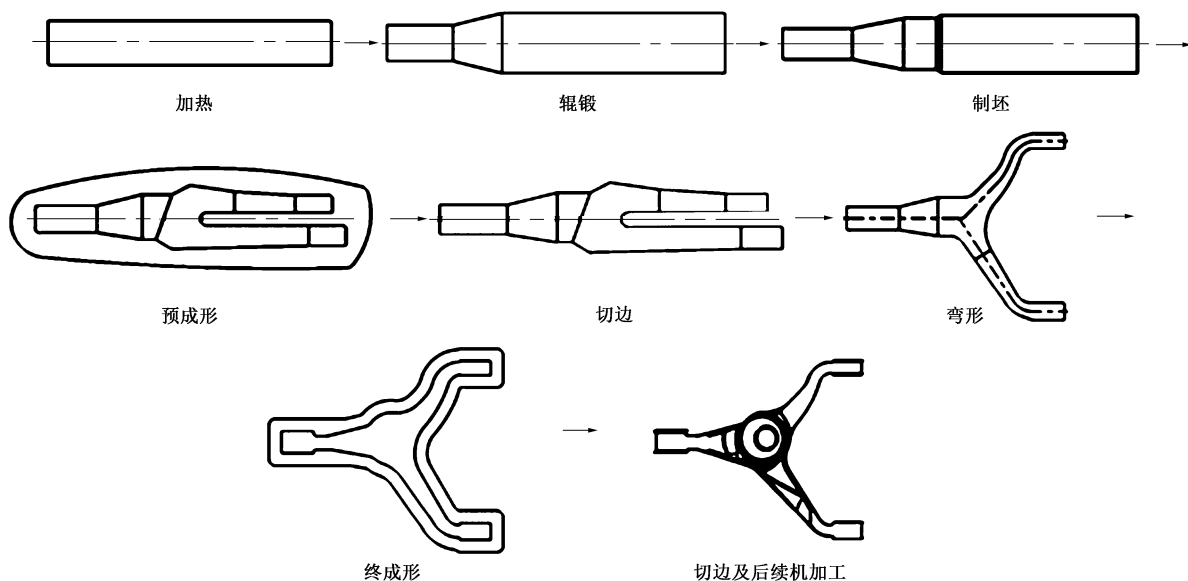


图 2 后上摆臂多道次锻造成形过程

Fig. 2 Multi-pass forging process of rear upper swing arm

(3) 模具与坯料间的摩擦因数设置为 0.3, 热传导系数设置为 $5000 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 。

(4) 模拟步数设置为 100 步, 采用时间步长为 0.0045 s。

通过修改各道次前处理设置所保存的 Key 文件中对应的数值并保存为新文件, 即可实现对前处理工艺参数的修改^[12]。利用 DEFORM 文本模式下 DEF_PRE.COM 程序界执行模拟前处理, 读取修改后的 Key 文件生成运算所需的 DB 文件, 再使用 DEF_ARM_CTL.COM 程序进行仿真模拟计算^[13]。本文基于 Omar Cornut 于 GitHub 上发布的 IMGUI 开源图形界面框架^[14], 创建了一个 DEFORM-3D 自动化前处理程序, 实现了 Key 文件参数的自动化修改、逐次计算, 运行界面如图 3 所示。通过设定坯料或模具的前处理参数的变化范围与步长, 可自动生成参数修

图形用户界面 (Graphics User Interface, GUI) 模式下进行前处理, 完成坯料和模具的初始温度、运行速度、材料参数、相对位置、接触关系、摩擦因数、传热系数等工艺参数, 以及模拟计算总步数与步长的设置。以一次辊锻为最初模拟步骤, 设置主要参数:

(1) 坯料为 $\Phi 70 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的圆棒, 塑性 (Plastic) 物体, 材料为 30MnVS 非调质钢, 初始温度为 1240°C , 运行速度为 $-X$ 方向, 大小为 $666 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 划分为 88469 个四面体网格。

(2) 模具模型为企业现行辊锻模型, 刚性 (Rigid) 物体, 材料为 H13 钢, 初始温度为 300°C , 沿模具中心运行, 不进行网格划分。

改后的新 Key 文件及对应的调用批处理 Bat 文件。通过逐次运行所生成的 Bat 文件, 实现对各成形道次的锻造模拟自动化计算。使用自动化修改程序, 设置好修改参数范围及步长后, 即可一键生成前处理文件, 将重复的前处理参数修改步骤, 简化为一次操作, 从而提高了模拟效率。

3 后上摆臂多道次锻造模拟结果分析

通过使用 1、2 章中 JMatPro 软件计算所得到的 30MnVS 非调质钢材料性能结果文件, 及模拟计算的自动化参数修改、调用运行的脚本, 实现了对新能源汽车底盘后上摆臂的多道次锻造脚本自动化模拟。按照所设置的坯料、模具运行速度的参数变化范围, 进行分步模拟计算, 利用 DEFORM-3D 后处



图 3 DEFORM-3D 自动化前处理程序

Fig. 3 DEFORM-3D automatic pre-processing program

理模块进行多道次锻造过程的模拟结果分析。

3.1 一次辊锻模拟结果

一次辊锻坯料为 $\Phi 70\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 的圆棒。通过比较模拟结果，分析得出在不同运行速度范围下坯料经过一次辊锻后产生的缺陷，如表 2 所示。

