

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.014

GH4169 螺栓圆角滚压对表面粗糙度和变形量的影响

何坤^{1,2}, 马震宇³, 樊建军^{1,2}, 赵阳^{1,2}, 漆昌恒³, 徐锋³, 左敦稳³

(1. 河南航天精工制造有限公司, 河南 信阳 464099;

2. 河南省紧固连接技术重点实验室, 河南 信阳 464099;

3. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘要:通过正交试验,研究不同滚压工艺参数对 GH4169 螺栓头下圆角处水平表面粗糙度、垂直表面粗糙度和塑性变形量的影响。实验用螺栓为 1 300 MPa 级 GH4169 普通螺纹六角头螺栓,标准号为 Q/Dy 1079—2012,规格为 M6×42-A,头下圆角 $R=0.6$ mm,使用激光共聚焦显微镜和表面形状测量仪对表面粗糙度和变形量进行表征,重点研究滚压力、滚压时间和滚压转速 3 个工艺参数对滚压强化的影响。结果表明:滚压工艺参数对螺栓头下圆角水平表面粗糙度的影响主次顺序为滚压转速、滚压时间、滚压力;对垂直表面粗糙度的影响主次顺序为滚压转速、滚压力、滚压时间;对变形量 A 和 C 的影响主次顺序为滚压力、滚压转速、滚压时间;对变形量 B 和轴向残余应力的影响主次顺序为滚压力、滚压时间、滚压转速。

关键词:GH4169 螺栓;圆角滚压;表面粗糙度;变形量

中图分类号:TH161⁺.14 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)05-0073-06

Effect of Fillet Rolling of GH4169 Bolt on Surface Roughness and Deformation

HE Kun^{1,2}, MA Zhenyu³, FAN Jianjun^{1,2}, ZHAO Yang^{1,2}, QI Changheng³, XU Feng³, ZUO Dunwen³

(1. Henan Aerospace Precision Machining Co., Ltd., Xinyang 464099, China;

2. Henan Key Laboratory of Fastening Connection Technology, Xinyang 464099, China;

3. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper studies the effects of different rolling process parameters on the horizontal roughness, vertical roughness and plastic deformation of the lower fillet of GH4169 bolt head by orthogonal test. The bolts for experiment are 1 300 MPa grade GH4169 ordinary thread hexagon head bolts, whose standard number being Q/Dy1079-2012, with specification as M6×42-A and the fillet under the head as $R=0.6$ mm. The roughness and deformation are characterized by laser confocal microscopy and surface shape measuring instrument, with the focus on the study of the effects of three process parameters, rolling pressure, rolling time and rolling speed on rolling strengthening. The results show that the primary and secondary orders of the influence of rolling process parameters on the horizontal roughness of the fillet under the bolt head are: rolling speed, rolling time, rolling pressure; the primary and secondary effects on the vertical roughness are: rolling speed, rolling pressure, rolling time; the primary and secondary effects on deformation A and C are: rolling pressure, rolling speed, rolling time; the primary and secondary effects on the deformation B and axial residual stress are: rolling pressure, rolling time, and rolling speed.

Keywords: GH4169 bolts; fillet rolling; surface roughness; deformation

0 引言

GH4169 高温合金是一种镍基高温合金,合金组织由 γ 基体、 δ 相、碳化物及作为强化相的 γ'' [Ni_3Nb] 和 γ' [$\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Nb})$] 组成,主要应用温度范围为 $-253^\circ\text{C} \sim 650^\circ\text{C}$ [1-3]。该合金因强度高且能够在高温复杂应力条件下长期可靠服役,故被广泛应用于发动机螺栓的制造,又因室温下经时效热处理后强度等级可达到 1 300 ~ 1 500 MPa,故被大量应用于航空航天连接用

