

## GH4169 合金螺栓镦制工艺及力学性能

刘光辉<sup>1</sup>, 孙红星<sup>1,2</sup>, 刘 丹<sup>1</sup>, 孙晓军<sup>3</sup>, 秦单单<sup>3</sup>, 周玉辉<sup>4</sup>, 刘 华<sup>1</sup>

(1. 中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司, 河南 郑州 450001;

2. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049; 3. 河南航天精工制造有限公司, 河南 信阳 464000;

4. 上海理工大学 材料与化学学院, 上海 200093)

**摘要:** 为了研究某型号 GH4169 合金螺栓的镦制工艺及力学性能, 利用 Deform-3D 有限元模拟软件对 M30 mm×130 mm 规格的 GH4169 合金螺栓的镦制成形过程进行了数值模拟, 分析了不同摩擦因数对成形载荷的影响、成形过程中工件的等效应力和模具应力分布等, 根据模拟结果设计、制造相应模具结构并完成了镦制工艺试验。将试验得到的 GH4169 合金螺栓锻件进行后续加工, 分析时效处理与滚丝工艺的顺序对其显微组织及其力学性能的影响。研究表明, 制定的 GH4169 合金螺栓镦制成形工艺是可行的, 模具结构设计合理, 加工时采用先时效处理后滚丝加工的制造工艺可降低材料的晶粒尺寸且具有良好的螺纹形态, 其疲劳寿命高于先滚丝加工后时效处理的螺栓。研究结果对 GH4169 合金螺栓镦制工艺及后续加工方法具有较实用的指导价值。

**关键词:** GH4169 合金; 镦制; 模具结构; 显微组织; 力学性能

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.01.006

**中图分类号:** TG316.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2025) 01-0042-06

## Upsetting process and mechanical properties on alloy GH4169 bolt

Liu Guanghui<sup>1</sup>, Sun Hongxing<sup>1,2</sup>, Liu Dan<sup>1</sup>, Sun Xiaojun<sup>3</sup>, Qin Dandan<sup>3</sup>, Zhou Yuhui<sup>4</sup>, Liu Hua<sup>1</sup>

(1. China Academy of Machinery Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Henan Aerospace Precision Manufacturing Co., Ltd., Xinyang 464000, China;

4. School of Materials and Chemistry, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In order to study the upsetting process and mechanical properties of a certain model of alloy GH4169 bolt, the upsetting process of alloy GH4169 bolt with M30 mm×130 mm was numerically simulated by finite element simulation software Deform-3D, and the influences of different friction coefficients on forming loads, equivalent stress distribution of workpieces and stress distribution in the molds during forming process were analyzed. Then, based on the simulation results, corresponding mold structures were designed, and corresponding upsetting process experiments were conducted. Furthermore, the alloy GH4169 bolt forgings obtained from the experiment was performed subsequent process, and the influences of aging treatment and rolling wire process sequence on their microstructure and mechanical properties were analyzed. The research results indicate that the developed alloy GH4169 bolt upsetting process is feasible, the mold structure design is reasonable, and the manufacturing process of aging treatment before rolling wire processing during processing can reduce the grain size of the material and have good thread morphology. Its fatigue life is higher than that of bolts processed by rolling wire processing before aging treatment. Thus, the research results have practical guidance value for the upsetting process and subsequent processing methods of alloy GH4169 bolts.

**Key words:** alloy GH4169; upsetting; die structure; microstructure; mechanical property

GH4169 属于 Fe-Ni-Cr 基高温合金范畴, 其服役温度高达 800 ℃, 材料中添加的 Cr 和 Co 元素在

热处理过程中能够形成强化相, 具有良好的高温力学性能, 在航空航天紧固件中应用广泛<sup>[1-3]</sup>。但是该合金的热变形抗力较大, 锻造温度范围较窄<sup>[4-5]</sup>, 因此, 需要对其镦制工艺进行模拟, 以便选择合适的镦制设备进行试验研究。除此之外, 后续时效处理与滚丝工艺顺序对其显微组织和力学性能影响较大, 直接关系其使用寿命, 裴烈勇等<sup>[6]</sup>研究了时效处理和滚丝工艺顺序对 GH738 合金拉伸力学性能的影响, 发现了时效后进行滚丝时的抗拉强度为

