

GH4706 高温合金斜 I 型环件轧制成形及组织与性能研究

周 涛¹, 罗鸿飞², 孙玉祥³, 卢 熠², 王建国³, 李昌永⁴, 刘 东³

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110043; 2. 贵州航宇科技发展股份有限公司, 贵州 贵阳 550081;

3. 西北工业大学 材料学院, 陕西 西安 710072; 4. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 技术中心, 辽宁 沈阳 110043)

摘要: 通过有限元方法对 GH4706 高温合金矩形环件和斜 I 型环件的轧制成形过程进行了数值模拟, 得到 2 种轧制工艺下的应变分布与温度分布情况, 并对相同名义成形参数条件下矩形环件和斜 I 型环件的显微组织和力学性能进行了对比分析。结果表明: 斜 I 型环件轧制成形后大端面内环处的等效应变最大, 达到 6 以上, 最大温差为 200 °C; 而矩形环件轧制成形后的等效应变较小, 最大等效应变约为 4, 最大温差仅为 50~60 °C。因此, 可以采用矩形环坯轧制成形斜 I 型环件, 但因其温度与等效应变分布均匀性较低, 相较于矩形环件其成形难度更大。通过实际试验验证, 在保证性能和组织要求的前提下, 采用 1050 °C 预轧+1030 °C 终轧的方法可以对 GH4706 高温合金斜 I 型环件进行轧制, 且实际环件成形完整, 无成形缺陷。

关键词: GH4706 高温合金; 环轧; 斜 I 型环件; 显微组织; 力学性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.10.013

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 10-0099-06

Rolling of oblique I-shaped ring piece for superalloy GH4706 and study on microstructure and properties

Zhou Tao¹, Luo Hongfei², Sun Yuxiang³, Lu Yi², Wang Jianguo³, Li Changyong⁴, Liu Dong³

(1. Air China Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110043, China;

2. Guizhou Aviation Technical Development Co., Ltd., Guiyang 550081, China;

3. Department of Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

4. Technology Center, AECC Shenyang Liming Aero Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

Abstract: The rolling processes of rectangular and oblique I-shaped ring pieces for superalloy GH4706 were simulated by finite element method, and the strain and temperature distributions after two types of rolling process were obtained. Then, the microstructures and mechanical properties of rectangular and oblique I-shaped ring pieces under the same nominal forming parameters were compared and analyzed. The results show that after rolling the oblique I-shaped ring piece, the equivalent strain at the inner ring of large end face is the highest, reaching six or more, and the maximum temperature difference reaches 200 °C. However, the equivalent strain of rectangular ring piece after rolling is relatively small, with the maximum equivalent strain of only close to four and the maximum temperature difference of only 50~60 °C. Thus, the oblique I-shaped ring piece can be formed by rolling the rectangular ring blank, but the uniformity of temperature and equivalent strain distributions is lower, making it more difficult to form compared to the rectangular ring piece. Through practical experiments, it can be verified that under the premise of ensuring performance and organizational requirements, the method of pre-rolling at 1050 °C + final rolling at 1030 °C can be used to roll superalloy GH4706 oblique I-shaped ring piece, and the actual ring forming is complete without forming defects.

Key words: superalloy GH4706; ring rolling; oblique I-shaped ring piece; microstructure; mechanical properties

GH4706 高温合金 (美国牌号为 Inconel 706) 是 20 世纪 60 年代美国国际镍公司在 Inconel 718 合金基础上设计出的一种 γ' 相沉淀硬化型镍基高温合

金, 可以长期服役于 700 °C 以下的高温环境^[1]。其化学成分相比 GH4169 高温合金较为合理, 不含钼, 降低了镍、铌、铬的含量, 增加了钛和铁的含量, 因此, 其成本低、偏析小, 同时机加工性能优于 GH4169 高温合金, 具备一定的强韧性、可焊性、耐腐蚀性及抗氧化性, 适合在高温条件下服役, 被广泛应用于航空领域中, 特别适用于制造航空发动机中的盘件和环件, 以及制造重型地面燃气轮机中

