

齿轮温锻模具磨损失效分析

张继方¹, 晋会杰², 徐颖若¹

(1. 河南工业职业技术学院 汽车与航空工程学院, 河南 南阳 473000; 2. 商丘工学院 机械工程学院, 河南 商丘 476000)

摘要: 为了延长齿轮温锻凹模的使用寿命, 借助 DEFORM 软件和 Archard 模型对齿轮闭式温锻成形过程进行模拟分析, 预测凹模磨损最严重区域, 并利用响应曲面法建立齿轮温锻凹模磨损量编码因子方程, 以凹模预热温度、凹模硬度、冲孔连皮厚度和凹模齿顶过渡圆角半径作为目标参数对凹模磨损最严重区域进行参数化分析。预测结果表明: 齿轮齿形填充饱满, 轮齿不存在塌角现象, 优化后磨损最严重区域的磨损量为 1.42×10^{-5} mm, 与回归模型预测值比率相差 5.63%, 误差较小; 对应的最优参数组合为: 凹模预热温度为 150 ℃、凹模硬度为 55 HRC、冲孔连皮厚度为 2.7 mm 和凹模齿顶过渡圆角半径为 0.4 mm, 预测齿轮温锻凹模寿命为 7746 件, 符合生产预期的 6500 件。说明响应曲面法预测结果较为准确, 可一定程度上降低试模成本。

关键词: 直齿圆柱齿轮; 闭式温锻成形; 凹模磨损; 响应曲面法; 凹模预热温度; 凹模硬度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.007

中图分类号: TG376.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 05-0038-07

Analysis on wear failure of warm forging die for gear

Zhang Jifang¹, Jin Huijie², Xu Yingruo¹

(1. School of Automotive and Aviation Engineering, Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shangqiu Institute of Technology, Shangqiu 476000, China)

Abstract: In order to extend the service life of warm forging die for gear, the closed warm forging process of gears was simulated and analyzed by software DEFORM and model Archard, the most serious wear area of die was predicted, and the code factor equation for wear amount of warm forging die for gear was established by the response surface method. Then, taking die preheating temperature, die hardness, punched skin thickness and transition fillet radius of die tooth tip as target parameters, the most serious wear area of die was parametrically analyzed. The prediction results show that the gear tooth profile is fully filled, and there is no slump in the gear teeth. After optimization, the wear amount in the most serious wear area is 1.42×10^{-5} mm, which is 5.63% different from the predicted value of the regression model, and the error is small. The optimal parameters combination is the die preheating temperature of 150 ℃, the die hardness of 55 HRC, the punched skin thickness of 2.7 mm and the transition fillet radius of die tooth tip of 0.4 mm, and the predicted service life of warm forging die for gear is 7746 pieces, which is in line with the production expectations of 6500 pieces. Thus, the prediction results of the response surface method are more accurate and can reduce the trial cost to a certain extent.

Key words: spur gear; closed warm forging; die wear; response surface method; die preheating temperature; die hardness

齿轮作为传动系统的重要组成部分, 其加工精度对传动系统的性能影响较大。目前, 齿轮的生产方式比较多: 如传统的滚齿和插齿等, 材料利用率和生产率低; 如压铸件铸齿等, 齿轮精度较低; 如冷精锻成形齿轮等, 材料变形抗力大。而闭式温锻成形齿轮, 材料利用率可达 90%^[1], 材料变形抗力

小, 塑性好。

根据齿轮的实际加工方式可知, 不管采用上述哪一种齿轮生产方法, 刀具和模具磨损失效或者寿命预测问题均为齿轮制造中的难题。近些年, 不少学者采用响应曲面法对模具寿命进行预测, 并取得了一定的进展。例如: 齐双强^[2]以活塞预锻凸模的磨损量等作为目标函数值, 利用响应面法对模具预热温度、摩擦因数、下压速度以及模具硬度等因素进行参数优化分析, 结果表明, 模具寿命较优化前得以延长, 该方法能够延长活塞预锻凸模的使用寿命。张静等^[3]以阀杆模具磨损深度作为目标函数值, 利用响应面法对工艺参数和模具结构参数进行优化分析, 结果显示, 磨损量的期望值较优化前的

收稿日期: 2021-12-08; 修订日期: 2022-03-09

基金项目: 2019 年度河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目 (2019GGJS280)

作者简介: 张继方 (1991-), 男, 硕士, 助教

E-mail: 991972669@qq.com

通信作者: 徐颖若 (1991-), 女, 硕士, 助教

E-mail: 289425501@qq.com

效果好, 并利用试验验证了优化结果的正确性, 证明了利用该方法进行参数优化分析预测磨损量的可信度高。

本文以延长齿轮温锻凹模使用寿命为目标, 以响应曲面法为优化手段, 以凹模预热温度、凹模硬度、冲孔连皮厚度和凹模齿顶过渡圆角半径作为目标参数, 对凹模磨损最严重区域进行优化分析, 并通过试验验证了结果的正确性。

