

航天用超大规格 GH4169 高温合金螺栓热锻工艺

金 宏^{1,2}, 殷银银^{1,2}, 刘 乐^{1,2}, 刘 丹³

(1. 河南省紧固连接技术重点实验室, 河南 信阳 464000; 2. 河南航天精工制造有限公司, 河南 信阳 464000;
3. 郑州机械研究所有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要: 为研究一种航天用超大规格 GH4169 高温合金螺栓热锻工艺, 利用热模拟试验机对材料进行了高温压缩实验, 分析了不同变形温度和应变速率对材料变形抗力的影响, 并对 GH4169 高温合金螺栓的热锻成形过程进行了数值模拟, 分析了成形过程中等效应力场分布、损伤值分布、金属流线分布、摩擦因数对成形载荷的影响, 最后进行了工艺实验。研究表明: 应变速率一定时, 随着变形温度的升高, 材料的变形抗力逐渐降低; 变形温度一定时, 随应变速率的增大, 材料的变形抗力逐渐增大; 摩擦因数 $\mu=0.3$ 时成形过程中的最大载荷为 3.56×10^6 N, 摩擦因数 $\mu=0.5$ 时成形过程中的最大载荷为 4.11×10^6 N。工艺实验得到的 GH4169 高温合金螺栓锻件充填饱满, 尺寸符合要求, 未发现锻造缺陷, 符合航天领域使用需求。

关键词: 超大规格螺栓; GH4169 高温合金; 高温压缩实验; 变形抗力; 热锻工艺

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.007

中图分类号: TG314.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 06-0055-06

Hot upsetting process of super-sized superalloy GH4169 bolts for aerospace

Jin Hong^{1,2}, Yin Yinyin^{1,2}, Liu Le^{1,2}, Liu Dan³

(1. Henan Provincial Key Laboratory of Fastening Technology, Xinyang 464000, China;

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

3. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to study the hot upsetting process of super-sized GH4169 superalloy bolts for aerospace, the high-temperature compression experiment of material was carried out by the thermal simulation testing machine, and the influences of different deformation temperatures and strain rates on the deformation resistance of material were analyzed. Then, the hot upsetting process of superalloy GH4169 bolts was numerically simulated, and the influences of the distributions of equivalent stress field, damage value and metal streamline, and friction factor on forming load during the forming process were analyzed. Finally, the process experiment was carried out. The results show that when the strain rate is constant, the deformation resistance of material decreases gradually with the increase of deformation temperature. When the deformation temperature is constant, the deformation resistance of material increases gradually with the increase of strain rate. When the friction factor $\mu=0.3$, the maximum load in the forming process is 3.56×10^6 N, and when the friction factor $\mu=0.5$, the maximum load in the forming process is 4.11×10^6 N. The superalloy GH4169 bolt forgings obtained by the process experiment are fully filled, the sizes meet the requirements, and no forging defects are found, which meets the using needs of aerospace field.

Key words: super-sized bolts; superalloy GH4169; high-temperature compression experiment; deformation resistance; hot upsetting process

GH4169 材料是一种沉淀强化的镍基高温合金, 在 $-253 \sim 700$ °C 温度范围内具有良好的综合性能, 并且具有良好的抗疲劳、抗辐射、抗氧化和耐腐蚀性能, 故常用于航空发动机的耐高温紧固件, 以及核能、石油工业高温结构元件^[1-3]。但 GH4169 材料

的合金化程度高、导热性能差、切削温度高、加工硬化现象严重、切削力大, 造成切削加工效率低、生产升本高, 因此, GH4169 高温合金螺栓基本均以热锻成形方式加工^[4-5]。

本文以航天某型号火箭用超大规格 (M40) GH4169 高温合金螺栓为对象, 采用数值模拟和实验相结合的方法, 对螺栓六角头部热锻成形过程中的金属流动规律、成形过程中的载荷-时间曲线、金属流线分布、等效应力场分布进行了数值模拟分析, 并进行了工艺实验, 对数值模拟结果和工艺的

收稿日期: 2021-06-29; 修订日期: 2021-10-09

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (2013ZX04002081)

