

航空发动机高温合金大尺寸小宽径比轴端自锁螺母收口 工艺分析及参数优化

陈衍祥^{1,2}, 罗小龙¹, 李少龙³, 姚齐水¹, 田 坤², 余江鸿¹

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 株洲瀚捷航空科技有限公司, 湖南 株洲 412000;
3. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘要: 为解决航空发动机用大尺寸小宽径比高温合金轴端自锁螺母收口成形中收口量不一致和齿形外翻的问题, 对收口模具结构和工艺参数进行优化。以某型 GH2132 高温合金轴端自锁螺母为研究对象, 根据生产经验初选 3 种收口模锥面角, 通过数值仿真并基于最大等效应力和收口精度确定最优锥面角。采用正交试验法和 Vague 集优化方法获得两组工艺参数组合, 通过仿真试验对比并基于最大损伤值和最大成形载荷优选最佳参数组合, 最后进行仿真试验和生产试验验证。结果表明: 收口模锥面角为 30°、保压时间为 0.5 s、下压速度为 40 mm·s⁻¹、摩擦因数为 0.1 条件下, 可有效解决该型自锁螺母收口量不一致和齿形外翻的问题。该研究可为其他型号自锁螺母的工艺优化提供参考。

关键词: GH2132 高温合金; 自锁螺母; 收口成形; 收口量; 齿形外翻; Vague 集

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.04.021

中图分类号: V229.1; TG386.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 04-0172-11

Process analysis and parameter optimization on self-locking nut closing at large-size and small-aspect-ratio shaft-end of superalloy for aero-engine

Chen Yanxiang^{1,2}, Luo Xiaolong¹, Li Shaolong³, Yao Qishui¹, Tian Kun², Yu Jianghong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China; 2. Zhuzhou Hanjie Aviation Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China; 3. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: In order to solve the problems of inconsistent closing amount and tooth outward rotation in the closing forming of self-locking nuts at large-size and small-aspect-ratio shaft-end of superalloy for aero-engine, the structure and process parameters of the closing die were optimized. For a certain type of shaft-end self-locking nut for superalloy GH2132, three kinds of taper angles for closing die were preliminarily selected according to production experience, and the optimal taper angle was determined by numerical simulation based on the maximum equivalent stress and closing accuracy. Two groups of process parameter combinations were obtained by using orthogonal experimental method and Vague set optimization method, and the optimal parameter combination was selected by comparing simulation experiments and based on the maximum damage value and maximum forming load. Finally, the simulation experiments and production validation were conducted. The results show that the problems of inconsistent closing and tooth outward rotation for this type of self-locking nut are effectively solved when the closing die taper angle is 30°, the holding time is 0.5 s, the pressing speed is 40 mm·s⁻¹, and the friction coefficient is 0.1. Thus, this research provides a reference for the process optimization of other types of self-locking nuts.

Key words: superalloy GH2132; self-locking nut; closing forming; closing amount; tooth outward rotation; Vague set

航空发动机是一种高度复杂的机械装置, 典型的航空发动机包含 2 万多个零部件^[1-2], 这些零部

件通过紧固件实现连接得以稳固。螺纹紧固件是最常用的航发紧固件, 其中, 自锁螺母因其可靠的抗震、防松、可重复使用功能, 成为航空航天领域应用最为广泛的螺纹连接件。航空发动机工作条件极端, 面临高温、高速和高负荷的挑战, 对紧固件的材料性能要求极高。高温合金因其良好的热稳定性和热强度, 广泛用于制造航空发动机的高端紧固件等^[3-5]。

自锁螺母的关键性能指标在于增强其防松能力, 而收口量是决定锁紧力矩的关键因素, 直接影响产

收稿日期: 2024-10-08; 修订日期: 2025-01-16

基金项目: 湖南省教育厅重点项目 (22A0399); 湖南省自然科学基金资助项目 (2024JJ8268)

作者简介: 陈衍祥 (1972-), 男, 博士, 高级工程师

E-mail: yxchen@vip.163.com

通信作者: 余江鸿 (1978-), 男, 博士, 教授

E-mail: hutjyh@hut.edu.cn

品的性能和使用寿命^[6]。经过收口的自锁螺母局部中径较小,安装时会对螺栓施加径向压力,增加螺纹副之间的摩擦力,进而产生有效的锁紧力矩^[7-9]。然而,如果收口量过小,可能导致锁紧力矩不足,无法实现预期的防松效果;反之,若收口量过大,则可能引起过大的剪切应力,甚至会导致螺母开裂,影响整体的力学性能。若自锁螺母各齿的收口量不一致,会使螺母在拧紧过程中无法形成稳定的干涉配合,导致锁紧力矩不稳定、衰减速度加快,影响螺母的防松效果和使用寿命。

鉴于自锁螺母收口工艺的重要性,相关研究一直受到重视。齐增星等^[10]利用 ABAQUS 分析了不同收口量、收口区域高度及收口速度对螺母内螺纹区域应力应变的影响。梁坤等^[11]利用 Deform-3D 数值模拟软件分析了高温合金自锁螺母的挤压成形过程,并设计了挤压成形模具,通过试验验证了该工艺的可行性。田晶等^[12]提出了一种收口自锁螺母的高保真建模方法,并通过仿真分析了不同结构参数和载荷参数对收口自锁螺母连接结构松动特性的影响。Li M 等^[13]采用 ABAQUS 有限元分析软件,模拟了不同材料自锁螺母的收口过程,研究了不同尺寸自锁螺母的收口量对锁紧性能的影响,最后得到了不同材料的自锁螺母的等效应力范围和不同尺寸自锁螺母的收口量范围。孙景冬等^[14]采用分组试验法对 GH738 高温合金螺母锁紧力矩的衰减速度进行了研究,结果表明,增大收口段壁厚、增大收口量均可以提高螺母的锁紧力矩。总体上,目前关于自锁螺母收口工艺的研究,主要采用数值仿真方法。此类方法对于分析自锁螺母收口后的锁紧性能较为成熟可靠,但对于收口工艺的多参数优化问题效果欠佳。而 Vague 集优化方法因简单实用和所需信息较少的特点,在用于处理多指标决策和参数优化问题具有优势^[15-16]。