收稿日期: 2024-04-11; 修订日期: 2024-07-21

基金项目: 科研院所双创基金资助项目 (203SC2023001-07);

河南省重点研发专项基金资助项目 (231111221800)

作者简介: 刘光辉 (1989-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: liu0406gh@163.com

通信作者: 孙红星 (1975-), 男, 博士, 研究员

E-mail: sunhx@zrime.com.cn

1117 MPa, 显著提高了典型螺栓样件的力学性能。陈顺等<sup>[7]</sup>通过设计不同的热处理工艺改善 R26 高温合金螺栓的组织结构缺陷, 研究表明, 经过中间处理和复合时效处理的材料析出了细小弥散的第二相, 改善了材料性能。孙晓军等<sup>[8]</sup>认为, 虽然热处理对 GH4141 合金晶粒尺寸的影响较大, 但通过合适的热处理和螺栓加工工艺以形成相互匹配的工艺规范是提高螺栓服役性能的有效途径。

本文以某型号 GH4169 合金 M30 mm×130 mm 螺栓为研究对象, 利用 Deform-3D 有限元模拟软件对螺栓的镦制成形过程进行了数值模拟, 分析了不同摩擦因数对成形载荷的影响、成形过程中工件的等效应力分布和模具应力分布等, 根据模拟结果设计相应的模具结构, 并进行了相应的镦制工艺试验。将试验得到的 GH4169 合金螺栓锻件进行后续加工, 分析了时效处理与滚丝工艺的顺序对其显微组织及力学性能的影响。研究结果对 GH4169 合金螺栓镦制工艺及后续加工方法具有较实用的指导价值。

## 1 GH4169 合金螺栓镦制工艺有限元模拟

### 1.1 有限元模型的建立

图1为GH4169合金螺栓镦制成形有限元模拟模型, 主要由冲头、凹模、预应力圈、外圈、垫块和顶料杆组成。经过计算并考虑到模拟成形过程中重新划分网格会导致网格畸变从而造成的体积损失, 确定坯料规格为  $\Phi 40$  mm×180 mm, 冲头行程为

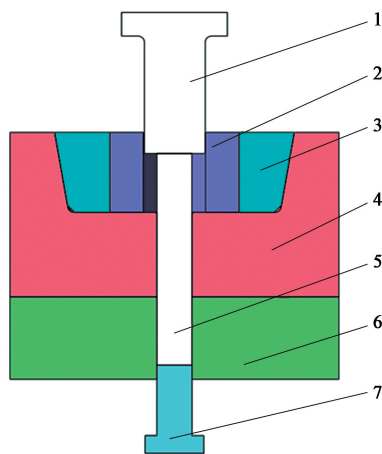


图1 GH4169 合金螺栓镦制成形的有限元模型

1. 冲头 2. 凹模 3. 预应力圈 4. 外圈 5. 坯料 6. 垫块 7. 顶料杆

Fig. 1 Finite element model of upsetting for alloy

GH4169 bolt

31.3 mm。其模拟的具体流程为: 将模型装配完成后保存为 STL 格式并导入至 Deform-3D 有限元模拟软件, 设置镦制温度为 1050 °C, 镦制速度为  $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 摩擦因数  $\mu$  分别设置为 0.1、0.3 和 0.6, 每步步长设置为 0.25 mm<sup>[9-11]</sup>。

