

不同冲压速度下箍带弯曲成形有限元模拟

佟政阳¹, 程思佳², 王虎军¹, 靳 凯³

(1. 安徽天航机电有限公司, 安徽 芜湖 241000; 2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 211100;

3. 国营芜湖机械厂, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 针对围圆冲压成形中易发生卡箍折裂的现象, 使用 SolidWorks 建模, 利用 ABAQUS 进行仿真运算, 分析不同冲压速度下, 卡箍箍带弯曲成形后的应力、应变、厚度的分布情况。结果表明: 在不同冲压速度下, 卡箍箍带的应力、应变以及厚度的变化趋势大致相同, 均在耳圆部分和最底部出现拉应力增大、应变集中以及厚度减小的现象, 表明在此 3 处出现变形较大的现象; 经过对不同冲压速度下的卡箍箍带进行模拟仿真, 得出在 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的冲压速度下, 卡箍箍带的应力、应变以及厚度的变化分布均相对均匀, 且整个箍带的变形相对平稳。

关键词: 卡箍箍带; 高温合金; 冲压速度; 弯曲成形; 围圆成形

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.014

中图分类号: TG115 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 02-0094-06

Finite element simulation on hoop belt bending under different stamping speeds

Tong Zhengyang¹, Cheng Sijia², Wang Hujun¹, Jin Kai³

(1. Anhui Tianhang Electromechanical Co., Ltd., Wuhu 241000, China;

2. School of Mechatronics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China;

3. State Owned Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241000, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon that the clamp hoop was prone to crack in the process of circular stamping, the calculated model was established by SolidWorks, and the simulation calculation was conducted by ABAQUS to analyze the distribution conditions of stress, strain and thickness for clamp hoop belt after bending under different stamping speeds. The results show that under different stamping speeds, the variation trends of stress, strain and thickness of the clamp hoop belt are roughly the same, and the phenomenons of tensile stress increasing, strain concentration and thickness decreasing all appear at the ear circle and the bottom, indicating that there is a large deformation in these three places. Through the simulation of the clamp hoop belt under different stamping speeds, it is concluded that under the stamping speed of $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, the distributions of stress, strain and thickness change of the clamp hoop belt all are relatively uniform, and the deformation of the whole hoop belt is relatively stable.

Key words: clamp hoop belt; superalloy; stamping speed; bending; circular forming

导管连接卡箍在飞机管路系统上的应用比较普遍, 由于飞机管路系统的工作环境较为复杂, 因此, 要求卡箍类零件具有较高的密封性, 以及抗高温、高压和抗冲击等性能^[1]。飞机管路连接卡箍经历数次变革, 从最开始的法兰式刚性连接, 到由外套胶管和卡箍组成的可拆卸的胶管卡箍连接, 再到导管快卸卡箍, 对卡箍的制造、使用要求越来越高^[2]。

总的来说, 卡箍的连接从刚性的硬连接过渡到柔性连接, 实现该连接的过程即使用金属代替传统的胶管连接, 国外卡箍材料大多使用 2A12 硬铝、1Cr18Ni9 不锈钢等材料, 而国内大多使用铝合金、GH4169 高温合金、不锈钢等材料^[3-6]。本文所使用的材料即为 GH4169 高温合金^[4], 这种高温合金的强度高, 热稳定性、抗氧化性和耐腐蚀性优良, 被广泛地应用于航空领域^[5]。箍带是整个卡箍的支撑, 是卡箍系统的重要组成部分, 箍带的成形质量在一定程度上对卡箍的工作寿命有巨大的影响^[6]。卡箍箍带的三维模型如图 1 所示, 其中, D_1 为卡箍箍带内环直径。

本文研究的卡箍箍带所使用的成形技术为冲压

收稿日期: 2021-01-06; 修订日期: 2021-04-05

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0703301)

作者简介: 佟政阳 (1993-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: tzy18895330913@163.com

