

基于田口方法与灰色关联分析的连杆热锻模具等效应力与磨损

邓 伟¹, 王卓安¹, 贾德文¹, 杜俊韦¹, 许传恒²

(1. 昆明理工大学 云南省内燃机重点实验室, 云南 昆明 650500; 2. 重庆彭氏科技开发有限公司, 重庆 401320)

摘要: 以某 H13 钢连杆模具为研究对象, 基于田口方法与灰色关联分析, 采用有限元模拟研究发动机连杆锻造过程中, 锻造温度、模具预热温度、摩擦因数、模具硬度和锻压速度这 5 个工艺参数对模具的磨损深度及等效应力的影响规律, 基于田口设计方法设计 25 组正交试验, 并基于灰色关联分析法进行多目标关联性分析。结果表明, 优化的工艺参数组合为: 锻压速度为 $550 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、锻造温度为 $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、模具预热温度为 $225 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、摩擦因数为 0.30、模具硬度为 56 HRC。与初始工艺相比, 最优工艺参数组合下的磨损深度改善了 28.3%、等效应力改善了 9.1%。最后, 通过实际生产验证, 主要磨损部位及应力集中区域状况与现场生产情况基本一致, 验证了优化模型的可行性。

关键词: 连杆; 热锻模具; 磨损深度; 等效应力; 正交试验; 灰色关联分析

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.018

中图分类号: TG76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 11-0135-09

Equivalent stress and wear of connecting rod hot forging die based on Taguchi method and grey correlation analysis

Deng Wei¹, Wang Zhuo'an¹, Jia Dewen¹, Du Junwei¹, Xu Chuanheng²

(1. Yunnan Key Laboratory of Internal Combustion Engines, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Chongqing Pengshi Technology Development Co., Ltd., Chongqing 401320, China)

Abstract: For H13 steel connecting rod die, based on Taguchi method and grey correlation analysis, the influence laws of five process parameters, namely, forging temperature, die preheating temperature, friction factor, die hardness and forging speed, on the wear depth and equivalent stress of die during the forging process of engine connecting rod were studied by finite element simulation. Then, twenty-five sets of orthogonal test were designed based on Taguchi design method, and the multi-objective correlation analysis was conducted based on grey correlation analysis method. The results indicate that the optimized process parameters are the forging speed of $550 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, the forging temperature of $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, the die preheating temperature of $225 \text{ }^{\circ}\text{C}$, the friction factor of 0.30 and the die hardness of 56 HRC. Compared with the initial process, the wear depth and equivalent stress under the optimal process parameter combination are improved by 28.3% and 9.1%, respectively. Finally, through the actual production verification, the conditions of main wear positions and stress concentration areas are basically in line with the actual production conditions, which verifies the feasibility of the optimization model.

Key words: connecting rod; hot forging die; wear depth; equivalent stress; orthogonal test; grey correlation analysis

模锻成形技术高质量、高效率的特点得到了广泛应用。模锻成形时, 坯料与模具型腔间存在剧烈的相对运动和接触压力, 模具型腔表面易产生磨损, 严重影响模具寿命。Han X H 和 Hua L^[1] 认为热锻

模的使用寿命受热疲劳、塑性变形和磨损等因素影响, 在这些因素中, 磨损被认为是引发热锻模具失效的关键, 其比例超过了失效总数的 70%^[2]。因此, 对连杆热锻过程中磨损行为的准确预测变得愈加重要。到目前为止, 对模具的磨损机理进行了一些研究, 并提出了考虑影响磨损过程参数的数学模型^[3-4]。金飞翔等^[5]基于有限元铝合金复杂精密锻造模具失效分析的问题, 考虑模具材料和热处理影响, 提出了模具结构和模具应力是导致模具失效开裂的主要原因。Kang J H 等^[6]和 Behrens B A^[7]在 Archard

收稿日期: 2024-06-18; 修订日期: 2024-09-25

基金项目: 云南省科技厅重大科技专项计划 (202202AC080006)

作者简介: 邓 伟 (1976-), 男, 学士, 教授级高工, 硕士生导师

E-mail: 1323364897@qq.com

通信作者: 贾德文 (1977-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师

E-mail: 27546658@qq.com

磨损方程中将模具硬度作为温度函数。Lee R S 和 Jou J L^[8]考虑了热对模具硬度和磨损系数的影响。李宝聚^[9]以连杆终锻模为试验对象,利用信噪比分析得到参数最佳组合。在此基础上,王兴等^[10]基于 Archard 磨损模型和 BP 神经网络,结合有限元模拟,研究了成形过程中工艺参数对磨损量的影响规律。本文以模具的磨损深度和等效应力为优化目标,基于田口试验设计的方法对锻造工艺参数进行多目标均值和方差分析,运用灰色关联性分析方法对各个目标进行关联性协同分析,以得到最优工艺参数组合。对得到的工艺参数组合通过实际生产进行试验试制,以验证本文优化方法的准确性。

