基于响应面法的连杆模锻成形载荷影响因素研究

贾德文¹, 孙艳¹, 邓伟¹, 冀会平², 王茜², 彭益源^{1,3}

(1.昆明理工大学 云南省内燃机重点实验室,昆明 650500;2.云南西仪工业股份有限公司, 昆明 650114;3.昆明云内动力股份有限公司,昆明 650200)

摘要:目的 解决 42CrMo 连杆预锻成形过程中因成形载荷较大导致的模具损坏风险较大和使用寿命低的问题。方法 构建连杆预锻成形的仿真模型,分析不同坯料温度、模具温度、模锻速度、摩擦因数对成形载荷 的影响规律,基于 Box-Behnken 试验设计与响应面法对连杆预锻的成形载荷进行研究,并结合多岛遗传算 法进行优化。结果 在多因素交互下,各工艺参数按对成形载荷显著性影响由大到小的顺序依次为:坯料温 度、摩擦因数、模锻速度、模具温度。当坯料温度为1190 ℃、模具温度为350.7 ℃、模锻速度为532.5 mm/s、 摩擦因数为0.1 时,成形载荷为3226.6 kN,相比原工艺的成形载荷降低了50.74%。模锻试验后成形效果较 好,说明了优化工艺参数的合理性。结论 优化后的工艺参数可使成形载荷明显降低,该研究可为连杆实际 模锻成形的生产提供有效指导。

关键词:连杆;成形载荷;响应面法;多岛遗传算法 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.05.023

中图分类号: TG316 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2023)05-0193-09

Affecting Factors of Forming Load of Connecting Rod Die Forging Based on Response Surface Method

JIA De-wen¹, SUN Yan¹, DENG Wei¹, JI Hui-ping², WANG Xi², PENG Yi-yuan^{1,3}

 (1. Yunnan Key Laboratory of Internal Combustion Engines, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Xiyi Industry Co., Ltd., Kunming 650114, China;
 3. Kunming Yunnei Power Co., Ltd., Kunming 650200, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the high risk of die damage and low service life 42CrMo connecting rods due to the large forming load in pre-forging. The pre-forging simulation model of connecting rods was constructed, and the effect law of different billet temperature, die temperature, die forging speed and friction coefficient on forming load was analyzed. Based on the Box–Behnken test design and response surface method, the forming load of pre-forging was studied and optimized in combination with the multi-island genetic algorithm. The results showed that under the interaction of multiple factors, the order of the

Fund: Major Science and Technology Special Program of Yunnan Province(202202AC080006)

收稿日期: 2022-07-24

Received: 2022-07-24

基金项目:云南省重大科技专项计划(202202AC080006)

作者简介:贾德文(1977-),男,博士,副教授,主要研究方向为车辆结构分析与优化。

Biography: JIA de-wen(1977-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: vehicle structure analysis and optimization. 通讯作者: 彭益源(1983—), 男,硕士,高级工程师,主要研究方向为内燃机性能、设计与结构优化。

Corresponding author: PENG Yi-yuan(1983-), Male, Master, Senior engineer, Research focus: Performance, design and structure optimization of Internal combustion engine.

引文格式: 贾德文, 孙艳, 邓伟, 等. 基于响应面法的连杆模锻成形载荷影响因素研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 193-201. JIA De-wen, SUN Yan, DENG Wei, et al. Affecting Factors of Forming Load of Connecting Rod Die Forging Based on Response Surface Method[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5): 193-201.

significant effect of each process parameter on the forming load was: billet temperature, friction coefficient, die forging speed, and die temperature. When the billet temperature was 1 190 °C, the die temperature was 350.7 °C, the die forging speed was 532.5 mm/s, and the friction coefficient was 0.1, the forming load was 3 226.6 kN, which was 50.74% lower than the original process. The forming effect after the die forging test was good, which showed the rationality of optimizing the process parameters. The optimized parameters can significantly reduce the forming load. This research can provide effective guidance for production in actual die forging forming of connecting rods.