通信作者: 靳 凯 (1987-), 男, 博士, 副教授

E-mail: jinkai@nuaa.edu.cn

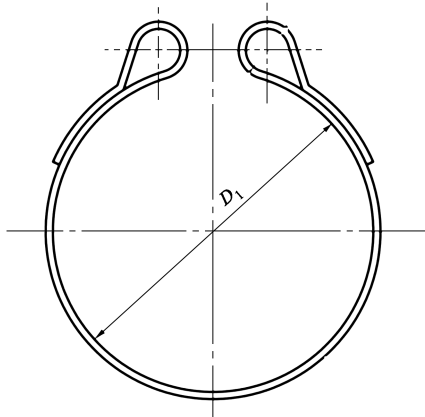


图 1 卡箍箍带三维模型示意图
Fig. 1 Schematic diagram of three-dimensional model for clamp hoop belt

成形。邢继刚^[7]在研究铝合金板材冲压成形时，发现随着冲压速度的增大，减薄率整体呈现下降趋势。居龙等^[8]探究了不同冲压速度对铝合金拉深性能的影响，发现冲压速度越小，零件圆角处越容易破裂。总结以上研究者发现，冲压速度的不同对板材的成形质量会产生较大的影响，由于在卡箍成形方面对冲压速度的研究较少，因此，冲压速度的研究对卡箍箍带精密弯曲成形工艺具有十分重要的意义。

本文创新点在于利用 ABAQUS 仿真软件研究卡箍箍带弯曲成形过程中，不同冲压速度对箍带成形质量的影响，对箍带生产的关键工艺-围圆成形工艺部分进行实体建模，分析箍带弯曲成形过程，获取对应的应力-应变分布曲线、厚度分布云图，并验证其成形可靠性，为卡箍冲压成形过程提供理论指导。

1 模型的建立

1.1 有限元模型

GH4169 高温合金在常温下难以成形，试验中将材料加热到固溶状态，然后在 900 ℃ 的条件下进行卡箍箍带冲压成形^[9-10]。根据 ASTM E8/E8M—2021^[11]技术条件和实际冲压的工序安排，对材质为 GH4169 高温合金的板材进行固溶处理（1010 ℃ 保温 1 h，水冷+720 ℃ 保温 8 h，炉冷至 620 ℃ 保温 8 h，空冷），而后在 900 ℃ 进行拉伸试验，获得该材料的真实应力-真实应变曲线。对拉伸试验数据进一步处理，获得 GH4169 高温合金固溶处理后在 900 ℃ 条件下的真实应力-真实应变模拟曲线（图 2），为卡箍箍带的冲压成形仿真强化提供材料属性参数。将热处理后的合金加工成拉伸试样与金相试

样，参照文献 [12]，在 LFK-300 kN 电子万能试验机上进行高温拉伸试验（900 ℃）。同时，得到在该状态下的材料性能如表 1 所示。

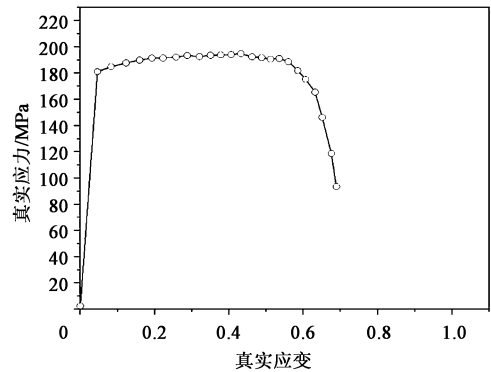


图 2 真实应力-真实应变拟合曲线
Fig. 2 Fitting curve of true stress-true strain

表 1 GH4169 高温合金在 900 ℃ 条件下的性能参数
Table 1 Performance parameters of super alloy GH4169 at 900 ℃

参数	密度/(g·cm ⁻³)	熔点/℃	弹性模量/GPa	泊松比
数值	7.86	1260~1320	130	0.3

1.2 围圆成形模型的建立

卡箍箍带冲压仿真模型如图 3 所示。模型的设置中，分析步采用 Dynamic Explicit，模具定义为刚性，约束下模具的位移与旋转，在上模具上施加一定的载荷使板料成形。为确保计算的收敛性，模具采用 R3D4 网格类型，材料选择壳单元，网格类型定义为 S4R。该卡箍箍带尺寸为 200 mm×50 mm×0.5 mm，接触类型为面面接触，切向无摩擦。