目前主要研究的多是宽径比接近或大于 1 的传统自锁螺母,而部分航空发动机传动部件的螺纹直径在 $\Phi 20$ mm 以上,甚至超过 $\Phi 100$ mm。在这种情况下,传统的大宽径比自锁螺母已经无法满足轴类零件的轴向紧固要求,而小宽径比轴端自锁螺母更适合对轴类零件进行轴向锁紧^[17]。相较于传统锁紧螺母与锁片配合使用的方式,大尺寸小宽径比轴端自锁螺母避免了在轴上开槽从而降低其强度的风险,是一种新型的航空发动机传动轴轴向锁紧零件^[18]。

株洲瀚捷航空科技有限公司在大尺寸小宽径比轴端自锁螺母收口成形过程中,出现收口量不一致和

齿形外翻的情况,导致收口尺寸精度低、外形不符合技术要求、锁紧性能不稳定等问题,直接影响了螺母的服役性能和可靠性。为了解决上述问题,以某型直径为 $\Phi 56$ mm、宽径比为 9/56 的 GH2132 高温合金轴端自锁螺母的收口工艺为研究对象,采用数值分析方法,基于最大等效应力和收口精度确定收口模具的最优锥面角;结合正交试验法和 Vague 集优化方法,以最大损伤值和最大成形载荷为成形质量评价指标,优化收口工艺参数,并通过仿真试验和实际生产验证结果的有效性。

1 轴端自锁螺母及收口装置

1.1 轴端自锁螺母及收口模具结构

GH2132 高温合金轴端自锁螺母零件如图 1 所示。螺母尾部位置开了 8 个均匀分布的槽口,收口之后螺母内螺纹能够与外螺纹实现多点过盈接触。收口模具装置如图 2 所示,主要包括下模座、定位销、定位座、收口模、上模座、螺钉、厚垫圈和调整垫圈。上模座连接液压机,当液压机下压时,带动收口模向下移动,使轴端自锁螺母尾部螺纹齿发生径向变形,当螺栓旋入变形区域时,螺母施加的径向挤压导致螺栓表面产生静摩擦力,从而达到防松效果。收口模采用有锥度的圆形模具,如图 2 所示,下模座上端面安装有调整垫圈,通过调整垫圈的厚度控制收口模的下压距离,从而控制螺母的收口量,收口模下压距离与收口量之间的关系式可表达为式(1):

$$\tan \alpha = \frac{s}{l} \quad (1)$$

式中: s 为自锁螺母各齿径向收口量; l 为收口模下压距离; α 为收口模锥面角,即圆锥面与竖直方向的夹角。

1.2 收口过程受力分析

采用锥形圆模进行收口相较于其他常用收口方式,受力更加均匀,在加工小型自锁螺纹时,能保证各齿的收口量一致,且锁紧力矩比较稳定^[19-20]。但在实际生产中,大尺寸小宽径比螺母尾端的开槽设计往往会导致内螺纹表面质量下降,各齿的收口量不一致。

对螺母尾部的齿形收口过程进行受力分析,如图 3 所示,其中, γ 为轴端自锁螺母与收口模的摩擦角, α 为收口模锥面角, F_d 为摩擦力 F_f 与正压力

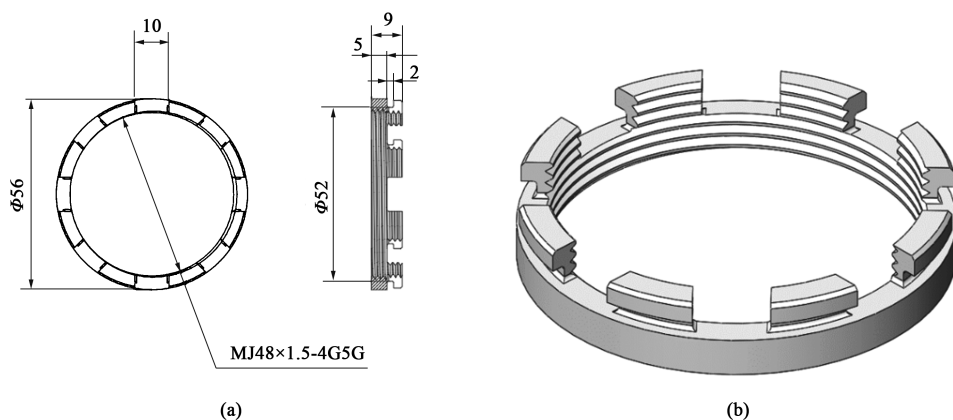


图 1 轴端自锁螺母示意图

(a) 尺寸图 (b) 三维图

Fig. 1 Schematic diagram of self-locking nut at shaft end

(a) Size diagram (b) 3D diagram

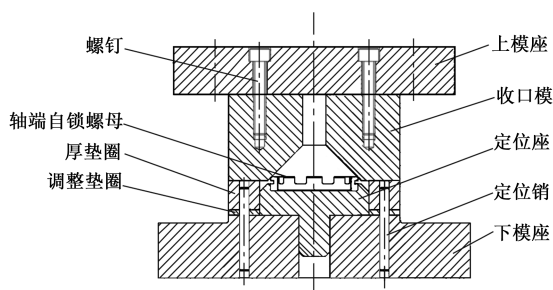


图 2 收口模具示意图

Fig. 2 Schematic diagram of closing die

F_N 的合力, F_1 和 F_2 分别为 F_d 的水平和竖向直分力, 参数之间的关系如式 (2) ~ 式 (4) 所示。

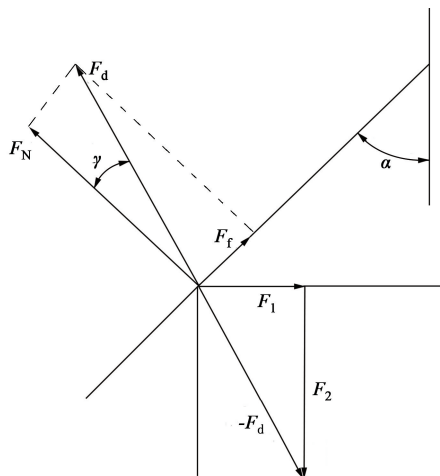


图 3 收口受力分析

Fig. 3 Closing force analysis

$$F_1 = -F_d \cdot \cos(\alpha + \gamma) \quad (2)$$

$$F_2 = -F_d \cdot \sin(\alpha + \gamma) \quad (3)$$

$$\gamma = \arctan \mu \quad (4)$$

式中: μ 为收口模与轴端自锁螺母之间的摩擦因数。

为了防止收口模下压时轴端自锁螺母齿形外翻, 应满足 $F_1 > F_2$, 即:

$$\cos(\alpha + \gamma) > \sin(\alpha + \gamma) \quad (5)$$

因此,

$$\alpha + \gamma < 45^\circ \quad (6)$$

而原有收口模锥面角 α 为 45° , 因此需要对其进行优化。根据生产经验, 对收口模结构提出了 3 种改进方案, 分别对应收口模锥面角 α 为 25° 、 30° 和 35° , 如图 4 所示。在 Deform-3D 软件中分别建立有限元模型, 根据收口后零件尺寸精度和最大等效应力对收口模改进方案进行优选。