KEY WORDS: connecting rod; forming load; response surface method; multi-island genetic algorithm

连杆作为发动机曲柄连杆机构中的重要零部件, 对其性能要求较高,需具有足够高的尺寸精度、疲劳强 度、结构刚度^[1]。目前连杆的生产主要依赖模锻工艺, 利用专用模具使毛坯锻压成形,从而获得所需锻件^[2]。 模锻生产效率高,劳动强度低,加工余量小,适用于 批量生产,而且锻压出来的产品流线是按锻件轮廓分 布的,具有较好的尺寸精度和力学性能^[3]。在实际模 锻过程中,上模需要压力机施加足够大的压力,才能 使坯料达到成形要求,所以模锻过程所需的载荷较 大,模具长期受热交变负荷的作用,模具的磨损会比 较剧烈,寿命也普遍偏低^[4]。不合理的工艺参数会提 高对压力机载荷的要求,模具会承受更大的载荷^[5]。 成形载荷越大,在连杆模锻过程中模具整体受力越 大,模具可能会出现较为严重的磨损,相反,如果该 值较小,则表明模具的受力较小,模具的磨损较小, 有利于延长模具的使用寿命。成形载荷最大值是衡量 模具使用寿命的指标^[6],故有必要研究工艺参数对成 形载荷的影响。

目前,国内外研究学者对模锻工艺进行了大量研 究^[7-9]。大多数工程技术人员对连杆模锻工艺参数优 化主要采用经验设计的方法^[3]。部分研究学者利用有 限元数值模拟的方法对连杆模锻工艺进行了研究^[10-11]。 Jia 等^[12]探究了温度对材料填充情况和模具磨损情况 的影响。闫中原等^[13]采用单因素法研究了不同始锻温 度、冲头速度对成形载荷、损伤值及最大等效应变的 影响并进行了优化研究。秦庆磊等^[14]分析了连杆模锻 的应力-应变分布规律。Zhang 等^[15]研究了不同加载 方式下铝合金连杆的成形效果及成形特性曲线变化 规律。高冲等^[16]基于 Cockcroft-Latham 断裂模型研究 了不同工艺参数对连杆锻件损伤的影响规律。张松泓 等^[17]采用正交试验法对连杆模锻模具磨损的失效行 为进行了分析并对模具寿命进行了预测。但是目前关 于采用有限元法与优化算法相结合的方法对多个参 数交互作用下成形载荷影响的研究及优化分析较少。 因此,结合优化算法对模锻工艺参数进行分析及优化 具有重要意义,可为连杆实际模锻成形的生产提供有 效指导。

文中以 42CrMo 连杆为研究对象,采用单参量扫 值法分析不同坯料温度、模具温度、模锻速度、摩擦 因数对预锻成形载荷的影响,在此基础上,建立响应 面模型分析多因素交互作用对成形载荷的影响规律, 并结合多岛遗传算法对成形载荷进行全局寻优。

1 有限元模型建立

1.1 研究对象

以 42CrMo 连杆为研究对象,运用三维建模软件 建立连杆预锻仿真所需的坯料、上模、下模的三维模 型,根据实际预锻情况进行装配及相对位置的调整, 然后导入 DEFORM 软件中进行仿真计算。连杆二维 预锻坯料图、预锻件图、模具图如图 1 所示。连杆预 锻上模型腔结构如图 2 所示。



Fig.1 Two-dimensional pre-forging billet diagram, forging diagram and die diagram of connecting rod (mm): a) view of billet; b) view of pre-forged parts; c) view of the die



图 2 连杆预锻上模型腔结构 Fig.2 Cavity structure of pre-forging upper die for connecting rod

1.2 有限元模型及仿真分析

连杆材料为 42CrMo,故在软件材料库中选择对应 牌号 AISI-4140,类型选择塑性体,划分网格数量为 100 000,生成的最小网格尺寸为 0.758 mm。上模和 下模的材料均为 H13 钢,对应牌号选择 AISI-H13, 类型选择刚性体,划分的网格数量为 100 000,并细 化模具型腔部分的网格。坯料与上模及下模的摩擦类 型选择剪切摩擦,坯料及模具与空气的换热系数为 0.02 W/(m².℃),坯料与上模、下模的换热系数为 11 W/(m².℃)。

