

对击锤与液压机锻造 GH4169 盘件组织与性能分析

李昌永¹, 黄钧崴², 周涛³, 王建国², 秦卫东⁴, 谭志刚¹, 刘东², 石永召²

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043;

2. 西北工业大学 材料学院, 西安 710072; 3. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110043,

4. 陕西宏远航空锻造有限责任公司, 陕西 咸阳 713801)

摘要: 目的 揭示在对击锤与液压机模锻工艺下盘件的组织与性能差异, 为锻造工艺选择和指导生产实践提供理论依据。方法 采用数值模拟方法, 对 GH4169 涡轮盘在 63TM 对击锤和 200MN 等温锻压机上的成形过程进行对比分析, 通过对不同工艺制备的 GH4169 合金经直接时效后进行组织形貌观察和力学性能测试, 探究对击锤模锻与液压机等温模锻 GH4169 合金盘件的组织与性能差异。结果 2 种工艺下盘件的等效应变分布差异不大, 但液压机成形盘件的温度比锤锻高, 且温度分布的均匀性略优; 对击锤模锻的 GH4169 合金内留存高密度位错, 有效促进 γ "相形核, 沉淀强化相的增多使其具有更高的抗拉和屈服强度。结论 与液压机锻造相比, 锤锻 GH4169 合金盘件具有更好的综合性能。

关键词: GH4169 涡轮盘; 数值模拟; 对击锤; 等温锻压机; 组织性能差异

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.01.022

中图分类号: TG316.3 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2023)01-0182-08

Differences in Microstructure and Properties of GH4169 Discs Forged by Counter-blow Hammer and Hydraulic Press

LI Chang-yong¹, HUANG Jun-wei², ZHOU Tao³, WANG Jian-guo², QIN Wei-dong⁴,
TAN Zhi-gang¹, LIU Dong², SHI Yong-zhao²

(1. AECC Shenyang Liming Aero Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China; 2. Department of Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110043, China; 4. Shaanxi Hongyuan Aviation Forging Company Ltd., Shannxi Xianyang 713801, China)

ABSTRACT: The work aims to study the differences in the organization and properties of discs forged by counter-blow ham-

收稿日期: 2022-08-02

Received: 2022-08-02

基金项目: 国家自然科学基金 (52101052); 重庆市自然科学基金 (cstc2020jcyj-msxmX0046)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52101052); Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2020jcyj-msxmX0046)

作者简介: 李昌永 (1983—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为航空发动机关键构件塑性成形。

Biography: LI Chang-yong (1983-), Male, Senior engineer, Research focus: plastic forming of key components of aero-engine.

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

Corresponding author: WANG Jian-guo (1987-), Male, Doctor, Assistant researcher, Research focus: plastic forming and control.

引文格式: 李昌永, 黄钧崴, 周涛, 等. 对击锤与液压机锻造 GH4169 盘件组织与性能分析[J]. 精密成形工程, 2023, 15(1): 182-189.

LI Chang-yong, HUANG Jun-wei, ZHOU Tao, et al. differences in microstructure and properties of GH4169 discs forged by counter-blow hammer and hydraulic press[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(1): 182-189.

mer and hydraulic press, so as to provide theoretical foundation for selection of forging process and guidance of production. Numerical simulations were used to compare and analyze the forming process of GH4169 turbine discs on 63TM counter-blow hammer and 200MN isothermal forging press, and the differences in the organization and properties of GH4169 alloy discs prepared by different processes were investigated by observing the tissue morphology and mechanical properties after direct aging of GH4169 alloy prepared by different processes and by isothermal die forging GH4169 discs on counter-blow hammer and hydraulic press. It was found that the differences in the distribution of the isothermal transformation between the two discs were not significant, but the temperature of the hydraulically formed discs was higher than that of the hammer forging, and the uniformity of the temperature distribution was slightly better. The high density of dislocations in the hammer die-forged GH4169 alloy effectively promoted the nucleation of the γ phase, and the increase of the precipitation strengthening phase made the hammer-forged GH4169 alloy have a higher overall performance than the hydraulic forging alloy. Compared with those forged by hydraulic press, GH4169 alloy discs prepared by hammer have better overall properties.