作者简介: 金 宏 (1989-), 男, 学士, 工程师

E-mail: jin_hong@casic694.com

可行性进行了验证, 为该类螺栓热锻成形工艺提供了一定的技术依据。

1 GH4169 高温合金高温压缩实验及结果

1.1 高温压缩实验

选择 GH4169 高温合金棒料, 截取尺寸为 $\Phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的试样^[6], 如图 1 所示。利用 Gleeble-1500D 热模拟试验机对试样进行单道次压缩实验。为了研究变形量一定时不同变形温度和应变速率对材料热变形抗力的影响, 制定了不同变形温度和应变速率下的高温压缩实验方案, 如表 1 所示。

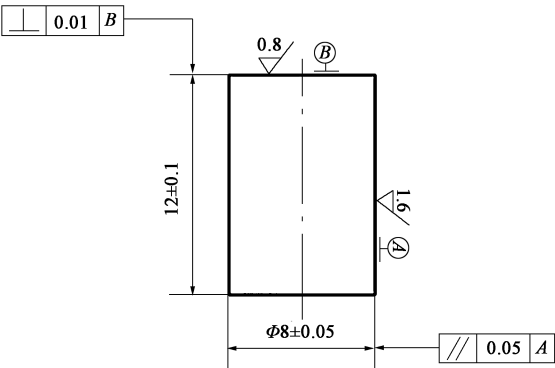


图 1 压缩试样零件图

Fig. 1 Part diagram of compression sample

表 1 高温压缩实验方案

试样编号	变形温度/℃	应变速率/s ⁻¹	压缩道次	变形量/%
01	900	0.10	1	70
02	950	0.10	1	70
03	1000	0.10	1	70
04	1050	0.01	1	70
05	1050	0.10	1	70
06	1050	1.00	1	70
07	1050	10.00	1	70
08	1100	0.10	1	70
09	1150	0.10	1	70

1.2 变形结果分析

1.2.1 不同变形温度下的真应力-真应变曲线

图 2 为变形量为 70%、应变速率为 0.1 s^{-1} 时, 不同变形温度下 GH4169 高温合金的真应力-真应变曲线。从图 2 中可以看出, 无论在何种变形温度下, 真应力-真应变曲线均是先升高而后稍微有所降低。

这主要是因为: 在变形的初始阶段, 位错运动的能力比较弱, 其发生攀移的可能性很小, 在此阶段材料产生加工硬化作用, 其变形抗力逐渐增大, 随着变形量的不断增加, 材料发生动态再结晶, 而动态再结晶具有一定的软化作用, 消除了一部分的加工硬化作用, 因此, 变形抗力又稍有降低。由图 2 可知, 变形温度对 GH4169 高温合金变形抗力的影响较大, 变形温度越高, 变形抗力越小。图 3 为变形量一定、应变速率为 0.1 s^{-1} 时, GH4169 高温合金的峰值应力与变形温度的关系。从图 3 中可以看出, GH4169 高温合金的峰值应力与变形温度基本呈线性关系, 变形温度越高, 峰值应力越小。

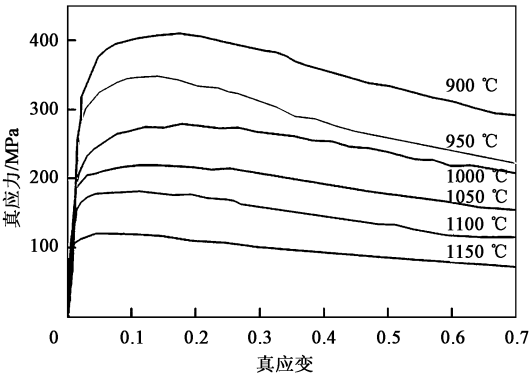


图 2 不同变形温度下 GH4169 高温合金的真应力-真应变曲线

Fig. 2 True stress-true strain curves of superalloy GH4169 under different deformation temperatures