表 2 一次辊锻产生的宏观缺陷			
Table 2 Macroscopic defects caused by the first roll forging			
模具运行速度/ (rad · s ⁻¹)	缺陷	坯料运行速度/ (mm · s ⁻¹)	缺陷
3.30~3.33	变形量不足	660~666	变形量不足
3.33~3.36	过变形、折叠 凹陷	666~680	过变形、折叠 凹陷

当模具运行速度或坯料运行速度低于 $3.33\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 或 $666\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，坯料在一次辊锻的加工变形量不足，影响后续变形加工效果。当模具运行速度或坯料运行速度高于 $3.33\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 或 $666\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，坯料会出现过变形及折叠凹陷的缺陷。在 DEFORM-3D 后处理中，分析比较辊锻后的温度、损伤、等效应力与等效应变云图。统计不同参数下，一次辊锻后损伤、等效应力、等效应变的最大值，结果如表 3 所示。

在模具运行速度不变的情况下，随着坯料的运

表 3 一次辊锻后处理结果

Table 3 Post-processing results of the first roll forging

坯料运行 速度/ (mm · s ⁻¹)	模具运行 速度/ (rad · s ⁻¹)	损伤最大 值	等效应力 最大值/ MPa	等效应变 最大值
660	3.33	0.195	84.9	0.577
662	3.33	0.192	85.2	0.579
664	3.33	0.188	86.4	0.585
666	3.33	0.185	88.5	0.587
668	3.33	0.181	88.3	0.582
670	3.33	0.177	88.0	0.579
672	3.33	0.175	88.2	0.572
674	3.33	0.173	87.8	0.568
676	3.33	0.170	87.7	0.563
678	3.33	0.168	87.5	0.560
680	3.33	0.164	87.4	0.557
666	3.30	0.176	88.4	0.578
666	3.31	0.178	88.6	0.577
666	3.32	0.182	88.2	0.581
666	3.33	0.185	88.5	0.587
666	3.34	0.188	88.3	0.585
666	3.35	0.191	88.4	0.584
666	3.36	0.195	88.1	0.582

行速度从 $660 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高至 $680 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 锻后损伤最大值逐渐降低。锻后等效应力最大值随着坯料运行速度的增大出现先上升再小幅度波动的规律, 等效应变最大值则先增大后逐渐减小。在坯料运行速度不变的情况下, 随着模具运行速度从 $3.30 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高至 $3.36 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 锻后损伤最大值逐渐上升, 等效应力最大值的变化幅度小。而等效应变最大值呈现先增大、后减小的变化趋势, 总体变化幅度也较小。结合辊锻过程中产生的宏观缺陷分析, 可以得出, 一次辊锻的坯料最优运行速度为 $666 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、模具最优运行速度为 $3.33 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 在该条件下一

次辊锻后的成形效果相对最优。最优参数下的后处理结果云图如图 4 所示。可以看出, 经过一次辊锻后, 坯料与模具接触后由于存在热交换, 坯料被拉长的扁端的表面温度会有较明显的下降。在坯料发生变形的部分, 会出现较大的损伤值, 即容易在损伤值高的部位形成缺陷。在模具与坯料接触处存在较大的等效应力, 最高值处可达 88.5 MPa 。而在坯料与模具最先接触的扁端, 因变形而产生了较大的等效应变, 于尖端处达到最大值 0.5870 。因此在该最优条件下, 在部分位置仍存在产生一定微观缺陷的可能。