1 齿轮锻造工艺性分析

1.1 响应曲面法概述

Box G E P 等^[4]通过寻找目标值与不同试验参数的定量规律, 建立多元回归方程, 用交互曲面表示出来, 得到最优目标函数解, 此预测方法为响应曲面法。利用响应曲面多项式方程对齿轮温锻凹模磨损量进行优化, 方程如式(1)所示:

$$W = \gamma_1 + \sum_{p=1}^q \gamma_p Z_p + \sum_{p=1}^q \gamma_{pp} Z_p^2 + \sum_{\substack{p=1 \\ p < k}}^q \gamma_{pk} Z_p Z_k \quad (1)$$

式中: W 为凹模磨损量预测值; Z_p 为第 p 个试验参数; Z_k 为第 k 个试验参数; $p, k=1, 2, \dots, q, p < k$; q 为试验参数的数量; γ_1 为常数值; γ_p 为一阶偏移系数; γ_{pp} 为二阶偏移系数; γ_{pk} 为交互试验参数系数。

1.2 工艺方案设计

本文以直齿圆柱齿轮为研究对象, 齿轮零件图如图1所示, 齿轮的主要结构参数为: 齿数为20个, 模数为1.5 mm, 压力角为20°, 齿宽为10 mm, 毛坯尺寸为 $\Phi 26 \text{ mm} \times 9.5 \text{ mm}$ 。

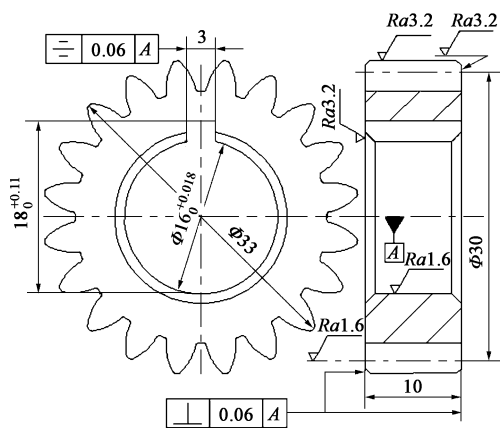


图1 齿轮零件图

Fig. 1 Part drawing of gear

齿轮实际加工中使用400 t 双动挤压液压机设

备, 生产过程为: 车削下料—软化热处理(球化退火)—表面处理和润滑—闭式温锻—冲孔连皮—软化热处理(球化退火)—表面处理和润滑—冷锻精整—机加工, 齿轮成型的主要工序在闭式温锻过程, 故本文重点研究齿轮的温锻成形过程。

2 齿轮锻造模拟分析

2.1 齿轮生产要求和模拟参数设置

生产要求: 齿轮温锻成形过程中要求齿顶、齿根位置填充饱满、轮齿不存在塌角、齿根处不允许出现开裂和齿面冷隔等现象; 凹模不能发生早期开裂, 保证凹模寿命为6500件, 即凹模失效前齿轮加工数量需大于6500件。

齿轮温锻成形过程的模拟参数条件为:

(1) 模型选取, 齿轮模型取一个完整齿和两个半齿作为研究对象, 即取整个模型的1/10 利用 DEFORM 软件进行数值模拟。

(2) 材料选取, 齿轮材料选用40Cr 钢, 因模拟软件数据库不存在此材料, 选用数据库自带与其性能相近的AISI-4120 钢代替, 模具材料选取美标钢号AISI-H13。

(3) 边界条件, 齿轮温锻成形过程中, 坯料温度为800 °C, 模具预热温度为150 °C, 采用混和摩擦形式, 摩擦因数为0.25。

2.2 闭式温锻齿轮模拟结果分析

通过上述模拟参数对齿轮进行闭式温锻成形, 其模拟结果如图2所示。

最小间距分布图用来衡量齿轮成形件与凹模型腔的贴合程度。通过图2a所示齿轮最小间距可知: 齿轮轮齿成形位置的最小间距为0.000~0.052 mm, 表明齿轮轮齿成形后与凹模紧密连接, 齿轮凹模与坯料贴合度高, 齿轮能够完全填充凹模、上凸模和下凸模围成的整个型腔, 且轮齿不存在塌角等缺陷。满足齿轮轮齿填充饱满、无塌角的加工要求。

通过图2b所示等效应变可知: 模拟结束时, 齿轮齿根、齿面和齿形端部位置的等效应变值均大于1.75 (等效应变理论数值超过1.10, 型腔基本可以填充饱满^[5]), 齿轮温锻成形不存在困难; 齿轮齿顶位置等效应变值几乎为0, 说明模拟结束时齿顶已完全填充饱满(图2a), 特别是轮齿根部等效应变值达到12.20, 表明该位置变形程度较其他位置大, 易造成齿轮根部发生开裂, 在加工齿轮过程中应注意轮齿根部变形程度。