螺栓 [4-5]。

据统计,在螺栓的疲劳破坏中从螺栓头下圆角处断裂的约占 60%,从螺纹处断裂约占 25%,从螺纹与杆部连接处断裂约占 15% [6]。由此可见从螺栓头下圆角处断裂是螺栓主要的失效形式之一,圆角处的强度将直接影响到螺栓的机械强度 [7-9]。螺栓头下圆角是应力集中区,通过滚压强化可以延缓应力集中区裂纹萌生和扩展,提高螺栓的抗疲劳强度 [10-12]。GH4169 螺栓应力集中区示意图如图 1(a) 所示,从头下圆角处断裂图

第一作者简介:何坤(1994—),男,河南信阳人,工程师,硕士,研究方向为紧固件先进制造工艺技术,1041262449@qq.com。

如图 1(b)所示。

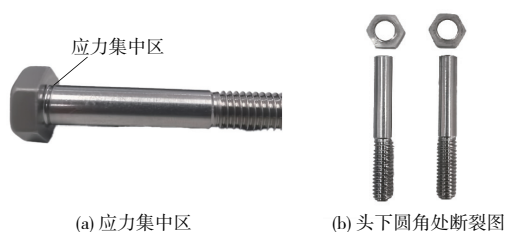


图 1 GH4169 高温合金螺栓

目前,国内主要航空标准件制造企业对螺栓头下圆角的滚压通常由工人通过经验手工操作,这使得生产中存在工艺参数不确定和产品稳定性差等现象^[13-15]。在航空航天等重大项目中,对 GH4169 高温合金等高强度螺栓的技术要求更高,仅凭经验的加工方式很难满足其要求^[16-17]。因此,研究螺栓头下圆角滚压工艺,获得能指导生产的试验数据,具有重要的学术和工程应用意义^[18-19]。本文针对滚压工艺对螺栓头下圆角处表面形貌、表面粗糙度和变形量的影响开展研究。

1 螺栓圆角滚压实验

1.1 实验试件及制备工艺

实验用螺栓为 GH4169 普通螺纹六角头螺栓,标准号为 Q/Dy 1079—2012,规格为 M6×42—A,头下圆角 $R = 0.6 \text{ mm}$,性能等级 $\sigma_b = 1\ 300 \sim 1\ 600 \text{ MPa}$ 。

实验用螺栓制备工艺路线为:①下料—②普车(端面和倒角)—③无心磨(通磨杆径)—④润滑(镀层)—⑤热锻(成型)—⑥表面处理(去除润滑镀层)—⑦喷砂(去除热锻产生的氧化层)—⑧热处理(固溶+时效)—⑨喷砂(细砂喷砂)—⑩普车(尾部中心孔)—⑪数控车(头下圆角、头部支撑面和杆部)—⑫普车(倒角和去中心孔)—⑬制标(头部端面标记)—⑭无心磨(磨杆部尺寸)—⑮滚圆角(滚压螺栓头下圆角)—⑯滚丝(滚制螺纹)—⑰探伤—⑱表面处理—⑲终检。

1.2 滚压强化参数选择和实验设计

本文主要研究螺栓圆角滚压工艺参数对圆角处表面粗糙度和塑性变形量的影响。滚压实验选用 SKG-03-50 数控圆角滚压机和圆角 $R = 0.55 \text{ mm}$ 滚压轮进行滚压强化,通过 3 因素 3 水平的正交试验,探究滚压力、滚压转速和滚压时间对滚压强化结果的影响。滚压角度选择为

45°,滚压力选择分别为 750 N、1 250 N 和 1 750 N,滚压时间选择分别为 2.0 s、2.5 s 和 3.0 s,滚压转速选择分别为 240 r/min、300 r/min 和 360 r/min,实验设计如表 1 所示。为减小实验误差,每组实验均选用 5 个样件进行。

表 1 3 因素 3 水平正交试验表

序号	滚压力/N	滚压转速/(r/min)	滚压时间/s
1	750	240	2.0
2	750	300	2.5
3	750	360	3.0
4	1 250	300	2.0
5	1 250	360	2.5
6	1 250	240	3.0
7	1 750	360	2.0
8	1 750	240	2.5
9	1 750	300	3.0