### 1.2 不同摩擦因数下冲头的载荷-行程曲线

图2为不同摩擦因数下冲头的载荷-行程曲线, 从图2中可以看出, 在初始变形阶段, 冲头载荷均较小。这主要是因为在此阶段, 材料的变形过程主要为自由镦粗变形, 且金属材料并未与凹模接触, 材料流动阻力较小。随着变形程度的增加, 金属材料径向流动, 逐渐与凹模接触, 载荷逐渐增大。最后阶段, 金属材料与模具形成封闭模腔, 金属流动阻力急剧增加, 因此, 载荷在最后阶段突然急剧增大, 且摩擦因数越大, 最终成形载荷越大。在成形结束时,  $\mu=0.1$  时, 冲头最大载荷为  $2.61 \times 10^6 \text{ N}$ ;  $\mu=0.3$  时, 冲头最大载荷为  $2.85 \times 10^6 \text{ N}$ ;  $\mu=0.6$  时, 冲头最大载荷为  $3.21 \times 10^6 \text{ N}$ 。后续工艺试验时, 必须考虑模具润滑, 这样不仅有利于产品脱模, 还能降低成形力, 提高模具寿命。

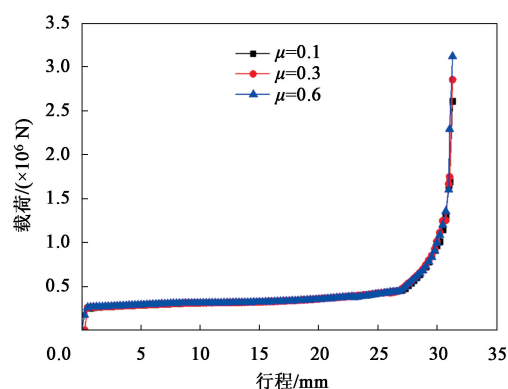


图2 不同摩擦因数下冲头的载荷-行程曲线

Fig. 2 Load-stroke curves of punch under different friction coefficients

### 1.3 工件等效应力场分布

图3为镦制温度为 1050 °C、镦制速度为  $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\mu=0.3$  时, GH4169 高温合金螺栓镦制成形过程中工件的等效应力场分布图。从图3中可以看出, 工件的等效应力主要集中于头部, 因为头部为主要变形区域; 随着变形程度的增加, 分布在工件上的等效应力逐渐增大; 成形结束时, 最大等效应力为 670 MPa。

### 1.4 模具应力场分布

由于 GH4169 合金螺栓镦制成形过程中金属材

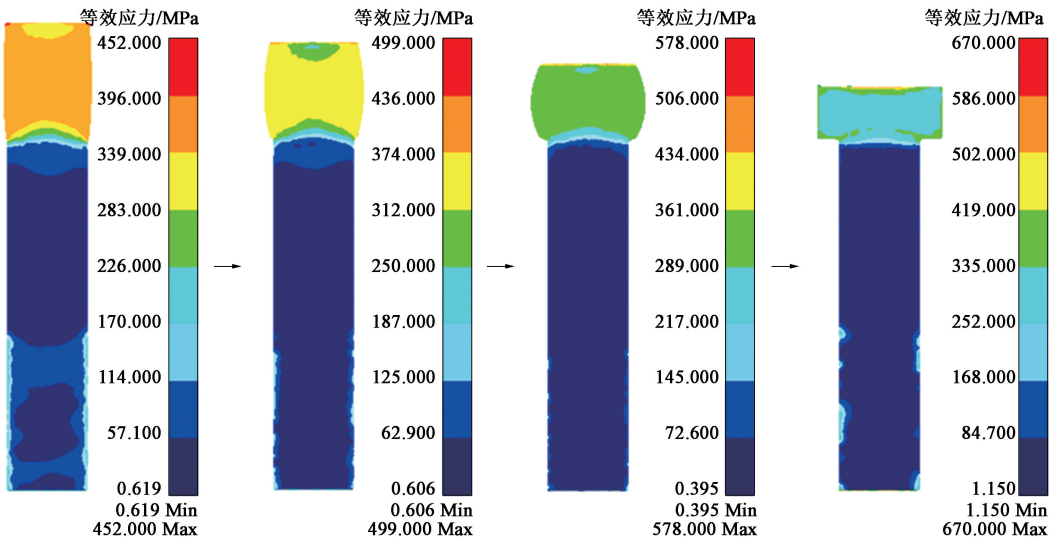


图 3 GH4169 合金螺栓镦制成形过程中的等效应力场分布

Fig. 3 Equivalent stress field distributions of alloy GH4169 bolt during upsetting process