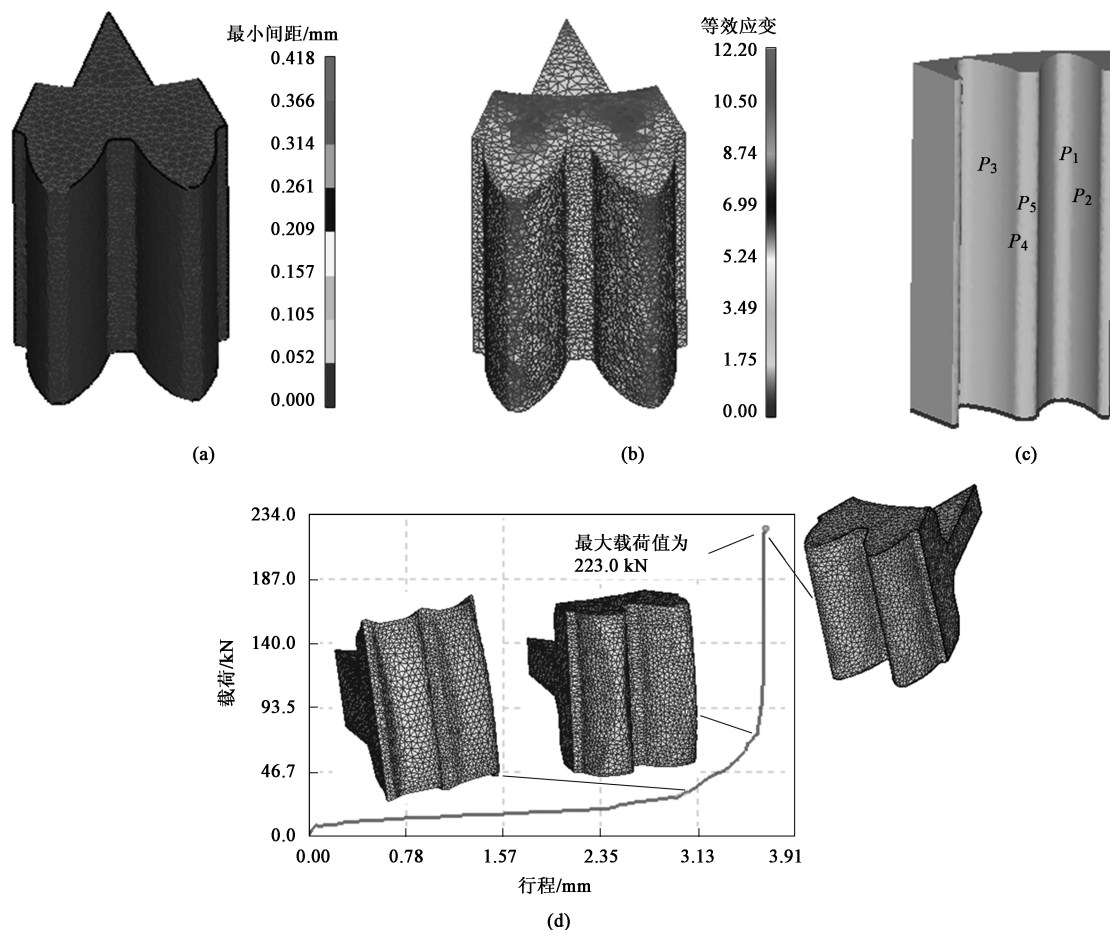


图 2 闭式温锻成形齿轮的模拟结果

(a) 最小间距 (b) 等效应变 (c) 凹模取样区域 (d) 载荷-行程曲线

Fig. 2 Simulation results of closed warm forging for gear

(a) Minimum spacing (b) Equivalent strain (c) Sampling areas of die (d) Load-stroke curve

为了准确地预测齿轮凹模各位置的磨损程度,生产中重点关注凹模磨损最严重区域,故在齿轮凹模上选择 5 个代表性区域,通过图 2c 可知: P_1 为齿轮凹模齿根圆所在区域, P_2 为齿轮凹模齿根圆与齿面过渡圆角所在区域, P_3 为齿轮凹模齿面所在区域, P_4 为齿轮凹模齿顶圆与齿面过渡圆角所在区域, P_5 为齿轮凹模齿顶圆所在区域。

通过图 2d 所示载荷-行程曲线可知: 上凸模从 0.00 mm 下压至 3.13 mm 阶段,在上、下凸模与齿轮坯料接触后,凸模沿轴向对材料进行挤压,材料开始发生塑性变形,坯料沿轴向和径向两个方向进行塑性流动。由于凹模齿槽较小,故坯料与凹模齿槽摩擦较大,坯料沿凹模齿槽流动困难,材料向自由轴向方向流动快,造成中间齿形相对饱满,两端齿形不完整,出现鼓形齿轮的现象。由于型腔中仍有自由空间,因此,载荷变化相对平缓,随着下压量的不断增大,轴向自由空间越来越小,材料向齿

