

模具

汽车深轮辐齿坯件热精锻模具结构优化

万杭勇¹, 夏琴香¹, 肖刚锋¹, 刘梅华², 徐尔灵³

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641; 2. 广东韶铸精锻有限公司, 广东 韶关 512031;
3. 广东省韶铸集团有限公司, 广东 韶关 512031)

摘要: 针对某变速箱齿轮热模锻成形时由于模锻力较大导致的模具易损坏等问题, 以某 SCr420H 钢深轮辐齿坯件为研究对象, 构建了基于 Deform-3D 的深轮辐齿坯件多工位闭式热精锻有限元模拟模型, 并验证了该模型的可靠性。分析了多工位闭式热精锻成形过程中材料流动和应力应变分布, 确定了模具结构设计的不合理处, 并基于正交试验研究了拔模斜度和圆角半径等模具结构参数对闭式热精锻模锻力的影响规律, 基于此获得了最优模具结构参数组合。试验结果表明: 在大变形区域的过渡区域处, 不合理的模具结构会使材料流动速度明显变差, 导致成形模锻力增大。通过改变该处的拔模斜度和圆角半径, 可改善其材料流动速度, 减少材料流动阻力, 优化后的模具能有效降低成形时的模锻力。

关键词: 深轮辐齿坯件; 模锻力; 多工位闭式热精锻; 模具结构; 正交试验

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.04.026

中图分类号: TG315.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 04-0215-07

Structure optimization on hot precision forging die for automobile deep wheel spoke tooth blank

Wan Hangyong¹, Xia Qinxia¹, Xiao Gangfeng¹, Liu Meihua², Xu Erling³

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. Guangdong Shaozhu Precision Forging Co., Ltd., Shaoguan 512031, China;
3. Guangdong Shaozhu Group Co., Ltd., Shaoguan 512031, China)

Abstract: In order to solve the problem that the die is easily damaged due to the large die forging force during the hot die forging of a gearbox gear, for a SCr420H steel deep wheel spoke tooth blank, a finite element simulation model of multi-station closed-die hot precision forging process for deep wheel spoke tooth blank was constructed based on Deform-3D, and the reliability of the model was verified. Then, the material flow and stress-strain distribution during the multi-station closed-die hot precision forging process were analyzed, and the unreasonable aspects of the die structure design were determined. Furthermore, based on orthogonal experiments, the influences of die structure parameters, such as draft angle and fillet radius, on the die forging force in closed-die hot precision forging were investigated, and the optimal die structure parameters combination was obtained. The experimental results show that in the transition region of the large deformation area, the unreasonable die structure produces obvious material flow velocity differences, resulting in the increasing of die forging forces. Changing the draft angle and fillet radius in this region improves the material flow velocity and reduces the material flow resistance. Thus, the optimized die effectively reduces the die forging force during forming.

Key words: deep wheel spoke tooth blank; die forging force; multi-station closed-die hot precision forging; die structure; orthogonal experiment

作为汽车上传递动力和运动的重要零部件, 变速箱齿轮需在高转速、高负荷、交变载荷的情况下工作。在齿轮的生产中, 齿坯件的成形质量和尺寸

精度直接关系到齿轮的使用性能^[1-2], 闭式模锻是制造齿坯件等精密锻件最有效的方法之一^[3], 但由于闭式模锻成形力大, 对设备要求高, 而某汽车轮辐齿坯件的深轮辐特征加剧了这一问题, 使其生产成本较高。模具结构是影响模锻力的主要因素之一^[4], 合理的模具结构设计, 可有效降低模锻力, 提高模具使用寿命。

传统依赖经验设计并优化模具的方法存在生产调试周期长、生产成本高等缺点。张辉等^[5]利用

收稿日期: 2024-02-29; 修订日期: 2024-05-18

基金项目: 广东省科技专项资金项目 (210907154533470)

