

曲轴锻造模具 Archard 磨损模型系数修正及视觉验证

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: 热模锻模具在实际生产过程中由于受到交变应力的影响, 受力情况复杂且服役环境相当恶劣。基于 Archard 磨损模型, 通过典型曲轴锻造模具的有限元模拟结果与实际磨损量的对比, 计算出磨损模型的磨损系数 K 值, 从而获得适合曲轴热锻生产的修正 Archard 磨损模型; 通过修正后的 Archard 磨损模型预测模具寿命, 并基于机器视觉系统对模具的磨损失效进行判断。结果表明: K 的修正值为 1.425×10^{-7} , 与实际测量值的吻合度达 91.47%, 预测寿命为 6351 件, 与实际生产情况 6400 件相吻合; 对磨损失效模具进行了机器视觉判断, 验证了机器视觉技术在锻造模具磨损检测方向的可行性。

关键词: 曲轴; Archard 模型; 磨损系数; 模具磨损; 机器视觉; 寿命预测

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.026

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 01-0202-08

Coefficient correction and visual verification on Archard wear model for crankshaft forging die

Li Chaokun, Zeng Qi, Liu Qingsheng

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

Abstract: Due to the influence of alternating stress during the actual production process, hot forging mold has complex stress conditions and a very harsh service environment. Therefore, based on the Archard wear model, the wear coefficient K value of the wear model was calculated by comparing the finite element simulation result of a typical crankshaft forging die with the actual wear amount to obtain a modified Archard wear model suitable for the hot forging production of crankshaft. Then, the die life was predicted by the modified Archard wear model, and the wear and failure of the die were judged based on the machine vision system. The results show that the correction value of K is 1.425×10^{-7} , and the agreement with the actual measured value is 91.47%. The predicted life is 6351 pieces, which is consistent with the actual production condition of 6400 pieces. Machine vision judgment is performed on the wear and failure die to verify the feasibility of machine vision technology in forging die wear detection.

Key words: crankshaft; Archard model; wear coefficient; die wear; machine vision; life prediction

锻造模具在实际生产过程中往往要承受复杂的应力和载荷, 特别是热锻模具, 在生产过程中不仅需要承受巨大的机械载荷, 而且随着模具温度的变化, 还需要承受热应力和交变载荷。由于这些因素, 热锻模具的耐久性通常较差。据统计, 国产热锻模具的平均使用寿命仅为国外的 $1/3 \sim 1/5$, 远远不及国际先进水平^[1-4]。

曲轴作为汽车传动系统的核心零部件, 其主要的生产方法有铸造和锻造两种形式, 锻造曲轴由于其优秀的力学性能而被广泛应用于汽车工业中。热

模锻作为曲轴常用的加工方法, 模具状态的好坏对产品质量有重要影响。

对于模具磨损, 国内外学者展开了大量的研究。大部分对于模具磨损的研究均是基于 DEFORM-3D 软件进行的, 部分研究者针对磨损严重的区域, 通过正交实验法等方法进行工艺参数优化, 并进行实际验证, 取得了较好的效果; 部分研究者通过对锻件的形态特征进行测量, 逆向预测出模具的磨损状态, 取得了不错的效果; 部分研究者利用前沿的 BP 神经网络与有限元分析相结合的方式, 对生产工艺进行优化, 从而降低模具磨损^[5-7]。

1 模具磨损模型的建立

目前, 用于磨损的分析与预测模型主要分为两

收稿日期: 2023-06-21; 修订日期: 2023-09-14

作者简介: 李朝昆 (1996-), 男, 硕士

E-mail: 444580543@qq.com

通信作者: 曾 琦 (1974-), 女, 博士, 研究员

E-mail: laxzengq@163.com

种：Usui 模型和 Archard 模型，其中 Usui 模型适用于对金属切削加工这类连续加工过程进行分析和预测，Archard 磨损模型对不连续加工过程的分析与预测比较准确^[8-9]。

通常，采用 Archard 磨损模型对热锻过程中的模具磨损进行分析和预测，Archard 磨损模型公式如下：

$$W = K \frac{FL}{H}$$

(1)

式中： W 为总磨损深度； K 为磨损系数； F 为法向载荷； L 为相对滑动距离； H 为硬度。

在该模型中，模具总磨损深度 W 与法向载荷 F 、相对滑动距离 L 和磨损系数 K 呈正相关，与模具硬度 H 呈负相关。Archard 磨损模型在描述材料磨损量时仅需考量 K 、 F 、 L 、 H ，这奠定了磨损计算的重要基础。但 Archard 磨损模型同样存在缺陷：由于模具材料、生产工艺等多因素的影响，其磨损系数 K 值的确定比较困难，所以需要根据实际生产情况对 K 值进行修正以对生产状况做出精准预测。

