

锻造

基于正交实验的 TC4 钛合金连杆锻造工艺参数影响研究

邓 伟¹, 何葛豪¹, 贾德文¹, 冀会平², 管方楞², 崔志中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. 云南西仪工业股份有限公司, 云南 昆明 650114)

摘要: 为了实现连杆热锻过程的绿色设计, 针对 TC4 钛合金连杆的热锻过程的单位体积能耗, 采用有限元软件 Deform-3D 构建连杆的有限元模型, 运用正交实验方案探究了锻坯初始温度、锻造速度、压扁量、摩擦因数 4 个工艺参数对单位体积能耗的影响。通过极差分析得到了各因素对单位体积能耗的影响程度: 摩擦因数对单位体积能耗的影响程度最大, 其次为锻坯初始温度和锻造速度, 压扁量对单位体积能耗的影响最小; 确定了优选方案工艺参数组合为: 锻坯初始温度为 1010 ℃、锻造速度为 550 mm·s⁻¹、摩擦因数为 0.1、压扁量为 10 mm。在优选后的工艺参数条件下进行了连杆样品锻造, 单位体积能耗由原来的 418.54 J·mm⁻³ 下降至 288.17 J·mm⁻³, 降幅达 31.15%。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 钛合金; 连杆; 热锻; 单位体积能耗; 正交实验

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.08.001

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 08-0001-10

Study on influence of forging process parameters for TC4 titanium alloy connecting rod based on orthogonal test

Deng Wei¹, He Gehao¹, Jia Dewen¹, Ji Huiping², Guan Fangleng², Cui Zhizhong²

(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)

Abstract: In order to realize the green design of hot forging process for connecting rod, for the energy consumption per unit volume of the hot forging process for TC4 titanium alloy connecting rod, the finite element model of connecting rod was constructed by the finite element software Deform-3D, and the influences of four process parameters such as initial temperature of forging billet, forging speed, flattening amount and friction factor on the energy consumption per unit volume were investigated by the orthogonal test. Then, the influence degree of each factor on the energy consumption per unit volume was obtained by the range analysis. And the friction factor has the greatest influence on the energy consumption per unit volume, followed by the initial temperature of forging billet and forging speed, and the flattening amount has the least influence on the energy consumption per unit volume. Furthermore, the optimal combination of process parameters is determined as the initial temperature of forging billet of 1010 ℃, the forging speed of 550 mm·s⁻¹, the friction factor of 0.1, and the flattening amount of 10 mm. Finally, the forging of connecting rod sample was carried out under the optimized process parameters. The results show that the energy consumption per unit volume decreases from 418.54 J·mm⁻³ to 288.17 J·mm⁻³, which has a decrease of 31.15%, and the metal filling of the hot forging sample for TC4 titanium alloy connecting rod is normal, without forging defects, which realizes green manufacturing.

Key words: TC4 titanium alloy; connecting rod; hot forging; energy consumption per unit volume; orthogonal test

目前, 发动机连杆材料主要为钢铁材料, 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, 可作为发动机连杆的候选材料。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、冲击韧性高, 已作为重要零部件应用于航空、航天、车辆工程等领域^[1-2]。TC4 钛合金具有导热性较差、与模具之间的摩擦因数大、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。

为了实现对零件成形过程中单位体积能耗 (以下简称能耗) 的优化目的, 国内外学者针对塑性成

收稿日期: 2022-10-21; 修订日期: 2023-01-20

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, 副教授

E-mail: 27546658@qq.com

形工艺参数开展了大量研究。Ingarao G 等^[3]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,并对样件进行了能耗测量实验,验证了模型的准确性。高梦迪等^[4]对筒形件热拉深成形过程建立了能耗分析模型,结果显示不同温度下的筒形件热拉深成形理论能耗与实验分析能耗误差在 10% 以内。Torres S 等^[5]结合有限元仿真和实验的方法,研究了钣金成形工艺参数对能耗特性及碳排放的影响。Gao M D 等^[6]构建了冲压工艺链中的碳排放模型和能耗模型,发现此模型可以有效降低冲压过程中的能源消耗。采用物理实验获得所需的数据会消耗大量的时间以及昂贵的成本;而采用数值模拟的方法可以减少传统物理实验所需的时间及成本。

数值模拟方法被广泛应用于研究材料变形行为^[7-8]。Gao J Z 等^[9]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、仿真和实验,结果表明能耗下降了 18.4%。Gao M D 等^[10]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^[11]采用离散事件模拟模型与实验设计相结合的方法,对锻造过程各参数对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%。中北大学^[12-13]采用正交实验对不同工艺参数下连杆衬套挤压过程中的成形质量进行了研究,事实证明,正交实验是一种快速、高效、经济的优化工艺参数的方法。