料的流动会对与之接触的模具产生剧烈的摩擦和极大的接触压力，当模具承受的应力超过一定数值时，就会导致模具开裂而失效<sup>[12]</sup>，因此需要对成形过程中与坯料接触紧密的模具的应力场进行分析。具体步骤为：以冲头应力分析为例，首先将其他模具移除，保留冲头，定义冲头属性为“elastic”，划分网格为 80000 个，选用热作模具钢 H13 作为模具材料，然后设置边界条件，最后设置冲头插入力，图 4 为设置的冲头插入力。在后处理结果中得到冲头的应力分布，如图 5 所示，最大应力为 1010 MPa，出现在冲头大端与小端交界处，该处在设计模具时需要重点关注，可加大过渡圆弧。用同样的方法计算凹模的应力分布，图 6 为设置的凹模插入力，图 7 为凹模的应力分布，最大应力为 1030 MPa，出现

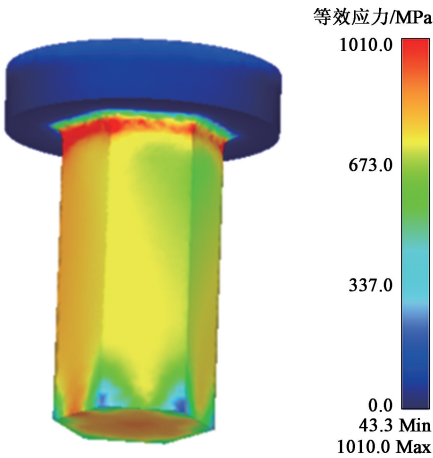


图 5 冲头的等效应力分布

Fig. 5 Equivalent stress distribution of punch

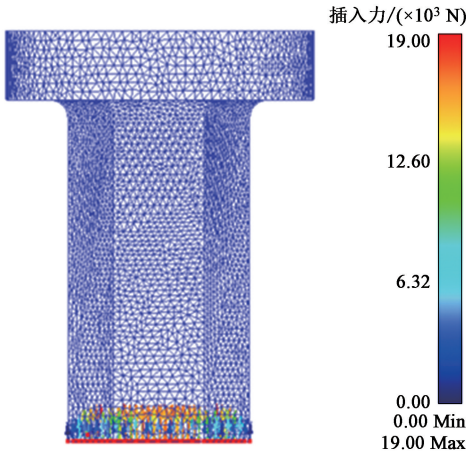


图 4 冲头插入力设置

Fig. 4 Setting of insertion force on punch

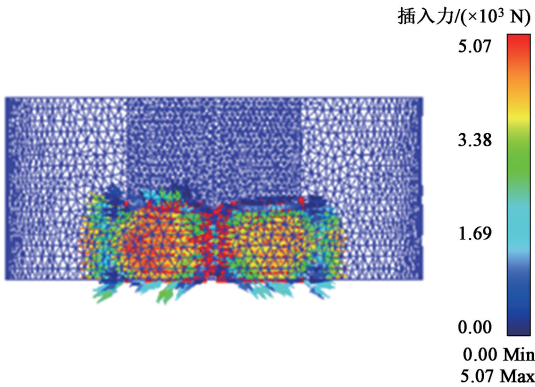


图 6 凹模插入力设置

Fig. 6 Setting of insertion force on concave die



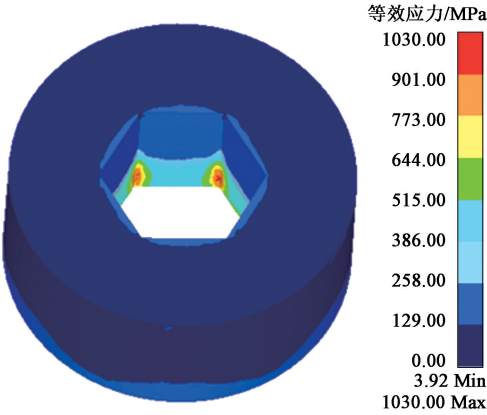


图 7 凹模的等效应力分布  
Fig. 7 Equivalent stress distribution of concave die

在凹模内侧，需要在设计模具时考虑组合模具的结构形式。经过分析，冲头和凹模的最大应力值均小于 H13 热作模具钢在使用温度下的许用应力，不会对模具产生破坏作用而导致模具失效，为后续模具设计提供理论依据。