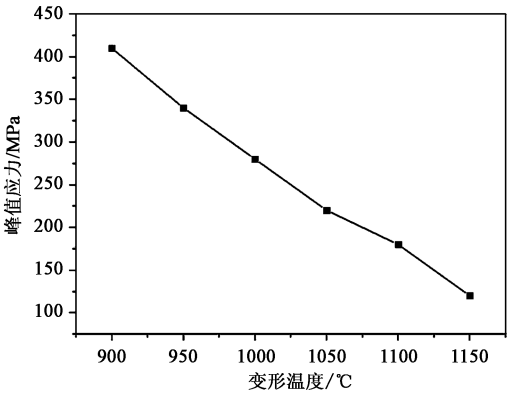


图 3 峰值应力与变形温度的关系

Fig. 3 Relationship between peak stress and deformation temperatures

1.2.2 不同应变速率下的真应力-真应变曲线

图 4 为变形温度为 1050 °C 、应变速率分别为 0.01 、 0.1 、 1 和 10 s^{-1} 时, GH4169 高温合金的真应力-真应变曲线。从图 4 中可知, 在变形温度和变形量一定时, 应变速率越大, 材料的变形抗力越大。这主要是因为: 在变形初始阶段, 变形速度越快, 位错的增值速度越快, 材料产生的加工硬化作

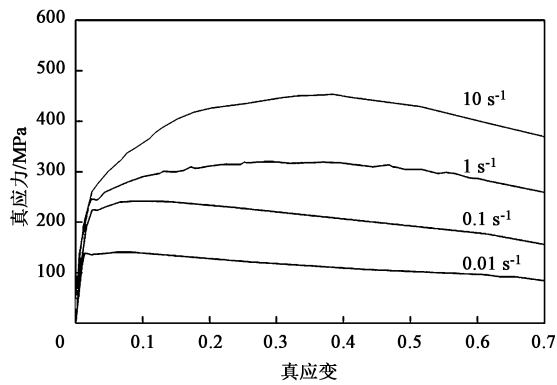


图 4 不同应变速率下的 GH4169 高温合金的真应力-真应变曲线
Fig. 4 True stress-true strain curves of superalloy GH4169 under different strain rates

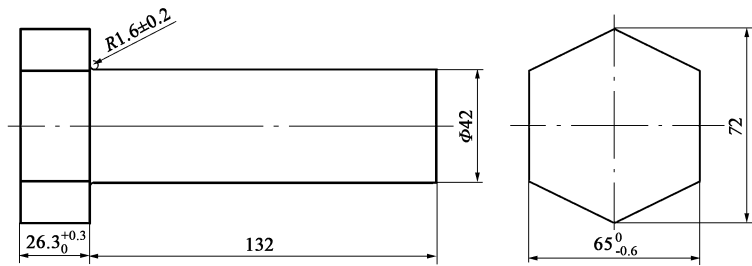


图 5 GH4169 高温合金螺栓锻件图
Fig. 5 Diagram of superalloy GH4169 bolt forgings

经过计算，选择下料尺寸为 $\Phi 42\text{ mm}\times 205\text{ mm}$ 。

3 GH4169 高温合金螺栓热锻工艺数值模拟及结果分析

3.1 有限元模型建立

根据 GH4169 高温合金螺栓锻件图，绘制出锻件三维模型和相应模具模型，主要组成有冲头、坯料和凹模，图 6 为有限元模型装配图。

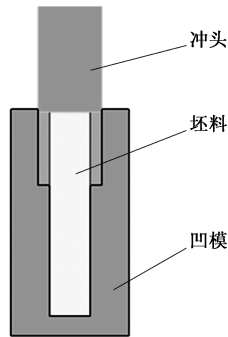


图 6 有限元模型装配图
Fig. 6 Assembly diagram of finite element model

3.2 模拟参数设置

由于 Deform-3D 材料库中没有 GH4169 高温合

金的真应力-真应变曲线，为了模拟结果的准确性，首先进入 Deform-3D 前处理，将高温压缩实验得到的 GH4169 高温合金的真应力-真应变曲线数据导入到 Deform-3D 材料库，然后将有限元模型导入 Deform-3D 中，坯料温度设定为 $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，冲头速度根据实际工况设定为 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，为了研究摩擦因数 μ 对成形载荷的影响，分别设定 $\mu=0.3$ 和 $\mu=0.5$ 进行模拟^[8]。