由于铸造成形比锻造成形所需的加热温度更高,不利于节能降耗,同时锻造成形工艺更有利于提高零部件的成形质量^[14-15]。因此,在发动机连杆毛坯成形工艺选择时,基于绿色设计考虑,采用锻造成形工艺来开展研究。为了使 TC4 钛合金连杆的锻造过程满足绿色设计要求,针对成形过程的能耗,采用有限元仿真软件 Deform-3D 模拟 TC4 钛合金连杆的锻造过程,以获取不同工艺参数下的锻造模拟数据;设计了 $L_{16}(4^4)$ 正交实验方案对连杆锻造成形过程进行工艺参数优化,结合极差分析与方差分析的方法,选择出最优组合方案,并对能耗进行计算、分析;按照优化后的工艺参数来完成 TC4 钛合金连杆锻件的成形与检测,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 1.0 L 的两缸四冲程发动机连杆为研究

对象,其锻造毛坯见图 1。

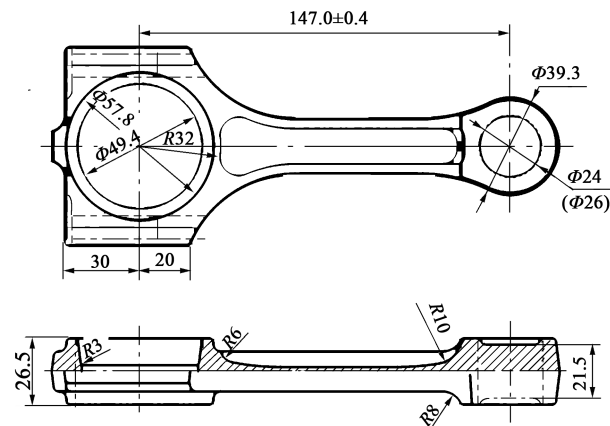


图 1 连杆二维模型

Fig. 1 Two-dimensional model of connecting rod

连杆的锻造材料为 TC4 钛合金,其材料的化学成分见表 1。

表 1 TC4 钛合金的化学成分(%,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

1.2 锻造过程分析

由于连杆属于细长型零件,且连杆大头、小头和杆部形状不同,整体结构相对复杂,因此,锻造成形时易出现充填不满、折叠以及塌角等缺陷。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。

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以及压扁、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 软件中进行热锻过程的有限元仿真计算。考虑到锻件与模具之间存在传热情况,在 Deform-3D 中对连杆锻坯及模具三维模型进行四面体网格划分,锻坯网格总数为 155560,模具网格总数为 158170。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。

1.4 锻造仿真模型参数设置

为了控制锻造成形工艺,通常采用真实应力-

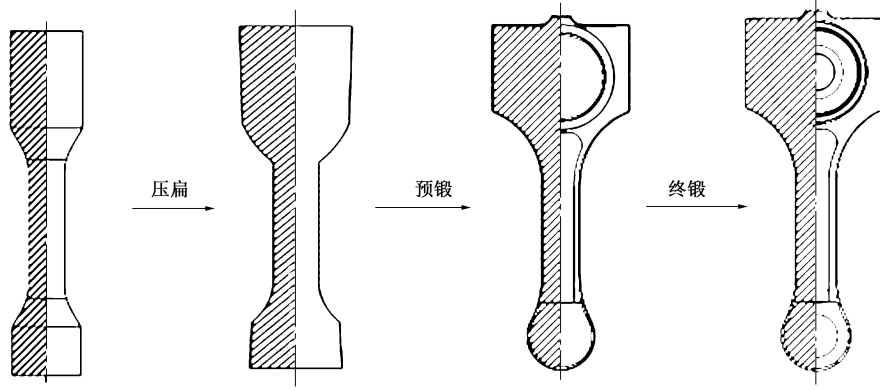


图 2 连杆锻造流程图

Fig. 2 Forging flow chart of connecting rod

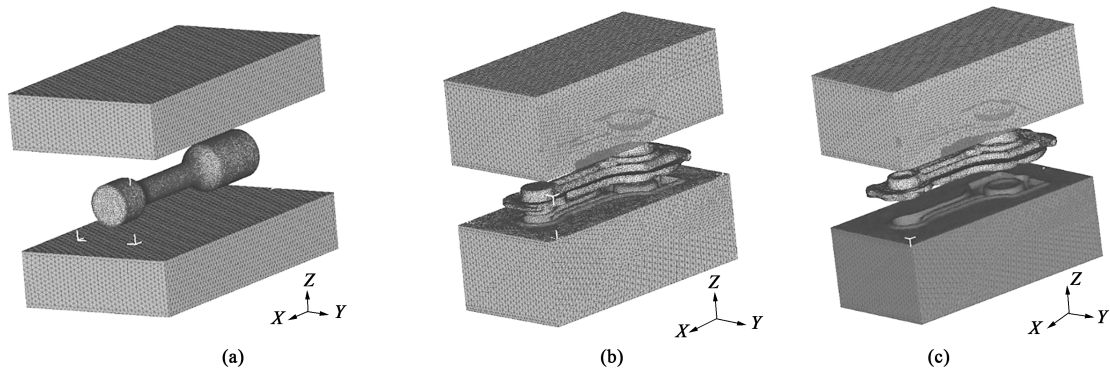


图 3 连杆热锻成形的三维热力耦合有限元模型

(a) 压扁 (b) 预锻 (c) 终锻

Fig. 3 Three-dimensional coupled thermo-mechanical finite element model for hot forging of connecting rod

