

基于 Archard 模型的曲轴模具磨损分析

李朝昆, 曾 琦, 刘庆生

(中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

摘要: 为了探究某型曲轴模具在生产过程中的磨损情况, 基于修正的 Archard 磨损模型, 采用 Deform-3D 软件模拟研究了该曲轴模具在热锻过程中磨损深度的分布和变化规律。在模具型腔中取 10 个特征点, 在模拟结束后得到每个点的磨损深度, 与实际情况基本吻合, 同时探究了不同预热温度、成形速度、润滑条件对制坯模具最大磨损深度的影响, 并对各点结果进行拟合得到拟合曲线。由模拟结果可知, 模具磨损深度最大处出现在 P1~P6 点附近, 且制坯工序的模具磨损深度大于预锻和终锻工序; 当模具预热温度为 250~300 °C、成形速度为 300 mm·s⁻¹、摩擦因数为 0.3 时, 模具的最大磨损深度最小。模拟结果可以为后续生产工艺优化以及预测和延长模具寿命提供参考。

关键词: Archard 模型; 模具磨损; 曲轴; 变形温度; 成形速度; 润滑条件

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.11.023

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 11-0167-07

Wear analysis on crankshaft mold based on Archard model

Li Chaokun, Zeng Qi, Liu Qingsheng

(Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd. CAM, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to explore the wear condition of a certain type of crankshaft mold in the production process, based on the modified Archard wear model, the distribution and change laws for wear depth for the crankshaft mold during the hot forging process were simulated and studied by software Deform-3D. Then, ten characteristic points were taken in the mold cavity, and the wear depth of each point after simulation was obtained, which was basically consistent with the actual situation. At the same time, the influences of different preheating temperatures, extrusion speeds and lubrication conditions on the maximum wear depth of blank-making mold were explored, and the results of each point were fit to obtain the fitting curve. The simulation results show that the maximum wear depth of mold occurs near points P1 to P6, and the mold wear depth in the blank-making process is greater than that in the pre-forging and final forging processes. When the mold preheating temperature is 250~300 °C, the forming speed is 300 mm·s⁻¹ and the friction coefficient is 0.3, the maximum wear depth of mold is the smallest. Thus, the simulation results can provide a reference for subsequent production process optimization, as well as the prediction and improvement of mold life.

Key words: Archard model; mold wear; crankshaft; deformation temperature; forming speed; lubrication conditions

热模锻作为一种金属成形工艺技术, 已经被大量应用于汽车制造业、机械行业的零部件生产之中, 在实际生产过程中, 锻压模具的稳定性和磨损情况与使用寿命对企业的生产效率和效益有着至关重要的影响。热模锻模具在实际生产过程中, 由于模具与坯料频繁接触, 需要承受较高的循环机械应力, 并且由于温度变化造成的冷热交变载荷, 其失效形式一般为磨损、断裂和塑性变形等, 其中超过

70%的模具失效是由磨损导致的^[1]。

对于模具磨损问题的研究, 国内外学者做了大量工作。刘琥珀等^[2]针对转向节预锻下模, 建立了 Archard 磨损模型, 利用 Deform 软件模拟了转向节下模磨损深度的变化规律, 研究了下模预热温度和上模成形速度对下模磨损深度的影响规律。张学奇和董万鹏^[3]利用 Archard 磨损模型探究了单座阀杆零件的 H13 钢锻造模具在不同模具硬度条件下, 模具寿命随着模具硬度的变化规律, 得到了锻件的等效应力、等效应变和模具磨损规律。杨晓俊等^[4]针对销轴温锻成形凹模磨损问题, 利用修正 Archard 磨损模型和 Deform 软件对成形过程进行了模拟, 从应力分布、成形载荷等多个方面对磨损进行了分析, 采用响应面法对成形过程中的关键工艺参数进行了

收稿日期: 2022-10-09; 修订日期: 2023-01-08

基金项目: 工业强基工程 (TC180A3Y1/18)