2 螺栓圆角滚压实验结果

2.1 表面形貌及表面粗糙度分析

螺栓头下圆角处一般技术要求为表面不应有裂缝、材料裂纹或条痕、凹痕、皱纹、切痕和损伤等缺陷。本文分别对滚压强化前和滚压强化后的螺栓头下圆角处进行激光共聚焦显微镜观测,其中滚压强化前螺栓头下圆角表面形貌图、二维平面图和三维形貌图如图 2 所示。滚压强化后(以序号 6 中一个样件为例)螺栓头下圆角表面形貌图、二维平面图和三维形貌图如图 3 所示。通过对比图 2(a)和图 3(a)的表面形貌图可以发现滚压强化带来了明显的表面质量优化,大幅减少了表面可见划痕,对提高螺栓强度具有积极意义。通过对比图 2(b)和图 3(b)的二维平面高度图可以发现,滚压处理后增大了螺栓头下圆角根部曲率半径,因此减小了螺栓头下圆角处应力集中的程度。通过对比图 2(c)和图 3(c)的三维形貌图可以发现,滚压后表面粗糙度有所改善。

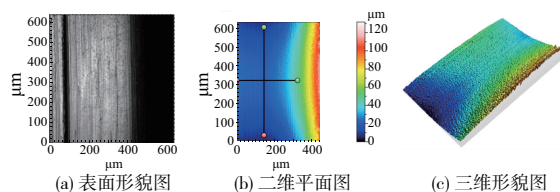


图 2 滚压强化前螺栓头下圆角处形貌图

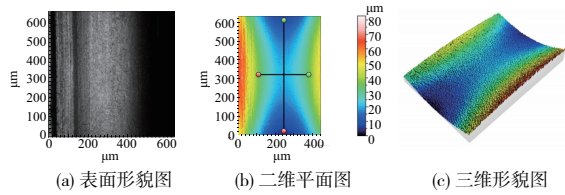


图3 滚压强化后螺栓头下圆角处形貌图

螺栓头下圆角处表面粗糙度对头下裂纹的萌生和扩展有很大影响。由断裂力学知识可知,材料的表面粗糙度越大,材料微观表面的沟壑越深,应力集中现象越明显,疲劳强度越低。因此应尽可能使螺栓头下圆角处的表面获得较优的水平垂直表面粗糙度。基于此,本文还对滚压强化前后的螺栓头下圆角表面粗糙度分别进行了量化测量,采用的评价参数为轮廓算术平均偏差 Ra ,单位为 μm 。

图4和图5显示了滚压强化前和滚压强化后(以序号6中一个样件为例)螺栓头下圆角的轮廓和表面粗糙度曲线,其中图4(a)为图2(b)垂直线对应的轮廓;图4(b)为图2(b)水平线对应的轮廓;图5(a)为图3(b)垂直线对应的轮廓;图5(b)为图3(b)水平线对应的轮廓;图4和图5中各水平表面粗糙度曲线图4(c)与图5(c)和垂直表面粗糙度曲线图4(d)与图5(d)由其对应的水平和垂直轮廓曲线去除形状和波纹后得到。通过分析表面粗糙度曲线,可以得到滚压前螺栓头下圆角处的水平表面粗糙度 $Ra=0.985\ 3$ 和垂直表面粗糙度 $Ra=1.050\ 0$,滚压后螺栓头下圆角处的水平粗糙度 $Ra=0.703\ 7$ 和垂直表面粗糙度 $Ra=0.794\ 5$ 。通过量化的表面粗糙度数值对比,可知滚压前后表面粗糙度变化明显,滚压后表面粗糙度显著降低,达到 N6 级。