(a) Flattening (b) Pre-forging (c) Final forging

真实应变曲线来描述金属的热变形行为^[16]。本次研究所采用的 TC4 钛合金的真实应力-真实应变曲线如图 4 所示^[17]，其中 $\dot{\epsilon}$ 为应变速率， T 为温度。

将图 4 中 TC4 钛合金高温变形时的真实应力-真实应变曲线导入 Deform-3D 软件以建立刚粘塑性流变应力模型^[17]。TC4 钛合金材料随着温度 T 变化的杨氏模量 E 、导热系数 K_a 和热容 C' 可由式 (1)~式 (3) 可得^[17]。

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

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

$$C' = 2.36 + 3 \times 10^{-4} + 2 \times 10^{-6}T^2 \quad (3)$$

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，应尽量提高锻坯的初始温度，有利于材料迅速软化、促进屈曲变形的发生。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。模拟参数设定如表 2 所示。

2 评价指标

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^[18]，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如下^[19-20]：

$$E_t = \left(1 + \frac{\mu}{3} \times \frac{D_t}{h}\right) \sigma_0 A' v' t_1 \quad (4)$$

$$E_{\text{total}} = E_t + E_f + E_e \quad (5)$$

$$E_{\text{SEC}} = \frac{E_{\text{total}}}{V_{\text{total}}} \quad (6)$$

式中： E_t 为压扁工序阶段的能耗，J； E_{total} 为锻造成形过程的总能耗，J； μ 为摩擦因数； D_t 为模具宽度，mm； h 为棒料压扁后的高度，mm； σ_0 为变形温度下材料的变形抗力，MPa； A' 为坯料的横截面

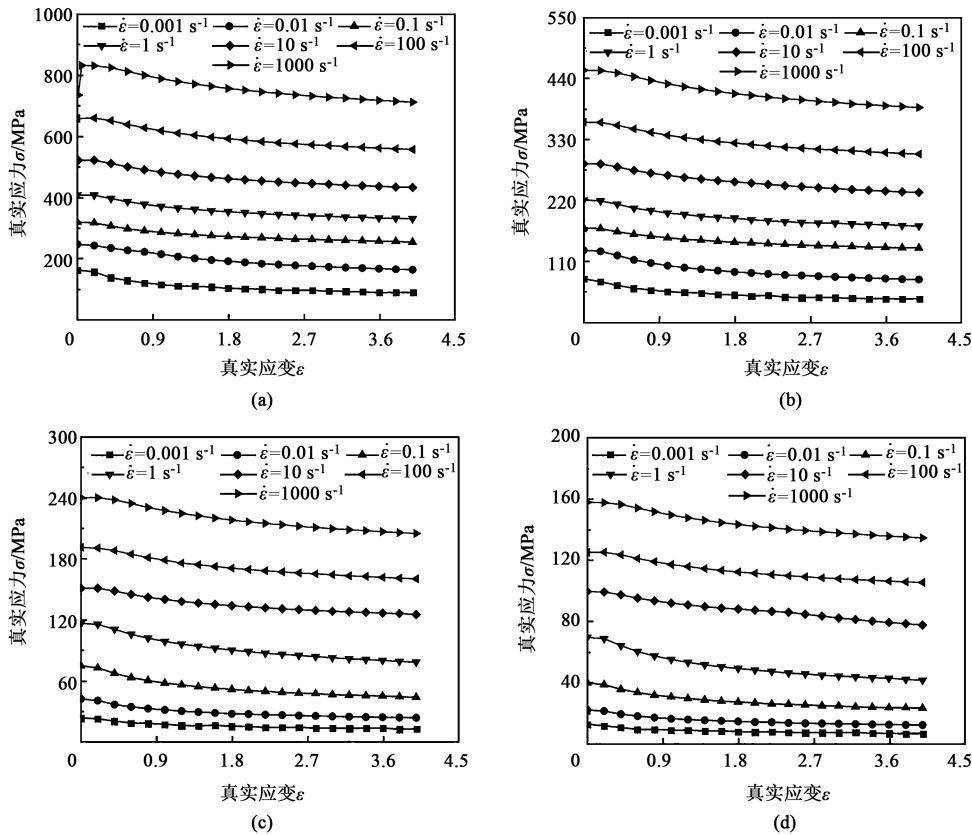


图4 TC4 钛合金高温变形时的真实应力-真实应变曲线
(a) $T=750\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b) $T=850\text{ }^{\circ}\text{C}$ (c) $T=950\text{ }^{\circ}\text{C}$ (d) $T=1050\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fig.4 True stress-true strain curves of TC4 titanium alloy during high temperature deformation

表 2 模拟参数设定
Table 2 Setting of simulation parameters

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	104.94-0.052079T

积, mm^2 , $A'=\pi D'^2/4$; D' 为坯料的直径, mm ; v' 为移动速度, $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$; t_1 为填充时间, s ; E_f 为预锻阶段的能耗, J ; E_e 为终锻阶段的能耗, J ;