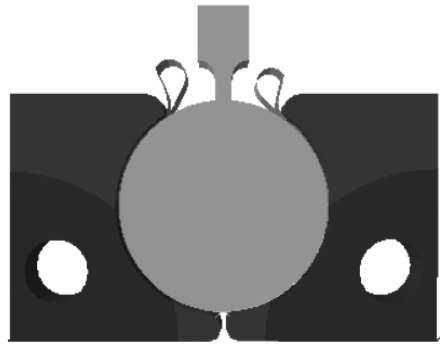


图 3 卡箍箍带冲压仿真模型
Fig. 3 Simulation model of clamp hoop belt stamping

1.3 箍带弯曲工艺参数选取

在冲压速度为 100、150 和 200 mm·s⁻¹ 下，对卡箍箍带进行有限元模拟，从而得到整个围圆路径下的应力、应变和厚度数值并进行整理，分析其影

响规律并得出结论。

2 围圆成形结果分析

2.1 冲压速度对应力的影响

不同冲压速度下的应力仿真云图如图 4 所示。为了更加直观地观察应力的变化,选取如图 5 所示的围圆路径,从左耳圆开始为 0,此后路径距离为图 5 所示围圆路径上离左耳圆的随圆距离,在右耳圆结束,得到整个围圆路径的应力分布折线图如图 6 所示。其中,横坐标为在围圆路径下的各点距离左耳圆的随圆距离,纵坐标为各距离点下的应力值。

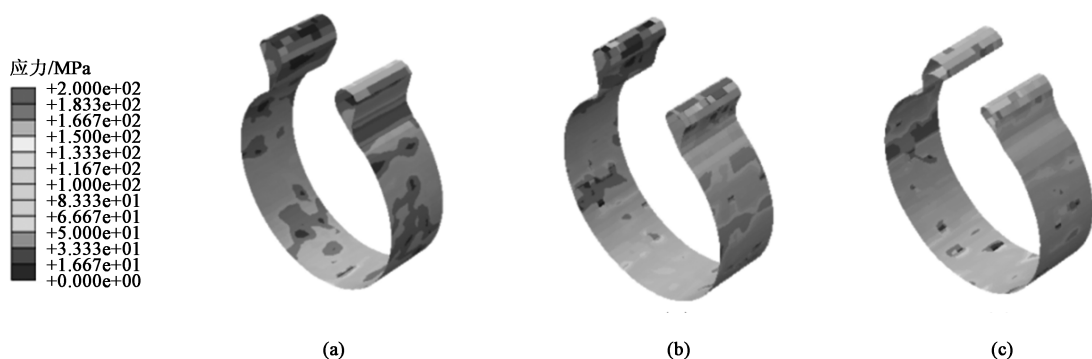


图 4 不同冲压速度下的应力仿真云图

(a) $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (c) $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 4 Simulation nephograms of stress under different stamping speeds

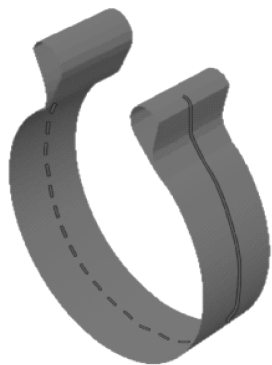


图 5 围圆路径选取

Fig. 5 Selection of circular path

2.2 冲压速度对应变的影响

不同冲压速度下应变仿真云图如图 7 所示。为了更加直观地观察应变的变化,选取如图 5 所示的围圆路径图,得到整个围圆路径的应变分布折线图如图 8 所示,其中横坐标为在围圆路径下的各点距离左耳圆的随圆距离,纵坐标为各距离点下的应变值。从图 7 和图 8 可得:在冲压速度为 100、150 和 $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 下,应变值的变化趋势大致相同,在

由图 4 和图 6 可以得出:3 种不同冲压速度下所获得的应力变化趋势大致相同,均存在一定的拉应力。最大拉应力分布在耳圆两端,在最底部附近出现小幅度上升,这是因为:在围圆冲压变形中,在此 3 处的变形最为严重,所产生的拉应力也最大。在整个路径距离下,拉应力的分布大致呈现左耳圆部分先增大随后下降至最底部,在底部附近小幅度增大,再上升致右耳圆部分。其中,150 和 $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的冲压速度对围圆拉应力的影响差距不大; $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的冲压速度所产生的拉应力最小,此冲压速度较为理想。拉应力越小,卡箍的抗折裂能力越强,成形质量也越好。