槽深处流动越来越多,材料流动阻力开始变大,变形抗力随之增加,使得成形载荷开始大幅升高。在最后阶段,齿轮齿形基本填充饱满(除过渡圆角位置),材料变形程度小,型腔中自由空间较小,金属流动困难,造成载荷曲线急剧增大,直至齿轮完全符合生产要求,此时载荷值为 223.0 kN,此为加工两个轮齿的载荷值,整个齿轮温锻成形需要载荷值为 2230 kN,因此,选用 400 t 的双动挤压液压机。

2.3 齿轮温锻凹模磨损分析

齿轮温锻成形过程中凹模磨损量采用 Archard 修正模型进行预测^[6-8],模型主要通过凹模磨损量 W 、粘着磨损系数 $K(T)$ 、模具硬度 $H(T)$ 、时间 t 、滑移速度 v 和表面压强 P' 对磨损量进行计算。Archard 修正模型如式 (2) 所示:

$$W = \int_0^t K(T) \frac{P' \cdot v}{H(T)} dt \quad (2)$$

式中: T 为绝对温度。

坯料和凹模接触后, 凹模会发生一定的回火效应, 造成凹模强度和硬度减小, 导致凹模磨损程度增大。通过图 3a 所示表面温度可知: 凹模上 5 个取样区域和坯料接触时间长短排序为 $P_5 = P_4 > P_3 > P_2 > P_1$, P_4 和 P_5 区域最先与坯料接触, 接触时间最长, 且由图 2b 可知, 齿轮根部的金属材料变形最为激烈, 模具表面温度主要由接触时间和变形激烈程度决定, 故 P_4 和 P_5 区域的表面温度最高, 该区域为齿根成形的关键部

位, 最高温度为 $574\text{ }^{\circ}\text{C}$ (AISI-H13 模具钢的热处理温度小于 $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ [9-10]), 满足齿轮温锻加工要求。

利用 Archard 修正模型, 通过图 3b 可知: 齿轮凹模上 5 个取样区域的磨损量大小排序为 $P_5 > P_4 > P_3 > P_2 > P_1$, P_5 区域平均磨损最为严重, P_4 区域平均磨损次之, 凹模磨损量最大值为 $1.68 \times 10^{-5}\text{ mm}$ 。实际生产中, 为了延长凹模寿命, 应重点关注凹模齿顶位置的磨损情况。

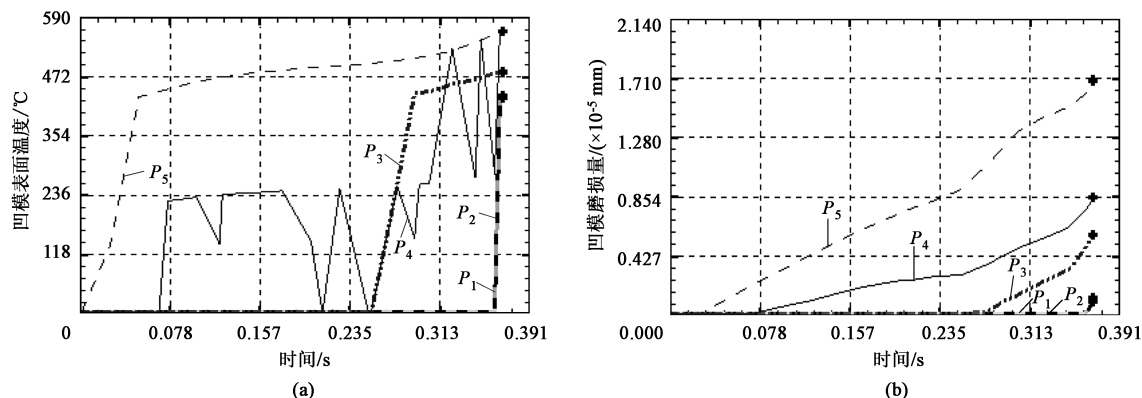


图3 5个取样区域的凹模表面温度 (a) 和凹模磨损量 (b) 的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of die surface temperature (a) and die wear (b) for five sampling areas

3 凹模磨损最严重区域 (P_5 区域) 优化

3.1 响应曲面试验因素范围选取

工艺参数和模具结构参数的有效选取对延长模具寿命具有重要的作用, 本文借助数值模拟技术和响应曲面法分析凹模预热温度、凹模硬度、冲孔连皮厚度和凹模齿顶过渡圆角对齿轮温锻成形过程中凹模磨损量的影响, 参数选取范围如下。

(1) 齿轮生产采用温锻工艺, 坯料温度约为 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, 模具与坯料接触时, 为了防止模具表面氧化起皮, 影响齿轮制造精度, 齿轮模具需要提前预热, 预热温度范围为 $150\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 模具预热过程应均匀, 避免产生组织应力不均匀, 造成应力过大 [11]。

