

# 2 m 级大尺寸高温合金机匣精密成形工艺研究

王清<sup>1</sup>, 罗鸿飞<sup>1</sup>, 佟健<sup>2</sup>, 王建国<sup>3,4</sup>, 孔令伟<sup>3</sup>, 吴永安<sup>1</sup>, 刘东<sup>3,4</sup>, 王华东<sup>1</sup>

(1. 贵州航宇科技发展股份有限公司, 贵阳 550081; 2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司,  
沈阳 110041; 3. 西北工业大学 材料学院, 西安 710072;  
4. 西北工业大学 重庆科创中心, 重庆 401120)

**摘要:** 目的 为满足某型号燃气轮机用 2 m 级大尺寸高温合金机匣整体精密成形的要求, 在保证组织与性能均匀性的同时, 进一步提高材料利用率。**方法** 通过数值模拟优化环件精密成形工艺, 对制坯及环轧过程的热力参数进行分析, 并将其与组织性能结果进行对比。**结果** 通过胎膜制坯+异形环轧成形大尺寸高温合金环锻件, 锻件成形完整, 热力参数分布均匀, 显微组织和性能一致性较高。**结论** 有限元数值模拟方法可对环件成形过程的热力参数进行有效预测, 而且可通过热力参数-组织-性能之间的关系准确判断工艺的合理性和可行性。高温合金的显微组织和性能对热加工过程非常敏感, 应尽量减少成形过程中局部区域变形的明显温升和只加热未变形的现象发生。

**关键词:** GH4169 合金; 大尺寸机匣; 异形制坯; 有限元模拟

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.01.016

**中图分类号:** TG335.19    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1674-6457(2021)01-0121-06

## Precision Forming Technology for Superalloy Casing with 2-meter Diameter

WANG Qing<sup>1</sup>, LUO Hong-fei<sup>1</sup>, TONG Jian<sup>2</sup>, WANG Jian-guo<sup>3,4</sup>, KONG Ling-wei<sup>3</sup>,  
WU Yong-an<sup>1</sup>, LIU Dong<sup>3,4</sup>, WANG Hua-dong<sup>1</sup>

(1. Gui Zhou Aviation Technology Development Co., Ltd., Guiyang 550081, China; 2. AECC Shenyang Liming Aero Engine  
Co., Ltd., Shenyang 110041, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical  
University, Xi'an 710072, China; 4. Chongqing Technology Innovation Center, Northwestern Polytechnical  
University, Chongqing 401120, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the material utilization on the premise of ensuring microstructure and property uniformity to meet the requirement on precision forming of 2-meter diameter superalloy casing used for gas turbine. The precision forming process of rings was optimized by numerical simulation. The thermal mechanical parameters during the blank forging and ring rolling process were analyzed and compared with the result of microstructure and properties. The results showed that the large-size superalloy ring forgings formed by membrane blank forging+special-shaped ring blank rolling were complete. Thermal mechanical parameters, microstructure and properties were distributed uniformly. FEM simulation can effectively predict the thermal parameters of ring forming process. Rationality and feasibility of the process can be accurately judged by the relationship between thermal parameters, microstructure and properties. Microstructure and properties of superalloy are sensitive to the hot working process. Obvious temperature rise and only heating process without deformation should be avoided during hot working of superalloy.

**KEY WORDS:** GH4169 alloy; large size casing; contour preforming; FEM

---

收稿日期: 2020-09-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (3102019ZX004); 陕西省自然科学基金 (2020JQ-182)

作者简介: 王清 (1989—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为材料成形。

通讯作者: 王建国 (1987—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为高温合金塑性成形与控制。

沉淀强化型镍基高温合金 GH4169 以其良好的抗疲劳、抗氧化性能，较高的高温强度以及良好的持久性能，被广泛应用于制造航空发动机和燃气轮机的机匣、盘、叶片等高温结构部件<sup>[1—3]</sup>。GH4169 合金也因其变形抗力大、热加工窗口窄、力学性能对显微组织敏感等特点成为高温合金中组织性能最难控制的牌号之一<sup>[4—6]</sup>。国内大尺寸 GH4169 合金机匣零件多采用分段轧制+焊接成形的方法制造<sup>[7—8]</sup>，不仅导致材料利用率和零件整体性能偏低，而且还需解决焊接过程引发的变形问题。随着我国先进装备对动力需求的不断增加，燃气轮机和航空发动机机匣类零件的尺寸也越来越大，对其也提出了大型化、异形化、精密化的发展需求，因此采用整体精密轧制成形已经成为航空发动机和燃气轮机机匣锻件成形的普遍选择。