基于该连杆的实际生产在仿真模型中进行参数 设置。坯料温度为1000℃,模具温度为200℃,摩 擦因数为0.3,下模固定,上模模锻速度为600mm/s。 仿真计算得到等效应变、等效应力分布如图3所示, 可知等效应变最大值为3.22,等效应力最大值为 333 MPa。成形载荷最大值为6549.50 kN,与试验收 集的成形载荷最大值6800 kN相比,偏差为3.68%。



图 3 夺XX应受、夺XX应力力币 Fig.3 Diagram of equivalent strain and equivalent stress distribution: a) equivalent strain; b) equivalent stress

2 单因素影响研究

为研究坯料温度、模具温度、模锻速度、摩擦因数 对成形载荷的影响,选择其中一个参数的各个水平进行 扫值,保持其他3个参数不变,进行4次单参量扫值^[18]。 2.1 坯料温度

通过仿真模型研究不同坯料温度对成形载荷的 影响,当模具温度为 200 ℃、模锻速度为 600 mm/s、 摩擦因数为 0.3 时,选取坯料温度 900~1 250 ℃进行 研究,坯料温度对成形载荷的影响如图 4 所示。可以 看出,成形载荷随坯料温度的增大呈减小趋势,这是 由于材料的塑性会随着温度的升高而变大,其变形抗 力会随温度的升高而降低。由此可知,坯料温度越高, 成形载荷越小,但由于条件限制,坯料温度一般不大 于 1 200 ℃。



Fig.4 Effect of billet temperature on forming load

2.2 模具温度

当坯料温度为 1 000 ℃、模锻速度为 600 mm/s、 摩擦因数为 0.3 时,选取模具温度 150~550 ℃进行研 究。模具温度对成形载荷的影响如图 5 所示,可以看 出,成形载荷随模具温度的增大而减小,当模具温度 由 150 ℃升高到 550 ℃时,成形载荷下降了 16.53%, 这是由于模具温度的升高使坯料温度下降的速度变 慢,坯料变形抗力减小,成形载荷降低,故模具温度 对成形载荷有一定的影响。



Fig.5 Effect of die temperature on forming load

2.3 模锻速度

当坯料温度为 1 000 ℃、模具温度为 200 ℃、摩 擦因数为 0.3 时,选取模锻速度 400~650 mm/s 进行 研究。模锻速度对成形载荷的影响如图 6 所示,可以 看出,随着模锻速度的增加,成形载荷呈现先减小后 增大的趋势。这是因为随着模锻速度的增大,坯料的 变形速度加快,流动性变好,坯料与模具之间的热交 换时间缩短,热传递损失减少,坯料会保持相对较高 的温度,故成形载荷呈减小趋势。但是当模锻速度增 加到一定值时,随着模锻速度的增大,坯料变形速度 逐渐加快,热力耦合产生的热量不易散发且坯料的变 形抗力增大,成形载荷就会增大。当模锻速度为 525 mm/s 时,成形载荷最小,为 5 444.58 kN。



2.4 摩擦因数

当坯料温度为 1 000 ℃、模具温度为 200 ℃、模 锻速度为 600 mm/s 时,选取摩擦因数 0.05~0.55 进行 研究。摩擦因数对成形载荷的影响如图 7 所示,可以 看到,成形载荷随摩擦因数的增大而增大,这是由于 摩擦力的增大使模锻过程中金属材料的流动受阻,坯



Fig.7 Effect of friction coefficient on forming load

料的变形阻力增大,从而使模具受到的载荷增大。当 摩擦因数大于 0.3 时,随着摩擦因数的增大,成形载 荷增大的幅度变小。

3 模锻工艺参数优化

当使用单参量扫值法研究模锻工艺参数对成形 载荷的影响时,无法考虑多个因素之间的交互作用, 结果容易受主观影响。响应面法(Response Surface Methodology, RSM)是研究多因素之间交互作用的 一种统计方法,通过合理的试验设计进行试验,得到 一定的样本点,利用多元二次回归方程将各个参数与 目标值之间的函数关系进行拟合,建立响应面模型, 对多个因素之间的交互作用进行评价和分析,进而寻 求最优参数,对目标值进行优化^[19]。