收稿日期: 2023-11-06; 修订日期: 2024-02-01

作者简介: 周 涛 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: ztzhzya@163.com

通信作者: 王建国 (1987-), 男, 博士, 助理研究员

E-mail: jianguow@nwpu.edu.cn

的盘件^[2-3]。机匣环件作为航空发动机的重要构件，其锻件成形技术主要有模锻成形与轧制成形。而相较于锻造、扩孔等传统环件成形工艺，轧制成形具有成形件尺寸精度高、加工余量小、材料利用率高、内部组织致密、流线连续和质量优异等优点^[4-7]，被广泛应用于环件生产中。实际中机匣环件大多选用斜 I 形环件机加工而成，以减少费用、提高材料利用率及精度。相比于矩形环件轧制，斜 I 形环件轧制过程中材料的流动特性表现为轴向流动补偿径向流动，倾斜角度越大成形越困难，且具有更加复杂的接触边界，轧制过程也更加不稳定，容易产生“攀升”和“端面剪切”等流动缺陷，因此，对倾斜角度过大的异形环件，可采用增加端盖的封闭孔型^[8-10]。本文研究了 GH4706 高温合金斜 I 形环件与矩形环件加工过程中的差异，以保证其在斜 I 形环件轧制成形后获得均匀的组织 and 合格的性能。

1 试验材料及方法

矩形环件和斜 I 形环件轧制成形使用相同的原

材料，分别为直径为其 $\Phi 280$ 和 $\Phi 250$ mm 的棒材，其化学成分如表 1 所示。环件成形工艺为下料、1080 ℃ 镦粗冲孔、预轧以及终轧。矩形环件轧制坯料为内径为 $\Phi 170$ mm、高度为 170 mm 的矩形截面环件，预轧和终轧温度及变形量分别为 1050 ℃、24% 与 1030 ℃、36%。采用内径为 $\Phi 170$ mm、高度为 180 mm 的矩形环件轧制为斜 I 形环件，分两次成形，成形参数分别为 1050 ℃、40% 的变形量及 1030 ℃、29% 的变形量。采用 Simufact 软件中的环轧模块进行模拟，GH4706 高温合金的矩形环件与斜 I 形环件轧制的几何模型及环件成形后的尺寸如图 1 所示，模拟过程中的参数设置如表 2 所示。进行有限元模拟前，根据彭剑冰等^[11]提出的 GH4706 高温合金本构关系建立有限元模拟所需的材料模型。轧制完成后对环件进行 970 ℃ 固溶（1 h，空冷）、845 ℃ 稳定化（3 h，空冷）和 720 ℃/620 ℃ 时效（720 ℃ 装炉，保温 8 h，再以 55 ℃·h⁻¹ 的速度炉冷至 620 ℃，保温 18 h，空冷）的热处理，再对其分别进行显微组织观察和力学性能测试。

表 1 GH4706 高温合金棒材的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of superalloy GH4706 bar（%，mass fraction）

C	Cr	Ni	Cu	Ti	Al	B	Mn	Si	S	Nb	Ta	P	Fe
0.030	16.79	43.92	0.013	1.85	0.24	0.005	0.001	0.083	0.001	2.9	0.17	0.004	余量

