

一种车用法兰盘零件的锻造工艺研究及模具结构优化

宋志峰¹, 逯云杰², 马磊³, 朱杰¹

(1. 濮阳职业技术学院 机电与汽车工程学院, 河南 濮阳 457000; 2. 河南大学 濮阳工学院, 河南 濮阳 457000;
3. 濮阳市公安局 信息技术科, 河南 濮阳 457000)

摘要: 为解决一种车用法兰盘零件传统制造工艺效率低、材料利用率低、生产成本低、产品使用性能差等问题, 设计了一种3工位热模锻成形工艺, 依次经预成形、预锻、终锻成形。为保证工艺质量, 利用 Deform-3D 软件对法兰盘零件的成形过程进行了模拟, 根据金属变形过程确定了工艺中的隐藏缺陷; 对预锻模具结构进行了优化, 提出了两种改进方案, 同时依次进行了成形检验, 并对比了改进后两种方案的终锻件的温度分布、预锻和终锻工位的锻造力及模具磨损情况。结果表明, 改进后工艺可解决锻造缺陷, 并且采用改进方案2, 对法兰盘锻件质量的提高和模具寿命的延长更有帮助。最后, 进行了法兰盘零件的热模锻试验, 得到了符合预期的法兰盘零件, 有效解决了目前面临的难题。

关键词: 法兰盘; 锻造工艺; 锻造缺陷; 锻造力; 模具磨损

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.09.003

中图分类号: TG316.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 09-0015-09

Research on forging process and optimization on die structure for an automotive flange part

Song Zhifeng¹, Lu Yunjie², Ma Lei³, Zhu Jie¹

(1. College of Electromechanical and Automotive Engineering, Puyang Vocational and Technical College, Puyang 457000, China;
2. Puyang Institute of Technology, Henan University, Puyang 457000, China;
3. IT Division, Puyang Public Security Bureau, Puyang 457000, China)

Abstract: In order to solve the problems of low efficiency, low material utilization, high production cost and poor product performance in the traditional manufacturing process of an automotive flange part, a three-station hot die forging process was designed, which consists of preforming, pre-forging and final forging in sequence. Then, to ensure the process quality, the forming process of flange part was simulated by software Deform-3D, and the hidden defects in the process were determined based on the metal deformation process. Furthermore, the pre-forging die structure was optimized, and two improvement schemes were proposed. At the same time, the forming inspection was carried out in turn, and the temperature distribution of final forgings, the forging force of pre-forging and final forging stations, and the die wear conditions of the two improved schemes were compared. The results show that the improved process solves the forging defects, and the improvement scheme 2 is more helpful to improve the quality of flange forgings and prolonging the life of die. Finally, hot die forging tests of flange parts are carried out, and the expected flange parts are obtained, which effectively solves the current problems.

Key words: flange; forging process; forging defects; forging force; die wear

近几年, 随着人民生活质量的改善, 汽车销量逐年增长, 但在后续售后服务中也遇到了不少质量问题, 而其中绝大部分问题均是由于极个别零部件性能差造成的, 不仅影响整车性能、增大安全风险, 一定程度上也会阻碍汽车工业的发展^[1-2], 因此, 针对相

关零部件的生产工艺进行研究, 加强生产技术创新具有非常大的社会价值。本文以某型号法兰盘零件为例, 该汽车零件常用制造工艺有铸造、切削、开式锻造、闭式锻造, 均存在一些问题, 例如, 铸造得到的法兰盘零件的内部组织比较疏松, 普遍存在气孔、粘砂、砂眼等问题^[3], 不仅报废率高, 力学性能也极不理想; 切削工艺下, 材料利用率较低, 生产成本低, 零件性能也一般; 开式锻造下, 由于飞边的存在, 同样有材料利用率低的问题, 也影响生产效率, 并且切除飞边造成的纤维断裂也会降低零件强

收稿日期: 2023-06-30; 修订日期: 2023-08-28

基金项目: 河南省高等教育教学改革研究与实践项目 (2021-SJGLX753); 河南省职业教育教学改革研究与实践项目 (豫教[2023] 03096)

作者简介: 宋志峰 (1981-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: zhuji1977@126.com

度^[4]；闭式锻造生产的法兰盘零件在尺寸、性能等方面均能达到要求，并且生产效率和材料利用率高，但由于处于高温高压条件下，锻模寿命较低^[5-6]。因此，提出采用 3 工位热模锻成形工艺，利用分步成形合理预分配金属^[7]，从而更利于促进金属流动变形，以降低模具负载和磨损，提高寿命。同时为保证工艺质量、降低试验风险，采用 Deform-3D 软件对法兰盘零件的 3 工位热模锻成形过程进行模拟，以实时观察是否存在隐藏缺陷^[8]，帮助工艺设计师及时、合理地调整模具结构，避免开模损失，从而更好地完成法兰盘零件新工艺的设计开发工作。

