

基于正交实验的 TC4 钛合金连杆锻造工艺参数多目标优化

何葛豪¹, 邓伟¹, 贾德文¹, 冀会平², 杨建辉², 宋仲模¹

(1. 昆明理工大学 云南省内燃机重点实验室, 昆明 650504; 2. 云南西仪工业股份有限公司, 昆明 650114)

Multi-objective optimization of forging process parameters of TC4 titanium alloy connecting rod based on orthogonal experiment

HEGehao¹, DENG Wei¹, JIA Dewen¹, JI Huiping², YANG Jianhui², SONG Zhongmo²

(1. Yunnan Key Laboratory of Internal Combustion Engines, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China; 2. Yunnan Xiyi Industry Co., Ltd., Kunming 650114, China)

Abstract: In order to realize the green design of connecting rod hot forging process, based on Deform-3D platform, the method of orthogonal experiment and numerical simulation was used to optimize the TC4 titanium alloy connecting rod in hot forging process. Four process parameters, including initial forging temperature, forging speed, flattening amount and friction factor, were taken as factors affecting the performance of connecting rod. The influence rules of four evaluation indexes, including energy consumption, maximum forming load, deformation uniformity and maximum equivalent stress, were investigated. The optimal process plan of TC4 titanium alloy connecting rod was obtained by means of comprehensive frequency analysis. The quality and energy consumption of connecting rod before and after optimization were compared and analyzed. It is found that compared with the other three process parameters, the initial temperature of forging blank has the greatest influence on the energy consumption and quality of connecting rod hot forging. After optimization, the unit volume energy consumption decreased from 658.37J/mm³ to 417.16J/mm³, a decrease of 31.15%. The forming load decreased by 20.18% from 6560.36kN to 5236.42kN; The equivalent stress decreased by 2.73% from 226MPa to 220MPa, and the deformation uniformity decreased by 10.52% from 0.656 to 0.587. The metal filling of TC4 titanium alloy connecting rod is normal and there are no forging defects, so green manufacturing is realized.

摘要: 为了实现连杆热锻过程的绿色设计, 基于 Deform-3D 平台, 采用正交试验法与数值模拟相结合的方法对热锻成形过程中的 TC4 钛合金连杆进行多目标优化。以锻坯初始温度、锻造速度、压扁量、摩擦因子四个工艺参数作为影响连杆性能的因素, 探究其对能耗、最大成形载荷、变形均匀性以及最大等效应力 4 个评价指标的影响规律。通过直观分析以及极差分析确定较优方案, 借助综合频率分析法得到 TC4 钛合金连杆最优工艺方案, 并对优化前后的连杆质量以及能耗进行了对比分析。通过研究发现: 相对于其他三个工艺参数, 锻坯初始温度对连杆热锻成形过程的能耗、质量影响最大。优化后, 单位体积能耗由原来的 658.37J/mm³ 下降至 417.16J/mm³, 降幅达 31.15%; 成形载荷由 6560.36kN 降低至 5236.42kN, 下降了 20.18%; 等效应力由 226MPa 下降至 220MPa, 下降了 2.73%, 变形均匀性由 0.656 下降至 0.587, 上升了 10.52%。TC4 钛合金连杆热锻样品的金属填充正常, 无锻造缺陷, 实现了绿色制造。

关键词: TC4; 连杆; 锻造工艺; 工艺优化; 单位体积能耗; 正交试验法;

Key words: TC4; Connecting rod; Forging process; Process optimization; Energy consumption per unit volume; Orthogonal test method;

中图分类号: TH162 文献标识码: A

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 云南省科技厅重大科技专项计划 (202202AC080006); 云南省科技厅重大科技专项计划 (202202AB080011)

作者简介: 何葛豪(1996-), 男, 硕士生, 主要研究方向为内燃机零部件结构强度与连杆锻造成型分析, E-mail:2071665869@qq.com;

邓伟 (通讯作者), E-mail:1323364897@qq.com。

0 概述

目前发动机连杆材料主要是钢铁材料，而钛合金材料的密度约为钢铁的 60%，其比强度高、力学性能优越^[1]。在钛合金众多材料牌号中 TC4 钛合金是一种($\alpha+\beta$)型钛合金，其综合性能优良，冲击韧性强，已作为重要零部件应用于航空、航天、车辆工程等领域^[2-3]。但同时具有导热性较差、与模具之间的摩擦系数大、变形抗力高以及对变形温度和变形速率敏感等特点，属于典型的难成形材料，影响了钛合金材料在汽车领域的应用^[4-5]。因此，针对 TC4 钛合金连杆进行工艺参数优化设计具有实际应用意义^[6]。

目前，金属体积成形的优化研究方法大体上可以分为3类——解析法、实验法和数值模拟法^[7]。数值模拟技术作为一种高效、便捷的数值实验方法，可以弥补实验的不足，更为直观地得到连杆热锻过程中的金属三维流动规律、等效应力场、等效应变场以及速度场等流动细节^[8-10]。充分掌握连杆锻件成形过程中各场量的演变分布规律，有助于设计人员改型、获得更为准确的热力耦合模型，提高锻件的成形质量^[11-13]。

为了实现对零件成形质量以及降低能耗的优化目的，国内外学者针对塑性成形工艺参数开展了大量研究。大量学者根据有限元数据分析了不同金属薄板冲压成形工艺参数下对能耗的影响程度，并对样件进行能耗测量试验，验证了模型的准确性^[14-16]。Gao 等^[17]提出了一种节能高效的离合器结构，并对新型离合器进行了理论计算、仿真和试验，结果表明能耗下降了 18.4%。GAO M D^[18]运用有限元法，针对热成形工艺参数对零部件的成形质量和能源消耗展开了研究，结果显示较优化前能耗下降了 17.6%。PARK H S 等^[19]采用离散事件模拟模型与试验设计相结合的方法，对锻造过程各个参数与能耗的影响程度进行了分析，结果表明提高加热效率，锻造过程能量效率提高约 10%。梁强^[20]提出一套基于灰色关联分析的齿环热精锻成形工艺参数多目标优化设计方法，发现优化后的工艺参数可有效提高热锻成形过程中的锻件质量。王俊^[21]建立了基于响应面法的工艺参数和材料参数的预测模型，最后对响应面模型进行多目标可视化优化，得到优化后的

工艺参数。Jia, Yanyan^[22]采用灰色关联分析(GRA)和响应面法(RSM)相结合的方法对同步环成形质量进行多目标优化，优化后的工艺参数进行试锻，质量良好；而中北大学^[23-26]采用正交试验对不同工艺参数下连杆衬套挤压过程中成形质量进行了大量研究，事实证明正交试验是一种快速、高效、经济的优化工艺参数的方法。

国内外大量学者对金属热锻工艺参数优化研究主要围绕结构简单、易成形金属开展的，此情况下获取的工艺参数最优范围，无法很好的应用于 TC4 钛合金锻件下。而开发研制的 TC4 钛合金连杆锻件，不仅能够更好的帮助一些高强度发动机进行升级，而且有助于实现发动机的轻量化，从而降低排放。迄今为止，TC4 钛合金连杆在国内的应用寥寥无几，更不用说大范围推广，究其原因，是 TC4 钛合金连杆热锻成形工艺尚不成熟完备，成形质量也不能令人满意。因此，在此背景下，本文提出以某 1.0L 的 2 缸四冲程发动机连杆为研究对象，采用多目标正交试验的方法对 TC4 钛合金连杆进行工艺参数优化，拟定了 25 种优化方案，选择出最优组合方案，并对相关评价指标进行计算分析；采用综合频率分析法挑选出满足能耗、成形载荷、等效应力、变形的均匀性四个目标进行正交试验的多目标优化。按照优化后的工艺参数来完成 TC4 钛合金连杆锻件成形与检测，以验证工艺参数的可行性，为实际生产提供指导。

1 有限元模型的建立

1.1 研究对象

选用某 1.0L 的 2 缸四冲程发动机连杆为研究对象，其锻造毛坯图见图 1。材质为牌号为 TC4 钛合金(Ti-6Al-4V)，该合金是一种典型的难成形合金，主要用于高端轿车零部件的制造^[27-32]。关于其高温流变行为的研究较少，而材料的高温流变行为对制定合理的连杆热加工工艺和精确的数值模拟分析至关重要。其材料的主要化学成分见表 1。按照 GB/T228.1-2021《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》对力学性能进行了检测，TC4 钛合金的机械性能参数见表 2。不同变形温度、不同应变速

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 云南省科技厅重大科技专项计划(202202AC080006); 云南省科技厅重大科技专项计划(202202AB080011)