2 GH4169 合金螺栓镦制工艺试验

以有限元模拟结果为指导，选择 JM31-400 压力机作为成形设备，其设备主要技术参数如表 1 所示。然后设计并制作相应的模具，进行工艺试验时，将模具预热至 250~400 ℃，并喷涂润滑剂。图 8 为模拟结果和试验结果对比照片，试验结果和模拟结果基本一致，锻件充填饱满，尺寸符合设计要求。

表 1 JM31-400 压力机主要技术参数  
Table 1 Main technical parameters of JM31-400 press

参数	数值
公称力/kN	4000
滑块行程/mm	200
最大装模高度/mm	600
工作台尺寸（宽度×长度）/(mm×mm)	900×1350
主电机功率/kW	37

3 GH4169 合金螺栓力学性能

3.1 试验方案

将工艺试验得到的锻件进行后续处理及加工，按照 GH4169 合金螺栓热处理（980 ℃ 固溶 1 h、720 ℃ 时效 8 h）与滚丝顺序的研究思路，设计两组

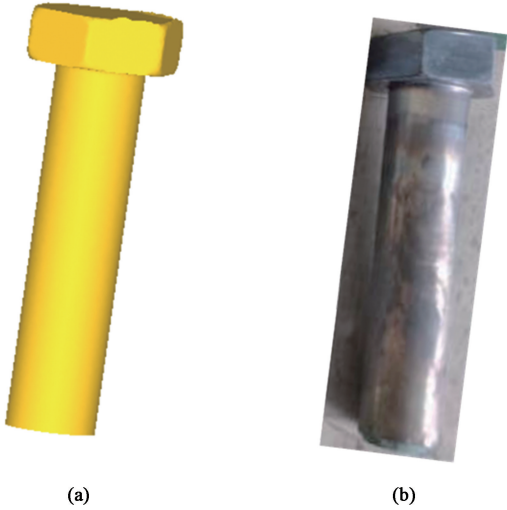


图 8 模拟 (a) 和试验 (b) 得到的锻件对比图  
Fig. 8 Comparison diagrams of forgings obtained from simulation (a) and experiment (b)

方案进行对比试验。方案 1 为：锻件→车→磨→滚丝→时效→滚 R→成品，方案 2 为：锻件→车→磨→时效→滚丝→滚 R→成品。使用 GPS50 中机高频试验机，按照 GJB 715. 29—1990<sup>[13]</sup>，设置高载为 25. 21 kN/低载为高载的 10%（2. 521 kN），进行螺栓的疲劳试验。最后使用线切割将螺栓试样进行切割并镶嵌，经过盐酸-氯化铁混合溶液腐蚀后，利用光学显微镜（Leica DMI8）观察螺纹形貌和金相特征<sup>[14-15]</sup>。

