

基于 DEFORM 3D 的汽车转向节锻造与缺陷形成机理

蒋懋旭^{1,2}, 涂君^{1,2}, 吴文涛³, 张旭^{1,2}, 宋小春^{1,2}

(1. 湖北工业大学 机械工程学院, 湖北 武汉 448000; 2. 现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 448000;
3. 湖北三环汽车方向机有限公司, 湖北 咸宁 437100)

摘要: 根据汽车转向节热锻成形过程中的主要影响因素即坯料始锻温度、模具预热温度、上模运动速度和摩擦因数, 运用 DEFORM 3D 软件对汽车转向节热锻成形过程进行了数值模拟, 并应用正交实验法对数值模拟结果进行分析。结果表明: 随着始锻温度的升高, 转向节在热锻过程中的最大等效应力减小, 能量和金属最大流动速度增大; 随着上模预热温度增加, 转向节热锻过程中的最大等效应力逐渐减小, 能量和金属最大流动速度逐渐增大; 随着上模运动速度增加, 热锻转向节的最大等效应力先减小后增加, 能量和金属最大流动速度呈现增大趋势; 随着摩擦因数增大, 转向节的最大等效应力和金属最大流动速度呈先减小后增大的趋势, 能量逐渐增大, 并通过比较极差值 R 判断了各个因素的主次关系。

关键词: 汽车转向节; 热锻; DEFORM 3D; 正交实验; 缺陷

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.02.002

中图分类号: TG316.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 02-0014-10

Forging of automobile steering knuckle and defect formation mechanism based on DEFORM 3D

Jiang Maoxu^{1,2}, Tu Jun^{1,2}, Wu Wentao³, Zhang Xu^{1,2}, Song Xiaochun^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 448000, China;

2. Hubei Provincial Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering, Wuhan 448000, China;

3. Hubei Tri-Ring Motor Steering Gear Co., Ltd., Xianning 437100, China)

Abstract: Based on the main influencing factors of initial forging temperature for billet, die preheating temperature, upper die movement speed and friction coefficient during the hot forging process of automotive steering knuckle, the hot forging process of automotive steering knuckle was simulated by using software DEFORM 3D, and the numerical simulation results were analyzed by the orthogonal experimental method. The results indicate that with the increasing of initial forging temperature, the maximum equivalent stress during the hot forging process decreases, and the energy increases and maximum metal flow velocity increase for the steering knuckle. With the increasing of die preheating temperature, the maximum equivalent stress during the hot forging process of automotive steering knuckle gradually decreases, while the energy and maximum metal flow velocity gradually increase. With the increasing of upper die movement speed, the maximum equivalent stress initially decreases and then increases, while the energy and maximum metal flow velocity show an increasing trend. In addition, with the increasing of friction coefficient, the maximum equivalent stress and maximum metal flow velocity of steering knuckle first decrease and then increase, and the energy gradually increases. Thus, the primary and secondary relation of each factor is determined by comparing range values R .

Key words: automotive steering knuckle; hot forging; DEFORM 3D; orthogonal experiment; defect

随着科技的进步, 我国汽车行业从高增速发展过渡到高质量发展中, 汽车零部件作为汽车的一部分, 其需求也在不断增长。转向节是汽车转向桥中

的重要安全零部件之一, 该部件的几何形状是根据车辆类型以及悬架和转向系统的其他部件位置进行设计和制造的, 外形复杂且由于工作过程中的受力、传力, 承受多变的载荷, 转向带的故障会对汽车造成较大的损坏, 其性能直接影响道路交通事故的发生率^[1-2]。因此, 要求成形件具备优异的综合性能和较高的尺寸精度。汽车转向节属于枝桠类零件, 集中了轴、套、盘环、叉架等4类零件的结构特点, 形状比较复杂, 制造工艺难度大, 难以做到一次成

收稿日期: 2023-08-12; 修订日期: 2023-11-15

基金项目: 湖北省重点研发计划项目 (2022BAA075)

作者简介: 蒋懋旭 (2000-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1250586971@qq.com

通信作者: 涂君 (1983-), 男, 博士, 教授

E-mail: Juntu@hbut.edu.cn

形。因此,在转向节的生产制造过程中,任何不合理的操作均会导致转向节产生折叠、填充不满等缺陷。为保证转向节在出厂时具备可靠的强度从而保证汽车行驶的安全,必须发展可靠的无损检测技术。近年来,在倡导智能制造发展的背景下,对汽车转向节锻造质量的要求不断升高,锻造材料利用率不断提升、锻件的模具寿命不断延长。国内外越来越多的学者开始深入分析和研究汽车转向节的工艺检测。

胡祚麻等^[3]针对转向节在长枝叉处出现的塌角缺陷设计了阻力墙结构,使用 Deform 3D 有限元软件对汽车转向节进行热锻成形数值模拟,通过响应面法优化阻力墙结构后获得了最优参数组合;陆建明等^[4]利用 Deform 软件对汽车转向节辊锻+终模锻成形进行数值仿真,分析了某型铝合金汽车转向节辊锻+终模锻成形工艺;黄晶晶^[5]通过 Deform 3D 有限元软件对汽车法兰盘体零件进行力耦合数值模拟,全面分析对比 3 种初步确定的成形工艺方案,并进行试验,确定了最终最佳工艺并降低了成本;张强等^[6]运用 Forge 软件对某型汽车转向节模锻中的预锻、终锻的形状及终锻的等效应变进行了仿真分析,得到转向节在模锻中的成形形状变化规律;武欢等^[7]将折叠概率指数通过二次开发嵌入 Deform 软件从而对折叠缺陷进行预测,确定了圆角过渡区产生折叠缺陷的原因,通过模拟确定了最优工艺参数,改善了折叠状况,降低了船用连杆锻件的折叠报废率;Deng L 等^[8]优化了锻造工艺和参数,融合精密锻造成形技术和其他成形技术的优势,不仅实现了轻量化,还满足了加工精度和产品质量,而且有效地降低了生产成本。Yang Y 等^[9]提出了一种基于深度卷积生成对抗网络的数据增强方法,用于汽车转向节荧光穿透检测图像的裂纹识别,识别方法的召回率为 95.1%,准确率为 90.8%;Liu L R 等^[10]构建了最大转向节模型,采用有限元方法分析了极端条件下指关节的受力,对模型进行拓扑优化并重建分析,验证了转向节结构合理性;Das P 等^[11]对流变压力压铸系统实际开发之前的转向节进行了半固体模填充模拟,使用商业软件 Flow3Dcast 研究了 A356 铝合金在半固态下的模具填充能力,以优化半固态浆料向模腔内的浇注温度,确定了最佳浇注温度为 610 ℃,该温度使浆料流动更顺畅、表面缺陷浓度更小。