3.1 试验设计及方差分析

在单因素研究的基础上,采用响应面法中的 Box-Behnken Design 试验设计方法,通过较少的试验次数 获得合理的试验点来拟合各参数和响应之间的回归 方程,建立响应面模型^[19]。选取坯料温度(A)模 具温度(B)模锻速度(C)摩擦因数(D)为优化 变量,以成形载荷 Y 为响应,设计四因素三水平响应 面试验。各参数水平设置如表1所示,计算结果如表 2 所示。

结合表 2 的结果,选用最小二次多项式函数拟合的方法,通过数学函数变换对试验因素及响应参数进行 二次多项式拟合,得到成形载荷 Y 的二次回归方程见式 (1),并得出其回归方程方差分析结果,如表 3 所示。

 $Y = -5\ 358.22 + 6.52A - 3.8B + 31.43C +$

 $16\ 715.47D + 0.01AB - 13.18AD -$

 $0.02BC + 7.44BD - 0.1CD - 0.01A^2 +$

 $0.01B^2 - 0.02C^2 - 493.91D^2 \tag{1}$

由表 3 的方差分析结果可知,回归模型的 P 值小 于 0.000 1,说明该模型显著程度较高。F 值表示模型 的响应值随各变量波动的大小,比较 F 值得出各工艺 参数按对成形载荷显著性影响由大到小的顺序依次 为:坯料温度、摩擦因数、模锻速度、模具温度。根 据模型显著性检验方法,将模拟项的 P 值与 0.05 和 0.000 1 比较,发现因素 A (坯料温度) D (摩擦因 数)的 P 值都小于 0.000 1,说明它们对目标值的影 响都极为显著。

3.2 响应面模型的建立

通过表 2 的试验设计数据点和回归分析方法可 以建立多因素交互影响下的成形载荷响应面模型,根 据 4 个设计变量、1 个优化目标,可以建立 6 个响应 面 3D 模型。选取因素 *A、B* 与因素 *A、D* 这 2 个具 有代表性的 3D 模型,如图 8 和图 9 所示。

Tab.1 Level setting of each parameter												
Parameters	Blank temperatu	are $A/^{\circ}\mathbb{C}$ Die tempe	rature <i>B</i> /°C Die forging spe	ed $C/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Friction factor D							
Minimum val	lue 900	1:	50 50	500								
Maximum val	lue 1 200	4	50 60	600								
Number of lev	vels 3		3 3	3								
表 2 计算结果												
Tab.2 Calculation results												
Serial number	Blank temperature/ $^{\circ}\!\mathrm{C}$	Die temperature/°C	Die forging speed/(mm \cdot s ⁻¹)	Friction factor	Forming load/kN							
1	1 050	450	500	0.25	4 862.23							
2	1 050	150	550	0.45	5 764.61							
3	1 050	450	550	0.05	4 080.95							
4	1 050	150	600	0.25	5 813.75							
5	1 050	300	550	0.25	5 063.52							
6	1 050	150	550	0.05	4 230.47							
7	900	300	550	0.45	7 196.45							
8	900	300	550	0.05	4 891.00							
9	1 200	300	600	0.25	3 616.30							
10	1 200	300	500	0.25	3 530.83							
11	900	450	550	0.25	6 278.98							
12	1 200	150	550	0.25	3 648.83							
13	1 200	300	550	0.45	4 073.68							
14	1 050	300	550	0.25	5 063.52							
15	1 200	450	550	0.25	3 582.87							
16	900	300	500	0.25	5 971.68							
17	1 050	450	550	0.45	6 507.46							
18	1 050	300	550	0.25	5 063.52							
19	900	300	600	0.25	6 061.54							
20	1 050	300	600	0.05	4 199.06							
21	1 050	150	500	0.25	5 068.26							
22	1 050	450	600	0.25	4 942.73							
23	1 200	300	550	0.05	3 350.31							
24	1 050	300	500	0.05	3 681.89							
25	1 050	300	550	0.25	5 063.52							
26	1 050	300	500	0.45	5 948.77							
27	1 050	300	600	0.45	6 461.83							
28	1 050	300	550	0.25	5 063.52							
29	900	150	550	0.25	7 106.98							