(2) 凹模硬度的合理选取有利于凹模寿命的延长, 在齿轮温锻成形过程中, 凹模初始硬度过高, 造成凹模硬度工艺复杂, 且容易导致凹模出现早期开裂问题; 但凹模硬度过小, 容易出现凹模磨损过快的问题 [12], 因此, 应合理选取凹模硬度, 凹模硬度范围为 $45\sim 55\text{ HRC}$ 。

(3) 冲孔连皮厚度小, 齿轮填充饱满, 后续冲

孔容易, 但过小易造成锻打不足或者打击力过大, 模具磨损严重; 冲孔连皮厚度过大造成后续冲孔困难, 且冲孔时易导致齿轮变形。因此, 应合理选取冲孔连皮高度, 冲孔连皮厚度范围为 $1.7\sim 2.7\text{ mm}$ 。

(4) 凹模齿顶过渡圆角过小, 填充困难, 易造成模具应力大, 出现模具开裂失效, 且加工的齿轮强度会降低; 凹模齿顶过渡圆角过大, 会增大过渡曲线长度, 减小渐开线有效长度。因此, 需合理地选取凹模齿顶过渡圆角, 凹模齿顶过渡圆角半径范围为 $0.2\sim 0.4\text{ mm}$ 。但该参数的选择仅在温锻工艺过程中使用, 后续精密机加工时, 加工出的对应的齿轮齿根过渡圆角大小会发生变化 [13]。

3.2 试验设计及结果分析

采用响应曲面试验设计方法 (BBD 方法) 对齿轮凹模磨损最严重区域进行方案设计, 设置 4 个因素, 每个因素 3 个水平, 表 1 为齿轮温锻凹模磨损试验因素水平表, 其中, J 为凹模预热温度, H 为凹模硬度, M 为冲孔连皮厚度, N 为凹模齿顶过渡圆角半径。根据 Design-Expert 对 4 因素 3 水平进行组合, 从所有参数组合中选取具有代表性的 26 组试验, 并编码为 $X_1\sim X_{26}$ 。表 2 为响应曲面试验的模拟结果。

表 1 齿轮温锻凹模磨损试验因素水平表
Table 1 Factors and levels of wear test for gear warm forging die

| 水平 | 因素 | | | |
|----|-------------|---------------|--------------|--------------|
| | <i>J</i> /℃ | <i>H</i> /HRC | <i>M</i> /mm | <i>N</i> /mm |
| 1 | 150 | 45 | 1.7 | 0.2 |
| 2 | 200 | 50 | 2.2 | 0.3 |
| 3 | 250 | 55 | 2.7 | 0.4 |

表 2 响应曲面试验模拟结果
Table 2 Simulation results of response surface test

| 编码 | 因素 | | | | 凹模磨损量/ ($\times 10^{-5}$ mm) |
|------------------------|-------------|---------------|--------------|--------------|----------------------------------|
| | <i>J</i> /℃ | <i>H</i> /HRC | <i>M</i> /mm | <i>N</i> /mm | |
| <i>X</i> ₁ | 150 | 50 | 2.2 | 0.4 | 1.83 |
| <i>X</i> ₂ | 250 | 50 | 1.7 | 0.3 | 2.16 |
| <i>X</i> ₃ | 250 | 50 | 2.7 | 0.3 | 1.87 |
| <i>X</i> ₄ | 200 | 55 | 1.7 | 0.3 | 1.92 |
| <i>X</i> ₅ | 150 | 45 | 2.2 | 0.3 | 2.12 |
| <i>X</i> ₆ | 200 | 50 | 2.2 | 0.3 | 2.01 |
| <i>X</i> ₇ | 150 | 50 | 2.2 | 0.2 | 2.14 |
| <i>X</i> ₈ | 150 | 50 | 1.7 | 0.3 | 2.08 |
| <i>X</i> ₉ | 200 | 50 | 2.7 | 0.2 | 1.86 |
| <i>X</i> ₁₀ | 200 | 50 | 2.2 | 0.3 | 1.99 |
| <i>X</i> ₁₁ | 250 | 50 | 2.2 | 0.2 | 2.21 |
| <i>X</i> ₁₂ | 200 | 50 | 1.7 | 0.2 | 2.23 |
| <i>X</i> ₁₃ | 200 | 50 | 1.7 | 0.4 | 2.01 |
| <i>X</i> ₁₄ | 250 | 45 | 2.2 | 0.3 | 2.22 |
| <i>X</i> ₁₅ | 250 | 50 | 2.2 | 0.4 | 1.95 |
| <i>X</i> ₁₆ | 200 | 45 | 2.2 | 0.4 | 2.09 |
| <i>X</i> ₁₇ | 200 | 55 | 2.2 | 0.4 | 1.59 |
| <i>X</i> ₁₈ | 200 | 45 | 2.2 | 0.2 | 2.31 |
| <i>X</i> ₁₉ | 200 | 55 | 2.2 | 0.2 | 1.83 |
| <i>X</i> ₂₀ | 200 | 50 | 2.7 | 0.4 | 1.70 |
| <i>X</i> ₂₁ | 200 | 45 | 1.7 | 0.3 | 2.41 |
| <i>X</i> ₂₂ | 200 | 55 | 2.7 | 0.3 | 1.52 |
| <i>X</i> ₂₃ | 200 | 45 | 2.7 | 0.3 | 2.01 |
| <i>X</i> ₂₄ | 150 | 55 | 2.2 | 0.3 | 1.86 |
| <i>X</i> ₂₅ | 250 | 55 | 2.2 | 0.3 | 1.78 |
| <i>X</i> ₂₆ | 150 | 50 | 2.7 | 0.3 | 1.67 |