1 法兰盘零件锻造工艺设计

法兰盘零件结构图如图 1 所示。由零件体积与零件包容体体积的比值可得，零件的整体复杂系数为 0.24^[9]，复杂程度较高，同时零件的材料为 60 钢，塑性变形时产生的变形抗力较大，因此通过增加预锻工位来促进金属流动。此外，考虑到预锻工位的定位问题，为防止出现锻造偏心，以及坯料表面的氧化问题，需要增加预成形工位，因此为法兰盘零件设计了如图 2 所示的 3 工位热模锻成形工艺。

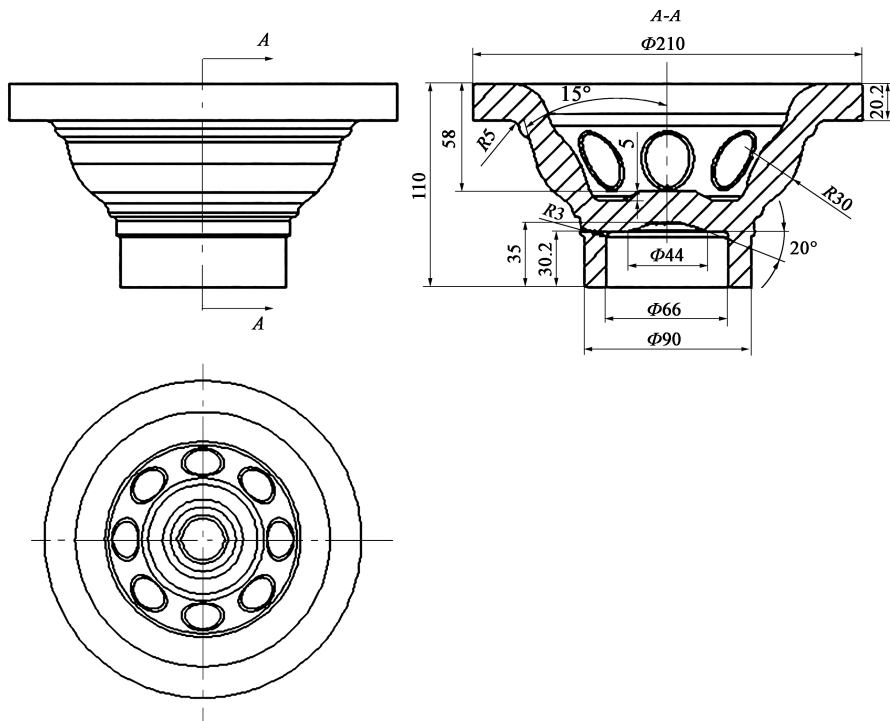


图 1 法兰盘零件结构图

Fig. 1 Structural drawing of flange part

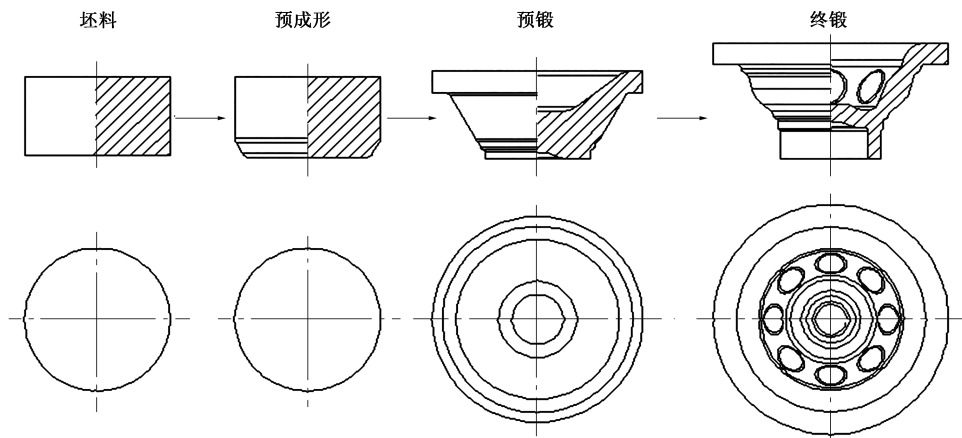


图 2 法兰盘零件 3 工位热模锻成形工艺

Fig. 2 Three-station hot die forging process for flange part

2 有限元模型建立及模拟结果分析

通过三维建模软件完成3个工位模具的几何模型建立,并且由于法兰盘零件结构具有对称性,可简化为1/4模型进行研究,随后先将工位1的模具及坯料以STL格式导入Deform-3D软件中,并进行模拟前的条件设定。法兰盘零件的生产材料为60钢,其不同高温条件下的压缩变形特性可根据赵劲松等^[10]的研究获得,可通过Arrhenius方程在软件中完成60钢本构模型的建立。坯料锻造的初始温度为1040℃,需进行四面体网格处理;锻模材料为4Cr5MoSiV1钢,锻前需预热,温度设定为320℃,因后文中需要对锻模进行磨损试验,因此,也需要四面体网格处理,对凸模进行下行速度设置;完成坯料和模具的对称面、传热面及摩擦关系的设置,并设置摩擦因数为0.3、传热系数为 $11 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$;建立Archard磨损模型,由于锻造在高温条件下进行,会对锻模表面产生一定的影响,因此采用修正后模型可提高模拟精度^[11],公式见式(1):