作者简介: 万杭勇 (2000-), 男, 硕士研究生

E-mail: 202220100247@mail.scut.edu.cn

通信作者: 夏琴香 (1964-), 女, 博士, 教授

E-mail: meqxxia@scut.edu.cn

Deform-3D 分析了锻造模具结构对金属流动方向、流动速度、等效应力和模具载荷的影响,利用分流法提出了一套新型的模具结构,极大地改善了齿坯件筋部的填充情况。张涛等^[6]利用 Deform-3D 分析了不同模具尺寸对模锻力的影响,通过改变模具的长度尺寸来影响坯料变形长度,以获得模锻力低的模具结构。以上研究表明,调整模具结构能够影响成形过程,降低模锻力。

某新能源汽车用齿坯件采用 5 工位成形方法制造,其锻造成形时工位 3 (预锻Ⅱ)、工位 4 (终锻)的模锻力较大,对成形设备要求高,生产成本低。为实现低成本、高效率、高精度成形,通过改变模具结构参数,利用 Deform-3D 软件进行数值模拟,并根据有限元模拟结果,设计正交试验,获取最优模具结构参数组合。最终通过生产试验,验证方案的合理性。

1 齿坯件热精锻工艺方案

某新能源汽车变速箱齿轮坯锻件如图 1 所示,齿坯件的外径为 $\Phi 134.3$ mm、高度为 (26 ± 0.5) mm,齿坯件下底面存在一个高度为 1.5 mm 的小台阶。轮辐深度为 17.5 mm,达到整个齿坯高度的 2/3,轮辐部分较深。现行的生产工艺流程为:下料→加热→锻粗→预锻Ⅰ→预锻Ⅱ→终锻→冲孔^[6],其锻造成形工艺流程如图 2 所示。

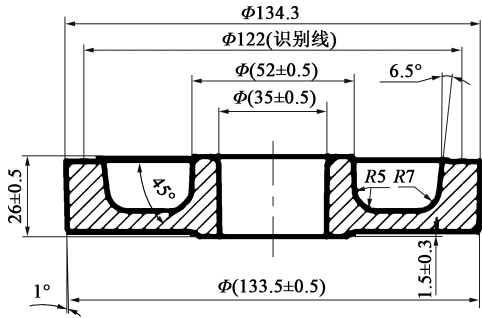


图 1 齿坯件的锻件图

Fig. 1 Forgings diagram of gear blank

2 闭式热精锻有限元模型的构建与验证

2.1 有限元模型的构建

采用三维建模软件完成锻造过程中 4 个工位模具的几何模型建立,随后将锻粗工位的模具及坯料以 STL 格式导入 Deform-3D 软件中,并进行模拟前

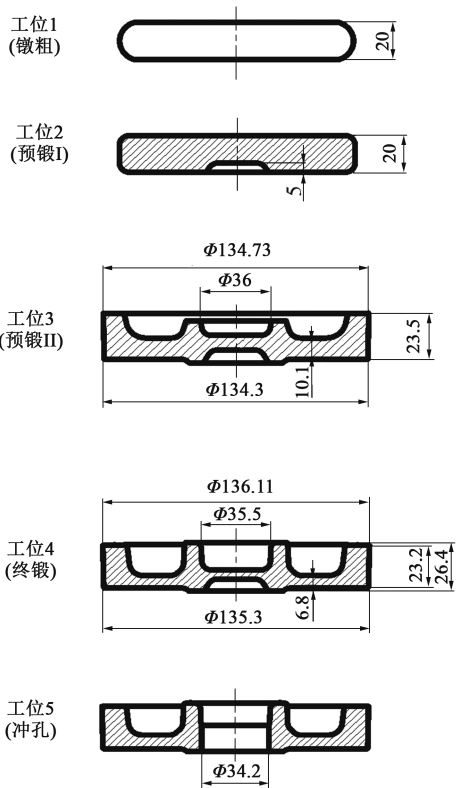


图 2 齿坯件的锻造工艺流程图

Fig. 2 Forging process flow chart of gear blank

的条件设定,模拟参数如表 1 所示^[7],坯料设置为变形体,材料选取 SCr420H 钢,对应软件中材料牌号为 AISI-5120H,初始网格划分为 120000 个,启动局部网格重划分技术并设置体积补偿与网格补偿,模具设置为刚性体,材料选取 4Cr5MoSiV1 (H13) 钢,对应软件中材料牌号为 AISI-H13。构建的齿坯件闭式热精锻有限元模型如图 3 所示。