2 模具磨损模型参数的修正及验证

2.1 模具磨损参数修正及验证流程

该曲轴的成形工艺主要为：制坯、预锻、终锻。为了简化计算，选取磨损状态最严重的制坯模具进行模型修正。主要分为以下流程：首先，使用 DEFORM-3D 进行模具磨损的模拟并进行数据处理，再通过三维扫描获取模具实际生产中的磨损量数据，然后将扫描结果与模拟结果进行比对，并修正磨损模型，最后通过机器视觉的方法加以验证，其流程图如图 1 所示。

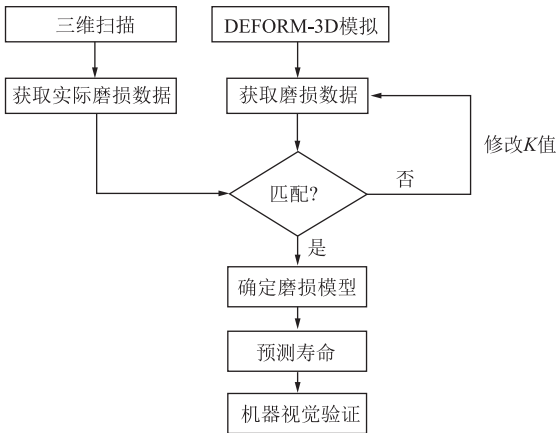


图 1 磨损模型修正及验证流程
Fig. 1 Correction and verification process of wear model

2.2 曲轴模具磨损分析

2.2.1 研究对象与建模

该曲轴锻件成形的具体工艺流程为：下料→中频加热→制坯→预锻→终锻→控温冷却，成形设备为 63000 kN 热模锻压力机。

将制坯模具的三维数模导入 DEFORM-3D 软件，建立三维模型，如图 2 所示。制坯模拟参数设置如表 1 所示。

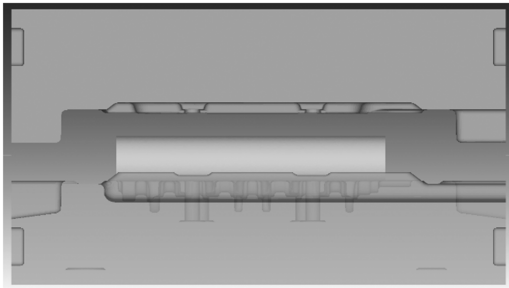


图 2 制坯三维模型
Fig. 2 Three-dimensional model of blanking

表 1 制坯模拟参数
Table 1 Simulation parameters of blanking

参数	数值
坯料尺寸/(mm×mm)	Φ85×435
坯料初始温度/℃	1150
模具预热温度/℃	250
成形速度/(mm·s ⁻¹)	280
环境温度/℃	20
摩擦因数	0.3

2.2.2 模拟结果分析

根据 2.2.1 节中的参数设置进行模拟，得到模具磨损深度云图如图 3 所示。由图 3 可知，在制坯工序中，模具磨损深度最大处出现在模具凸缘位置，为 1.132×10^{-4} mm。同时，在轴颈小端和大端处、模具凸台位置同样也出现了严重的磨损，说明制坯模具的磨损区域主要集中在模具表面，型腔内部的磨损深度较小，最大处仅为 0.331×10^{-4} mm。

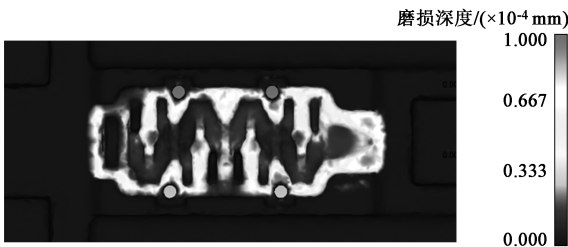


图 3 制坯工序磨损云图
Fig. 3 Wear cloud diagram of blanking process

分别在模具轴颈大小端处、模具凸台位置、模具凸缘位置取 14 个特征点,如图 4 所示,各点的磨损深度如表 2 所示。

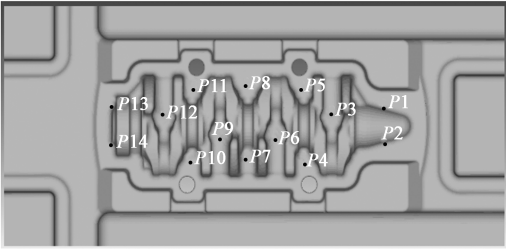


图 4 特征点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of feature points

表 2 各特征点的磨损深度 ($\times 10^{-4}$ mm)