因此,本文针对某型汽车转向节,采用仿真软件 Deform 3D,通过数值模拟的方式对其进行仿真计算,研究转向节在锻造过程中不同工艺参数对缺陷

产生的影响,并分析转向节缺陷形成机理,为后续汽车转向节在生产过程中性能和质量的提升提供了依据。

1 转向节锻造工艺分析

1.1 转向节工艺难点分析

汽车转向节锻件的几何结构如图 1 所示,属于立锻“孔-盘-耳”结构转向节锻件。该类结构代号为 V5,这是一种用于转向驱动桥的转向节结构,在小轿车、小型越野车的转向桥上应用最多。该类转向节结构复杂,其明显特点是中央需冲孔,为非对称零件,同时零件截面沿轴向变化较大,臂长较大,是大头带枝叉、小头有弯曲的连杆类锻件。

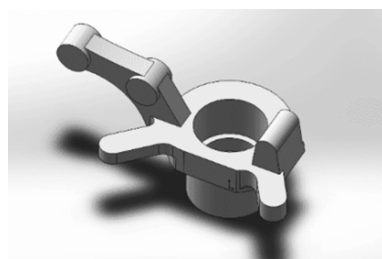


图1 转向节锻件三维结构图

Fig. 1 3D structure diagram of steering knuckle forgings

转向节锻件的尺寸并不大,质量一般在 50 kg 以下(初步统计,40 kg 以上的转向节锻件所占比例较小,而 20 kg 以下的转向节锻件占有很大比例),但结构复杂,按 GB/T 12362—2016^[12]定义的锻件形状复杂系数,转向节锻件大多数为 S_4 复杂级。转向节锻造的工艺难度主要体现在以下方面:(1) 枝叉结构复杂,导致材料流动方向不同(不对称);(2) 局部材料流动路径长,变形工步增加;(3) 局部模膛深而窄,容易出现填充不饱满缺陷;(4) 折叠等缺陷容易出现在“轴-盘”和“盘-臂”等连接部位^[13]。

1.2 缺陷产生机理

转向节锻件成形的工艺过程中,成形的难点和容易产生缺陷的步骤是制坯、预锻和终锻。转向环节锻造的一般流程为:制坯(压扁、劈叉)—预锻—终锻—切边—冲连皮,经过 5 个工步完成锻造,如图 2 所示。通过数值模拟得到的终锻过程中,折叠缺陷处截面的金属流动速度如图 3 所示。

在起始阶段,上模以固定速度下压,坯料逐渐接触上下模的模具型腔(图 3a)。随着上模和坯料之间的压力增大,金属材料开始逐渐填充模具型腔;

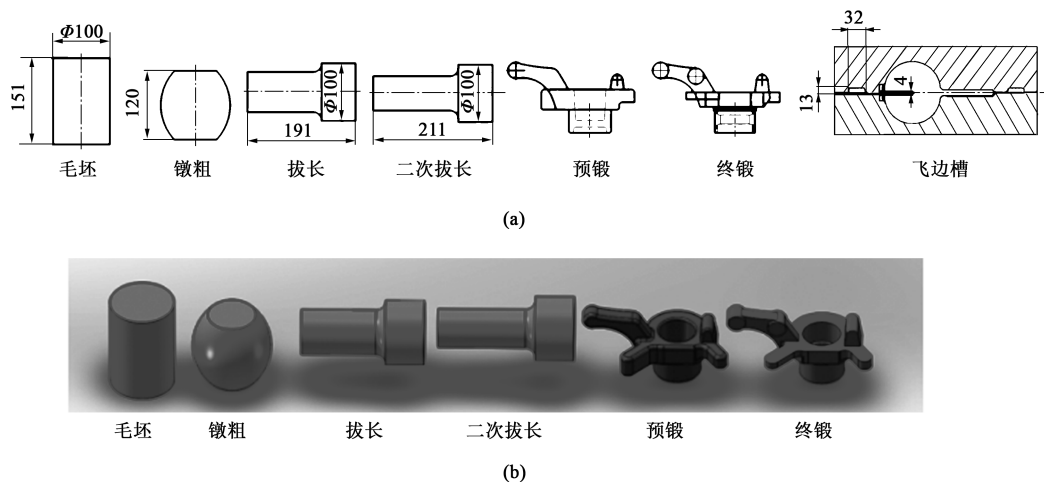


图 2 轴向往节锻造成形过程的简图 (a) 和三维图 (b)

Fig. 2 Schematic diagram (a) and 3D diagram (b) of forging process for steering knuckle