作者简介: 李朝昆 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: 444580543@qq.com

通信作者: 曾 琦 (1974-), 女, 博士, 研究员

E-mail: laxzengq@163.com

优化。刘洋等^[5]利用 Deform 建立了某汽车用吊耳零件的热锻造过程仿真模型,对热锻过程中坯料的流动状态、模具温度场、应力场以及磨损量进行了分析。Kang J H 等^[6]利用 Archard 磨损模型预测了刀具寿命,在考虑了模具的高温软化和操作时间对模具磨损的影响后,对 Archard 磨损模型进行了改进。Abachi S 等^[7]利用软件对闭式热模锻进行了模具磨损分析,通过将数值结果与磨损的实际测量结果进行比较,评估了模具表面不同点的磨损系数。

1 模具磨损机理及 Archard 磨损模型

模具的磨损形式主要包括磨料磨损、粘接磨损、冲击磨损和疲劳磨损。对于热锻模来说,最主要的磨损形式为磨料磨损,即由于硬质颗粒(氧化皮、金属碎屑、尘埃等)夹杂在坯料与模具的接触面之间,在载荷的反复作用下,刮擦模具零件表面导致表面材料脱落从而引起模具损伤。

Archard 理论是磨损理论中比较经典的一种理论模型,能够准确地模拟成形过程中的模具磨损,Archard 磨损理论进行求解时,有比较好的求解精度,并且可以分析与预测不同工艺参数下的模具磨损情况。其数学表达式为:

$$dw = K \frac{dp \cdot dl}{H} \quad (1)$$

式中: w 为模具磨损深度; p 为模具工作面与坯料接触的法向压力; l 为模具与坯料之间的相对滑移距离; H 为模具硬度; K 为磨损系数。

在热变形过程中,磨损系数 K 和模具硬度 H 与温度相关,Archard 磨损模型可修正为:

$$w(\theta) = \int K(\theta) \frac{p^a v^b}{H^c(\theta)} dt \quad (2)$$

式中: $w(\theta)$ 、 $K(\theta)$ 、 $H(\theta)$ 分别为磨损深度、磨损系数、模具硬度随温度变化的函数; θ 为模具温度; v 为坯料相对模具切向滑移速度; t 为时间; a 、 b 、 c 为常数。

2 研究对象及工艺参数

本次模拟对象为 534 型曲轴模具,零件如图 1 所示。零件的尺寸约为 560 mm×260 mm×150 mm,模具的尺寸约为 800 mm×360 mm×550 mm。其中曲轴材料为 45 钢,模具的材料为 4Cr5MoSiV1 钢(H13 钢)。

该曲轴的主要成形工序为:制坯、预锻、终锻和切边。模具的三维图形如图 2 所示。模拟的相关参数



图 1 曲轴零件图

Fig. 1 Part drawing of crankshaft

如下:坯料尺寸为 $\Phi 85 \text{ mm} \times 435 \text{ mm}$,坯料初始温度为 1150°C ;模具的预热温度为 250°C ,成形速度为 $280 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,环境温度设置为 20°C ;模具与坯料接触面换热系数设置为 $11 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$,模具与空气的换热系数设置为 $0.02 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$;坯料与模具的摩擦选择剪切摩擦,其摩擦因数选择热锻摩擦因数 0.3,Archard 磨损模型中的 a 、 b 、 c 参照文献^[8]分别取值为 1、1、2。

3 一次成形过程中曲轴模具的磨损分析

通过对曲轴模具的分析研究,基于 Archard 磨损模型,分析造成磨损的因素以及磨损严重的区域位置。

分别在制坯模、预锻模、终锻模上选取 10 个具有代表性的取样点,模具特征点如图 3 所示,制坯、预锻、终锻的特征点分别为:点 $P1 \sim P4$ 为模具上温度相对较高的点,点 $P5$ 、 $P6$ 为轴颈部分的桥部位置,点 $P7$ 、 $P8$ 为曲轴飞边的桥部位置,点 $P9$ 、 $P10$ 为型腔中轴颈部分的凸台位置。