$$W(T) = \int K(T) \frac{pv}{H^2(T)} dt \quad (1)$$

式中: T 为温度; p 为接触压力; v 为金属流动速度; t 为锻造时间; $W(T)$ 、 $K(T)$ 和 $H(T)$ 分别为不同温度下的磨损深度、磨损系数和模具硬度,并且根据模具材料为4Cr5MoSiV1钢可知, $K(T) = (29.29 \ln T - 168.73) \times 10^{-6}$, $H(T) = 9216.4T^{-0.505}$ 。

在模拟控制中设定工位1的停止条件,开始模拟。工位1模拟结束后,导入工位2的模具来替换工位1的模具,重复以上相关设置。工位2模拟结束后,导入工位3的模具在替换工位2的模具,重复以上相关设置。

法兰盘零件的3工位热模锻成形模拟结果如图3所示,其中,预成形件和预锻件成形较好,而终锻件的法兰底部则出现了材料折叠缺陷,无法满足要求。终锻变形过程如图4所示,在凸模作用下,预锻件在受力后使得法兰部位产生了翘曲,见图4b。随着变形的进行,因底部型腔填充难度大,变形金属优先进入法兰部型腔,同时,由于之前的翘曲变形导致了曲面空腔的出现,见图4c圆圈处。随着法兰部型腔填充完成,曲面空腔被压缩,逐渐在法兰底部形成折叠缺陷,见图4d。最后完成底部型腔填充,见图4e。