作者简介: 何葛豪(1996-), 男, 硕士生, 主要研究方向为内燃机零部件结构强度与连杆锻造成型分析, E-mail:2071665869@qq.com; 邓伟(通讯作者), E-mail:1323364897@qq.com。

率下 Ti-6Al-4V 的流动应力曲线曲线，材料的流变应力与变形温度、应变速率和应变呈非线性关系如图 1 所示。如图 1 所示：

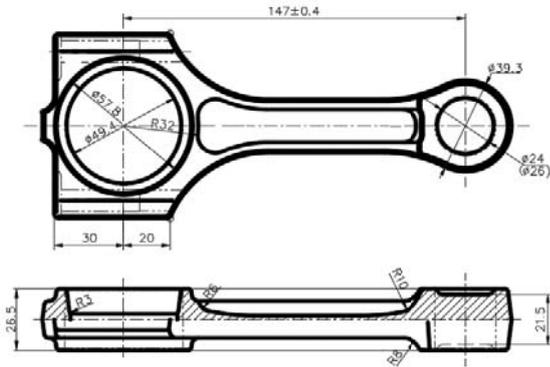


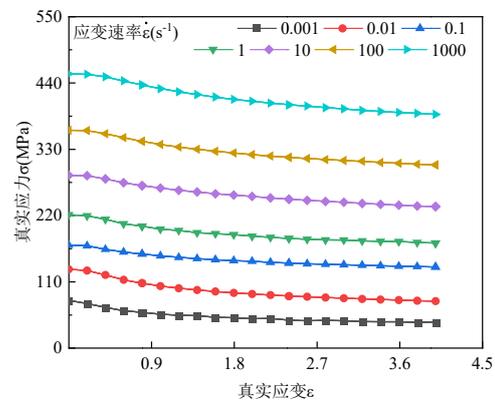
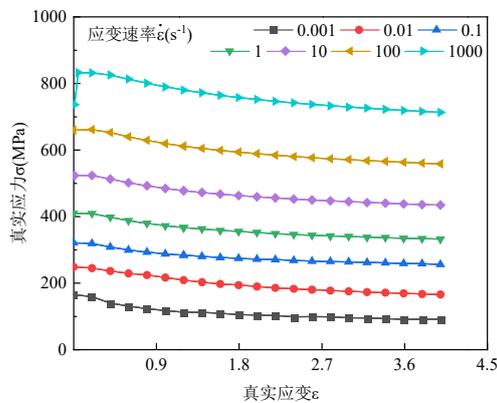
图 1 连杆二维模型

连杆的锻造材料为 TC4 钛合金，其材料的主要化学成分见表 1。

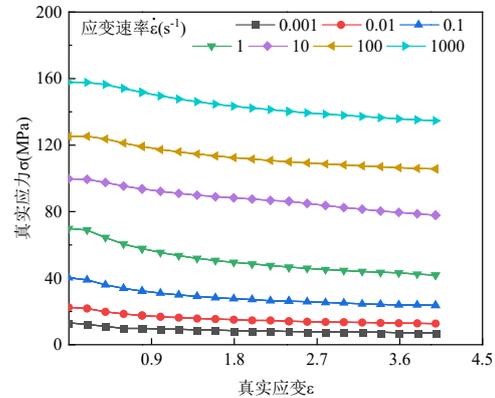
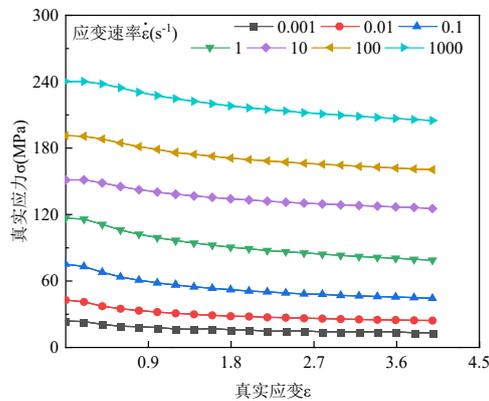
表 1 TC4 钛合金的主要化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of TC4 titanium alloy (% mass fraction)

| Al | V | Fe | O | H | C | Ti |
|-----------|-----------|-------|-------|--------|-------|----|
| 5.50~6.50 | 3.50~4.50 | ≤0.30 | ≤0.20 | ≤0.015 | ≤0.08 | 余量 |



(a) 750°C (b) 850°C



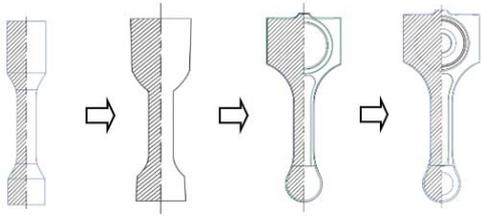
(c) 950°C (d) 1050°C

图 4 TC4 钛合金高温变形时的真实应力-真实应变曲线

1.2 连杆热锻成形工艺分析

该零件属于细长型零件，且连杆大头、小头和杆部形状不同，整体结构相对复杂。连杆的加工流程为：下料—中频感应加热—制坯—压扁—预锻—终锻—冲孔—机械车削加工。加工过程的重难点为连杆热锻成形，通过多次锻造成形连杆毛坯件，要求各部分充填饱满，无折叠、开裂等锻造缺陷，同时需要考虑工艺参数和成形能耗以提高成形质量和

模具使用寿命。在连杆锻件成形工序中压扁、预锻、终锻 3 个工位与连杆产品质量直接相关，本文选取以上成形工序进行研究。工序流程如图 2 所示。



压扁预锻终锻
图2 连杆锻造流程图

1.3 锻造仿真模型的建立

采用 Deform-3D 有限元软件，对 TC4 钛合金锻件进行成形模拟。采用 UG 软件建立连杆的坯料、压扁、预锻和终锻的上下模具模型，保存为 STL 文件格式，将其导入 Deform-3D 软件得中到其有限元模型，进行热锻过程的数值模拟仿真计算。采用

四面体网格单元对连杆锻坯三维几何模型进行划分。针对结构复杂变形而引起的网格畸变的问题，采用网格重划分技术来控制，保证其有限元求解的精度和迭代的收敛。连杆热锻成形的三维热力耦合有限元模型如图 3 所示：

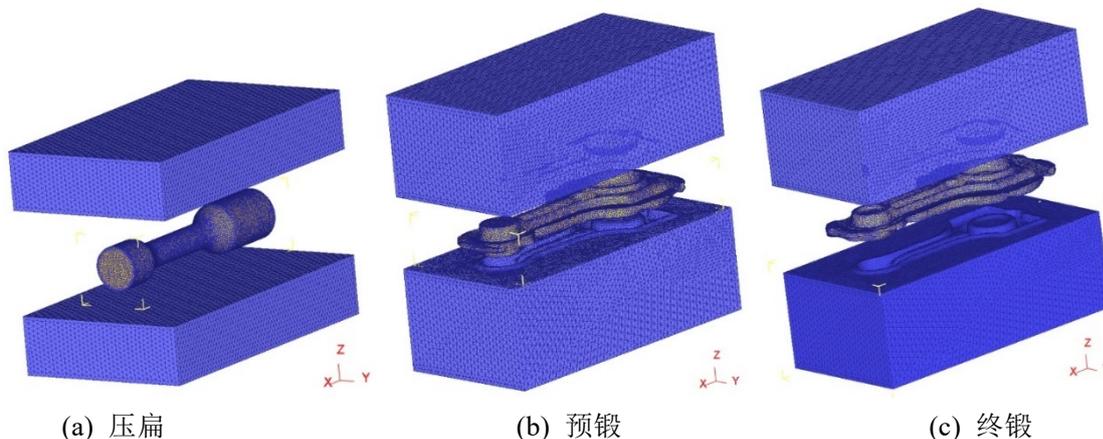


图 3 连杆热锻成形的三维热力耦合有限元模型

1.4 锻造仿真模型的参数设置

将图 4 中 TC4 钛合金材料不同温度下流动应力曲线导入 Deform-3D 软件来建立刚粘塑性流变应力模型^[7]；TC4 材料随着温度变化的杨氏模量 E 、导热系数 K_a 和热容 C ^[33]：

$$E = 104.94 - 0.052079 \times T \quad (1)$$

$$K_a = 0.0131 \times T + 6.45 \quad (2)$$

$$C = 2.36 + 3 \times 10^{-4} \times T + 2 \times 10^{-6} \times T^2 \quad (3)$$

由式(1)可知，随着温度的升高，TC4 钛合金的杨氏模量显著减小，因此在连杆热锻成形过程中，应尽量提高锻件的初始温度，有利于材料迅速软化、屈曲变形的发生。将坯料定义为弹塑性体，将模具定义为刚性体。设定坯料与上、下模具之间的接触摩擦为剪切摩擦。结果表明，有限元模拟中的摩擦力及其计算公式对模拟结果的精度影响很大。其公式可表示为^[35]。

$$\tau = mk \quad (4)$$

式中： τ 为摩擦应力， k 为剪切屈服应力， m 为摩擦系数。

连杆热锻过程中工件以及模具的重要力学性能以及热物性参数，锻造模拟工艺参数设定如表 3 所示：

表 2 模拟参数设定

| 参数 | 数值 |
|--|----------------------|
| 模具温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 300 |
| 摩擦因数 | 0.2 |
| 下模传热过程的热传导系数 $/(\text{N} \cdot (\text{mm} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$ | 1 |
| 锻造成形过程的热传导系数 $/(\text{N} \cdot (\text{mm} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$ | 11 |
| 热对流系数/ $(\text{N} \cdot (\text{mm} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$ | 0.02 |
| 热辐射率 | 0.7 |
| 位移步长/mm | 0.5 |
| 锻坯初始温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 950 |
| 锻造速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$ | 550 |
| 密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 4.51 |
| 泊松比/ ν | 0.342 |
| 杨氏模量 E/GPa | 104.94-0.05 2079T |