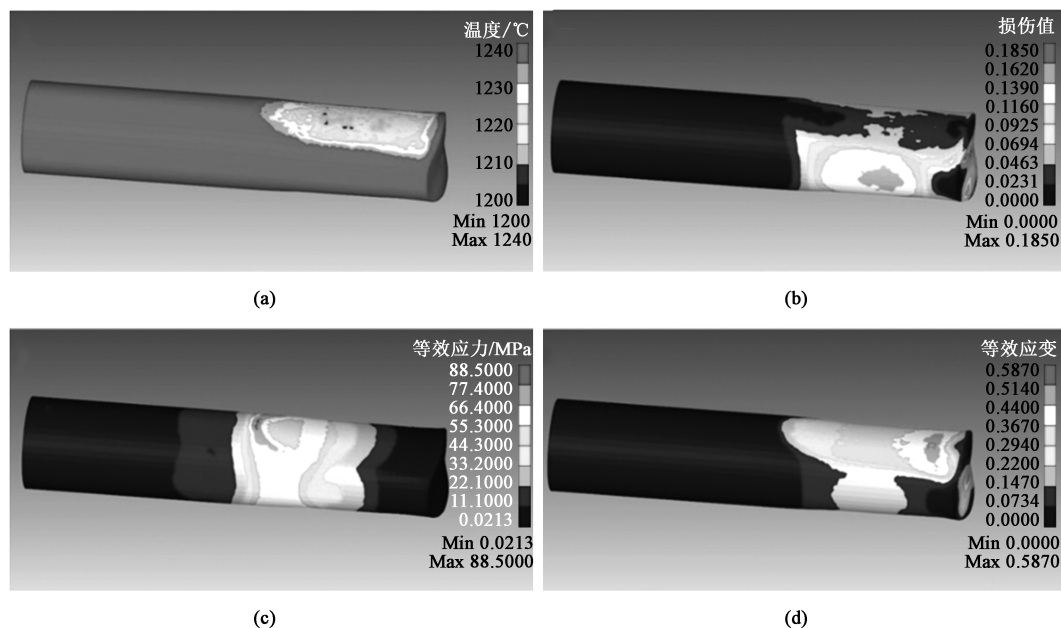


图 4 一次辊锻最优结果

(a) 温度 (b) 损伤值 (c) 等效应力 (d) 等效应变

Fig. 4 Optimal results of the first roll forging

(a) Temperature (b) Damage value (c) Equivalent stress (d) Equivalent strain

3.2 二次辊锻模拟结果

导出一次辊锻后的最优结果, 将其变形后的坯料模型导入至二次辊锻的模拟中, 传递前道次得到的坯料温度场、应力场等结果, 模具的初始温度为 $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 摩擦因数为 0.3 , 换热系数为 $5000 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, 修改坯料运行速度、模具运行速度, 进行二次辊锻的前处理设置。通过比较模拟结果, 分析得出在不同运行速度范围内, 坯料经过二次辊锻后产生的缺陷, 如表 4 所示。

当模具运行速度或坯料运行速度低于 $3.33 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 或 $666 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 坯料在二次辊锻的加工变形量不足。当模具运行速度或坯料运行速度高于 $3.33 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 或 $666 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 坯料会出现过变

表 4 二次辊锻产生宏观缺陷

Table 4 Macroscopic defects caused by the second roll forging

模具运行速度/ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	缺陷	坯料运行速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	缺陷
3.30~3.33	变形量不足	660~666	变形量不足
3.33~3.36	过变形、折叠 凹陷	666~680	过变形、折叠 凹陷

形及折叠凹陷的缺陷。在 DEFORM-3D 后处理中, 分析比较二次辊锻后的温度、损伤、等效应力与等效应变云图。统计不同参数下, 二次辊锻后损伤、等效应力、等效应变的最大值, 结果如表 5 所示。

在模具运行速度保持不变, 坯料运行速度从

表 5 二次辊锻后处理结果				
Table 5 Post-processing results of the second roll forging				
坯料运行 速度/ (mm·s ⁻¹)	模具运行 速度/ (rad·s ⁻¹)	损伤最大值	等效应力 最大值/ MPa	等效应变 最大值
660	3.33	0.516	93.1	3.10
662	3.33	0.512	93.8	3.15
664	3.33	0.508	94.4	3.18
666	3.33	0.505	95.6	3.24
668	3.33	0.502	95.7	3.26
670	3.33	0.480	95.9	3.29
672	3.33	0.476	95.6	3.26
674	3.33	0.475	95.5	3.25
676	3.33	0.472	95.3	3.24
678	3.33	0.469	95.2	3.25
680	3.33	0.467	95.0	3.24
666	3.30	0.495	97.5	2.91
666	3.31	0.498	97.2	3.12
666	3.32	0.501	96.4	3.18
666	3.33	0.505	95.6	3.24
666	3.34	0.509	94.8	3.17
666	3.35	0.515	94.2	2.86
666	3.36	0.519	93.6	2.71

660 mm·s⁻¹ 提升至 680 mm·s⁻¹ 的过程中，随着坯料运行速度的逐渐提升，二次辊锻后产生的损伤最

大值逐渐降低。而等效应力与等效应变的最大值先逐渐提升，当坯料运行速度达到 670 mm·s⁻¹ 后开始下降。在坯料运行速度保持不变，模具运行速度从 3.30 rad·s⁻¹ 提升至 3.36 rad·s⁻¹ 的过程中，损伤最大值逐渐提升，等效应力最大值逐渐降低。等效应变最大值呈现先上升后下降的趋势，当模具运行速度为 3.33 rad·s⁻¹ 时达到最大值。结合二次辊锻宏观缺陷分析，当坯料运行速度为 666 mm·s⁻¹、模具运行速度为 3.33 rad·s⁻¹ 时，成形效果相对最优。在该条件下，坯料宏观成形效果较好，且存在的损伤、等效应力及等效应变最大值均相对较低。二次辊锻最优参数下的后处理结果云图如图 5 所示。可以看出，经过二次辊锻后，坯料与模具接触后由于存在热交换，坯料被拉长的表面的温度会有较明显的下降；而在被挤压处由于摩擦产生的热量，温度反而出现一定程度的升高。在坯料被挤压拉长、变扁平的耳状部分会出现较大的损伤值，即容易在这些部位形成缺陷。在模具与坯料的接触处，存在较大的等效应力，最高值处可达 95.6 MPa。在坯料被拉伸的扁平耳状部分，因变形而产生了较大的等效应变，在压扁的两侧尖端处达到最大值 3.240，即在形成的扁平部位有产生一定缺陷的可能。