表 1 齿坯件闭式热精锻模拟参数

Table 1 Simulation parameters of closed-die hot precision forging for gear blank

参数	数值
始锻温度/℃	1200
锻粗工位模具预热温度/℃	200
预锻Ⅰ、预锻Ⅱ、终锻工位模具预热温度/℃	120
与模具热交换系数 (自由接触) / $(N \cdot (s \cdot mm \cdot ^\circ C)^{-1})$	1
与模具热交换系数 (成形接触) / $(N \cdot (s \cdot mm \cdot ^\circ C)^{-1})$	11
摩擦因数	0.3
上模运动速度 / $(mm \cdot s^{-1})$	400
每步压下量 / mm	0.1

2.2 有限元模型的验证

在锻造过程中,模锻力能够反映材料的成形过程^[8]。表 2 为各工位模锻力的数值模拟结果和实际生

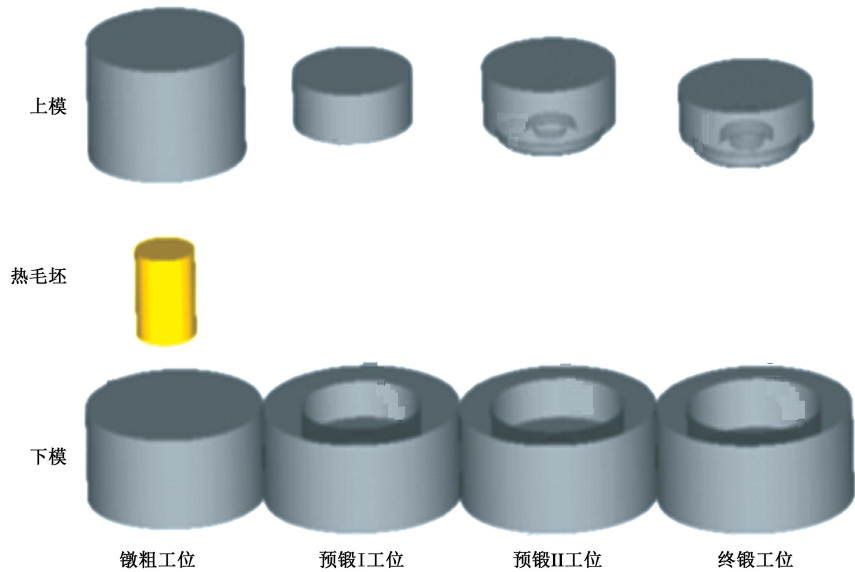


图 3 齿坯件闭式热精锻有限元模型

Fig. 3 Finite element model of closed-die hot precision forging for gear blank

产数据对比，由表 2 可见，镦粗、预锻 I、预锻 II 和终锻工位的数值模拟和实际模锻力的误差分别为 1.3%、1.8%、1.0% 和 1.6%，由此可得，模锻力的模拟数值与实际数值比较相近，在工程误差允许范围内，验证了所构建的齿坯件多工位闭式热精锻有限元模型的合理性。

表 2 不同工位的模锻力数值模拟值与实际测量值对比 (kN)
Table 2 Comparison between numerical simulated and actual measured values of die forging force at different stations (kN)