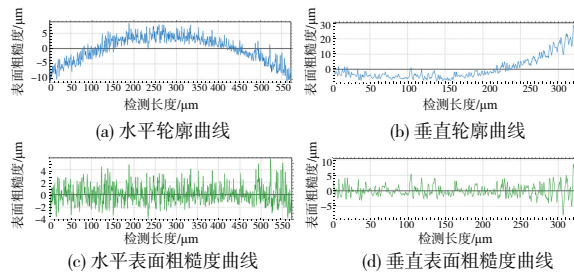


图4 滚压强化前螺栓头下圆角轮廓和粗糙度曲线

对经过滚压正交试验后的螺栓头下圆角处进行表面粗糙度检测,样件检测结果去除异常值后取平均值,结果如表2所示。从表2中可以看到:滚压后的任意序号螺栓头下圆角的表面粗糙度较

滚压前均明显变小,这对降低应力集中并提高螺栓的疲劳强度作用明显。

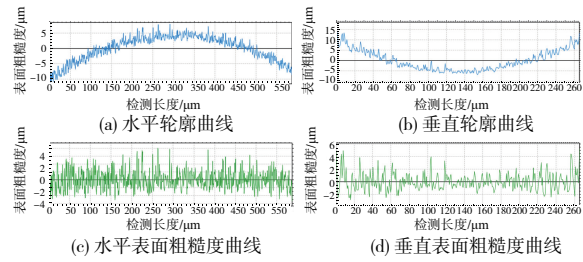


图5 滚压强化后螺栓头下圆角轮廓和粗糙度曲线

表2 表面粗糙度正交试验结果

单位: μm

序号	水平表面粗糙度	垂直表面粗糙度
1	0.776 2	0.898 6
2	0.661 4	0.784 9
3	0.733 6	0.844 4
4	0.690 5	0.827 1
5	0.723 0	0.830 8
6	0.756 3	0.804 2
7	0.677 5	0.783 8
8	0.701 2	0.860 5
9	0.720 5	0.834 6

利用极差分析法分析滚压强化过程中滚压力、滚压转速和滚压时间对头下圆角处表面粗糙度的影响,表3和表4分别为水平表面粗糙度和垂直表面粗糙度极差分析表,其中 K_i ($i=1,2,3$) 表示3个水平下的表面粗糙度之和, R 则是表示每个因素下不同水平表面粗糙度之和平均值的极差,计算公式为 $R=\max \bar{K}_i-\min \bar{K}_i$ 。

表3 水平表面粗糙度极差分析结果表

单位: μm

水平	滚压力因素	滚压转速因素	滚压时间因素
K_1	2.171 2	2.233 7	2.144 2
K_2	2.169 8	2.072 5	2.085 6
K_3	2.099 2	2.134 1	2.210 4
R	0.024 0	0.053 7	0.041 6

由表3可得到滚压参数对水平粗糙度的影响程度。水平表面粗糙度上影响较大的是滚压转速,其次是滚压时间,影响最小的是滚压力。表面

粗糙度最优的滚压参数为滚压力 1 750 N,滚压转速 300 r/min,滚压时间 2.5 s。

表 4 垂直表面粗糙度极差分析结果表

单位: μm			
水平	滚压力因素	滚压转速因素	滚压时间因素
K_1	2.527 9	2.563 3	2.509 5
K_2	2.462 1	2.446 7	2.476 3
K_3	2.479 0	2.459 0	2.483 2
R	0.021 9	0.038 9	0.011 1

由表 4 可得到滚压参数对垂直粗糙度的影响程度。垂直粗糙度上影响较大的是滚压转速,其次是滚压力,影响最小的是滚压时间。表面粗糙度最优的滚压参数为滚压力 1 250 N,滚压转速 300 r/min,滚压时间 2.5 s。

综合对比滚压参数对水平和垂直表面粗糙度的影响,发现滚压转速均为影响最为显著的因素,而垂直表面粗糙度的次要影响因素和水平表面粗糙度不一致的原因可能是滚压力对垂直方向因前序加工产生的划痕沟壑的移峰填谷效应更明显。

