

基于 FEA 的齿坯锻造模具寿命的提高

张 浩¹, 郭 磊²

(1. 中山市技师学院 机械系, 广东 中山 528400; 2. 电子科技大学 中山学院, 广东 中山 528400)

摘要: 为了节省耗材、减少工序、提高产品的精度和性能, 齿坯的制造方式正逐渐由开式锻造转变为闭式锻造, 但闭式锻造通常需要更大的成形力, 易引起模具开裂、加剧模具磨损。针对该问题, 对某齿坯的两种闭式锻造结构进行了分析, 确定了合适的锻模结构, 解决了模具开裂的问题, 模具寿命从 2600 件提升至 4120 件。在此基础上, 采用有限元分析 (FEA) 和正交试验相结合的方法, 获得了不同组合的坯料加热温度、模具预热温度、上模底角、上模圆角等工艺参数对上模单次磨损深度的影响, 并以降低上模单次磨损为最终目的, 通过极差分析法确定了各参数的最优水平值。而后采用最优参数, 以累计磨损方式连续进行 24 次锻造模拟, 并拟合获得了上模总磨损深度与锻造次数的函数模型, 依此推测出上模寿命。工艺参数改进后, 模具寿命从 4120 件提升至 7860 件。

关键词: 闭式锻造; 模具开裂; 模具磨损; 模具寿命; 锻造次数

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.035

中图分类号: TG315.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 10-0250-07

Improvement of service life for gear blank forging die based on FEA

Zhang Hao¹, Guo Lei²

(1. Department of Mechanics, Zhongshan Technical Institute, Zhongshan 528400, China;

2. Zhongshan Institute, University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan 528400, China)

Abstract: In order to save consumables, reduce processes and improve accuracy and performance of product, the manufacturing method of gear blank is gradually changing from open forging to closed forging, but the closed forging usually requires greater forming force, which is easy to cause die cracking and aggravate die wear. Therefore, aiming at this problem, two kinds of closed forging structures of gear was increased were analyzed, and the appropriate forging die structure was determined to solve the problem of die cracking and the die life from 2600 pieces to 4120 pieces. On this basis, using the method of combining finite element analysis (FEA) and orthogonal test, the influences of different combinations of blank heating temperature, die preheating temperature, upper die bottom angle and upper die fillet on the single wear depth of the upper die were obtained, and with the ultimate goal of reducing the single wear of the upper die, the optimal level of each parameter was determined by the range analysis method. Then, the optimal parameters were used to simulate twenty-four times of forging in the form of cumulative wear, the functional model of the total wear depth of the upper die and the number of forging was obtained by fitting, and the service life of the upper die was inferred. Thus, after the process parameters were improved, the service life of die was increased from 4120 pieces to 7860 pieces.

Key words: closed forging; die cracking; die wear; die life; forging times

齿轮最常用的生产方式有两种: (1) 直接精锻成形 (包括齿部); (2) 先锻造成形齿坯, 再通过切削加工成形齿部^[1-2]。虽然前者的材料利用率更高、生产更便捷, 但是由于锻件精度受限, 仅适合

小批量生产, 因此对于后者的应用更广泛。齿坯以往更多的是采用开式锻造, 其优势在于: 模具壁厚大, 不易造成模具开裂; 坯料体积充裕, 能确保锻件各个角落的填充; 飞边的存在能起到对模具的缓冲作用^[3], 能延长模具的使用寿命等。但开式模锻的材料损耗较大, 成本约占 65%, 因此, 随着模具制造工艺和材料性能的提高, 生产方式逐渐转变为材料利用率更高、锻件性能更好的闭式锻造^[4-6]。而闭式锻造需要依靠封闭模腔来封住坯料阻止外流, 在最后阶段会造成模具升温较快, 加速模具的磨损,

收稿日期: 2021-09-26; 修订日期: 2021-12-23

作者简介: 张 浩 (1985-), 男, 硕士, 高级讲师

E-mail: zhanghao198508@163.com

通信作者: 郭 磊 (1978-), 男, 博士, 教授

E-mail: 13824760975@139.com

或引起模具壁较薄的部位受力过大而开裂, 因此, 与开式锻造相比, 模具寿命相对较短。经查询文献可知, 关于如何提高齿坯闭式锻模寿命方面的研究工作较少, 因此, 本文以某种齿坯为研究对象, 通过对闭式锻造模具结构的合理设计, 避免模具开裂问题, 同时, 采用有限元分析 (Finite Element Analysis, FEA) 和正交试验设计等方法, 对闭式锻造工艺参数进行优化, 以降低模具磨损。

