

# 汽车加强板冲压模芯磨损分析及工艺参数优化

董竹林<sup>1</sup>, 李永锋<sup>2</sup>

(1. 山西工程科技职业大学 汽车工程学院, 山西 晋中 030619; 2. 太原理工大学 生物医学工程学院, 山西 太原 030002)

**摘要:** 针对 BR1500HS 高强钢加强板热冲压过程中凹模模芯磨损量大的问题, 利用 Deform 有限元软件进行了加强板的热冲压磨损分析。通过建立高强钢的材料模型并应用 Archard 修正模型来准确预测模芯的磨损行为, 选取对模芯磨损影响较大的板料加热温度、模芯预热温度、冲压速度以及模具间隙 4 个因素作为优化变量, 以模芯最大磨损深度为优化目标, 结合响应面理论建立了各变量关于优化目标的二阶响应面回归分析模型, 得到了模芯最大磨损深度随各变量的变化规律。模型寻优后确定的最佳工艺参数为: 板料加热温度为 680 °C、模芯预热温度为 380 °C、冲压速度为 45 mm · s<sup>-1</sup>、模具间隙为 2.25 mm。采用优化后的参数进行实际冲压试验, 模芯寿命提高了 32.2%, 解决了模芯磨损严重的问题。同时, 实际模芯寿命与响应面模型预测值和有限元模拟预测值相近, 验证了建模及优化结果的准确性。

**关键词:** 高强钢; 热冲压; 模芯磨损; Archard 修正模型; 响应面模型

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.06.012

**中图分类号:** TG386.41

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 06-0102-08

## Wear analysis and process parameter optimization on stamping die core for automobile reinforcing plate

Dong Zhulin<sup>1</sup>, Li Yongfeng<sup>2</sup>

(1. College of Automotive Engineering, Shanxi Vocational University of Engineering and Technology, Jinzhong 030619, China;  
2. College of Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030002, China)

**Abstract:** For the large wear amount of die core in the hot stamping process of BR1500HS high-strength steel reinforcing plate, the hot stamping wear of reinforcing plate was analyze by finite element software Deform, and the wear behavior of die core was accurately predicted by establishing the material model of high-strength steel and applying the Archard modified model. Then, taking the heating temperature of sheet metal, pre-heating temperature of die core, stamping speed and die clearance as the optimization variables, which had a significant impact on the wear of die core, and taking the maximum wear depth of die core as the optimization objective, a second-order response surface regression analysis model for each variable regarding the optimization objective was established by using response surface theory, the variation rule of the maximum wear depth of die core with each variable was obtained. After optimizing the model, the optimal process parameters were determined as the heating temperature of sheet metal of 680 °C, the pre-heating temperature of die core of 380 °C, the stamping speed of 45 mm · s<sup>-1</sup> and the die clearance of 2.25 mm. Furthermore, the actual stamping tests were conducted by the optimized parameters, and the life of die core was increased by 32.2%, solving the problem of severe wear of die core. At the same time, the actual life of die core was similar to the predicted values of response surface model and finite element simulation, verifying the accuracy of the modeling and optimization results.

**Key words:** high-strength steel; hot stamping; die core wear; Archard modified model; response surface model

为响应节能减排政策, 汽车行业逐渐向轻量化的方向发展, 对于高强钢的应用也越来越多, 其具

有质量轻、抗冲击能力强、耐腐蚀性好等优点, 主要成形方式为冲压, 材料利用率和生产效率高, 但因其具有低延伸性, 导致成形性能较差<sup>[1]</sup>。冷冲压时成形力要求大, 成形复杂板件的难度大, 对冲压设备要求高, 同时板件成形后回弹严重<sup>[2]</sup>, 并且也极易出现拉裂缺陷, 因此, 对于要求较高的板件通常采用热冲压技术<sup>[3-5]</sup>。热冲压能改善材料的成形性能, 消除内应力、提高塑性、降低变形抗力, 成

收稿日期: 2023-11-10; 修订日期: 2024-02-15

基金项目: 山西省交通运输厅科技计划项目 (2012-1-24)

作者简介: 董竹林 (1982-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: dzl198206@163.com

通信作者: 李永锋 (1982-), 男, 博士, 副教授

E-mail: lantian9980\_@163.com

形后板件的回弹量小,精度也较好。该技术的突破对于国内汽车工业的发展意义非凡,但温度因素的介入加剧了成形的复杂性,冲压前板料需加热至完全奥氏体化,并随后经配备冷却系统的模具快速成形、保压、淬火冷却,完成向马氏体的转变,该过程中易出现模具变形、模具开裂、模具磨损等各类问题,结合实际生产可知,模具磨损问题是高强钢热冲压中模具失效的最主要形式,占比接近80%,是成本的主要支出点。但是,关于成形高强钢的模具磨损问题的文献极少,因此,本文的研究能对各类高强钢热冲压工艺参数的确定提供一定的参考价值。