2 GH4169 高温合金螺栓的热锻工艺方案制定

GH4169 高温合金螺栓锻件如图 5 所示，头部和底部的截面尺寸相差较大，变形量较大。根据等截面原则，选择 GH4169 高温合金棒料的规格为 $\Phi 42\text{ mm}$ ，为确保锻件不出现缺料、飞边等缺陷，必须合理确定下料长度。可根据等体积法计算出坯料的长度，计算公式如下^[7]：

$$V_m = V_D(1 + \delta)$$

式中： V_m 为坯料体积； V_D 为锻件体积； δ 为火耗，对于感应加热来说，一般取 $\delta=1\%$ 。

金的真应力-真应变曲线，为了模拟结果的准确性，首先进入 Deform-3D 前处理，将高温压缩实验得到的 GH4169 高温合金的真应力-真应变曲线数据导入到 Deform-3D 材料库，然后将有限元模型导入 Deform-3D 中，坯料温度设定为 $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，冲头速度根据实际工况设定为 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，为了研究摩擦因数 μ 对成形载荷的影响，分别设定 $\mu=0.3$ 和 $\mu=0.5$ 进行模拟^[8]。

3.3 模拟结果分析

3.3.1 不同摩擦因数下的载荷-时间曲线

图 7 为 $\mu=0.3$ 和 $\mu=0.5$ 时，GH4169 高温合金螺栓在热锻成形过程中的载荷-时间曲线。从图 7 中可以看出：在变形的初始阶段，两条曲线基本重合，且载荷较小，主要是因为该阶段为自由锻粗阶段，坯料与模具并未接触，成形力较小；随着变形的进行，金属逐渐与模具型腔接触，随着接触面积的增大，金属流动阻力也逐渐增大，因此载荷迅速增大；在最后阶段，金属材料与模具型腔形成封闭空间，金属难以流动，因此成形力急剧增加。从图 7 中可以看出，摩擦因数越大，最后阶段的成形力越大， $\mu=0.3$ 时，最大载荷为 $3.56\times 10^6\text{ N}$ ， $\mu=0.5$ 时，最大载荷为 $4.11\times 10^6\text{ N}$ 。这说明在 GH4169 高

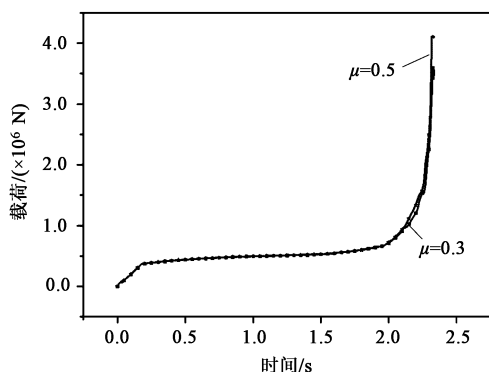


图 7 不同摩擦因数下冲头的载荷-时间曲线

Fig. 7 Load-time curves of punch under different friction factors

温合金螺栓的热锻成形过程中, 模具润滑十分重要, 润滑条件直接影响最后的成形力, 良好的润滑不仅可

以显著降低成形力, 并且有利于金属流动^[9]。

3.3.2 等效应力分布

通过等效应力分布可以看出在成形过程中金属容易产生应力集中的部位, 从而有针对性地设计模具结构, 例如: 将易损坏的模具采用分体结构, 从而降低模具成本^[10]。图 8 为 GH4169 高温合金螺栓热锻成形过程中的等效应力分布。从图 8 中可以看出, 在自由锻粗变形阶段, 只有冲头和坯料接触, 等效应力较大的地方出现在坯料上端面, 随着变形的进行, 凹模、冲头全部与坯料接触, 形成封闭模腔, 等效应力也随之变大, 最大等效应力出现在坯料的上端面位置, 最大等效应力为 275 MPa。这主要是因为: 在热锻成形过程中, 冲头轴向挤压力的主要作用面为坯料的上端面所致。