2 评价指标

判断连杆热锻成形工艺参数设计是否合理，首先确认连杆毛坯件是否出现锻造缺陷，如折叠、开裂等；其次评估毛坯件的充填效果，如连杆大头、工字形底部过渡圆弧、杆身与小头过渡圆弧等处是否充满型腔；第三考虑变形均匀性，检验连杆热锻变形分布均匀性；再者测试成形载荷，成形载荷的大小可以间接反映出工艺方案设计是否合理^[38]。

最后在满足上述条件下,考虑热锻各工序下的能量消耗因此,因此,连杆热锻成形的评价指标主要包括:有最大成形载荷 α 、最大等效应力 β 、变形均匀性 γ 、单位体积能耗 δ 。

2.1 单位体积能耗

在工业生产的绿色设计中,能耗的降低是实现碳达峰、碳中和目标的关键^[39],本次研究以连杆锻造过程中的压扁、预锻、终锻3个工序的能耗作为主要评价指标。具体以TC4钛合金连杆单位体积所需的成形能量展开研究,单位体积能耗的计算公式^[40-41]:

$$E_t = \left(1 + \frac{\mu}{3} \times \frac{D_t}{h}\right) \sigma_0 A v_t t_1 \quad (5)$$

$$E_{total} = E_t + E_f + E_e \quad (6)$$

$$E_{SEC} = \frac{E_{total}}{V_{total}} \quad (7)$$

式中: μ 为摩擦系数; D_t 模具宽度(mm); v_t 为移动速度(mm/s); t_1 为填充时间(s); h 为棒料压扁工序后的高度(mm); σ_0 为初始温度下材料的变形抗力(MPa); $A = \pi D^2 / 4$ 为坯料的横截面积(mm²); E_{total} 表示锻造成形过程的总能耗(J); E_t 表示压扁工序阶段的能耗(J); E_f 表示预锻工序阶段的能耗(J); E_e 表示终锻工序阶段的能耗(J)。 E_{SEC} 为单位体积能耗(J/mm³); V_{total} 为仿真参数下工件的体积(mm³);

2.2 锻件变形均匀性

为研究TC4钛合金连杆热锻过程中连杆锻件的变形均匀性,在连杆大头剖面沿终锻件与模具型腔轮廓取点(P1-P80),由上文可知,连杆大头的结构最复杂,连杆大头(除去飞边部分以及大头连皮)区域的变形最剧烈,与数值模拟的结果相吻合。因此选取连杆大头热锻过程中变形均匀性。

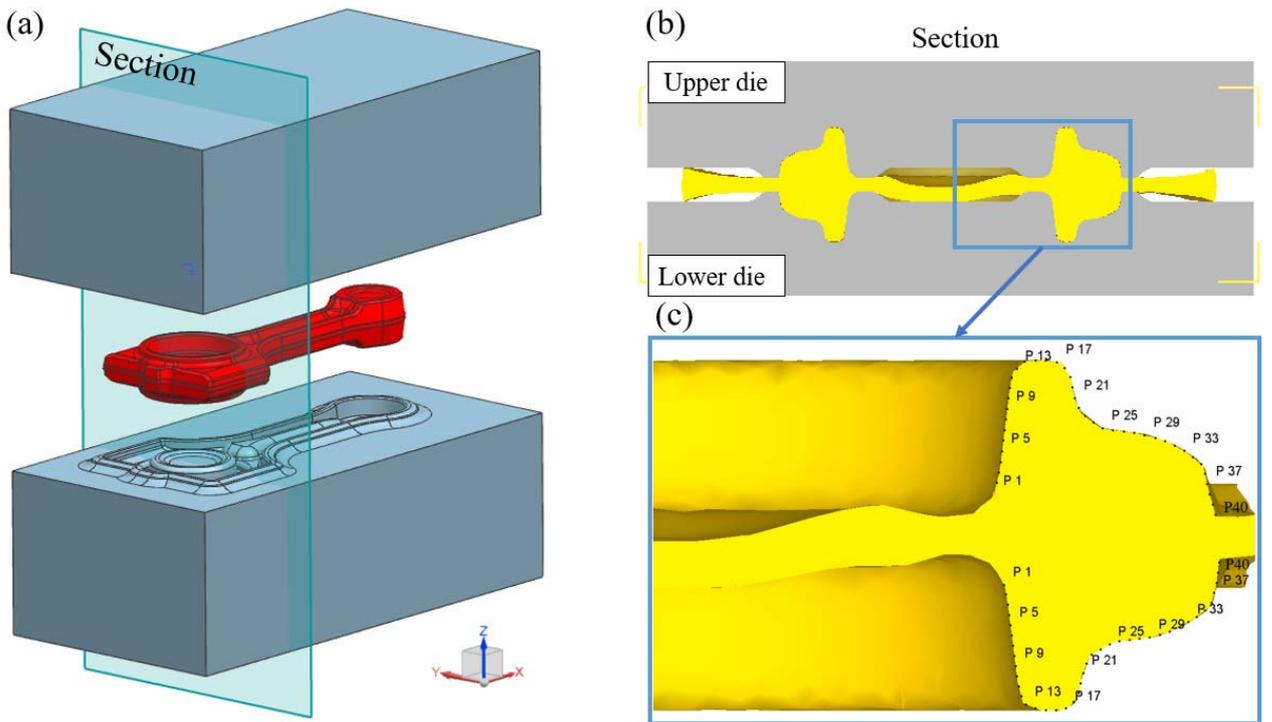


图 4.2 TC4 钛合金连杆锻件剖面及等效应变的位置信息

在研究 TC4 钛合金连杆锻造成形中，为揭示连杆热锻过程锻件的变形均匀程度，利用连杆锻件截面提取等效应力的数据计算该截面的等效应变的标准差作为评价该截面的变形均匀性的指标。等效应变的标准差代表该锻件变形分布均匀性越好，同时可以说明该锻件微观组织分布越均匀。等效应变的标准差的计算公式如下^[42]：

$$SDP = \sqrt{\sum_{i=1}^N (PEEQ_i - PEEQ_a)^2 / (N-1)} \quad (8)$$

$$PEEQ_a = \sum_{i=1}^N PEEQ_i / N \quad (9)$$

式中： i 为参考点编号； N 为参考点数量； $PEEQ$ 为等效应变； $PEEQ_i$ 为参考点第 i 个节点的等效应变； $PEEQ_a$ 为参考点的等效应变平均值。

2.3 成形载荷

成形载荷 T 是指在锻造过程中，模具所承受的最大成形载荷。在锻造过程中，减小成形载荷可以提高模具寿命以及降低能耗。成形载荷 T 计算公式如下^[43]：

$$T = \max(T_z) \quad (10)$$

式中： T_z 为上模受到沿 Z 方向上的力。

2.4 锻件内部等效应力

用锻件（除去飞边部分）连杆体的最大等效应力为评价锻件成形质量的指标，锻件等效应力的评价指标^[44]：

$$f_1(x) = S_{\max} \quad (11)$$

式中： S_{\max} 是锻件（除去飞边部分）连杆体的最大等效应力。

3 锻造工艺参数正交试验

3.1 正交试验设计

为 TC4 钛合金连杆热锻成形过程实现绿色制造主要从 2 个方面考虑——降低单位体积能耗及提高锻件成形质量。正交试验设计法是通过正交表挑选出代表性强的试验条件，安排试验计划进行试验，再利用极差分析对试验结果进行分析，找出最优方案^[45]。