模具磨损是一个长期性问题,若单纯采用物理试验进行冲压参数的优化,成本高、效率低,并且易出错,费时费力。Archard J F 教授<sup>[6]</sup>建立的数学模型较好地描述了模具的磨损行为,众多学者在此基础上结合有限元模拟技术展开了大量的试验并解决了磨损问题。例如,张帅帅等<sup>[7]</sup>对铜合金热挤压冲头的磨损问题进行了研究,通过建立响应面模型得到了不同参数的影响规律并进行了参数优化;赵慧真等<sup>[8]</sup>为提高一种用于生产空心六角头杆件的芯模寿命,研究了不同结构芯模的磨损情况,同时对芯模的重要尺寸参数进行了优化,并研究了涂层的芯模寿命的影响;陆元三等<sup>[9]</sup>基于磨损模型了解了端盖成形过程中的凸模磨损情况,并建立了挤压次数与磨损量之间的数模关系,准确地预测了模具寿命;莫杰等<sup>[10]</sup>采用正交试验对某六角螺栓终锻工位的4个重要工艺参数进行了优化,有效降低了内六角冲头的磨损,解决了企业的实际问题。因此,本文选取一种 BR1500HS 高强钢加强板为研究对象,针对其

凹模模芯磨损量大的实际问题,通过建立冲压成形有限元模型和 Archard 修正模型来预测磨损行为,通过建立冲压参数与磨损之间的响应面模型进行优化研究,并联合现场冲压试验对改进后的工艺进行验证。

## 1 磨损理论与有限元建模

### 1.1 Archard 磨损理论

Archard 磨损理论的常规模型如式(1)所示。

$$Q = \int K \frac{p^a v^b}{H^c} dt \quad (1)$$

式中:  $Q$  为模具的磨损深度;  $p$  为模具表面接触压力;  $v$  为材料流动速度;  $H$  为热处理后的模具硬度;  $K$  为磨损因数,主要由模具材料和润滑条件决定;  $t$  为磨损时间;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为试验所得材料常数,对于本文模具材料 4Cr5MoSiV1 钢而言,  $a = b = 1$ ,  $c = 2$ <sup>[11]</sup>。

该模型默认磨损因数及模具硬度保持不变,但本文研究的为热冲压过程,涉及温度较高,冲压过程中模具材料特性会随着温度的升高而发生变化,从而改变模具的硬度和磨损因数。因此,在处理热冲压模具磨损问题时必须考虑温度效应的影响以提高磨损预测的精度,修正后的模型如式(2)所示,其中,  $K(T)$  和  $H(T)$  可利用硬度试验和磨损试验测定,其结果如图1所示。

$$Q(T) = \int K(T) \frac{pv}{H^2(T)} dt \quad (2)$$

式中:  $Q(T)$ 、 $K(T)$  和  $H(T)$  分别为磨损深度、磨损因数和模具硬度关于温度  $T$  的函数模型。

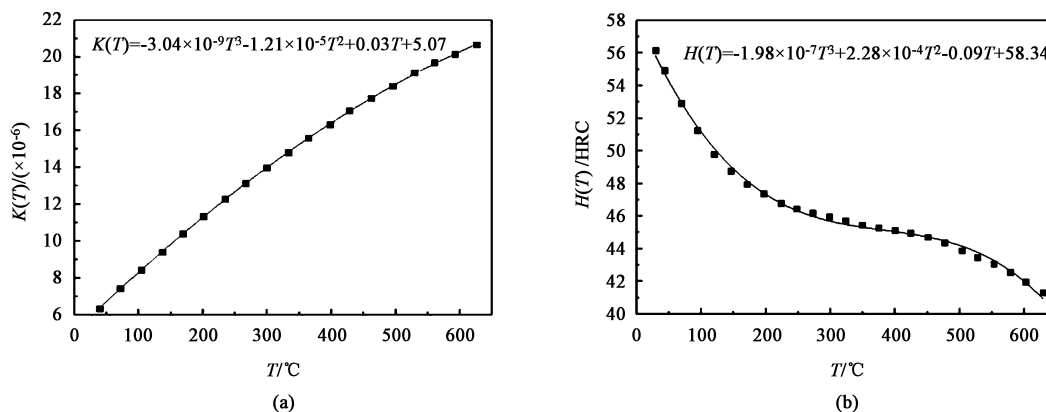


图1  $K(T)$  (a) 和  $H(T)$  (b) 随温度的变化曲线

Fig. 1 Changing curves of  $K(T)$  (a) and  $H(T)$  (b) with temperature

借助 FORTRAN 语言对修正后的模型进行程序

编译,并通过子程序接口导入到 Deform 中完成磨损

模型的定制。

## 1.2 有限元模型的建立

本文研究的加强板模型及冲压过程示意图如图 2 所示, 加强板材料为 BR1500HS 高强钢, 最大外径为  $\Phi 320$  mm、板料厚度为 2 mm。针对凹模模芯

磨损严重的问题进行参数优化, 目前, 凹模模芯的平均寿命为 12140 件, 通过三维扫描仪可知失效凹模模芯表面的平均最大磨损深度为 0.1 mm 左右, 可以此作为模芯磨损失效的参考。