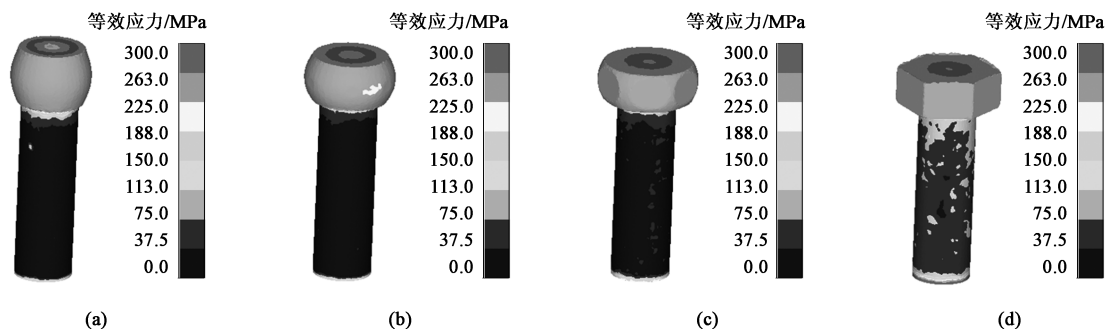


图 8 成形过程中等效应力分布

(a) 120 步 (b) 160 步 (c) 180 步 (d) 200 步

Fig. 8 Equivalent stress distributions during forming process

(a) Step 120 (b) Step 160 (c) Step 180 (d) Step 200

3.3.3 损伤值分布

通过损伤值分布可以预测在成形过程中容易出现裂纹的区域, 然后通过改变成形工艺来减少该部位产生裂纹的倾向^[11]。图 9 为 GH4169 高温合金螺栓在热锻成形过程中的损伤值分布, 其中, 损伤值是交叉孔洞面积与原始面积的比值。从图 9 中可以

看出, 最大损伤值总是出现在螺栓头部与凹模接触的区域, 特别是 6 个棱角处的损伤值最大, 因此, 在进行模具设计时需要考虑增加圆角。

3.3.4 金属流线分布

良好的金属流线一般沿着零件的轮廓方向, 可以使零件的力学性能显著提高^[12]。图 10 为成形最

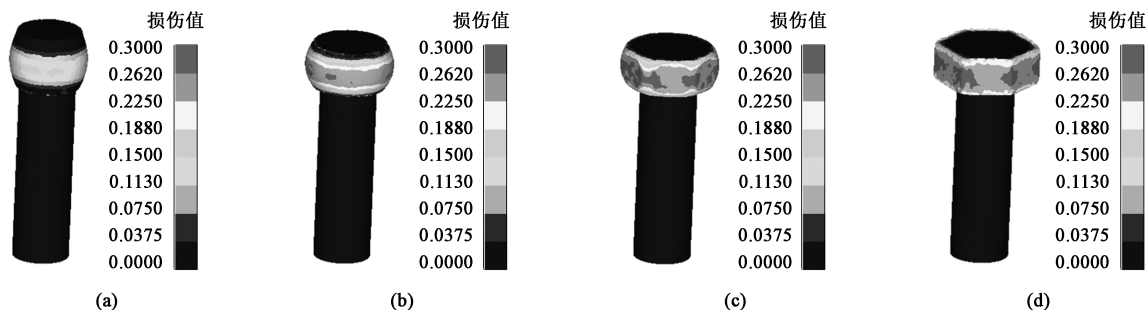


图 9 成形过程中损伤值分布

(a) 120 步 (b) 160 步 (c) 180 步 (d) 200 步

Fig. 9 Distributions of damage values during forming process

(a) Step 120 (b) Step 160 (c) Step 180 (d) Step 200

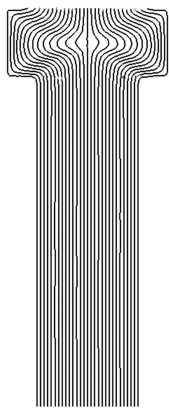


图 10 GH4169 高温合金螺栓的金属流线分布

Fig. 10 Metal streamline distribution of superalloy GH4169 bolt

后 GH4169 高温合金螺栓的金属流线分布，从图 10 中可以看出，其头部金属流线基本沿着其轮廓分布。

4 GH4169 高温合金螺栓热锻工艺实验

利用数值模拟分析得到的热锻工艺参数，结合现有成形设备，设计并加工相应模具，进行了工艺实验，实验得到的 GH4169 高温合金螺栓锻件饱满，经过测量，尺寸符合设计要求。图 11 为实验过程中不同压下量下得到的 GH4169 高温合金螺栓实物，图 12 为与之对应的数值模拟过程中坯料在不同压下量下的成形示意图，可以看出数值模拟结果和实验结果基本一致。图 13 为 GH4169 高温合金螺栓头部的金属流线分布，其流线基本沿锻件的轮廓方向分布，与模拟得到的金属流线分布基本一致，未出现流线缺陷。