表 1 各参数水平设置 b.1 Level setting of each paramet

表 3 响应面模型方差分析 Tab.3 ANOVA of response surface model

Factor	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F	Р
model	3.363×10 ⁷	14	2.402×10^{6}	27.71	< 0.000 1
A	2.055×10^{7}	1	2.055×10^{7}	237.13	< 0.000 1
В	1.582×10^{5}	1	1.582×10^{5}	1.83	0.198 1
С	3.439×10 ⁵	1	3.439×10 ⁵	3.97	0.066 2
D	1.106×10^{7}	1	1.106×10^{7}	127.59	< 0.000 1
Residual error	1.213×10^{6}	14	86 663.53		
Misfit error	1.213×10^{6}	10	1.213×10 ⁵		
Pure Error	0.000	4	0.000		







图 9 坯料温度和摩擦因数对成形载荷响应面图 Fig.9 Response surface plot of billet temperature and friction coefficient to forming load

由图 8 可明显看出, 坯料温度和模具温度对成形 载荷的影响强弱不一样, 坯料温度相较模具温度对成 形载荷的影响更强。由图 9 可知, 坯料温度与摩擦因 数相比, 坯料温度对成形载荷的影响更强, 摩擦因数 对成形载荷的影响较弱。由图 8、图 9 可知, 在以因 素 A、B、D 为变量, 成形载荷 F 为响应值的模型中, 存在成形载荷最小稳定点,并且不同因素对响应有不 同的影响, 坯料温度、摩擦因数对成形载荷的影响较 强, 这与方差分析中各工艺参数对成形载荷的影响显 著性高低顺序相符合。研究不同参数之间的相互作用 对目标值的影响, 可有助于后续获得降低成形载荷的 最优模锻工艺参数。

3.3 响应面模型的质量评价

为了保证模型的适应性和准确性,提高其拟合精

度,需要对模型的预测能力进行评估,进而对其精度进行评估,一般是对回归模型进行显著度检验^[20],采用负相关系数进行评定。负相关系数(*R*²)的计算公式见式(2)。

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (y_{i} - \tilde{y}_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{N} (y_{i} - \overline{y}_{i})^{2}}$$
(2)

式中: *ỹ_i* 为响应面的预测值; *y_i* 为第 *i* 个点的真 实值; *y_i* 为响应值的均值; *N* 为样本点的个数。

R²是判定拟合精度的度量值,R²越大,越接近1, 表示拟合效果越好、拟合精度越高。根据式(2)计 算得到回归模型的R²为0.965,大于0.95,表明响应 面模型拟合精度高,模型比较可靠,模型得到的试验 结果具有很好的一致性和预测能力,可用于后续的优 化设计。

为了进一步检验回归模型的精度及有效性,可在 试验设计变量的空间内随机对几个响应值进行预测, 并将预测值与试验值进行对比拟合,如图 10 所示。



图 10 成形载荷试验值与预测值对比 Fig.10 Comparison of test value and predicted value of forming load

图 10 中,方框越向直线靠近,说明误差越小, 拟合精度越高。由图 10 可知,除个别点的试验值与 预测值有偏差,其他预测值和试验计算的成形载荷基 本一致,这说明成形载荷预测模型较好,可信度比较 高,可以准确地预测响应值的各个实际值,可用于对 连杆最佳模锻工艺参数进行优化分析。