3.3 制坯模拟结果

导出二次辊锻后的最优结果，将其变形后的坯料

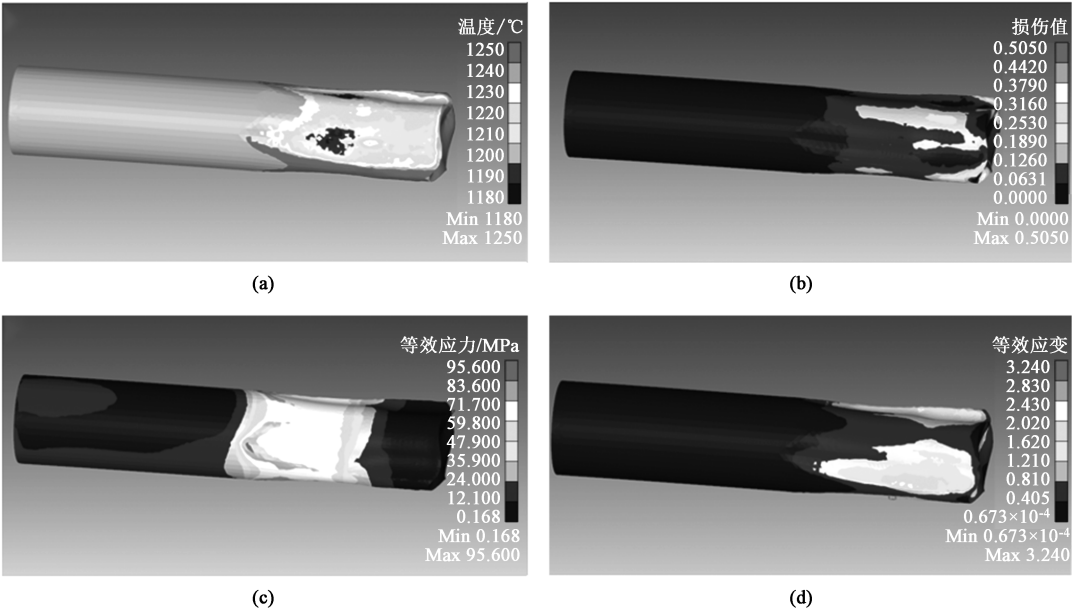


图 5 二次辊锻最优结果

(a) 温度 (b) 损伤值 (c) 等效应力 (d) 等效应变

Fig. 5 Optimal results of the second roll forging

(a) Temperature (b) Damage value (c) Equivalent stress (d) Equivalent strain

模型导入至制坯的模拟中，模具初始温度为 300 ℃，摩擦因数为 0.3，换热系数为 5000 W · (m² · K)⁻¹，修改模具运行速度进行制坯的前处理设置。通过比较模拟结果，分析宏观缺陷与模具运行速度的关系。当模具运行速度低于 26 mm · s⁻¹ 时，坯料在制坯过程的加工变形量不足。当模具运行速度高于 26 mm · s⁻¹ 时，坯料会出现凹陷、毛刺的宏观缺陷。在 DEFORM-3D 后处理中，分析比较制坯后的温度、损伤、等效应力与等效应变云图。统计不同参数下，制坯后损伤、等效应力、等效应变的最大值，结果如表 6 所示。

表 6 制坯后处理结果

Table 6 Post-processing results of billet making

模具运行速度/ (mm · s ⁻¹)	损伤最大值	等效应力最大 值/MPa	等效应变最大 值
20	0.448	79.8	2.94
22	0.448	81.3	2.95
24	0.449	82.5	2.94
26	0.448	81.7	2.94
28	0.449	85.4	2.94
30	0.449	88.9	2.94

随着模具运行速度从 20 mm · s⁻¹ 提升至 30 mm · s⁻¹，锻后损伤与等效应变的最大值基本不变，等效应力最大值逐渐上升。结合锻后宏观成形

结果，在模具运行速度为 26 mm · s⁻¹ 时，相对等效应力最大值较低，变形量合适且未出现凹陷、毛刺的宏观缺陷，该条件下的成形结果相对最优。最优参数下的后处理结果云图如图 6 所示，可以看出，经过制坯后，坯料与模具接触后由于存在热交换，坯料被压扁的表面的温度会有较明显的下降。在坯料扁端部分，会出现较大的损伤值，即容易在这些部位形成缺陷；同时由于制坯压扁的影响，在被压扁的尖端处也会出现较大损伤。在模具与坯料的接触处存在较大的等效应力，在被压扁的尖端处出现最高值，达 81.70 MPa。在坯料被压扁的部分，由于变形较为均匀，产生的等效应变较小，不超过 1；而在扁平耳状部分有较大的等效应变存在，最高可达 2.940。

3.4 预成形模拟结果

导出制坯后的最优结果，将其变形后的坯料模型导入至预成形的模拟中，模具初始温度为 300 ℃，摩擦因数为 0.3，换热系数为 5000 W · (m² · K)⁻¹，修改模具运行速度进行预成形的前处理设置。通过比较模拟结果，分析宏观缺陷与模具运行速度的关系。当模具运行速度低于 20 mm · s⁻¹ 时，坯料在预成形过程会出现填充不足的问题，坯料的宏观成形效果较差。当模具运行速度为 20~60 mm · s⁻¹ 时，坯料会出现毛刺的缺陷。当模具运行速度为 60~100 mm · s⁻¹ 时，主要会产生毛刺、飞边破裂的宏观缺陷。在 DEFORM-3D 后处理中，分析比较预成