为提高后续仿真试验的准确性, 在热模拟机上

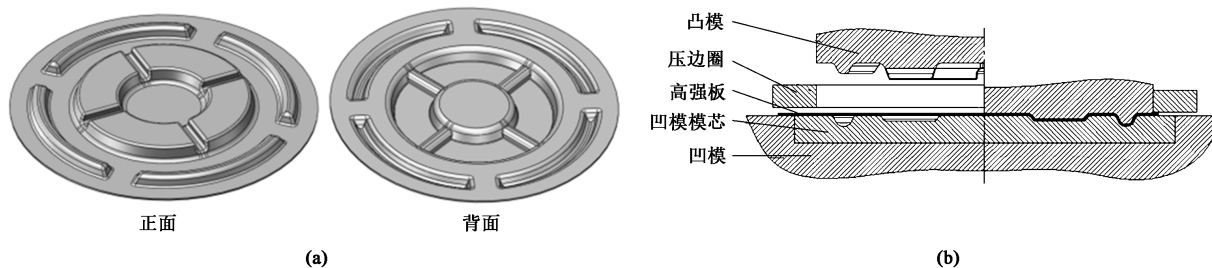


图 2 加强板的模型 (a) 及冲压过程示意图 (b)

Fig. 2 Model of reinforcing plate (a) and schematic diagram of stamping process (b)

对 BR1500HS 高强钢进行高温拉伸试验, 快速加热至 1000 °C 并保温使板料完全奥氏体化后, 分别冷却至试验温度并等温拉断, 最终拟合得到的不同温度、

不同应变速率下的真应力-真应变曲线如图 3 所示 (其中  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率), 并将数据导入 Deform 软件中建立材料模型。

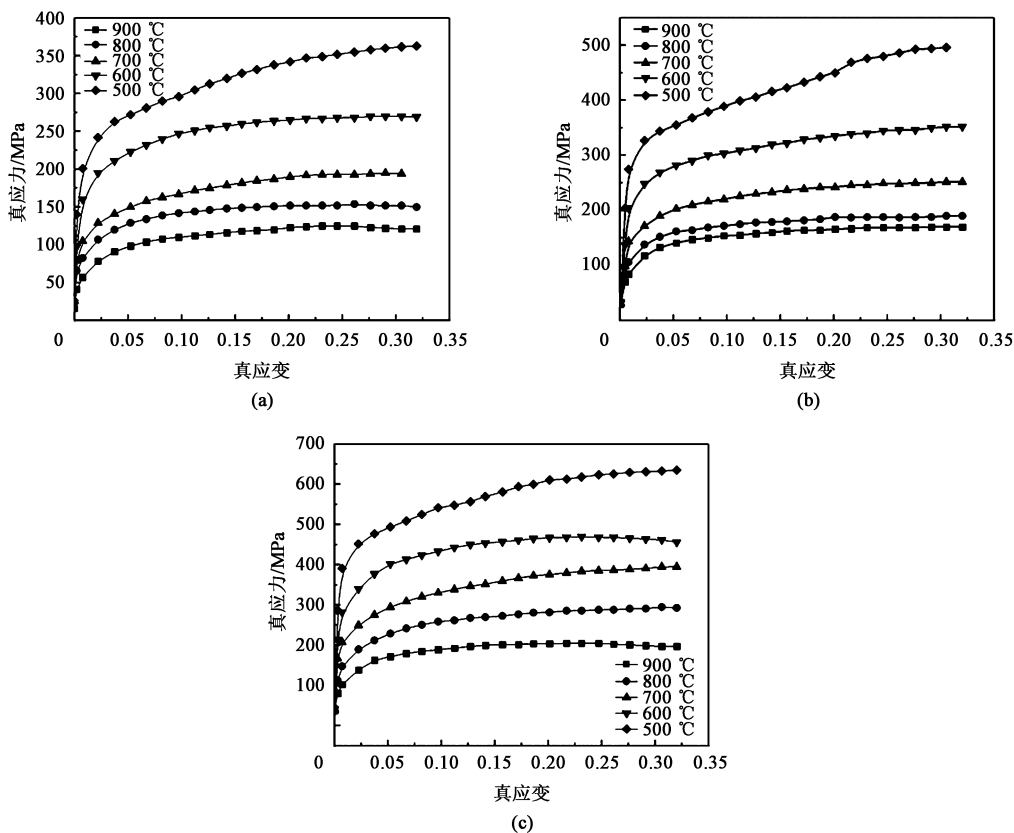


图 3 不同温度和应变速率下的真应力-真应变曲线

(a)  $\dot{\varepsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$  (b)  $\dot{\varepsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$  (c)  $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

Fig. 3 True stress-true strain curves at different temperatures and strain rates

按图 2b 所示建立冲压仿真模型, 板料视为塑性体, 划分网格数为 60000 个, 凸模、凹模模芯等视为刚体, 材料为 4Cr5MoSiV1 钢, 不同温度下的力学

性能如表 1 所示, 划分网格数均为 32000 个。凸模、压边圈为运动件, 凹模模芯、凹模为静止件, 先由压边圈压紧板料, 设置 195 kN 的压边力, 再由凸模