E_{SEC} 为单位体积能耗, $(\text{J}\cdot\text{mm}^{-3})$; V_{total} 为仿真参数下工件的体积, mm^3 。

3 锻造工艺参数正交实验

3.1 正交实验设计

正交实验设计法通过正交表挑选出代表性强的实验条件, 安排实验计划进行实验, 再利用极差和方差对实验结果进行分析, 找出最优方案^[21]。在根据相关研究及实际锻造条件下, 选取 TC4 钛合金连杆的锻坯初始温度 A 、摩擦因数 B 、压扁量 C 、锻造速度 D 作为正交实验因素, 并用单位体积能耗作为评价指标, 以此研究其对整个锻造过程中能耗的变化规律。

以原工艺参数即锻坯初始温度为 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、摩擦因数为 0.2、压扁量为 10 mm 、锻造速度为 $550\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 为参照; 选择 $L_{16}(4^4)$ 正交表和 Deform-3D 软件多核多任务功能进行 TC4 钛合金连杆锻造过程的热力耦合模拟。正交验方案见表 3。

表 3 正交实验因素水平

Table 3 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素			
	A/℃	B	C/mm	D/(mm·s ⁻¹)
1	920	0.1	10	400
2	950	0.2	12	450
3	980	0.3	14	500
4	1010	0.4	16	550

3.2 正交实验结果处理与分析

正交实验仿真值结果处理见表 4，16 组实验方案中，单位体积能耗最小的为第 9 组数据，最小值为 290.52 J·mm⁻³，各工艺参数为：锻坯初始温度为 980 ℃、摩擦因数为 0.1、压扁量为 14 mm、锻造速度为 550 mm·s⁻¹。

表 4 正交实验的结果

Table 4 Results of orthogonal test

序 号	因素				单位体积能耗/ (J·mm ⁻³)
	A/℃	B	C/mm	D/(mm·s ⁻¹)	
1	920	0.1	10	400	360.11
2	920	0.2	12	450	573.88
3	920	0.3	14	500	748.33
4	920	0.4	16	550	917.70
5	950	0.1	12	500	329.83
6	950	0.2	10	550	418.54
7	950	0.3	16	400	751.86
8	950	0.4	14	450	875.33
9	980	0.1	14	550	290.52
10	980	0.2	16	500	482.92
11	980	0.3	10	450	686.35
12	980	0.4	12	400	868.55
13	1010	0.1	16	450	292.06
14	1010	0.2	14	400	489.74
15	1010	0.3	12	550	522.22
16	1010	0.4	10	500	669.54

3.3 极差处理与分析

极差分析法具有计算简单、直观形象、简单易懂的特点，在仿真之后获取不同工艺参数下的锻造模拟数据，计算出实验方案的指标值后，对 16 组正交方案下的指标值进行统计参数 K_i 值及 \bar{K}_i 值的计算^[22]。

$$K_i = \sum_{k=1}^n Y_{i,k} \tag{7}$$

$$\bar{K}_i = \frac{1}{n} K_i \tag{8}$$

式中： K_i 为各因素在 i 水平下多次结果的平均值，本文中 $i=1, 2, 3, 4$ ； $Y_{i,k}$ 为 i 水平下第 k 个指标值； $k=1, 2, \cdots, n$ ； n 为试验次数，本文中 $n=16$ ； \bar{K}_i 为 K_i 的平均值。

极差 R 的计算公式为^[23]：

$$R = \max\{\bar{K}_1, \bar{K}_2, \bar{K}_3, \bar{K}_4\} - \min\{\bar{K}_1, \bar{K}_2, \bar{K}_3, \bar{K}_4\} \tag{9}$$

式 (7)~式 (9) 的计算结果如表 5 所示，所考虑的 4 个因素对能耗影响的顺序由大到小为：摩擦因数 B >锻坯初始温度 A >锻造速度 D >压扁量 C 。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的关系图。极差反映了各因素对评价指标的影响程度，极差越大，说明该因素对实验指标的影响越大，因此也就越重要^[23]。由单位体积能耗极差 R 可知，摩擦因数对能耗造成的影响最大，其次为锻坯初始温度和锻造速度，压扁量对能耗的影响最小。从图 5 可以看出，单位体积能耗随着锻坯初始温度的提高而下降，随着摩擦因数的增大而增大，随着压扁量的增大而增大，随着锻造速度的增大而减小，根据对各因素的极差分析结果可知，最优参数组合方案为 A4B1C1D4，即工艺参数锻坯初始温度为 1010 ℃、摩擦因数为 0.1、压扁量为 10 mm、锻造速度为 550 mm·s⁻¹。通过极差分析结果得到优选方案，证明了正交实验设计方法的高效性和经济性。

表 5 单位体积能耗的极差分析结果(J·mm⁻³)

Table 5 Range analysis results of energy consumption per unit volume(J·mm⁻³)

因素	A	B	C	D
K_1	2600.0	1272.4	2134.4	2470.4
K_2	2375.6	1965.2	2294.4	2427.6
K_3	2328.4	2708.8	2404.0	2230.8
K_4	1973.6	3331.2	2444.4	2148.8
\bar{K}_1	650.0	318.1	533.6	617.6
\bar{K}_2	593.9	491.3	573.6	606.9
\bar{K}_3	582.1	677.2	601.0	557.7
\bar{K}_4	493.4	832.8	611.1	537.2
极差 R	156.6	514.6	77.5	80.3
排序	2	1	4	3
最优参数	A4B1C1D4			