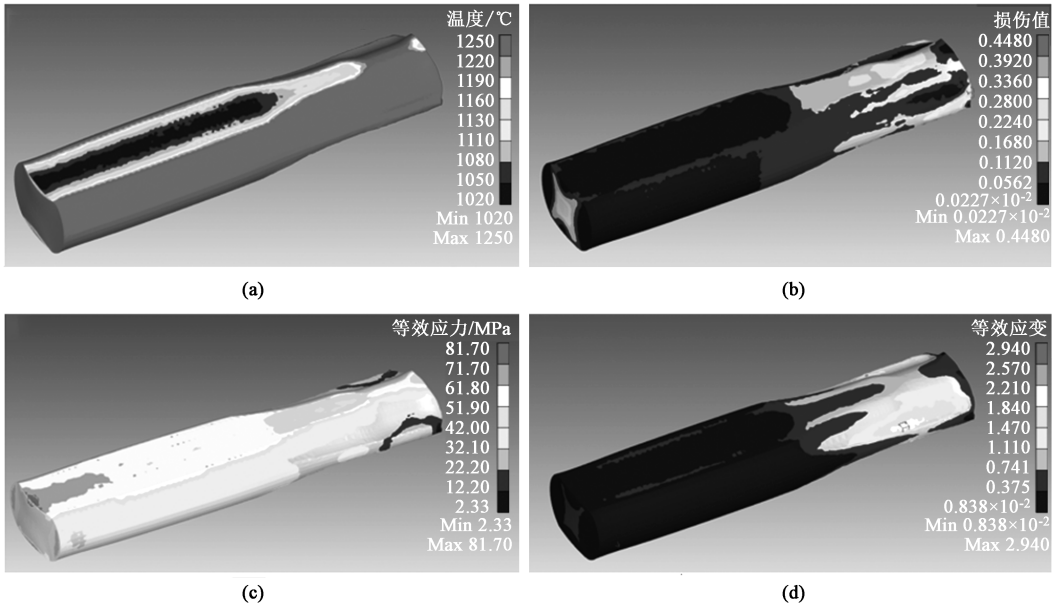


图 6 制坯最优结果

(a) 温度 (b) 损伤值 (c) 等效应力 (d) 等效应变

Fig. 6 Optimal results of billet making

(a) Temperature (b) Damage value (c) Equivalent stress (d) Equivalent strain

形后的温度、损伤、等效应力与等效应变云图。统计不同参数下预成形损伤、等效应力、等效应变的最大值，结果如表 7 所示。

表 7 预成形后处理结果
Table 7 Post-processing results of pre-forming

模具运行速度/ (mm·s ⁻¹)	损伤最大值	等效应力最大 值/MPa	等效应变最大值
10	2.05	258	7.01
20	1.93	258	7.00
30	2.04	255	7.39
40	2.00	233	7.08
50	2.20	211	10.60
60	1.75	203	13.30
70	1.84	186	12.40
80	2.04	214	10.30
90	1.75	188	9.37
100	1.92	205	6.50

随着模具运行速度的逐渐提升，预成形后损伤最大值在 1.75~2.20 波动，等效应力呈下降趋势，等效应变则出现先上升至 13.30（最大值）、后逐渐下降的趋势。结合宏观成形最优结果，模具运行速度为 20 mm·s⁻¹ 为相对最优结果。最优参数下的后处理结果云图如图 7 所示，可以看出，经过预成形后，坯料产生较大变形。坯料与模具接触后由于存在热交换，坯料被压扁的表面的温度会有较明显的下降，在两枝丫间的飞边达到最低温度。而在两侧飞边处，由于金属流动摩擦生热，温度最高可上升至 1270 ℃。在飞边的尖端处，会出现较大的损伤值，型腔内主要成形部位的损伤较少，出现缺陷的概率较低。而在形成的两枝丫尖端处可能会出现一定程度的损伤。在形成的枝丫间处存在较大的等效应力，在形成的飞边上出现最高值，可达 258.0 MPa，等效应变最高可达 7.00。在坯料预成形的主体部分，由于变形较为均匀，产生的等效应变较小，不超过 2.83；而在分模面处因会形成飞边，产生的等效应变较高，最高可能达到 5.33。