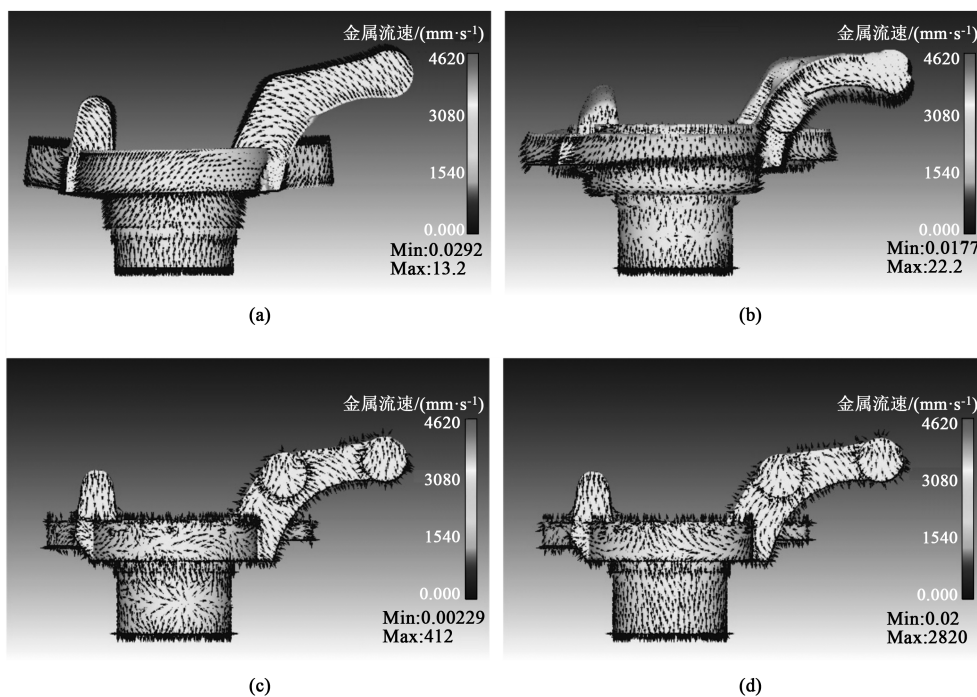


图 3 终锻过程中折叠缺陷处截面上的金属流动分布图

(a) 第 55 步 (b) 第 166 步 (c) 第 469 步 (d) 第 550 步

Fig. 3 Distribution diagrams of metal flow at folding defect section during final forging process

(a) Step 55 (b) Step 166 (c) Step 469 (d) Step 550

在成形中央孔的过程中,材料向边缘转移,沿分模面流动形成飞边(图 3b),行程继续增加,转向节盘部边缘的耳(叉)部金属填满型腔后,向上流动的中央孔外壁金属和向下流动的盘部金属形成对流,汇合后沿分模面流出;金属材料在中央孔底部则没有向上流动的趋势(图 3c)。对数值模拟结果进行分析,终锻过程中,金属材料首先在“轴-盘”边缘的耳(叉)部出现对流,汇合后一并沿着模具分模面流出,因此,折叠缺陷一般出现在金属材料产

生对流后的分模面附近。同时,材料在转向节头部枝桠某些部位不易流到,阻力过大则容易形成填充不满缺陷,如图 4 所示。

在终锻工序,观察转向节出现折叠缺陷和填充不满缺陷这两块区域的成形过程,发现产生缺陷的两块区域在终锻成形过程中金属流动速度变化差距大,如图 5 所示。两块区域的金属流动速度的最大值和最小值相差接近 10 倍。金属流动速度倍数差值较大,表明该部位在成形过程中坯料流动十分剧烈

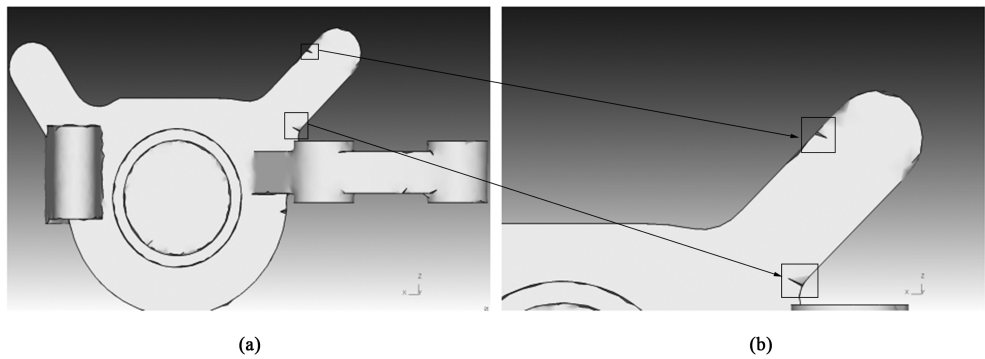


图 4 缺陷部位 (a) 和局部放大图 (b)
Fig.4 Defect location (a) and partial enlarged diagram (b)

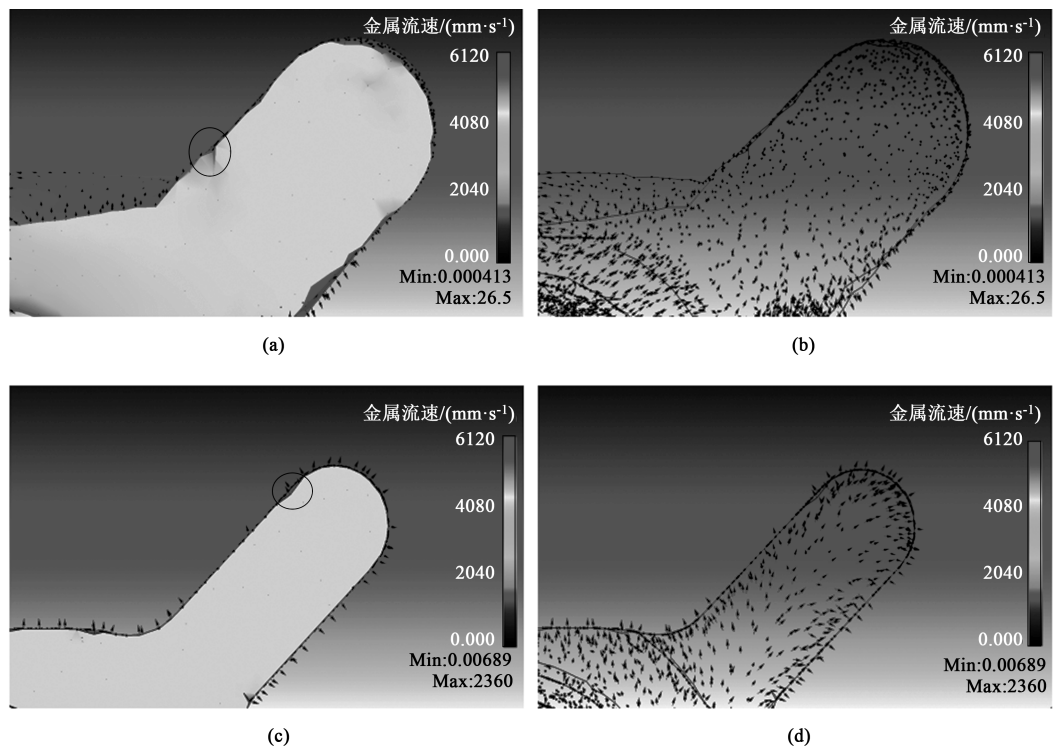


图 5 终锻过程中转向节折叠缺陷处的金属流动分布
(a) 起始阶段，阴影视图 (b) 起始阶段，框架视图 (c) 接近结束阶段，阴影视图 (d) 接近结束阶段，框架视图