KEY WORDS: GH4169 turbine disk; numerical simulation; counter-blow hammer; isothermal forging press; differences in microstructure and properties

GH4169 合金 (Inconel 718) 是一种沉淀强化型镍基变形高温合金, 以 γ 奥氏体为基体, 以体心四方的亚稳相 γ' (Ni_3Nb) 为主强化相, δ 相为稳定相^[1-3]。因其组织稳定, 并具有良好的高温强度和优异的抗疲劳抗蠕变性能, 被广泛应用于航空发动机和工业燃气轮机的涡轮叶片、导向叶片、涡轮盘和燃烧室等零部件^[4-5]。其中, 作为航空用发动机的核心部件, 涡轮盘工作时需承受热应力的叠加及复杂的机械应力作用, 工作条件极其恶劣。因此, 对涡轮盘的抗蠕变能力、持久和疲劳性能的要求十分严苛^[6-7]。由于 GH4169 合金在锻造时具有变形抗力大、可锻温度范围窄和热加工塑性差等特性, 且涡轮盘锻件的主要热处理制度为冷处理, 即热处理温度低于合金的静态再结晶温度, 因而应用热处理工艺无法调控合金锻件的微观组织^[8]。这就意味着涡轮盘的锻造工艺对锻件的组织与性能起决定性作用, 锻造工艺的控制极为重要。

田素贵等^[9]通过对等温锻造和热连轧工艺制备的 GH4169 合金进行蠕变性能测试和组织形貌观察发现, 与等温锻造相比, 热连轧合金中的高密度位错具有形变强化作用, 可提高合金的蠕变抗力。孔永华等^[10]发现, 与传统自由锻、快锻技术相比, 径锻 GH4169 合金具有更高的综合性能。径锻 GH4169 合金晶粒显著细化, 不同部位的晶粒度、 δ 相级别差异更小, 且边缘部位几乎不存在冷变形组织。孙伟^[11]应用数值模拟探究了近等温锻工艺参数对高温合金组织和性能的影响规律, 发现在相同变形和应变速率下, 晶粒度级别随变形温度升高而下降; 在变形温度及变形量相同时, 应变速率小的试样晶粒度级别较高, 但应变

速率大的试样性能稍好。尽管有关锻造工艺对合金组织与性能的影响已有较多研究, 但针对现有塑性成形设备中工作速度相差最大的对击锤和液压机的比较研究并无文献报道。对击锤锻造作为传统锻造工艺, 其结构简单、适用性好且成形性好, 被广泛应用于锻造行业中, 但其难以制备组织均匀的合金^[12]。液压机具有下压速度慢、可控制性强和噪音小等优点而成为越来越重要的模锻设备^[13]。目前, 国内涡轮盘生产设备主要是液压机和対击锤, 比较这 2 种设备模锻盘件的热力参数分布情况及组织与性能的差异, 对锻件质量控制与生产工艺优化均具有指导意义。以 GH4169 涡轮盘为研究对象, 借助有限元模拟软件, 模拟涡轮盘在 63TM 对击锤和 200MN 等温压机上的全工艺成形过程, 分析和对比 GH4169 涡轮盘在相同成形工艺、不同模锻设备上整个变形过程中的温度、应变和变形规律。将经对击锤与液压机模锻的 GH4169 合金盘件进行直接时效处理, 并对其进行显微组织观察和性能测试, 以期能够揭示 2 种锻造工艺下盘件的组织与性能差异。

1 实验

1.1 材料

实验材料为 GH4169 合金锻态棒材 (来自抚顺特殊钢股份有限公司), 主要化学成分见表 1, 显微组织见图 1。其晶粒分布均匀, 应用 Image-Pro Plus 软件统计的晶粒平均尺寸为 $46\text{ }\mu\text{m}$, 为 ASTM E112 (美国材料与试验学会标准) 6 级。

表 1 GH4169 合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of GH4169 alloy

Element	C	Cr	Mo	Nb	Ti	Al	Ni	Fe	Co	S	P	B
Content/wt. %	0.042	18.72	3.09	5.20	1.00	0.52	53.16	Bal.	0.01	0.002	0.006	0.002