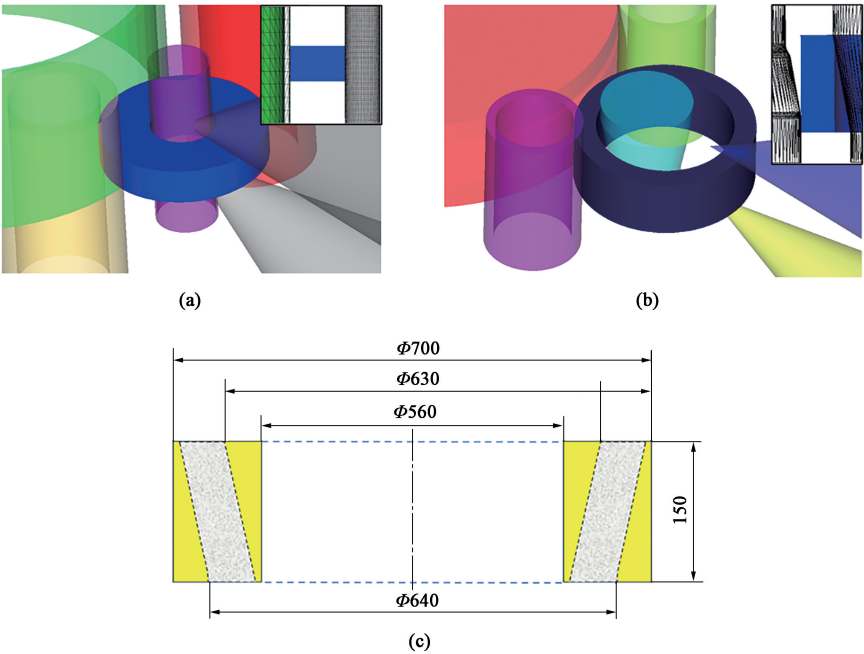


图 1 GH4706 高温合金的轧制模型及环件成形尺寸

(a) 矩形环件 (b) 斜 I 形环件 (c) 环件成形尺寸

Fig. 1 Rolling model of superalloy GH4706 and dimensions of formed ring piece

(a) Rectangular ring piece (b) Oblique I-shaped ring piece (c) Dimensions of formed ring piece

表 2 有限元模拟的参数设置		
Table 2 Parameters setting of finite element simulation		
参数	坯料	模具
材料	GH4706 高温合金	5CrNiMo 钢
导热系数/(W·(m·℃) ⁻¹)	30.7	33.5
比热容/(J·(kg·℃) ⁻¹)	749	448
弹性模量/GPa	207	198
密度/(kg·m ⁻³)	8060	7860
泊松比	0.29	0.30
温度/℃	1030	300
表面发射率	0.25	—
环境温度/℃	20	—
接触导热系数/(W·(m·℃) ⁻¹)	900	—
对流系数/(W·(m·℃) ⁻¹)	20	—
摩擦因数	0.3	—

2 试验结果

2.1 有限元模拟结果及实际成形后的环件

图 2 为两种成形方式成形后的环件的温度及等效应变分布图。可以看出，两种环件的温度与等效应变均在 800 ℃、0.25 以上，且均可顺利成形。斜 I 形环件由于壁厚薄、变形量大，其等效应变和温度与矩形环件存在较大的差异。矩形环件整体的温

度呈外部低、中部高的分布，上下端面处的内外环面位置的温度最低，心部温度最高，约为 1025 ℃，最大温差为 50~60 ℃；而等效应变呈外部大、中部小的分布，环件成形后的整体等效应变大于 0.67，内环面上下端面处的等效应变最大，约为 4。斜 I 形环件轧制后的温度也呈内高外低分布，最低温度位于小端面处，最高温度位于心部，约为 1005 ℃，最大温差约为 200 ℃；而等效应变呈内外环面处较大、其余位置较小的分布，其中大端内环处最大，达到 6 以上，小端内环处最小，在 0.25 以上，但与小端中心处差异较小。对矩形和斜 I 形环件分别进行取点，统计成形后的温度与等效应变的分布情况，取点位置为距上端面 10 mm、中心位置与距下端面 10 mm 处，矩形环件取点为 A₁~A₉，斜 I 形环件取点位置为 B₁~B₉，如图 3a 所示。统计后的温度与等效应变数据分布分别如图 3b 和图 3c 所示，可以看出，斜 I 形环件轧制后温度与等效应变的分布与矩形环件有明显的区别，大端面内环处（B₃）的等效应变明显大于矩形环件，小端面处（B₇、B₈ 和 B₉）的温度和等效应变又都明显小于矩形环件，截面中心位置处差异较小。斜 I 形环件轧制后，其上部与中部区域的温度较为均匀，略低于矩形环件，其下部区域的温度较低，且明显低于矩形环件下部区域。图 4 为实际生产的矩形及斜 I 形环件，可以看出，