Fig.5 Metal flow distribution at folding defect of steering knuckle during final forging process

(a) Initial stage, shadow view (b) Initial stage, framework view (c) Nearly final stage, shadow view (d) Nearly final stage, framework view

且不稳定，增大了折叠缺陷产生的可能。

2 有限元模型的建立和仿真参数设置

2.1 汽车转向节有限元仿真方案设计

考虑坯料始锻温度、模具预热温度、上模运动速度和摩擦因数对转向节热锻缺陷产生的影响，将 4 个影响因素依次编号为 A （坯料始锻温度）、 B （模具预热温度）、 C （上模运动速度）、 D （摩擦因数），分别对以上 4 个因素设置不同的数值，并采

用二次正交设计来制定转向节热锻实验方案，以减少重复率，并确保实验方案的多样性和均衡性，如表 1 所示。

2.2 汽车转向节热锻模型

本文以某型转向节为研究对象，通过 Solidworks 建立上模、下模以及坯料的模型，确定其相对位置关系，进行装配，另存为 STL 文件，将几何文件导入 Deform 3D 软件的前处理模块中，然后对毛坯进行网格划分，建立的汽车转向节仿真模型以及锻件图如图 6 和图 7 所示。

表 1 转向节热锻实验方案

Table 1 Experimental schemes for hot forging of steering knuckle

实验 编号	A 坯料始锻 温度/℃	B 模具预热 温度/℃	C 上模运动速度/ (mm · s ⁻¹)	D 摩擦因数
1	1000	250	9	0.20
2	1000	300	12	0.25
3	1000	350	15	0.30
4	1000	400	18	0.35
5	1050	250	12	0.30
6	1050	300	9	0.35
7	1050	350	18	0.20
8	1050	400	15	0.25
9	1100	250	15	0.35
10	1100	300	18	0.30
11	1100	350	9	0.25
12	1100	400	12	0.20
13	1150	250	18	0.25
14	1150	300	15	0.20
15	1150	350	12	0.35
16	1150	400	9	0.30

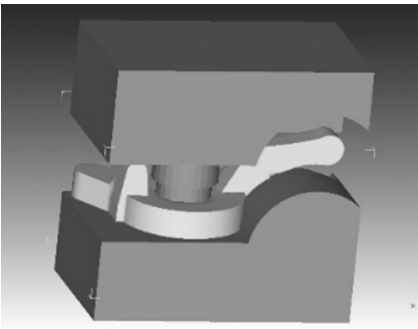


图 6 汽车转向节仿真模型

Fig. 6 Simulation model of automotive steering knuckle

毛坯材料在软件材料库中选择 45 钢，对应的美国牌号为 AISI-1045，其网格划分选用四面体网格，且采用绝对网格划分，最小单元尺寸为 1.5 mm，尺寸比为 5，总网格数为 50524，10560 个节点；上、下模具材料均选用常用的 H13 模具钢，对应的牌号为 AISI-H13。坯料和模具材料特性如表 2 所示。

2.3 正交实验结果分析

通过上述数值模拟过程，能得到对应的实验模

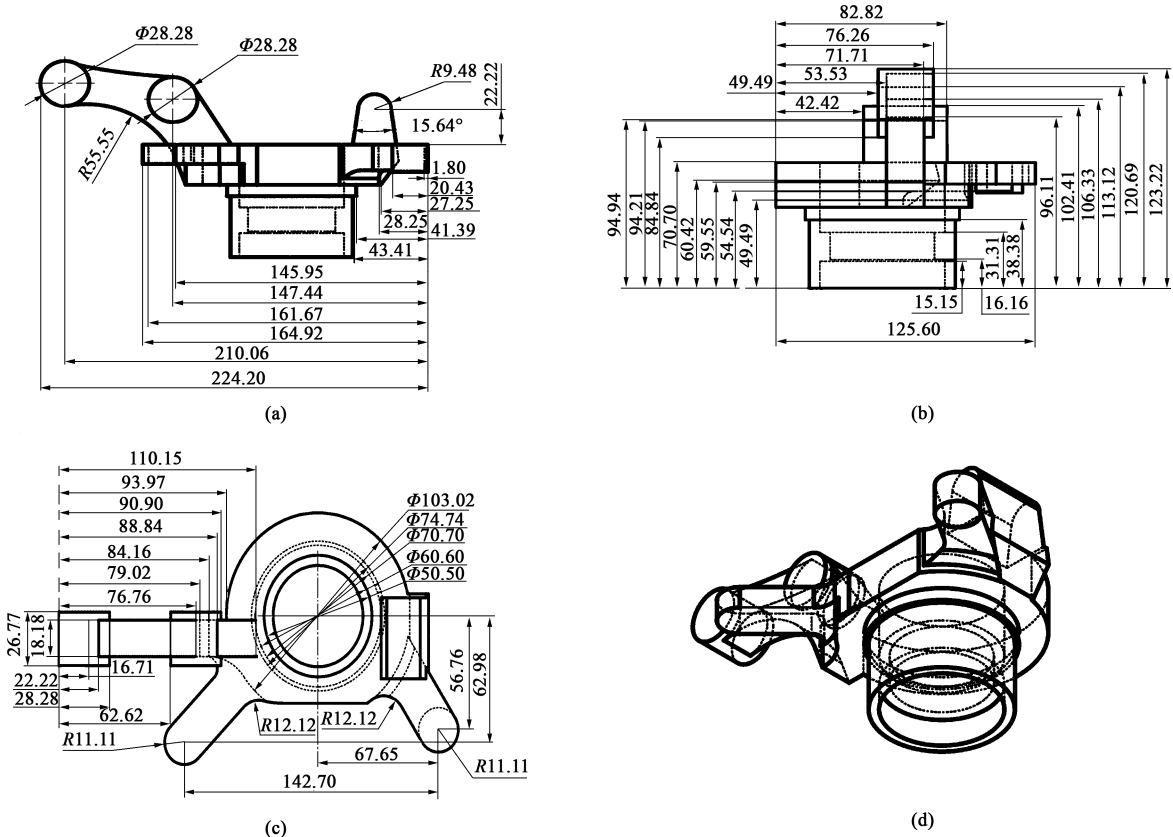


图 7 转向节锻件尺寸图

(a) 主视图 (b) 侧视图 (c) 俯视图 (d) 等轴侧视图

Fig. 7 Dimension diagrams of steering knuckle forgings

(a) Front view (b) Lateral view (c) Top view (d) Isometric view

表 2 坯料和模具的材料特性

Table 2 Material properties of billet and die

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	热传递系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	伸长率/%
45 钢	7850	355	600	210	0.269	46.6	16
H13 模具钢	7850	1460	1740	210	0.288	32.2	10