编码因子方程可用于预测响应每个因素的给定水平,该方程可用于识别通过比较因子系数来计算因子的相对影响,齿轮温锻凹模磨损量编码因子方程采用响应二次多项式形式表示,利用表 2 中齿轮模拟数据进行方程拟合,建立二次多项式模型,二次多项式方程如式(3)所示:

$$W = 1.97 \times 10^{-5} + 5.58 \times 10^{-7}J - 2.37 \times 10^{-6}H - 1.82 \times 10^{-6}M - 1.18 \times 10^{-6}N + 3 \times 10^{-7}JM + 1.25 \times 10^{-7}JN - 5 \times 10^{-8}HN + 1.5 \times 10^{-7}MN \quad (3)$$

由回归方程方差分析(表 3)可知:齿轮温锻凹模磨损模型和凹模预热温度、凹模硬度、冲孔连皮厚度、凹模齿顶过渡圆角半径 4 个因素的 *P* 值均小于 0.01,根据显著性要求($P<0.01$ 表示该因素对凹模磨损量影响显著;“ $P>0.05$ ”表示该因素对凹模磨损量影响不显著),说明模型、所有单独因素均显著;通过 *F* 值大小可知,凹模硬度对齿轮凹模磨损量影响最大,冲孔连皮厚度和凹模齿顶过渡圆角影响次之,凹模预热温度影响最小。交互因素 *JH*、*JM*、*JN*、*HM*、*HN* 和 *MN* 的 *P* 值均大于 0.1,表明所有交互因素均为非显著因素,对齿轮凹模磨损量无影响,且失拟项的 *P* 值为 0.2230,失拟项不显著,表明回归模型模拟效果好,能够合理可靠地分析凹模磨损量。

表 3 回归方程方差分析
Table 3 Variance analysis of regression equation

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 <i>f</i> | <i>F</i> 值 | <i>P</i> 值 |
|-----------|------------------------|--------------|------------|------------|
| 模型 | 1.28×10^{-10} | 10 | 56.660 | <0.0001 |
| <i>J</i> | 3.74×10^{-12} | 1 | 16.610 | 0.0010 |
| <i>H</i> | 6.72×10^{-11} | 1 | 298.400 | <0.0001 |
| <i>M</i> | 3.96×10^{-11} | 1 | 175.800 | <0.0001 |
| <i>N</i> | 1.66×10^{-11} | 1 | 73.550 | <0.0001 |
| <i>JH</i> | 0.00 | 1 | 0.000 | 1.0000 |
| <i>JM</i> | 3.60×10^{-13} | 1 | 1.600 | 0.2255 |
| <i>JN</i> | 6.25×10^{-14} | 1 | 0.280 | 0.6061 |
| <i>HM</i> | 0.00 | 1 | 0.000 | 1.0000 |
| <i>HN</i> | 1.00×10^{-14} | 1 | 0.044 | 0.8360 |
| <i>MN</i> | 9.00×10^{-14} | 1 | 0.400 | 0.5369 |
| 失拟项 | 3.36×10^{-12} | 14 | 12.000 | 0.2230 |

为了描述凹模预热温度、凹模硬度、冲孔连皮厚度和凹模齿顶过渡圆角对齿轮温锻凹模磨损量的交互影响,建立齿轮温锻凹模磨损量等值线分布图,如图 4 所示。由图 4a 可知:凹模预热温度为 150℃、凹模齿顶过渡圆角半径为 0.4 mm、凹模硬度在 45~55 HRC 区域内时,保持冲孔连皮厚度不变,凹模磨损量随着凹模硬度的增大而减小;冲孔连皮厚度在 1.7~2.7 mm 区域内,保持凹模硬度不变,凹模磨损量随冲孔连皮厚度的增大而减小;且其他因素不变情况下,凹模硬度从 45 HRC 变化至 55 HRC 较冲孔连皮厚度从 1.7 mm 变化至 2.7 mm 时的凹模磨损量等值线的减小幅度大。由图 4b 可