Table 2 Wear depth of each feature points ($\times 10^{-4}$ mm)

特征点	磨损深度
P1	1.132
P2	0.513
P3	0.057
P4	0.511
P5	0.453
P6	0.065
P7	0.067
P8	0.013
P9	0.052
P10	0.132
P11	0.125
P12	0.072
P13	0.125
P14	0.181

2.2.3 实际采集数据

采用 ReadyScan 扫描仪对生产前后的制坯模具进行扫描,获取生产前后模具形态的实际数据。将扫描结果导入 Geomagic Qualify 软件中进行对比检测,并参照在 DEFORM 中所取的特征点点位,在软件中取相应的特征点点位。模具磨损的实际采集数据如图 5 所示。其中 D 为综合尺寸偏差, D_x 为 x 方向的尺寸偏差, D_y 为 y 方向的尺寸偏差, D_z 为 z 方向的尺寸偏差。

2.2.4 磨损模型的修正

在模拟计算中,磨损系数 K 参考 Rabinowicz E^[10-11] 的研究数据,取 1.5×10^{-7} ,根据表 2 和图 5 中的数据,将三维扫描获得的磨损数据与通过模拟计算得到的数据绘制为磨损曲线图,如图 6 所示。由图 6 可以看出,三维扫描实测数据曲线与模拟所得曲线的趋势大致相同,但是实测数据曲线与模拟曲线并不吻合,总的来看,模拟所得的磨损深度要比实测数据小,偏差最大处出现在特征点 P2 处,整体数据的平均偏差率为 32.57%,与实测值的差距较大。

为了使模拟结果更加接近于实测结果,需要将现有的 Archard 磨损模型进行参数修正。由第 1 章可知,在 Archard 磨损模型中的磨损系数 K 与磨损深度成正比关系,Archard 磨损模型可以写为:

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

式中: p 为正向载荷; v 为滑移速度; t 为时间; a 、 b 、 c 为标准常数。

磨损系数 K 可以表示为:

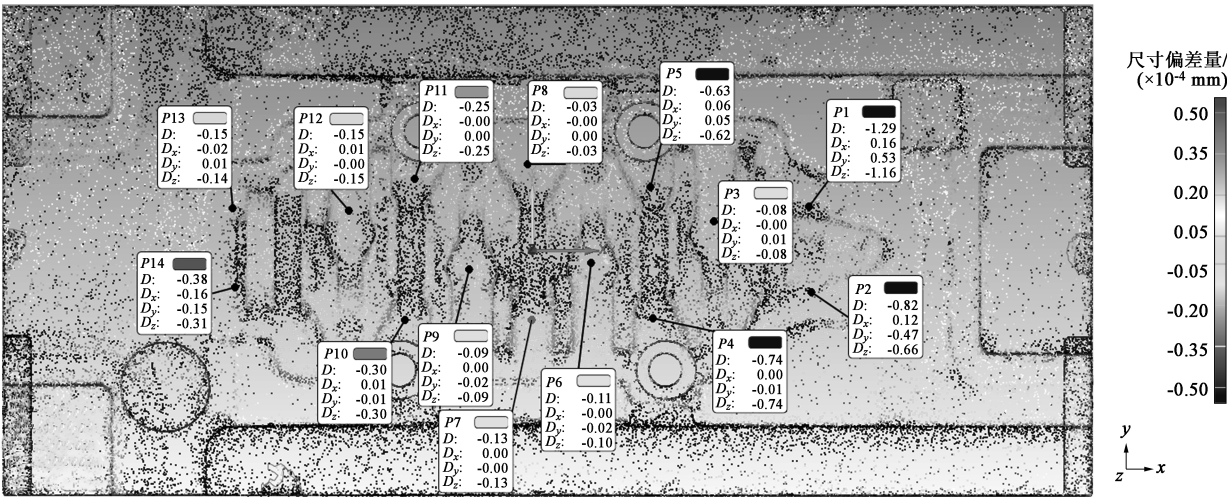


图 5 实际模具磨损结果

Fig. 5 Wear result of actual die

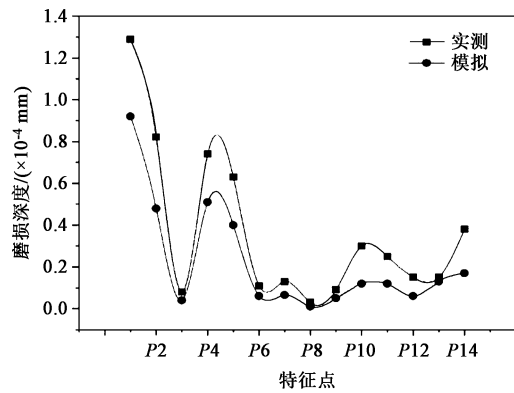


图 6 磨损对比曲线
Fig. 6 Comparative curves of wear

$$K = \frac{W}{\int \frac{p^a v^b}{H^c} dt} \quad (3)$$

磨损系数 K 可以通过式 (3) 进行反向求解，将实际测量所获得的模具各特征点的磨损深度值带入式 (3)，反推出磨损系数 K ，并对各特征点所求的磨损系数 K 求平均值，得到修正后的磨损系数 K ，即：

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{14} k_i}{14} \quad (4)$$

式中： k_i 为特征点 P_i 处的磨损系数。

得出模具磨损系数 K 的修正值为 1.425×10^{-7} 。

2.2.5 磨损模型的验证

为了验证修正模型的正确性，将 K 的修正值代入 Archard 磨损模型重新进行模具磨损模拟，磨损曲线图如图 7 所示。由图 7 可以看出，修正模型的模拟数据与实测数据的拟合程度较高，符合实际生产情况；其数据偏差最大点出现在特征点 P_{10} 处，偏差量为 23.35%，整体平均偏差量为 8.53%，与

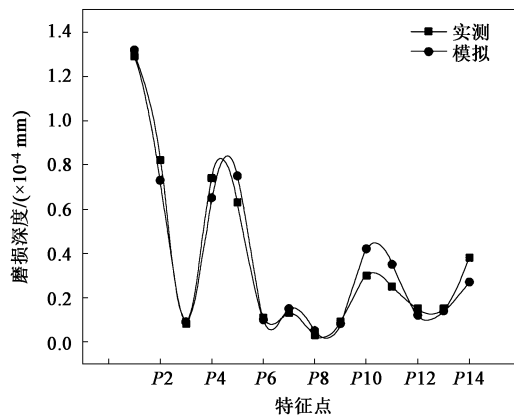


图 7 修正模型与实测磨损对比曲线
Fig. 7 Wear comparison curves of correction model and actual test

实际生产情况的吻合度较高。

在参数修正过程中发现，模拟数据与实测数据在特征点 P_{10} 处的数据偏差较大，经过现场实地探查后发现，这种情况主要由两个原因造成：(1) 在对模具进行三维扫描前，对模具型腔部分的清洁不够到位，模具表面附着的石墨和氧化皮对测量结果产生了影响；(2) 模具清洁完成后，对模具喷涂显影剂的过程中，由于喷涂的手法不够熟练，导致模具表面的喷涂不够均匀，模具部分型腔表面显像剂厚度不均匀，最终造成结果误差。

2.2.6 模具寿命预测

由表 2 可知，制坯模具磨损深度最大处出现在特征点 P_1 处，最大磨损深度为 1.132×10^{-4} mm，对于模具寿命的预测选取磨损深度最大的特征点 P_1 点进行研究。利用 DEFORM-3D 软件中的多工步模拟模块，将单次锻造的数据保存导入至下一工步中，反复进行模拟，得到第 1 次、第 5 次、第 10 次、第 15 次、第 20 次、第 25 次和第 30 次的单次磨损深度数据，如表 3 所示，其拟合曲线如图 8 所示。

表 3 不同锻造次数下的磨损深度 ($\times 10^{-4}$ mm)
Table 3 Wear depth under different forging times ($\times 10^{-4}$ mm)

锻造次数	磨损深度
1	1.130
5	1.143
10	1.175
15	1.1770
20	1.192
25	1.233
30	1.269

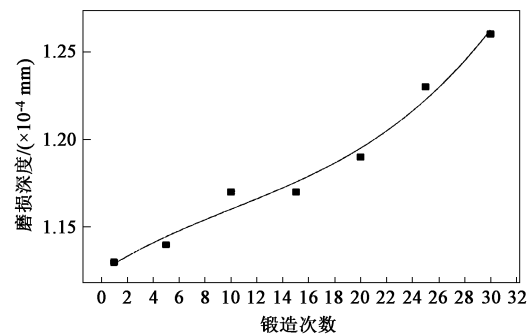


图 8 不同锻造次数下的磨损深度拟合曲线
Fig. 8 Fitting curve of wear depth under different forging times