设置 4 个评判指标：锻件变形均匀性、成形载荷、锻件内部等效应力、单位团体及能耗。选择锻坯初始温度（因素 A）、锻压速度（因素 B）、摩擦

系数（因素 C）及压扁量（因素 D），4 个因素进行正交试验研究。以原工艺参数锻坯初始温度 950℃、摩擦系数 0.3、压扁量 12mm、锻造速度 600mm/s 为参考；借助正交表和 Deform-3D 软件，对 TC4 钛合金连杆锻造过程进行数值模拟。本次正交试验共有 4 个试验因素，每个因素下有 5 个不同的水平。根据正交试验原理，采用四因素五水平 L25(5⁴)的正交试验方案，来研究不同因素对能耗和成形质量的影响。正交试验方案如表 4.4 所示：

表 4 正交试验因素水平表

| 水平 | 因素 | | | |
|----|--------|-------------------------|-----|--------|
| | A/(°C) | B/(mm·s ⁻¹) | C | D/(mm) |
| 1 | 8 | 400 | 0 | 1 |
| | 75 | | .2 | 2 |
| 2 | 9 | 450 | 0 | 1 |
| | 00 | | .25 | 4 |
| 3 | 9 | 500 | 0 | 1 |
| | 25 | | .3 | 6 |
| 4 | 9 | 550 | 0 | 1 |
| | 50 | | .35 | 8 |
| 5 | 9 | 600 | 0 | 2 |
| | 75 | | .4 | 0 |

3.2 正交试验结果处理与分析

正交试验仿真值结果处理见表4.6，按照传统试验方法，根据排列组合原理要进行625次试验，表2只需进行25次试验即可对试验结果进行综合处理，不仅缩短了试验时间，而且在试验结果处理也极大方便。

表 5 正交试验的方案

| 序号 | 因素 | | | |
|----|--------|-------------------------|-----|--------|
| | A/(°C) | B/(mm·s ⁻¹) | C | D/(mm) |
| 1 | 875 | 400 | 0 | 12 |
| | | | .20 | |
| 2 | 875 | 450 | 0 | 14 |
| | | | .25 | |
| 3 | 875 | 500 | 0 | 16 |
| | | | .30 | |
| 4 | 875 | 550 | 0 | 18 |
| | | | .35 | |
| 5 | 875 | 600 | 0 | 20 |
| | | | .40 | |
| 6 | 900 | 400 | 0 | 16 |
| | | | .25 | |
| 7 | 900 | 450 | 0 | 18 |
| | | | .30 | |
| 8 | 900 | 500 | 0 | 20 |
| | | | .35 | |
| 9 | 900 | 550 | 0 | 12 |
| | | | | |

| | | | | | |
|---|---|-----|-----|---|----|
| | | | .40 | | |
| 0 | 1 | 900 | 600 | 0 | 14 |
| | 1 | 925 | 400 | 0 | 20 |
| 1 | 1 | 925 | 450 | 0 | 12 |
| 2 | 1 | 925 | 500 | 0 | 14 |
| 3 | 1 | 925 | 550 | 0 | 16 |
| 4 | 1 | 925 | 600 | 0 | 18 |
| 5 | 1 | 950 | 400 | 0 | 14 |
| 6 | 1 | 950 | 450 | 0 | 16 |
| 7 | 1 | 950 | 500 | 0 | 18 |
| 8 | 1 | 950 | 550 | 0 | 20 |
| 9 | 2 | 950 | 600 | 0 | 12 |
| 0 | 2 | 975 | 400 | 0 | 18 |
| 1 | 2 | 975 | 450 | 0 | 20 |
| 2 | 2 | 975 | 500 | 0 | 12 |
| 3 | 2 | 975 | 550 | 0 | 14 |
| 4 | 2 | 975 | 600 | 0 | 16 |
| 5 | | | .35 | | |

表 4.6 正交试验结果

| 序号 | 评价指标 | | | |
|----|--------------------------------|----------------------|----------|--|
| | $\alpha/(\times 10^6\text{N})$ | $\beta/(\text{MPa})$ | γ | $\delta/(\text{J}\cdot\text{mm}^{-3})$ |
| 1 | 7.67 | 328 | 0.725 | 604.88 |
| 2 | 6.99 | 310 | 0.738 | 724.25 |
| 3 | 7.71 | 299 | 0.766 | 748.72 |
| 4 | 8.93 | 322 | 0.785 | 885.37 |
| 5 | 8.41 | 328 | 0.794 | 951.88 |
| 6 | 6.81 | 286 | 0.745 | 667.76 |
| 7 | 6.79 | 275 | 0.728 | 686.89 |
| 8 | 7.43 | 303 | 0.736 | 837.15 |
| 9 | 7.84 | 256 | 0.804 | 988.39 |
| 10 | 6.61 | 258 | 0.714 | 520.36 |
| 11 | 6.45 | 260 | 0.643 | 689.89 |
| 12 | 6.83 | 254 | 0.734 | 881.04 |
| 13 | 7.98 | 261 | 0.795 | 969.46 |
| 14 | 7.18 | 247 | 0.747 | 495.41 |
| 15 | 6.74 | 243 | 0.690 | 572.09 |

| | | | | |
|----|------|-----|-------|--------|
| 16 | 6.90 | 248 | 0.685 | 875.58 |
| 17 | 7.68 | 237 | 0.814 | 851.62 |
| 18 | 6.16 | 230 | 0.638 | 484.04 |
| 19 | 6.52 | 228 | 0.636 | 509.55 |
| 20 | 6.23 | 228 | 0.674 | 669.6 |
| 21 | 6.82 | 232 | 0.708 | 838 |
| 22 | 5.26 | 220 | 0.587 | 439.22 |
| 23 | 6.24 | 214 | 0.664 | 584.09 |
| 24 | 6.75 | 214 | 0.689 | 641.83 |
| 25 | 7.01 | 212 | 0.707 | 701.43 |

根据数值模拟计算结果,对正交试验的4个考察指标进行分析。先对每个考察指标进行单指标的直观分析,然后再利用直观分析结果进行极差分析,最终,根据直观分析与极差分析得到的结果,运用综合频率分析法进行分析,确定最佳试验方案。

对25组方案的正交试验结果进行直观分析,直观分析下的优化方案如表4.7所示:

表 4.7 直观分析优化方案

| δ | α | β | γ |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 方案 22: A5B2C1D5 | 方案 22: A5B2C1D5 | 方案 25: A5B5C4D3 | 方案 22: A5B2C1D5 |

3.3 极差处理与分析

极差分析法简单、直观,在计算出试验方案的指标值后,对各因素水平下的指标值进行统计参数 \bar{K} 值及 K_i 值的计算^[46]:

$$\bar{K} = \sum_{k=1}^n Y_k \quad (12)$$

$$K_i = \frac{1}{n} \bar{K} \quad (13)$$

式中: K_i 为各因素在*i*水平下多次结果的平均值; Y_i 为第*K*个指标值; \bar{K}_i 为 K_i 的平均值; n 为因素水平数; i 为水平数。极差计算公式^[47]:

$$R_j = \max \{K_1, K_2, \dots\} - \min \{K_1, K_2, \dots\} \quad (14)$$

(1) 单位体积能耗

根据上述公式的计算结果如表4.8所示,所考虑四个因素对能耗影响的顺序由大到小为:摩擦系数(C)>锻坯初始温度(A)>压扁量(D)>锻造速度(B)。以因素水平为横坐标,单位体积能耗为纵坐标,得到如图5所示的各因素水平与单位体积能耗关系图。极差反映了各因素对评价指标影响程度,极差越大,说明该因素对试验指标的影响越大,因此也就越重要^[47]。由单位体积能耗极差R可知,说明摩擦系数对能耗造成的影响最大,其次为锻坯初

始温度和压扁量，锻压速度对能耗的影响最小。

根据极差分析结果，优化参数组合方案为 A5B5C1D5，即工艺参数：锻坯初始温度 975°C、摩擦系数 0.2、压扁量 20mm、锻造速度为 600mm/s。通过对极差分析结果分析得到优选方案，说明了正交试验设计方法的高效性和经济性。

表 4.8 单位体积能耗极差分析结果

| 评价指标 | 因素 | A | B | C | D |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| 单位体积 能耗 | K_1 | 3815 | 3676 | 2544 | 3728 |
| | K_2 | 3700.5 | 3583 | 3058 | 3731.5 |
| | K_3 | 3608 | 3623.5 | 3437 | 3465 |
| | K_4 | 3390.5 | 3520.5 | 4180.5 | 3466.5 |
| | K_5 | 3204.5 | 3415.5 | 4599.5 | 3427.5 |
| | \bar{K}_1 | 763.0 | 735.2 | 508.8 | 745.6 |
| | \bar{K}_2 | 740.1 | 716.6 | 611.6 | 746.3 |
| | \bar{K}_3 | 721.6 | 724.7 | 687.4 | 693 |
| | \bar{K}_4 | 678.1 | 704.1 | 836.1 | 693.3 |
| | \bar{K}_5 | 640.9 | 683.1 | 919.9 | 685.5 |
| | 极差 R | 142.1 | 52.1 | 411.1 | 60.8 |
| | 排秩 | 2 | 4 | 1 | 3 |