在选取的这 10 个特征点之中,各特征点的磨损深度见表 1,各工序的磨损云图如图 4 所示。模拟结果表明,相较于曲轴的预锻和终锻工序,其制坯工序模具的磨损深度最大。原因为:(1)在制坯工序中要将一个圆柱形的棒料挤压变形为曲轴的形状,在成形过程中坯料在模具中发生剧烈流动,导致模具局部温度升高使模具发生软化现象,模具局部硬度降低,加剧模具表面摩擦;(2)随着变形过程的进行,变形越来越剧烈,模具表面接触压力越来越大,坯料与模具的相对滑移越大,造成磨损增加。而预锻和终锻两个工序相对于制坯来说材料流动没有那么剧烈,变形量较小,所以模具的磨损程度相对于制坯来说也较小。

从表 1 和图 4 中各个特征点的磨损深度可知,模具磨损最严重的地方发生在点 $P1$ 、 $P2$ 附近,因为这两点附近区域的模具温度在所取特征点中最高,根据 Archard 磨损模型,磨损深度与模具温度与模具与坯料之间的相对滑移距离有关。此外,点 $P3 \sim$

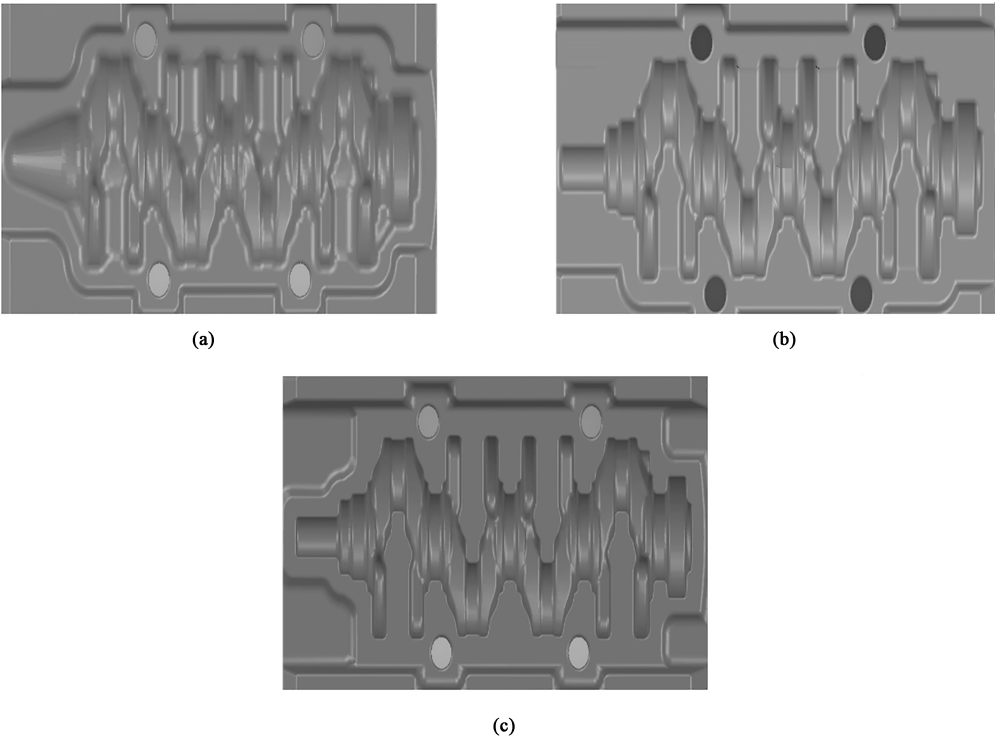


图 2 模具三维图
(a) 制坯模具 (b) 预锻模具 (c) 终锻模具

Fig. 2 3D drawings of molds
(a) Blank-making mold (b) Pre-forging mold (c) Final forging mold