拟结果。采用正交实验设计和均匀实验设计方法对计算结果进行系统研究^[14]。正交实验结果分析如表 3 所示。由表 3 结果可得，9 号实验的效果最明显，平均等效总应变达到了 16.386，相应的组合 ($A=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $B=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $C=9\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $D=0.2$) 是当前最容易产生缺陷的组合搭配。根据上述实验结果分析各个影响因素对锻造过程中缺陷形成的影响比重。

表 3 正交实验结果

Table 3 Orthogonal experimental results

实验 编号	A 坯料始锻 温度/ $^{\circ}\text{C}$	B 模具预热 温度/ $^{\circ}\text{C}$	C 上模运动 速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	D 摩擦 因数	平均等效 总应变
1	1000	250	9	0.20	13.621
2	1000	300	12	0.25	14.732
3	1000	350	15	0.30	15.403
4	1000	400	18	0.35	15.445
5	1050	250	12	0.30	9.672
6	1050	300	9	0.35	15.420
7	1050	350	18	0.20	8.082
8	1050	400	15	0.25	8.851
9	1100	250	15	0.35	16.386
10	1100	300	18	0.30	10.103
11	1100	350	9	0.25	9.372
12	1100	400	12	0.20	9.110
13	1150	250	18	0.25	8.326
14	1150	300	15	0.20	13.473
15	1150	350	12	0.35	10.217
16	1150	400	9	0.30	13.579

分别计算实验方案中 4 个不同因素在 16 个实验方案下的平均等效总应变，如表 4 所示。其中， K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 为对应因素下 4 次正交实验的平均等效总应变之和， k_1 、 k_2 、 k_3 和 k_4 为对应因素下 4 次正交实验的平均等效总应变的平均值。通过计算该影响因素的极差值 R ，如始锻温度的极差值 $R=\max\{k_1, k_2, k_3, k_4\}-\min\{k_1, k_2, k_3, k_4\}=4.297$ ，可得到各因素的影响程度顺序。

在一项实验中，各因素的影响是有先后次序的，主要因素不同值之间的平均等效总应变的差距较大，相反，次要因素不同值之间的平均等效总应变的差距就较小。可以通过比较极差值 R 来判断各个因素的主次关系。由上述结果分析可知，在该实验条件

表 4 平均等效总应变正交实验结果

Table 4 Orthogonal experiment results of average equivalent total strain

数据类型	始锻温度	模具预热 温度	上模运动 速度	摩擦因数
总和	K_1 59.217	48.005	52.001	44.285
	K_2 42.034	53.738	43.730	41.281
	K_3 44.971	43.073	54.112	48.757
	K_4 45.594	46.984	41.955	57.477
平均值	k_1 14.804	12.001	13.000	11.071
	k_2 10.507	13.434	10.933	10.320
	k_3 11.243	10.768	13.528	12.189
	k_4 11.398	11.746	10.489	14.369
极差 R	4.297	2.666	3.039	4.049

下，对平均等效总应变即产生缺陷的影响的程度排序如下： A （始锻温度） $>D$ （摩擦因数） $>C$ （上模运动速度） $>B$ （模具预热温度）。

3 汽车转向节仿真分析及生产验证

3.1 不同坯料始锻温度对转向节热锻成形的影响

由于转向节热锻缺陷影响因素的复杂性，通过数值仿真模拟方法，对各影响因素进行综合分析。现设置坯料始锻温度为 1000、1050、1100 和 1150 $^{\circ}\text{C}$ ，控制上模运动速度为 $15\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，模具钢的预热温度固定为 $250\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，摩擦因数为 0.25，并分析始锻温度对转向节缺陷产生的影响规律，如图 8 所示。

由图 8 可知，随着始锻温度的升高，转向节热锻过程中的最大成形载荷和最大等效应力减小，能量逐渐增大，金属最大流动速度增大。随着始锻温度的升高，热锻件的应力差值较小，材料的塑性越好，有利于成形过程中金属的流动，有利于提升转向节的质量精度。但是在实际生产过程中，温度不能无限增加，过高的温度会造成严重的氧化和脱碳，因此，始锻温度要选择适宜的温度。

3.2 不同模具预热温度对转向节热锻成形的影响

现改变模具预热温度分别为 250、300、350 和 400 $^{\circ}\text{C}$ ，控制上模运动速度为 $15\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，坯料始锻温度固定为 1100 $^{\circ}\text{C}$ ，摩擦因数为 0.25 不变，分析模具预热温度对转向节缺陷产生的影响规律，如图 9 所示。