2 收口模结构优化

2.1 有限元建模

在 Solidworks 中建立零件和收口模具模型并进行装配, 以 STL 格式导入到 Deform-3D 软件, 零件材料为 GH2132 高温合金, 泊松比 $\nu = 0.3$, 杨氏模量 $E = 190 \text{ GPa}$, 其化学成分如表 1 所示, 以 key 文件导入软件材料库, 将零件设置为塑性体, 模具部件设置为刚体, 温度设置为常温 20°C , 摩擦条件设置为剪切模型, 零件划分为 250000 个四面体网格, 设置体积补偿, 依据经验步长应设置为最小网格单元的 $1/3$, 取整为 0.1 mm 。3 种方案的有限元模型如图 5 所示。

2.2 最大等效应力对比分析

通过 Deform-3D 对 3 种方案进行仿真。收口量为 0.2 mm 时的最大等效应力云图如图 6 所示, 从

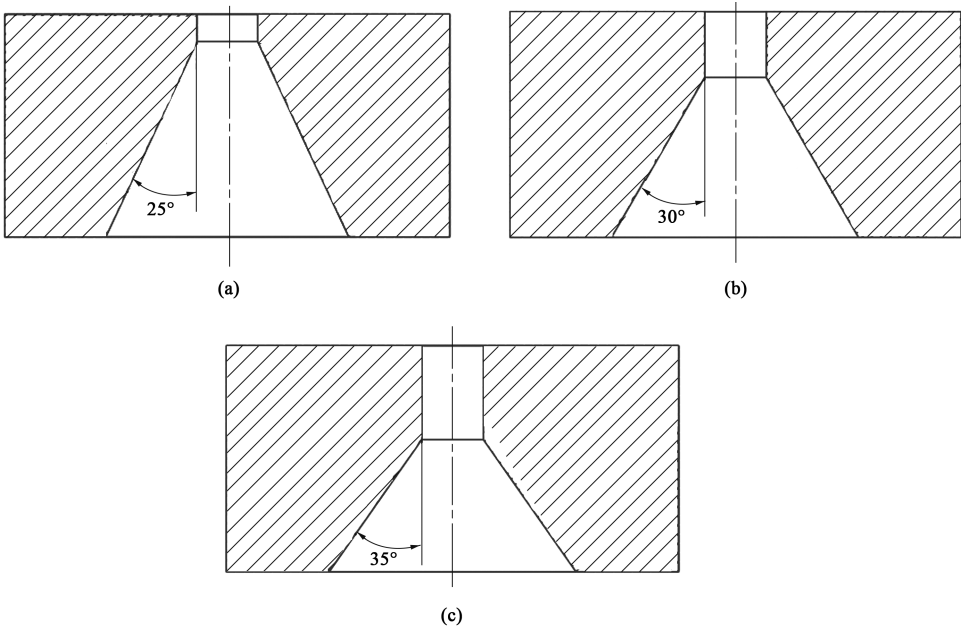


图 4 收口模改进方案
(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3
Fig. 4 Improvement schemes for closing die
(a) Scheme 1 (b) Scheme 2 (c) Scheme 3

表 1 GH2132 高温合金的化学成分 (%, 质量分数)
Table 1 Chemical compositions of superalloy GH2132 (%, mass fraction)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S	V	Fe
0. 01	0. 21	0. 25	24. 17	13. 5~16. 0	1. 0~1. 5	0. 016	0. 006	0. 27	余量

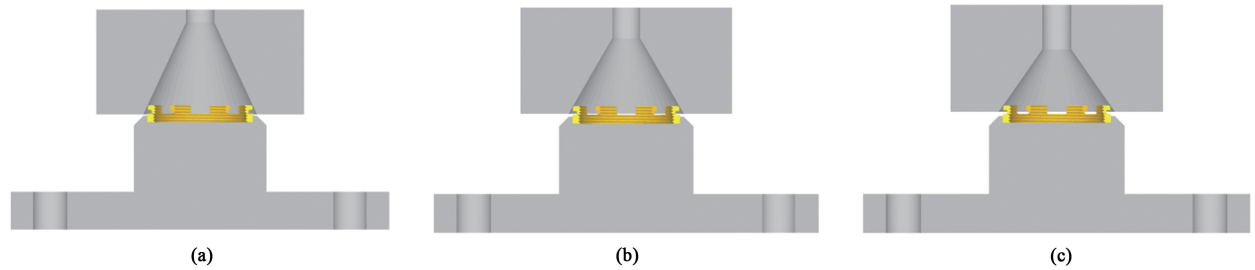


图 5 有限元模型剖面图
(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3
Fig. 5 Section diagrams of finite element model
(a) Scheme 1 (b) Scheme 2 (c) Scheme 3

图 6 中可以看出，应力大的区域主要位于螺母齿形的底部，说明发生塑性变形的部位主要集中在螺母齿形底部的内螺纹。图 7 为不同收口量下 3 种方案的最大等效应力变化曲线，从图 7 中可以看出，轴端自锁螺母的收口量对最大等效应力有显著影响，最大等效应力随着收口量的增大而增大。收口量为 0.1 mm 时，3 种方案中螺母收口区域的最大等效应力较小；收口量为 0.3 mm 时，螺母收口

区域的最大等效应力已达到较高状态；收口量为 0.5 mm 时，螺母的最大等效应力已达到材料的最大屈服强度，若收口量继续增加，螺母内螺纹的区域可能会产生裂纹。在相同收口量下，轴端自锁螺母的最大等效应力随着收口模锥面角的增大而增大。方案 3 在相同收口量下的最大等效应力高于方案 1 和方案 2，因此，方案 1 和方案 2 要优于方案 3。