2013 年，贵州航宇首次锻造出质量达 4.7 t 的 GH4169 合金异形环锻件<sup>[9]</sup>，锻件尺寸达 1.95 m，然而该锻件设计精密度偏低，材料利用率较低，零件加工周期较长。异形环锻件轧制初始均采用矩形截面坯料轧制成形，由此容易导致环件截面整体变形不均匀，加剧了对难变形合金的显微组织和力学性能的控制难度。西北工业大学曾对 GH4738 合金异形环件的成形过程进行数值模拟，发现异形环件的应变、温度等热力参数的分布均匀性明显较低，因此提高锻件成形热力参数分布的均匀性<sup>[10]</sup>，对于提高大尺寸的高温合金异形环锻件显微组织和力学性能的均匀性具有决定性意义。顾青采用体积补偿方法设计了 GH4169 合金异形环锻件的坯料，但环锻件最终采用模锻成形。除环件坯料的设计之外，针对高温合金显微组织演化规律的研究也是确保锻件组织性能的基础。杜金辉<sup>[11—13]</sup>、董建新<sup>[14—17]</sup>、蔺永诚<sup>[18—20]</sup>、张士宏<sup>[21—23]</sup>、刘东<sup>[24—26]</sup>等对 GH4169 合金的显微组织演化规律做了多年系统的研究，为 2 m 级大尺寸高温合金机匣锻件的精密成形提供了理论依据。

文中以某型号燃气轮机用 2 m 级大尺寸高温合金机匣为对象，通过数值模拟优化了环件精密成形工艺，对制坯及环轧过程的热力参数进行分析，并将其与组织性能结果进行对比，成功获得了组织性能满足要求的 GH4169 合金精密环件，锻件成形精度及材料利用率大幅度提高。

## 1 试验

采用直径为  $\phi 600$  mm 的 GH4169 合金棒材，化学成分如下(质量分数)：C 为 0.029%，Cr 为 18.12%，Mo 为 2.98%，Nb 为 5.38%，Ti 为 0.95%，Al 为 0.52%，Ni 为 53.99%，Co 为 0.21%，S 为 0.0006%，P 为 0.011%，B<0.005%。棒材晶粒度为 ASTM 3—4 级。棒材经镦粗、冲孔、马架矩形环坯、预锻异形环坯、异形轧制而成形为所需锻件，锻件经精细设计后，如图 1 所示。锻件的斜度约 18°，高度为 760 mm 左右，大小端直径差约为 600 mm。通过胎模制坯分 3 次将马架所得矩形环坯制成异形环坯，其成形过程示意如图 2 所示。首先用冲头预成形斜面，然后冲头继续压下成形环坯斜面，同时成形大头法兰，再将整套模具翻面，成形小头法兰，最后使用异形环坯轧制成最终锻件。

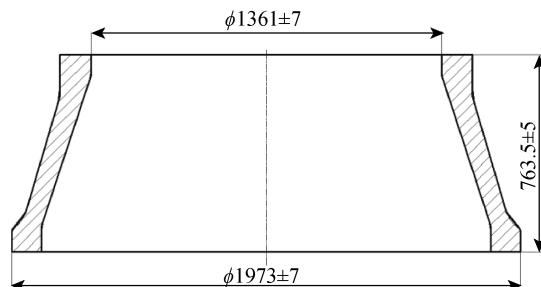


图 1 2 m 级 GH4169 合金精密环件锻件  
Fig.1 Drawing of GH4169 alloy precision ring forging with 2-meter diameter