(2) 最大成形载荷

根据上述公式的计算结果如表 4.9 所示，所考虑四个因素对最大成形载荷影响的顺序由大到小为：锻坯初始温度(A) > 摩擦系数(C) > 锻造速度(B) > 压扁量(D)。由最大成形载荷极差 R 可知，说明锻坯初始温度对成形载荷造成的影响最大，其次为摩擦系数和锻造速度，压扁量对成形载荷的影响最小。值得关注的是，锻坯初始温度的改变对连杆热锻变形的影响显著；当锻坯初始温度较小时，由 TC4 钛合金流动应力曲线及仿真结果可知其低温变形抗力大；当锻坯初始温度最大时，连杆热锻过程成形载荷显著减小。可以得出，在适当提高锻坯初始温度可以改善连杆锻件生产过程中能量消耗以及减小模具磨损，提高零部件质量。

根据极差分析结果，优化参数组合方案为 A5B2C1D5，即工艺参数：锻坯初始温度 975°C、摩擦系数 0.2、压扁量 20mm、锻造速度为 450mm/s。

表 4.9 最大成形载荷极差分析结果

| 评价指标 | 因素 | A/($\times 10^6$) | B/($\times 10^6$) | C/($\times 10^6$) | D/($\times 10^6$) |
|------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 最大成形 | K_1 | 39.71 | 34.65 | 32.88 | 34.81 |
| | K_2 | 35.48 | 33.55 | 33.3 | 35.23 |

| | | | | | |
|----|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 载荷 | K_3 | 35.18 | 35.52 | 33.93 | 36.39 |
| | K_4 | 33.49 | 37.22 | 37.1 | 35.44 |
| | K_5 | 32.08 | 35 | 38.73 | 34.07 |
| | \bar{K}_1 | 7.94 | 6.93 | 6.57 | 6.96 |
| | \bar{K}_2 | 7.09 | 6.71 | 6.66 | 7.04 |
| | \bar{K}_3 | 7.03 | 7.10 | 6.78 | 7.28 |
| | \bar{K}_4 | 6.69 | 7.44 | 7.42 | 7.09 |
| | \bar{K}_5 | 6.41 | 7 | 7.74 | 6.81 |
| | 极差 R | 1.52 | 0.73 | 1.17 | 0.46 |
| | 排秩 | 1 | 3 | 2 | 4 |

(3) 最大等效应力

根据上述公式的计算结果如表 4.10 所示，所考虑四个因素对等效应力影响的顺序由大到小为：锻坯初始温度(A) > 锻造速度(B) > 摩擦系数(C) > 压扁量(D)。由最大等效应力极差 R 可知，说明锻坯初始温度对最大等效应力造成的影响最大，其次为摩擦系数和锻造速度，压扁量对等效应力的影响最小。

表 4.10 最大等效应力极差分析结果

| 评价指标 | 因素 | A | B | C | D |
|------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 等效应力 | K_1 | 1587 | 1354 | 1283 | 1280 |
| | K_2 | 1378 | 1296 | 1281 | 1291 |
| | K_3 | 1265 | 1307 | 1276 | 1281 |
| | K_4 | 1171 | 1267 | 1339 | 1302 |
| | K_5 | 1092 | 1269 | 1314 | 1339 |
| | \bar{K}_1 | 317.4 | 270.8 | 256.6 | 256 |
| | \bar{K}_2 | 275.6 | 259.2 | 256.2 | 258.2 |
| | \bar{K}_3 | 253 | 261.4 | 255.2 | 256.2 |
| | \bar{K}_4 | 234.2 | 253.4 | 267.8 | 260.4 |
| | \bar{K}_5 | 218.4 | 253.8 | 262.8 | 267.8 |
| | 极差 R | 99 | 17.4 | 12.6 | 11.8 |
| | 排秩 | 1 | 2 | 3 | 4 |

根据极差分析结果，优化参数组合方案为 A5B4C3D1，即工艺参数：锻坯初始温度 975°C、摩擦系数 0.2、压扁量 20mm、锻造速度为 550mm/s。

(4) 变形均匀性

根据上述公式的计算结果如表 4.11 所示，所考虑四个因素对变形均匀性影响的顺序由大到小为：摩擦系数(C) > (A) > 压扁量(D) > 锻造速度(B)。由变形均匀性极差 R 可知，说明摩擦系数对变形均匀性造成的影响最大，其次为锻坯初始温度和压扁量，

锻造速度对等效应力的影响最小。根据极差分析结果,优化参数组合方案为 A5B1C1D5, 即工艺参数: 锻坯初始温度 975°C、摩擦系数 0.2、压扁量 20mm、锻造速度为 400mm/s。

表 4.11 变形均匀性极差分析结果

| 评价指标 | 因素 | A | B | C | D |
|----------|-------------|------|-------|------|-------|
| 等效应力的标准差 | $K1$ | 3.81 | 3.51 | 3.41 | 3.60 |
| | $K2$ | 3.73 | 3.60 | 3.47 | 3.62 |
| | $K3$ | 3.61 | 3.60 | 3.50 | 3.78 |
| | $K4$ | 3.45 | 3.66 | 3.65 | 3.55 |
| | $K5$ | 3.36 | 3.58 | 3.92 | 3.40 |
| | \bar{K}_1 | 0.76 | 0.70 | 0.68 | 0.72 |
| | \bar{K}_2 | 0.74 | 0.72 | 0.69 | 0.72 |
| | \bar{K}_3 | 0.72 | 0.72 | 0.7 | 0.76 |
| | \bar{K}_4 | 0.69 | 0.73 | 0.73 | 0.71 |
| | \bar{K}_5 | 0.67 | 0.71 | 0.78 | 0.68 |
| | 极差 R | 0.09 | 0.031 | 0.1 | 0.076 |
| | 排序 | 2 | 4 | 1 | 3 |

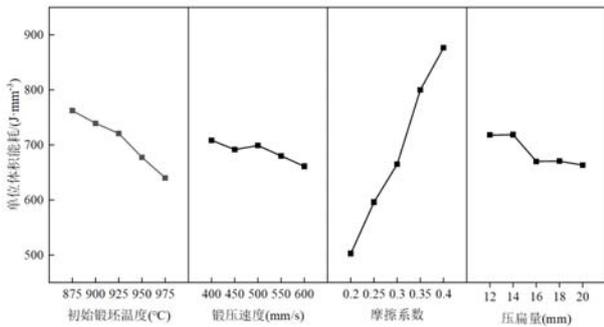


图 4.6 各因素水平与单位体积能耗的关系

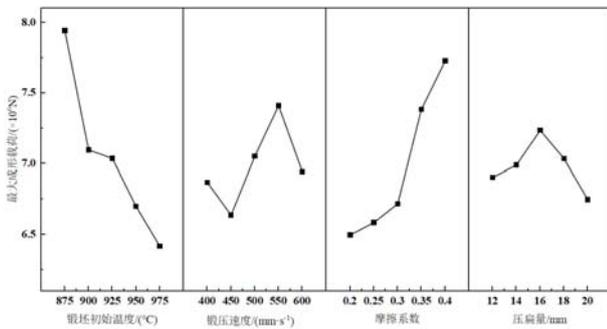


图 4.7 各因素水平与最大成形载荷的关系

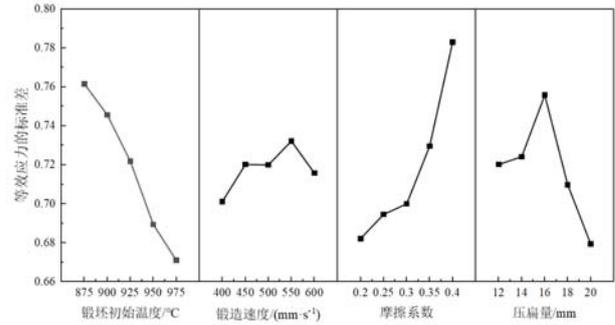


图 4.8 各因素水平与变形均匀性的关系

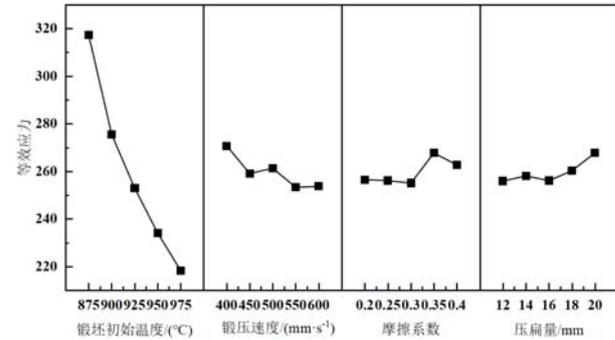


图 4.9 各因素水平与最大等效应力的关系

对各评判指标下各因素的极差 R 分析可知,4 个因素对评判指标影响的显著性顺序为: 能耗为摩擦系数(C)>锻坯初始温度(A)>压扁量(D) > 锻造速度(B); 成形载荷为锻坯初始温度(A)>摩擦系数(C)>锻造速度(B)>压扁量(D); 等效应力为锻坯初始温度(A)>锻造速度(B)>摩擦系数(C)>压扁量(D); 等效应变的标准差为摩擦系数(C)>锻坯初始温度(A)>压扁量(D)>锻造速度(B)。