特种成形栏目由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司赞助刊出

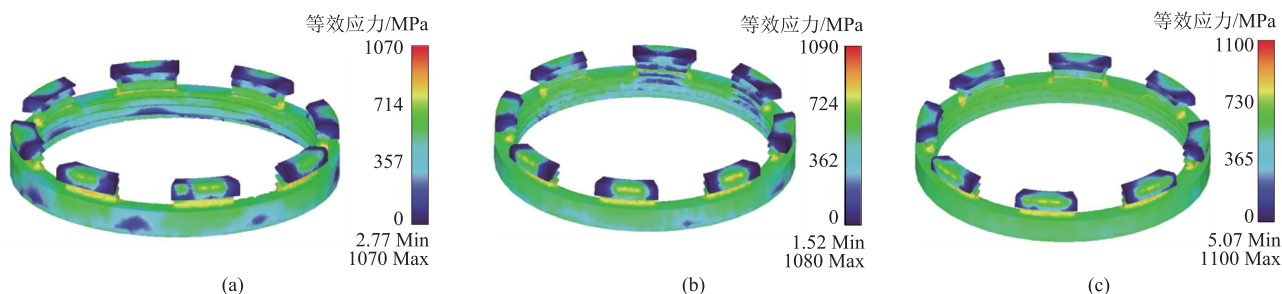


图 6 收口量为 0.2 mm 时的最大等效应力云图

(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3

Fig. 6 Maximum equivalent stress nephograms for closing amount of 0.2 mm

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2 (c) Scheme 3

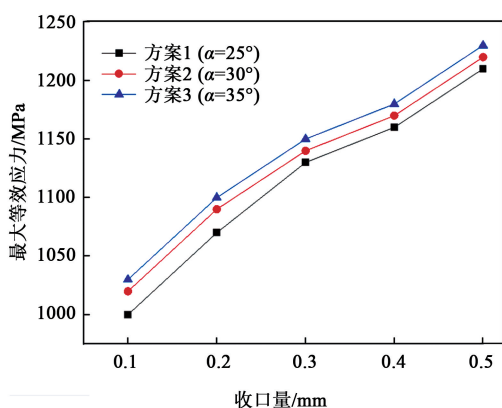


图 7 不同方案下最大等效应力随收口量的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of maximum equivalent stress with closing amount under different schemes

2.3 收口后零件尺寸对比分析

图 8 显示了收口量为 0.3 mm 时两种方案收口后螺母的仿真尺寸，受塑性变形的影响，收口后螺母的尺寸通常会小于理论值。表 2 对比分析了方案 1 和方案 2 在不同收口量下螺母尺寸的理论值和仿真值，以及对应的误差。从表 2 中可以看出：方案 2 的仿真值在不同收口量下的误差较小，波动范围在 0.20%~0.27%之间；而方案 1 的误差较大，波动范围在 0.21%~0.32%之间。在相同的收口量下，方案 2 的误差均小于方案 1，说明方案 2 在控制收口量方面的性能更为优越，螺母收口后的尺寸一致性更好。因此，方案 2 更能通过控制收口模下压距离来精确控制收口量，使螺母收口后的尺寸更符合预期要求。最终选择方案 2 作为收口方案。

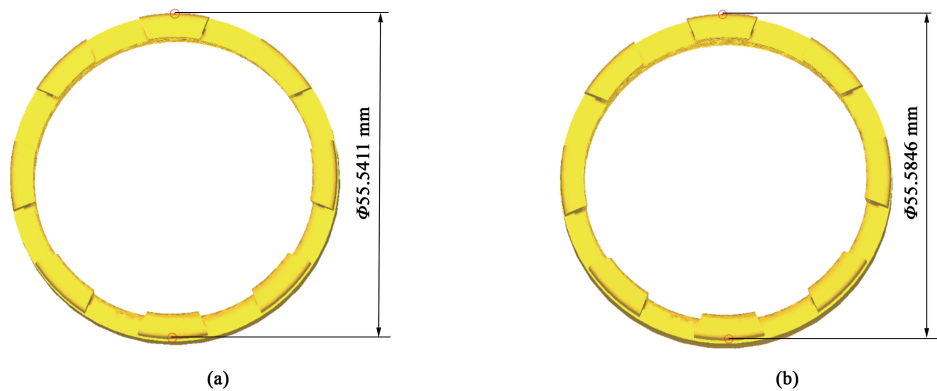


图 8 收口后螺母尺寸仿真值

(a) 方案 1 (b) 方案 2

Fig. 8 Simulation values of nut size after closing

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

3 收口工艺参数优化

在实际生产过程中，收口模下压速度、摩擦因

数和保压时间是轴端自锁螺母收口质量的主要影响因素，为了减少收口后螺母内螺纹牙裂纹的产生和对收口模的磨损，以最大损伤值和最大成形载荷作为评价指标，采用正交试验参数优化方法和Vague

表 2 不同收口量下螺母尺寸的理论值和仿真值对比

Table 2 Comparison of nut size between theoretical and simulated values at different closing amounts

螺母尺寸	收口量/mm									
	0.1		0.2		0.3		0.4		0.5	
	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2
理论值/mm	55.90	55.90	55.80	55.80	55.70	55.70	55.60	55.60	55.50	55.50
仿真值/mm	55.78	55.79	55.67	55.69	55.54	55.58	55.46	55.49	55.32	55.35
误差/%	0.21	0.20	0.23	0.20	0.29	0.22	0.25	0.20	0.32	0.27

集优化方法对螺母收口过程中的工艺参数进行优化。

3.1 正交试验

选取收口模下压速度 v 、摩擦因数 μ 、保压时间 t 作为试验因素，每个因素取 4 个水平进行正交试验，因素水平表如表 3 所示，轴端自锁螺母收口过程中产生的不良缺陷可以用损伤值的大小来衡量。损伤值越大，工件表面出现裂纹的概率也就越高。成形载荷是模具受力状况的直接体现，成形载荷越小，模具磨损越少，使用寿命越长。因此，以最大损伤值和最大成形载荷作为评价指标，正交试验共 16 组数据，将正交试验方案的各组数据在 Deform-3D 软件中进行设置并仿真，试验方案及结果如表 4 所示。

表 3 正交试验因素水平

Table 3 Factors and levels for orthogonal test

水平	因素		
	保压时间 t/s	下压速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	摩擦因数 μ
1	0.5	20	0.1
2	1.0	40	0.2
3	1.5	60	0.3
4	2.0	80	0.4

3.1.1 极差分析

极差分析结果如表 5 所示，其中， K_x 表示某因素下水平 x 的平均值， Q 表示极差值，体现了 K_x 中最大值与最小值的差值， Q 值越大说明该因素对目标参数的影响越显著， Q 值越小则影响越弱。图 9 为各影响因素对 2 个目标参数的影响曲线。由图 9 可知，摩擦因数的变动对最大损伤值和最大成形载荷的影响最为突出，下压速度和保压时间对最大损伤值的影响较为微弱，对最大成形载荷的影响波动较大。