得出曲线的拟合公式为：

$$w(j) = 0.56076 \times 10^{-6}j^3 - 1.71024 \times 10^{-4}j^2 + 4.72 \times 10^{-3}j + 1.12467 \tag{5}$$

式中： $w(j)$ 为锻造次数为 j 时的模具磨损深度， $j=1, 2, 3, \dots, 30$ 。

则共 n 次锻造后，特征点 $P1$ 处的磨损总深度 $\omega_{\text{总}}$ 可以通过式 (6) 得出：

$$\omega_{\text{总}} = \sum_{j=1}^n w(j) \tag{6}$$

对于此套模具，当磨损深度超过 0.8 mm 即视为模具失效，通过式 (6) 计算得到模具的寿命为 6351 件，通过现场实际跟踪观察，平均一套模具在经过 8 个班组的生产后会将模具拉出进行修模；每个班的平均产量为 800 件，8 个班组共计 6400 件左右，与实际使用情况吻合。

3 模具磨损失效的视觉验证

目前，模具的非接触式检测方法主要是通过三坐标扫描仪或者三维扫描仪进行检测，虽然三维扫描仪可以实现模具的精确测量，但是其检测方式复杂繁琐，需要在扫描区域粘贴标记点并在模具表面喷涂显影剂，无法做到快速对模具磨损情况作出判断。

机器视觉技术作为一种新兴的检测技术，在各个领域获得了广泛的应用。由于锻造行业的特殊性，目前机器视觉技术在锻造模具检测方面的应用较少。

3.1 机器视觉系统的组成及设备选型

机器视觉是利用工业相机代替人的眼睛进行检测的方法。机器视觉系统的检测流程为：通过工业相机采集图像，将图像传递至计算机，计算机通过图像处理软件将图像的像素信息进行数字化处理，通过不同的图像处理算法完成对目标的识别，最终根据识别结果控制执行机构进行下一步操作^[12]。机器视觉系统一般由工业相机、镜头、光源和图像处理软件这几部分构成。在搭建机器视觉系统的过程中，需要根据实际应用需求对硬件进行选择。基于成本和使用需求的考量，最终选择使用康耐视 CAM-CIC-5000R-14-G 工业相机、富士能 DF6HA-1S 镜头、康耐视 LED 条形光源和 Visionpro 图像处理软件，相关参数如表 4 和表 5 所示。

3.2 基于 Visionpro 的模具磨损失效视觉验证

作为整个系统软件设计部分的关键一环，图像处理模块的合理性、可行性和准确性，直接影响到整个系统性能的好坏，其具体步骤包括：首先进行模型定位和快速匹配，输出定位后的图像结果；然后利用 CogCaliperTool 工具和 CogBlobTool 工具对定位

表 4 CAM-CIC-5000R-14-G 相机的各项参数

Table 4 Various parameters of CAM-CIC-5000R-14-G

camera	
参数	数值
分辨率	500 万像素
像素尺寸/($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	2.2 \times 2.2
曝光时间/s	1/10 ⁻⁴ ~30
光学尺寸	1/2.5"
帧率/fps	14
信噪比/db	>52
传感器	CMOS
数据位数	8 位
输出方式	Gige Vision

表 5 DF6HA-1S 镜头的各项参数

Table 5 Various parameters of DF6HA-1S lens

参数	数值
焦距/mm	6
光圈范围	F 1.2~F 16
最小工作距离/mm	100
镜头接口	C

后的图像进行分析处理，同时利用直方图工具判断区域是否存在缺陷与磨损。

具体工作如下：

(1) 利用 CogPMAlignTool 工具和 CogFixtureTool 工具进行模型匹配和初步定位，方便后续的图像处理过程。参数设置与区域划分如图 9 所示。查找角度设置为 $-180^\circ \sim 180^\circ$ ，防止由于图像偏转导致匹配失败；缩放设置为 0.8~1.2，允许图像进行一定范围的缩放；接受阈值设置为 0.5。



图 9 工具参数设置

Fig. 9 Setting of tool parameters

(2) 利用 CogCaliperTool 工具，通过模拟得出的磨损较大区域等结果，进行感兴趣区域 (Region of Interest, ROI) 的划分。在区域内检测边缘信息