工位	镦粗	预锻 I	预锻 II	终锻
数值模拟值	2210	2230	9340	16230
实际测量值	2240	2190	9430	16490

3 预锻 II 工位材料流动分析

镦粗工位为预锻提供毛坯外形，还可以改进材料组织性能，但由于该工位无模具结构，此处不予讨论。

预锻 I 工位为后续工位定位，在工件底部锻打出内凹结构，由于该工位的模锻力远远小于后续工位的模锻力，其模具结构优化对降低模锻力的影响较小。

预锻 II 工位使坯料进一步成形，使其形状更接近终锻件，减少终锻时的变形量，降低终锻成形过程中因变形量过大导致的锻件开裂问题^[9-14]。图 4

为预锻 II 工位材料的流动过程，由图 4 可知：成形初期，在压下量为 30% 时，材料整体向外流动，填充轮缘部分，轮毂部分由坯料中心连皮部分的材料填充，且中心连皮部分材料有向轮缘部分填充的趋势；成形中期，轮缘、轮毂和轮辐逐渐成形，在压下量为 55% 时，轮毂部分初步成形，填充情况良好，且底部台阶部分也初步成形，材料主要向轮缘部分流动，填充轮缘高处部分，随着成形的进行，中部多余材料向轮缘部分填充，中部材料流速小于轮辐材料，其原因因为在轮毂轮辐连接处材料流动受阻而导致模锻力偏大；成形后期，在压下量为 90% 时，各部位已基本成形，轮毂区域的材料有向下流动的趋势，中心连皮和轮辐部分逐渐减薄，该处材料往轮缘高处部分填充，轮缘部分逐渐拔高。轮缘两侧留下少量空隙，预锻件上未出现飞边，材料填充情况良好。

图 5 为预锻 II 工位成形过程中等效应力云图。由图 5 可知，在成形中、后期，等效应力最大处分别出现在轮毂部分、中心连皮部分和底部台阶部分，其主要原因为轮毂部分和底部台阶部分填充完全，上模继续向下运动，其多余材料受力往轮辐部分流动，推动轮辐区域的材料一起向轮缘高处流动，故轮毂部分、中心连皮部分和底部台阶部分应力偏大。图 6 为预锻 II 工位成形过程中等效应变云图。由图 6 可知，等效应变最大处出现在轮毂部分与轮辐部分拐角处和轮缘部分与上模接触斜面处，其主要原因为轮毂部分和底部台阶部分填充完成后，上模继

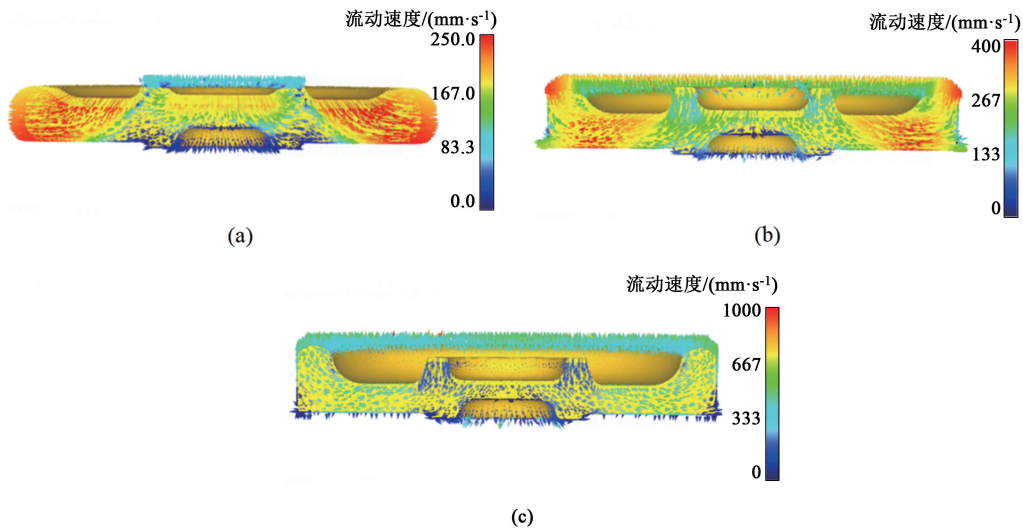


图 4 不同压下量下预锻 II 工位材料流动速度分布云图

(a) 30% (b) 55% (c) 90%

Fig. 4 Distribution nephgrams of material flow velocity in pre-forging II station under different compression amounts

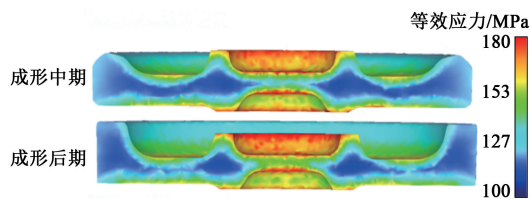


图 5 预锻 II 工位成形过程中等效应力云图

Fig. 5 Equivalent stress nephgram of pre-forging II station during forming process