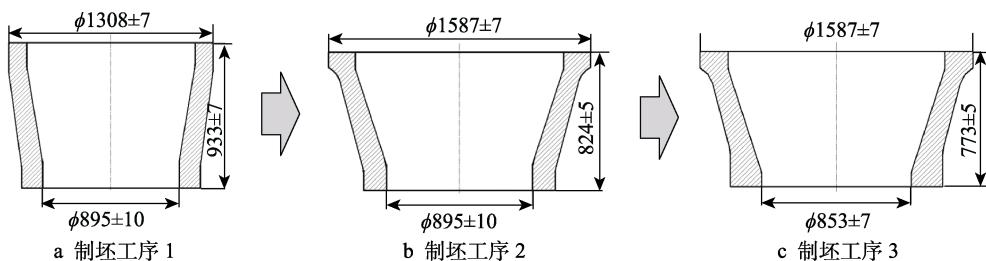


图 2 异形环坯成形方案  
Fig.2 Forming scheme of shaped ring blank

采用有限元商用软件对异形环坯和最终环件成形过程进行数值模拟，有限元参数设置见表 1，其中坯料与模具的表面辐射率均为 0.25，环境温度均为 20 °C，坯料-模具换热系数为 2000 W/(m·°C)，坯料-空气换热系数为 20 W/(m·°C)，摩擦因数为 0.3，以此确定坯料设计合理性和异形环件的热力参数分布，并与采

用矩形坯料成形的环件热力参数进行了对比。有限元模拟过程中，高温合金的材料模型根据 ZHU X 等<sup>[27]</sup>建立的 GH4169 高温合金本构关系建立。环件轧制完成后，经 960 °C 固溶 1 h 油冷，随后经 720 °C 保温 8 h，55 °C/h 炉冷至 620 °C 保温 8 h 后空冷后，分别进行显微组织和力学性能测试，试样取样位置如图 3 所示。

表1 有限元模拟参数设置

Tab.1 Finite element simulation parameters

部件	材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比	温度/℃
坯料	GH4169	8240	0.29	1010~1040
模具	5CrNiMo	7860	0.3	300

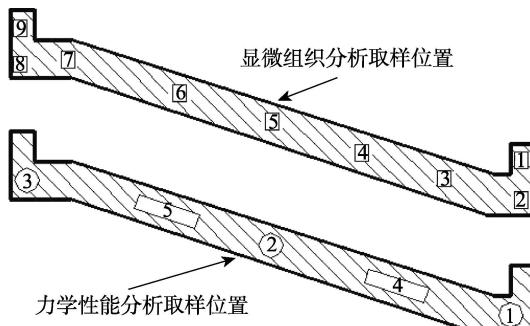


图3 显微组织和力学性能取样位置示意图

Fig.3 Sample position for microstructure and mechanical properties analysis

## 2 结果及讨论

### 2.1 有限元模拟结果及实际环件

GH4169 合金异形环坯各成形工序的等效应变分布如图 4 所示。可以看出，第一工序坯料等效应变处于 0.125~0.5 之间，应变主要集中于轴向上 2/3 区域，轴向下 1/3 区域的等效应变较小，而且存在明显的镦粗变形，变形带呈现典型的 45°切应变分布特点。第二工序变形集中于大端面区域，等效应变达 0.5 以上。第三工序变形集中于小端面区域，等效应变在 0.375 以上。从累积变形结果分析，异形环坯的大小端面变形较大，而中间倾斜部分的变形较小，而且要经历后续 2 个火次的加热过程，将增加中间倾斜部位的组织控制难度。

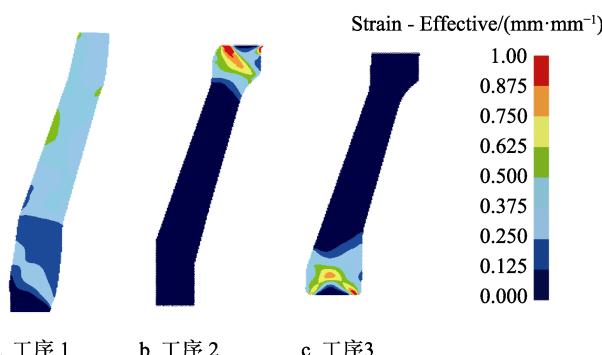


图4 预锻异形环坯等效应变分

Fig.4 Effective strain distribution of preformed shaped ring blank

GH4169 合金大尺寸精密环件采用异形环坯和矩形环坯的等效应变分布如图 5 所示，可以看出，采用异形环坯的等效应变较为均匀（见图 5a），整体等效应变在 0.375 以上，大小端面的外环面区域等效应变较大，达到 1.0 以上。采用矩形环坯的等效应变分布