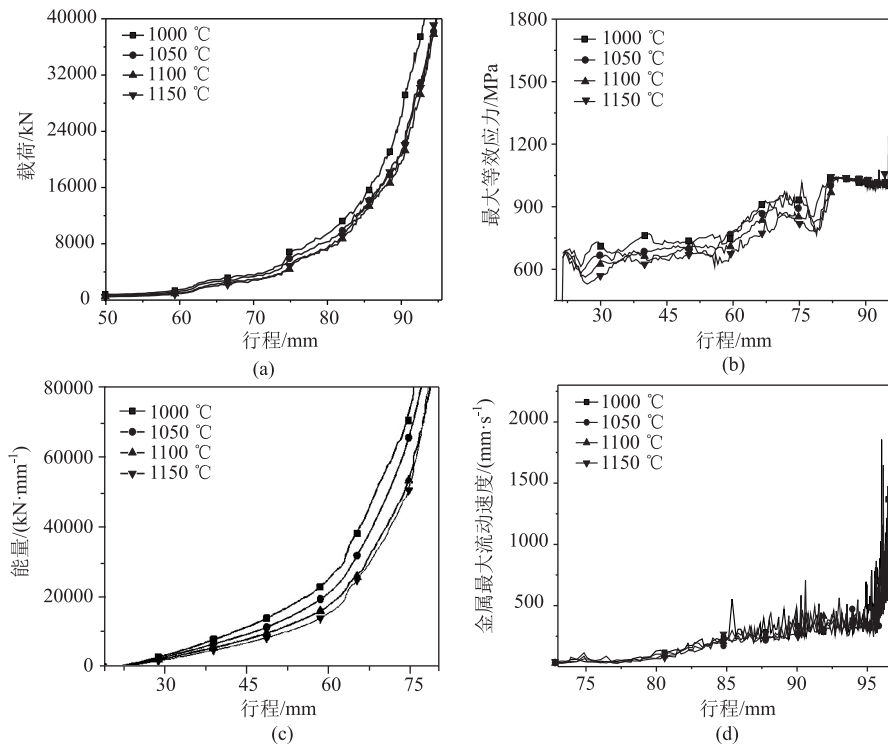


图 8 不同坯料始锻温度下的汽车转向节仿真结果

(a) 载荷-行程曲线 (b) 最大等效应力-行程曲线 (c) 能量-行程曲线 (d) 金属最大流动速度-行程曲线

Fig. 8 Simulation results of automotive steering knuckle under different initial forging temperatures of billet

(a) Load-displacement curves (b) Maximum equivalent stress-displacement curves (c) Energy-displacement curves (d) Maximum flow velocity of metal-displacement curves

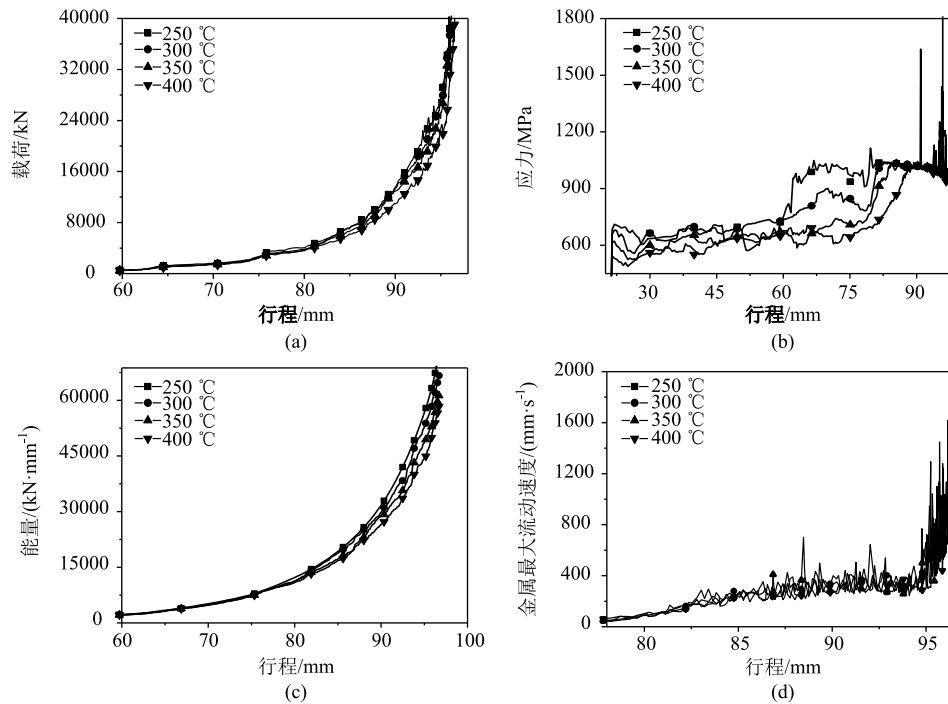


图 9 不同模具预热温度下的汽车转向节仿真结果

(a) 载荷-行程曲线 (b) 最大等效应力-行程曲线 (c) 能量-行程曲线 (d) 金属最大流动速度-行程曲线

Fig. 9 Simulation results of automotive steering knuckle under different die preheating temperatures

(a) Load-displacement curves (b) Maximum equivalent stress-displacement curves (c) Energy-displacement curves (d) Maximum flow velocity of metal-displacement curves

由图9可知,随着模具预热温度的升高,转向节热锻过程中的最大成形载荷和最大等效应力逐渐减小,能量和金属最大流动速度则相反,逐渐增大。通过分析上述仿真结果可知,模具预热温度对转向节热锻成形的影响趋势和始锻温度一致,但是影响程度上低于始锻温度。

3.3 不同上模运动速度对转向节热锻成形的影响

现改变上模运动速度分别为 9、12、15 和 $18 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 固定坯料始锻温度为 1100°C , 模具预热温度为 300°C , 摩擦因数为 0.25, 分析上模运动速度对转向节缺陷产生的影响规律, 如图10所示。