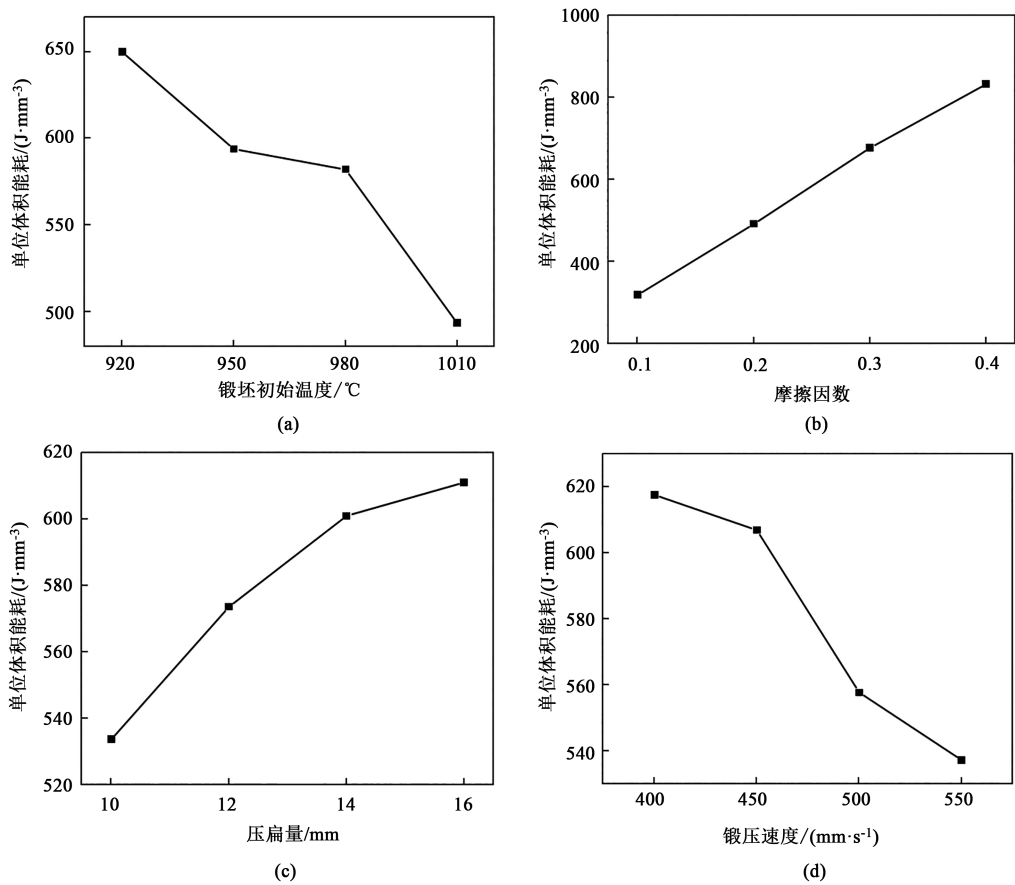


图 5 各因素水平与单位体积能耗的关系图

(a) 锻坯初始温度 (b) 摩擦因数 (c) 压扁量 (d) 锻造速度

Fig. 5 Relationship diagrams between level of each factor and energy consumption per unit volume

(a) Initial temperature of forging billet (b) Friction factor (c) Flattening amount (d) Forging speed

3.4 方差处理与分析

根据极差分析计算结果对 16 组正交实验方案中单位体积能耗的影响进行了分析,但是极差分析缺少实验误差对实验结果影响的显著性分析,因此,需要通过方差分析对正交实验方案的显著性进行考察和判断。其方差分析的相关计算公式^[24]如下:

$$S_T = \sum_{k=1}^n (Y_{i,k} - Y)^2 \quad (10)$$

$$Y = \frac{1}{n} \times \sum_{k=1}^n Y_{i,k} \quad (11)$$

$$f = m - 1 \quad (12)$$

$$S = \frac{S_T}{f} \quad (13)$$

$$F = \frac{S}{S_E} \quad (14)$$

式中: S_T 为总偏差平方和; Y 为 $Y_{i,k}$ 的平均值; f 为自由度; S 为均方差; m 为因素水平数; F 为方差分析中的 F 值; S_E 为残差误差均方差。

对正交实验的方案结果进行方差分析,结果见表 6。通过比较方差分析中的 F 值与显著性水平 $F_{0.05}(3, 15)$ 的大小,从而判断各因素与实验结果之间的统计意义是否显著。通常,显著性水平 $F_{0.05}(3, 15) = 3.29$, 当 $F < 3.29$ 时,则该因素在统

表 6 单位体积能耗的方差分析结果

Table 6 Variance analysis results of energy consumption per unit volume

方差来源	偏差平方和/ ($\times 10^5$)	自由度	均方差/ ($\times 10^4$)	F 值	显著性
A	0.50	3	1.68	11.04	显著
B	5.99	3	19.97	131.19	显著
C	0.14	3	0.48	3.15	不显著
D	0.18	3	0.59	3.91	显著
残差误差	0.04	3	0.15	—	—
合计	6.86	15			