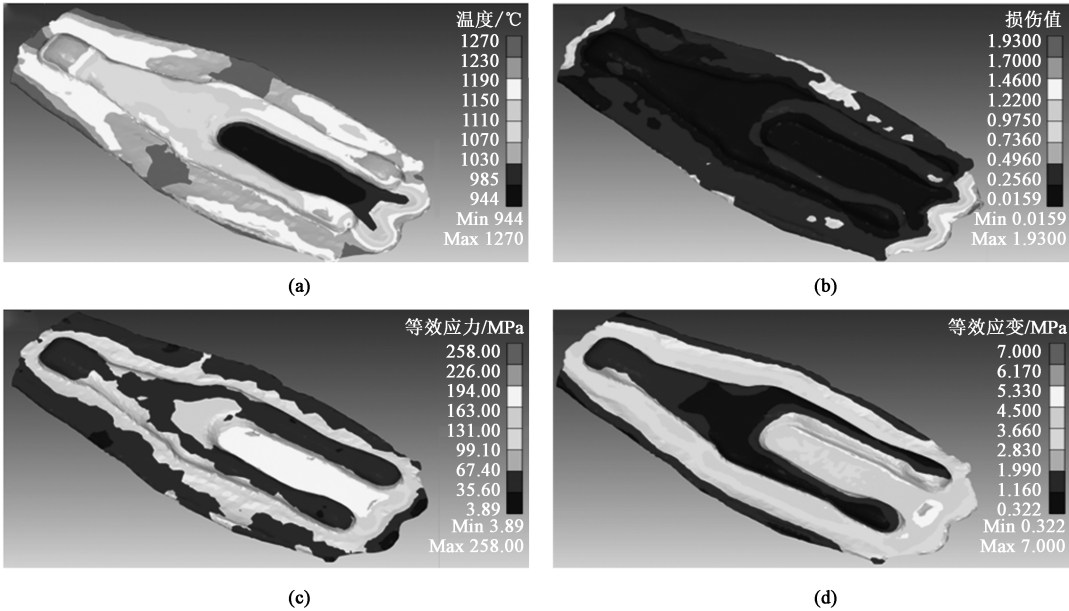


图 7 预成形最优结果

(a) 温度 (b) 损伤值 (c) 等效应力 (d) 等效应变

Fig. 7 Optimal results of pre-forming

(a) Temperature (b) Damage value (c) Equivalent stress (d) Equivalent strain

3.5 终成形模拟结果

导出预成形最优结果的坯料模型，通过布尔运算进行切边，再经过变形后将其导入至终成形模拟中进行计算。模具初始温度为 300 ℃，摩擦因数为 0.3，换热系数为 5000 W·(m²·K)⁻¹，修改模具运行速度进行模拟优化。通过比较模拟结果，分析

宏观缺陷与模具运行速度的关系。当模具运行速度低于 50 mm·s⁻¹ 时，坯料在终成形过程中会出现填充不足的现象。当模具运行速度高于 50 mm·s⁻¹ 时，坯料会出现毛刺的宏观缺陷。在 DEFORM-3D 后处理中，分析比较终成形后的温度、损伤、等效应力与等效应变云图。统计不同参数下，终成形损伤、

等效应力、等效应变的最大值，结果如表 8 所示。

表 8 终成形后处理结果
Table 8 Post-processing results of final forming

模具运行速度/ (mm · s ⁻¹)	损伤最大值	等效应力最大值/ MPa	等效应变 最大值
25	1.54	354	4.93
50	2.19	302	3.63
75	1.98	340	4.30
100	1.83	318	4.55

当模具运行速度从 25 mm · s⁻¹ 提升至 50 mm · s⁻¹ 时，终成形后损伤最大值提高，等效应力和等效应变最大值降低。当模具运行速度从 75 mm · s⁻¹ 提升至 100 mm · s⁻¹ 时，终成形后损伤最大值降低，等效应力最大值降低，而等效应变最大值上升。结合宏观成形结果，得到最优模具运行速度为 50 mm · s⁻¹。该模具运行速度下存在的缺陷相对可能更少，成形效

果更好。最优参数下的后处理结果如图 8 所示，可以看出，经过终成形后，坯料锻出完整的后上摆臂形状。坯料与模具接触后由于存在热交换，坯料被压扁的表面温度会有较明显的下降，表面部分位置的最低温度已降低至 797 ℃。在生成的飞边处，由于金属流动摩擦生热，温度最高可上升至 1030 ℃。由于温度的大幅度下降，30MnVS 非调质钢的塑性会有下降，影响成形效果，并且终成形过程中锻件会出现较明显的氧化皮。在后上摆臂的各角会出现较大的损伤值，型腔内主要成形部位的损伤较少，出现缺陷的概率较低。而在形成的各角尖端处可能会出现一定程度的损伤。在中间成形部位存在较大的等效应力，中心圆部位的等效应力可达最高值 318.0 MPa。在坯料终成形的主体部分，由于变形较为均匀，产生的等效应变较小，不超过 2.30；而在靠近分模面处因形成飞边，产生的等效应变较高，平均最高可达到 2.86；并且在三角臂的臂成形处会达到最大值 4.55。