1 连杆热锻模具有限元模拟

1.1 Archard 磨损模型

Archard 磨损模型被广泛用于分析模具的磨损行为,如式(1)所示:

$$W = K \frac{LF}{H} \quad (1)$$

式中: W 为磨损深度; K 为磨损系数; H 为模具硬度; L 为相对滑动距离; F 为工件与模具的接触压力。

由于 K 和 H 与温度 T 有关,上述模型将这两个参数视为与材料有关的常数是不合理的,在热锻操作中会带来一定的误差。因此, Luo S Y 等^[11]提出了一种改进的磨损模型,可以表示为式(2):

$$W(T) = K(T) \frac{LF}{H(T)} \quad (2)$$

随温度变化的摩擦因数 K 和模具硬度 H 可由式(3)和式(4)求得。

$$K(T) = (29.29 \ln T - 168.73) \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$H(T) = 9216.4 \times T^{-0.505} \quad (4)$$

锻造时,模具不同位置所承受的压力、温度、锻件材料流经长度等随时间而变化。因此,式(2)可进一步修改为:

$$W_{ij} = K_{ij}(T) \frac{V_{ij} F_{ij}}{H_{ij}(T)} dt_j \quad (5)$$

式中: W_{ij} 为模具第 j 时刻 i 点处的磨损深度; $K_{ij}(T)$ 为模具第 j 时刻 i 点处的磨损系数; V_{ij} 为模具第 j 时刻 i 点处的相对滑动速度; F_{ij} 为模具第 j 时刻 i 点处与工件的接触压力; $H_{ij}(T)$ 为模具第 j 时刻 i 点处的硬度; t_j 为第 j 时刻的时间, j 取值为 $[1, n]$, n 为锻造过程仿真的总时间步数。

在完成热锻工序后,模具 i 点处的磨损深度可通过式(6)计算:

$$W_i = \sum_{j=1}^n K_{ij}(T) \frac{V_{ij} P_{ij}}{H_{ij}(T)} dt_j \quad (6)$$

1.2 锻造成形工艺及有限元模型建立

锻造上模具、下模具和坯料基于 UG12.0 完成三维建模并保存 STL 格式文件,导入 DEFORM-3D 软件中模拟热锻过程。模具型腔如图 1 所示,连杆是一种细长类零件,其大头、小头、杆身的形状各异,整体结构较为复杂,易出现折叠、塌边等问题。内燃机连杆制造时,由于模具型腔内材料的无序流动,造成模具严重磨损^[12]。图 2 展示了模具的构造和有限元模型。热锻模具使用 4Cr5MoSiV1 (AISI H13) 模具钢,划分为 121152 个网格。38MnVS 合金结构钢材料作为坯料,被分割为 111344 个网格,并设定模拟步长为 0.3 mm。DEFORM-3D 数值模拟结果如图 3 所示,连杆锻造成形无明显缺陷。

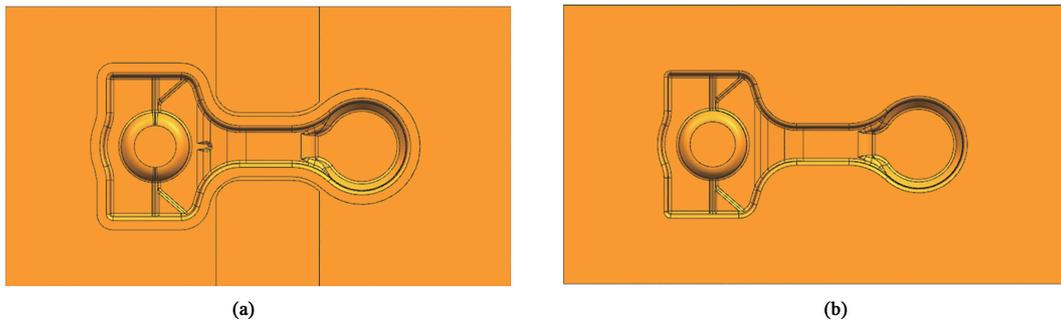


图 1 模具三维模型

(a) 上模 (b) 下模

Fig. 1 3D models of dies

(a) Upper die (b) Lower die

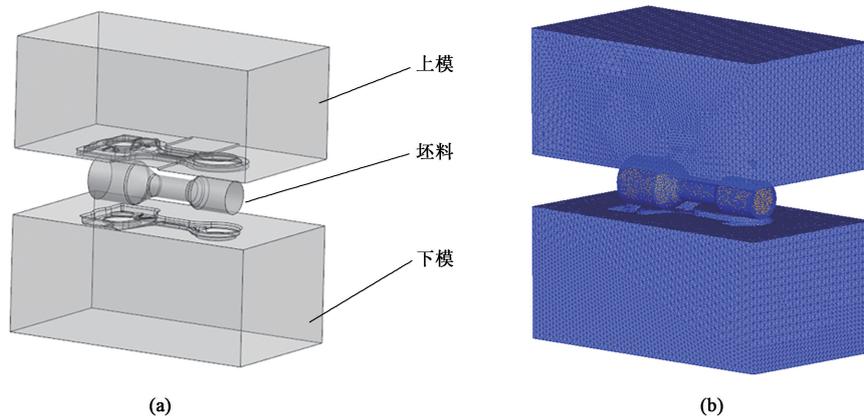


图 2 热锻模具的结构 (a) 和有限元模型 (b)