3.4 最优模锻工艺参数确定

当响应面模型的拟合精度较好时,可在此基础上 结合优化算法,在较少的计算时间内对连杆最佳模锻 工艺进行全局寻优。遗传算法是借鉴生物的进化、遗 传而推演出的一种可用于全局搜索的优化算法,可以 解决许多变量多、范围广的非线性反演问题^[21]。多岛 遗传算法是基于传统遗传算法改进而来的一种算法, 它将子代种群分为几个岛,使各个子群独立进化,并 在一定时间段内进行岛间迁移,从而进行信息交换, 增加种群多样性,防止早熟。与传统遗传算法相比, 多岛遗传算法具有更好的计算效率和全局寻优能力。 以成形载荷最小为优化目标、4个参数的水平上下限 为约束条件,采用多岛遗传算法进行全局参数优化, 目标函数如式(3)所示,约束函数如式(4)所示。

$$Y_{\min} = \min[Y(A, B, C, D)]$$
(3)

$$\begin{cases} 900 \le A \le 1\,200 \\ 150 \le B \le 450 \\ 500 \le C \le 600 \\ 0.05 \le D \le 0.45 \end{cases}$$
(4)

为了获得比较稳定的结果,多岛遗传算法的杂交 方式采用两点交叉式,选择制度采用最优淘汰制,并 将突变方式进行统一。将近似模型的初始种群个体数 设置为10,岛数设置为4,交叉概率设置为0.8,进 化代数设置为10,共对400个数据点进行寻优,最 终迭代至373次得到一组满足条件的全局最优解。成 形载荷目标函数迭代寻优过程如图11所示。



objective function



表 4 优化前后的参数及目标值对比 Tab.4 Comparison of parameters and objectives before and after optimization

Parameters and objectives	Original value	Optimiza- tion value	Rate of change/%
Α	1 000 °C	1 190 ℃	19
В	200 °C	350.7 ℃	42.97
С	600 mm/s	532.5 mm/s	11.25
D	0.3	0.1	63.33
F	6 549.5 kN	3 226.6 kN	50.74

为了验证预测的最佳模锻工艺参数的准确性与 有效性,将优化所得的最优模锻工艺参数代入仿真模 型中进行计算。优化的等效应变、应力分布如图 12 所示,载荷-行程曲线如图 13 所示。等效应变最大值 为 4.22,等效应力最大值为 253 MPa,成形载荷为 3 239.96 kN,与多岛遗传算法优化的响应值 3 226.6 kN 相比,偏差为 4.12%。





Fig.12 Diagram of optimized equivalent strain, equivalent stress distribution: a) equivalent strain; b) equivalent stress



Fig.13 Load-travel curve of the validation model

3.5 生产检验

采用优化后的工艺参数对坯料进行预锻、终锻及 后续加工,得到的连杆毛坯件如图 14a 所示,对其外 形进行检验及尺寸测量,可知毛坯件表面光滑,无折 叠、毛刺、裂痕等缺陷,外形尺寸达到设计要求,能 满足后续机械加工要求。连杆总成件如图 14b 所示, 参照 GB/T 228.1—2010^[22]进行连杆试样的拉伸试验, 对其拉伸力学性能进行检测,测得其抗拉极限为 930 MPa,屈服极限为 800 MPa。参照 JB/T126612016^[23],将连杆总成件样品在 MTS370 疲劳试验机上 进行疲劳性能测试。该连杆所用机型气缸最大爆发压 力为 6.5 MPa,最大受压工况载荷为 17.06 kN,最大 受拉工况载荷为 4.5 kN,螺栓装配拧紧力矩为 16.5 N·m。试验平均载荷为-5.7 kN,交变载荷幅值为 ±16~±39 kN,试验载荷循环基数为 10⁷,正弦波加载。 经检测该连杆总成样品件在交变载荷幅值为±24 kN 时未发生断裂,满足实际使用需求,证明了优化工艺 的合理性。





b 连杆总成件

图 14 连杆毛坯件、连杆总成件 Fig.14 Connecting rod billet, connecting rod assembly: a) billet of connecting rod; b) connecting rod assembly