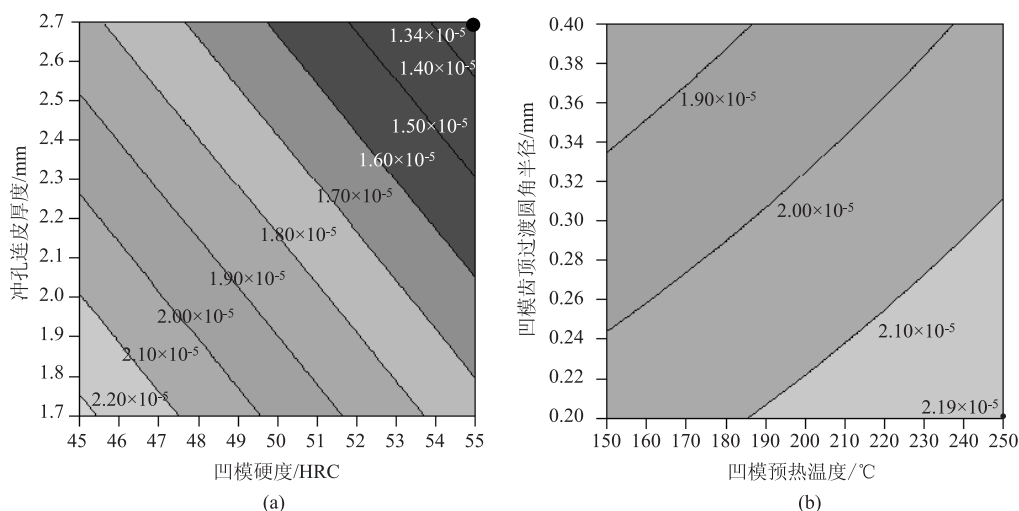


图4 齿轮温锻凹模磨损量等值线分布图

(a) 冲孔连皮厚度与凹模硬度 (b) 凹模齿顶过渡圆角半径与凹模预热温度

Fig. 4 Contour distribution diagrams of wear amount for gear warm forging die

(a) Punched skin thickness and die hardness (b) Transition fillet radius of die tooth tip and preheating temperature of die

知: 凹模硬度为 45 HRC、冲孔连皮厚度为 2.7 mm、凹模预热温度在 150~250 °C 区域内时, 保持凹模齿顶过渡圆角不变, 凹模磨损量随着凹模预热温度的增大而增大; 凹模齿顶过渡圆角半径在 0.2~0.4 mm 区域内, 保持凹模预热温度不变, 凹模磨损量随着凹模齿顶过渡圆角的增大而减小; 且其他因素不变情况下, 凹模预热温度从 150 °C 变化至 250 °C 较凹模齿顶过渡圆角半径从 0.2 mm 变化至 0.4 mm 时的凹模磨损量等值线的减小幅度小。

综上所述, 凹模硬度对齿轮温锻凹模磨损量等值线影响最大, 冲孔连皮厚度影响次之, 凹模齿顶过渡圆角和凹模预热温度影响最小, 符合表 3 的数据结果, 齿轮温锻凹模磨损量最小值为 1.34×10^{-5} mm, 该磨损量下的参数组合为: 凹模预热温度为 150 °C、凹模硬度为 55 HRC、冲孔连皮厚度为 2.7 mm、凹模齿顶过渡圆角半径为 0.4 mm。

4 凹模寿命预测

利用上述响应曲面法对齿轮温锻成形过程凹模磨损量进行预测, 齿轮温锻凹模 (P_5 区域) 的最优磨损量为 1.34×10^{-5} mm, 对应的最优参数组合为: 凹模预热温度为 150 °C、凹模硬度为 55 HRC、冲孔连皮厚度为 2.7 mm 和凹模齿顶过渡圆角半径为 0.4 mm, 该参数组合属于响应曲面模型预测结果, 但该组合在齿轮数值模拟编码组的 26 组试验组合中未出现, 为了保证预测值与模拟结果的精度, 利用

此参数组合对齿轮温锻成形过程进行模拟分析, 优化后齿轮温锻凹模磨损量结果如图 5 所示, P_5 区域属于齿轮凹模磨损最严重区域, 优化后模拟磨损量结果为 1.42×10^{-5} mm, 与优化前相比齿轮温锻凹模抗磨损能力提高了 15.5%, 通过对比磨损量模拟结果和回归模型预测值, 两者相差比率为 5.63%, 误差较小。

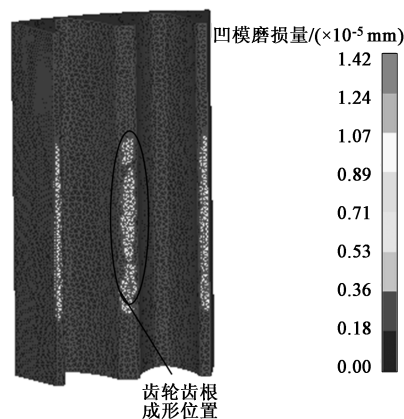


图5 优化后齿轮温锻凹模磨损量

Fig. 5 Wear amount of gear warm forging die after optimization

以齿轮公差最小要求 0.11 mm 作为凹模许用磨损量, 可知凹模使用寿命为 7746 件, 通过齿轮实际生产得到凹模的使用寿命大致为 7000 件, 模拟结果和实际生产的凹模使用寿命均符合生产预期要求 (6500 件)。通过分析可知, 采用响应曲面法预测齿轮温锻凹模磨损量的结果较为准确, 可一定程度上降低模具的使用成本和生产周期。