均匀性明显低于异形环坯，在大端面的内侧和小端面与倾斜区域的外侧，等效应变较大，可达 3.0 以上，其余部位的等效应变达 1.5 以上。经模拟计算，采用异形环坯轧制成形所需轧制力约为 500 t，而采用矩形环坯轧制所需轧制力约为 1000 t，由此对轧制设备的能力提出了更高的要求。采用矩形环坯轧制成形，等效应变分布均匀性较低，易出现环件组织不均匀、残余应力高等问题，因此采用异形环坯轧制是完成 2 m 级高温合金精密环件成形的优选方案。

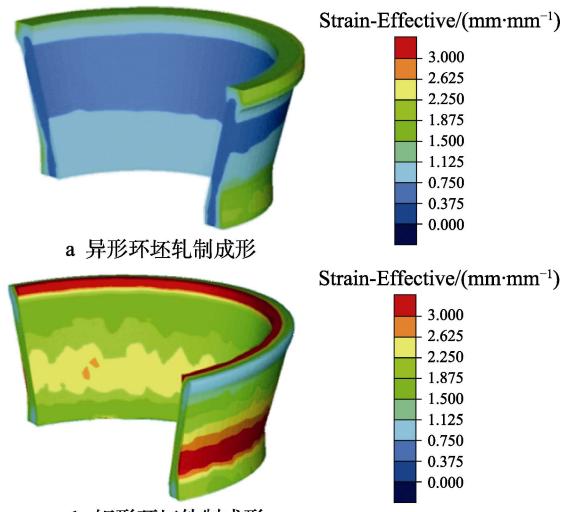


图5 精密轧制大尺寸环件等效应变分布  
Fig.5 Effective strain distribution of large precision ring

GH4169 合金大尺寸精密环件的坯料和最终成形环件实物如图 6 所示，可以看出，实际坯料和环件成形完整、无成形缺陷，说明有限元模型设计合理、数据准确。矩形环中间坯的上端面存在明显的尺寸差异，这是因为矩形环中间坯采用马架扩孔成形，属自由锻方式。GH4169 合金变形抗力大，对终锻温度的要求高，因此需采用多次小变形量渐进成形。工序的增加必然增加了锻件尺寸控制的难度，使矩形环坯两侧的高度尺寸存在差异。

### 2.2 大尺寸环件的显微组织与力学性能

图 7 为 2 m 级 GH4169 高温合金异形环件的显微组织，可以看出，各位置晶粒尺寸相对均匀，平均晶粒尺寸约为 ASTM 4 级，同时可以观察到位置 1 和位置 9 的晶粒尺寸略大，位置 5 出现个别的大晶粒。数值模拟结果显示，位置 1, 5, 9 在变形结束时的等效应变分别为 2.16, 0.47, 1.83，变形结束的温度分别为 1022, 1006, 1032 °C，其余位置的等效应变在 0.6~0.9，温度在 950~1010 °C。经对比发现，位置 1 和 9 的变形量较大，变形温升较高，已经超过 GH4169 合金中 δ 相的溶解温度，这是引发晶粒尺寸偏大的主要原因。位置 5 出现个别大晶粒的主要原因可归结于制坯过程中该位置经历 2 次加热过程而无变形过程，而且在轧制成形过程中变形量较小，导致个别大晶粒残留。