Fig. 2 Structure (a) and finite element model (b) of hot forging die

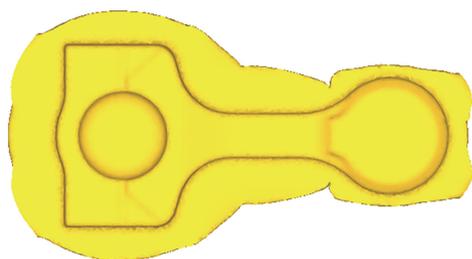


图 3 锻造成形仿真结果

Fig. 3 Simulation result of forging

2 工艺参数正交试验

2.1 评价指标

Archard 磨损理论指出,影响模具磨损的主要因素有:模具承受的法向压力、材料和模具的相对移动速率、模具的硬度和模具的预热时间。影响模具承受的法向压力的因素包括坯料的加热温度、模具的温度、坯料在模具内部的流动速率和锻压速度,模具的材质以及热处理参数决定了模具的硬度。所以,将锻压速度、锻造温度、模具预热温度、摩擦因数以及模具的初始硬度视为研究对象。

38MnVS 合金结构钢在无润滑情况下的摩擦因数为 0.4~0.7,使用润滑剂可以降低摩擦因数,加润滑时的摩擦因数为 0.2~0.4。对于中小型锻件,锻压速度通常较高,在 $100\sim 600\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间。锻造过程中,温度的控制非常重要,以确保材料的良好性能和可加工性,对于 38MnVS 钢的锻造,通常建议的温度范围为 $1050\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在这个温度范围内,钢材具有良好的可塑性和韧性,能够通过锻造过程得到所需的形状和性能。通常情况下, H13 钢

的预热温度为 $250\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$,而模具预热的目的是为了减少热应力。正交试验的影响因素水平表如表 1 所示。将热锻模具的磨损深度 W 与等效应力值 P 作为评估的依据,并采用 $L_{25}(5^6)$ 的正交试验图,其试验数据见表 1。

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素				
	A 锻压速度/ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	B 锻造温度/ $^{\circ}\text{C}$	C 模具预热 温度/ $^{\circ}\text{C}$	D 摩擦 因数	E 模具的 初始硬度/ HRC
1	400	1000	225	0.20	48
2	450	1050	250	0.25	50
3	500	1100	275	0.30	52
4	550	1150	300	0.35	54
5	600	1200	325	0.40	56

2.2 信噪比计算

利用田口试验方法,将信噪比作为评估反馈的重要参数,用来评估信号的质量和可靠性,以优化和确定最优设计目标。在具体应用中,通过提高或降低信噪比,可以获得更清晰、更准确的信号,从而提高系统的性能和可靠性。信噪比有较大值、较小值和目标值 3 种分类。较大值意味着质量特性值越大越好,通常用于希望信号值尽可能大的场景;较小值则表示质量特性值越小越好,通常用于希望信号值尽可能小的场景^[13]。为了减少模具失效的概率,磨损深度 W 和等效应力 P 需要尽可能低,因此,采用了较小值的信噪比方法。具体的计算方法详见式 (7)。

$$\eta = -10 \times \lg\left(\frac{1}{f} \sum_{d=1}^f x_d^2\right) \quad (7)$$

式中： η 为信噪比； f 为试验总次数，本研究中 $f=25$ ； x_d 为第 d 组试验所对应的试验结果， $d=1, 2, 3, \dots, f$ 。

本文利用 Minitab Statistical 软件对设计的因素水平表进行了田口设计，生成 25 组试验；使用 DEFORM-3D 软件对这些试验组进行有限元分析。对后处理中磨损深度和模具等效应力两个评价目标进行提取，依据上述田口设计目标结果与信噪比如表 2 所示。

表 2 田口设计目标结果与信噪比
Table 2 Target results and signal-to-noise ratio for Faguchi Methods

试验方案	因素					目标结果			
	$A/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$B/^\circ\text{C}$	$C/^\circ\text{C}$	D	E/HRC	磨损深度/mm	磨损深度的信噪比	等效应力/MPa	等效应力的信噪比
1	400	1000	225	0.20	48	0.00000535	105.43	1250	-61.94
2	400	1050	250	0.25	50	0.00000421	107.51	1360	-62.67
3	400	1100	275	0.30	52	0.00000297	110.54	1510	-63.58
4	400	1150	300	0.35	54	0.00000238	112.47	1680	-64.51
5	400	1200	325	0.40	56	0.00000167	115.55	1830	-65.25
6	450	1000	250	0.30	54	0.00000427	107.39	1390	-62.86
7	450	1050	275	0.35	56	0.00000330	109.63	1520	-63.64
8	450	1100	300	0.40	48	0.00000352	109.07	1680	-64.51
9	450	1150	325	0.20	50	0.00000278	111.12	1810	-65.15
10	450	1200	225	0.25	52	0.00000199	114.02	1230	-61.80
11	500	1000	275	0.40	50	0.00000501	106.00	1500	-63.52
12	500	1050	300	0.20	52	0.00000404	107.87	1650	-64.35
13	500	1100	325	0.25	54	0.00000287	110.84	1790	-65.06
14	500	1150	225	0.30	56	0.00000220	113.15	1180	-61.44
15	500	1200	250	0.35	48	0.00000237	112.51	1340	-62.54
16	550	1000	300	0.25	56	0.00000412	107.70	1660	-64.40
17	550	1050	325	0.30	48	0.00000462	106.71	1810	-65.15
18	550	1100	225	0.35	50	0.00000324	109.79	1230	-61.80
19	550	1150	250	0.40	52	0.00000247	112.15	1320	-62.41
20	550	1200	275	0.20	54	0.00000191	114.38	1490	-63.46
21	600	1000	325	0.35	52	0.00000481	106.36	1850	-65.34
22	600	1050	225	0.40	54	0.00000372	108.59	1240	-61.87
23	600	1100	250	0.20	56	0.00000274	111.24	1310	-62.35
24	600	1150	275	0.25	48	0.00000295	110.60	1470	-63.35
25	600	1200	300	0.30	50	0.00000213	113.43	1640	-64.30