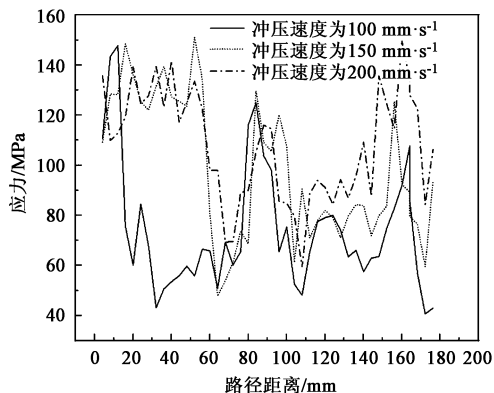


图 6 不同路径距离下的应力折线图

Fig. 6 Line chart of stress under different path distances

两端耳圆部分和围圆最底端的应力集中较为明显,这是由于在耳圆和最底部变形最为严重。其中,150 和 $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 冲压速度下的折线图应力集中非常明显,应变值非常大;而 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 冲压速度下应变虽然也有相同趋势,但是增加幅度不大,且整个路径曲线的应变值变化平稳。由此可见,在 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 冲压速度下,围圆成形的应变各处变

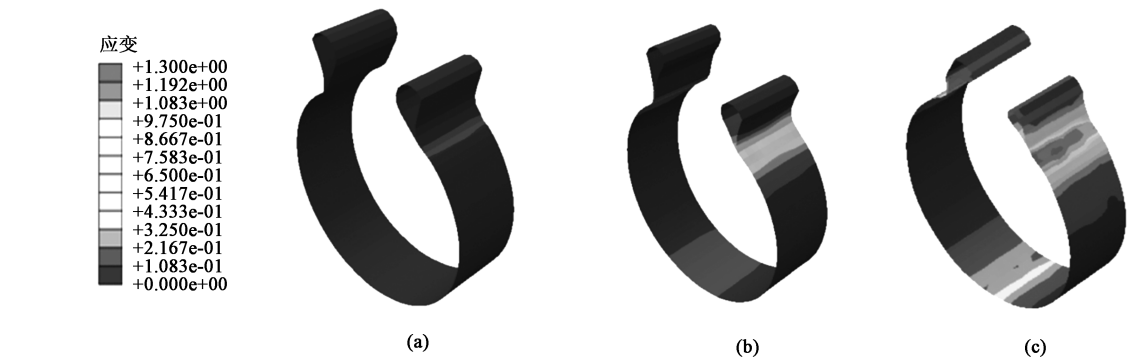


图 7 不同冲压速度下的应变仿真云图
(a) $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (b) $150\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (c) $200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
Fig. 7 Simulation nephograms of strain under different stamping speeds

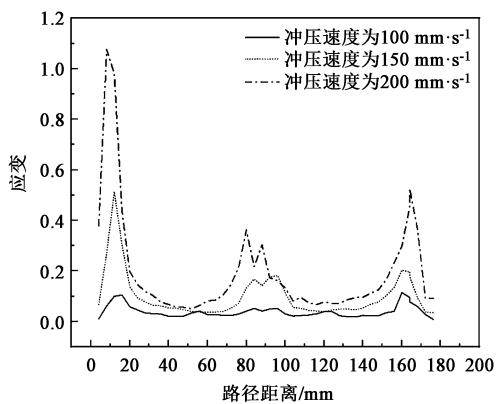


图 8 不同路径距离下的应变折线图
Fig. 8 Line chart of strain under different path distances

化不大，没有应力过度集中的现象，可以减少卡箍箍带断裂的发生，符合生产效益。

2.3 冲压速度对厚度的影响

不同冲压速度下的厚度仿真云图如图 9 所示。为了更加直观地观察厚度的变化，选取如图 5 所示的围圆路径，得到整个围圆路径的厚度分布折线图如图

10 所示，其中横坐标为在围圆路径下的各点距离左耳圆的随圆距离，纵坐标为各距离点下的厚度值。从图 9 和图 10 可以得到：厚度的变化幅度非常小，其中在耳圆部分和最底部板材比初始厚度小，其他部分比初始厚度大。且冲压速度为 $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，厚度的变化最为平稳，整个路径的厚度变化不会出现大幅度升降；在 150 和 $200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 冲压速度下，折线会出现不同程度的抖动。这说明在 $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 冲压速度下，板材的变形最为均匀，厚度变化也最小。