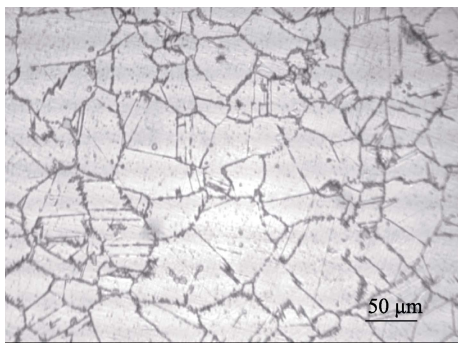


图 1 GH4169 合金原始组织

Fig.1 Microstructure of GH4169 alloy as received

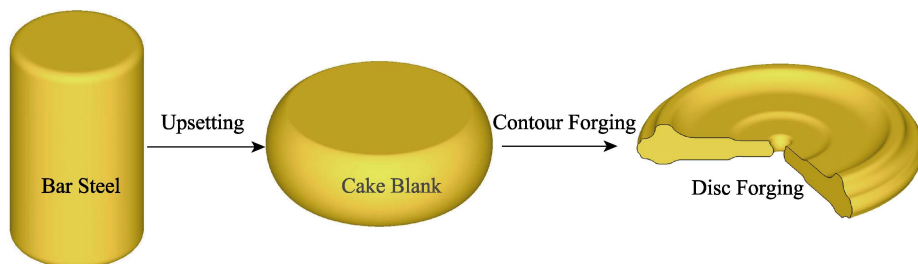


图 2 GH4169 盘件成形过程

Fig.2 Forming process of GH4169 discs

表 2 有限元模拟参数设置
Tab.2 Finite element simulation parameters

Parameter	Workpiece	Mold
Material	GH4146	5CrNiMo
Density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	8 240	7 860
Poisson's ratio	0.29	0.3
Forging Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	990	300
Press down speed/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)		10 or Energy control
Coefficient of thermal emissivity		0.25
Ambient temperature/ $^{\circ}\text{C}$		20
Thermal conductivity/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)		2 000
Convection coefficient/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)		20
Coefficient of friction		0.3

1.3 组织性能检测

GH4169 合金盘件模锻完成后立即水冷,经双时效热处理(720 $^{\circ}\text{C}$ 保温 8 h,经 55 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 炉冷至 620 $^{\circ}\text{C}$ 、保温 8 h 后空冷)后,分别对锻件试样进行显微组织观察和性能测试,所取试样在锻件上的位置见图 3,取样尺寸均为 15 mm×15 mm×15 mm 的正方体。GH4169 合金的热处理加热实验在陶瓷纤维热处理炉中进行,设备来自陕西国豪炉业科技有限公司。

1.2 方法

棒材在 1 010 $^{\circ}\text{C}$ 下经液压机墩粗成饼坯,饼坯加热后经转运 35 s 后分别在 63TM 对击锤和 200MN 等温锻压机上完成模锻,锻造温度均为 990 $^{\circ}\text{C}$,设备均来自天津市天锻压力机有限公司,其成形过程见图 2。对击锤成形过程分为 35 锤次打击成形,打击能量设置分别为 1~5 锤次 20%,6~30 锤次 50%,31~35 锤次 70%;液压机模锻采用恒速 8 mm/s 成形。同时,采用 Deform 有限元仿真软件对盘锻件成形过程进行模拟,模拟参数设置见表 2。

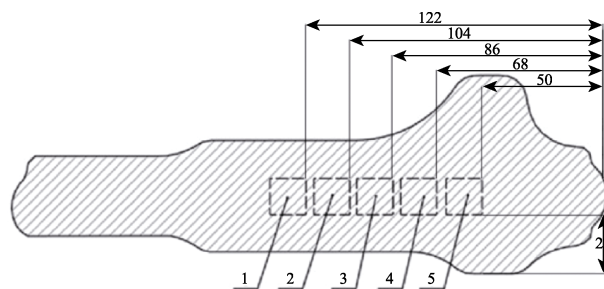


图 3 GH4169 锻件的取样位置(单位:mm)

Fig.3 Sampling location of GH4169 forgings

2 结果与分析

2.1 热力参数分布规律对比

对击锤和液压机等 2 种设备模锻盘件在终锻结束时的热力参数分布见图 4—5。盘锻件在 63TM 对击锤上成形总用时 116 s,最终锻件等效应变范围为 0.373~2.41,温度范围为 923~1 030 $^{\circ}\text{C}$ 。盘锻件在 200 MN 等温锻压机上成形总用时为 10 s。最终锻件等效应变范围为 0.302~2.25,温度范围为 813~1 040 $^{\circ}\text{C}$ 。