2.3 极差分析

根据正交试验表对试验结果进行极差分析。依据极差分析的特性，对各评价指标进行讨论，分析各参数的影响权重，并确定对应目标下最优参数组合。表 3 为磨损深度、等效应力的信噪比极差分析。

通过对表 3 进行分析可知，对于磨损深度优化目标，各工艺参数的影响权重规律为：锻造温度 $B >$

模具硬度 $E >$ 摩擦因数 $D >$ 锻压速度 $A >$ 模具预热温度 C ，根据极差 R 大小排列分析可知在该目标值下最优工艺参数组合为 $A1B5C3D5E5$ ；对于等效应力优化目标，各工艺参数的影响权重规律为：模具预热温度 $C >$ 锻造温度 $B >$ 锻压速度 $A >$ 模具硬度 $E >$ 摩擦因数 D ，由极差 R 大小排列可知在该目标值下最优工艺参数组合为 $A3B4C1D1E5$ 。

表 3 磨损深度和等效应力的信噪比极差分析结果

Table 3 Range analysis results of signal-to-noise ratio for wear depth and equivalent stress

水平	磨损深度					等效应力				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	110.30	106.60	110.20	110.01	108.90	-63.59	-63.61	-61.77	-63.45	-63.50
2	110.25	108.10	110.16	110.14	109.60	-63.59	-63.54	-62.57	-63.45	-63.49
3	110.07	110.30	110.23	110.25	110.20	-63.38	-63.46	-63.51	-63.47	-63.50
4	110.14	111.90	110.11	110.15	110.70	-63.45	-63.37	-64.41	-63.57	-63.55
5	110.05	114.00	110.11	110.27	111.50	-63.44	-63.47	-65.19	-63.51	-63.41
极差 R	0.26	7.40	0.12	0.26	2.60	0.21	0.24	3.42	0.12	0.14
排序	4	1	5	3	2	3	2	1	5	4
最优组合	A1B5C3D5E5					A3B4C1D1E5				

图 4 为磨损深度、等效应力信噪比主效应图。由于本文采取各个影响因素的 5 个水平进行研究，梯度水平范围选取较为细致，故各目标值下的信噪比主效应图较为平缓。由图 4a 可知，对于磨损深度主效应图，随着锻造温度 B 的增加，磨损深度信噪比数值不断增大，由于金属坯料加热温度升高，导致流动应力减小，随着变形抵抗能力的逐渐降低，对模具的磨损也在逐步缩小。随着锻压速度 A 的增

大，磨损深度信噪比数值呈减小趋势；随着模具预热温度 C 的增大，磨损深度信噪比数值呈增大趋势。在坯料传热的影响下，模具温度随之上升，温度增高使得模具的硬度下降，此时，模具磨损深度随之升高，且 C3 处出现拐点；随着摩擦因数 D 的增加，磨损深度信噪比数值在 D3~D4 处有较小下降，但总体保持上升趋势；随着模具硬度 E 的增大，磨损深度信噪比数值呈增大趋势。

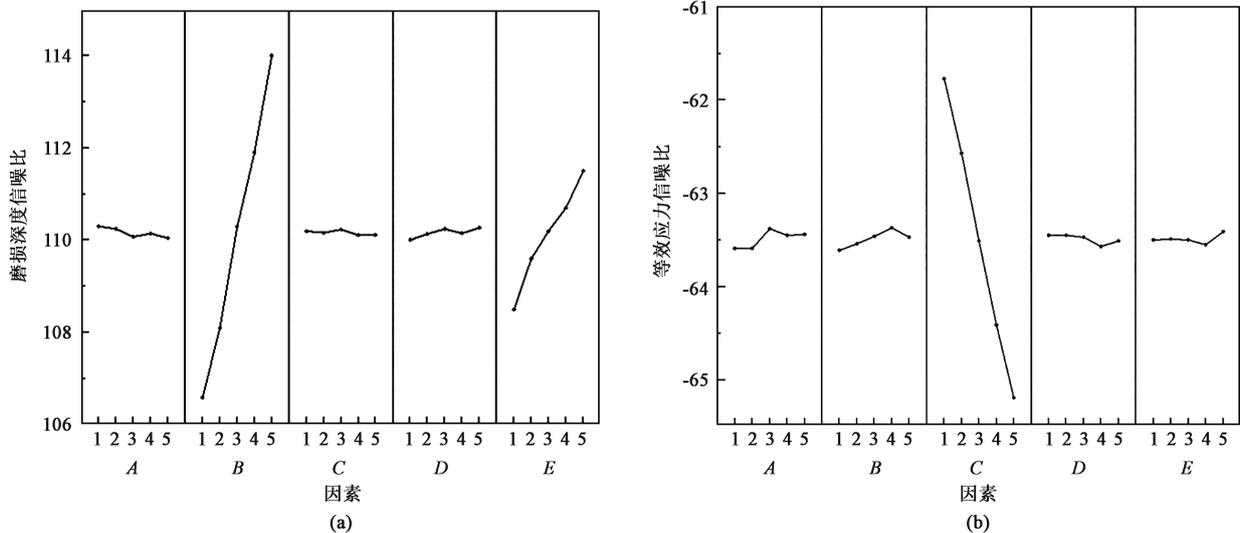


图 4 磨损深度 (a) 和等效应力 (b) 信噪比主效应图

Fig. 4 Main effect diagrams of signal-to-noise ratio for wear depth (a) and equivalent stress (b)