2.4 试验结果与仿真结果对比分析

将 GH4169 高温合金材料加热到固溶状态，然后在 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行卡箍冲压成形试验，得到的试验成品如图 11 所示。由于板材的初始厚度为 0.5 mm ，在试验过程中厚度差距较小，将厚度作为评价指标不明显，因此，选用应力值作为试验评价指标。在冲压速度为 $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，对试验品进行应力测试，得到应力值如表 2 所示。试验所用压力机型号为 JH21-110。

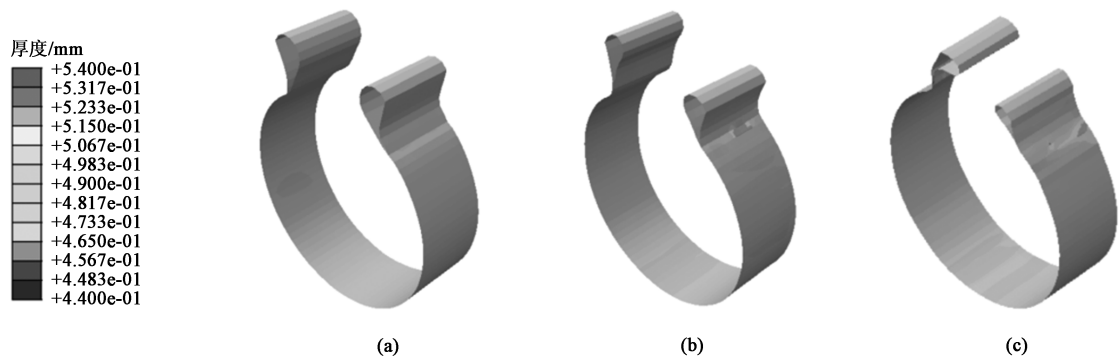


图 9 不同冲压速度下的厚度仿真云图
(a) $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (b) $150\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (c) $200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
Fig. 9 Simulation nephograms of thickness under different stamping speeds

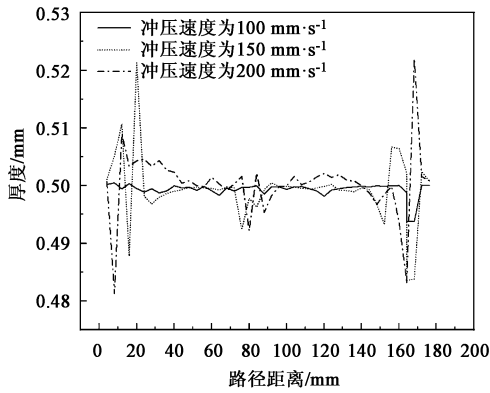


图 10 不同路径距离下的厚度折线图

Fig. 10 Line chart of thickness at different path distances



图 11 卡箍箍带成品件

Fig. 11 Finished product of clamp hoop belt

表 2 卡箍箍带拉应力测试结果 (MPa)

Table 2 Test results of tensile stress for clamp hoop belt (MPa)

位置	左耳圆部分	路径 50 mm 处	最底部	右耳圆部分
数值	139.875	55.432	103.557	98.742

试验结果与有限元模拟结果对比如图 12 所示,

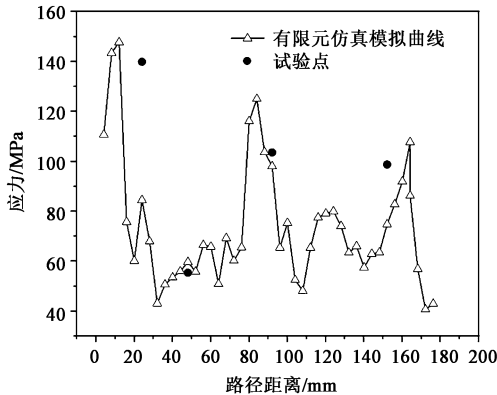


图 12 有限元仿真模拟与试验所测点应力折线对比

Fig. 12 Comparison of stress line between finite element simulation and test points