表 4.16 极差分析较优方案

| δ | α | β | γ |
|----------|----------|----------|----------|
| A5B5C1D5 | A5B2C1D5 | A5B4C3D1 | A5B1C1D5 |

3.4 综合频率分析法

采用综合频率分析法对本次正交试验的 4 个评价指标进行分析, 视各指标的重要性相同, 所以各指标的权重都为 0.25^[48]。由表 4.17 可知, 锻坯初始温度(因素 A)的 5 水平、锻压速度(因素 B)的 2 水平、摩擦系数(因素 C)的 1 水平、压扁量(因素 D)的 5 水平的频率最高。结合前文的分析, TC4 钛合金连杆热锻工艺参数最优方案为 A5B2C1D5, 此时连杆锻造成形的能耗及产品质量综合性能最佳。最优方案的参数为: 锻坯初始温度 975°C, 锻造速度为 450mm/s, 摩擦因数为 0.2, 压扁量为 20mm。

表 4.18 TC4 连杆热锻优化前后参数对比

| 对比项 | A | B | C | D | 因素水平 |
|-----|-----|-----|-----|----|----------|
| 优化前 | 950 | 600 | 0.3 | 14 | A4B5C3D2 |
| 优化后 | 975 | 450 | 0.2 | 20 | A5B2C1D5 |

表 4.17 各因素水平频率统计

| 因素水平 | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 |
|------|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 频率 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1/8 | 1/2 | 0 | 1/8 | 1/4 |
| 因素水平 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 |
| 频率 | 3/4 | 0 | 1/8 | 1/8 | 0 | 1/8 | 0 | 1/8 | 0 | 3/4 |

4 优选方案模拟分析

优选方案选取最优参数组合，即锻坯初始温度为 1010°C，摩擦因数为 0.1，压扁量为 10mm，锻造速度为 550mm/s。通过 Deform-3D 对 TC4 钛合金连杆在优选方案下进行成型过程的仿真。

4.1 评价指标对比分析

选取原工艺参数下与优选工艺参数下的单位体积能耗进行对比。由表4可知，原工艺参数下单位体积能耗为658.37J/mm³；在优选方案下对TC4钛合金连杆进行仿真，获取锻造成形模拟数据，通过计算得到优选工艺参数下的单位体积能耗为417.16J/mm³，比原工艺参数下的能耗下降了36.64%。成形载荷预锻载荷由6560.36kN降低至5236.42kN，下降了20.18%；等效应力由226 MPa下降至220MPa，下降了2.73%，变形均匀性由0.656下降至0.587，上升了10.52%。这说明，通过正交试验选取的最优化方案，能够有效地提高连杆热锻过程中的成形质量，降低能量的消耗。

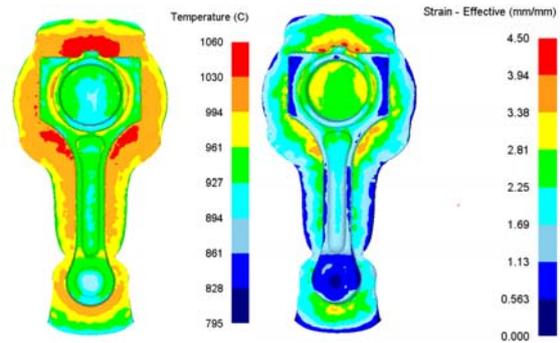
表 4.19 TC4 连杆热锻优化前后评价指标对比

| 对比项 | α /(kN) | δ /(J·mm ⁻³) | β /(MPa) | γ | 因素水平 |
|-----|----------------|---------------------------------|----------------|----------|----------|
| 优化前 | 6560.36 | 658.37 | 226 | 0.656 | A4B5C3D2 |
| 优化后 | 5236.42 | 417.16 | 220 | 0.587 | A5B2C1D5 |

由图 6 可知，优化后工艺参数温度场最高温度为 1070°C，这一现象产生的主要原因是由于连杆在热锻成形过程中，其飞边处的金属变形量大于连杆其它部分金属的变形量，且该区域金属流动过程中金属与模具之间的摩擦更为剧烈，从而使得连杆飞边区域金属的变形热效应和摩擦热效应强于连杆其它区域，进而导致连杆飞边区域的金属变形和摩擦热量更大，并最终致使连杆飞边区域的温度更高；尤其是其连杆锻件大头区域变形量最大，进而大头区域的飞边温度较其他区域要高。

在图 6(b)中等效应应变分布可以看出，TC4 钛合金连杆除去飞边后的基体等效应变未超过 4，整体等效应变分布均匀。等效应变分布较均匀表示该区域的变形分布均匀性越好。可以看到在锻件四周上下模具桥部轮廓区域应变较大，这是因为该区域的金属变形程度较其它区域更大。其中连杆大头部位飞边处的最大等效应变为 6.47，与温度场分布规律

相似。



(a)温度场分布云图(b)等效应变云图

图 6 优化后的 TC4 钛合金连杆温度场分布云图和等效应变云图

4.2 速度场分析

针对 TC4 钛合金连杆锻件速度场的分布规律进行分析，图 7(a)给出了连杆热锻成形工序完成后，其连杆锻件的速度场分布云图。由图可知，在连杆锻件的流动速度差异不大，不易形成穿流、折叠等锻造缺陷；由于连杆锻件毛边区域的金属和模具之间的相对滑动摩擦最为剧烈，从而导致由摩擦热效应和变形热效应所产生的热量最多，所以连杆锻件飞边处的金属流动速度大于杆身部分的金属流动速度，最高速度为 4790mm/s。连杆大头与杆身过渡区域速度场分布云图如图 7(b)所示，连杆大头区域速度场分布云图如图 7(c)所示，由图可知，金属流动方向与锻件外形轮廓走势基本一致，未出现塌角、缺料、折叠等缺陷。

4.3 成形载荷分析

TC4 钛合金连杆成形载荷随时间的变化曲线如图 8 所示，该曲线揭示了锻造压扁、预锻、终锻工序上模的载荷大小随时间的变化关系。载荷曲线随着时间的增大而增大，主要是因为随着 TC4 钛合金材料的持续变形，产生了加工硬化效应，导致成形后期载荷增大。从图 8 中可以看出原工艺参数与优选方

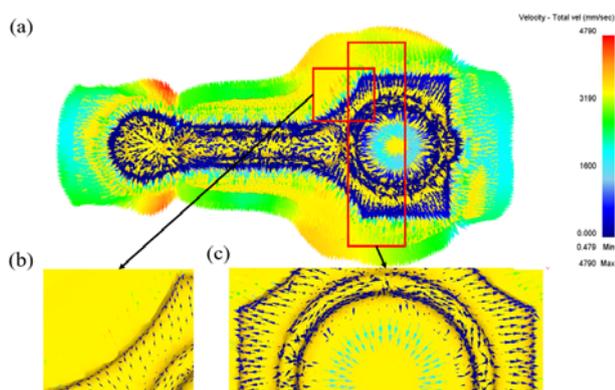


图7 TC4钛合金连杆锻件的速度场分布云图
(a)速度场分布云图、(b)连杆大头向杆身过渡部位局部放大图、(c)连杆大头局部放大图(旋转90°)

图7 TC4钛合金连杆锻件的速度场分布云图

案工艺参数下的成形载荷差异。在优选方案工艺参数下,由于锻造初始温度的提高,导致TC4钛合金材料的变形抗力减小,由于原工艺参数与最优工艺参数在压扁工序的压扁量不一致,导致最优工艺参数在压扁工序的成形载荷高于原工艺参数,因而锻造成形时压扁成形载荷由734.96kN上升至960.94kN,增加了30.74%,但是由图可知,在压扁量一致时,