由图 4b 可以看出，随着锻压速度 A 的增大，等效应力信噪比数值在 A3 处出现拐点；随着锻造温度 B 的增加，等效应力信噪比数值在 B4 处出现拐点，并达到最大值，在拐点后的因素水平与磨损深度呈相反响应趋势，在 B4 处后锻造温度升高虽然可以降低等效应力，但会导致磨损深度升高，减少模具的使用寿命。随着模具预热温度 C 的增大，等效应

力信噪比数值呈下降趋势，与磨损深度呈相同的响应趋势，主效应图进一步验证了极差分析的准确。随着摩擦因数 D 的增大，等效应力信噪比数值在 D4 处出现拐点，但总体呈向下趋势；此外，随着模具硬度 E 的增加，等效应力信噪比先呈下降趋势，而在 E4 后升高，并达到信噪比最大值。

根据前述的分析可以得出，在设定磨损深度目

标值时, A1B5C3D5E5 为最优的工艺参数组合。而在等效应力目标值下, A3B4C1D1E5 为最优的工艺参数组合。由以上分析可知, 对于单个评价指标而言, 产生的因素指标条件是最优的, 然而, 在多个评价目标中, 有时某一指标的信噪比较高, 而其他指标的信噪比较低。另外, 采用不同评价指标得到的最佳设计变量组合也是不同的。所以, 要综合考虑各个指标的优劣, 才能更好地对其进行综合评价。鉴于田口方法仅适用于单一目标^[14], 对于多个目标, 本文提出利用灰色关联分析来优选。

3 灰色关联分析

采用灰色关联分析方法, 将多目标转化为单个目标, 在应用该方法对多目标参数进行调节时, 必须先求出各因子与各指标间的相关性^[15]。由于各个目标反映的量级和单元各不相同, 需要对其进行无量纲化处理, 如式 (8) 所示:

$$y_d = \frac{\eta_{\max} - \eta_d}{\eta_{\max} - \eta_{\min}} \quad (8)$$

式中: η_d 为第 d 组试验的信噪比; η_{\max} 为各组试验信噪比最大值; η_{\min} 为各组试验信噪比最小值; y_d 为 η_d 无量纲后的数值。

利用计算所得到的无量纲数据, 计算第 d 组试验的灰色关联系数 ξ_d , 如式 (9) 所示:

$$\xi_d = \frac{|a - y_{\min}| + \rho |a - y_{\max}|}{|a - y_d| + \rho |a - y_{\max}|} \quad (9)$$

式中: ρ 为偏差系数, 一般取为 0.5; a 为常数 0; y_{\max} 为各组无量纲数据最大值; y_{\min} 为各组无量纲数据最小值。

紧接着对灰色关联度进行计算, 灰色关联度表示各影响因素对各目标响应值协同关联性的权重高低。第 d 组试验的灰色关联度 γ_d 的计算公式如式 (10) 所示:

$$\gamma_d = \frac{1}{m} \sum_{d=1}^f \xi_d (d = 1, 2, \dots, f) \quad (10)$$

式中: f 为试验总次数, 本文中 $f=25$; m 为目标响应值个数, 本文中 $m=2$ 。

当灰色相关性指标的数值增加时, 意味着该试验的结果更贴于预期的结果。表 4 展示了灰色关联系数和关联度。通过关联度计算结果可以看出, 第 14 组试验有着最高的关联度值, 为 0.839, 具有最好的综合性能。这一结果表明, 第 14 组试验的工艺参数水平对磨损深度和等效应力两个目标的协同影响性较高。

表 4 各组试验的灰色关联系数及灰色关联度

Table 4 Gray correlation coefficient and grey correlation degree for each group of tests

试验	磨损深度			等效应力			关联度
	η_d	y_d	ξ_d	η_d	y_d	ξ_d	
1	105.433	1.000	0.333	-61.94	0.128	0.796	0.565
2	107.514	0.794	0.386	-62.67	0.316	0.613	0.500
3	110.545	0.495	0.503	-63.58	0.548	0.477	0.490
4	112.468	0.304	0.622	-64.51	0.786	0.389	0.505
5	115.546	0.000	1.000	-65.25	0.976	0.339	0.669
6	107.391	0.806	0.383	-62.86	0.364	0.579	0.481
7	109.630	0.585	0.461	-63.64	0.563	0.470	0.466
8	109.069	0.640	0.438	-64.51	0.786	0.389	0.414
9	111.119	0.438	0.533	-65.15	0.951	0.344	0.439
10	114.023	0.151	0.769	-61.80	0.092	0.844	0.806
11	106.003	0.944	0.346	-63.52	0.534	0.484	0.415
12	107.872	0.759	0.397	-64.35	0.746	0.401	0.399
13	110.842	0.465	0.518	-65.06	0.927	0.350	0.434
14	113.152	0.237	0.679	-61.44	0.000	1.000	0.839
15	112.505	0.301	0.624	-62.54	0.283	0.639	0.632
16	107.702	0.776	0.392	-64.40	0.759	0.397	0.395
17	106.707	0.874	0.364	-65.15	0.951	0.344	0.354
18	109.789	0.569	0.468	-61.80	0.092	0.844	0.656
19	112.146	0.336	0.598	-62.41	0.249	0.667	0.633
20	114.379	0.115	0.813	-63.46	0.519	0.491	0.652
21	106.357	0.909	0.355	-65.34	1.000	0.333	0.344
22	108.589	0.688	0.421	-61.87	0.110	0.819	0.620
23	111.245	0.425	0.540	-62.35	0.232	0.683	0.612
24	110.604	0.489	0.506	-63.35	0.489	0.506	0.506
25	113.432	0.209	0.705	-64.30	0.732	0.406	0.556