时，会增强与投影方向平行的边缘信息，并减弱噪声影响，如图 10 框线所示。



图 10 ROI 区域划分
Fig. 10 ROI region division

由 2.2.2 节模拟可知，制坯模具磨损最大处出

现在凸台区域，所以在本系统中将模具的凸台区域作为 ROI 区域进行磨损失效判断。

(3) 利用 CogBlobTool 工具将模具中的磨损部分提取出来，最后通过直方图工具挑选出合适的阈值，对模具磨损情况做出判断。由图 11 可知，通过直方图工具，在全新模具的 ROI 区域中，灰度最小值为 19，最大值为 255，平均值为 176.222，标准差为 54.2033；而打击 6000 件左右的模具 ROI 区域中，灰度最小值为 12，最大值为 255，平均值为 114.541，标准差为 49.6791。通过直方图工具中的动态阈值分割工具，对比磨损前后图像中 ROI 区域的灰度统计值差距，实现动态分割并进行判断。图 12 与图 13 分别为软件分割阈值和图像处理结果。

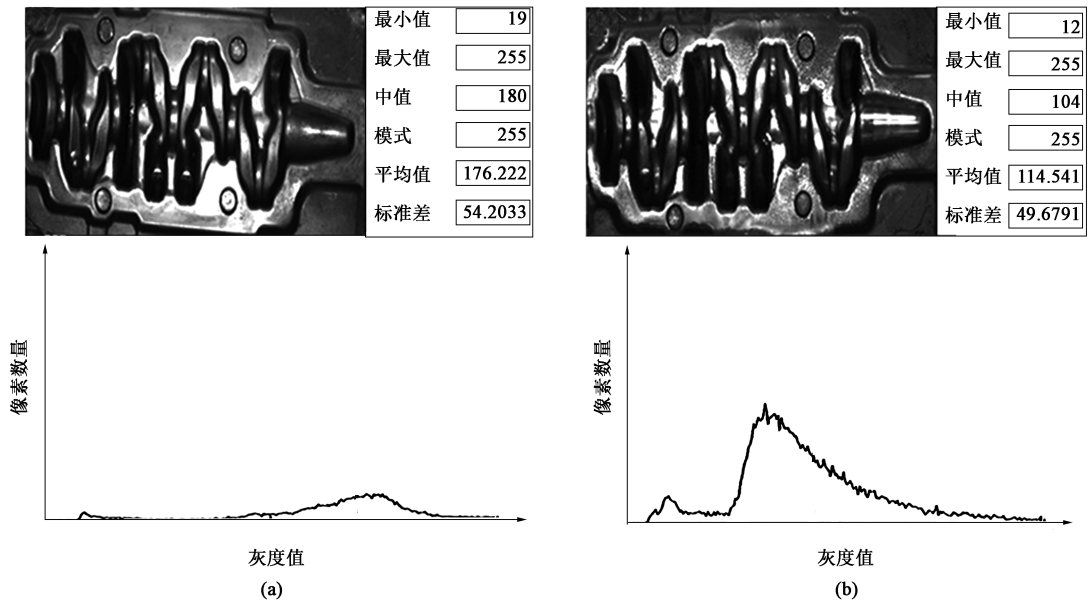


图 11 ROI 区域直方图
(a) 全新模具 (b) 实际打击 6000 件左右的模具

Fig. 11 ROI region histograms
(a) New die (b) Die after actually hitting about 6000 pieces

经相对阈值处理后，全新模具与打击 6000 件左右的模具状态评分为 8.16 与 9.17。

由图 12 与图 13 可知，经过动态阈值处理判断后的结果很好地识别出了磨损失效模具：当 ROI 区域阈值超过 8.84 时即认为模具磨损失效（图 12a）。从图 12b 的 ROC（Receiver Operating Characteristic Curve）图像可以看出，其 AUC（Area Under Curve）值为 1，说明该模型的预测准确率较高，可以准确识别出磨损失效模具；且该方法的图像处理时间为 $(167.1 \pm 1.2) \times 10^{-3}$ s，具备在线检测的能力，有实际应用价值。

4 结论

- (1) 利用 Archard 磨损模型对典型曲轴模具进行模具磨损模拟，可知该模具磨损严重区域出现在模具凸缘、凸台和轴颈大小端位置。
- (2) 基于磨损严重区域在模具上选取 14 个特征点，利用三维扫描仪对实际生产前后的模具进行扫描，得出模具磨损深度的实际数值，将模拟数据与实测数据进行比对，发现模拟数据与实测数据的偏差较大，平均偏差量达到了 32.57%。为了使模