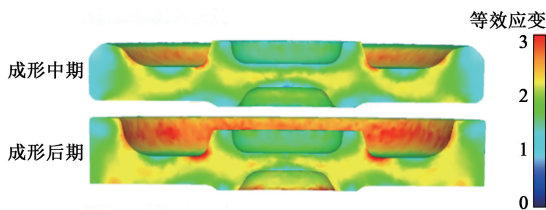


图 6 预锻 II 工位成形过程中等效应变云图

Fig. 6 Equivalent strain nephgram of pre-forging II station during forming process

续运动,中部材料往轮辐部分流动,在拐角处流动受阻,导致变形较大,材料在填充轮缘过程中与上模斜面接触流动,其过渡区域上模的拔模斜度和圆角半径较小,受摩擦力的影响较大,等效应变较大。

在终锻工位,轮缘和轮毂部分进一步拔高,轮辐和中心连皮部分进一步减薄,终锻件留下的中心连皮部分后续待冲孔去除。图 7 为终锻工位的材料流动过程。成形初期,在压下量为 30%时,轮辐部分材料均匀流向轮缘和轮毂部分,将其拔高。成形中期,在压下量为 55%时,轮毂部分进一步拔高,

且流速较大,材料向模膛深处流动,轮缘部分均匀向内侧流动,由轴向运动变为径向运动,填充其内侧圆角部分。成形后期,在压下量为 90%时,锻件的整体流速较均匀,此时模具型腔内部填充接近填满。材料在终锻成形过程中按预期方式流动,且流动过程中受阻较小,该工位模具结构较为合理。

通过分析齿坯件锻造成形过程中预锻 II 工位和终锻工位的材料流动发现:在预锻 II 工位中,由于材料分布不均,导致在轮毂已初步成形后,中心连皮部分仍有部分材料多余,随着成形继续进行,该部分材料经轮辐部分流向轮缘部分,在轮毂与轮辐部分拐角处受阻,如图 8 中 D 和 E 处,导致该处应变较大,即该处的模具结构不合理;预锻 II 工位的材料主要流向轮缘部分,填充过程较为缓慢,坯料在轮缘部分与上模接触处流动受阻,如图 8 中的 A、B 和 C 处,其等效应变较大,故该处模具结构不合理;终锻工位在工位 3 得到合理尺寸后,材料按照预期方式流动,不受工位 3 模具结构的影响,且其流动过程中受阻较小,此工位处模具结构较为合理。

4 闭式热精锻模具结构优化

4.1 正交试验方案设计

针对材料流动不合理现象,选取图 8 中 A 处凹模拔模斜度、B 处凸模拔模斜度、C 处凸模圆角半径、D 处凸模圆角半径、E 处凸模拔模斜度共 5 处模具结构参数,并以位置字母作为因素代号。通过