1 齿坯锻造工艺介绍及建模

1.1 工艺分析

图 1 为本文研究的齿坯锻件示意图, 最大外径为 $\Phi 170$ mm, 厚度为 80 mm, 材料为 5140 合金钢。原工艺通过开式锻造成形, 但零件精度较差, 材料损耗大, 对工人的技术要求较高, 因此, 现在更倾

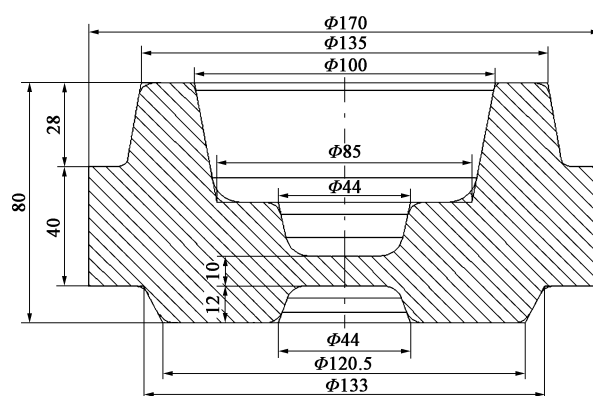


图 1 齿坯锻件图

Fig. 1 Forgings drawing of gear blank

向于采用闭式锻造工艺, 齿坯的具体成形流程为: 下料 (坯料尺寸为 $\Phi 90$ mm \times 187 mm) \rightarrow 加热 \rightarrow 镦粗 (镦至 $\Phi 170$ mm) \rightarrow 闭式温锻 \rightarrow 机加工。针对该齿坯设计的两种闭式锻造结构如图 2 所示。

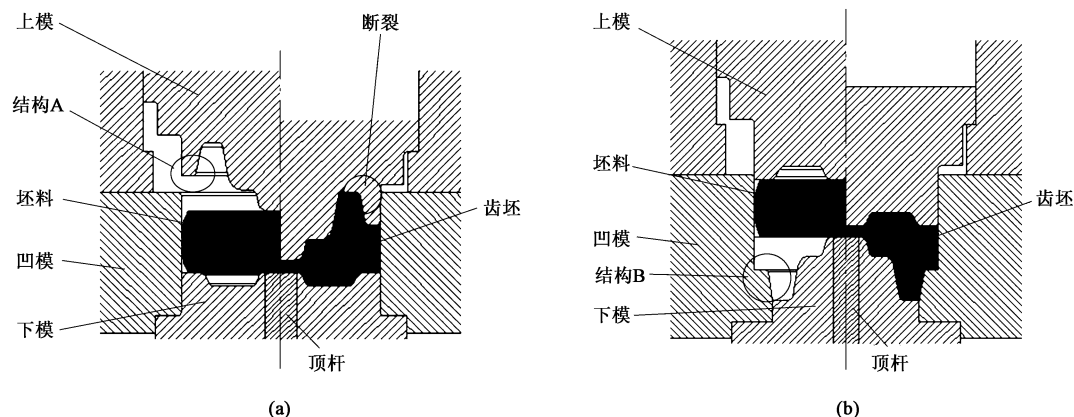


图 2 齿坯的闭式锻造结构

(a) 结构形式 1 (b) 结构形式 2

Fig. 2 Closed forging structures of gear blank

(a) Structure form 1 (b) Structure form 2

采用结构形式 1 时, 由于图 2a 中上模结构 A (图 2a 中圆圈部位) 的壁厚较薄, 且高度较大, 因此, 成形后期促进齿坯成形时需要承受非常大的载荷, 经长时间锻造后, 容易导致结构 A 根部圆角处出现开裂, 最终断裂失效。经实践表明, 采用该形式的模具寿命在 2600 件左右。