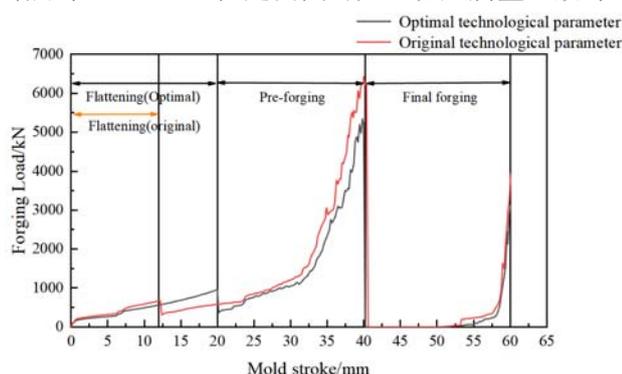


图8 TC4钛合金连杆成形载荷随时间的变化曲线

成形载荷由734.96kN降低至566.65kN,下降了22.9%,最优工艺参数的成形载荷低于原工艺参数,说明正交试验方案的可行性与正确性;预锻载荷由6560.36kN降低至5236.42kN,下降了20.18%;终锻载荷由4445.49kN降低至3142.04kN,下降了29.32%。优选方案的工艺参数下的成形载荷更小,对模具的磨损更小,能源的消耗更低。

5 连杆毛坯锻造与检测

5.1 毛坯锻造

为了验证工艺参数的可行性及锻件质量,使用优选方案工艺参数进行TC4钛合金连杆毛坯实际锻造。实际锻造毛坯未发现塌角、缺料、折叠、裂纹等锻造缺陷,与仿真结果吻合,毛坯实物如图9所示。

在连杆锻件毛坯上按照GB/T228.1-2021《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》^[49]取样进行力学性能检测,测试数据见表7。TC4钛合金锻造连杆的力学性能达到了GB/T23340-2018《内燃机连杆技术条件》^[50]对连杆强度要求。



图9 TC4钛合金连杆锻造毛坯

5.2 金属流线检测分析

宏观流线反映了变形过程中的金属流动情况,也是判断锻件成形好坏的重要指标^[51]。为了观测钛合金连杆毛坯的锻造金属流线的分布情况,选取纵剖面进行检测。对照仿真分析,在实验中同样选取连杆大头及其杆身过渡区域的两个部位进行宏观金属流线检测。

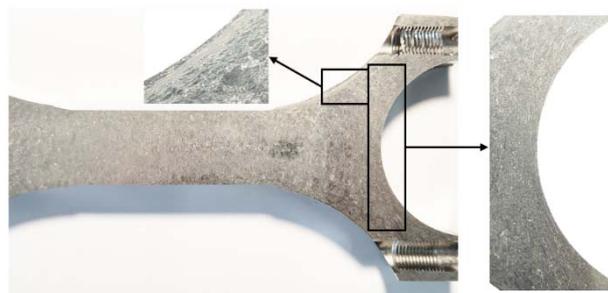


图10 TC4钛合金连杆锻造毛坯金属流线图

连杆大头的金属流线走势基本沿着锻件毛坯外形轮廓方向,见图10。TC4钛合金连杆在热塑性变形时,由于连杆大头及其杆身过渡区域两个位置的结构复杂,变形量大,因此钛合金晶粒被锻压变形,形成了细条状的纤维组织,金属流线特征较为明显。同时两个位置均未出现流线紊乱和穿流等缺陷,说明优选方案锻造工艺参数的可行性。

6 结论

本文采用正交试验法对某发动机连杆热锻工艺参数进行多目标优化。以锻坯初始温度、摩擦系数、锻压速度及压扁量4个工艺参数作为影响因素,每个因素下选取5个水平构建正交试验表,通过数值模拟探究不同因素水平对能耗、最大成形载荷、变形均匀性以及等效应力四个评价指标的影响规律。通过直观分析和极差分析结合的方法,并且借助综

合频率分析法确定了一组最优方案,并对优化后的连杆进行了试锻,其成形质量良好。本文主要结论如下:

(1)不同因素对不同指标的影响不同。锻坯初始温度对能耗、最大成形载荷、变形均匀性以及等效应力评判指标影响均比较大,摩擦系数对能耗、最大成形载荷、变形均匀性的影响较大,锻压速度对成形载荷的影响较大,压扁量对能耗和变形均匀性的影响较大。相对于其他3个因素,锻坯初始温度对连杆热锻成形质量及稳定性的影响最大。

(2)连杆热锻成形质量、能耗在优化后得到明显改善,单位体积能耗由 $658.37\text{J}/\text{mm}^3$ 下降为 $417.16\text{J}/\text{mm}^3$,下降了36.64%。成形载荷最大载荷由 6560.36kN 降低至 5236.42kN ,下降了20.18%;等效应力由 226MPa 下降至 220MPa ,下降了2.73%,变形均匀性由0.656下降至0.587,上升了10.52%。实现了绿色设计。

(3)根据优选方案的工艺参数进行TC4钛合金连杆毛坯锻造,并进行了金属流线检测分析,连杆大头及其杆身过渡区域的金属流线走势基本沿着锻件毛坯外形轮廓方向,与仿真分析规律相符。说明优选方案锻造工艺参数具有可行性。研究结果对TC4钛合金连杆毛坯的绿色制造有一定的指导意义。

(4)在本文的计算分析时,没有考虑宏-微的协联关系,在今后研究中,应考虑连杆热锻成形宏-微耦合有限元模型的构建;在工程实践中,还应结合生产成本、锻造设备等条件来进一步优化方案。

参考文献:

- [1]李中. 钛及钛合金在汽车上的应用[J]. 中国金属通报, 2010(48): 17-19.
LI Z. Applications of titanium and titanium alloys in automotive field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010(48): 17-19.
- [2]郭鲤,何伟霞,周鹏,等.我国钛及钛合金产品的研究现状及发展前景[J]. 热加工工艺,2020,49(22):22-28.
GUO L, HE W X, ZHOU P, et al. Research Status and Development Prospect of Titanium and Titanium Alloy Products in China[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(22): 22-28.
- [3]朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 44-50.
ZHU Z S. Recent Research and Development of Titanium Alloys for Aviation Application in China[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 44-50.
- [4]柯尔涅叶夫. 有色金属锻造与模锻手册[M]. 国防工业出版社, 1981.
- [5]牟正君, 航空零件和重型燃机叶片锻造过程数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [6]陈学文, 王进, 陈军, 等. 热锻成形过程数值模拟与多目标设计优化技术研究[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(4): 80-84.
CHEN X W, WANG J, CHEN J, et al. Research on multiple-objective design optimization and numerical simulation of hot forging process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12(4): 80-84.
- [7]罗石元. 汽轮机 TC4 钛合金大型复杂叶片精密热锻成形基础研究[D]. 武汉理工大学, 2017.
- [8]李心蕊, 邢彪, 管延锦, 等. 螺旋锥齿轮锻造成形过程数值模拟及其模具变形规律[J]. 锻压技术, 2020, 45(9): 16-21.
LI X R, XING B, GUAN Y J, et al. Numerical simulation on forging process of spiral bevel gear and mold deformation law [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45(9): 16-21.
- [9]齐敏杰, 张学宾, 宋克兴, 等. 大型液压装载机摇臂锻造成形模拟[J]. 锻压技术, 2017, 42(2): 1-4.
QI M J, ZHANG X B, SONG K X, et al. Forging simulation on the rocker arm of large hydraulic loader [J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(2): 1-4.
- [10]王宁, 李健, 薛峰, 等. 钼粉烧结体近等温包套锻造过程的数值模拟[J]. 金属功能材料, 2013(2): 40-44.
WANG N, LI Jian, XUE Feng, et al. Numerical Simulation of Near-isothermal Canning Forging Process for Molybdenum Sinter [J]. Metallic Functional Materials, 2013(2): 40-44.
- [11]刘时英. 基于 Deform-3D 的 20CrMnTi 钢端盖类零件的锻造成形性分析[J]. 热加工工艺, 2018, 47(11): 140-143.
LIU S Y. Analysis of Forging Formability of 20CrMnTi Steel End Cover Parts Based on Deform-3D [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(11): 140-143.
- [12]郝用兴, 王超峰, 张红艺, 等. 基于响应面法的汽车发电机磁极锻造成形工艺多目标优化[J]. 锻压技术, 2016, 41(12): 1-7.
HAO Y X, WANG C F, ZHANG H Y, et al. Multi-objective optimization on automobile generator pole in forging process based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41(12): 1-7.
- [13]赵明杰, 邓磊, 孙朝远, 等. 300M 高强度钢大型构件全流程锻造变形机理及工艺研究进展[J]. 科学通报, 2022.
- [14]Ingarao G, Ambrogio G, Gagliardi F, et al. A sustainability point of view on sheet metal forming operations: material wasting and energy consumption in incremental forming and stamping processes[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 29: 255-268.
- [15]高梦迪, 刘志峰, 李磊. 金属薄板热冲压成形能耗分析[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(5): 74-81.
GAO M D, LIU Z F, LI L. Energy consumption analysis focusing on hot stamping of sheet metal[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(5): 74-81.
- [16]王晋炜, 郭水军, 杨旭静, 等. 冲压成形中凹模入口角曲线优化[J]. 中国机械工程, 2014, 25(24): 3333.
WANG J W, GUO S J, YANG X J, et al. Optimization of Draw-die Entrance Curve in Sheet Metal Stamping[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(24):