由上述结果和图 5 所示优化后齿轮温锻凹模磨

损量结果可知,凹模齿顶圆位置磨损最严重,在实际生产中应注意对应齿轮齿根成形位置情况。在凹模无开裂和无齿轮成形不完整的情况下(图6),应尽可能地降低凹模预热温度、适当提高冲孔连皮厚度、增大凹模齿顶过渡圆角、提高凹模硬度,以延长齿轮温锻凹模使用寿命。



图6 实际齿轮零件
Fig. 6 Actual gear parts

5 结论

(1) 齿轮温锻凹模齿顶所在区域磨损最为严重,凹模磨损量最大值为 1.68×10^{-5} mm。

(2) 基于数值模拟,齿轮齿形填充饱满,轮齿不存在塌角现象,整体变形均匀,齿根处无开裂现象。

(3) 基于响应曲面法,建立齿轮温锻凹模磨损量编码因子方程,回归模型模拟效果好,能够合理、可靠地分析凹模磨损量, P_5 区域齿轮温锻凹模磨损量最优参数组合为:凹模预热温度为 150 ℃、凹模硬度为 55 HRC、冲孔连皮厚度为 2.7 mm 和凹模齿顶过渡圆角半径为 0.4 mm,优化后模拟磨损量结果为 1.42×10^{-5} mm,与优化前相比齿轮温锻凹模抗磨损能力提高了 15.5%。

(4) 磨损量模拟结果和回归模型预测值,两者相差比率为 5.63%,误差较小;模拟结果计算凹模寿命为 7746 件,符合生产预期要求。表明响应曲面法预测齿轮温锻凹模磨损量结果较为准确,可一定程度上降低模具的使用成本和生产周期。

参考文献:

[1] 闫克龙. 直齿圆柱齿轮的精锻工艺及模具设计 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
Yan K L. The Precision Forging Process and Die Design for Spur Gear [D]. Wuhan: Huanzhong University of Science & Technology, 2013.

[2] 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.

[3] 张静, 郭竞宇, 梁颖, 等. 基于响应面法的单座阀杆预锻工艺优化 [J]. 轻工机械, 2017, 35 (5): 65-69.
Zhang J, Guo J Y, Liang Y, et al. Optimization of single seat valve stem pre forging process based on response surface method [J]. Light Industry Machinery, 2017, 35 (5): 65-69.

[4] Box G E P, Wilson K B. On the experimental attainment of optimum conditions [J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B: Methodological, 1951, 13 (1): 1-45.

[5] 沈晓辉. 高速车轮成形理论及组织演变规律研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
Shen X H. Research on Forming Theories and Microstructure Evolution of High Speed Railway Wheels [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[6] 林高用, 冯迪, 郑小燕, 等. 基于 Archard 理论的挤压次数对模具磨损量的影响分析 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40 (5): 1245-1251.
Lin G Y, Feng D, Zheng X Y, et al. Analysis of influence of extrusion times on total die wear based on Archard theory [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40 (5): 1245-1251.

[7] 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.

[8] Eriksen M. The influence of die geometry on tool wear in deep drawing [J]. Wear, 1997, 207 (1-2): 10-15.

[9] 施渊吉, 黎军硕, 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.

[10] Cui X H, Wang S Q, Wei M X, et al. Wear characteristics and mechanisms of H13 steel with various tempered structures [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20 (6): 1055-1062.

[11] 丁旭辉, 宋岩, 杨孝享, 等. 减少锻模过早失效的方法 [J]. 锻造与冲压, 2019, (23): 64-66.
Ding X H, Song Y, Yang X H, et al. How to control earlier failure of forging dies [J]. Forging & Metalforming, 2019, (23): 64-66.

[12] 吴淑芳, 王培安, 郭欢欢, 等. 基于正交试验的梭心冷挤压成形工艺研究及模具优化设计 [J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2018, 37 (1): 92-101.
Wu S F, Wang P A, Guo H H, et al. Bobbin cold extrusion forming process and mold optimum design based on orthogonal test [J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2018, 37 (1): 92-101.

[13] 熊显文, 涂家海, 明兴祖. 齿轮齿根过渡圆角的计算方法及控制的研究 [J]. 机械传动, 2008, (3): 9-11, 14, 104.
Xiong X W, Tu J H, Ming X Z. Research on calculation method and control of tooth root fillet [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2008, (3): 9-11, 14, 104.