2.2 滚压变形量分析

对螺栓头下圆角进行滚压会在接触和临近部位造成变形,而在临近部位所产生的凸起变形过大,会影响螺栓的装配使用,所以在保证滚压深度的情况下,圆角两侧与杆部和端部光滑过渡是基本要求。因此有关标准对螺栓头下圆角处的变形量进行了严格规定,且变形量是滚压强化工艺参数的重要检测指标。

对于本实验采用的 M6 螺栓,即对角两边缘凸出量的最大变形量 $A_{\max}$ 为 0.05 mm,滚压深度的最大变形量 $B_{\max}$ 为 0.05 mm,螺杆上凸变形的下缘到螺栓头部下端面 $C_{\max}$ 为 1.5 mm。螺栓头下圆角滚压强化所允许变形量示意图如图 6 所示,所允许的最大变形量值如表 5 所示。

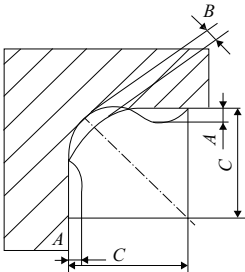


图 6 螺栓头下圆角滚压变形图

表 5 螺栓头下圆角滚压变形量 单位: mm

螺栓公称直径	$A_{\max}$	$B_{\max}$	$C_{\max}$
5~7			1.5
8~10	0.05	0.05	2.5
12~16			3.5
18~25			4.5

本文通过 2303 型表面形状测量仪对滚压强化后的螺栓头下圆角变形量 A 、 B 和 C 进行检测,去除异常值后取平均值如表 6 所示。从表中观察实验结果发现,本正交试验采用的滚压参数所滚压出的头下圆角均满足变形量的要求。

表 6 滚压变形量正交试验结果 单位: mm

序号	变形量 A	变形量 B	变形量 C
1	0.012 7	0.024 4	0.883 6
2	0.012 2	0.025 3	0.845 5
3	0.017 0	0.028 7	0.854 2
4	0.018 9	0.027 1	0.846 6
5	0.018 9	0.029 8	0.884 2
6	0.017 2	0.027 4	0.882 5
7	0.022 8	0.030 7	0.946 9
8	0.020 0	0.036 5	0.924 6
9	0.018 6	0.043 2	0.908 0

利用方差分析法分析滚压强化过程中滚压力、滚压转速和滚压时间对头下圆角处变形量的影响,表 7、表 8 和表 9 分别为变形量 A 、变形量 B 和变形量 C 的方差分析表,其中 $K_i(i=1,2,3)$ 表示 3 个水平下的变形量之和。

表 7 变形量 A 方差分析结果表 单位: μm

水平	滚压力因素	滚压转速因素	滚压时间因素
K_1	0.042 0	0.049 9	0.054 4
K_2	0.055 0	0.049 8	0.051 1
K_3	0.061 4	0.058 7	0.052 8

表 8 变形量 B 方差分析结果表 单位: μm

水平	滚压力因素	滚压转速因素	滚压时间因素
K_1	0.078 4	0.088 3	0.082 2
K_2	0.084 3	0.095 6	0.091 6
K_3	0.110 4	0.089 2	0.099 3

表 9 变形量 C 方差分析结果表 单位: μm

水平	滚压力因素	滚压转速因素	滚压时间因素
K_1	2.583 3	2.690 7	2.677 1
K_2	2.613 3	2.600 1	2.654 3
K_3	2.779 5	2.685 3	2.644 7

由表 7 可得到滚压参数对变形量 A 的影响程度。从显著性分析的角度看,本实验中各因素的自由度均为 2,误差的自由度为 2,可查各置信水平对应的临界 F_A 值为: $F_{0.01}(2, 2) = 99.00$; $F_{0.05}(2, 2) = 19.00$; $F_{0.10}(2, 2) = 9.00$; $F_{0.25}(2, 2) = 3.00$ 。将试验得到的实际 F_A 与临界值比较,得到因素水平变化对结果影响的显著性结论如下:滚压力对变形量 A 影响较显著;滚压转速对变形量 A 影响不显著但有影响;滚压时间对变形量 A 基本无影响。综上,对变形量 A 影响主次顺序为滚压力、滚压转速、滚压时间。