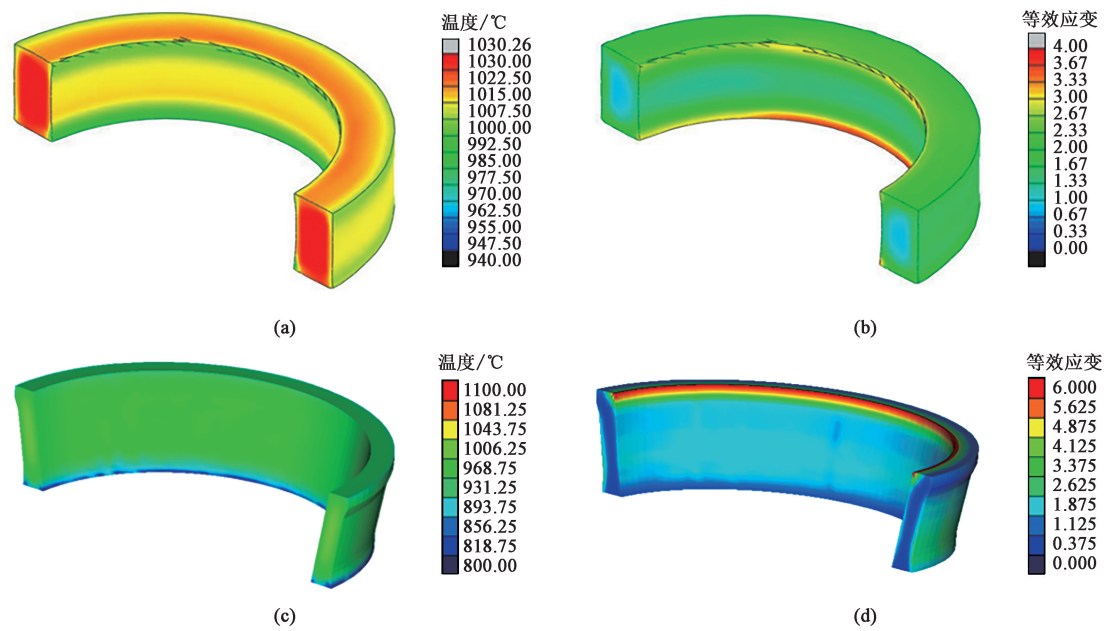


图 2 矩形环件和斜 I 形环件的温度与等效应变分布云图
(a) 矩形环件，温度 (b) 矩形环件，等效应变 (c) 斜 I 形环件，温度 (d) 斜 I 形环件，等效应变
Fig. 2 Temperature and equivalent strain distribution cloud maps of rectangular and oblique I-shaped ring pieces
(a) Temperature for rectangular ring piece (b) Equivalent strain for rectangular ring piece (c) Temperature for oblique I-shaped ring piece
(d) Equivalent strain for oblique I-shaped ring piece