其中横坐标为在围圆路径下的各点距离左耳圆的随圆距离, 纵坐标为各距离点下的应力值。试验所测点的应力值与仿真模拟结果基本相同, 均在有限元仿真模拟所得折线附近, 表明有限元模拟卡箍箍带应力值是准确可靠的, 说明应力分布趋势如模拟仿真所得, 拉应力值在耳圆两端和最底部最大。

3 结论

(1) 卡箍箍带进行冲压成形的模拟仿真结果与试验结果基本相符, 说明该仿真过程是可靠的。

(2) 在不同冲压速度下, 卡箍箍带的应力、应变以及厚度的变化趋势大致相同, 均在耳圆部分和最底部出现拉应力增大、应变集中以及厚度减小的现象, 表明在此 3 处出现变形较大的现象。

(3) 经过对不同冲压速度下的卡箍箍带进行模拟仿真, 得出在 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度下, 无论应力、应变还是厚度的变化均相对均匀, 且整个箍带的变形相对平稳。

(4) 在一定冲压速度范围内, 冲压速度越大, 对卡箍箍带的成形质量影响越大, 变形越严重, 应力集中越明显, 箍带越容易折裂。

参考文献:

[1] 郑敏, 张爽, 吴超. 国内外导管连接卡箍发展动态研究 [J]. 航空标准化与质量, 2010, (4): 15-21.
Zheng M, Zhang S, Wu C. Development trends of coupling clamps for pipes at home and abroad [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2010, (4): 15-21.

[2] 郑敏, 章怡宁, 景绿路, 等. 国外新型带垫固定卡箍分析 [J]. 航空标准化与质量, 2009, (5): 12-16, 45.
Zheng M, Zhang Y N, Jing L L, et al. Analysis of new foreign gasketed fixed clamps [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2009, (5): 12-16, 45.

[3] 丁琪, 嵇佳佳, 柯文敏, 等. 高温合金 GH4169 激光焊工艺研究 [J]. 金属加工: 热加工, 2020, (12): 23-26.
Ding Q, Ji J J, Ke W M, et al. Research on laser welding technology of superalloy GH4169 [J]. Metal Working, 2020, (12): 23-26.

[4] 杨正东, 隋明丽, 任超, 等. 基于飞机环控系统的高温卡箍优化设计与应用 [J]. 航空标准化与质量, 2018, (5): 21-24, 36.
Yang Z D, Sui M L, Ren C, et al. The optimization design and application of hot temperature clamp based on aircraft environmental control system [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2018, (5): 21-24, 36.

[5] 李荣之, 曹征宽, 欧红燕, 等. 固溶时效工艺对 GH4169 高温合金组织和性能的影响 [J]. 四川冶金, 2021, 43 (4):