表 1 4Cr5MoSiV1 钢的力学性能

Table 1 Mechanical properties of 4Cr5MoSiV1 steel

温度/ ℃	杨氏模 量/GPa	热膨胀系数/ ( $\times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ )	泊松 比	屈服强 度/MPa	断面收缩 率/%	伸长率/ %
250	214	1.25	0.3	1207	45	6.1
300	210	1.28	0.3	1100	45	6.1
350	194	1.30	0.3	980	51	6.5
400	189	1.34	0.3	958	62	7.2

压下成形。根据式（2）可知，影响磨损的变量包括接触压力  $p$ 、材料流动速度  $v$  以及温度  $T$ ，综合考虑后，将板料加热温度、模芯预热温度、凸模冲压速度以及模具间隙作为研究因素，结合理论及生产经验，确定各因素的范围为：板料加热温度为 500~800℃、模芯预热温度为 250~400℃、冲压速度为 30~60 mm·s<sup>-1</sup>、模具间隙为 2.1~2.3 mm。板料与模具间为常剪切摩擦类型，摩擦因数为 0.3，模具与板料的热传导系数为 4000 W·(m<sup>2</sup>·K)<sup>-1</sup>、与空气的热传导系数为 5 W·(m<sup>2</sup>·K)<sup>-1</sup>，模芯的初始硬度设置为 55 HRC。按当前工艺进行参数设置，板料加热温度为 750℃、模芯预热温度为 310℃、冲压速度为 50 mm·s<sup>-1</sup>、模具间隙为 2.2 mm。建立的有限元模型如图 4 所示，模拟计算后得到的模芯磨损分布结果如图 5 所示，最大磨损深度为 8.618×10<sup>-6</sup> mm，当模芯的最大磨损深度累积达到 0.1 mm 时，可生产 11603 件左右，与模芯实际平均寿命的误差为 4.42%，误差值在可接受范围内，说明建模结果具有较高的可靠性，可利用该模型进行参数优化研究。

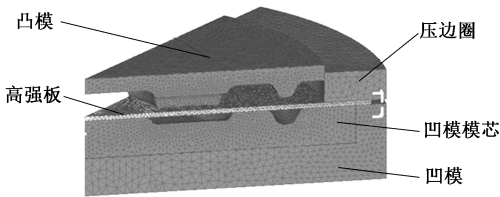


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

## 2 响应面理论与设计

### 2.1 响应面试验设计

响应面法是一种结合方案设计和数学建模，利用多元回归方程分析处理多因素优化问题的一种分析方法<sup>[12-13]</sup>，预测效果好，应用较多的有中心组合设计（Central Composite Design, CCD）和 Box-

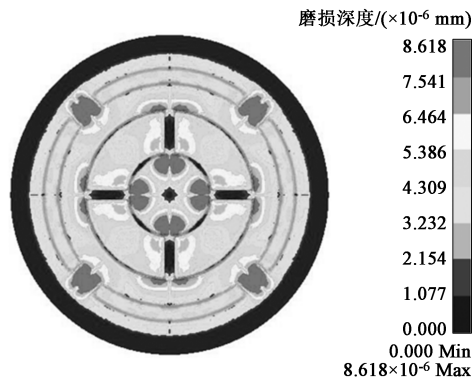


图 5 优化前模芯磨损有限元分析结果

Fig. 5 Finite element analysis results of die core wear before optimization

Benhnken（BBD）两种方法。由于采用 CCD 时，会出现最优参数取值超过限定范围的情况，因此，本文更适合采用 BBD 方法，且 BBD 方法所需的试验次数更少。通过 BBD 设计的参数水平如表 2 所示，为方便后续工作，将板料加热温度、模芯预热温度、冲压速度和模具间隙分别用  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  和  $x_4$  表示，通过 Design-Expert 生成的 29 组不同参数组合试验方案如表 3 所示，以模芯最大磨损深度  $Q_{\max}$  为响应量，通过 Deform 软件依次模拟获得，结果如表 3 所示。

表 2 BBD 设计的参数水平

Table 2 Parameter levels of BBD design

参数	水平 1	水平 2	水平 3
$x_1/^\circ\text{C}$	500	650	800
$x_2/^\circ\text{C}$	250	325	400
$x_3/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	30	45	60
$x_4/\text{mm}$	2.1	2.2	2.3

对 29 组磨损数据采用二次多项式进行拟合处理，得到 4 个参数关于模芯最大磨损深度的回归方程如式（3）所示。图 6 给出了模芯最大磨损深度的有限元模拟预测值与回归方程预测值间的相关性示意图，图 6 中散点表示有限元模拟预测值，直线表示回归方程预测值，散点越接近直线，表明相关性越好。由图 6 可知，散点基本沿直线两侧分布，说明相关性较高，回归方程能够有效预测模芯最大磨损深度。

$$\begin{aligned} Q_{\max} = & 19.614 - 0.033x_1 + 0.088x_2 - 0.205x_3 - \\ & 12.708x_4 - 2.889 \times 10^{-6}x_1x_2 - 4.667 \times 10^{-5} \times \\ & x_1x_3 + 2.667 \times 10^{-3}x_1x_4 + 7.778 \times 10^{-5}x_2x_3 - \\ & 0.037x_2x_4 + 0.062x_3x_4 + 2.317 \times 10^{-5}x_1^2 - \\ & 2.20 \times 10^{-5}x_2^2 + 1.467 \times 10^{-3}x_3^2 + 5.25x_4^2 \quad (3) \end{aligned}$$