结构形式 2 为改进后结构, 与结构形式 1 相比, 坯料结构、尺寸完全相同, 而成形锻件翻转了 180° , 并且原壁厚较薄的结构 A 与凹模设计成一体, 用以加强强度, 如图 2b 中结构 B 所示。采用该种形式后, 原开裂情况完全解决, 模具寿命显著提高, 但由于上模受到的冲击力较大, 在经历 4120 次左右锻造后, 上模因过度磨损比下模先失效。经

生产实践表明, 下模寿命约为上模寿命的 1.46 倍, 上、下模寿命的差距过大, 若分时段更换会影响生产效率, 而集体替换会造成浪费, 同时也会增加齿坯的不合格率。因此, 本文拟选取相关重要参数进行改进, 以降低上模磨损、提高上模寿命, 并采用 Deform-3D 平台协助分析^[7-8]。

1.2 磨损模型建立及初始分析验证

在塑性成形中, 由 Archard J F 教授提出的粘着磨损模型可以非常有效地模拟模具的磨损历程^[9-11], 其数学表达式如式 (1) 所示:

$$W = \int K \frac{P \cdot v}{H} dt \quad (1)$$

式中: W 为模具的磨损深度; K 为粘着磨损系数;

P 为表面接触压力; v 为变形速度; H 为模具硬度; t 为变形时间。

从式 (1) 中可以看出, K 和 H 为常量, 在整个过程中是恒定的, 而本文研究的是齿坯的温锻模具磨损, 变形过程中热效应显著, 会引起 K 和 H 的变化, 若仍采用式 (1) 模型, 必然会导致误差较大, 结果不准确。因此, 本文采用 Lee R S 等^[12] 修正后的模型, 其数学表达式如式 (2) 所示, 其中 $K(T)$ 和 $H(T)$ 为变量, 随温度 T 的变化关系可具体表示为:

$$W = \int K(T) \frac{P \cdot v}{H(T)} dt \quad (2)$$

本文选取的模具材料的为 4Cr5MoSiV1 热作模具

钢, 热处理工艺为: 通过盐浴炉加热淬火, 在 550~600 ℃ 和 800~850 ℃ 温度下进行两次预热, 后升温至 1020~1050 ℃, 保温 50 min 后进行油淬; 回火在空气炉中进行, 温度为 560~600 ℃, 保温时间 2 h, 采用两次回火, 第 2 次回火温度较第 1 次低 20 ℃, 回火结束后空冷至室温。初始硬度为 47 HRC。

图 3 为结构形式 2 在工艺改进前上、下模一次锻造后的磨损深度模拟结果, 上模圆角处的磨损深度最大, 达到 2.520×10^{-5} mm, 下模同样也是两个过渡圆角处的磨损深度最大, 为 1.740×10^{-5} mm。简单计算可知, 上模磨损深度大概为下模磨损深度的 1.45 倍, 其结果与实际模具寿命基本相同, 因此, 可初步确认该磨损模型是有效的。