注: $F_{0.05}(3, 15)$ 由查表得到。

计意义上不显著, 当 $F > F_{0.05}(3, 15)$ 时, 则该因素在统计意义上显著。则根据表 6 的方差结果可知, 因素 A 对应的 F 值 $F_A = 11.04 > F_{0.05}(3, 15)$, 说明锻坯初始温度对单位体积能耗的作用显著; 因素 B 对应的 F 值 $F_B = 131.19 > F_{0.05}(3, 15)$, 说明摩擦因数对单位体积能耗的作用比较显著; 因素 D 对应的 F 值 $F_D = 3.91 > F_{0.05}(3, 15)$, 说明锻造速度对单位体积能耗的作用比较显著; 因素 C 对应的 F 值 $F_C = 3.15 < F_{0.05}(3, 15)$, 说明连杆压扁工序的压扁量对单位体积能耗的作用不显著。该结论与极差 R 和各因素水平与单位体积能耗关系图所示结果较为一致, 验证了优选方案的科学性。

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 $1010\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、摩擦因数为 0.1 、压扁量为 10 mm 、锻造速度为 $550\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过 Deform-3D 对 TC4 钛合金连杆在优选方案下进行成形过程的仿真。

4.1 能耗对比分析

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 $418.54\text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$; 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 $288.17\text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$, 较原工艺参数下的能耗下降了 31.15% 。

由图 6 可知, 采用优化后工艺参数的温度场的最高温度在其飞边区域, 为 $1070\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这一现象产生的主要原因为: 由于连杆在热锻成形过程中, 其飞边处的金属变形为其整个锻件中变形量最大的区域,

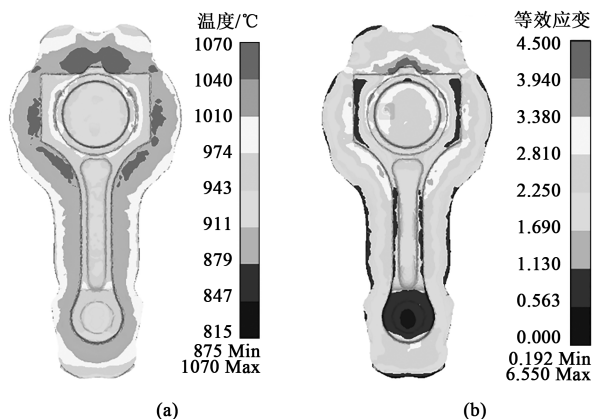


图 6 优化后的 TC4 钛合金连杆温度场 (a) 和等效应变 (b) 分布云图

Fig. 6 Distributions cloud diagrams of temperature field (a) and effective strain (b) for TC4 titanium alloy connecting rod after optimization

并且在该区域由于锻坯填充型腔的过程中, 多余的金属顺着飞边槽与模具之间进行剧烈摩擦而产生大量的热, 从而导致连杆飞边区域的温度更高; 尤其是其连杆锻件大头区域的变形量最大, 进而大头区域的飞边温度较其他区域要高。

由图 6b 中可以看出, TC4 钛合金连杆除去飞边后的基体等效应变小于 4, 整体等效应变分布均匀, 这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的应变较大, 这是因为: 金属流动与模具摩擦使得此处的等效应变比其他区域大。其中连杆大头部位飞边处的最大等效应变为 6.55 , 与温度场分布相吻合。

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 为连杆热锻成形工序结束后, TC4 钛合金连杆锻件的速度场分布云图。由图 7 可知, 除去飞边及中心孔区域, TC4 钛合金连杆锻件的金属流动速度差小, 不易形成穿流、折叠等锻造缺陷。这是由于: 连杆锻件金属从模具型腔排出和模具之间发生剧烈摩擦形成飞边区域, 从而导致飞边区域由于变形能与摩擦能所产生的热量较多, 金属流动速度大于杆身区域的金属流动速度, 其最高金属流速为 $3080.00\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。连杆大头与杆身过渡区域的速度场分布云图如图 7 中放大图 (左) 所示, 连杆大头区域的速度场分布云图如图 7 中放大图 (右) 所示, 可以发现, 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。

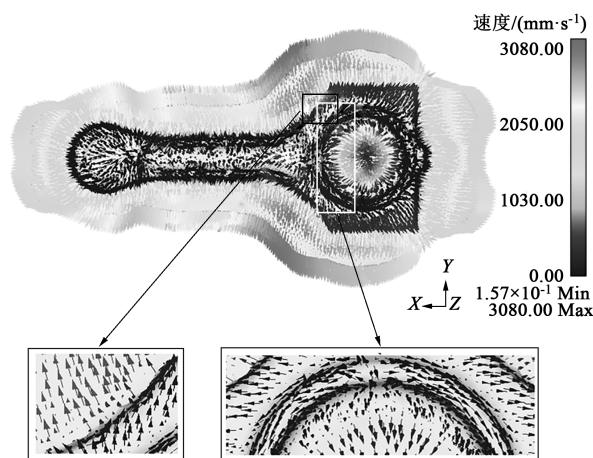


图 7 TC4 钛合金连杆锻件的速度场分布云图

Fig. 7 Velocity field distribution cloud diagram of TC4 titanium alloy connecting rod forgings