为了进一步探究各工艺影响因素对各目标响应值协同关联性的权重高低, 对灰色关联度进行极差分析^[16-17]。考虑到灰色关联度这一目标响应值越大越好, 因此, 采用较大值 (Larger-the-Better) 对灰色关联度信噪比进行计算, 如式 (11) 所示:

$$\eta_d = -10 \times \lg \left(\frac{1}{f} \sum_{d=1}^f \frac{1}{x_d^2} \right) \quad (11)$$

对于表 5 所示的灰色关联度均值与灰色关联度信噪比的极差分析结果, 与上文中对磨损深度和等效应力的极差分析方法相同。依据各工艺参数水平下的灰色关联度极差来评估各影响因素对目标响应值的影响权重, 极差值越大即表明受该因素的影响程度越大。

表 5 灰色关联度均值与信噪比极差分析结果

Table 5 Range analysis results of mean and signal-to-noise ratio for grey correlation degree

水平	灰色关联度均值					灰色关联度信噪比				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	0.55	0.44	0.70	0.53	0.53	-5.32	-7.26	-3.23	-5.62	-5.64
2	0.52	0.50	0.57	0.53	0.51	-5.94	-6.20	-4.93	-5.83	-5.92
3	0.54	0.52	0.51	0.59	0.53	-5.67	-5.81	-6.02	-4.80	-5.86
4	0.58	0.58	0.45	0.52	0.54	-4.86	-4.90	-6.95	-5.90	-5.48
5	0.53	0.66	0.47	0.55	0.60	-5.74	-3.63	-6.79	-5.38	-4.80
极差 R	0.063	0.223	0.244	0.071	0.083	1.08	3.63	3.72	1.10	1.12
排秩	5	2	1	4	3	5	2	1	4	3
最优组合	A4B5C1D3E5					A4B5C1D3E5				

由表 5 可知，对于灰色关联度均值，各影响因素下的极差 R 分别为 0.063、0.223、0.244、0.071 和 0.083。通过对极差的数值进行分析，各工艺参数对灰色关联度均值的影响权重为：模具预热温度 C > 锻造温度 B > 模具硬度 E > 摩擦因数 D > 锻压速度 A ；对于灰色关联度信噪比，各影响因素下的极差 R 分别为 1.08、3.63、3.72、1.10 和 1.12。通过对极差的数值进行分析，各工艺参数对灰色关联度信噪比的影响权重为：模具预热温度 C > 锻造温度 B > 模具硬度 E > 摩擦因数 D > 锻压速度 A 。

图 5 为灰色关联度均值和灰色关联度信噪比主效应图。由图 5 可知，两种主效应图随工艺参数因素水平的变化趋势一致。最优工艺参数组合为 A4B5C1D3E5，即锻压速度为 $550 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、锻造温度为 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 、模具预热温度为 $225 \text{ }^\circ\text{C}$ 、摩擦因数为 0.30、模具硬度为 56 HRC。在该工艺组合下，磨损深度和等效应力两目标响应值协同关联性的权重最高。灰色关联度均值与灰色关联度信噪比望大特征的结果一致，与该目标下极差分析的结果一致，两组数据的一致性进一步证实了本研究的准确性。