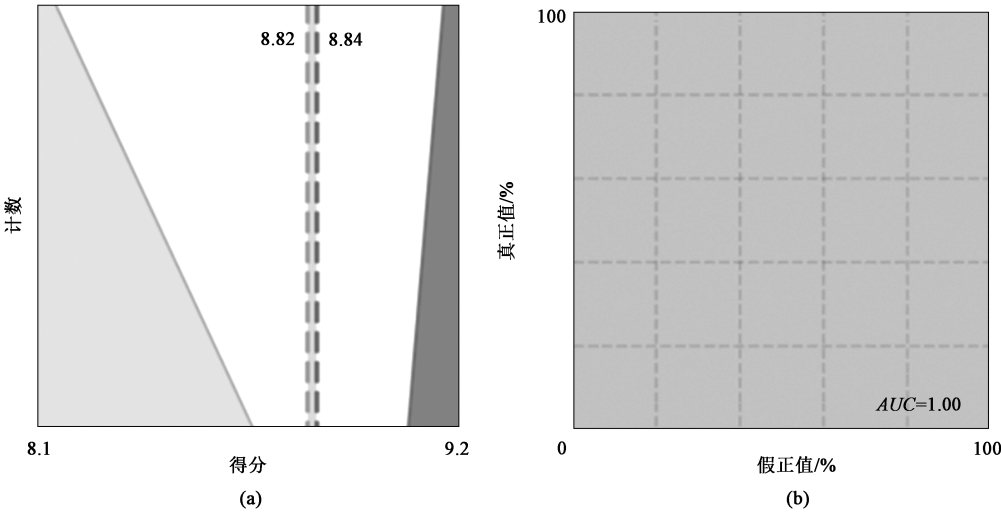


图 12 软件分割阈值

(a) 得分图 (b) ROC 图像

Fig. 12 Software segmentation threshold

(a) Score diagram (b) ROC diagram

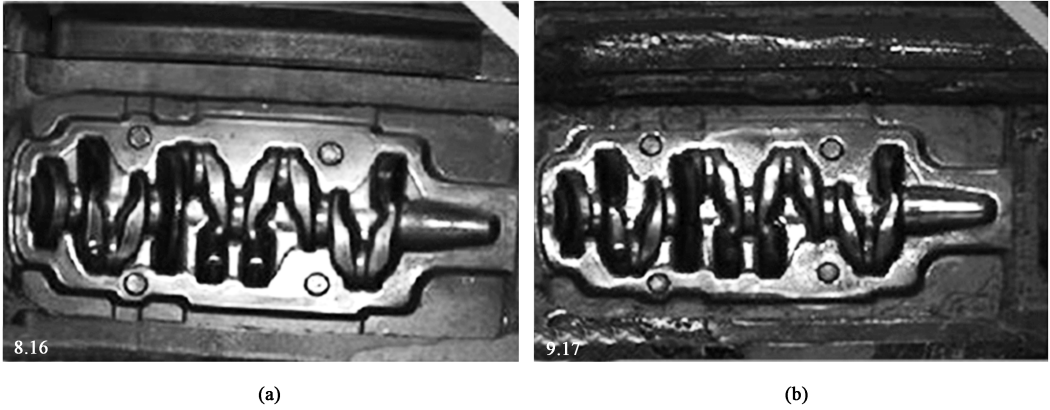


图 13 图像处理结果

(a) 全新模具 (b) 实际打击 6000 件左右的模具

Fig. 13 Image processing results

(a) New die (b) Die after actually hitting about 6000 pieces

拟数据更加贴近于实测数据，对 Archard 磨损模型中的磨损系数 K 值进行了修正，最终得出当修正后的 $K=1.425\times10^{-7}$ 时，两条曲线的拟合状态最好，平均偏差为 8.53%，比较符合实际测量状态。对模具的寿命进行了预测，通过计算得出模具寿命为 6351 件，与现场实际情况相符。

(3) 基于模具的寿命预测，实际采集了模具全新状态和打击 6000 件左右模具的照片，通过机器视觉技术对模具失效进行了判断，验证了机器视觉技术在锻造模具磨损失效检测方面的可行性。

参考文献：

[1] 田福祥，王者静. 现代模具技术及其进展 [J]. 模具制造，

2002, (3): 3-6.