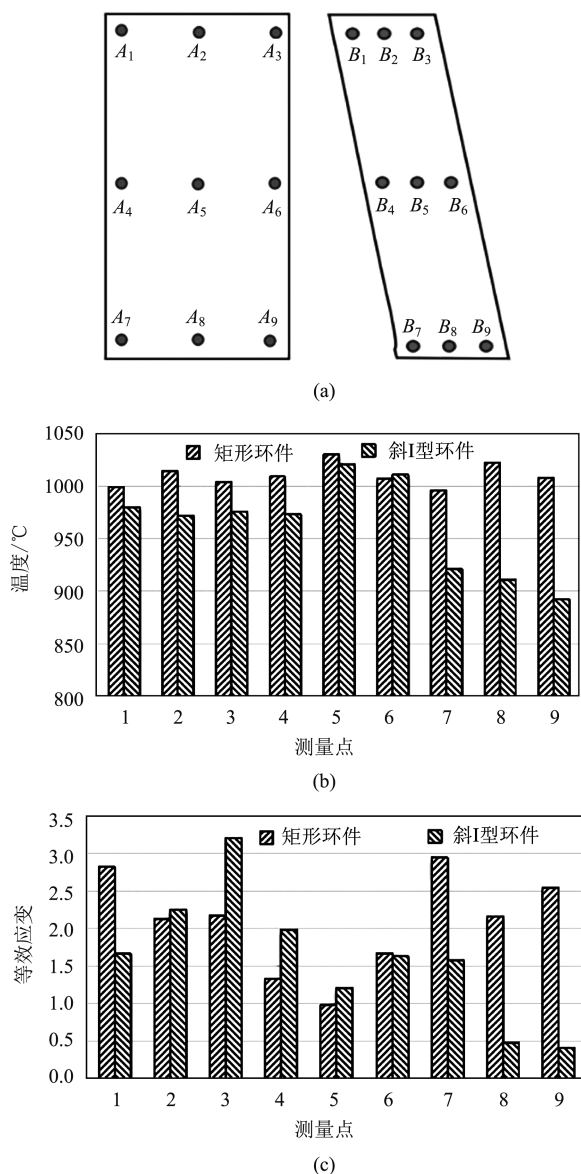


图3 矩形环件与斜I形环件的温度与等效应变分布柱状图

(a) 测量点位置示意图 (b) 温度

(c) 等效应变

Fig. 3 Temperature and equivalent strain distribution bar graphs of rectangular and oblique I-shaped ring pieces

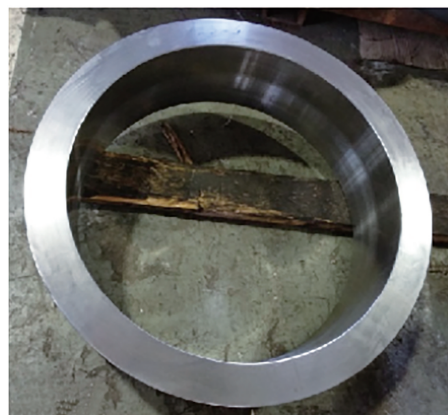
(a) Schematic diagram of measurement point positions

(b) Temperature (c) Equivalent strain

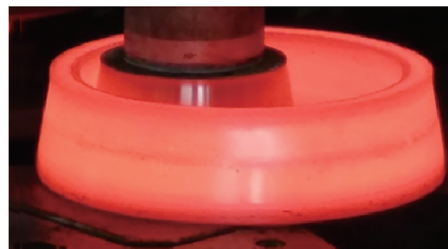
由于斜I形环件的倾斜度较小,故无攀升、剪切等缺陷,证明有限元模型设计合理,可通过轧制成形斜I形环件。

2.2 不同轧制成形方式对晶粒形貌的影响

图5为轧制成形后矩形和斜I形环件的组织试样取样位置示意图,图6为图5中对应取样位置的晶粒形貌观察结果。可以看出,矩形环件与斜I形环件成形后均为均匀的等轴晶组织。通过 Image-Pro Plus 6.0 软件进行晶粒尺寸统计,得到矩形环件上



(a)



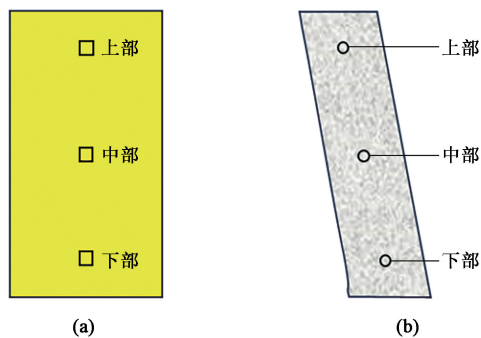
(b)