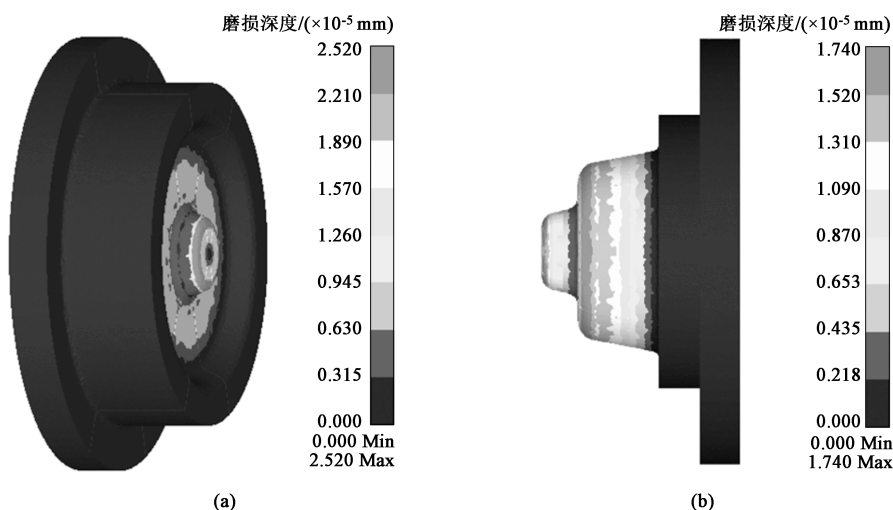


图 3 改进前模具磨损深度模拟结果

(a) 上模 (b) 下模

Fig. 3 Simulation results of die wear depth before improvement

(a) Upper die (b) Lower die

2 正交试验设计与优化

2.1 重要参数选取

从式 (2) 可知, 模具磨损主要受 $K(T)$ 、 $H(T)$ 、 P 以及 v 的影响, 而 $K(T)$ 、 $H(T)$ 、 P 以及 v 均与温度相关, 同时 P 和 v 也受模具结构的影响, 因此, 本文考虑从温度及上模结构方面进行优化。由图 3a 可知, 上模中间凸台的磨损较为严重, 故改进相关参数以改善金属流动, 最终选定的重要参数为坯料加热温度 T_1 、模具预热温度 T_2 、上模底角 α 以及上模圆角半径 R (图 4)。虽然上模底角和圆角半径的变化会引起上模结构的变化, 从而改变最终成形齿坯的尺寸, 但尺寸变化的部位出现在齿坯中间连皮部位, 后

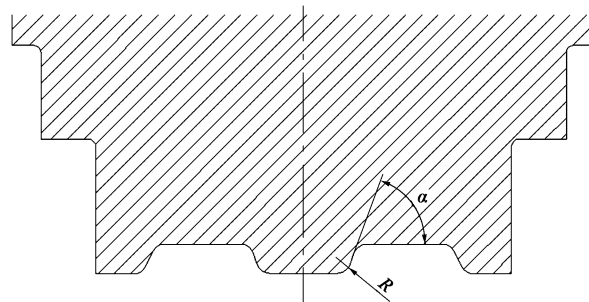


图 4 上模结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of upper die structure

续需要切除成形通孔, 因此并不影响齿轮的最终尺寸。

2.2 正交试验方案设计及优化

正交试验是通过正交表选取具有代表性的方案

进行研究的一种方法^[13]，在处理多因素优化问题时，试验少，效率高，结果参考性强。经 Minitab 软件建立了 $L_{16}(4 \text{ 因素 } 4 \text{ 水平})$ 正交表，如表 1 所示。利用 Deform-3D 软件对设计的 16 组方案依次进行模拟，获取了上模的磨损深度结果，由表 2 所示，并通过极差分析法来确定各参数的最优水平值。

表 1 正交试验因素水平表
Table 1 Factors and levels of orghogonal test

水平	因素			
	坯料加热温度	模具预热温度	上模底角	上模圆角半径
	$T_1/^{\circ}\text{C}$	$T_2/^{\circ}\text{C}$	$\alpha/(^{\circ})$	R/mm
1	800	200	60	4
2	875	250	65	6
3	950	300	70	8
4	1025	350	75	10

表 2 正交试验方案及上模磨损深度结果
Table 2 Schemes of orthogonal test and results of upper die wear depth

方案	坯料加热温度 $T_1/^{\circ}\text{C}$	模具预热温度 $T_2/^{\circ}\text{C}$	上模底角 $\alpha/(^{\circ})$	上模圆角半径 R/mm	上模磨损深度 $W/(\times 10^{-5} \text{ mm})$
1	800	200	60	4	2.47
2	800	250	65	6	2.29
3	800	300	70	8	2.11
4	800	350	75	10	2.86
5	875	200	65	8	1.78
6	875	250	60	10	1.96
7	875	300	75	4	1.29
8	875	350	70	6	1.34
9	950	200	70	10	1.99
10	950	250	75	8	2.62
11	950	300	60	6	2.07
12	950	350	65	4	2.71
13	1025	200	75	6	2.36
14	1025	250	70	4	1.84
15	1025	300	65	10	2.05
16	1025	350	60	8	2.21

极差计算公式如式 (3) 所示，依次计算后得到的结果如表 3 所示。

$$\begin{cases} S_{ij} = \sum_{i=1}^n W_{ij} \\ K_{ij} = \frac{1}{n} S_{ij} \\ R_i = \text{Max}K_{ij} - \text{Min}K_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