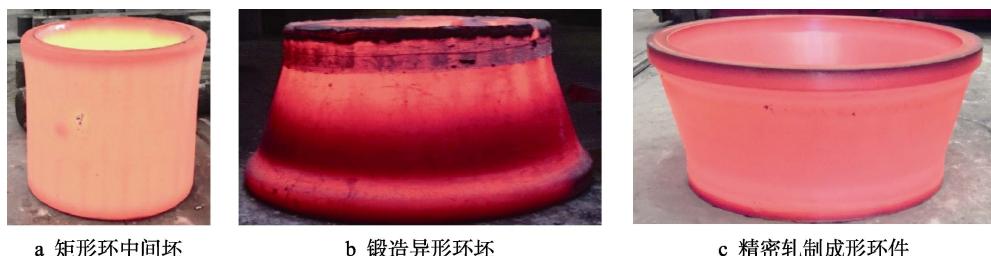


图 6 环坯及成形环件  
Fig.6 Blank and rolled ring

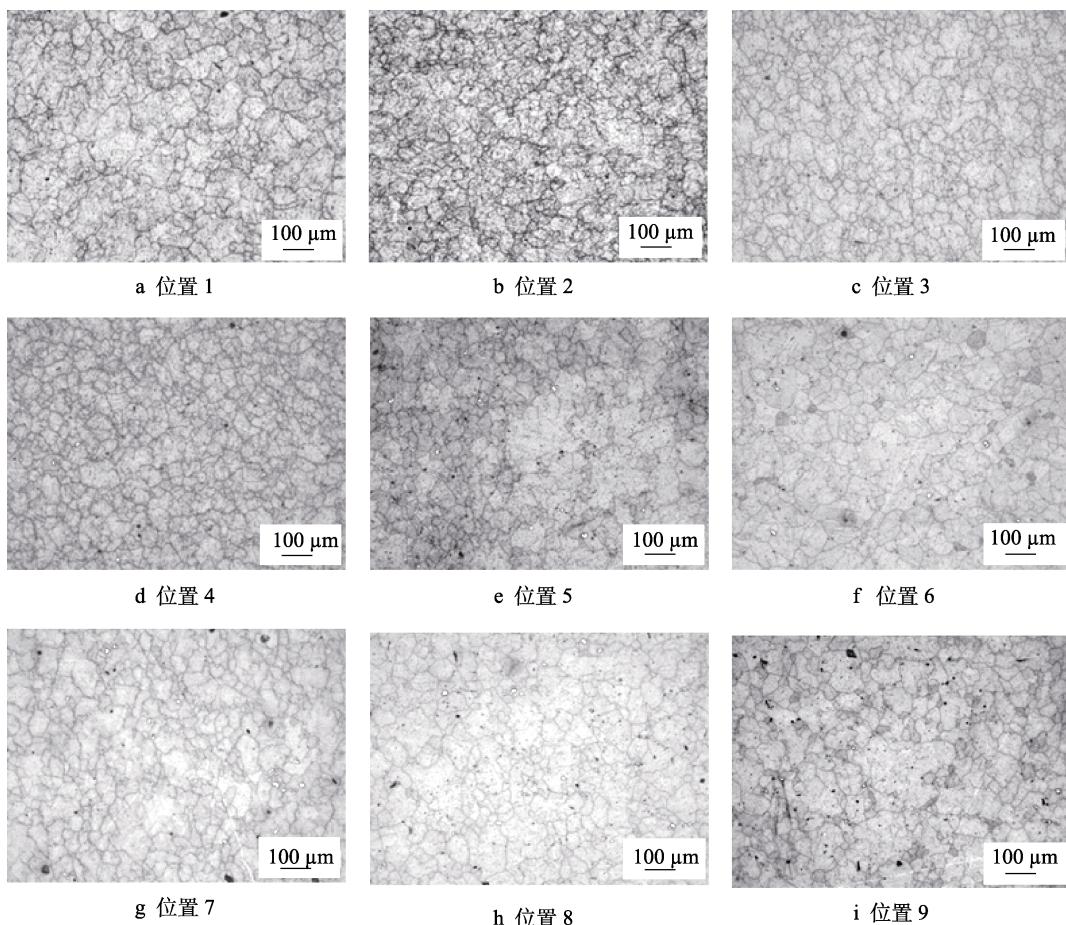


图 7 2 m 级 GH4169 高温合金异形环件的显微组织  
Fig.7 Microstructure of 2-meter GH4169 superalloy shaped ring

表 2 和表 3 为 GH4169 合金环件室温和高温拉伸性能 , 可以看出 , 该环件的整体拉伸性能较为理想。室温拉伸性能中 , 抗拉强度均大于 1360 MPa , 屈服强度均大于 1110 MPa , 断后伸长率均大于 23% , 收缩率均大于 32%; 高温拉伸性能中 , 抗拉强度最低为 1089 MPa , 屈服强度最低为 913 MPa , 伸长率最低为 29% , 收缩率最低为 32%。位置 4 与位置 5 的两试样的塑性偏低 , 两位置均从环件倾斜区域的轴向取样。对比数值模拟与显微组织的结果发现 , 该位置存在经历 2 次高温加热且未变形的现象 , 显微组织显示该部位存在个别大晶粒 , 而且环轧过程主要为径 / 周向变形 , 轴向变形较小 , 这是导致两位置塑性偏低的主要原因。