图4 实际轧制成形的 GH4706 高温合金环件

(a) 矩形环件 (b) 斜I形环件

Fig. 4 Actual rolling ring pieces of superalloy GH4706

(a) Rectangular ring piece (b) Oblique I-shaped ring piece



(a)

(b)

图5 GH4706 高温合金环件的取样位置示意图

(a) 矩形环件 (b) 斜I形环件

Fig. 5 Schematic diagrams of sampling positions for superalloy GH4706 ring pieces

(a) Rectangular ring piece (b) Oblique I-shaped ring piece

部、中部和下部的平均晶粒尺寸分别为 66.8、62.4 及 67.1 μm ; 斜I形环件上部、中部、下部的平均晶粒尺寸分别为 68.4、68.5 及 66.7 μm , 晶粒度均为 5 级 (5 级晶粒度尺寸为 63.5 μm 左右^[12])。可以看出,两种环件的显微组织不存在明显差异。这是因为: GH4706 高温合金发生动态再结晶的临界温度 T_{DRX} 与临界应变 ε_{DRX} 分别为 975 $^{\circ}\text{C}$ 、0.25, 且

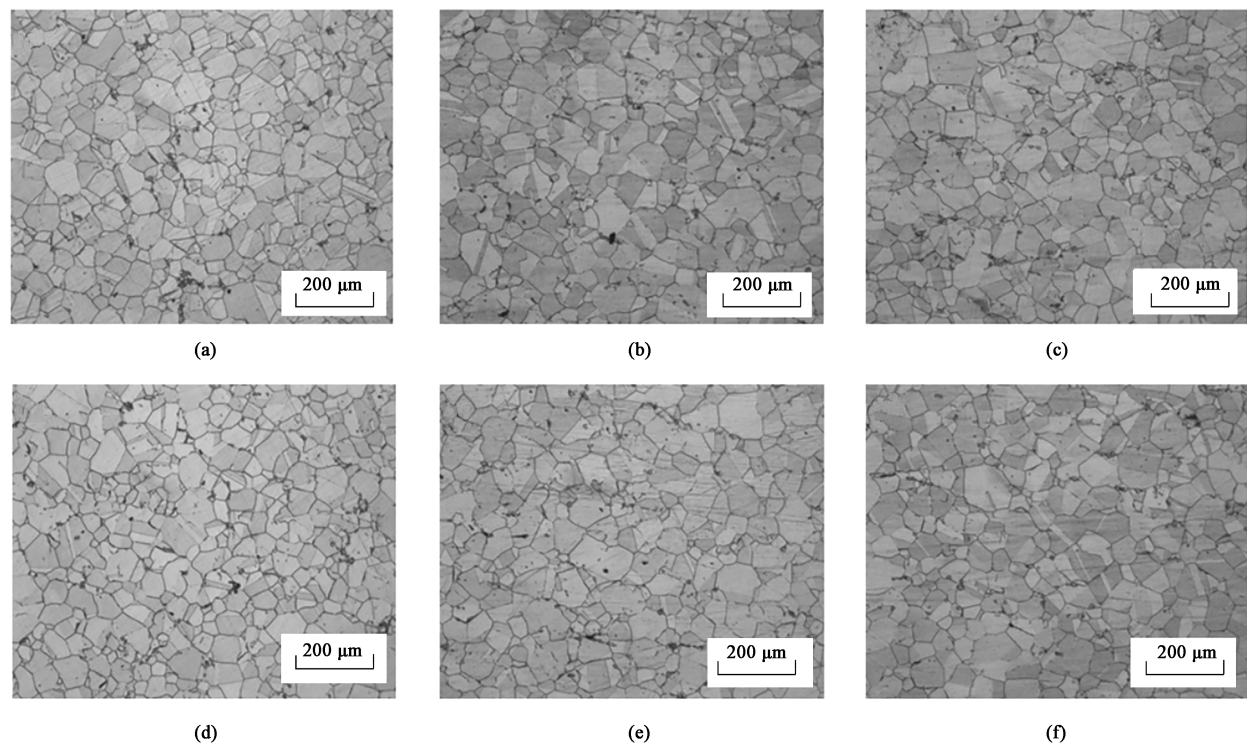


图 6 GH4706 高温合金矩形环件和斜 I 形环件不同取样位置的晶粒形貌

(a) 矩形环件上部 (b) 矩形环件中部 (c) 矩形环件下部
(d) 斜 I 形环件上部 (e) 斜 I 形环件中部 (f) 斜 I 形环件下部

Fig. 6 Grain morphologies at different sampling positions of rectangular and oblique I-shaped ring pieces for superalloy GH4706

(a) Upper part of rectangular ring piece (b) Middle part of rectangular ring piece (c) Lower part of rectangular ring piece
(d) Upper part of oblique I-shaped ring piece (e) Middle part of oblique I-shaped ring piece (f) Lower part of oblique I-shaped ring piece

当变形温度高于 T_{DRX} 时, GH4706 高温合金热处理后的晶粒尺寸仅与变形温度有关, 与变形量无关, 而本试验中矩形环件与斜 I 形环件的心部温度均高于此温度, 因此均发生了动态再结晶^[13]。

2.3 不同轧制成形方式对力学性能的影响