- 3333.
- [17]Gao M, Huang H, Li X, et al. Carbon emission analysis and reduction for stamping process chain[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1): 667-678.
- [18]Gao M, Wang Q, Li L, et al. Energy-economizing optimization of magnesium alloy hot stamping process[J]. Processes, 2020, 8(2): 186.
- [19]Park H S, Nguyen T T, Dang X P. Energy-Efficient optimization of forging process considering the manufacturing history[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2016, 3(2): 147-154.
- [20]梁强, 张贤明, 杜彦斌, 等. 基于灰色关联分析的齿环热精锻成形工艺参数优化[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(4): 1020.
- [21]王俊, 王克鲁, 鲁世强, 等. 基于响应面法的TA5钛合金工艺参数优化[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(06): 2130-2136.
- WANG J, WANG K L, LU S K, et al. Optimization of Process Parameters of TA5 Titanium Alloy Based on Response Surface Methodology [J]. Rare metal materials and engineering, 2022, 51(06): 2130-2136.
- [22]Jia Y, Peng H, Cao H, et al. Parameter optimization in hot precision forging process of synchronizer ring based on grey relational analysis and response surface method[J]. Materials Research Express, 2022, 9(4): 046517.
- [23]杨华龙, 樊文欣, 曹存存, 等. 基于有限元的发动机连杆衬套温挤压工艺参数优化[J]. 锻压技术, 2017, 42(2): 172-177.
- YANG H L, FAN W X, CAO C C, et al. Optimization on warm extrusion process parameters for engine connecting rod bushing based on finite element[J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(2): 172-177.
- [24]余勇, 占刚, 樊文欣, 等. 基于遗传算法的强力旋压连杆衬套工艺参数多目标优化[J]. 锻压技术, 2019, 44(12): 187-191.
- SHE Y, ZHAN G, FAN W X, et al. Multi-objective optimization on process parameters of power spinning for connecting rod bushing based on genetic algorithms[J]. Forging & Stamping Technology, 2019, 44(12): 187-191.
- [25]高帅, 赵俊生, 李志伟, 等. 基于 Simufact 的强力热旋压连杆衬套成形精度研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 27(10): 40-47.
- GAO S, ZHAO J S, LI Z W, et al. Study on forming accuracy of hot power spinning connecting rod bushing based on Simufact[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 27(10): 40-47.
- [26]郭芳, 原霞, 吉梦雯, 等. 基于二次回归正交试验的连杆衬套成形质量分析[J]. 塑性工程学报, 2019, 25(5): 153-157.
- GUO F, YUAN X, Ji M W, et al. Forming quality analysis of connecting rod bushing based on quadratic regression orthogonal test[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 25(5): 153-157.
- [27]Minato S, Mizokawa K. Development of hollow titanium connecting rod[J]. Honda R&D Technical Review, FI Special, 2009: 241-243.
- [28]Matsubara T. Development of Free Machining Titanium Alloy for Connecting Rods[J]. Titanium & zirconium, 1991, 39(4): 175-184.
- [29]Hagiwara Y, Takahashi K, Murakami A, et al. Development of Titanium Connecting Rod for Mass-produced Motorcycles[J]. Honda R&D Technical Review, 1990, 2: 229-237.
- [30]Genma, Y. Application of the light metals materials to automobile parts[J]. Journal of the Japan Institute of Light Metals, 63(5): 204-208, 2013.
- [31]Donachie M J. Titanium: A Technical Guide; ASM International: Geauga County, OH, USA, 2000. 19[J]. Da Silva, LM.
- [32]Kahles J F, Field M, Eylon D, et al. Machining of titanium alloys[J]. Jom, 1985, 37(4): 27-35.
- [33]Luo S, Zhu D, 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.
- [34]Hu H J, Huang W J. Studies on wears of ultrafine-grained ceramic tool and common ceramic tool during hard turning using Archard wear model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69: 31-39.
- [35]Zhang D W, Yang H. Analytical and numerical analyses of local loading forming process of T-shape component by using Coulomb, shear and hybrid friction models[J]. Tribology International, 2015, 92: 259-271.
- [36]Qiu J W, Liu Y, Liu B, et al. Optimizing the hot-forging process parameters for connecting rods made of PM titanium alloy[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47: 3837-3848.
- [37]赵祖德, 陈学文, 陈军, 等. 基于近似模型和数值模拟的连杆热锻成形工艺设计优化[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(5): 748-751.
- [38]梁强, 张贤明, 杜彦斌, 等. 基于灰色关联分析的齿环热精锻成形工艺参数优化[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(4): 1020.
- [39]张继宏, 程芳萍. “双碳”目标下中国制造业的碳减排责任分配[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(09): 64-72.-186.
- ZHANG J H, CHENG F P. Carbon emission reduction responsibility allocation in China's manufacturing industry under the targets of carbon peak and carbon neutrality[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(09): 64-72.-186.
- [40]方华. 基于粒子群算法的等温挤压能耗优化[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- FANG H A Optimization of isothermal extrusion energy consumption based on PSO [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [41]黎宇嘉, 黄兵, 鲁娟, 等. 基于有限元模拟的 Ti6Al4V 铣削过程参数多目标优化[J]. 中国机械工程, 2021, 32(13): 1555.
- LI Y J, HUANG B, LU J, et al. Multi-objective Optimization of Cutting Parameters in Ti6Al4V Milling Processes

- Based on Finite Element Simulation[J].China Mechanical Engineering, 2021, 32(13): 1555.
- [42]Luo S, Zhu D, Hua L, et al. Effects of process parameters on deformation and temperature uniformity of forged Ti-6Al-4V turbine blade[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25: 4824-4836.
- [43]何玉婷. 基于 DEFORM3D 的热锻工艺参数对连杆成形的影响分析[J]. 热加工工艺, 2017 (1): 182-185.
- [44]赵茂俞, 薛克敏, 李萍. 多元非线性回归的铝合金覆盖件成形模拟优化设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 166-169.
ZHAO M Y, XUE K M, LI P. Numerical Simulation and Optimization of Aluminum Alloy Auto Panel Forming by Multivariate Nonlinear Regressing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 166-169.
- [45]梁敏富,方新秋,陈宁宁,等.正交试验设计的FBG测力锚杆结构封装优化及应用[J].煤炭学报,2022,47(08):2950-2960.
LIANG M F, FANG X Z, CHEN N N, et al. Structure packaging optimization and application of FBG dynamometry bolts based on the orthogonal test design[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(08): 2950-2960.
- [46]Yang Y, Zhou L, Zhou H, et al. Optimal design of slit impeller for low specific speed centrifugal pump based on orthogonal test[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(2): 121.
- [47]孙洁,蔡建国,葛新峰,等.基于正交试验多目标的两叶片灯泡贯流式水轮机性能优化[J].中国电机工程学报,2022,42(09):3317-3327.
SUN J, CAI J G, GE X F, et al. Performance Optimization of Bulb Tubular Turbine With two Blades Based on Multi-objective Orthogonal Test[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(09): 3317-3327.
- [48]刘俊娥, 傅昊, 郭章林. 综合频率分析法在多指标正交试验设计中的应用[J]. 价值工程, 2016, 24.
- [49]GB/T 228.1-2021, 金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法[S].
GB/T 228.1-2021, Metallic materials Tensile testing Part 1: Method of test at room temperature[S].
- [50]GB/T 23340-2018, 内燃机连杆技术条件[S].
GB/T 23340-2018, Internal combustion engines Connecting rods Specification[S].
- [51]苗站, 张治民, 于建民, 等. 不同参数对铝合金枝杈类构件金属流线的影响及优化[J]. 锻压技术, 2022, 46(2): 105-110.
MIAO Z, ZHANG Z M, YU J M, et al. Influence of different parameters on metal streamline of aluminum alloy part with branch and optimization[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 46(2): 105-110.