3.1.2 最优参数组合

对极差分析结果进行分析，由表 5 中的 Q 值可知，对最大损伤值和最大成形载荷的影响顺序均为 $\mu > t > v$ 。从单个优化目标可得：实现最小损伤值的参

表 4 正交试验方案及结果

Table 4 Schemes and results of orthogonal test

试验 序号	因素			最大损伤 值	最大成形 载荷/N
	保压时间	下压速度	摩擦因数		
	t/s	$v/(mm \cdot s^{-1})$	μ		
1	0.5	20	0.1	0.121	14800
2	0.5	40	0.2	0.120	14600
3	0.5	60	0.3	0.124	15700
4	0.5	80	0.4	0.125	16000
5	1.0	20	0.2	0.123	16000
6	1.0	40	0.1	0.120	14800
7	1.0	60	0.4	0.125	17100
8	1.0	80	0.3	0.119	17700
9	1.5	20	0.3	0.120	17000
10	1.5	40	0.4	0.125	16400
11	1.5	60	0.1	0.120	14800
12	1.5	80	0.2	0.127	14400
13	2.0	20	0.4	0.125	16700
14	2.0	40	0.3	0.125	15900
15	2.0	60	0.2	0.123	14700
16	2.0	80	0.1	0.120	14700

数组合为 $t_2v_1\mu_1$ ，实现最小成形载荷的参数组合为 $t_1v_2\mu_1$ 。结合实际生产优先考虑零件的成形质量，优先考虑的顺序为：损伤值>成形载荷。综上，参数优化结果为 $t_2v_1\mu_1$ ，即保压时间为 1.0 s、下压速度为 $20\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.1。

3.2 Vague 集优化

Vague 集的核心思想是利用多个评价指标 Vague 集之间的相似度来表达评价指标之间的耦合关系和联系，它能直观给出支持和反对的证据，并有效求解多目标决策问题^[21]。

设 2 个 Vague 集 $U = [t_U(x_{ij}), 1 - f_U(x_{ij})]$ ， $V = [t_V(x_{ij}), 1 - f_V(x_{ij})]$ ，则 U 、 V 的相似度为：

特种成形栏目由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司赞助刊出

表 5 极差分析结果
Table 5 Variance analysis results

因素	最大损伤值			最大成形载荷/N		
	保压时间 t	下压速度 v	摩擦因数 μ	保压时间 t	下压速度 v	摩擦因数 μ
K_1	0.1225	0.1223	0.1203	15275	16125	14775
K_2	0.1218	0.1225	0.1233	16400	15425	14925
K_3	0.1230	0.1230	0.1220	15650	15575	16575
K_4	0.1233	0.1228	0.1250	15500	15700	16550
Q	0.0015	0.0008	0.0048	1125	700	1800
影响大小	$\mu > t > v$			$\mu > t > v$		
较优组合	$t_2 v_1 \mu_1$			$t_1 v_2 \mu_1$		

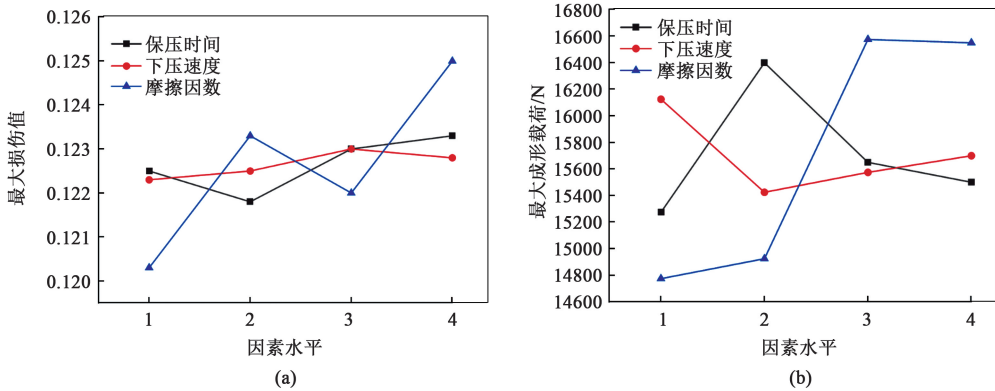


图 9 目标参数随因素水平的变化曲线
(a) 最大损伤值 (b) 最大成形载荷

Fig. 9 Variation curves of target parameters with factor levels
(a) Maximum damage value (b) Maximum forming load

$$R(U, V) = 1 - \left[\frac{t_U(x_{ij}) - t_V(x_{ij})}{1 + t_U(x_{ij}) + t_V(x_{ij})} + \frac{f_U(x_{ij}) - f_V(x_{ij})}{1 + f_U(x_{ij}) + f_V(x_{ij})} \right] \quad (7)$$

式中: $R(U, V)$ 为集合 U 和集合 V 之间的相似度; x_{ij} 为第 i 个评价指标的第 j 个测量值; $t_U(x_{ij})$ 、 $t_V(x_{ij})$ 为集合 U 与集合 V 中第 i 个评价指标的第 j 个测量值的真隶函数; $f_U(x_{ij})$ 、 $f_V(x_{ij})$ 为集合 U 与集合 V 中第 i 个评价指标的第 j 个测量值的假隶函数。

采用 Vague 集优化轴端自锁螺母收口工艺参数的步骤为: (1) 将试验数据转化为 Vague 集值; (2) 确定 Vague 集理想值; (3) 计算试验数据与理想值的相似度, 再根据评价指标的重要性, 对其赋予权重, 从而得到总相似度; (4) 得到收口工艺最优参数组合^[22-23]。

3.2.1 Vague 集转化

将 16 组仿真的最大损伤值和最大成形载荷代入

转化公式 (式 (8)) 进行 Vague 集转化:

$$P_i(x_{ij}) = [t_i(x_{ij}), 1 - f_i(x_{ij})] = \left[\frac{x_{imax} - x_{ij}}{x_{imax} - x_{imin}}, 1 - \frac{x_{ij}^p - x_{imin}^p}{x_{imax}^p - x_{imin}^p} \right] \quad (8)$$