4 结论

 利用单参量扫值法研究单因素对成形载荷的 影响,结果表明,成形载荷随坯料温度和模具温度的 升高而减小,随模锻速度的增加而先减小后增大,随 摩擦因数的增大而减小。

2)以成形载荷为目标设计了四因素三水平的响应面试验,并对成形载荷进行回归分析,得到各参数 按对成形载荷显著性影响由大到小的顺序依次为:坯 料温度、摩擦因数、模锻速度、模具温度。

3)通过函数多项式得出成形载荷的回归方程及 精度较高的响应面模型,在此基础上结合多岛遗传算 法进行优化,发现成形载荷由 6549.5 kN 减小到 3226.6 kN,降低了 50.74%。采用优化后的工艺参数 进行生产检验,结果表明,优化后的连杆具有很好的 成形效果及力学性能,满足使用要求。该研究可为连 杆实际成形的生产提供有效指导。

参考文献:

[1] 蒋爱香,赵建平,张旭东,等.某双燃料发动机的连杆 CAE 分析及优化设计[J].内燃机工程,2019,40(6): 86-92.

JIANG Ai-xiang, ZHAO Jian-ping, ZHANG Xu-dong,

et al. CAE Analysis and Optimization Design of Dual Fuel Engine Connecting Rod[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2019, 40(6): 86-92.

- [2] 齐莉, 于晓鹏. 基于 BP 神经网络的连杆锻压工艺优化[J]. 热加工工艺, 2020, 49(13): 96-99.
 QI Li, YU Xiao-peng. Optimization of Connecting Rod Forging Process Based on BP Neural Network[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(13): 96-99.
- [3] 王相钧, 王大勇, 王培涛, 等. 连接杆头预锻工艺参数优化研究[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(6): 36-41.
 WANG Xiang-jun, WANG Da-yong, WANG Pei-tao, et al. Process Parameters Optimization of Die Forging for Connecting Rod Head[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(6): 36-41.
- [4] 李朝亮,陈文琳,曹谦,等.基于负公差设计的卡车前轴成形工艺改进[J].塑性工程学报,2019,26(6): 30-35.

LI Chao-liang, CHEN Wen-lin, CAO Qian, et al. Improvement of Forming Process of Truck Front Axle Based on Negative Tolerance Design[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(6): 30-35.

[5] 张学奇,董万鹏,葛力华,等.基于正交试验的闭式 挤压工艺参数优化[J]. 塑性工程学报,2017,24(3): 84-89.

ZHANG Xue-qi, DONG Wan-peng, GE Li-hua, et al. Processing Parameters Optimization of Closed Extrusion Based on Orthogonal Experiment[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(3): 84-89.

- [6] XU H H, JING Y B, QI X M, et al. Automobile Connecting Rod Forging Optimization Based on DEFORM and Orthogonal Experiment[C]// Proceedings of 2019 5th International Conference on Mechanical Engineering and Automation Science (ICMEAS 2019), 2019.
- [7] 张旭辉,刘鑫,谭涛,等. 19 英寸 TBM 盘形滚刀刀圈 模锻成形研究[J]. 锻压技术, 2022, 47(6): 17-25.
 ZHANG Xu-hui, LIU Xin, TAN Tao, et al. Study on Die Forging for 19-Inch TBM Disc Hob Ring[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(6): 17-25.
- [8] 高健飞, 钱夏晔, 康佳良. 阀盖模锻成形模拟分析与 试验验证[J]. 精密成形工程, 2021, 13(6): 117-122. GAO Jian-fei, QIAN Xia-ye, KANG Jia-liang. Simulation Analysis and Test Verification of Valve Cover Forming[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(6): 117-122.
- [9] MAAREFDOUST R, MAAREFDOUST M. Analysis of Finite Volume of Forging Process of Connecting Rod[J]. Advanced Materials Research, 2012, 341: 313-317.
- [10] 黄河,王培安,张迎春,等.发动机连杆盖锻造上模 使用寿命[J]. 锻压技术,2021,46(11):68-73.
 HUANG He, WANG Pei-an, ZHANG Ying-chun, et al. Service Life of Forging Upper Die for Engine Connecting Rod Cap[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(11):68-73.
- [11] 刘艳梅, 赵美兰, 冯辉, 等. 7A09 铝合金模锻连杆件 的开裂分析[J]. 金属热处理, 2020, 45(1): 234-238.