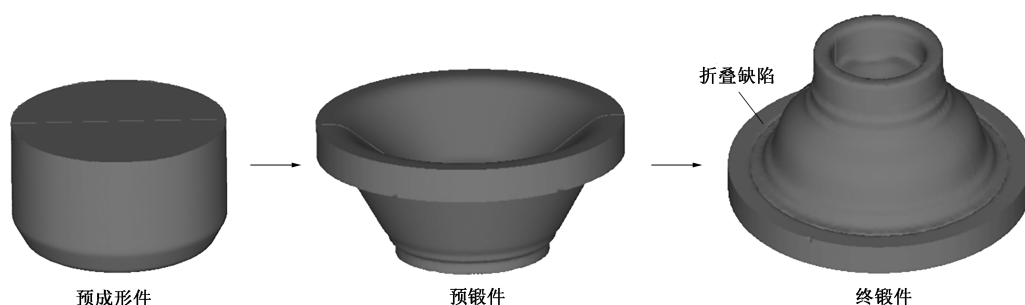


图3 法兰盘零件3工位热模锻成形模拟结果

Fig. 3 Simulation results of three-station hot die forging for flange part

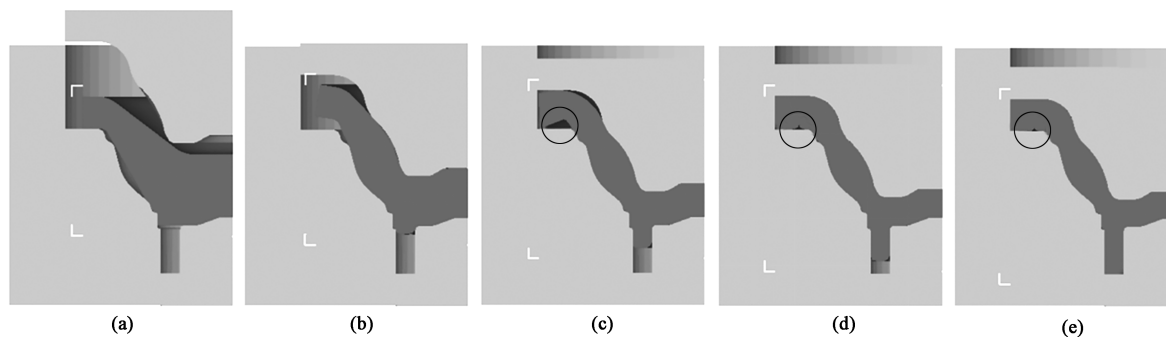


图4 终锻变形过程示意图

(a) 第1步 (b) 第200步 (c) 第304步 (d) 第348步 (e) 第392步

Fig. 4 Schematic diagrams of final forging deformation process

(a) Step 1 (b) Step 200 (c) Step 304 (d) Step 348 (e) Step 392

3 模具结构优化与模拟验证

经过上述模拟分析可知,终锻件折叠缺陷是由于预锻件法兰翘曲变形造成的,因此,考虑对预锻模具结构进行优化,从而使得预锻件的整体外形更为合理,更利于后续终锻成形。通过多次模拟调整,提出了两种改进方案,两种优化后的预锻件的外形结构如图 5 所示,两种方案优化后的预锻、终锻变形过程分别如图 6 和图 7 所示。两种方案的预锻工位均是通过预成形件底部圆弧面定位,变形过程比较相似,变形金属均先向下流动成形零件底部,随后沿着模具壁面反向流动填充型腔,金属变形过程完全符合塑性成形规律,两种方案的预锻件均可正常成形,不存在成形缺陷。两种方案的终锻工位均是通过预锻件底部定位,变形过程也非常相似,在凸模作用下,部分金属向下流动成形零件底部,同时部分金属沿着模具壁面反向流动成形零件法兰,由于优化后的预锻件上端盲孔的外形与终锻凸模的外形比较接近,并且预锻件取消了法兰结构,因此,金属可沿着模具壁面较好地流动,在成形中不会出现原方案中的翘曲现象,最终终锻件均能较好地成