表 3 为成形后两种环件在室温及 650 ℃ 下的拉伸性能对比, 拉伸试样均取自环件心部。可以看出, 矩形环件和斜 I 形环件的力学性能均满足要求, 且两

种轧制方式成形环件的强度基本一致, 其中成形后的斜 I 形环件的抗拉强度、屈服强度和断面收缩率均略高于矩形环件。表 4 为 GH4706 高温合金矩形环件与斜 I 形环件的持久和蠕变性能。可以看出, 两种轧制成形后的环件其持久性能与蠕变性能均满

表 4 两种方式成形后环件的持久及蠕变性能

Table 4 Stress rupture and creep properties of ring pieces formed by two different methods

表 3 两种方式成形后环件的力学性能					
Table 3 Mechanical properties of ring pieces formed by two different methods					
温度/ ℃	环件类型	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	断面收缩 率/%
25	矩形	1272	1042	22.5	21.5
	斜 I 形	1297	1061	23.0	24.0
	文献[14]要求	≥1140	≥895	≥12	≥15
	矩形	989	865	28.0	46.3
650	斜 I 形	1002	881	28.5	49.0
	文献[14]要求	—	—	—	—

性能	环件类型	温度/℃	载荷/MPa	寿命/h	伸长率/%
持久性能	矩形	650	690	38.2	13.5
	斜 I 形	650	690	37.3	16.0
	文献[14]要求	650	690	≥23	≥4
性能	环件类型	温度/℃	载荷/MPa	加载时间/ h	残余伸长 率/%
蠕变性能	矩形	650	750	25	3.848
	斜 I 形	650	750	25	2.374
	文献[14]要求	650	750	25	—
	文献[14]要求	650	750	25	—

足文献 [14] 的性能要求, 差异不显著, 其中斜 I 形环件的蠕变性能略高于矩形环件。由图 2 可知, 成形后的斜 I 形环件心部温度为 1005 ℃, 而矩形环件心部的温度为 1025 ℃, 导致斜 I 形环件的位错密度略高于矩形环件, 因此其性能也高于矩形环件。

3 结论

(1) 通过有限元法对 GH4706 高温合金斜 I 型环件的轧制过程进行模拟分析, 得出的数据准确性较高。然而, 与矩形环件相比, 斜 I 型环件的等效应变分布均匀性较差, 导致其轧制成形的难度也更大。

(2) GH4706 高温合金轧制成形后, 无论是斜 I 形环件还是矩形环件, 其微观结构与力学性能均保持一致, 未观察到显著的区别。因此, 当等效应变不小于 0.25, 采用 1050 ℃ 预轧与 1030 ℃ 终轧的工艺时, 两种成形方式均能够获得均匀的显微组织及合格的性能。