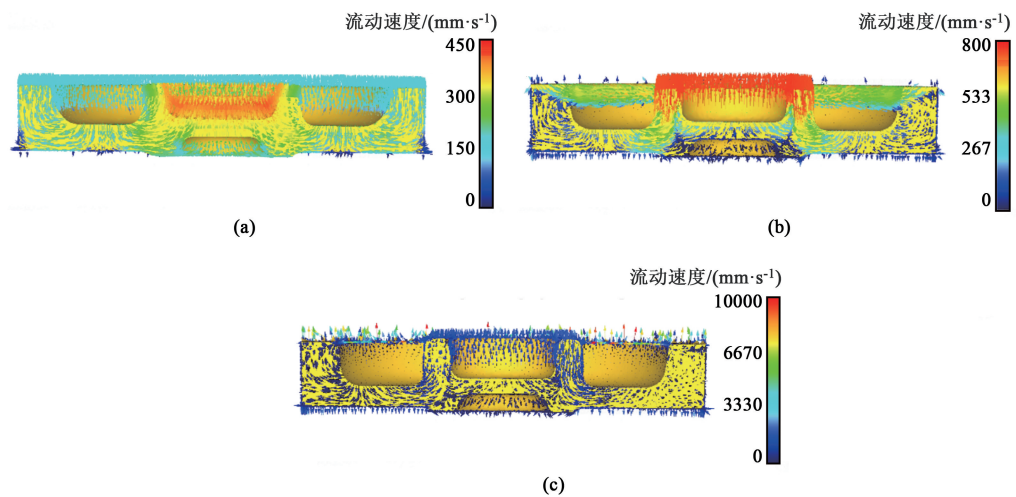


图 7 不同压下量下终锻工位材料流动速度分布云图
(a) 30% (b) 55% (c) 90%

Fig. 7 Distribution nephgrams of material flow velocity in final forging station under different compression amounts

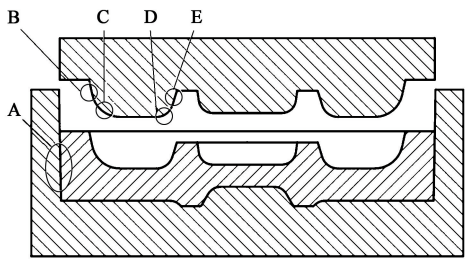


图 8 模具结构示意图
Fig. 8 Schematic diagram of die structure

改变闭式热精锻模具的拔模斜度和圆角半径来改善拐角处的材料流动情况。

以模锻力和填充情况作为评价指标，根据以上条件，建立5因素5水平的热精锻成形正交试验因

素水平表，如表 3 所示。

表 3 正交试验因素水平表					
Table 3 Factors and levels of orthogonal experiment					
水平	A/(°)	B/(°)	C/mm	D/mm	E/(°)
1	1.0	11.0	8	3.0	16.0
2	1.5	11.5	9	3.5	16.5
3	2.0	12.0	10	4.0	17.0
4	2.5	12.5	11	4.5	17.5
5	3.0	13.0	12	5.0	18.0

4.2 正交试验结果分析

根据正交试验设计方法设计正交试验，开展了 25 组齿坯件热精锻成形试验，数值模拟结果如表 4 所示。工位 3 中坯料产生少量飞边会影响工位 4 材

表 4 正交试验结果

Table 4 Orthogonal experimental results								
试验号	A/(°)	B/(°)	C/mm	D/mm	E/(°)	工位 3 填充程度/%	工位 3 模锻力/kN	工位 4 模锻力/kN
1	1.0	11.0	8	3.0	16.0	少量飞边	11860	16240
2	1.0	11.5	9	3.5	16.5	少量飞边	11730	16810
3	1.0	12.0	10	4.0	17.0	99.9	9340	16230
4	1.0	12.5	11	4.5	17.5	98.2	8400	15010
5	1.0	13.0	12	5.0	18.0	97.4	7630	16760
6	1.5	11.0	9	4.0	17.5	99.6	9620	15180
7	1.5	11.5	10	4.5	18.0	98.3	8180	17080
8	1.5	12.0	11	5.0	16.0	97.2	7630	16880
9	1.5	12.5	12	3.0	16.5	96.3	7150	16760
10	1.5	13.0	8	3.5	17.0	99.8	10090	16520

表 4 (续)
Table 4 (Continued)

试验号	A/(°)	B/(°)	C/mm	D/mm	E/(°)	工位 3 填充程度/%	工位 3 模锻力/kN	工位 4 模锻力/kN
11	2.0	11.0	10	5.0	16.5	97.6	7860	16450
12	2.0	11.5	11	3.0	17.0	97.3	7390	16720
13	2.0	12.0	12	3.5	17.5	95.8	6710	16600
14	2.0	12.5	8	4.0	18.0	99.5	8510	16780
15	2.0	13.0	9	4.5	16.0	97.7	7930	16730
16	2.5	11.0	11	3.5	18.0	96.3	6790	16550
17	2.5	11.5	12	4.0	16.0	95.7	6350	16910
18	2.5	12.0	8	4.5	16.5	98.7	8190	16090
19	2.5	12.5	9	5.0	17.0	96.8	7480	16780
20	2.5	13.0	10	3.0	17.5	96.5	7160	16620
21	3.0	11.0	12	4.5	17.0	94.8	5840	16950
22	3.0	11.5	8	5.0	17.5	97.3	7650	16880
23	3.0	12.0	9	3.0	18.0	96.9	7270	16460
24	3.0	12.5	10	3.5	16.0	95.1	6180	15370
25	3.0	13.0	11	4.0	16.5	96.6	7030	16720