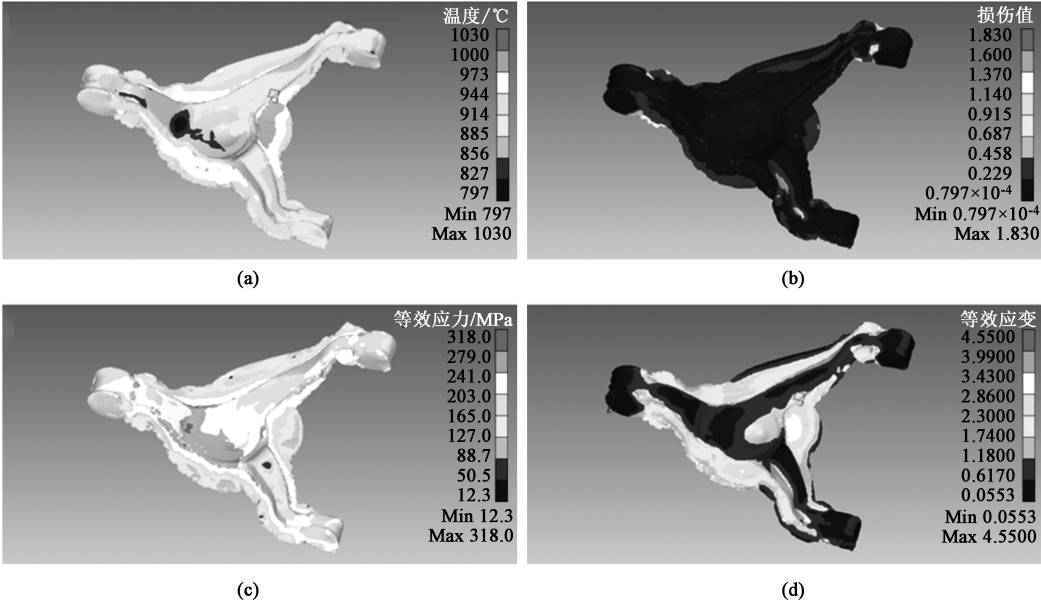


图 8 终成形最优结果

(a) 温度 (b) 损伤值 (c) 等效应力 (d) 等效应变

Fig. 8 Optimal results of final forming

(a) Temperature (b) Damage value (c) Equivalent stress (d) Equivalent strain

4 后上摆臂多道次锻造模拟结果验证

将后上摆臂锻造模拟结果与实际生产产品进行对比，验证模拟结果。实际产品如图 9a 所示，模拟计算得出的锻造成形效果与实际产品相近。图 9b 和图 9c 为实际产品所出现的缺陷（图 9b 和图 9c 中圈出的区域），在摆臂的各角产生了折叠和缺料等问

题，这与模拟过程中存在较大应力、应变及损伤的区域相符合，证明模拟结果对产生缺陷概率的预测具有一定的参考性。

5 结论

(1) 使用 JMatPro 软件进行 30MnVS 非调质钢材料力学性能的计算，可以得出流变应力、杨

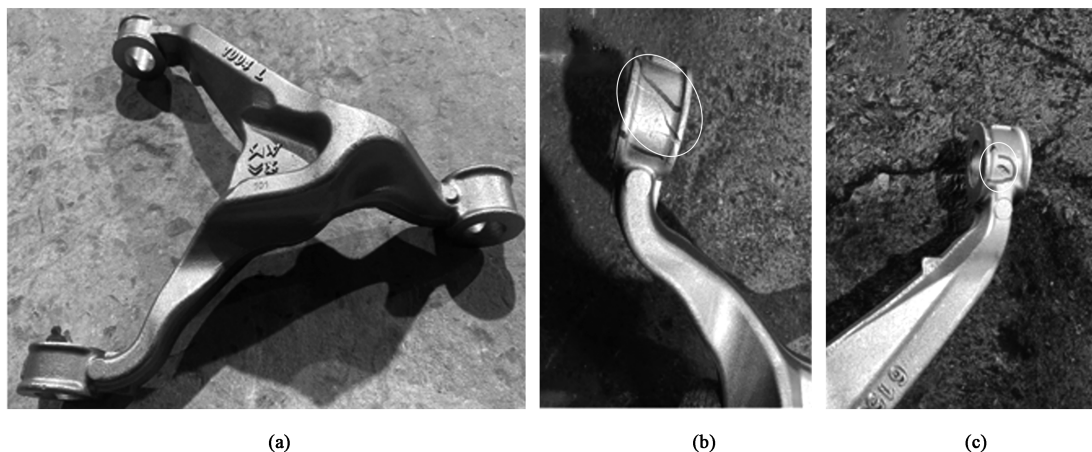


图9 实际产品图及缺陷

(a) 后上摆臂 (b) 折叠 (c) 缺料

Fig.9 Pictures of practical products and defects

(a) Rear upper swing arm (b) Folding (c) Material shortage

氏模量、泊松比等力学性能参数随温度变化的曲线,为 DEFORM-3D 软件锻造模拟提供所缺少的材料参数。

(2) 应用 DEFORM-3D 自动化前处理程序,可以实现后上摆臂多道次锻造的自动化参数修改、计算模拟。成形效果与模具、坯料运行速度有关,经过 DEFORM-3D 的模拟计算,得出最优工艺为:一次、二次辊锻的坯料运行速度为 $666 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,模具运行速度为 $3.33 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$;制坯过程的模具运行速度 $26 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;预成形的模具运行速度为 $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;终成形的模具运行速度为 $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在该最优工艺参数下,得到的最终锻件的宏观成形效果较好,应力集中部位相对较少,有助于减少样品缺陷。

(3) 通过将模拟结果与实际产品的成形效果和产生的缺陷进行对比,模拟计算过程中存在较大等效应力、等效应变与损伤的部位与实际产生缺陷的位置相对应,模拟结果具有一定的参考价值。

致谢:感谢浙江锐泰悬挂系统科技有限公司在科技创新 2025 重大专项(宁波市重大科技任务攻关项目)新能源汽车底盘悬挂系统零部件的轻量化及冷成形技术(2022Z048)中对本文研究工作给予大力支持。

参考文献:

- [1] 赵顺治,景财年,林涛,等. 基于 Deform-3D 的风机主轴空心轴预制坯成形优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 47-54.
- Zhao S Z, Jing C N, Lin T, et al. Optimization of prefabricated

blank forming for hollow shaft of fan spindle based on Deform-3D [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 47-54.