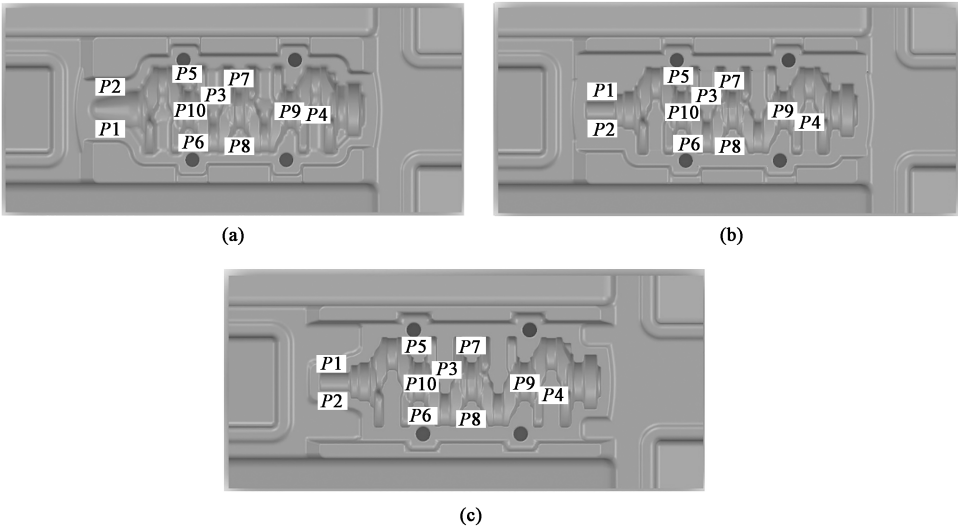


图 3 模具特征点
(a) 制坯模 (b) 预锻模 (c) 终锻模

Fig. 3 Feature points of molds
(a) Blank-making mold (b) Pre-forging mold (c) Final forging mold

P_6 也是模具发生磨损严重的区域，其中，点 P_3 、 P_4 附近区域由于模具温度相对点 P_1 、 P_2 稍低，则磨损情况稍好于点 P_1 、 P_2 ，点 P_5 、 P_6 为轴颈部分的桥部位置，与飞边槽接触的区域变形剧烈，模具与坯料之间的相对滑移速度较快，与模具之间的摩

擦也越频繁和剧烈，导致模具发生高温软化，硬度降低，从而导致模具磨损。

4 不同工艺参数对模具磨损的影响

模拟结果表明，相较曲轴的预锻和终锻工序，

表 1 各特征点的模具磨损深度 ($\times 10^{-4}$ mm)

特征点	工序		
	制坯	预锻	终锻
P1	0.919	0.663	0.112
P2	0.985	0.598	0.103
P3	0.590	0.236	0.151
P4	0.579	0.254	0.221
P5	1.130	0.302	0.051
P6	1.020	0.319	0.028
P7	0.270	0.229	0.030
P8	0.559	0.262	0.040
P9	0.055	0.015	0.010
P10	0.048	0.011	0.036

其制坯工序模具的磨损深度最大,现在重点研究制坯工艺中不同模具预热温度、成形速度、润滑条件对模具磨损造成的影响。

4.1 预热温度对模具磨损深度的影响

模具的磨损深度与模具的预热温度有一定的关系,通常热模锻模具在使用前需要在 200 ~ 400 ℃ 进行预热,选取模具磨损较为严重的区域 P1~P6,通过对不同温度参数下的成形过程进行分析,研究其对模具磨损的影响。

在坯料温度为 1150 ℃、上模运动速度为 $280\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、模具硬度为 55 HRC、摩擦因数为 0.3 的条件下,分别在模具预热温度为 200、250、300、350 和 400 ℃ 的条件下进行模拟,其磨损深度如表 2 所示。