由图 4 可知,2 种盘锻件的等效应变分布差异不大,小变形区域均在轮缘外层,轮毂区域为变形较大区域。由图 5 可知,对击锤模锻的盘件温度主要集中在 990~1 010 $^{\circ}\text{C}$,液压机模锻的盘件温度主要集中在 1 010~1 030 $^{\circ}\text{C}$ 。可见,相较于液压机模锻,对击锤模锻盘件成形结束后,锻件的整体温度更低,这是因

为锤击的间隙较大,总变形时间较长,导致整体的温降更为明显。另外,2种成形方式下的锻件温度分布规律也略有不同。液压机模锻因模具一直与坯料接触,锻件低温区连续分布在工件的上下表面,高温区贯穿于盘锻件辐板的整个带状区域。而对击锤成形盘件的轮缘外层为低温区,辐板中心区域温度较高。总体来看,液压机成形的盘件温度分布均匀性略优于对击锤。

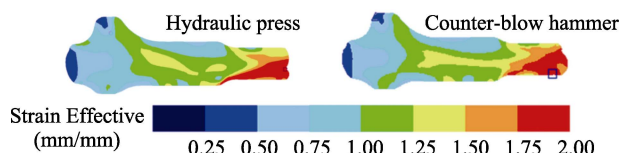


图 4 终锻时刻盘锻件的等效应变分布云图

Fig.4 Equivalent strain distribution pattern of disc forgings at final forging

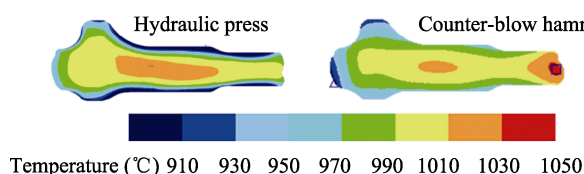


图 5 终锻时刻盘锻件的温度分布云图

Fig.5 Temperature distribution pattern of disc forgings at final forging

2.2 热力参数演变规律对比

为了更加准确直观地反映整个锻造过程的特点,选取锻件轴截面 5 个典型位置作为研究点(图 3),对 5 个关键点进行应变和温度追踪。不同模锻工艺的应变变化对比曲线见图 6。由图 6 可知,各位置的等效应变均自变形开始从零开始增加。其中,液压机模锻盘件中各选取点的应变均呈线性增长,应变增长速率基本保持不变,经过 10 s 变形结束后达到最高应变 1.2;对击锤模锻盘件中各选取点的应变呈阶梯增长,在变形结束 116 s 时达到 1.35 的最大应变。并且在模锻后期,等效应变虽依旧升高,但速度不断减慢,逐渐趋于稳定。这是由于对击锤是在快速冲击下使坯料成形,锻件中的等效应变是瞬间增加的,而成形后期随着锻件的整体变形抗力增加,变形越来越困难,因此随着变形的进行,等效应变增加越来越缓慢。对于液压机模锻来说,坯料是在缓慢的静压力下成形,即使变形抗力在后期大大增加,但还远远达不到设备的吨位,变形依然会继续进行,因此液压机上的盘锻件在成形过程中应变持续增加。

不同模锻工艺下温度变化对比曲线见图 7,可以看出,总体上盘件在 2 种设备的成形过程中温度变化规律差异很大。液压机模锻的盘件,其心部温度随着模锻的进行不断上升,经 10 s 成形完成后,各点温度达 1 005~1 013 °C,温度的增长速率基本保持不变。

对击锤模锻的盘件,其心部的温度随着模锻的进行,在 0~20 s 时缓慢上升,在 20~72 s 时快速升温至 1 032 °C,达到锻件成形全过程中选取点的最高温度,随后温度不断降低,在 116 s 结束成形时温度降至 1 015~1 008 °C。同时,无论是对击锤还是液压机模锻的盘件,各选取点的温度在前期均随着变形的进行不断升高,这是由于选取点都位于锻件心部区域,而心部作为大变形区域,在变形中产生大量热能来不及散发,这些热量集聚在锻件内部,造成温度的不断上升。特别是对击锤的工作间隙时间长,锻件在大应变速率下产生的温升难以抵消由于锤击间隙大、变形时间长产生的温降,因此锤上锻造后期温度会不断下降。