由表 8 可得到滚压参数对变形量 B 的影响程度。从显著性分析的角度看,将实验得到的实际 F_A 与临界值比较,得到因素水平变化对结果影响的显著性结论如下:滚压力对变形量 B 影响不显著但有影响;滚压转速对变形量 B 基本无影响;滚压时间对变形量 B 基本无影响。综上,对变形量 B 影响主次顺序为滚压力、滚压时间、滚压转速。

由表 9 可得到滚压参数对变形量 C 的影响程度。从显著性分析的角度看,将实验得到的实际 F_A 与临界值比较,得到因素水平变化对结果影响的显著性结论如下:滚压力对变形量 C 影响较显著;滚压转速对变形量 C 影响不显著但有影响;滚压时间对变形量 C 基本无影响。综上,对变形量 C 影响主次顺序为滚压力、滚压转速、滚压时间。

2.3 残余应力分析

本文分别对滚压强化前和滚压强化后的螺栓头下圆角处的残余应力使用 X-350A 型 X 射线应力测定仪进行测定。检测发现未经过滚压强化的螺栓,其头下圆角处轴向残余应力范围在 $\pm 18 \text{ MPa}$,平均轴向残余应力接近 0。同时对经过滚压正交试验后的螺栓头下圆角处进行残余应力测定,样件检测数据去除异常值后取平均值,轴向残余应力检测结果如表 10 所示。从表 10 中可以看出,滚压后的任意序号螺栓头下圆角的轴向残余应力均为负值,表现为残余压应力。

表 10 轴向残余应力正交试验结果 单位: MPa

序号	轴向残余应力
1	-211.1
2	-224.0
3	-269.4
4	-254.1
5	-288.0
6	-259.5
7	-299.9
8	-383.3
9	-471.6

利用极差分析法分析滚压强化过程中滚压力、滚压转速和滚压时间对头下圆角处轴向残余应力的影响,表 11 为轴向残余应力极差分析表,其中 $K_i (i=1, 2, 3)$ 表示不同水平下的轴向残余应力之和, R 则是表示每个因素下不同水平的轴向残余应力之和平均值的极差。

表 11 轴向残余应力极差分析结果表 单位: MPa

水平	滚压力因素	滚压转速因素	滚压时间因素
K_1	-704.5	-853.9	-765.1
K_2	-801.6	-949.7	-895.3
K_3	-1 154.8	-857.3	-1 000.5
$\bar{K}_1$	-234.8	-284.6	-255.0
$\bar{K}_2$	-267.2	-316.6	-298.4
$\bar{K}_3$	-384.9	-285.8	-333.5
$\max \bar{K}_i$	-384.9	-316.6	-333.5
$\min \bar{K}_i$	-234.8	-284.6	-255.0
R	150.1	31.9	78.5

由表 11 可得到滚压工艺参数对头下圆角处轴向残余应力的影响主次。对螺栓头下圆角处轴向残余应力影响最大的是滚压力,其次是滚压时间,影响最小的是滚压转速。适当的残余压应力可以使螺栓头下圆角表面处于压应力状态,能够在裂纹萌生前的很长时间中起到降低交变载荷中拉应力水平的作用,从而提高螺栓疲劳强度,增加螺栓使用寿命。

3 结语

1) GH4169 高温合金螺栓头下圆角处经滚压强化后表面粗糙度显著降低,水平表面粗糙度可降至 $0.8 \mu\text{m}$ 以下,垂直表面粗糙度可降至 $0.9 \mu\text{m}$ 以下。在优选工艺参数的情况下水平表面粗糙度