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

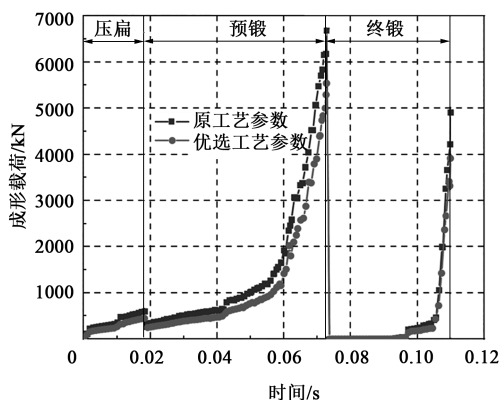


图 8 TC4 钛合金连杆成形载荷随时间的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of forming load with time for TC4 titanium alloy connecting rod

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案工艺参数下成形载荷的差异。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, 因而造成锻造成形时压扁成形载荷由 597 kN 降低至 450 kN, 下降了 24.62%; 预锻载荷由 6676 kN 降低至 5542 kN, 下降了 16.99%; 终锻载荷由 4911 kN 降低至 3920 kN, 下降了 20.18%。优选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 锻造毛坯力学性能检测

为了验证工艺参数的可行性及锻件质量, 使用优选工艺参数进行 TC4 钛合金连杆毛坯实际锻造。实际锻造毛坯未出现塌角、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。



图 9 TC4 钛合金连杆锻造毛坯

Fig. 9 TC4 titanium alloy connecting rod forging blank

在连杆锻造毛坯上按照 GB/T 228.1—2021^[25] 取样并进行力学性能检测, 测试数据见表 7。

表 7 TC4 钛合金的力学性能测试数据

Table 7 Mechanical property test data of TC4 titanium alloy

参数	屈服强度 R_{eL} /MPa	抗拉强度 R_m /MPa
测试数值	1050	1082
标准最大值	650	830

TC4 钛合金锻造连杆的力学性能达到了 GB/T 23340—2018^[26] 对连杆强度的要求。

5.2 金属流线检测

宏观流线反映了锻造变形过程中的金属流动情况, 合理的流线分布对锻件的力学性能至关重要^[27]。为了观测钛合金连杆锻造毛坯的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两个部位进行宏观金属流线检测。

连杆大头的金属流线走势基本沿着锻造毛坯外形轮廓方向, 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, 说明了优选锻造工艺参数的可行性。

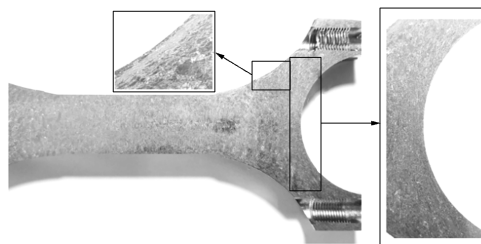


图 10 TC4 钛合金连杆锻造毛坯的金属流线图

Fig. 10 Metal streamline diagram of TC4 titanium alloy connecting rod forging blank

6 结论

(1) 基于 Deform-3D 建立了 TC4 钛合金的刚粘塑性流变应力模型, 对连杆热锻成形进行了有限元仿真分析, 运用正交实验, 对锻坯初始温度、摩擦因数、压扁量、锻造速度这 4 个工艺参数对单位体积能耗的影响程度进行了分析, 根据正交实验的极差计算结果可知, 当锻坯初始温度为 1010 ℃、摩擦因数为 0.1、压扁量为 10 mm 且锻造速度为 550 mm · s⁻¹ 时的单位体积能耗最小。根据方差计算结果可知, 摩擦因数、锻坯初始温度和锻造速度

对单位体积能耗的作用显著; 压扁量对单位体积能耗的作用不显著。

(2) 采用优选方案的工艺参数组合进行 TC4 钛合金连杆锻造仿真分析, 锻造成形时压扁工序成形载荷由 597 kN 降低至 450 kN, 下降了 24.62%; 预锻工序成形载荷由 6676 kN 降低至 5542 kN, 下降了 16.99%; 终锻工序成形载荷由 4911 kN 降低至 3920 kN, 下降了 20.18%。单位体积能耗由 $418.54 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$ 减少至 $288.17 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$, 降幅达 31.15%, 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造毛坯外形轮廓方向, 与仿真分析规律相符, 说明优选锻造工艺参数具有可行性。研究结果对 TC4 钛合金连杆的绿色制造具有一定的参考价值。在工程实践中, 还应结合模具寿命等条件来进一步优化方案。

参考文献:

- [1] 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.
- [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] 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, 29-30: 255-268.
- [4] 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.
- [5] Torres S, Calderón E, Ortega R, et al. Sustainability in terms of energy consumption in processes of incremental forming and stamping [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 49 (1): 175-180.
- [6] Gao M D, Huang H H, Li X Y, et al. Carbon emission analysis and reduction for stamping process chain [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91 (1): 667-678.
- [7] 王家毅, 米振莉, 李辉, 等. 基于热加工图 6082 铝合金锻造工艺优化及强化机制研究 [J]. 稀有金属, 2019, (2): 113-121.
- Wang J Y, Mi Z L, Li H, et al. Isothermal forging process and strengthening mechanism of 6082 aluminum alloy through processing map [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019, (2): 113-121.
- [8] 闫迎亮, 张鹏飞. TC4 钛合金绝热剪切行为的数值模拟 [J]. 机械工程材料, 2020, 44 (10): 76-80, 86.
Yan Y L, Zhang P F. Numerical simulation of adiabatic shear behavior of TC4 titanium alloy [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44 (10): 76-80, 86.
- [9] Gao J Z, Zhao S D, Gao J J, et al. A novel telescoping mechanism integrating spline sliding and worm drive: An energy-saving and high-efficient solution for the clutch of mechanical press [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022, 44 (9): 1-16.
- [10] Gao M D, Wang Q Y, Li L, et al. Energy-economizing optimization of magnesium alloy hot stamping process [J]. Processes, 2020, 8 (2): 186.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 叶勇, 王金彦. 钛合金的应用现状及加工技术发展概况 [J]. 材料导报, 2012, 26 (2): 360-363.
Ye Y, Wang J Y. An overview on application status and processing technology development of titanium alloy [J]. Materials Review, 2012, 26 (2): 360-363.
- [15] 张一帆, 朱晓飞, 周舸, 等. A100 钢的热变形行为及加工图 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (2): 88-94.
Zhang Y F, Zhu X F, Zhou K, et al. Hot deformation behavior and processing map of A100 steel [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (2): 88-94.
- [16] Luo J, Li M Q, Li H, et al. Effect of the strain on the deformation behavior of isothermally compressed Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 505 (1-2): 88-95.
- [17] 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: 武汉理工大学, 2017.
Luo S Y. Fundamental Research on Precision Hot Forging of Large Complex TC4 Titanium Alloy Turbine Blade [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [18] 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 (9): 64-72.
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, Re-

- sources and Environment, 2021, 31 (9): 64-72.
- [19] 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. Optimization of Isothermal Extrusion Energy Consumption Based on PSO [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [20] 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): 1555-1561.
- 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): 1555-1561.
- [21] 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 (8): 2950-2960.
- Liang M F, Fang X Q, 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 (8): 2950-2960.
- [22] Yang Y, Zhou L, Zhou H T, 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.
- [23] 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 (9): 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 (9): 3317-3327.
- [24] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究 [J]. 实验技术与管理, 2010, 27 (9): 52-55.
- Liu R J, Zhang Y W, Wen C W, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27 (9): 52-55.
- [25] 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].
- [26] 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].
- [27] 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.

2023 年第二届钛材料及技术装备国防军工轻量化应用会议征文通知

由中国机械工业联合会、中国国防工业企业协会联合主办, 主题为“强化技术支撑、推动轻量化应用、加快钛产业升级”的第二届钛材料及技术装备国防军工轻量化应用会议拟于 2023 年 11 月 8 日-10 日召开 (会议地点另行通知)。

为了便于参会各方开展更具价值的交流与合作, 本届大会将启动第二届会议论文征集工作, 欢迎钛生产加工企业、国防军工科研院所、高等院校等相关单位和科技工作者踊跃参与, 积极投稿并出席此次会议, 交流钛材料技术及装备在国防军工行业的技术成果与应用趋势。现将有关征文事项通知如下:

一、征文范围 (包括但不限于以下内容)

1. 钛产业技术与装备数智化升级能效及趋势
2. 低成本高性能钛合金在武器装备中的应用进展
3. 钛合金先进成形技术研究与应
4. 钛合金生产加工共性技术研究成果
5. 钛合金在海陆空天武器装备应用场景及拓展研究
6. 用于武器装备中的先进锻造、铸造、增材制造、焊接、表面处理工艺
7. 镁、铝、镍合金、高温合金、特殊钢关键制备技术及应用

二、征文要求

1. 论文要求原创, 主题明确、观点明确、论证充分、数据准确、条理清晰, 能够反映作者近期的研究进展或成果。

2. 投稿及图片请勿涉及保密内容, 在截止日前发送至指定邮箱。

3. 论文截止日期为 2023 年 10 月 18 日。

三、征文使用与出版

1. 经专家审核入选的论文将编印会议论文集, 向参会单位及作者发放。
2. 经专家评选的优秀论文将重点推荐至《重型机械》、《材料工程》、《航空材料学报》、《钢铁钒钛》、《锻压技术》、《焊接》、《焊接学报》、《铸造》、《铸造工程》、《航空精密制造技术》、《船舶工程》、《现代兵器》、《舰船科学技术》、《兵器材料科学与工程》、《坦克装甲车辆》等中文核心期刊选登。请勿一稿多投。

四、联系方式

1. 论文指定投稿邮箱: 66804786@qq.com;

投稿咨询: 史朝宇 18602248844

2. 会议咨询:

中国机械工业联合会

联系人: 党媛、史朝宇、冯玲、蒋晓健

联系电话: 010-60519818、13520097071、18602248844、13581896542、18610318186

中国国防工业企业协会

联系人: 张一博、梁潇

联系电话: 010-57528173