3.2 螺纹显微组织及形貌分析

图 9 和图 10 分别为方案 1 和方案 2 得到的螺纹显微组织和螺纹形貌。从图 9 和图 10 中可以看出，方案 2 得到的螺纹的晶粒尺寸相对较小且形态相对均匀。产生这样的结果是因为螺纹滚丝加工作为时效后一步工序时，在螺纹形成过程中伴随着显著的材料变形和金属材料损失，进一步细化了 GH4169 合金的晶粒。其次，观察方案 1 和方案 2 形成的螺纹形貌可知，方案 1 产生的螺纹存在折叠损伤缺陷，而方案 2 产生的螺纹轮廓相对光滑，螺纹形态相对较好。

3.3 疲劳性能分析

图 11 为两种方案下获得的螺栓在室温状态下的疲劳寿命对比图。从图 11 中可以看出，方案 1 和方案 2 加工的螺栓样件的疲劳寿命平均值分别为 15. 5 万次和 17. 1 万次。与方案 1 相比，方案 2 即时效后滚丝的螺栓疲劳寿命提高了 11%。同时结合材料的晶粒尺寸和螺纹形貌特征分析认为，时效处理



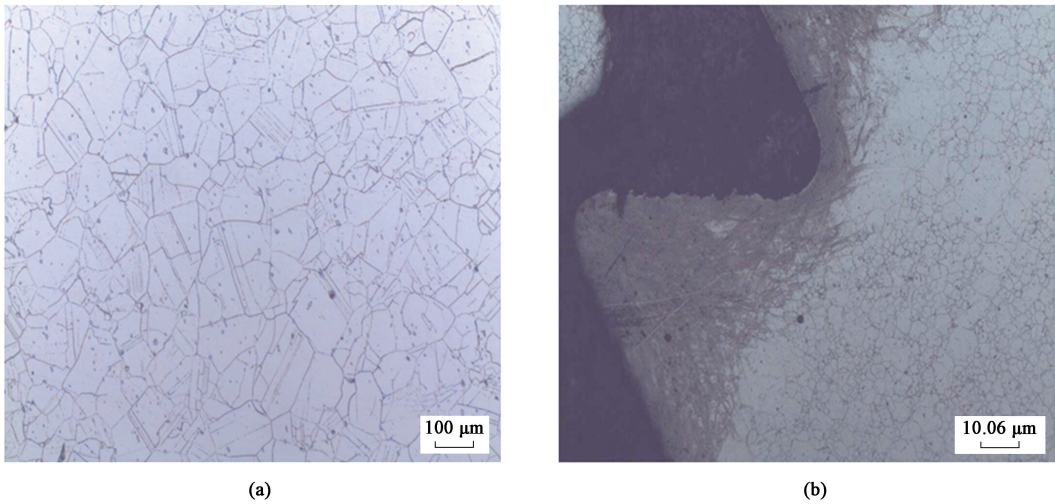


图 9 方案 1 的螺纹显微组织 (a) 及形貌 (b)  
Fig. 9 Microstructure (a) and morphology (b) of thread in scheme 1