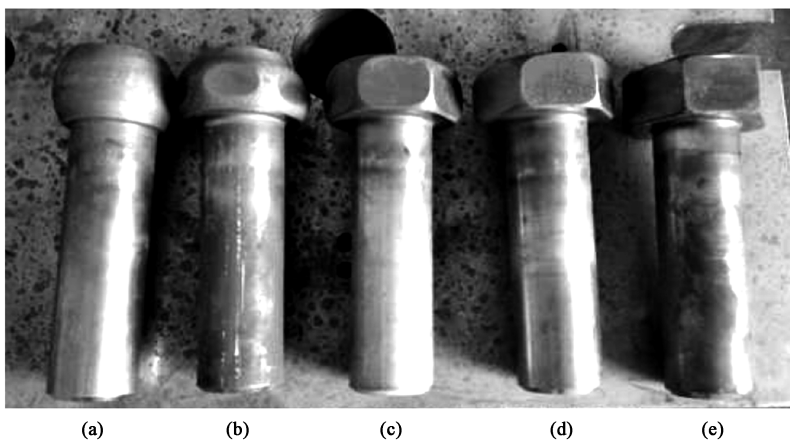


图 11 实验过程中不同压下量下的 GH4169 高温合金螺栓

(a) 压下量为 20% (b) 压下量为 40% (c) 压下量为 60% (d) 压下量为 80% (e) 压下量为 100%

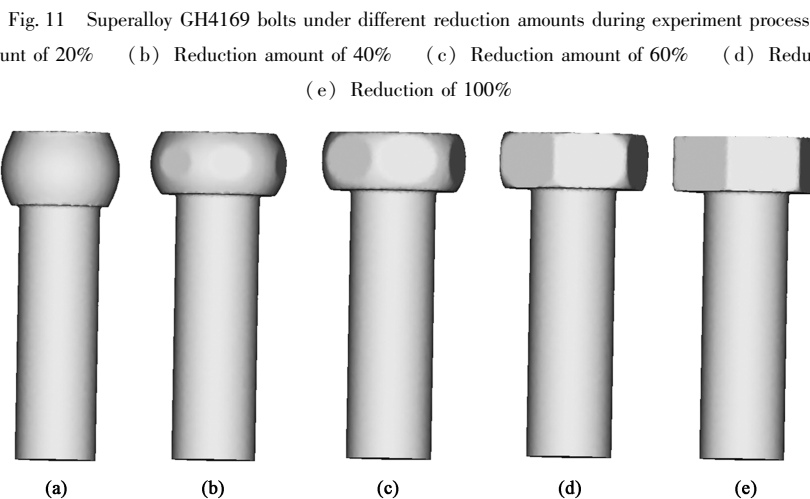


图 12 数值模拟过程中不同压下量下的 GH4169 高温合金螺栓的成形示意图

(a) 压下量为 20% (b) 压下量为 40% (c) 压下量为 60% (d) 压下量为 80% (e) 压下量为 100%

Fig. 12 Forming schematic diagrams of superalloy GH4169 bolts under different reduction amounts in numerical simulation process

(a) Reduction amount of 20% (b) Reduction amount of 40% (c) Reduction amount of 60% (d) Reduction amount of 80% (e) Reduction amount of 100%

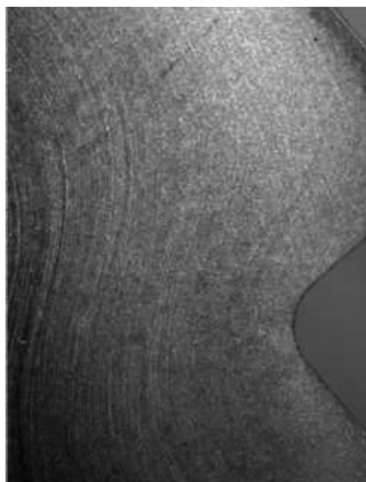


图 13 GH4169 高温合金螺栓头部的金属流线图

Fig. 13 Metal streamline diagram for head of superalloy GH4169 bolt

5 结论

(1) 通过高温压缩实验, 得到了 GH4169 高温合金的真应力-真应变曲线, 为热锻工艺模拟提供了接近实际工况的数据, 使得模拟结果更加准确。

(2) 应变速率一定时, 随着变形温度的升高, 材料的变形抗力逐渐降低。变形温度一定时, 随应变速率的增大, 材料的变形抗力逐渐增大。

(3) 模拟结果和实验结果基本一致, 工艺实验得到的 GH4169 高温合金螺栓锻件充填饱满, 尺寸和性能均达到了航天某型号火箭的使用需求, 为该产品的实际生产提供了一定的技术依据。