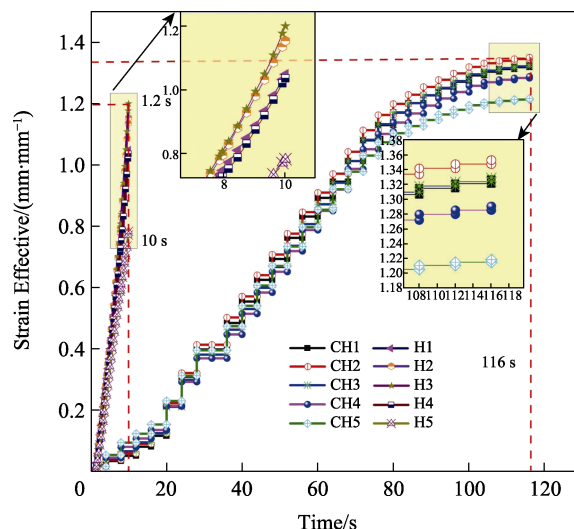


图 6 不同模锻工艺应变变化对比

(H1—H5 为液压机、CH1—CH5 为对击锤)

Fig.6 Contrast curves of strain changes under different die forging processes (H1-H5: hydraulic press, CH1-CH5: counter-blow hammer)

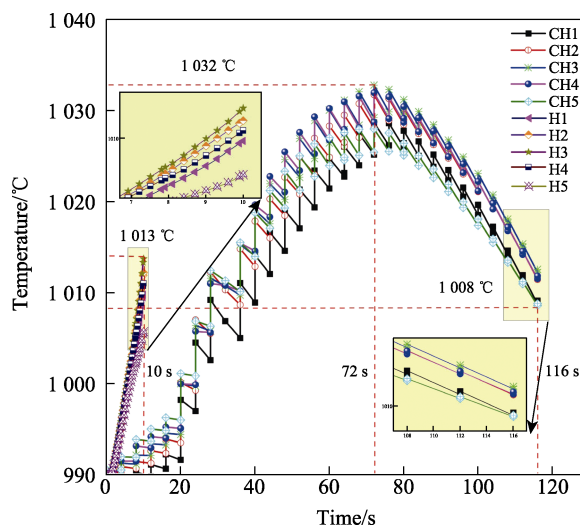


图 7 不同模锻工艺温度变化对比

(H1—H5 为液压机、CH1—CH5 为对击锤)

Fig.7 Contrast curves of temperature changes under different die forging processes (H1-H5: hydraulic press, CH1-CH5: counter-blow hammer)

2.3 组织与性能对比

不同设备制备的合金经直接时效后其中心区域显微组织见图8。由图8可知,应用液压机模锻的盘件,其中心区域的晶粒尺寸较对击锤模锻的盘件略大,2种工艺盘件整体的晶粒度均匀性都较好。由图9可知,经直接时效处理后合金中均弥散析出了一定量的 γ' 相,但相较于液压机模锻合金,对击锤模锻合金析出的 γ' 相尺寸更小、数量更多。

GH4169合金盘锻件的拉伸性能见表3,可以看出,2种工艺下制备的盘锻件力学性能均合格,但不同设备锻造的盘件拉伸性能差异明显。相较于液压机模锻,对击锤模锻的盘件明显具有更优异的拉伸性能,其在室温和高温时抗拉和屈服强度都较高,只是室温下的塑性略差。其中,采用对击锤模锻的盘件室温抗拉和屈服强度均有提升,增长幅度分别为4.5%和7%左右,塑性有所降低,伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 分别降低了5.2%和7%;同时高温抗拉和屈服强度分别提高了4.4%和10%左右,高温塑性相当。可见,锻造制备工艺极大地影响着盘锻件的强度。与液压机锻造相比,应用对击锤对盘件进行模锻,可显著提高锻件的强度。

由GH4169合金盘锻件的持久和蠕变性能(表4)可知,2种工艺下盘锻件的蠕变性能有所差异,而持

久性能基本一致。液压机和对击锤模锻的GH4169盘件经双时效处理后在650℃、700MPa条件下的持久寿命相差1h,分别为72.5、73.5h,对击锤锻造的盘件持久性能稍好。2种工艺制备的合金在时效温度595℃、恒定应力825MPa条件下,持续25h的塑性变形量都小于0.2%,均满足该锻件技术标准要求。其中,液压机与对击锤锻造的盘件残余变形分别为0.069%、0.054%。可见,采用对击锤锻造,盘件成形后的残余变形降低0.015%,降低幅度达27%左右,蠕变性能有所提升。