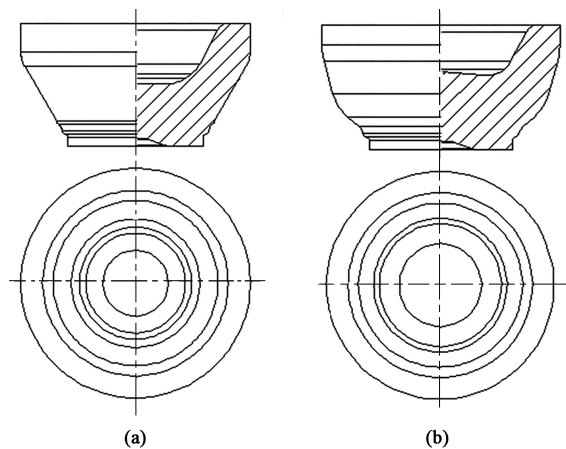


图 5 不同方案优化后预锻件结构

(a) 方案 1 (b) 方案 2

Fig. 5 Structures of pre-forged parts for different schemes after optimization

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

形,无缺陷产生。结果表明,优化后两种方案均可解决原方案中的锻造缺陷。

4 工艺优选与试模

4.1 终锻件温度分布分析

优化后两种方案的终锻件温度分布情况如图 8

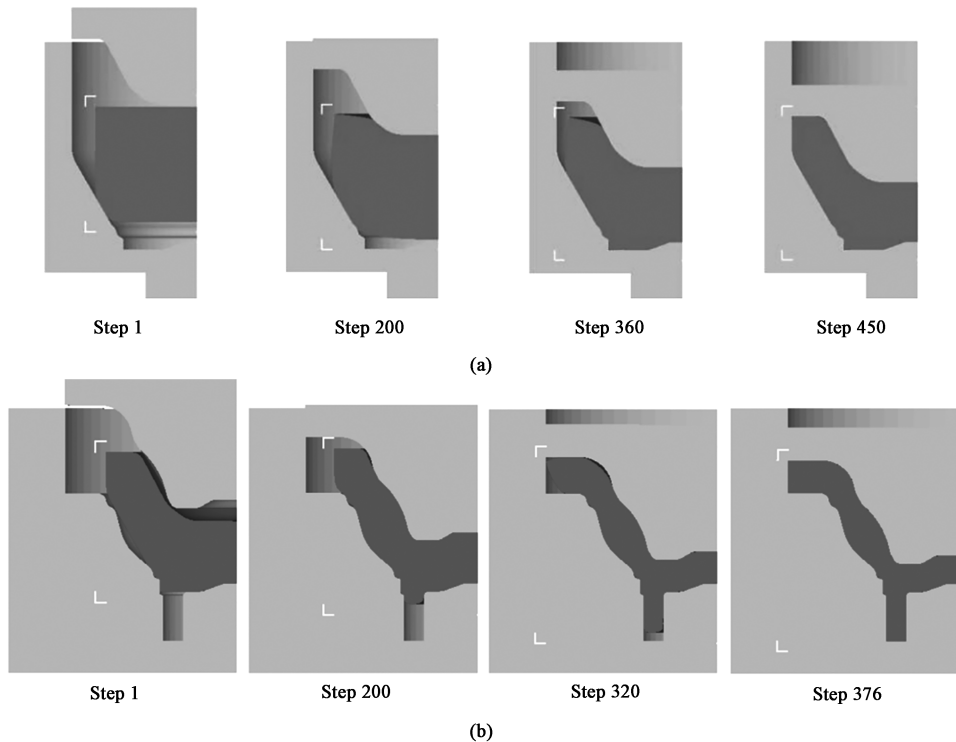


图 6 方案 1 锻造变形过程示意图

(a) 预锻 (b) 终锻

Fig. 6 Schematic diagrams of forging deformation process in scheme 1

(a) Pre-forging (b) Final forging

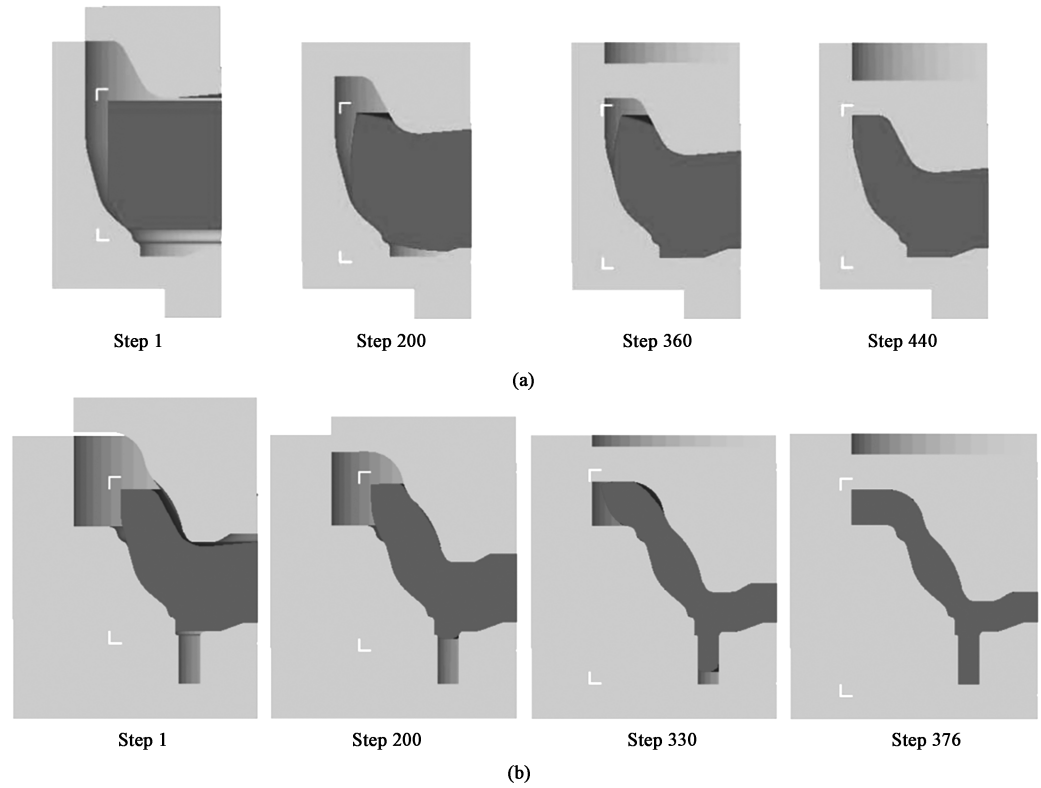


图 7 方案 2 锻造变形过程示意图
(a) 预锻 (b) 终锻
Fig. 7 Schematic diagrams of forging deformation process in scheme 2
(a) Pre-forging (b) Final forging

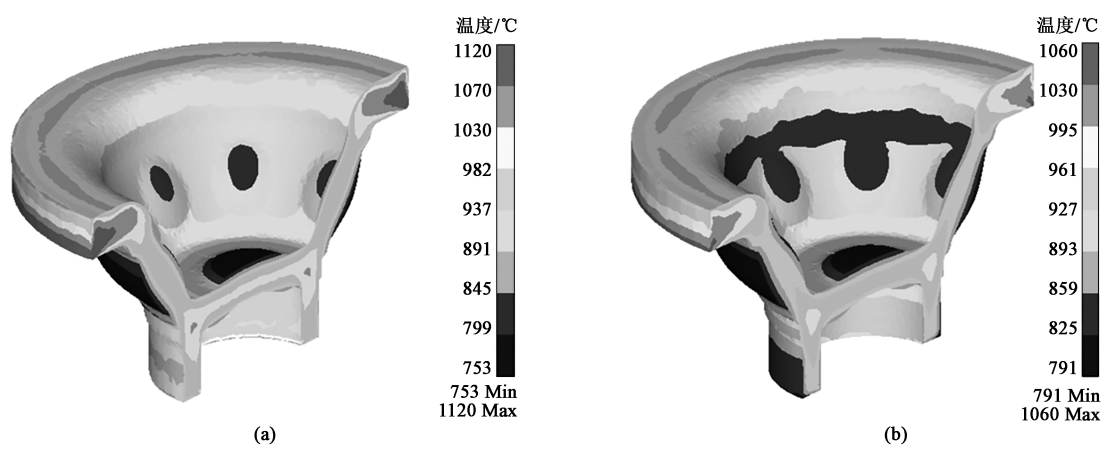


图 8 不同方案下终锻件温度分布情况
(a) 方案 1 (b) 方案 2
Fig. 8 Temperature distribution conditions of final forgings for different schemes
(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