LIU Yan-mei, ZHAO Mei-lan, FENG Hui, et al. Failure Analysis on Cracking of Die-Forged Connecting Rod of 7A09 Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(1): 234-238.

- [12] JIA Z, ZHOU J, JI J J, et al. The Effect of Temperature Condition on Material Deformation and Die Wear[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22: 2019-2028.
- [13] 闫中原,张晓波,徐洪磊,等.齿套闭塞式锻造成形研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(2): 33-38.
 YAN Zhong-yuan, ZHANG Xiao-bo, XU Hong-lei, et al. Closed Die Forging Forming of the Truncated Tooth Sleeve[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(2): 33-38.
- [14] 秦庆磊, 王亚平. 基于 Simufact 的连杆热锻成形数值 模拟[J]. 热加工工艺, 2018, 47(15): 148-150.
 QIN Qing-lei, WANG Ya-ping. Numerical Simulation of Hot Forging Forming of Connecting Rod Based on Simufact[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(15): 148-150.
- [15] ZHANG W, YU Y D. Closed-Die Forging Technology and Numerical Simulation of Aluminum Alloy Connecting Rod[J]. Open Physics, 2019, 17(1): 497-504.
- [16] 高冲,刘淑梅, 霍文军. 基于响应面法的铝合金连杆 锻造工艺优化[J]. 热加工工艺, 2020, 49(11): 97-100.
 GAO Chong, LIU Shu-mei, HUO Wen-jun. Optimization of Forging Process for Aluminum Alloy Connecting Rods Based on Response Surface Method[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(11): 97-100.
- [17] 张松泓, 徐颖若. 基于响应面法发动机连杆热锻模具 磨损失效分析[J]. 锻压技术, 2021, 46(7): 178-184.
 ZHANG Song-hong, XU Ying-ruo. Analysis on Wear Failure of Hot Forging Die for Engine Connecting Rod Based on Response Surface Method[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(7): 178-184.
- [18] 邓晰文,林贤衍,贾德文,等.柴油转子发动机的全 可变配气系统优化[J].农业工程学报,2021,37(4):

114-121.

DENG Xi-wen, LIN Xian-yan, JIA De-wen, et al. Optimization of Fully Variable Valve System in a Diesel Rotary Engine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(4): 114-121.

- [19] 李宝阁, 王进, 张会, 等. 基于响应面法的无芯模成 形精度研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(3): 34-39.
 LI Bao-ge, WANG Jin, ZHANG Hui, et al. Forming Accuracy of Mandreless Die Based on Response Surface Method[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(3): 34-39.
- [20] 聂学选,毕玉华,申立中,等.基于响应曲面法的柴油机 SCR 性能预测[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 64-72.
 NIE Xue-xuan, BI Yu-hua, SHEN Li-zhong, et al. Pre-

diction of SCR Performance of Diesel Engine Based on Response Surface Methodology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(10): 64-72.

- [21] 韩军, 段荣鑫, 张磊, 等. 采用多岛遗传算法的插齿 刀几何参数优化研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(5): 749-754.
 HAN Jun, DUAN Rong-xin, ZHANG Lei, et al. Study on Optimization of Geometric Parameters of Gear Shaper Cut-Ter with Multi-island Genetic Glgorithm[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(5): 749-754.
 [22] GB/T 228.1—2010, 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室
- [22] GB/1 228.1—2010, 金属材料拉伸试验第 1 部分: 至 温试验方法[S].
 GB/T 228.1—2010, Tensile Testing of Metallic Materials Part 1: Room Temperature Test Method[S].
- [23] JB/T 12661—2016,内燃机连杆疲劳试验方法[S]. JB/T 12661—2016, Fatigue Test Method for Internal Combustion Engine Connecting Rod[S].

责任编辑:蒋红晨