料填充, 故对产生少量飞边的组别不予考虑。填充程度较低的组别, 其模锻力因未达到最大值, 在填充程度为 97% 时, 坯料轮缘顶部两侧角隙均未填满, 故对填充程度小于 97% 的组别不予考虑。在综合考虑工位 3 和工位 4 模锻力情况下, 确定试验组 4 为最优参数组合。

图 9 为最优参数组合下预锻 II 工位材料的流动过程。由图 9 可得, 相较于原参数下的材料流动, 该参数下受阻区材料的流动速度更大, 但其流动形式未发生变化, 改变拔模斜度和圆角半径只能影响其流动速度, 不能影响其流动形式。

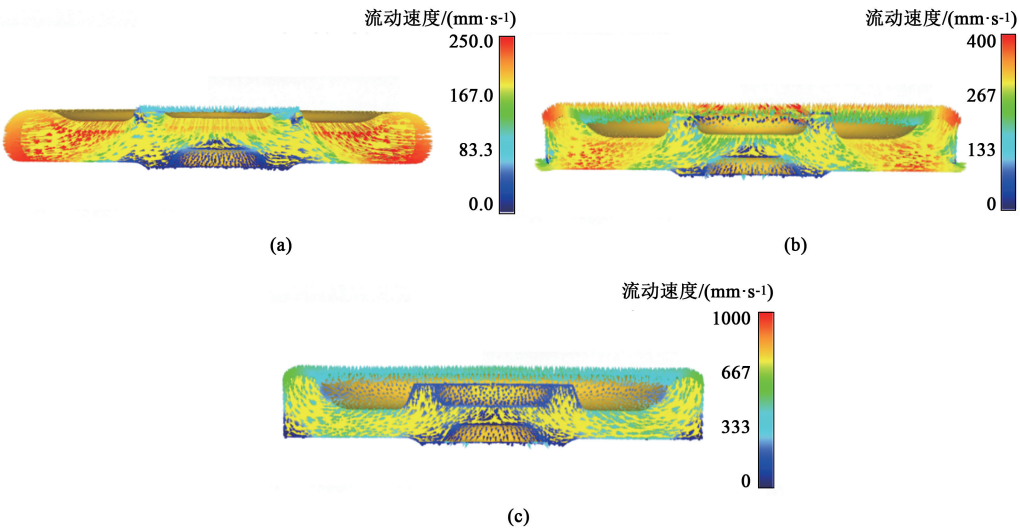


图 9 最优参数组合下不同压下量时预锻 II 工位材料流动速度分布云图
(a) 30% (b) 55% (c) 90%

Fig. 9 Distribution nephgrams of material flow velocity in pre-forging II station under different compression amounts under optimal parameter combination

4.3 生产试验验证

使用 HGP2500 热模锻压力机进行热模锻成形试验, 如图 10 所示。图 11 为齿坯件闭式热精锻试验结果。由图 11 可见, 齿坯件制件外观成形良好, 无填充不满、折叠、裂纹等缺陷, 其锻造过程中工位 3 模锻力大小为 8400 kN, 与未优化模具相比下降

10.9%, 工位 4 模锻力大小为 15010 kN, 与未优化模具相比下降 8.9%。

5 结论

(1) 基于材料流动和应力应变分析, 确定模具



图10 深轮辐齿坯件多工位闭式热精锻成形试验

Fig. 10 Multi-station closed-die hot precision forging experiment of deep wheel spoke tooth blank