参考文献:

- [1] 王迎, 潘清林, 张宇玮, 等. GH4169 镍基高温合金热压缩变形行为和加工图 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45 (11): 3752-3761.
Wang Y, Pan Q L, Zhang Y W, et al. Hot deformation behavior and processing map of GH4169 super alloy [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45 (11): 3752-3761.
- [2] 李爱兰, 曾燮榕, 曹腊梅, 等. 航空发动机高温材料的研究现状 [J]. 材料导报, 2003, 17 (2): 26-28.
Li A L, Zeng X R, Cao L M, et al. Current status of research on high temperature materials for advances aircraft engines [J]. Materials Review, 2003, 17 (2): 26-28.
- [3] 师昌绪, 仲增埤. 中国高温合金 40 年 [J]. 金属学报, 1997, 33 (1): 1-8.
Shi C X, Zhong Z Y. Forty years of super alloy R & D in China [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33 (1): 1-8.

- [4] 谢锡善. 我国高温材料的应用与发展 [J]. 机械工程材料, 2004, 28 (1): 2-8.
Xie X S. The development and application of high temperature materials in China [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2004, 28 (1): 2-8.
- [5] 李晨, 李森泉, 王柯. 固溶处理 GH4169 合金的高温变形行为 [J]. 航空学报, 2010, 31 (2): 360-375.
Li C, Li M Q, Wang K. Deformation behavior of nickel based super alloy GH4169 through solution treatment [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31 (2): 360-375.
- [6] 刘乐, 殷银银, 金宏, 等. 超大规格 GH4169 高温合金螺栓成形工艺及模具结构优化 [J]. 制造技术与机床, 2022, 27 (4): 110-115.
Liu L, Yin Y Y, Jin H, et al. Forming process and die structure optimization of super large size GH4169 super alloy bolt [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022, 27 (4): 110-115.
- [7] 王蓬书, 李琴敏, 韦贤毅, 等. 固溶对 GH4169 合金晶粒尺寸与力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (4): 245-249.
Wang P S, Li Q M, Wei X Y, et al. Effect of solid solution on grain size and mechanical properties of GH4169 alloy [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (4): 245-249.
- [8] 张海燕, 张士宏, 程明. δ 相对 GH4169 合金高温拉伸变形行为的影响 [J]. 金属学报, 2013, 49 (4): 483-488.
Zhang H Y, Zhang S H, Cheng M. Effect of δ phase on the tensile deformation behavior of GH4169 alloy at high temperature [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49 (4): 483-488.
- [9] 时伟, 王岩, 邵文柱, 等. GH4169 合金高温塑性变形的热加工图 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2012, 17 (3): 281-289.
Shi W, Wang Y, Shao W Z, et al. Processing map of GH4169 alloy during hot plastic deformation [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2012, 17 (3): 281-289.
- [10] 罗俊鹏, 杨成斌, 丁凯, 等. GH4169 合金细长轴锻件局部锻造成形工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (13): 160-163.
Luo J P, Yang C B, Ding K, et al. Study on local forging process of GH4169 alloy slender shaft forgings [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (13): 160-163.
- [11] 李钊, 王彦菊, 耿长建, 等. 锻制温度对 GH4169 合金紧固件组织的影响 [J]. 材料热处理学报, 2020, 41 (5): 79-86.
Li Z, Wang Y J, Geng C J, et al. Effect of heading temperature on microstructure of GH4169 alloy fasteners [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41 (5): 79-86.
- [12] 吕旭东, 邓群, 杜金辉, 等. GH4169 合金盘件热模锻工艺优化 [J]. 钢铁研究学报, 2011, (S2): 158-161.
Lyu X D, Deng Q, Du J H, et al. Technics optimization of hot die forging for GH4169 disk [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, (S2): 158-161.