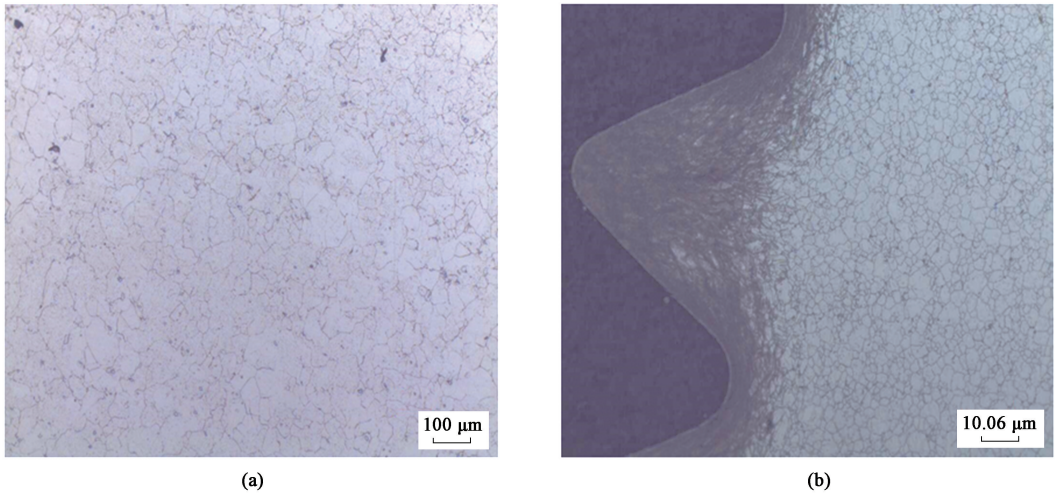


图 10 方案 2 的螺纹显微组织 (a) 及形貌 (b)  
Fig. 10 Microstructure (a) and morphology (b) of thread in scheme 2

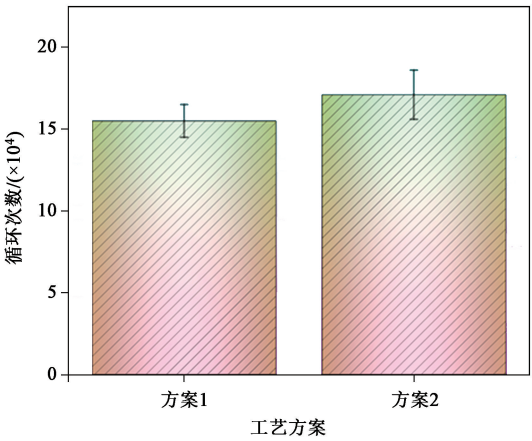


图 11 两种方案下的疲劳寿命对比  
Fig. 11 Comparison of fatigue life under two schemes

时合金中形成一些稳定的沉淀强化相，从而提高了螺栓的强度；这些强化相在滚丝后形成的加工硬化效应进一步提高了螺栓的强化效果；时效处理后的冷变形细化了晶粒度，其残余应力未被热处理消除也是提高螺纹强度和寿命的重要因素。