Tian F X, Wang Z J. Modern mold technology and its progress [J]. Mold Manufacturing, 2002, (3): 3-6.

[2] 徐华，胡双锋，付秀娟. 基于 Deform 的三缸曲轴模锻设计 [J]. 锻压技术，2022, 47 (1): 161-167.

Xu H, Hu S F, Fu X J. Design of three cylinder crankshaft die forging based on Deform [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (1): 161-167.

[3] 金飞翔，董奇，徐梦洁. 基于有限元铝合金复杂精密锻造模具失效分析及优化 [J]. 锻压技术，2023, 48 (2): 180-184.

Jin F X, Dong Q, Xu M J. Failure analysis and optimization of complex precision forging dies for aluminum alloy based on finite element method [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (2): 180-184.

[4]

陈小刚, 陈贵清. 基于 Archard 理论的曲轴模具磨损研究 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (7): 125-127.
Chen X G, Chen G Q. Research on crankshaft die wear based on Archard theory [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (7): 125-127.

[5]

车路长, 蒋平, 刘俊, 等. Ti-6Al-4V 钛合金筋板类吊挂锻造成形工艺优化及模具磨损研究 [J]. 精密成形工程, 2022, 47 (10): 250-256.
Che L C, Jiang P, Liu J, et al. Optimization of Ti-6Al-4V titanium alloy suspension forging process and research on mold wear [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 47 (10): 250-256.

[6]

Lukasz Dworzak, Hawryluk M R, Ziemba J P. Wear analysis of die inserts in the hot forging process of a forked type forging using reverse scanning techniques [J]. Advances in Science and Technology-Research Journal, 2017, 11 (4): 225-238.

[7]

Cai L G, Liu H D, Li D, et al. Mold wear during die forging based on variance analysis and prediction of die life [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 37 (6): 872-883.

[8]

Ulf Ståhlberg, Jonas Hallström. A comparison between two wear models [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 87 (1-3): 223-229.

[9]

蒋钰钢. 高速切削加工过程有限元仿真研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
Jiang Y G. Finite Element Simulation Research on High Speed Cutting Process [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.

[10]

Rabinowicz E. New coefficients predict wear of metal parts [J]. Product Engineering, 1958, 29: 71-73.

[11]

Rabinowicz E. Wear coefficients-Metals [J]. Wear Control Handbook, 1980, 103 (2): 188-194.

[12]

Obiko J O, Mwema F M. Forging optimization process using numerical simulation and Taguchi method [J]. SN Applied Sciences, 2020, 5 (33): 712-721.



中国机械工程学会塑性工程分会 2024 年活动计划

序号	活动类别	活动名称	活动组织者	时间	地点
1	学术交流	《塑性工程学报》创刊 30 周年纪念大会暨学术报告会（2024 年中国机械工程学会会员日系列活动）	《塑性工程学报》编辑部、中国机械工程学会塑性工程分会	5 月	待定
2	学术交流	高质量加热技术研讨会	中国机械工程学会塑性工程分会（加热论坛）	5 月	南京
3	学术交流	第 8 届全国精密锻造学术研讨会	中国机械工程学会塑性工程分会（精密锻造论坛）、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司	7 月	海安
4	学术交流	2024 年度高速成形技术论坛	中国机械工程学会塑性工程分会（高速成形论坛）	7 月	福州
5	学术交流	2024 年塑性理论论坛学术会议	中国机械工程学会塑性工程分会（塑性理论论坛）	9 月	武汉
6	学术交流	钛合金结构成形及焊接技术交流会暨超塑性学术研讨会	协办：中国机械工程学会塑性工程分会（超塑性论坛）	9/10 月	待定
7	学术交流	锻压活动周 ● 主论坛：第四届塑性工程技术高层论坛 ● 分论坛：由分会秘书处与大锻件论坛、青年工作委员会、旋压论坛、高速成形论坛等共同策划 ● 展览：第四届锻压技术与装备展	中国机械工程学会塑性工程分会	10 月	待定
8	学术交流	第十二届中国压铸、挤压铸造及半固态加工年会	主办之一：中国机械工程学会塑性工程分会（半固态加工论坛）等	10/11 月	待定
9	大学生赛	中国大学生锻压工艺设计大赛	中国机械工程学会塑性工程分会	1—8 月	待定
10	工程能力评价	材料锻压工程师（含见习）工程能力评价	中国机械工程学会塑性工程分会	全年	待定