2.4 讨论

GH4169合金的组织与性能对热变形过程中工艺参数的变化极其敏感,加工过程控制不当,会直接影响合金的蠕变、持久和缺口敏感性等性能^[14]。锻造作为合金组织与性能的主要控制手段,不同的锻造工艺会导致合金的晶粒大小及沉淀强化相的形貌、含量和分布均有不同程度的差异^[15]。实验结果表明,2种锻造工艺制备合金经直接时效后晶粒尺寸相差不大,但相较于液压机锻造,对击锤模锻的盘锻件其抗拉及屈服强度都显著提高,蠕变性能也更优。因此,忽略晶粒大小对合金性能的影响,主要从合金析出相方面分析对击锤与液压机锻造对盘锻件性能的影响。

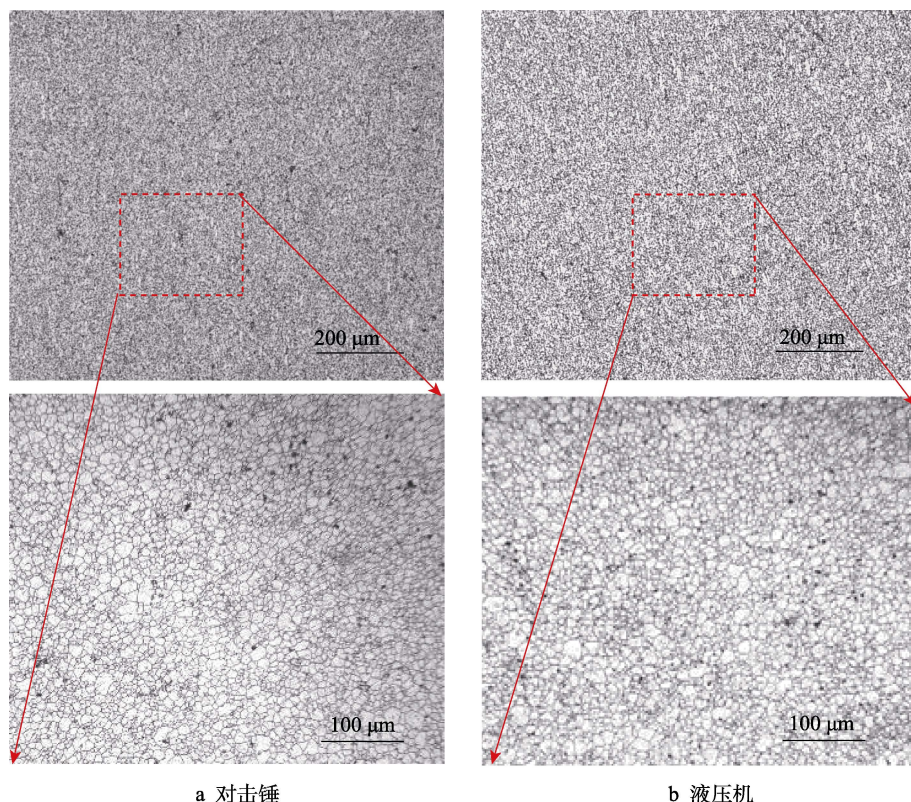


图8 不同模锻工艺制备GH4169合金直接时效后显微组织

Fig.8 Microstructure of GH4169 alloy prepared by different die forging processes after direct aging:
a) counter-blow hammer; b) hydraulic press

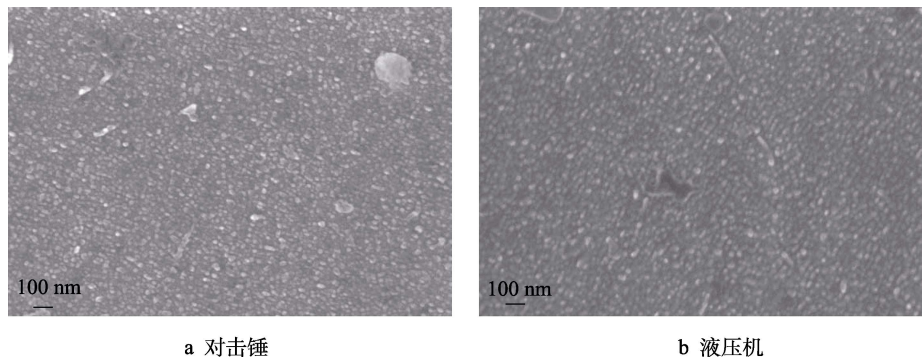


图 9 不同模锻工艺制备 GH4169 合金直接时效后强化相形貌
Fig.9 Strengthening phase morphology of GH4169 alloy prepared by different die forging processes after direct aging:
a) counter-blow hammer; b) hydraulic press