式中： S_{ij} 为第 i 个因素的第 j 个水平下的上模磨损深度总和； W_{ij} 为第 i 个因素的第 j 个水平下的上模磨损深度试验结果； K_{ij} 为 S_{ij} 的均值； R_i 为第 i 个因素的极差值；因素 $i=1, \dots, n$ ，本文选取了 4 个因素，即 $n=4$ ，分别对应 T_1 、 T_2 、 α 和 R ； $j=1, \dots, 4$ ，分别对应各因素的水平。

表 3 极差计算结果
Table 3 Range calculation results

因素	坯料加热温度 $T_1/^{\circ}\text{C}$	模具预热温度 $T_2/^{\circ}\text{C}$	上模底角 $\alpha/(^{\circ})$	上模圆角半径 R/mm
K_{i1}	2.432	2.150	2.178	2.078
K_{i2}	1.593	2.178	2.208	2.015
K_{i3}	2.348	1.880	1.820	2.180
K_{i4}	2.115	2.280	2.283	2.215
R_i	0.839	0.400	0.463	0.200
最优水平	第 2 水平	第 3 水平	第 3 水平	第 2 水平

表 3 中，极差值大小顺序为： $R_1 > R_3 > R_2 > R_4$ ，表明各因素对上模磨损深度的影响排序为： $T_1 > \alpha > T_2 > R$ ；而通过 K_{ij} 值的大小可确定各因素的最优水平，各列中 K_{12} 、 K_{23} 、 K_{33} 、 K_{42} 的数值最小，表示该因素相应水平下的上模磨损深度最小。因此，可确定最优水平组合为： T_1 为 875°C ， T_2 为 300°C ， α 为 70° ， R 为 6 mm 。

3 模拟验证

为验证所获最优工艺参数的正确性，采用 Deform-3D 软件对锻造模具的磨损进行数值分析，并同图 3 中改进前模拟结果和表 1 中上模磨损深度数据进行对比。改进后的上、下模一次锻造后的模具磨损深度如图 5 所示。与图 3 相比，上、下模磨损严重的部位并未发生变化，上模磨损最大的部位为上模圆角处，下模磨损最大的部位为上、下端面的两个过渡圆角处，但磨损严重区域的大小明显缩小。同时，改进后上模最大磨损深度为 $1.240 \times 10^{-5} \text{ mm}$ ，下模最大磨损深度为 $1.180 \times 10^{-5} \text{ mm}$ ，上模磨损深度小于表 1 中所示的最小数据，说明了以上优化过程的正确性。与图 3 相比，上模磨损深度降低了 50.8%，下模磨损深度降低了 32.2%，改进后上、下模的磨损情况较为接近，在实际生产中更接近模具的集体更换理念，换模时间以寿命较短的上模为准。虽然本文重点对上模进行优化，但锻造过程中由于材料流动得到了改善，使得下模磨损同样得到了一定的改善。