- [2] 李月超,李婷. 基于 DEFORM-3D 的带齿轴套锻造工艺仿真与实践 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 93-98.
- Li Y C, Li T. Forging process simulation and practice of toothed shaft bushing based on DEFORM-3D [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 93-98.
- [3] 刘大海,陈劲东,柴浩瑞,等. 基于 DEFORM-3D 的 GH5188 卡箍热模锻造过程数值模拟 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 9-16.
- Liu D H, Chen J D, Chai H R, et al. Numerical simulation of hot die forging process of GH5188 clamp based on DEFORM-3D [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 9-16.
- [4] 黄晶晶. 基于 Deform 的汽车法兰盘体零件锻造成形工艺 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 81-86.
- Huang J J. Forging and forming process for automotive flange body parts based on Deform [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 81-86.
- [5] 杨兴旺,陶志伟,袁凯,等. 基于响应面法的喷射成形 7055 铝合金飞机轮毂锻造工艺优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (10): 23-28.
- Yang X W, Tao Z W, Yuan K, et al. Optimization of spray forming 7055 aluminum alloy aircraft hub forging process based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (10): 23-28.
- [6] 陆建明,刘杰,潘晓涛. 基于 Deform 的铝合金汽车转向节锻造成形分析 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (5): 111-113.
- Lu J M, Liu J, Pan X T. Forging and forming analysis of aluminum alloy automobile steering knuckle based on Deform [J]. Hot Working Technology, 2023, 52 (5): 111-113.

- [7] 赵玉琳, 王培吉, 闫利军, 等. 基于 DEFORM 数值仿真的钢质活塞塑性成形过程缺陷预测及模具优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 87-92, 106.
- Zhao Y L, Wang P J, Yan L J, et al. Defect prediction and mold optimization for plastic forming of steel pistons based on DEFORM numerical simulation [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 87-92, 106.
- [8] 杨阳. 基于 DEFORM 二次开发的 38MnVS6 非调质钢锻造过程微观组织演化模拟 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- Yang Y. Simulation of Microstructure Evolution During Forging Process of 38MnVS6 Non Quenched and Tempered Steel Based on Secondary Development of DEFORM [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [9] 李馨家. 基于 DEFORM-3D 的热锻成形多尺度模拟软件的开发与应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- Li X J. Development and Application of Multiscale Simulation Software for Hot Forging Based on DEFORM-3D [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [10] 骆俊廷, 赵静启, 杨哲懿, 等. 基于 Deform 软件二次开发和 BP 神经网络的 TA15 多向锻造微观组织预报 [J]. 航空学报, 2021, 42 (12): 327-344.
- Luo J T, Zhao J Q, Yang Z Y, et al. Microstructure prediction of TA15 multi-directional forging based on secondary development of Deform software and BP neural network [J]. Journal of Aeronautics, 2021, 42 (12): 327-344.
- [11] GB/T 15712—2016, 非调质机械结构钢 [S].
- GB/T 15712—2016, Microalloyed medium carbon steels [S].
- [12] 徐新生. 大型环件成形工艺与锻造 CAPP 系统的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- Xu X S. Research on the CAPP System for Large Ring Forming Process and Forging [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [13] 杜康康. 面向变形均匀性的回转体锻件坯料自适应优化平台开发 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- Du K K. Development of an Adaptive Optimization Platform for Rotary Forging Blanks Oriented to Deformation Uniformity [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [14] Omar Cornut. Imgui [EB/OL]. <https://github.com/ocornut/imgui.git>.

第 21 届国际制造研究会议征文通知

(21st International Conference on Manufacturing Research, ICMR 2024)

第 21 届国际制造研究会议 (21st International Conference on Manufacturing Research, ICMR 2024) 将于 2024 年 8 月 28-30 日于英国苏格兰格拉斯哥举办, 同期召开第 38 届英国制造研究全国会议。

ICMR 由英国大学制造和工程负责人联合会 (COMEh) 发起, 是英国主要的制造研究会议, 自 2003 年起发展为国际会议, 旨在将研究人员、学者和企业界人士聚集在一起, 分享他们的愿景、知识和经验, 共同探讨新兴趋势和新挑战。随着 21 世纪制造业全球化进程的加快, 与时俱进的迫切需求推动了技术、研究和创新的快速发展。ICMR 征集有关前沿和新兴理论研究及其最新工业应用的论文, 旨在汇集全球学术、政府和工业组织的实践和理论知识。

一、组织单位

主办单位: The University of Strathclyde, UK

协办单位: COMEH, UK; 中国机械工程学会塑性工程分会

二、重要日期、内容

- 2024 年 3 月 30 日, 全文投稿截止
- 2024 年 5 月 1 日, 通知全文审理结果
- 2024 年 5 月 16 日, 最终投稿截止
- 2024 年 7 月 15 日, 提前缴费截止
- 2024 年 8 月 20 日, 最终注册截止

三、会议网址: <https://www.icmr.org.uk/>

四、联系方式

联系人: Dr. Jie Zhao, ICMR2024 Administrator, The University of Strathclyde

地 址: Department of Design, Manufacturing & Engineering Management Glasgow, G1 1XJ UK

电 话: +44 (0) 141 574 5155, 邮箱: j.zhao@strath.ac.uk

中国机械工程学会塑性工程分会