所示，由于坯料与模具间存在传热现象，导致较早成形的部位与模具的接触时间比较长，温度相对较低，同时由于终锻过程中零件的变形较大，使得发生剧烈变形的部位会产生大量的变形热^[12]，这就导致了局部部位升温比较明显，因此，终锻件温度分布通常存在分布不均的现象，而如果局部温差过大，

会因为冷却不均而产生较大的热应力，从而增加终锻件出现裂纹的风险，影响产品质量，因此要尽可能地控制锻件温差。由图 8 可知，方案 1 下的终锻件局部最高温度为 1120 ℃，局部最低温度为 753 ℃，最大温差为 367 ℃，而方案 2 下的终锻件的局部最高温度为 1060 ℃，局部最低温度为

791 ℃, 最大温差为 269 ℃, 优于方案 1, 可降低裂纹风险, 对法兰盘锻件质量的提高更有帮助。

4.2 锻造力分析

优化后两种方案下的预锻工位和终锻工位的锻造力变化曲线如图 9 所示, 锻造力随着凸模行程的增加而不断增大, 这是因为: 随着锻造的进行, 零件发生变形后会不断增加与锻模间的接触面面积, 导致阻力上升, 使得金属在型腔内流动更为困难, 而要想继续进行变形, 自然需要更大的锻造力, 与

实际生产中的锻造力变化规律完全相符。但是, 锻造力过大会增加锻模的损伤和开裂风险, 影响锻模寿命, 因此在不妨碍锻件成形的前提下必须尽量降低锻造力。由图 9 可知, 方案 1 下的预锻工位的最大锻造力为 2141 kN, 终锻工位的最大锻造力为 4645 kN, 而方案 2 下的预锻工位的最大锻造力为 1669 kN, 终锻工位的最大锻造力为 3876 kN, 与方案 1 相比分别降低了 22% 和 16.6%, 可有效降低模具损伤, 对模具寿命的延长更有帮助。

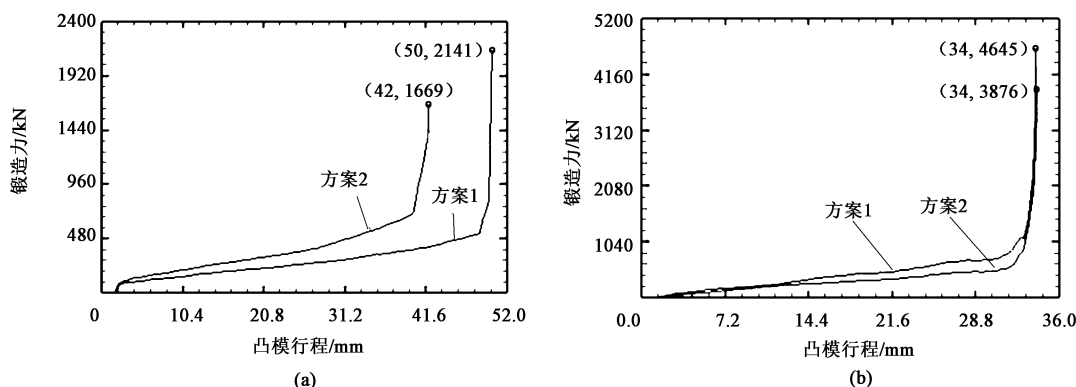


图 9 锻造力变化曲线

(a) 预锻 (b) 终锻

Fig. 9 Variation curves of forging force

(a) Pre-forging (b) Final forging

4.3 模具磨损分析

锻造时锻模与坯料摩擦后会产生磨损, 当磨损量达到一定程度时, 会造成锻件超差的情况, 因此, 锻模的磨损情况也影响模具寿命, 在不妨碍锻件成形的前提下要求磨损越小越好。优化后两种方案下的预锻工位和终锻工位的模具表面磨损情况如图 10 所示, 较大磨损处均为金属剧烈流动的部位, 基本均出现在过渡圆角部位, 方案 1 下预锻工位凸、凹模的最大磨损深度分别为 3.87×10^{-5} 和 8.27×10^{-6} mm, 终锻工位凸、凹模的最大磨损深度分别为 8.60×10^{-5} 和 2.88×10^{-5} mm, 方案 2 下预锻工位凸、凹模的最大磨损深度分别为 2.40×10^{-5} 和 7.81×10^{-6} mm, 终锻工位下的凸、凹模的最大磨损深度分别为 6.32×10^{-5} 和 2.15×10^{-5} mm。很明显, 不管是预锻工位还是终锻工位, 方案 2 下的锻模的磨损均要更小些, 对模具寿命的延长更有帮助。

4.4 锻造试验

基于以上研究, 采用改进方案 2 进行法兰盘零件的热模锻试验, 其 3 工位锻造模具结构示意图如图 11 所示, 模具完成制作后利用压力机进行锻造试验, 60 钢棒料的下料尺寸为 $\Phi 130 \text{ mm} \times$