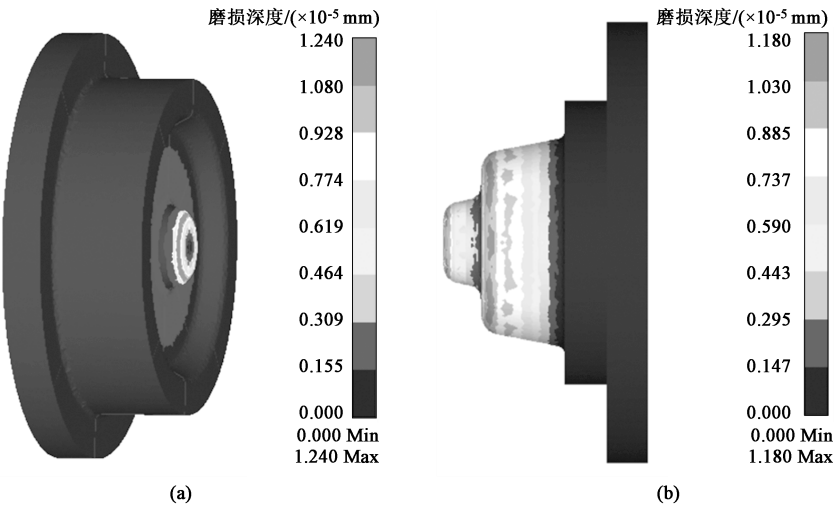


图 5 改进后模具磨损深度模拟结果

(a) 上模 (b) 下模

Fig. 5 Simulation results of die wear depth after improvement

(a) Upper die (b) Lower die

4 模具寿命预测及试模结果

实际生产中为了达到模具使用的最大化，需要对模具的寿命进行预判，以指导换模时间，本文采用精度更高的累计磨损方式进行预测^[14]。顾名思义，即将每一次锻造后模具的磨损情况作为下一次锻造的初始条件，依此循环，连续进行24次锻造模

拟，记录各次上模磨损数据，统计结果见表 4。从表 4 中可以看出，由于每次锻造环境存在一定的偶然性，并不完全相同，因此，使得上模单次磨损深度并不是每次均呈现稳定增长趋势，也会出现单次磨损深度减小的情况，但上模的总磨损深度还是不断增加的。利用 Origin 函数绘图软件对表 4 中 24 组数据进行多项式拟合，拟合结果如图 6 所示，同时获得的上模磨损与锻造次数的数学方程如式（4）所示。

表 4 上模磨损结果 (×10⁻⁵ mm)

Table 4 Upper die wear result (×10⁻⁵ mm)

锻造次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
上模单次磨损深度	1.24	1.22	1.31	1.33	1.25	1.21	1.29	1.36	1.34	1.22	1.30	1.27
上模累积磨损深度	1.24	2.46	3.77	5.10	6.35	7.56	8.85	10.21	11.55	12.77	14.07	15.34
锻造次数	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
上模单次磨损深度	1.25	1.36	1.33	1.24	1.29	1.38	1.34	1.27	1.41	1.32	1.37	1.31
上模累积磨损深度	16.59	17.95	19.28	20.52	21.81	23.19	24.53	25.80	27.21	28.53	29.90	31.21

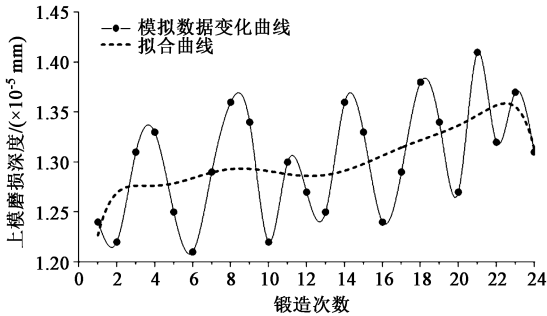


图 6 上模磨损深度随锻造次数的变化曲线图

Fig. 6 Variation curve diagram of upper die wear depth with forging times

$$W(\lambda) = -2.67 \times 10^{-9} \lambda^8 + 2.69 \times 10^{-7} \lambda^7 - 1.12 \times 10^{-5} \lambda^6 + 2.49 \times 10^{-4} \lambda^5 - 0.003 \lambda^4 + 0.024 \lambda^3 - 0.101 \lambda^2 + 0.219 \lambda + 1.088 \quad (4)$$

式中： $W(\lambda)$ 为锻造 λ 次后上模的磨损深度； λ 为锻造的次数， $\lambda \leq 24$ 。

通过表 3 统计可知，当上模经过 24 次锻造后，累计磨损达到 31.21×10^{-5} mm，因此，通过式（5）可预测出 Q 次锻造后上模的总磨损量 W^* 为：

$$W^* = \frac{Q}{24} \sum_{\lambda=1}^{24} W(\lambda) \quad (5)$$

换言之,同样可以根据上模的许用磨损来预测上模寿命。实际生产中,当模具磨损深度达到 0.1 mm 后,锻造获得的齿坯尺寸超差率明显上升,因此,上模的累计磨损深度不得高于 0.1 mm,根据式(5)可计算得 $Q \leq 7689$,即上模的使用寿命为 7689 次。生产中,在经过 7600 次锻造后,技术人员可对模具进行检查,考虑换模。最终通过实际生产数据可知,改进后的上模模具寿命为 7860 次,与工艺改进前的 4120 次相比,模