表 3 试验方案及模芯最大磨损结果

Table 3 Test schemes and maximum wear results of die core					
方案 序号	$x_1/^\circ\text{C}$	$x_2/^\circ\text{C}$	$x_3/$ ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$x_4/\text{mm}$	$Q_{\max}/$ ( $\times 10^{-6}\text{mm}$ )
1	650	325	60	2.1	8.48
2	800	325	45	2.1	7.92
3	650	400	45	2.1	8.01
4	650	325	45	2.2	7.74
5	500	400	45	2.2	8.11
6	650	325	60	2.3	9.10
7	650	400	60	2.2	8.91
8	650	325	30	2.3	7.47
9	800	250	45	2.2	8.12
10	650	325	45	2.2	7.74
11	650	400	45	2.3	7.38
12	500	325	60	2.2	9.25
13	650	250	45	2.1	7.41
14	650	250	45	2.3	7.89
15	650	250	60	2.2	8.73
16	650	325	45	2.2	7.74
17	650	400	30	2.2	7.09
18	650	325	45	2.2	7.74
19	500	325	30	2.2	7.77
20	800	400	45	2.2	7.81
21	650	325	30	2.1	7.22
22	500	325	45	2.3	8.73
23	500	250	45	2.2	8.29
24	800	325	60	2.1	9.21
25	500	325	45	2.1	8.39
26	650	325	45	2.2	7.74
27	800	325	45	2.3	8.42
28	800	325	30	2.2	8.15
29	650	250	30	2.2	7.26

2.2 模型可靠性验证

对式 (3) 进行方差分析, 进一步检验模型的显著性, 是否能较好地反映试验参数与模芯最大磨损深度之间的关系。表 4 为模芯最大磨损深度  $Q_{\max}$  的方差分析表, 表中  $F$  值为显著性指标,  $F$  值越大越好,  $P$  值为差异性检验指标。由表 4 可知, 该模型的  $F$  值为 19.27,  $P$  值<0.0001, 意指出现更大  $F$  值的概率小于 0.01%, 说明模型的显著性较强。此外, 通过拟合系数  $R$ 、校正拟合系数  $R_{\text{adj}}$  以及信噪比

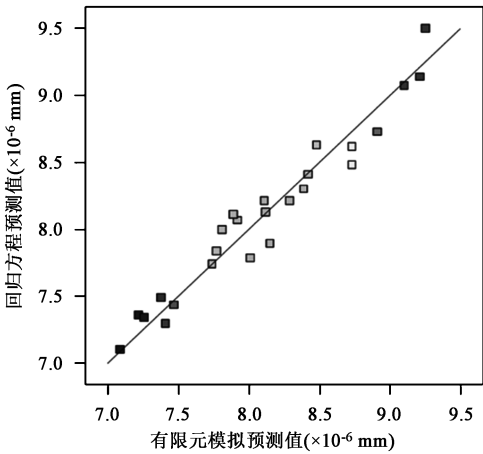


图 6 模芯最大磨损深度的有限元模拟预测值与回归方程预测值的相关性

Fig. 6 Correlation of die core maximum wear depth between finite element simulation and regression equation predicted values

表 4 模芯最大磨损深度的方差分析

Table 4 Variance analysis on maximum wear depth of die core					
方差来源	平方和	自由度	均方差	$F$ 值	$P$ 值
模型	9.6500	14	0.6900	19.270	<0.0001
$x_1$	0.3600	1	0.3600	10.190	0.0065
$x_2$	0.3400	1	0.3400	9.370	0.0085
$x_3$	0.1000	1	0.1000	2.790	0.1171
$x_4$	0.0019	1	0.0019	0.052	0.8226
$x_1x_2$	0.0042	1	0.0042	0.120	0.7362
$x_1x_3$	0.0440	1	0.0440	1.230	0.2856
$x_1x_4$	0.0064	1	0.0064	0.180	0.6787
$x_2x_3$	0.0310	1	0.0310	0.860	0.3705
$x_2x_4$	0.3100	1	0.3100	8.610	0.0109
$x_3x_4$	0.0340	1	0.0340	0.960	0.3446
$x_1^2$	1.7600	1	1.7600	49.270	<0.0001
$x_2^2$	0.0990	1	0.0990	2.780	0.1178
$x_3^2$	0.7100	1	0.7100	19.750	0.0006
$x_4^2$	0.0180	1	0.0180	0.500	0.4912
残差	0.50	14	0.036		
失拟项	0.50	10	0.050		
纯误差	0.000	4	0.000		
总和	10.15	28			
$R=0.9507$ $R_{\text{adj}}=0.9013$ 信噪比=17.638					

同样能对模型的可靠性进行检验。表 4 中,  $R$  值为 0.9507, 表明该模型的拟合精度高达 95.07%, 模拟值与预测值的误差极小;  $R_{\text{adj}}$  值为 0.9013, 表明该模型能对 90.13% 的试验响应值进行解释, 表明模