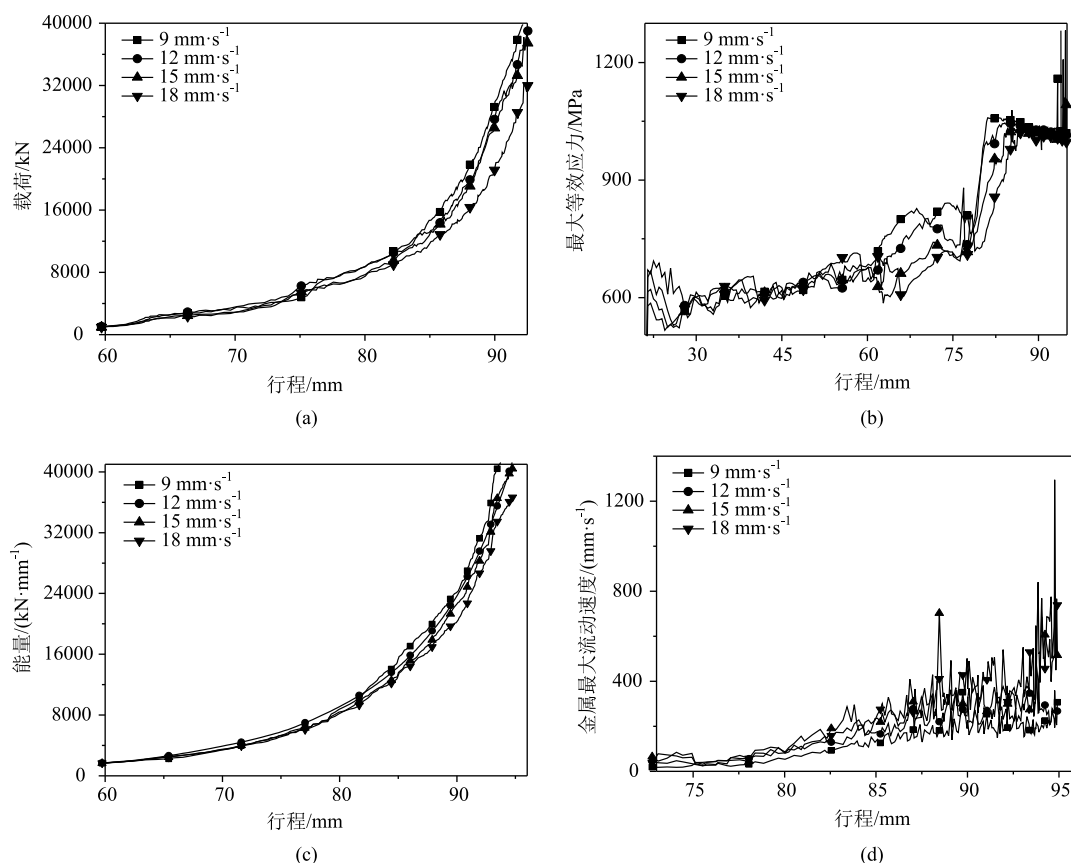


图10 不同上模运动速度下汽车转向节的仿真结果

(a) 载荷-行程曲线 (b) 最大等效应力-行程曲线 (c) 能量-行程曲线 (d) 金属最大流动速度-行程曲线

Fig. 10 Simulation results of steering knuckle under different upper die movement velocities

(a) Load-displacement curves (b) Maximum equivalent stress-displacement curves (c) Energy-displacement curves

(d) Maximum flow velocity of metal-displacement curves

由图10可知,随着上模运动速度的增加,转向节热锻过程中的载荷值减小,其原因为上模下压速度的增加导致上模和坯料接触过程中材料流速增大,降低了上、下模和坯料的接触时间,导致了热量传递时热损失减小,材料易变形,成形载荷减小;能量和金属最大流动速度则相反,逐渐增大,而最大等效应力值先减小后增加。

3.4 不同摩擦因数对转向节热锻成形的影响

现改变摩擦因数分别为 0.20、0.25、0.30 和 0.35, 控制坯料始锻温度为 1100°C , 模具预热温度为 300°C , 上模运动速度为 $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 不变, 分析摩擦因数对转向节缺陷产生的影响规律, 如图11

所示。

由图11可知,随着摩擦因数增大,转向节热锻过程中的最大成形载荷、最大等效应力和金属最大流动速度呈先减小后增大的趋势,能量则是逐渐增大。模具之间的摩擦力增大,且热锻过程中坯料流动阻力增大,加剧了模具的损坏程度,所以随着摩擦因数的增加,载荷逐渐增加,容易影响转向节的质量。

3.5 实际生产验证

在转向节实际锻造过程中,采用 J58K-250 电动螺旋压力机进行锻造,润滑剂采用石墨脱模剂,毛坯材料选择 45 钢,始锻温度加热至 1100°C , 模具

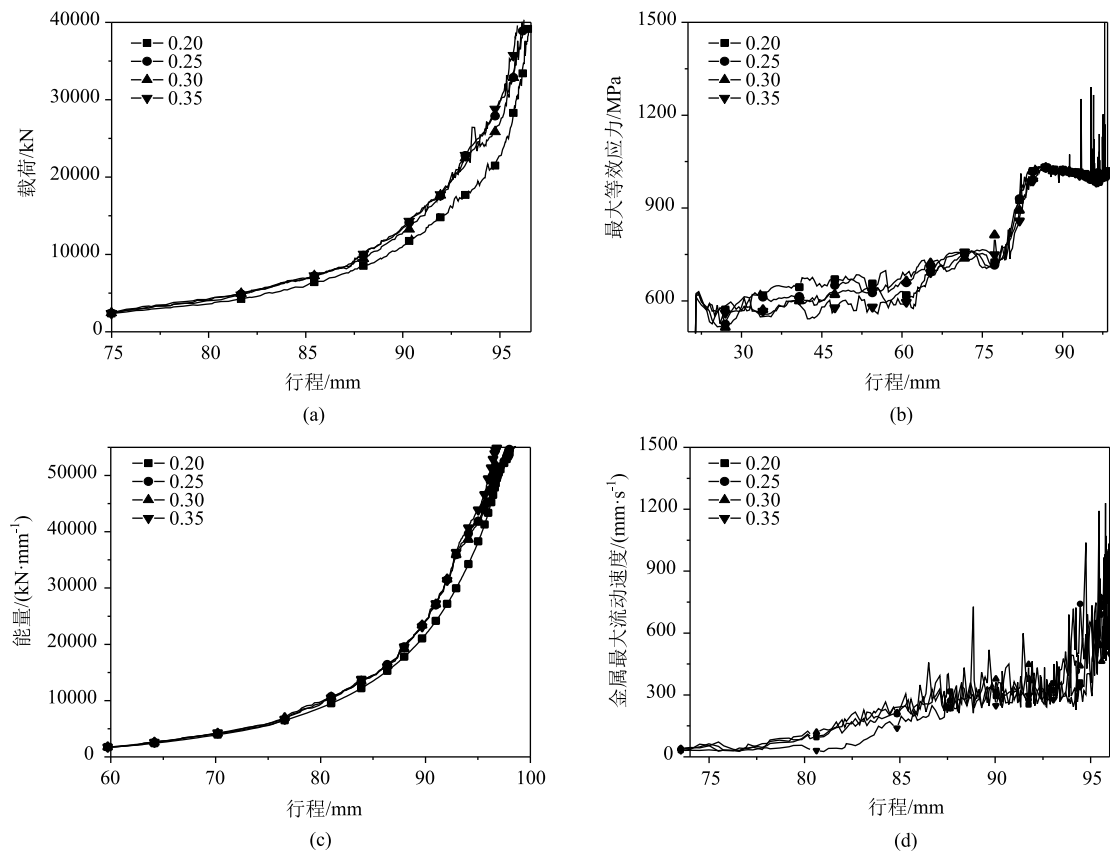


图 11 不同摩擦因数下的汽车转向节仿真结果

(a) 载荷-行程曲线 (b) 最大等效应力-行程曲线 (c) 能量-行程曲线 (d) 金属最大流动速度-行程曲线

Fig. 11 Simulation results of automotive steering knuckle under different friction coefficients