具寿命提高了 90.8%。模型预测精度为 2.22%,精度较高,表明上述研究是一种有效的模具寿命寻优和寿命预测方法。

图 7a 为改进前闭式锻造结构的上模实物图,长期锻造后,根部圆角处出现开裂而失效,寿命较短,为 2600 件左右。图 7b 为改进后闭式锻造结构的上、下模具实物图,锻造磨损试验结果如图 7c 所示,最终上模因圆角处过度磨损而先于下模失效,模具寿命为 7860 件。从图 7 中可以看出,上模磨损严重部位均出现在上模圆角处,下模磨损严重部位均出现在上、下端面的两个过渡圆角处,与仿真结果一致。

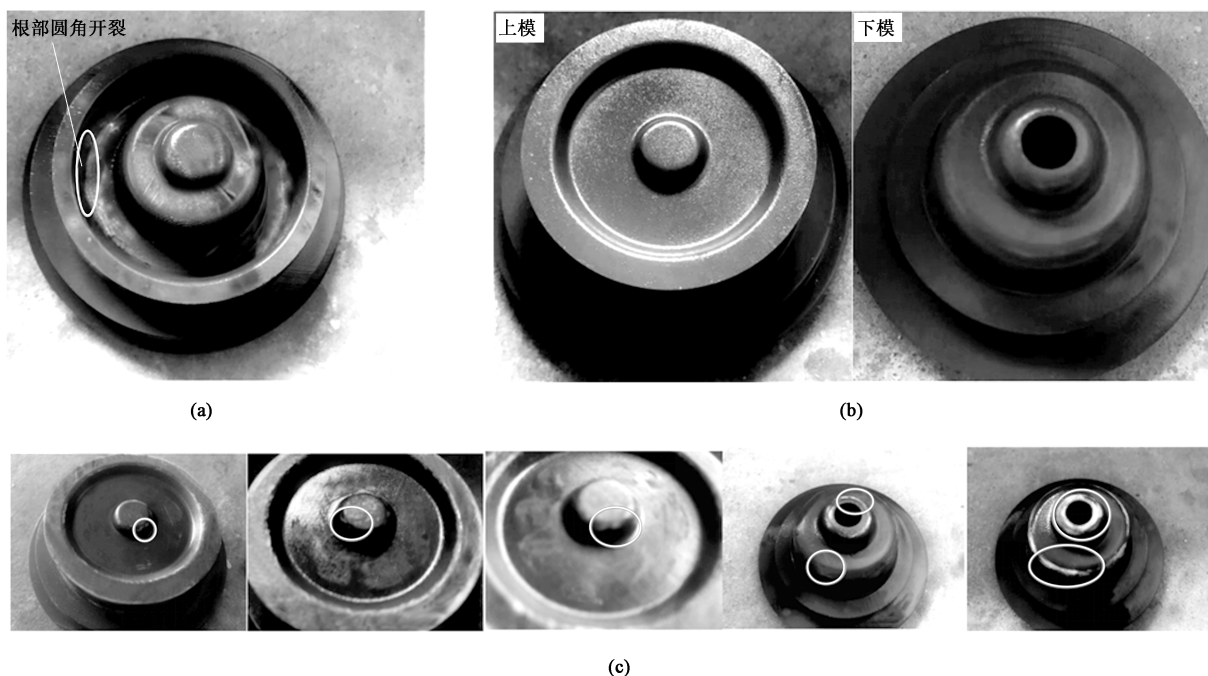


图 7 模具实物图

(a) 改进前的上模结构 (b) 改进后的上、下模结构 (c) 改进后的上、下模锻造磨损结果

Fig. 7 Physical drawings of die

(a) Structure of upper die before improvement (b) Structure of upper and lower dies after improvement

(c) Forging wear results of upper and lower dies after improvement

5 结论

(1) 对齿坯的闭式锻造结构进行了分析,确定了更合适的模具结构,避免了模具的开裂,模具结构改进后使模具寿命从 2600 件提高至 4120 件。

(2) 通过对 Archard 模具磨损模型进行分析,确定了影响上模磨损的重要参数,并通过 FEA 和正交试验法对参数进行了优化,得到最优参数为:坯料加热温度为 875 ℃、模具预热温度为 300 ℃、上