型的预测性较好,可靠性较高;信噪比是检验模型分辨能力的指标,一般以4为检验水平<sup>[14]</sup>,由表4可得该模型的信噪比为17.638(远大于4),因此,认为该模型的分辨能力较强。综上分析可知,建立的4个参数关于模芯最大磨损深度的回归方程的可靠性较好。

### 2.3 响应曲面分析与优化

由方差分析中各参数的 $F$ 值大小可知,各参数对模芯最大磨损深度影响程度的排序为: $x_1 > x_2 > x_3 > x_4$ ,为进一步了解4个参数的变化对模芯最大磨损深度产生的影响,建立响应曲面进行直观分析,如图7所示。由图7a可得,模芯最大磨损深度随着板

料加热温度的升高先减小后增大,随着模芯预热温度的升高先增大后减小。这是因为:板料加热温度不仅影响材料的变形速度,对模芯温度也存在一定的影响,因此,对模芯磨损的影响并非简单的单调关系,而模芯预热温度过高会直接降低模芯的强度,加快模芯磨损速度,温度过低会影响板料变形,使成形力变大,也会加速模芯磨损。由图7b可得,模芯最大磨损深度随着冲压速度的增大而增大,随着模具间隙的增加而减小。这是因为:冲压速度越大,材料变形越快,接触压力越大,导致模芯磨损加剧,而在合理范围内增加模具间隙,有利于减小接触压力,缓解模芯磨损速度。

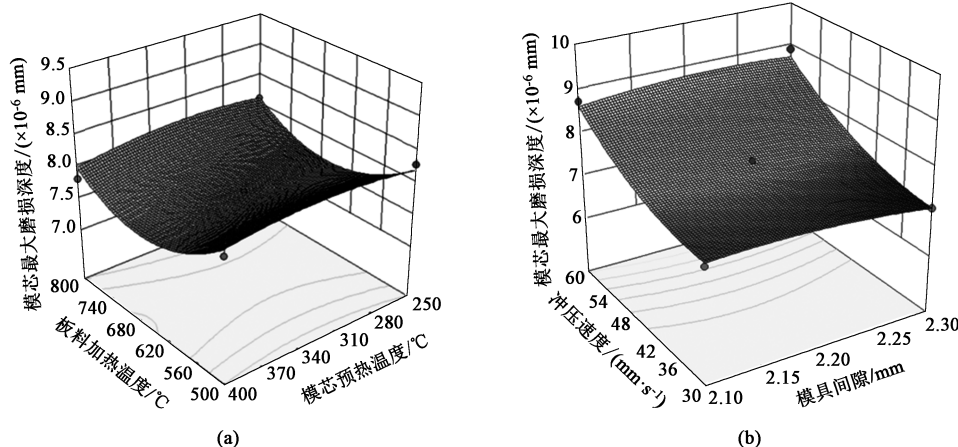


图7 模芯最大磨损深度与各参数的关系

(a) 板料加热温度与模芯预热温度 (b) 冲压速度与模具间隙

Fig. 7 Relationships between maximum wear depth of die core and various parameters

(a) Heating temperature of sheet metal and pre-heating temperature of die core (b) Stamping speed and die clearance

综合以上分析可知,选取的4个参数之间均存在一定的交互影响,且对模芯最大磨损深度影响较大,进行优化是非常有必要的。该优化问题可转化为如式(4)所示的数学形式。

$$\begin{cases} \text{优化参数: } x_1, x_2, x_3, x_4 \\ \text{优化目标: } \min(Q_{\max}) \\ \text{参数取值范围: } \begin{cases} 500\text{ }^{\circ}\text{C} \leq x_1 \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 250\text{ }^{\circ}\text{C} \leq x_2 \leq 400\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 30\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \leq x_3 \leq 60\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \\ 2.1\text{ mm} \leq x_4 \leq 2.3\text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

通过 Design-Expert 软件对式(4)进行求解,可知优化参数的最终取值如下:板料加热温度为 $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、模芯预热温度为 $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、冲压速度为 $45\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、模具间隙为 $2.25\text{ mm}$ ,优化后模芯最大磨损深度为 $6.352 \times 10^{-6}\text{ mm}$ ,与表2中数据进行

对比可知优化效果显著。

### 3 有限元分析与试模验证

按优化获得的参数在 Deform 中重新设定,进行加强板的热冲压模拟,加强板成形过程如图8所示,成形效果较好,未见拉裂、褶皱等问题,说明模具间隙较为合理。凹模模芯磨损分布情况如图9所示,磨损严重位置与优化前一致,但磨损程度得到了一定改善,面积和深度均明显减小,模芯最大磨损深度为 $6.487 \times 10^{-6}\text{ mm}$ ,与模型预测最优结果 $6.352 \times 10^{-6}\text{ mm}$ 相比,误差值仅为2.28%,说明预测模型准确,优化参数可靠。经计算可知,响应面模型预测寿命为15743件,有限元模拟预测寿命为15415件。采用优化后参数进行实际冲压试验,设备采用 THP01 热冲压成形液压机,最终统计出模芯的平均寿命在16050件左右,较目前的模芯寿命提高了