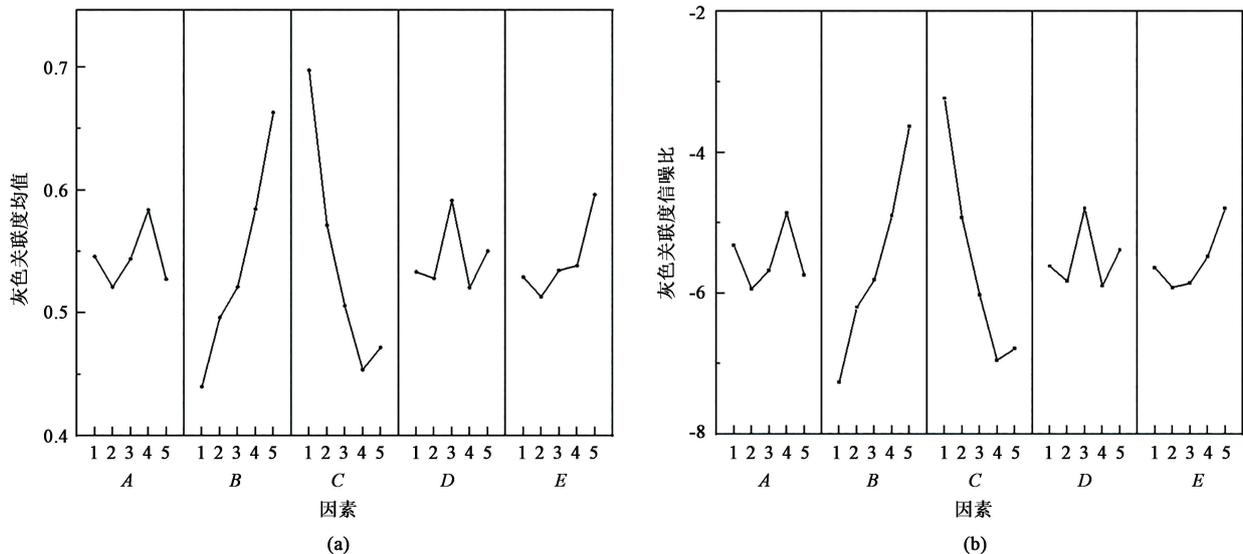


图 5 灰色关联度均值 (a) 和灰色关联度信噪比 (b) 主效应图

Fig. 5 Main effect diagrams of mean (a) and signal-to-noise ratio (b) for grey correlation degree

4 有限元模拟及试验验证

利用灰关联分析法优选出一套优化的工艺参数组合 A4B5C1D3E5，该组合能够保证模具具有较小

的磨损深度和较低的等效应力。对最优工艺组合进行数值模拟，图 6a、图 6b 为初始方案，初始方案的参数设置为：锻压速度为 $550 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、锻造温度为 $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ 、模具预热温度为 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 、摩擦因数为 0.40、模具硬度为 52 HRC。初始方案下模具磨损深

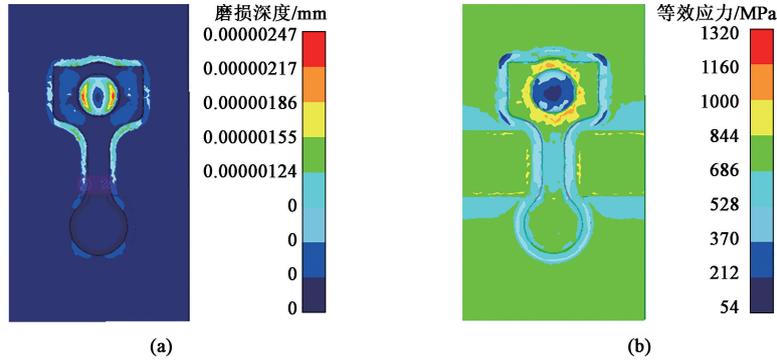


图 6 初始方案下的有限元模拟结果

(a) 磨损深度 (b) 等效应力

Fig. 6 Finite element simulation results of initial scheme

(a) Wear depth (b) Equivalent stress

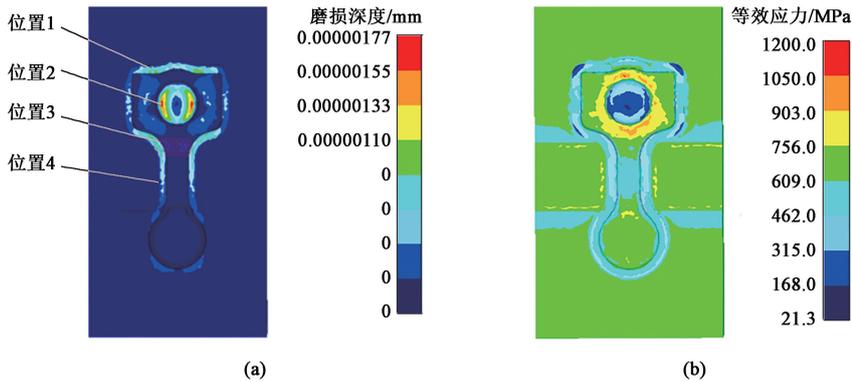


图 7 优化方案下的有限元模拟结果

(a) 磨损深度 (b) 等效应力

Fig. 7 Finite element simulation results of optimized scheme

(a) Wear depth (b) Equivalent stress

度为 0.00000247 mm、等效应力为 1320 MPa。图 7a、图 7b 为优化方案下的磨损深度与等效应力的数值模拟结果。由数值模拟结果可知，该优化方案的磨损深度为 0.00000177 mm、等效应力为 1200 MPa，与初始工艺相比，优化工艺参数组合下的磨损深度改善了 28.3%、等效应力改善了 9.1%。

如图 7 所示，模具磨损主要分布在型腔边缘、飞边桥部和头部区域，由于金属汇流导致连杆大头端中位置 2 的应力较为集中且与磨损位置基本重合，位置 1、位置 2 和位置 3 附近的变形比连杆小头端处更加剧烈。这种变形使得位置 1、位置 2 附近的滑移速度增大，从而导致位置 1、位置 2 和位置 3 的磨损更严重，说明在锻造作业中位置 1、位置 2 受到的磨损深度较高，且在位置 2 处发现了最大磨损深度，在材质属性及各参数相同的情况下，该位置更易发生失效；连杆小头端处的应力及磨损深度

较小；连杆大头端型腔边缘的位置 3、位置 4 的应力较为集中。最后，通过实际生产验证，图 8 所示锻模磨损区域的位置 1、位置 2、位置 3、位置 4 与模具磨损分布一致，与模拟结果较符合。