式中: $P_i(x_{ij})$ 为第 i 个评价指标的 Vague 集值; x_{imax} 、 x_{imin} 分别为第 i 个评价指标的最大值、最小值; $t_i(x_{ij})$ 为第 i 个评价指标的第 j 个测量值的真隶函数; $f_i(x_{ij})$ 为第 i 个评价指标的第 j 个测量值的假隶函数; P 为指数, 通常情况下取 2。

转化后的 Vague 集值如表 6 所示。

3.2.2 确定 Vague 集理想值

表 6 中各项评价指标的 Vague 集值的最大值为理想值, 其公式如下:

$$P_i^+(x_i) = \{\max[t_i(x_{ij})], \max[1 - f_i(x_{ij})]\} \quad (9)$$

式中: $P_i^+(x_i)$ 第 i 个评价指标的最优理想值。

根据表 6 的 Vague 集值转化结果, 轴端自锁螺母收口两个评价指标的理想值为 $[1, 1]$ 、 $[1, 1]$ 。

表 6 转化后的 Vague 集值

Table 6 Vague set values after transforming

序号	最大损伤值		最大成形载荷/N	
	t_i	$1-f_i$	t_i	$1-f_i$
1	0.7500	0.7561	0.8788	0.8897
2	0.8750	0.8786	0.9394	0.9452
3	0.3750	0.3826	0.6061	0.6306
4	0.2500	0.2561	0.5152	0.5408
5	0.5000	0.5081	0.5152	0.5408
6	0.8750	0.8786	0.8788	0.8897
7	0.2500	0.2561	0.1818	0.1971
8	1.000	1.000	0.000	0.000
9	0.8750	0.8786	0.2121	0.2293
10	0.2500	0.2561	0.3939	0.4185
11	0.8750	0.8786	0.8788	0.8897
12	0.000	0.000	1.000	1.000
13	0.2500	0.2561	0.3030	0.3247
14	0.2500	0.2561	0.5455	0.5709
15	0.5000	0.5081	0.9091	0.9176
16	0.8750	0.8786	0.9091	0.9176

3.2.3 计算每个评价指标的相似度和总相似度

评价指标的相似度 R_i 计算公式为：

$$R_i = 1 - \left[\frac{1 - t_i(x_{ij})}{2 + t_i(x_{ij})} + \frac{f_i(x_{ij})}{1 + f_i(x_{ij})} \right] \quad (10)$$

采用变异系数法对不同评价指标赋予不同的权重。变异系数为：

$$V_i = \frac{\sigma_i}{x_i} \quad (11)$$

式中： V_i 为第 i 个评价指标的变异系数； \bar{x}_i 为第 i 个评价指标的平均值； σ_i 为第 i 个评价指标的标准差。

权重系数 W_i 为：

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (12)$$

式中： W_i 为第 i 个评价指标的权重系数； n 为评价指标数。

总相似度 R 为：

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i R_i \quad (13)$$

将试验结果代入式（12）计算，得到最大损伤值的权重系数为 0.2390，最大成形载荷的权重系数为 0.7610。最优理想值的相似度和总相似度如表 7 所示。

表 7 最优理想值的相似度和总相似度

Table 7 Similarity and total similarity of optimal ideal values

序号	最大损伤值相似度	最大成形载荷相似度	总相似度
1	0.7130	0.8586	0.4119
2	0.8483	0.9274	0.4542
3	0.3551	0.5791	0.2628
4	0.2401	0.4926	0.2161
5	0.4703	0.4926	0.2436
6	0.8483	0.8586	0.4281
7	0.2401	0.1797	0.0971
8	1.0000	0.0000	0.1195
9	0.8483	0.2086	0.1807
10	0.2401	0.3791	0.1729
11	0.8483	0.8586	0.4281
12	0.0000	1.0000	0.3805
13	0.2401	0.2942	0.1407
14	0.2401	0.5278	0.2295
15	0.4703	0.8926	0.3958
16	0.8483	0.8926	0.4410

3.2.4 Vague 集优化结果

计算轴端自锁螺母收口工艺参数在不同水平下对评价指标 Vague 集理想值的平均相似度。各个因素的平均相似度计算结果如表 8 所示。

表 8 各因素下的平均相似度

Table 8 Average similarity of each factor

工艺参数	平均相似度				相似度
	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	极差
保压时间	0.3363	0.2220	0.2906	0.3018	0.1143
下压速度	0.2442	0.3211	0.2960	0.2893	0.0769
摩擦因数	0.4272	0.3685	0.1981	0.1567	0.2705

平均相似度数值最高的水平为最优解，由表 8 可得：

（1）保压时间 t 对螺母收口性能的影响相似度排序为： $t_1 > t_4 > t_3 > t_2$ ；

（2）下压速度 v 对螺母收口性能的影响相似度排序为： $v_2 > v_3 > v_4 > v_1$ ；

（3）摩擦因数 μ 对螺母收口性能的影响相似度排序为： $\mu_1 > \mu_2 > \mu_3 > \mu_4$ ；

综上，优化的工艺参数组合为 $t_1 v_2 \mu_1$ ，即保压时间为 0.5 s、下压速度为 40 mm · s⁻¹、摩擦因数为 0.1。

特种成形栏目由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司赞助刊出

4 试验验证

4.1 仿真试验

将正交试验优化求得的工艺参数组合 $t_2v_1\mu_1$ 和 Vague 集优化求得的工艺参数组合 $t_1v_2\mu_1$ 进行仿真对比。优化效果对比如表 9 所示。

表 9 正交试验与 Vague 集优化结果对比
Table 9 Comparison of optimization results between orthogonal and Vague set

优化方法	最大损伤值	最大成形载荷/N
正交试验	0.117	15000
Vague 集	0.112	14800

由表9优化效果对比可知：Vague集优化后的

最大损伤值和最大成形载荷均小于正交试验优化的结果，因此，Vague 集优化效果更好。正交试验优化和 Vague 集优化的损伤值分布云图如图 10 所示，最大成形载荷曲线如图 11 所示。

4.2 生产试验验证

采用改进后的 $\alpha=30^\circ$ 的收口模和 Vague 集优化后的工艺参数组合 $t_1v_2\mu_1$ 在单臂液压机上对轴端自锁螺母收口进行试模生产验证，单臂液压机型号为 YQ41-10T，试验厂家为山东滕州达因重工机床有限公司。收口设备及模具如图 12 所示。

收口完成后的轴端自锁螺母实物如图 13 所示，经查验，试件成形质量较好，螺母内螺纹无裂纹，螺母尾部齿形无外翻现象，经尺寸检验后发现尺寸和仿真尺寸比较接近，收口一致性好，收口精度及外观质量符合检测要求。