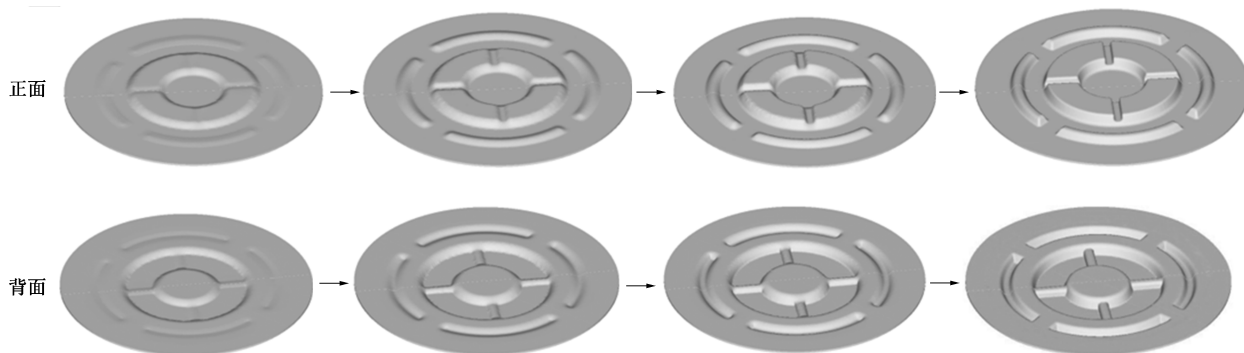


图 8 加强板成形过程

Fig. 8 Forming process of reinforcing plate

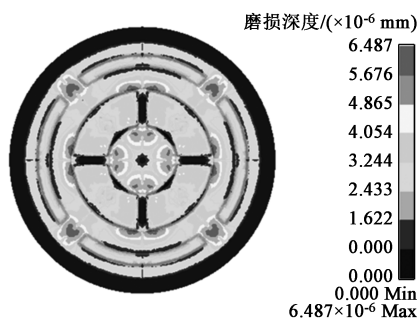


图 9 优化后模芯磨损的有限元分析结果

Fig. 9 Finite element analysis results of die core wear after optimization

32.2%，与响应面模型预测值和有限元模拟预测值

均非常接近。模芯实际磨损分布情况如图 10 所示，图 10 中圈出的磨损严重部位与模拟结果基本一致，验证了有限元建模与模拟结果的准确性，同时也验证了响应面模型和优化结果的准确性。

#### 4 结论

(1) 建立了 BR1500HS 高强钢的材料模型以及加强板冲压仿真模型，并基于 Archard 修正磨损模型，完成了当前工艺参数下的模芯磨损分析，通过与实际情况对比，验证了建模结果的可靠性。

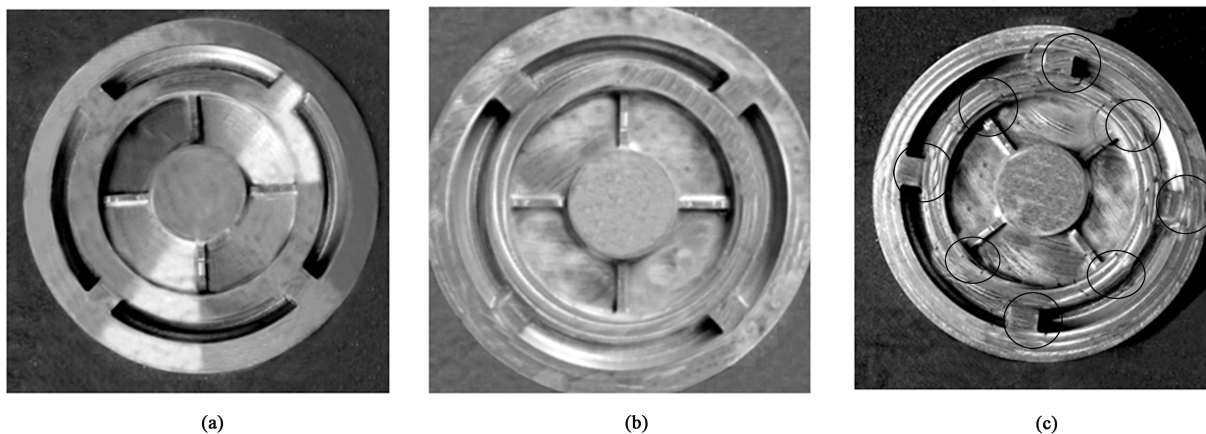


图 10 模芯实际磨损

(a) 冲压 3000 件左右 (b) 冲压 10000 件左右 (c) 冲压 15000 件左右

Fig. 10 Actual wear of die core

(a) Stamping about 3000 pieces (b) Stamping about 10000 pieces (c) Stamping about 15000 pieces

(2) 基于响应面理论，建立了模芯磨损的优化模型，并进行了可靠性验证，最终获得的最佳工艺参数为：板料加热温度为 680 ℃、模芯预热温度为 380 ℃、冲压速度为 45 mm · s<sup>-1</sup>、模具间隙为 2.25 mm。此外，各参数对模芯最大磨损影响程度