表 4 为 GH4169 合金环件持久性能 , 可以看出 ,

该环件的整体持久性能较为理想 , 持久寿命达 54.0 h 以上 , 伸长率大于 18%。相同地 , 位置 4 与位置 5

表 2 GH4169 高温合金异形环件的室温拉伸性能  
Tab.2 Room temperature tensile properties of shaped ring parts for superalloy GH4169

位置	抗拉强度/	屈服强度/	断后伸长率/	断面收缩率/
	MPa	MPa	%	%
1	1370	1080	24	42
2	1380	1130	24	42
3	1360	1120	25	43
4	1360	1110	23	34
5	1360	1130	24	32

表3 GH4169 高温合金异形环件的高温拉伸性能  
Tab.3 High temperature tensile properties of shaped ring parts for superalloy GH4169

位置	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	断后伸长率/ %	断面收缩率/ %
1	1101	924	34.0	55
2	1101	928	37.5	57
3	1093	926	35.0	54
4	1089	925	32.5	50
5	1093	913	29.0	40

表4 GH4169 高温合金异形环件的持久性能  
Tab.4 Stress rupture properties of shaped ring for superalloy GH4169

位置	载荷/MPa	寿命/h	伸长率/%
1	690	56.1	33
2	690	56.6	34
3	690	58.0	20
4	690	54.5	20
5	690	54.0	18

试样的寿命较低, 位置5的试样伸长率较低, 其主要原因仍是该部位显微组织存在个别大晶粒。

### 2.3 讨论

以上结果表明, FEM方法可准确预测GH4169合金环件的成形过程, 而且热力参数-工艺过程-组织-力学性能之间具有明确的映射关系。GH4169合金的显微组织具有强烈的遗传特性, 在异形环坯的制备过程中, 位置4和5仅在制坯的第一工序存在变形, 而在后续的第2, 3工序中基本无变形, 由此导致位置4和5出现了只加热而无变形的现象。第2, 3工序中加热温度为1010 °C, 虽然该温度低于GH4169合金中 $\delta$ 相的溶解温度, 不会引发晶粒长大, 但会导致两位置中小角度晶界及位错密度含量的大幅度降低, 使后续变形过程中各部位的显微组织初始状态存在差异, 这也是导致位置4和5处力学性能区别于其他位置的主要原因。

环件位置1和9的晶粒尺寸略大于其他位置, 从FEM模拟结果看出, 两位置的等效应变明显较高, 主要原因是GH4169合金的晶粒尺寸受温度影响较为明显。由于两位置变形量较大, 导致变形温升较为明显, 甚至超过GH4169合金中 $\delta$ 相的溶解温度, 导致 $\delta$ 相溶解, 对晶界迁移的阻力大幅度降低, 使两位置的晶界迁移速率增加, 晶粒尺寸略高于其他部位。