参考文献:

- [1] 彭永辉, 王继红, 吴贵林, 等. GH706 合金固溶处理温度的探索 [J]. 钢铁研究学报, 2003, 15 (Z1): 72-75.
Peng Y H, Wang J H, Wu G L, et al. Exploration of solution temperature of superalloy GH706 [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2003, 15 (Z1): 72-75.
- [2] 阙志, 吴贵林, 于腾, 等. GH4706 合金超大尺寸棒材冶炼及加工工艺研究 [A]. 第十三届中国高温合金年会论文集 [C]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
Kan Z, Wu G L, Yu T, et al. The research of smelting and forging craftwork of GH4706 alloy big diameter bar [A]. Proceedings of the 13th China High Temperature Alloy Annual Conference [C]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.
- [3] 黄烁, 赵光普, 王磊, 等. 微量元素 P、B 对 GH4706 合金力学性能的影响 [A]. 第十三届中国高温合金年会论文集 [C]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
Huang S, Zhao G P, Wang L, et al. Effect of minor elements P and B on the mechanical properties of GH4706 alloy [A]. Proceedings of the 13th China High Temperature Alloy Annual Conference [C]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.
- [4] 华林, 黄兴高, 朱春冬. 环件轧制理论和技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
Hua L, Huang X G, Zhu C D. Ring Rolling Theory and Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [5] Zambrano-Robledo P, Salinas-Rodriguez A, Almeraya C F. Proceedings of the Symposium of Aeronautical and Aerospace Processes, Materials and Industrial Applications [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2018.
- [6] 江河, 何方有, 许亮, 等. 高温合金环形件环轧工艺研究进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50 (5): 1860-1866.
Jang H, He F Y, Xu L, et al. Research progress on ring rolling technology of superalloy ring forging [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50 (5): 1860-1866.
- [7] Hua L, Deng J D, Qian D S. Recent development of ring rolling theory and technique [J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2017, 54 (1-3): 65-87.
- [8] 魏志坚. GH4169 和 TC4 合金环件胀形技术基础研究及应用 [D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
Wei Z J. Fundamentals of Bulging Process and Its Application for GH4169 and TC4 Alloy Rings [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [9] 洪意飞. 异形环件轧制成形的材料流动与表面缺陷控制技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
Hong Y F. Research on Material Flow and Surface Defect Control Technology in Rolling Forming of Profile Ring [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [10] 马义伟, 王志宏, 刘东, 等. GH4169 合金异形环件轧制过程的最优主辊转速 [J]. 航空学报, 2011, 32 (8): 1555-1562.
Ma Y W, Wang Z H, Liu D, et al. Optimization of rotational speed of main roll in profile ring rolling of GH4169 alloy [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32 (8): 1555-1562.
- [11] 彭剑冰, 边丽虹, 杨艳慧, 等. GH706 合金流变曲线特性及本构关系 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (20): 1-5.
Peng J B, Bian L H, Yang Y H, et al. Characteristics of flow curves and constitutive relationship of GH706 alloy [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (20): 1-5.
- [12] GB/T 6394—2017, 金属平均晶粒度测定方法 [S].
GB/T 6394—2017, Determination of estimating the average grain size of metal [S].
- [13] 黄烁, 王磊, 张北江, 等. GH4706 合金的动态再结晶与晶粒控制 [J]. 材料研究学报, 2014, 28 (5): 362-370.
Huang S, Wang L, Zhang B J, et al. Dynamic recrystallization behavior and grain size control of GH4706 superalloy [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2014, 28 (5): 362-370.
- [14] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 第 2 卷: 变形高温合金 铸造高温合金 [M]. 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2002.
Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook. China Aeronautical Materials Handbook-Volume 2: Wrought Superalloy and Cast Superalloy [M]. 2th Edition. Beijing: Standards Press of China, 2002.