可降至 $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 以下,垂直表面粗糙度可降至 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 以下。

2) 滚压工艺参数对水平表面粗糙度的影响主次顺序为滚压转速、滚压时间、滚压力;对垂直表面粗糙度的影响主次顺序为滚压转速、滚压力、滚压时间。

3) 滚压工艺参数对螺栓头下圆角变形量 A 影响主次顺序为滚压力、滚压转速、滚压时间;对变形量 B 影响主次顺序为滚压力、滚压时间、滚压转速;对变形量 C 影响主次顺序为滚压力、滚压转速、滚压时间。

4) 滚压工艺参数对螺栓头下圆角轴向残余应力影响主次顺序为滚压力、滚压时间、滚压转速。

参考文献:

- [1] 庄景云,杜金辉,邓群,等. 变形高温合金 GH4169[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [2] 刘光辉,孙红星,刘丹,等. GH4169 合金螺栓锻造工艺及力学性能[J]. 锻压技术,2025,50(1):42-47.
- [3] 王昭晗,潘凯,陈永辉,等. GH4169 镍基高温合金超高频振动疲劳实验[J]. 航空材料学报,2025,45(2):110-118.
- [4] 史艳霞. 一种高强度螺栓零件加工工艺研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.
- [5] 刘婧颖,李浩楠,徐昊,等. 螺栓根部圆角滚压的残余应力分布及参数优化研究[J]. 航空制造技术,2024,67(18):60-65,72.
- [6] 王勉,王自勤. Ti6 螺栓头下圆角滚压工艺参数与疲劳强度研究[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版),2008,37(5):108-110.
- [7] YANG J, LIU D X, ZHANG X H, et al. The effect of ultrasonic surface rolling process on the fretting fatigue property of GH4169 superalloy[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 133: 105373.
- [8] 杨如松. 圆角滚压残余压应力与曲轴疲劳强度的关系[J]. 柴油机设计与制造,2016,22(3):41-45,56.
- [9] 申顺. GH4169 高温合金裂纹萌生数值模拟[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):122-124.
- [10] 石大鹏,马震宇,何坤,等. 基于神经网络的 GH4169 螺栓圆角滚压强化性能预测[J]. 工具技术,2025,59(2):114-119.
- [11] 孟祥峰. 基于普通车床的螺栓过渡圆角滚压强化装置设计[J]. 机械工程与自动化,2024(2):95-97.
- [12] HÖNNIGE J, SEOW C E, GANGULY S, et al. Study of residual stress and microstructural evolution in as-deposited and inter-pass rolled wire plus arc additively manufactured Inconel 718 alloy after ageing treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 801: 140368.
- [13] YANG J, LIU D X, REN Z C, et al. Grain growth and fatigue behaviors of GH4169 superalloy subjected to excessive ultrasonic surface rolling process [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 839: 142875.
- [14] WU D B, LV H R, WANG H, et al. Surface micro-morphology and residual stress formation mechanisms of near-net-shaped blade produced by low-plasticity ultrasonic rolling strengthening process[J]. Materials & Design, 2022, 215: 110513.
- [15] 夏春和. 螺栓圆角滚压强化工艺方法[J]. 机械管理开发,2022,37(9):56-58.
- [16] 陈家兑,刘勇,田丰果,等. 螺栓圆角滚压工艺分析及数控圆角滚压机研制[J]. 制造业自动化,2011,33(12):72-75.
- [17] 陈晖,虞彪,卢嘉专. 基于神经网络的天然气双燃料发动机性能预测[J]. 汽车工程师,2023(4):20-25.
- [18] 罗远新,曹锋,易丽群,等. 大型曲轴圆角滚压矫直工艺优化研究[J]. 重型机械,2024(4):25-32.
- [19] 翟鑫钰,陆金桂. 基于神经网络的螺旋桨敞水性能预测[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2022,44(3):291-297.

收稿日期:2023-11-03