### 3 结论

1) 采用异形环坯轧制成形大尺寸高温合金环锻件, 锻件成形完整, 热力参数分布均匀, 显微组织和性能一致性较高, 异形环锻件尺寸精度明显提高。

2) 采用有限元数值模拟方法可对环件成形过程的热力参数进行有效预测, 而且可通过热力参数-组织-性能之间的关系准确判断工艺的合理性和可行性。

3) 高温合金的显微组织和性能对热加工过程非常敏感, 应尽量减少成形过程中局部区域的变形温升效应和只加热未变形的现象发生。

### 参考文献:

- [1] 王庆增, 田沛玉, 吴令萍. GH4169合金大型转子锻件的研制[J]. 宝钢技术, 2020(4): 47—50.  
WANG Qing-zeng, TIAN Pei-yu, WU Ling-ping. Development of GH4169 Alloy Large Rotor Forgings for Engineering[J]. Baosteel Technology, 2020(4): 47—50.
- [2] 惠瑞拓, 赵彦辉, 何俊, 等. 晶粒度对GH4169合金机匣力学性能及加工变形的影响[J]. 铸造技术, 2020, 41(6): 518—521.  
HUI Rui-tuo, ZHAO Yan-hui, HE Jun, et al. Effects of Grain Size on Mechanical Properties and Machining Deformation of GH4169 Casing Parts[J]. Foundry Technology, 2020, 41(6): 518—521.
- [3] 刘桢, 代朋超. 两种不同热变形方式对于GH4169合金锻棒组织的影响[J]. 金属功能材料, 2020, 27(3): 65—68.  
LIU Zhen, DAI Peng-chao. Effect of Two Different Hot Working Methods on Microstructure of Alloy GH4169 Forged Rod[J]. Metallic Functional Materials, 2020, 27(3): 65—68.
- [4] 张勇, 李鑫旭, 韦康, 等. 三联熔炼GH4169合金大规格铸造与棒材元素偏析行为[J]. 金属学报, 2020, 56(8): 1123—1132.  
ZHANG Yong, LI Xin-xu, WEI Kang, et al. Element Segregation in GH4169 Superalloy Large-Scale Ingot and Billet Manufactured by Triple-Melting[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(8): 1123—1132.
- [5] 高天明, 程晓农, 罗锐, 等. 时效处理对GH4169合金显微组织及高温拉伸变形行为的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(8): 119—123.  
GAO Tian-ming, CHENG Xiao-nong, LUO Rui, et al. Effect of Aging Treatment on Microstructure and High Temperature Tensile Deformation Behavior of GH4169 Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(8): 119—123.
- [6] YUAN Guang-jian, WANG Run-zi, GONG Cong-yang, et al. Investigations of Micro-notch Effect on Small Fatigue Crack Initiation Behaviour in Nickel-based Alloy GH4169: Experiments and Simulations[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 136: 105578.
- [7] 刘晓娟. 高温合金薄壁机匣焊接应力变形控制及加工工艺优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 7—9.  
LIU Xiao-juan. Welding Stress/Deformation Control and Processing Technology Optimization of Thin-wall Casing of High Temperature Alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 7—9.
- [8] 戚龙升, 郑文健, 曲伸, 等. 辐条式高温合金涡轮后机匣焊接工艺研究[J]. 焊接, 2019(4): 44—48.  
QI Long-sheng, ZHENG Wen-jian, QU Shen, et al. Welding Process of the Spoke-style Superalloy Turbine