#### 4 结论

(1) 通过有限元模拟，得到了 GH4169 合金螺栓合理的锻造工艺参数，且模具最大应力为 1030 MPa，可以满足使用要求，为后续工艺试验提供了理论依据。

(2) 工艺试验得到的 GH4169 合金螺栓锻件充

饱满,尺寸符合设计要求,试验结果与模拟结果基本一致。

(3) GH4169 合金螺栓先时效后滚丝处理(方案2)得到的螺栓晶粒尺寸小于先滚丝后时效处理(方案1)得到的螺栓,且螺纹轮廓相对光滑,螺纹形态相对较好。

(4) 方案1和方案2得到的螺栓疲劳寿命分别为15.5万次和17.1万次,与方案1相比,方案2即时效后滚丝的螺栓疲劳寿命提高了11%。

#### 参考文献:

- [1] 李帮松,曾祥帅,曾梦婷,等. 锻造态 GH4169 高温合金热变形行为的有限元模拟 [J]. 热处理, 2023, 38 (3): 18-24.
- Li B S, Zeng X S, Zeng M T, et al. Finite element simulation of hot deformation behavior of GH4169 high-temperature alloy as forged [J]. Heat Treatment, 2023, 38 (3): 18-24.
- [2] 王妙全,田成刚,徐瑶,等. GH4169D 高温合金锻件持久寿命的影响因素研究 [J]. 锻压技术, 2023, 47 (1): 46-52.
- Wang M Q, Tian C G, Xu Y, et al. Research on factors influencing the endurance life of GH4169D high temperature alloy forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 47 (1): 46-52.
- [3] 孙晓军,康根发,许永春,等. GH4169 六角头螺栓异常断裂分析 [J]. 金属加工(热加工), 2023 (4): 74-76.
- Sun X J, Kang G F, Xu Y C, et al. Analysis of abnormal fracture of GH4169 hexagonal head bolt [J]. MW Metal Forming, 2023 (4): 74-76.
- [4] 张鑫,白亚冠,聂义宏. 变形工艺参数对 GH4169 合金再结晶的影响 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (5): 51-56.
- Zhang X, Bai Y G, Nie Y H. Effect of deformation process parameters on recrystallization of GH4169 alloy [J]. Hot Working Technology, 2023, 52 (5): 51-56.
- [5] 王锦永,张爱亮,刘静,等. GH4169 镍基合金热挤压成形的工艺开发 [J]. 金属加工(热加工), 2022 (12): 107-109.
- Wang J Y, Zhang A L, Liu J, et al. Process development of hot extrusion forming of GH4169 nickel based alloy [J]. MW Metal Forming, 2022 (12): 107-109.
- [6] 裴烈勇,戴爱丽,樊开伦,等. 时效与滚丝工艺顺序对 GH738 合金螺栓力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (12): 140-141.
- Pei L Y, Dai A L, Fan K L, et al. The influence of aging and rolling process sequence on the mechanical properties of GH738 alloy bolts [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45 (12): 140-141.
- [7] 陈顺,刘俊建,吴跃,等. 不同热处理工艺对 R26 高温合金螺栓组织和性能的影响 [J]. 汽轮机技术, 2021, 63 (1): 68-70.
- Chen S, Liu J J, Wu Y, et al. Effect of different heat treatment process on microstructure and properties of R26 superalloy bolt [J]. Turbine Technology, 2021, 63 (1): 68-70.
- [8] 孙晓军,刘乐,付建建,等. 不同热处理对高温合金 GH4141 微观组织和拉伸性能的影响 [J]. 制造技术与机床, 2023, (4): 85-88.
- Sun X J, Liu L, Fu J J, et al. The effect of different heat treatments on the microstructure and tensile properties of high-temperature alloy GH4141 [J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2023 (4): 85-88.
- [9] 田亚丁,朱绘丽. 基于有限元分析的汽车法兰盘连接件精密锻造工艺 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (12): 9-17.
- Tian Y D, Zhu H L. Precision forging process for automotive flange connectors based on finite element analysis [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (12): 9-17.
- [10] 关悦,贺连栋,张森,等. GH4141 高温合金十二角螺栓顶锻工艺研究 [J]. 制造技术与机床, 2023 (12): 129-134.
- Guan Y, He L D, Zhang M, et al. Research on the upsetting process of GH4141 high temperature alloy twelve point bolt [J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2023 (12): 129-134.
- [11] 王博,边颖帅,岳战国,等. 锻造工艺对大规格 2219 铝合金锻环综合力学性能的影响 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (11): 35-39.
- Wang B, Bian Y S, Yue Z G, et al. Influence of forging process on comprehensive mechanical properties for large-size 2219 aluminum alloy forging rings [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (11): 35-39.
- [12] 廖海龙,夏玉峰,孙朝远,等. 热锻模具结构参数与模具应力关系的数值模拟 [J]. 锻压技术, 2023, 47 (4): 210-217.
- Liao H L, Xia Y F, Sun C Y, et al. Numerical simulation of the relationship between structural parameters of hot forging molds and mold stress [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 47 (4): 210-217.
- [13] GJB 715.29—1990, 紧固件试验方法 应力断裂 [S].
- GJB 715.29—1990, Fastener test methods Stress rupture [S].
- [14] 王锴,张晓斌,肖琪,等. PH13-8Mo 不锈钢冷滚压螺纹参数对金相折叠的影响 [J]. 现代制造工程, 2022 (4): 9-14.
- Wang K, Zhang X B, Xiao Q, et al. The effect of cold rolling thread parameters on metallographic folding of PH13-8Mo stainless steel [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022 (4): 9-14.
- [15] 袁武华,邓建伟,申庆援,等. 圆角滚压对螺栓残余应力分布及疲劳寿命的影响 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 108-114.
- Yuan W H, Deng J W, Shen Q Y, et al. The effect of fillet rolling on residual stress distribution and fatigue life of bolts [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (1): 108-114.