(a) Load-displacement curves (b) Maximum equivalent stress-displacement curves (c) Energy-displacement curves
(d) Maximum flow velocity of metal-displacement curves

预热温度加热至 250 ℃。最终生产锻造结果证明, 在“轴-盘”边缘的耳(叉)部以及“盘”部侧面

产生裂纹和填充不满缺陷, 实际生产缺陷样件如图 12 所示。

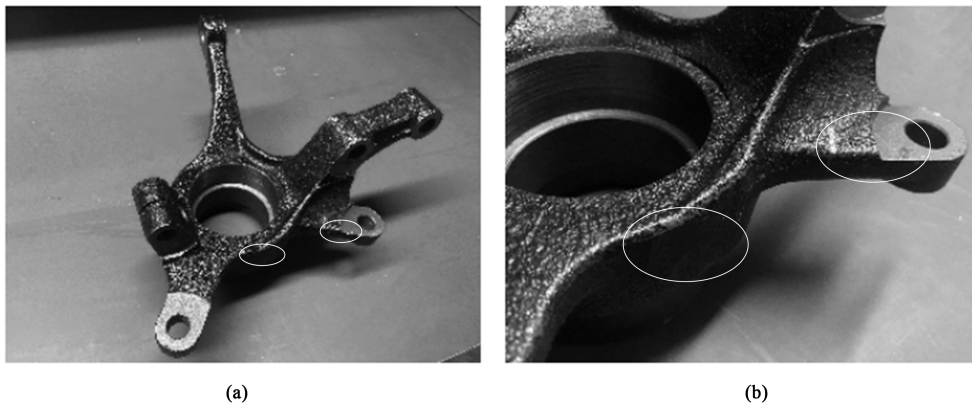


图 12 实际生产缺陷样件 (a) 和局部放大图 (b)

Fig. 12 Defective specimen in actual production (a) and partial enlarged image (b)

4 结论

(1) 借助有限元方法建立了汽车转向节热锻仿

真模型, 分析了转向节锻造过程中缺陷的产生机理, 并考虑了始锻温度、上模预热温度、上模运动速度和摩擦因数对转向节热锻过程产生缺陷的影响, 采

用正交实验法建立了系统数值模型, 模拟出不同热锻参数下的平均等效总应变。

(2) 分析正交实验结果可得, 不同因素对转向节锻造过程中缺陷的影响程度次序依次为坯料始锻温度>摩擦因数>上模运动速度>模具预热温度。随着坯料始锻温度的升高, 转向节热锻过程中的最大等效应力减小, 能量逐渐增大, 金属最大流动速度增大; 随着上模预热温度增加, 转向节热锻过程中的最大等效应力逐渐减小, 能量和金属最大流动速度逐渐增大; 随着上模运动速度增加, 热锻转向节的最大等效应力先减小后增加, 能量和金属的最大流动速度呈现逐渐增大的趋势; 随着摩擦因数增大, 转向节最大等效应力和金属最大流动速度呈先减小后增大的趋势, 能量则是逐渐增大。

参考文献:

- [1] Huang X, Qiu X Y, Li A J, et al. Defects detection of vehicle steering knuckle based on magnetic-acoustic multi-physical field coupling technology [A]. 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) [C]. Vancouver: IEEE, 2019.
- [2] Reza K K. Effects of axial and multiaxial variable amplitude loading conditions on the fatigue life assessment of automotive steering knuckle [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2020, 20 (2): 455-463.
- [3] 胡祚麻, 刘淑梅, 毛欣然. 基于正交实验与响应面法汽车转向节模具结构优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (8): 178-184.
Hu Z M, Liu S M, Mao X R. Structural optimization on automobile steering knuckle mold based on orthogonal test and response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (8): 178-184.
- [4] 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. Analysis of forging forming of aluminum alloy automotive steering knuckle based on deform [J]. Hot Working Technology, 2023, 52 (5): 111-113.
- [5] 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 process for automobile flange body part based on Deform [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 81-86.
- [6] 张强, 刘阳. 基于 Forge 的汽车转向节模锻仿真分析 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (11): 114-116, 121.
Zhang Q, Liu Y. Simulation analysis of die forging of automobile steering joint based on forge [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (11): 114-116, 121.
- [7] 武欢, 陈康, 代先东, 等. 基于 Deform 二次开发的连杆折叠缺陷预测及优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (2): 12-18.
Wu H, Chen K, Dai X D, et al. Prediction and optimization on folding defect for connecting rod based on secondary development of Deform [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (2): 12-18.
- [8] Deng L, Wang X Y, Jin J S, et al. Precision forging technology for aluminum alloy [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2018, 13: 25-36.
- [9] Yang Y, Min Z, Zuo J Z, et al. Crack identification of automobile steering knuckle fluorescent penetrant inspection based on deep convolutional generative adversarial networks data enhancement [J]. Frontiers in Physics, 2022, 10: 1275.
- [10] Liu L R, Li J Z, Tian C L. Steering knuckle lightweight research for additive manufacturing [A]. 8th International Forum on Manufacturing Technology and Engineering Materials [C]. Chongqing: Journal of Physics: Conference Series, 2023.
- [11] Das P, Bhuniya B, Samanta S K, et al. Studies on die filling of A356 Al alloy and development of a steering knuckle component using rheo pressure die casting system [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 293-311.
- [12] GB/T 12362—2016, 钢质模锻件 公差及机械加工余量 [S].
GB/T 12362—2016, Steel die forgings—Tolerance and machining allowance [S].
- [13] 中国锻压协会. 汽车典型锻件生产 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
Confederation of Chinese Metalforming Industry. Typical Forging Production of Automobiles [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [14] 幸雪松, 邱浩, 文敏, 等. 基于正交实验法射孔参数优化设计数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (25): 10952-10957.
Xing X S, Qiu H, Wen M, et al. Numerical simulation investigation of perforation parameter optimization design based on orthogonal experimental method [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22 (25): 10952-10957.