排序为：板料加热温度>模芯预热温度>冲压速度>模具间隙。优化后模芯的实际平均寿命约为 16050 件，与优化前相比提高了 32.2%，解决了凹模模芯磨损严重的实际问题。

(3) 将有限元分析结果、响应面模型预测结果

与实际冲压试模结果进行了对比,误差较小,验证了响应面分析与有限元分析的准确性,表明该方法能被应用于解决实际生产中的一系列模具磨损问题,有效降低试模成本。

#### 参考文献:

- [1] Wang W R, Zhang L, Guo M X, et al. Non-isothermal deformation behavior and FE simulation of ultrahigh strength BR1500HS steel in hot stamping process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87 (9-12): 1-15.
- [2] 张辉, 潘爱琼, 李世云. BR1500HS 板料热冲压成形工艺参数影响分析与试验研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (19): 97-99, 103.
- Zhang H, Pan A Q, Li S Y. Analysis and experimental study on process parameters of hot stamping of BR1500HS sheet metal [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (19): 97-99, 103.
- [3] 李沁阳, 杨昭, 洪圆圆. 高强 BR1500HS 钢热冲压成形的计算机模拟研究 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (1): 137-140.
- Li Q Y, Yang Z, Hong Y Y. Computer simulation on hot stamping of high strength BR1500HS steel [J]. Foundry Technology, 2018, 39 (1): 137-140.
- [4] Hajbarati H, Zajkani A. A novel finite element simulation of hot stamping process of DP780 steel based on the Chaboche thermo-mechanically hardening model [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 111 (9-10): 1-14.
- [5] Li J B. Research on springback during hot stamping with uniform and local-thickened sheet blanks [J]. Key Engineering Materials, 2021, 871: 73-79.
- [6] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24 (8): 981-988.
- [7] 张帅帅, 张彦敏, 韩文奎, 等. 基于响应曲面法的 QCr0.5 铜合金热挤压冲头磨损数值分析 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (9): 80-85.
- Zhang S S, Zhang Y M, Han W K, et al. Numerical analysis of punch wear of QCr0.5 copper alloy in hot extrusion based on response surface method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (9): 80-85.
- [8] 赵慧真, 崔华丽. 基于有限元分析的车用空心六角头杆件芯模寿命研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (7): 177-183.
- Zhao H Z, Cui H L. Study on service life of core mold for vehicle hollow hexagonal rod based on finite element analysis [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (7): 177-183.
- [9] 陆元三, 王培安, 郭欢欢. 挤压次数对端盖凸模磨损的失效模拟研究 [J]. 材料保护, 2020, 53 (1): 96-100, 119.
- Lu Y S, Wang P A, Guo H H. Failure simulation of extrusion times on endface punch wear [J]. Materials Protection, 2020, 53 (1): 96-100, 119.
- [10] 莫杰, 刘坚, 李旋, 等. 基于正交试验的内六角冲头磨损分析及工艺参数优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 1-6.
- Mo J, Liu J, Li X, et al. Wear analysis and process parameter optimization on hexagon punch based on orthogonal test [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 1-6.
- [11] 宋宇, 张丰收, 皇涛, 等. 基于高温磨损的 H13 热作模具钢磨损规律和模型研究 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (4): 187-193.
- Song Y, Zhang F S, Huang T, et al. Study on wear law and model of H13 hot working die steel based on high-temperature wear [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (4): 187-193.
- [12] 吕雷雷, 张东民, 朱景秋, 等. 基于响应面法的接合螺栓冷成形工艺参数优化 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (9): 94-97.
- Lyu L L, Zhang D M, Zhu J Q, et al. Optimization of cold forming process parameters of joint bolts based on response surface method [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (9): 94-97.
- [13] 张宏伟. 基于响应面的车用连接板拉伸成形性能及优化 [J]. 中国科技论文, 2020, 15 (2): 240-243.
- Zhang H W. Drawing formability and optimization of vehicle connecting plate based on response surface method [J]. China Sciencepaper, 2020, 15 (2): 240-243.
- [14] 申晨彤, 龚红英, 尤晋, 等. 基于 Dynaform 及响应面法的封头零件冲压成形及优化 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (1): 54-59.
- Shen C T, Gong H Y, You J, et al. Stamping and optimization of head parts based on Dynaform and response surface method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (1): 54-59.

## 《锻压技术》郑重声明

为充分尊重作者权益,坚决抵制学术不端行为,积极倡导优良学风,努力为学术创新营造良好氛围,本刊郑重声明:对一稿多投,重复发表,存在署名有争议,引用他人著述未注明出处,抄袭、剽窃、弄虚作假,或以上情况的变相形式等学术不端行为的文章,坚决拒绝刊登。一经发现,立即撤稿,并由本刊视情节轻重给予书面警告、拒绝刊登有其署名的稿件、通知其所在单位等处理。轻者给予 3~5 年不允许刊发其论文的处罚,情节严重者,将以适当方式予以公布,该作者的论文永久不得刊用。

《锻压技术》编辑部