- Rear Frame[J]. Welding & Joining, 2019(4): 44—48.
- [9] 罗鸿飞, 吴永安, 宋捷, 等. GH4169 合金超大异形环件锻造技术[C]// 全球华人塑性技术研讨会, 武汉, 2013. LUO Hong-fei, WU Yong-an, SONG Jie, et al. Forging Technology for Large Contour Ring of GH4169 Alloy[C]// Global Chinese Plastic Technical Seminar, Wuhan, 2013.
- [10] 王丹, 刘智, 王建国, 等. GH4738 高温合金异形环件组织与性能研究[J]. 锻压技术, 2020, 45(5): 128—132. WANG Dan, LIU Zhi, WANG Jian-guo, et al. Study on Microstructure and Properties of Shaped Ring Parts for Super Alloy GH4738[J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45(5): 128—132.
- [11] 杜金辉, 赵光普, 邓群, 等. 中国变形高温合金研制进展[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 27—39. DU Jin-hui, ZHAO Guang-pu, DENG Qun, et al. Development of Wrought Superalloy in China[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 27—39.
- [12] 邓群, 杜金辉, 曲敬龙, 等. 缶拔开坯对 GH4169 合金棒材显微组织及性能的影响[C]// 第十三届中国高温合金年会论文集, 2015: 4. DENG Qun, DU Jin-hui, QU Jing-long, et al. Effect of Upset-draw Cogging Method on Microstructures and Tensile Properties of Alloy GH4169 Bar[C]// The 13th China High Temperature Alloy Conference Proceedings, 2015: 4.
- [13] DU J H, LYU X D, DENG Q. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of GH4169 Superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(8): 1830—1834.
- [14] 赵薇, 董建新, 张麦仓, 等. GH4169、GH4169plus 和 GH4738 高温合金组织稳定性[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(S1): 1—6. ZHAO Wei, DONG Jian-xin, ZHANG Mai-cang, et al. High-temperature Microstructure Stability of GH4169, GH4169 Plus and GH4738 Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(S1): 1—6.
- [15] 韦家虎, 董建新, 付书红, 等. GH4169 合金盘件热变形后不同冷却速率条件下的组织模拟[J]. 失效分析与预防, 2013, 8(6): 321—325. WEI Jia-hu, DONG Jian-xin, FU Shu-hong, et al. Simulation of Effect of Cooling Rate after Hot Deformation for GH4169 Super Alloy Turbine Disk[J]. Failure Analysis and Prevention, 2013, 8(6): 321—325.
- [16] 王浩宇, 赵薇, 董建新, 等. 基于 Deform-3D 和正交实验法的 GH4169 合金涡轮盘热模锻工艺优化[J]. 锻压技术, 2013, 38(5): 13—19. WANG Hao-yu, ZHAO Wei, DONG Jian-xin, et al. Research on Optimization of GH4169 Turbine Disc Hot Die Forging Technique Based on Deform-3D and Orthogonal Experimental Method[J]. Failure Analysis and Prevention, 2013, 38(5): 13—19.
- [17] 张麦仓, 曹国鑫, 董建新. 冷却速度对 GH4169 合金凝固过程微观偏析及糊状区稳定性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(11): 3107—3113. ZHANG Mai-cang, CAO Guo-xin, DONG Jian-xin. Effect of Cooling Rate on Microsegregation Behaviors and Mush Zone Stability of GH4169 Alloy during Solidification Process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(11): 3107—3113.
- [18] LIN Y C, HE D, CHEN M, et al. EBSD Analysis of Evolution of Dynamic Recrystallization Grains and  $\delta$  Phase in a Nickel-based Superalloy during Hot Compressive Deformation[J]. Materials & Design, 2016, 97: 13—24.
- [19] LIN Y C, NONG F, CHEN X, et al. Microstructural Evolution and Constitutive Models to Predict Hot Deformation Behaviors of a Nickel-based Superalloy[J]. Vacuum, 2017, 137: 104—114.
- [20] LIN Y C, WU F, WANG Q, et al. Microstructural Evolution of a Ni-Fe-Cr-base Superalloy during Non-isothermal Two-stage Hot Deformation[J]. Vacuum, 2018, 151: 283—293.
- [21] 张海燕, 程明, 赵忠, 等. GH4169 合金涡轮盘热模锻中晶粒尺寸演变的数值模拟与分析[J]. 锻压技术, 2017, 42(11): 1—5. ZHANG Hai-yan, CHENG Ming, ZHAO Zhong, et al. Numerical Simulation and Analysis on Grain Size Evolution during the Hot Die Forging for Alloy GH4169 Turbine Disk[J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(11): 1—5.
- [22] 甘洪岩, 程明, 宋鸿武, 等. GH4169 合金楔横轧微观组织演变及动态再结晶机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(11): 3556—3562. GAN Hong-yan, CHENG ming, SONG Hong-wu, et al. Microstructure Evolution and Dynamic Recrystallization Mechanism of GH4169 Alloy during Cross Wedge[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(11): 3556—3562.
- [23] 张士宏, 程明, 宋鸿武, 等. 航空航天复杂曲面构件精密成形技术的研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 1—11. ZHANG Shi-hong, CHENG Ming, SONG Hong-wu, et al. Research Progress on Precision Forming Technology for Complex Curved Surface Components in Aerospace[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 1—11.
- [24] 袁颖菁, 刘东, 王健妍, 等. 微量元素碳对 GH4169 合金性能的影响[J]. 锻压技术, 2019, 44(12): 153—158. YUAN Ying-jing, LIU Dong, WANG Jian-yan, et al. Influence of Trace Element Carbon on Properties for GH4169 Alloy[J]. Forging & Stamping Technology, 2019, 44(12): 153—158.
- [25] 王建国, 刘东, 杨艳慧. GH4169 合金非均匀组织在加热过程中的演化机理[J]. 金属学报, 2016, 52(6): 707—716. WANG Jian-guo, LIU Dong, YANG Yan-hui. Mechanisms of Non-uniform Microstructure Evolution in GH4169 Alloy during Heating Process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(6): 707—716.
- [26] 王建国, 刘东, 王海平, 等. GH4169 合金晶界  $\delta$  相析出的动力学分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(4): 1148—1154. WANG Jian-guo, LIU Dong, WANG Hai-ping, et al. Precipitation Kinetic Analysis for  $\delta$  Phases at Grain Boundary of GH4169 Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(4): 1148—1154.
- [27] ZHU X, LIU D, YANG Y, et al. Effects of Blank Dimension on Forming Characteristics during Conical-section Ring Rolling of Inco718 Alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(9/10/11/12): 2707—2718.