72 mm, 锻造前需要先进行加热软化并除鳞, 锻造中需要通过润滑剂保持润滑, 锻造后需要进行抛丸、探伤、防锈、尺寸检验等。锻造试验结果如图 12 所示, 各工位的锻件均能较好成形, 外形饱满, 探伤后未发现成形缺陷, 全部符合模拟结果, 生产的法兰盘零件尺寸满足要求, 质量稳定, 说明该工艺能较好地代替传统制造工艺, 有效地解决目前面临的效率低、材料利用率低、生产成本低、产品使用性能差等问题。

5 结论

(1) 为解决一种车用法兰盘零件传统制造工艺效率低、材料利用率低、生产成本低、产品使用性能差等问题, 设计了一种 3 工位热模锻成形工艺, 同时为保证研发工艺的质量, 预先利用 Deform-3D 软件对法兰盘零件的成形过程进行了模拟。

(2) 根据金属变形过程确定了工艺中的隐藏缺陷, 提出了两种改进方案, 优化了预锻模具结构, 进行了成形检验, 并对比了改进后两种方案的终锻件温度分布情况、预锻和终锻工位的锻造力情况及

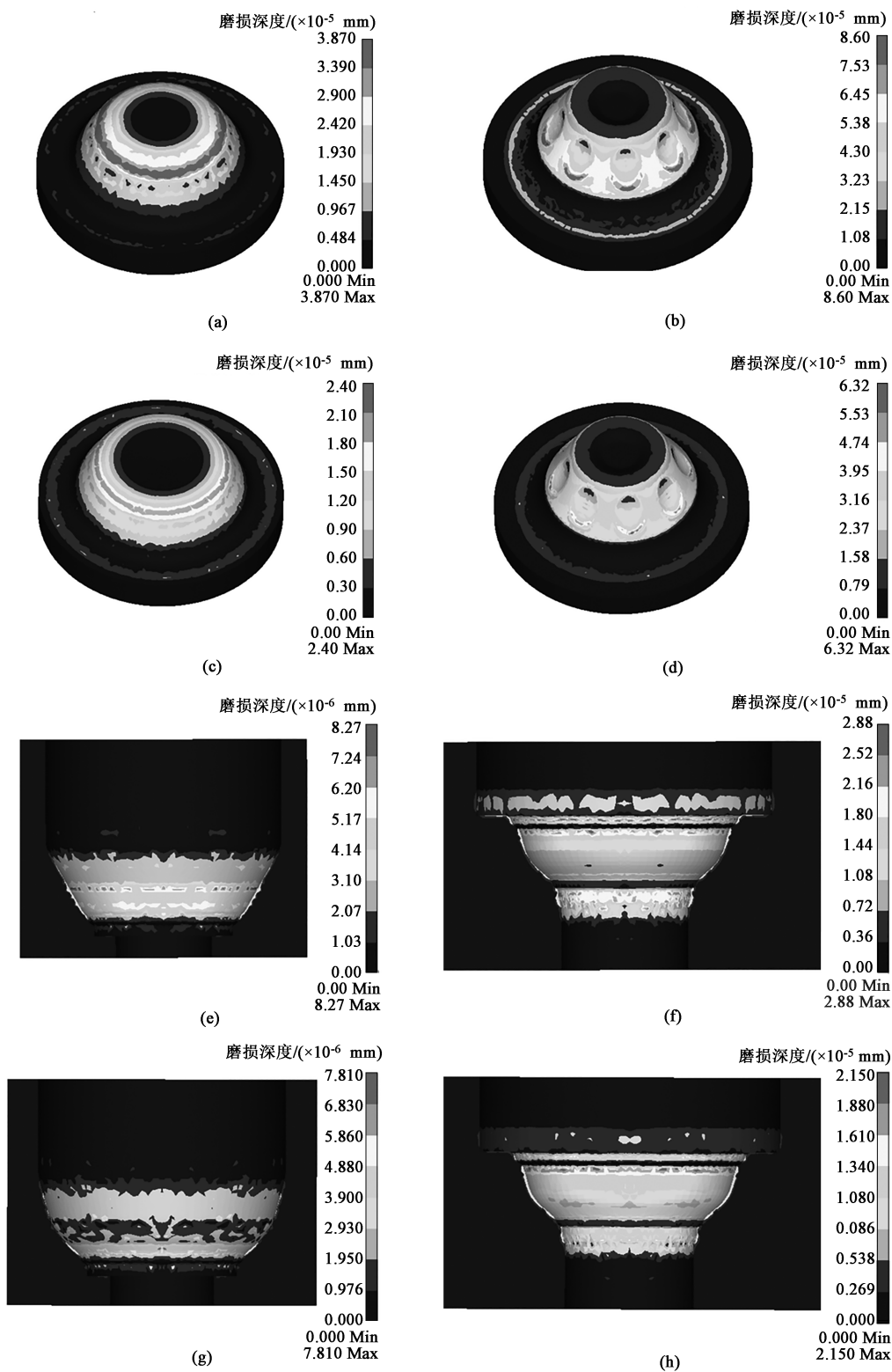


图10 模具表面磨损分布情况

(a) 方案1, 预锻凸模 (b) 方案1, 终锻凸模 (c) 方案2, 预锻凸模 (d) 方案2, 终锻凸模 (e) 方案1, 预锻凹模
(f) 方案1, 终锻凹模 (g) 方案2, 预锻凹模 (h) 方案2, 终锻凹模