模底角为 70°、上模圆角半径为 6 mm。

(3) 对最优参数组合进行了模拟验证,并采用累计磨损方式对上模寿命进行了预测;通过 Origin 软件获得了磨损与锻造次数的多项式方程,最终计算得到上模的寿命为 7689 次,而实际生产数据为 7860 次,预测精度较高。工艺参数改进后使模具寿命从 4120 件提高至 7860 件。

参考文献:

- [1] 孙建辉,谢瑞,薛克敏,等.带轴齿轮坯闭式精锻成形数值模拟与实验研究[J].精密成形工程,2016,8(5):137-

- 141.
- Sun J H, Xie R, Xue K M, et al. Numerical simulation and experimental study on closed precision-forging for shaft gear billet [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8 (5): 137-141.
- [2] 张辉, 潘爱琼, 张莉. 某齿轮坯精锻模具的优化与数值模拟分析 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (19): 188-191.
- Zhang H, Pan A Q, Zhang L. Optimization and numerical simulation analysis of precision forging die for a gear billet [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (19): 188-191.
- [3] 夏巨谟, 王新云. 闭式模锻 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- Xia J C, Wang X Y. Closed Die Forging [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [4] 徐君燕, 卜建荣, 朱楠. 带肋板齿轮坯闭式热精锻成形工艺的数值模拟改进 [J]. 机械工程材料, 2017, 41 (3): 103-106.
- Xu J Y, Bu J R, Zhu N. Numerical simulation of closed hot precision forging process improvement for gear blank with ribbed plate [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41 (3): 103-106.
- [5] 李天兴, 张迅雷, 傅建中, 等. 轿车用齿坯精锻工艺参数与模具结构对金属流线的影响 [J]. 机械传动, 2015, 39 (10): 154-157, 175.
- Li T X, Zhang X L, Fu J Z, et al. Influence of the technological parameter and die structure on metal flow line for precision forging car gear blank [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39 (10): 154-157, 175.
- [6] 张辉. 档位齿轮坯精锻成形的数值模拟研究及工艺优化 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- Zhang H. Research and Optimization of the Precision Forging Process for Shifting Gear Blank by the Numerical Simulation Method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [7] 张东民, 盛育东, 周伟民, 等. SCM435 合金钢材浮动反挤压成形模拟及参数优化 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (11): 2698-2700.
- Zhang D M, Sheng Y D, Zhou W M, et al. Forming simulation and parameter optimization of floating back extrusion for SCM435 alloy steel wires [J]. Foundry Technology, 2017, 38 (11): 2698-2700.
- [8] 杨红超, 淳道勇, 和永岗, 等. GH4169 合金叶片挤杆工序模具磨损及寿命的数值模拟分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 198-207.
- Yang H C, Chun D Y, He Y G, et al. Numerical simulation analysis on wear and life of mold in bar extrusion process for GH4169 alloy blade [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 198-207.
- [9] 翟崇琳, 唐友亮, 徐青青, 等. 基于正交试验的汽车扭力臂热锻模具磨损分析及优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 185-189.
- Zhai C L, Tang Y L, Xu Q Q, et al. Wear analysis and optimization of hot forging mold for automobile torque arm based on orthogonal test [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 185-189.
- [10] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24 (8): 981-988.
- [11] 施渊吉, 黎军顽, 吴晓春, 等. 汽车法兰盘热锻模具磨损失效的实验分析和数值研究 [J]. 摩擦学学报, 2016, 36 (2): 215-225.
- Shi Y J, Li J W, Wu X C, et al. Experimental and numerical study on the wear failure of hot forging die of automobile flange [J]. Tribology, 2016, 36 (2): 215-225.
- [12] Lee R S, Jou J L. Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140 (1-3): 43-48.
- [13] 闫志勇, 赵颖, 马怀超, 等. 铝合金板材双杆连续挤压模具参数优化设计 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (6): 119-126.
- Yan Z Y, Zhao Y, Ma H C, et al. Optimization design of die parameters for aluminum alloy sheet during continuous extrusion with double billets [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (6): 119-126.
- [14] 齐双强. 活塞预锻模具磨损失效研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 21-26.
- Qi S Q. Research on wear failure for pre-forging die of piston [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 21-26.