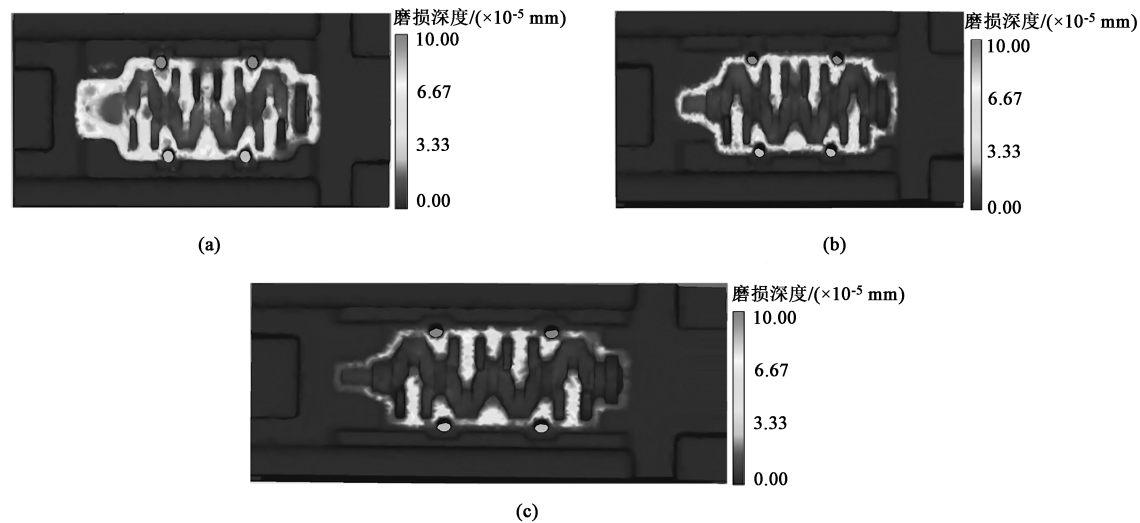


图 4 各工序的磨损深度分布云图
(a) 制坯 (b) 预锻 (c) 终锻

Fig. 4 Distribution cloud maps of wear depth for each process
(a) Blank-making (b) Pre-forging (c) Final forging

表 2 不同预热温度下模具的磨损深度 ($\times 10^{-4}$ mm)

特征点	预热温度/℃				
	200	250	300	350	400
P1	0.953	0.919	0.897	0.875	0.916
P2	1.032	0.985	0.921	0.972	1.053
P3	0.653	0.590	0.614	0.671	0.712
P4	0.645	0.579	0.551	0.612	0.653
P5	1.142	1.130	1.060	1.180	1.223
P6	1.146	1.120	0.960	0.993	1.110

对以上 6 组数据采用三次多项式进行拟合,得出模具预热温度对模具磨损深度的影响曲线如图 5 所示。

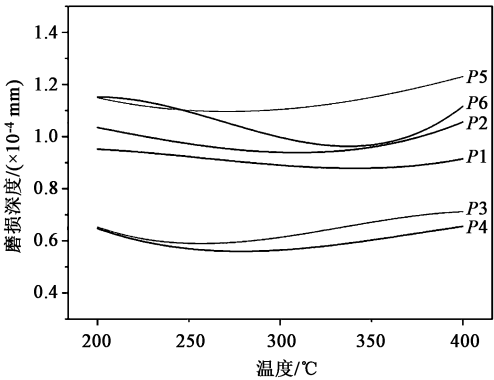


图 5 预热温度对磨损深度的影响

Fig. 5 Influence of pre-heating temperature on wear depth

从表 2 和图 5 中可以看出,随着模具预热温度的增加,模具的磨损深度呈现出先减小后增加的趋势。

势，当预热温度在 200~300 ℃ 之间时，随着模具预热温度的增加，模具各个特征点的磨损深度减小，在此温度区间，模具硬度随着温度的升高并无明显变化^[9]，而随着模具预热温度的增加，锻件的填充质量会得到提高，模具磨损深度下降。当预热温度超过 300 ℃ 后，随着模具预热温度的增大，模具磨损深度增大，当模具预热温度在 300~400 ℃ 时，预热温度较高，再加上变形过程中坯料与模具的接触和变形过程中产生的热量导致模具温度升高，从而导致模具硬度降低，发生高温软化现象，最终造成模具磨损深度急剧上升。