Fig. 10 Wear distribution conditions on surface of die

(a) Scheme 1, pre-forging punch (b) Scheme 1, final forging punch (c) Scheme 2, pre-forging punch (d) Scheme 2, final forging punch
(e) Scheme 1, pre-forging die (f) Scheme 1, final forging die (g) Scheme 2, pre-forging die (h) Scheme 2, final forging die

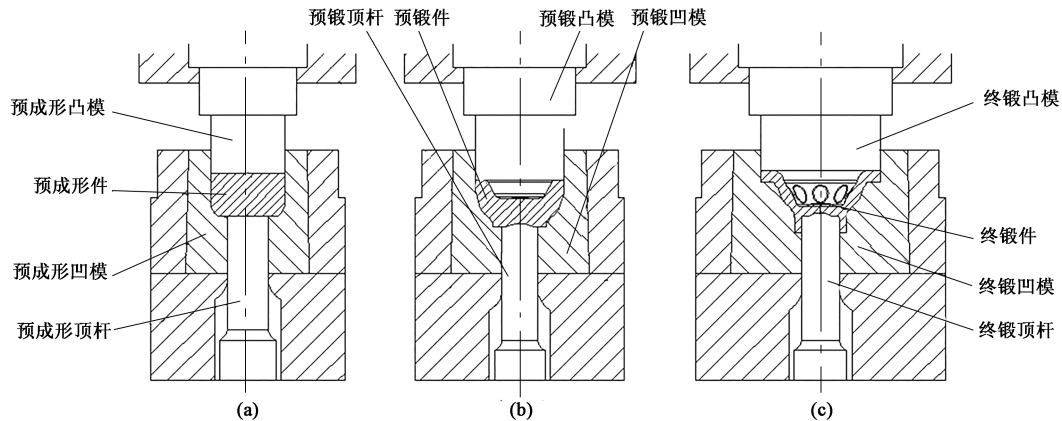


图 11 法兰盘零件 3 工位热模锻模具结构示意图

(a) 预成形 (b) 预锻 (c) 终锻

Fig. 11 Schematic diagrams of die structure for three-station hot die forging of flange part

(a) Pre-forming (b) Pre-forging (c) Final forging



图 12 法兰盘零件锻造试验结果

(a) 各工位锻件 (b) 法兰盘零件产品

Fig. 12 Forging test results of flange part

(a) Forgings at each station (b) Products of flange part

模具磨损情况,从而确定了优化方案。

(3) 根据优化方案进行了法兰盘零件的热模锻试验,并得到了符合预期的法兰盘零件,验证了研发工艺的可靠性。采用该工艺能有效解决目前面临的效率低、材料利用率低、生产成本低、产品使用性能差的生产问题。

参考文献:

- [1] 葛金喜,郭鹏鹏,乔福存. 浅谈国内汽车零部件质量管控[J]. 汽车零部件, 2021, (6): 117-118.
Ge J X, Guo P K, Qiao F C. Discussion on quality control of domestic auto parts [J]. Automobile Parts, 2021, (6): 117-118.
- [2] 李建明. 对汽车零部件制造质量控制与优化的思考[J]. 汽车实用技术, 2021, 46 (3): 159-160, 172.
Li J M. Thoughts on quality control and optimization of automobile parts manufacturing [J]. Automobile Applied Technology, 2021, 46 (3): 159-160, 172.
- [3] 杨小冬,周文龙,马文龙. 铝合金传动箱体铸造缺陷分析及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (12): 1566-1569.
Yang X D, Zhou W L, Ma W L. Casting defect analysis and process optimization of aluminum alloy transmission box [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42 (12): 1566-1569.
- [4] 徐伟,万铁,沙鑫美. 模具加载方式对传动用螺旋伞齿轮闭式锻造工艺的影响[J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 75-80.
Xu W, Wan Y, Sha X M. Influence of mold loading mode on closed forging process for transmission spiral bevel gear [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 75-80.
- [5] 万铁,陈林. 汽车盘体零件小飞边模锻成形工艺开发及数值分析[J]. 材料科学与工艺, 2022, 30 (3): 44-50.
Wan Y, Chen L. Development and numerical analysis of small flash die forging process for automobile disc part [J]. Materials Science and Technology, 2022, 30 (3): 44-50.
- [6] 闫中原,张晓波,徐洪磊,等齿套闭式锻造成形研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14 (2): 33-38.
Yan Z Y, Zhang X B, Xu H L, et al. Closed die forging forming of the truncated tooth sleeve [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (2): 33-38.

(下转第 48 页)