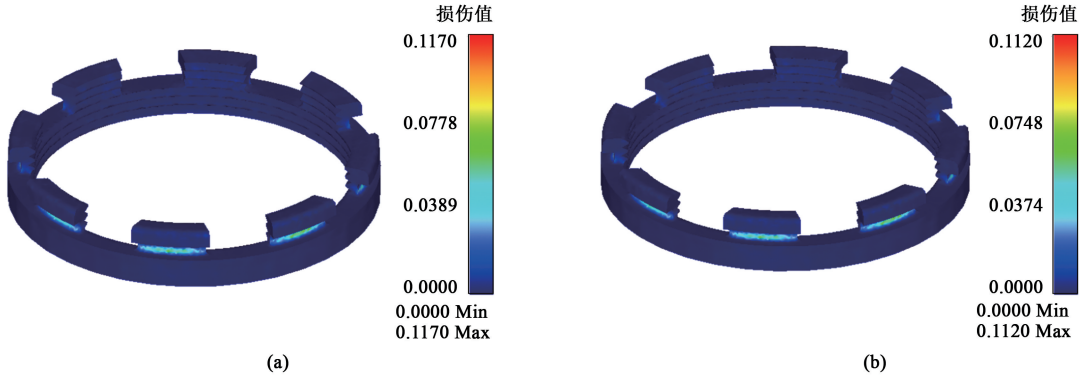


图 10 损伤值分布云图
(a) 正交试验优化 (b) Vague 集优化
Fig. 10 Distribution nephgrams of damage value
(a) Orthogonal test optimization (b) Vague set optimization

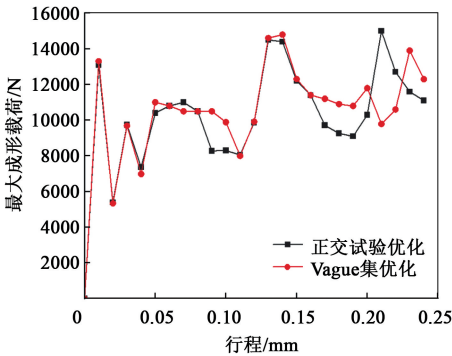


图 11 最大成形载荷-行程曲线
Fig. 11 Curves of maximum forming force-stroke

5 结论

(1) 基于最大等效应力和收口精度，确定最优

收口模锥面角为 30° 。

(2) 对比正交试验和 Vague 集优化结果，确定收口最优工艺参数组合为保压时间为 0.5 s、下压速度为 $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.1。

(3) 结合仿真试验和实际生产对 30° 的收口模和 Vague 集优化得出的最优工艺参数组合进行了验证，结果均表明，该方案能够稳定实现预期的收口效果，有效解决大尺寸小宽径比轴端自锁螺母收口不一致与螺母齿形外翻问题，具有科学性和实用性。

(4) 分析对象为特定尺寸和材料的轴端自锁螺母，研究结果不具普遍性，若自锁螺母的结构或材料发生改变，需另行分析以确定合适的模具结构和工艺参数，本文所用方法可供参考。

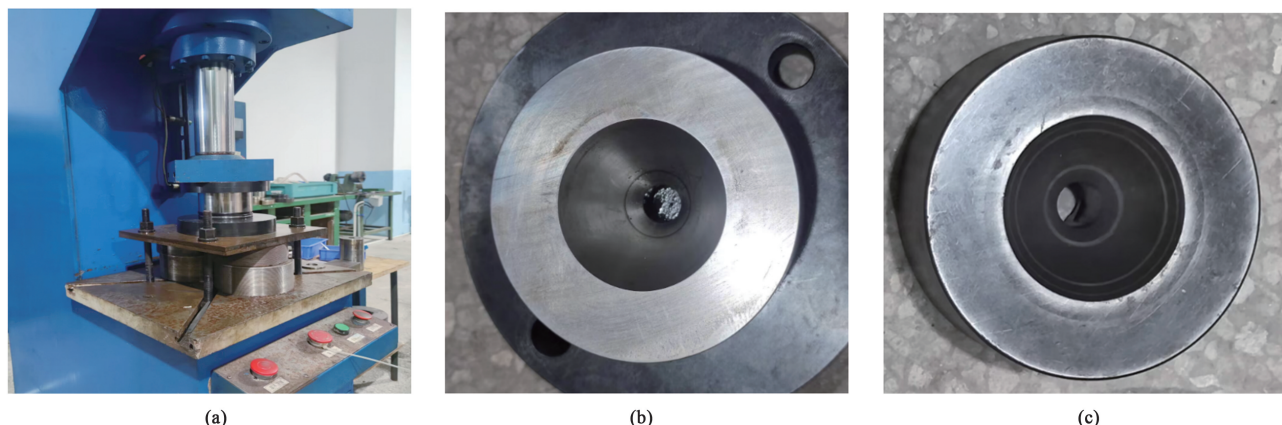


图12 收口设备及模具图

(a) 收口设备 (b) 改进后的收口模 (c) 原有收口模

Fig. 12 Photos of closing equipment and die

(a) Closing equipment (b) Improved closing die (c) Original closing die



图13 轴端自锁螺母实物图

Fig. 13 Physical drawing of shaft-end self-locking nut

参考文献:

- [1] Cai Z Q, Wang Y H, Cao H Y, et al. Life prediction of self-locking nut for aeroengine based on survival analysis and bayesian network [A]. IEEE, 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) [C]. Singapore: IEEE, 2020.
- [2] 刘维伟. 航空发动机叶片关键制造技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2016 (21): 50-56.
Liu W W. Research progress on key manufacturing technology of aeroengine blades [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016 (21): 50-56.
- [3] Li M, Yang Z J, Dong H, et al. Machining performance of high energy die-sinking electrical discharge machining on GH2132 [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2020, 35 (9): 1024-1031.
- [4] Song H Z, Zhao G L, Duan S W, et al. Effect of deep cryogenic treatment on improving the high-temperature impact resistance of Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2024, 909: 146846.
- [5] 田宪华, 闫奎呈, 赵军, 等. GH2132 高温高应变率下力学性能分析与 Johnson-Cook 本构模型的建立 [J]. 中国机械工程, 2022, 33 (7): 872-881.
Tian X H, Yan K C, Zhao J, et al. Properties at elevated temperature and high strain rate and establishment of Johnson-Cook constitutive model for GH2132 [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33 (7): 872-881.
- [6] 王立东, 刘风雷, 赵庆云. 收口量对钛合金自锁螺母锁紧性能的影响 [J]. 航空制造技术, 2017 (Z2): 79-82, 87.
Wang L D, Liu F L, Zhao Q Y. Influence of crimping dimension on locking properties of titanium alloy self-locking nut [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017 (Z2): 79-82, 87.
- [7] 张宇鹏. 航空用 TC16 钛合金自锁螺母的研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Zhang Y P. Development of Self-locking TC16 Titanium Alloy Nuts for Aerospace Industry [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [8] 吴南星, 鲍星, 徐梅香. 不同因素对高锁螺母锁紧力矩影响的研究 [J]. 航空制造技术, 2016 (9): 103-106.
Wu N X, Bao X, Xu M X. Influence of some different factors on locking torque of high-lock nut [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016 (9): 103-106.
- [9] 陈衍祥, 罗小龙, 余江鸿, 等. 高强度螺栓轴力与扭矩关系线性回归分析及不确定度评定 [J]. 机电产品开发与创新, 2024, 37 (2): 142-146.
Chen Y X, Luo X L, Yu J H, et al. Linear regression analysis and uncertainty evaluation of the relationship between axial force and torque of high strength bolts in pressure vessels [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2024, 37 (2): 142-146.
- [10] 齐增星, 梁铨, 吴同一, 等. TC4 自锁螺母三点收口成型工艺有限元仿真研究 [J]. 机械科学与技术, 2024, 43 (12):

- 2076–2082.
- Qi Z X, Liang C, Wu T Y, et al. Finite element simulation of three-point necking forming process of TC4 self-locking nut [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024, 43 (12): 2076–2082.
- [11] 梁坤, 许丁, 辛选荣, 等. 高温合金螺母挤压成形工艺研究及模具设计 [J]. 模具工业, 2020, 46 (8): 43–46, 50.
- Liang K, Xu D, Xin X R, et al. Study on extrusion forming technology for high temperature alloy nut and the die design [J]. Die & Mould Industry, 2020, 46 (8): 43–46, 50.
- [12] 田晶, 高崇, 关焦月, 等. 收口自锁螺母高保真建模方法及松动特性研究 [J]. 机械工程学报, 2024, 60 (21): 132–143.
- Tian J, Gao C, Guan J Y, et al. Study on modeling method and bolt loosening characteristics of self-locking nut [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60 (21): 132–143.
- [13] Li M, Zhou L, Zhang M Y, et al. Numerical simulation of closing amount for aerial self-locking nuts with different materials [J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series C, 2021, 102 (6): 1571–1579.
- [14] 孙景冬, 郑冬梅. 多种收口因素对 GH738 自锁螺母力矩衰减速度的影响研究 [J]. 航空制造技术, 2020, 63 (12): 87–91, 96.
- Sun J D, Zheng D M. Various influence on locking torque descent rate of GH738 self-locking nut [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63 (12): 87–91, 96.
- [15] Han Y B, Han P, Yuan B, et al. Design and application of Vague set theory and adaptive grid particle swarm optimization algorithm in resource scheduling optimization [J]. Journal of Grid Computing, 2023, 21 (2): 24–24.
- [16] Sheng J, Wan W, Liu D R, et al. Investigation of the optimization of unloading mining scheme in large deep deposit based on vague set theory and its application [J]. Advances in Civil Engineering, 2021 (1): 6690861.
- [17] 黄南, 李少龙, 朱伟坚. 航空发动机自锁螺母使用寿命影响因素分析与研究 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (4): 68–74.
- Huang N, Li S L, Zhu W J. Research on influencing factors of service life of aero-engine self-locking nut [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (4): 68–74.
- [18] 黄南, 李少龙, 刘建雄, 等. 航空发动机用自锁螺母寿命分析与优化设计 [Z]. 中国航发湖南动力机械研究所, 2019.
- Huang N, Li S L, Liu J X, et al. Life analysis and optimization of self-locking nuts for aero-engines [Z]. China Aviation Development Hunan Power Machinery Research Institute, 2019.
- [19] 汪健, 吴英宏, 张四林. 自锁螺母力矩衰减速度的影响因素 [J]. 华东科技 (综合), 2020 (9): 262–263.
- Wang J, Wu Y H, Zhang S L. Factors affecting the rate of torque decay in self-locking nuts [J]. East China Science & Technology (Comprehensive), 2020 (9): 262–263.
- [20] 胡军林. 飞机舱盖连接用快卸收口螺母研制过程工艺技术难点分析及解决措施 [J]. 军民两用技术与产品, 2017 (10): 108–109.
- Hu J L. Analysis of technological difficulties in the development process of quick-release nuts for aircraft hatch connections and measures to solve them [J]. Dual-Use Technologies and Products, 2017 (10): 108–109.
- [21] 张辰锐, 李辉. Vague 集在 C15 不锈钢变薄拉深工艺参数优化中的应用 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 115–120.
- Zhang C R, Li H. Application of vague set in ironing process parameter optimization of C15 stainless steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (1): 115–120.
- [22] 赵大庆. 基于 Vague 集的多目标决策方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- Zhao Q Q. The Study on Multi-objective Decision Making Method Based on Vague Sets [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [23] 赵煜, 李家春, 张萍, 等. 高速列车 A286 螺栓螺纹滚压工艺多目标优化 [J]. 机电工程, 2023, 40 (4): 502–508, 515.
- Zhao Y, Li J C, Zhang P, et al. Multi-objective optimization of rolling process for A286 bolt thread of high-speed train [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2023, 40 (4): 502–508, 515.

警惕不法网站，保障投稿安全

近期，本刊接到多名作者投诉，网络上出现冒充《锻压技术》杂志官方网站的伪网站，如 www.dyjszz.cn，这些网站盗用本杂志官网内容及相关行业信息，误导和欺骗广大投稿作者，骗取文章版面费、套取作者文章及个人信息，侵犯了广大作者的切身利益。

特此声明，本刊唯一官方网站为 www.fstjournal.net，投稿方式为网站注册登录投稿，不接受邮箱投稿。请作者投稿时务必认准杂志官方网站，谨防受骗。

本刊郑重警告伪网站相关人员尽快停止违法行为，否则将严肃处理，并将运用一切法律手段维护本刊的权利。

请广大读者协助本刊监督网络上的不法行为，一经发现，请联系本刊，本刊将及时处理，共同努力营造良好的期刊网络氛围。

《锻压技术》杂志联系方式：fst@263.net；010-62920652。

《锻压技术》编辑部