4.2 成形速度对模具磨损深度的影响

热模锻实际生产过程中，当成形速度较低时，模具与坯料接触时间增加；坯料材料流动速度减小从而导致成形困难，模具磨损增加；随着成形速度的增加，模具与坯料接触时间减小，坯料材料流动速度增大，模具充盈性较好，可以一定程度上减少模具的磨损。为了研究成形速度对模具磨损的影响，在坯料温度为 1150 ℃、模具硬度为 55 HRC、摩擦因数为 0.3 和模具预热温度为 250 ℃ 的条件下，分别在成形速度为 10、100、200、300、400 mm·s⁻¹ 的条件下进行成形模拟，成形后各特征点磨损深度如表 3 所示，分别对特征点和磨损数值点进行三次多项式拟合，拟合曲线如图 6 所示。

表 3 不同成形速度下模具的磨损深度 (×10⁻⁴ mm)

Table 3 Wear depth of mold under different forming speeds (×10⁻⁴ mm)

特征点	成形速度/(mm·s ⁻¹)				
	10	100	200	300	400
P1	0.955	0.824	0.803	0.922	0.993
P2	1.001	0.817	0.770	0.988	1.037
P3	0.493	0.458	0.428	0.512	0.602
P4	0.439	0.411	0.422	0.504	0.583
P5	1.410	1.042	0.942	1.125	1.260
P6	1.322	0.985	0.890	1.013	1.132

由表 3 和图 6 可知：随着成形速度的增加，模具的磨损深度呈现先减小后增大的趋势，在成形速度为 200 mm·s⁻¹ 左右时，模具的最大磨损深度最小，为 0.942×10⁻⁴ mm。在成形速度为 10~300 mm·s⁻¹ 时，随着成形速度的增大，模具与坯料接触时间变短，模具温升较小，模具高温软化现象得到改善^[10]；在成形速度为 10 mm·s⁻¹ 时，模具表面最高温度为 985 ℃ 左右，模具与坯料接触时

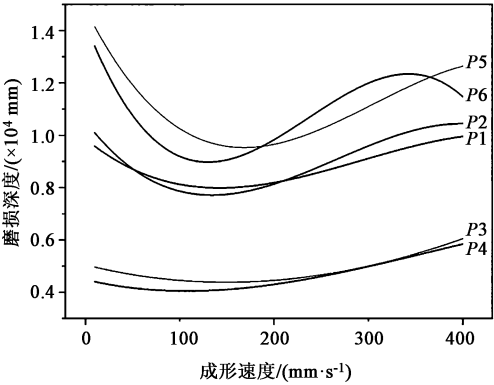


图 6 成形速度与磨损深度的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between forming speed and wear depth

间较长，由于模具与坯料之间的热传导时间较长，模具温度升高程度较大，高温软化现象严重，磨损深度加剧；在成形速度为 200 mm·s⁻¹ 左右时，模具表面最高温度仅为 540 ℃，模具与坯料接触时间缩短，热传导时间较短，模具高温软化现象得以改善，此时模具磨损深度最小；在成形速度超过 200 mm·s⁻¹ 时，虽然接触时间变短，但因为坯料与模具之间不断增大的相对流速，使得变形比较剧烈，加上材料受加工硬化影响难以成形^[11]，造成模具磨损进一步加剧。

4.3 润滑条件对模具磨损深度的影响

在实际生产过程中，良好的模具润滑条件可以极大地提高模具的寿命。为了探究不同润滑条件对模具磨损深度的影响，在坯料温度为 1150 ℃、上模运动速度为 280 mm·s⁻¹、模具硬度为 55 HRC、模具预热温度为 250 ℃ 的条件下，分别在摩擦因数为 0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 的条件下进行模拟，其模具表面温度以及模具磨损深度分别如表 4 和表 5 所示，对上述数据进行三次多项式拟合，拟合曲线如图 7 所示。