图11 深轮辐齿坯件锻件图

Fig. 11 Forgings photo of deep wheel spoke tooth blank

拔模斜度和圆角半径等结构参数存在不合理的设计,导致轮毂与轮辐连接处阻碍中部材料向外流动,轮辐与轮缘连接处的材料流动阻力大。

(2) 增大拔模斜度和圆角半径等模具结构参数,可加快受阻区材料的流动速度,减少材料流动阻力。

(3) 通过模拟和生产验证,最优参数组合为:A处拔模斜度为 1° ,B处拔模斜度为 12.5° ,C处圆角半径为11 mm,D处圆角半径为4.5 mm,E处拔模斜度为 17.5° ,该组参数下可获得合格的深轮辐齿坯件,并且成形过程中模锻力与原有模具相比,工位3下降10.9%,工位4下降8.9%。

参考文献:

- [1] 王玉,李丽君,孙弘毅,等. 变速箱齿轮多工况疲劳寿命分析[J]. 煤矿机械, 2021, 42 (12): 75-78.
Wang Y, Li L J, Sun H Y, et al. Multicondition fatigue life analysis of transmission gears [J]. Coal Mine Machinery, 2021, 42 (12): 75-78.
- [2] 卢杰,龚先生. 基于有限元的齿轮坯锻造模拟及工序改进[J]. 热加工工艺, 2013, 42 (21): 97-99, 102.
Lu J, Gong X S. Finite element simulation and process improvement of gear blanking forging [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (21): 97-99, 102.
- [3] 佟莹. 端盖闭式模锻数值模拟分析[J]. 热加工工艺,

2013, 42 (3): 134-136.

Tong Y. Numerical simulation and analysis of end cover closed-die forging [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (3): 134-136.

- [4] 杨锋,富国亮,侯巧红,等. 基于Deform的飞边槽结构对法兰盘模锻的影响分析[J]. 热加工工艺, 2020, 49 (19): 108-110.
Yang F, Fu G L, Hou Q H, et al. Analysis of the impact of flash groove structure on flange forging based on deform [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (19): 108-110.
- [5] 张辉,周杰,曾德涛,等. 某齿轮坯精锻分流成形的新型模具设计[J]. 热加工工艺, 2012, 41 (1): 175-177.
Zhang H, Zhou J, Zeng D T, et al. Design of a novel die for precision forging and metal flow distribution of a gear blank [J]. Hot Working Technology, 2012, 41 (1): 175-177.
- [6] 张涛,史文雅,王菲. 基于DEFORM的煤矿用地质钻杆端部挤压锻造模具的优化设计[J]. 煤矿机械, 2019, 40 (11): 100-102.
Zhang T, Shi W Y, Wang F. Optimization design of end squeeze forging dies for geological drilling rods in coal mines based on deform [J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40 (11): 100-102.
- [7] 夏琴香,彭冲,肖刚锋,等. 深轮辐齿坯多工位闭式模锻材料流动规律研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2024, 52 (9): 35-41.
Xia Q X, Peng C, Xiao G F, et al. Study on material flow patterns in multi-station closed-die forging of deep-rim gear blanks [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 52 (9): 35-41.
- [8] 张海渠. 模锻工艺与模具设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
Zhang H Q. Die Forging Process and Die Design [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [9] Ji H C, Li Y M, Xiao S, et al. Study on forging process of valve based on response surface method [J]. Metalurgija, 2020, 59 (3): 321-324.
- [10] 胡亚民. 锻造工艺过程及模具设计[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.
Hu Y M. Forging Process and Die Design [M]. Beijing: Peking University Press, 2006.
- [11] 中国机械工程学会塑性工程学会. 锻压手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
China Society for Technology of Plasticity, CMES. Forging Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [12] 苏梁,弓硕,王福明. 预热处理工艺对SCr420H齿轮钢高温渗碳奥氏体晶粒长大行为的影响[J]. 特殊钢, 2023 (3): 1-10.
Su L, Gong S, Wang F M. Influence of preheating process on austenite grain growth behavior of SCr420H gear steel during high-temperature carburizing [J]. Special Steel, 2023 (3): 1-10.
- [13] Zhang H, Pan A Q, Zhang Y Q, et al. Research on the shunting precision forging of ribbed plate gear blank based on Deform-3D finite element analysis under the frame work of new engineering [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1302 (4): 042029.
- [14] 程里. 模锻实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
Cheng L. Practical Technology of Die Forging [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.