- 34-37.
- Li R Z, Cao Z K, Ou H Y, et al. Effect of solution aging process on microstructure and properties of GH4169 superalloy [J]. *Sichuan Metallurgy*, 2021, 43 (4): 34-37.
- [6] 朱绍荷. 铝合金柔性导管连接卡箍简介 [J]. *航空标准化与质量*, 2004, (3): 35-37.
- Zhu S H. Brief introduction of aluminum alloy flexible conduit connection clamp [J]. *Aviation Standardization and Quality*, 2004, (3): 35-37.
- [7] 邢继刚. 铝合金板材冲压成形数值模拟及变压边力技术研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2020.
- Xing J G. Research on Numerical Simulation and Variable Blank Holder Force Technology of Aluminum Alloy Sheet Stamping [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2020.
- [8] 居龙, 毛婷婷, 李洪波, 等. 冲压速度对铝合金 5182-O 拉深性能的影响 [J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2016, 47 (8): 2643-2649.
- Ju L, Mao T T, Li H B, et al. Effects of forming speed on drawability of aluminum alloy 5182-O [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2016, 47 (8): 2643-2649.
- [9] 宋润华, 秦海龙, 毕中南, 等. GH4169 合金高温动态应变时效实验及模拟 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52 (12): 21-26.
- Song R H, Qin H L, Bi Z N, et al. Experimental and modeling investigations of high temperature DSA behaviour for GH4169 superalloy [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52 (12): 21-26.
- [10] 谭海波, 孙亚利. 热处理工艺对 GH4169 高温合金锻件组织与力学性能的影响 [J/OL]. *热加工工艺*, 2022, (2): 114-116, 109 [2022-02-21]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20193633>.
- Tan H B, Sun Y L. Effects of heat treatment process on microstructure and mechanical properties of GH4169 superalloy forgings [J/OL]. *Hot Working Technology*, 2022, (2): 114-116, 109 [2022-02-21]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20193633>.
- [11] ASTM E8/E8M—2021, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [S].
- [12] GB/T 228.1—2010, 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法 [S].
- GB/T 228.1—2010, Metallic materials—tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].

“2022 上海锻压技术与装备展”将于 2022 年 6 月 15-18 日在上海虹桥国家会展中心盛大开幕

由中国机械工程学会塑性工程分会、北京机电研究所有限公司精心筹备的“2022 上海锻压技术与装备展”将于 2022 年 6 月 15-18 日在上海虹桥国家会展中心盛大开幕。现热忱邀请国内外锻压技术与装备供应商参展,展示新产品、新技术、新形象;同时,邀请国内外同行和朋友届时光临,共谋行业发展大计!

同期举办:先进塑性成形技术与装备前沿论坛、全国锻压技术与装备高级研修班、第 22 届中国国际模具技术和设备展览会、2022 上海热处理装备与技术展览会。

“2022 上海锻压技术与装备展”致力于打造锻压行业一站式展览平台,不仅涵盖下料、加热、设备、模具、检测、新技术、产品、模拟等锻造生产全产业链,而且聚焦推动锻压领域产学研进程,为国内科研机构、团体提供集中展示科研成果、技术推广、人才培养等成果的便利平台,通过 24×365×360°式全方位宣传,为企业开拓市场、扩大贸易往来搭建更畅通的合作桥梁,同时促进锻压领域的产学研用学术交流与合作,实现优势互补、互惠共赢。“2022 上海锻压技术与装备展”期待您的到来!2022,相约上海,见证发展!

展品范围:(1) **成形零部件:**锻件、挤压件、轧制件及特种成形件(旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧、楔横轧、充液成形、增量成形及各种新技术等);(2) **锻压设备及附件:**锻造、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备,锻造生产用工业炉、窑和节能技术,自动化控制,锻压辅助设备,锻压防护产品等;(3) **锻压智能制造技术及装备:**自动化生产线、智能工厂、工业机器人、智能机床、智能物流管理、增材制造、机器视觉技术、工业物联网及系统集成、自动化生产解决方案及各种软件等;(4) **锻压检测设备及仪器仪表;**(5) **工艺设计和 CAD、CAM,材料成形模拟软件等。**

展位分类:(1) **标准展台:**3 m×3 m, 3 m×4 m, 3 m×6 m。注:每个标准展位包括:三面隔板、帽板、地毯、一张展桌、两把椅子、两支照明灯、一个 220 V/5 A 电源插座。(2) **光地展区:**36 平方米起租。(3) **“科创中国”新技术、新成果集中展示区:**宣传板(单张宣传板标准尺寸约 3 m×2 m);宣传板由主办方统一制作和布展。

参观者:来自国外及全国各地的专业人士前来参观和洽谈,其他相关行业的参观者有机械、模具、热处理、工业炉、航空航天、石油、兵器、家电、电子、纺织机械等。

联系方式:

地 址:北京市海淀区学清路 18 号中国机械工程学会塑性工程分会秘书处 **网 址:**<http://www.cstp-cmes.org.cn>

联系人:林玉彤、秦思晓、周 林 **联系电话:**010-62920652 **E-mail:**fst_linyutong@163.com; duanya@cmes.org

中国机械工程学会塑性工程分会