表 4 不同摩擦因数下各特征点模具的表面温度 (℃)

Table 4 Mold surface temperature at each feature point under different friction coefficients (℃)

特征点	摩擦因数				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
P1	453	476	483	535	559
P2	456	480	511	520	553
P3	441	452	469	518	547
P4	480	494	493	521	531
P5	443	458	465	485	506
P6	458	470	495	507	526

表 5 不同摩擦因数下各特征点模具的磨损深度 ($\times 10^{-4}$ mm)Table 5 Mold wear depth at each feature point under different friction coefficients ($\times 10^{-4}$ mm)

特征点	摩擦因数				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
P1	0.652	0.781	0.919	0.963	1.035
P2	0.683	0.802	0.985	1.075	1.157
P3	0.399	0.452	0.590	0.635	0.702
P4	0.385	0.436	0.579	0.624	0.693
P5	0.924	0.988	1.130	1.352	1.471
P6	0.816	0.897	1.020	1.132	1.351

从表 4、表 5 和图 7 中可以看出, 摩擦因数对模具表面温度具有一定的影响, 随着摩擦因数的升高, 模具表面温度变化呈现逐渐增大的过程, 在摩擦因数大于 0.3 时, 模具表面温度迅速升高, 在生产或加工的过程中, 模具表面润滑条件恶劣, 模具表面温度将迅速升高^[12], 模具材料将发生高温软化, 导致模具表面磨损深度迅速增大, 影响模具

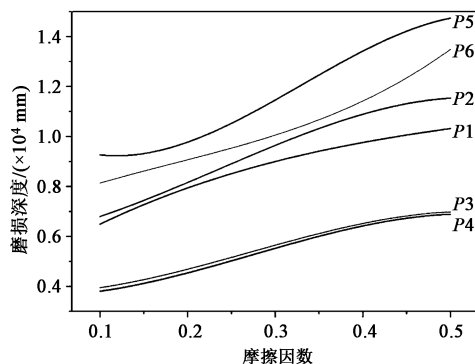


图 7 摩擦因数与磨损深度关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between friction coefficient and wear depth

的使用寿命。

5 现场验证

为了验证曲轴有限元模拟结果的准确性, 在热模锻压力机对曲轴进行了实际生产锻造, 锻造 6000 件前后模具的形貌如图 8 所示。

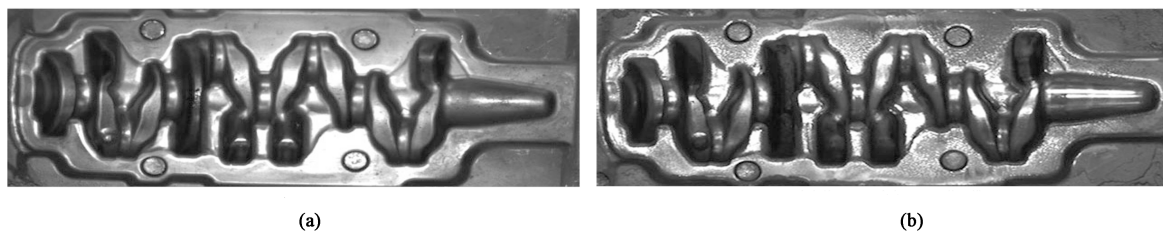


图 8 生产前 (a) 和生产后 (b) 终锻模具对比图

Fig. 8 Comparison diagrams of final forging molds before (a) and after (b) production

由图 8 可以看出, 生产 6000 件后的模具型腔表面有明显的磨损痕迹, 模具磨损最严重的地方发生在点 P1、P2 附近, 此外, 点 P3~P6 也是发生磨损严重的区域, 基本与模拟结果相当, 验证了模拟结果的正确性。

6 结论

(1) 在制坯、预锻、终锻 3 个工序中, 制坯工序的最大磨损深度为 1.13×10^{-4} mm, 大于预锻和终锻工序的模具最大磨损深度。在实际生产过程中应着重关注制坯模具的磨损情况, 及时进行模具的检查和维护。