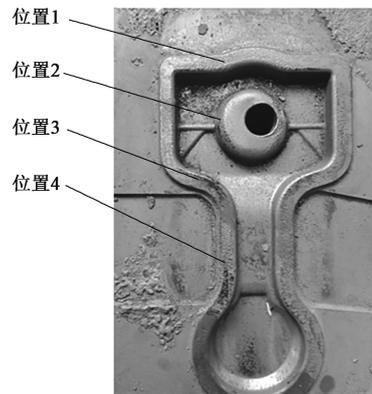


图 8 热锻模具

Fig. 8 Hot forging die

5 结论

(1) 针对发动机汽车连杆模具, 基于田口设计方法, 设计了 5 因素 5 水平的 $L_{25}(5^6)$ 正交试验表。依据信噪比及极差分析结果, 得出各工艺因素对磨损深度的影响权重为: 锻造温度>模具硬度>摩擦因数>锻压速度>模具预热温度; 对等效应力的影响权重为: 锻造温度>摩擦因数>模具硬度>锻压速度>模具预热温度。

(2) 基于灰色关联度分析方法, 依据各目标响应值协同关联性的权重, 得出最优工艺参数组合为: 锻压速度为 $550 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、锻造温度为 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 、模具预热温度为 $225 \text{ }^\circ\text{C}$ 、摩擦因数为 0.30、模具硬度为 56 HRC。与初始工艺相比, 最优工艺参数组合下的磨损深度改善了 28.3%, 等效应力改善了 9.1%。

(3) 利用数值仿真与试验相结合的方法, 对灰色关联分析的结果进行了验证。研究表明, 采用灰关联分析法, 可以减少试验次数, 获得更好的工艺参数, 减少制造测试费用, 有助于提升产品合格率与生产效率, 并为相关过程的优化提供可借鉴的联合优化方法。

参考文献:

- [1] Han X H, Hua L. 3D FE modelling of contact pressure response in cold rotary forging [J]. Tribology International, 2013, 57: 115-123.
- [2] Lange K, Cser L, Geiger M, et al. Tool life and tool quality in bulk metal forming [J]. CIRP Annals, 1992, 41 (2): 667-675.
- [3] 李宝聚, 王兆辉, 谭磊, 等. 热锻工艺参数对模具磨损影响的有限元分析 [J]. 模具工业, 2014, 40 (9): 6-11.
Li B J, Wang Z H, Tan L, et al. Hot forging process parameters on the influence of mold wear finite element analysis [J]. Die & Mould Industry, 2014, 40 (9): 6-11.
- [4] 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 wear parts of hot forging dies based on CAE analysis [J]. Journal of Hubei University of Automotive Technology, 2021, 35 (2): 58-63, 69.
- [5] 金飞翔, 董奇, 徐梦洁, 等. 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, et al. Failure analysis and optimization on aluminum alloy complex precision forging mold based on finite element [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (2): 180-184.
- [6] Kang J H, Park I W, Jae J S, et al. A study on a die wear model considering thermal softening; (I) Construction of the wear model [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 96 (1-3): 53-58.
- [7] Behrens B A. Finite element analysis of die wear in hot forging processes [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57 (1): 305-308.
- [8] 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.
- [9] 李宝聚. 热锻模具磨损有限元分析与优化 [D]. 济南: 山东大学, 2015.
Li B J. Finite Element Analysis and Optimization of Hot Forging Die Wear [D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [10] 王兴, 林育阳, 贺利乐, 等. 基于神经网络粉末冶金摆线转子成形模具磨损分析与优化 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (16): 44-48.
Wang X, Lin Y Y, He L L, et al. Wear analysis and optimization of powder metallurgy trochoidal rotor forming die based on neural network [J]. Hot Working Technology, 2022, 51 (16): 44-48.
- [11] Luo S Y, Zhu D H, Hua L, et al. Numerical analysis of die wear characteristics in hot forging of titanium alloy turbine blade [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 123: 260-270.
- [12] 殷剑, 黎诚, 金康, 等. 基于响应面法和修正 Archard 磨损理论的汽车前下摆臂热锻模具应力与磨损分析 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 231-238.
Yin J, Li C, Jin K, et al. Stress and wear analysis of hot forging die for automotive front hem arm based on response surface method and modified Archard wear theory [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 231-238.
- [13] 齐贺闯, 叶筱, 亢燕铭, 等. 基于田口方法与灰色关联分析的碰撞射流通风系统优化 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2022, 48 (6): 127-133, 142.
Qi H C, Ye X, Kang Y M, et al. Optimization of collision jet ventilation system based on taguchi method and grey correlation analysis [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2022, 48 (6): 127-133, 142.
- [14] Dehnad K. Quality Control, Robust Design, and the Taguchi Method [M]. Boston: Springer, 2012.
- [15] 梁强, 张贤明, 贾艳艳. 基于灰色关联分析的直齿轮冷挤压成形工艺参数优化 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (1): 69-76.
Liang Q, Zhang X M, Jia Y Y. Optimization of cold extrusion process parameters of spur gear based on grey correlation analysis [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (1): 69-76.
- [16] Du Y P, Zhao C Y, Tian Y, et al. Analytical considerations of flow boiling heat transfer in metal-foam filled tubes [J]. Heat and Mass Transfer, 2012, 48 (1): 165-173.
- [17] Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1988, 1 (1): 3-17.