(2) 在该曲轴成形过程中, 模具的磨损主要发生在轴颈部分的桥部位置和曲轴前轴端温度较高部位, 经过现场生产验证证明了模拟结果的正确性。

在后续生产设计的时候可以对这部分模具结构进行适当的优化以提高模具寿命。

(3) 根据对制坯工序的不同生产工艺的模拟, 模具磨损深度随着模具预热温度和成形速度的升高均呈现出先减小后增大的趋势, 随着摩擦因数的增大逐渐增加。

参考文献:

- [1] 赵中里, 薛勇杰, 吴大鸣, 等. 热锻模高温摩擦磨损探讨及对策 [J]. 模具工业, 2021, 47 (5): 1-5.
Zhao Z L, Xue Y J, Wu D M, et al. High temperature friction and wear behavior of hot forging die and its countermeasures [J]. Die & Mould Industry, 2021, 47 (5): 1-5.
- [2] 刘琥珀, 黄昌文, 吴玉国, 等. 转向节预锻下模热锻过程中的磨损研究 [J]. 安徽工业大学学报: 自然科学版, 2019, 36 (3): 244-249.
Liu H P, Huang C W, Wu Y G, et al. Research on wear of pre-forging lower die of steering knuckle during hot forging [J]. Jour-

- nal of Anhui University of Technology: Natural Science, 2019, 36 (3): 244-249.
- [3] 张学奇, 董万鹏. T 型回转件锻压模具寿命数值模拟分析 [J]. 上海工程技术大学学报, 2016, 30 (2): 101-105.
Zhang X Q, Dong W P. Die wear numerical analysis of T-section forgings [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2016, 30 (2): 101-105.
- [4] 杨晓俊, 朱兴龙. 基于修正 Archard 理论非标销轴温锻成形模具磨损研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 32-37.
Yang X J, Zhu X L. Study on wear of warm upsetting mold for non-standard pin shaft based on revised Archard wear theory [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 32-37.
- [5] 刘洋, 李峰光, 刘建永, 等. 基于 CAE 分析的热锻模具磨损部位预测及验证 [J]. 湖北汽车工业学院学报, 2021, 35 (2): 58-63, 69.
Liu Y, Li F G, Liu J Y, et al. Prediction and verification of hot forging die wear based on CAE analysis [J]. Journal of Hubei University of Automotive Technology, 2021, 35 (2): 58-63, 69.
- [6] Kang J H, Park I W, Jae J S, et al. A study on a die wear model considering thermal softening: (1) Construction of the wear model [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 96 (1-3): 53-58.
- [7] Abachi S, Akk  k M, Mustafa İlhan G  kler, et al. Wear analysis of hot forging dies [J]. Tribology International, 2010, 43 (1-2): 467-473.
- [8] 桂长林. Archard 的磨损设计计算模型及其应用方法 [J]. 润滑与密封, 1990, (1): 12-21.
Gui C L. The Archard design calculation model and its application methods [J]. Lubrication Engineering, 1990, (1): 12-21.
- [9] 姬金金, 周杰, 杨海, 等. 热模锻预热温度对材料成形及模具磨损的影响 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (3): 79-83.
Ji J J, Zhou J, Yang H, et al. Effect of preheating temperature of hot forging die on material forming and die wear [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (3): 79-83.
- [10] 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.
- [11] 舒鹤鹏. 基于 Deform 的汽车发动机曲轴模锻数值模拟及模具优化 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (3): 173-175.
Shu D P. Numerical simulation and die optimization of automotive engine crankshaft die forging based on Deform [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (3): 173-175.
- [12] 孙啸天, 周杰, 张光华. 发动机曲轴模锻优化及磨损影响因素研究 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (5): 117-119.
Sun X T, Zhou J, Zhang G H. Optimization on forging die of engine crankshaft and research on influence factors of wear [J]. Hot Working Technology, 2011, 40 (5): 117-119.