表 3 GH4169 合金盘锻件拉伸性能
Tab.3 Tensile properties of GH4169 alloy forgings

Temperature	Forming method	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%	Surface shrinkage/%
25 ℃	hydraulic press	1 502.8	1 318.6	19.8	33.5
	counterblow hammer	1 571.5	1 411.5	14.6	26.5
	requirement	≥1 450	≥1 240	≥10	≥15
650 ℃	hydraulic press	1 260.2	1 117.8	25.7	55.8
	counterblow hammer	1 316	1235.5	25.5	55.5
	requirement	≥1 170	≥1 000	≥12	≥15

表 4 GH4169 合金盘锻件持久及蠕变性能
Tab.4 Endurance and creep properties of GH4169 alloy disc forgings

Forming method	Durable performance (650 ℃、700 MPa)		Creep performance (595 ℃、825 MPa)	
	Life/h	Elongation/%	Loading time /h	Residual deformation /%
Hydraulic press	72.5	24	25	0.069
Counterblow hammer	73.5	23	25	0.054

现有塑性成形设备的工作速度相差很大,工件的应变速率也必然不同。对击锤的应变速率较高,等温模锻压力机锻造的应变速率最低^[16]。有限元软件模拟结果也说明 2 种设备生产的同一种锻件,变形过程的温度场、应变场均有差别,特别是流动应力的差异很大。这说明 GH4169 合金在高温塑性变形过程中,其变形温度和应变速率显著影响合金的宏观场量与微观组织。奥罗万方程表明,位错的积累速度与位错的平均自由程呈反比,而与应变速率成正比^[17]。因此,锤上锻件和液压机锻件在变形过程中加工硬化产生的位错密度相差很大。锤上模锻的盘锻件在加工硬化阶段位错大量增殖,动态回复与动态再结晶消耗的位错又不足以抵消加工硬化产生的位错^[18],因而变形结束后,应用对击锤锻造的 GH4169 盘件具有更高的位错密度,宏观上表现为变形抗力增加。变形完成后直接进行双时效处理,盘锻件因没有经过高温固溶处理,故其保留了模锻时产生的一定量的位错密度。保留的一定量位错为 γ'' 相形核提供了充足能量,降低了 γ'' 相形核析出时因共格畸变所产生的应力,有效促进

了 γ'' 相形核^[19]。因此,对击锤盘锻件经直接时效后,弥散析出的 γ'' 相数量较液压机模锻的盘件更多(图 9a),而 γ'' 相作为 GH4169 合金中的主要沉淀强化相,其对屈服强度的贡献最大^[20],合金的强度随着主要强化相数量的增加而显著提高^[21],致使室温和高温屈服强度呈现近似规律,即对击锤盘锻件的屈服和抗拉强度相较于液压机有较大提升。实验结果中对击锤模锻盘件的塑性较液压机有所下降,可能是由于在较大的应变速率下,合金没有足够的时间进行回复和再结晶,软化过程不充分所致。

与液压机模锻的合金相比,锤上模锻的变形特点是合金内部存在高密度位错。有研究表明^[22],GH4169 合金在蠕变期间的变形机制是位错滑移和李晶变形。因此,采用对击锤模锻的合金内部留存的高密度位错,一方面可增加李晶变形的阻力;另一方面,可以促使李晶内位错多取向滑移的发生,因形变产生的应力集中进而可以得到一定的协调和释放。另外,形变强化作用随着李晶及位错密度的提高会进一步增强。因此,锤锻 GH4169 合金盘件的蠕变性能相对更好。

在对击锤模锻变形过程中(图7),盘锻件在20~72 s时快速升温至1 032 ℃,且较于液压机模锻,锤上锻造变形时间较长。而有研究^[23-24]表明, δ 相在980 ℃开始溶解,1 020 ℃可完全溶解,析出温度为780~980 ℃,析出峰值温度为940 ℃,这就造成采用对击锤锻造的盘件在变形过程中处于 δ 相溶解温度的时间较长,使合金中 δ 相含量减少,增加了奥氏体 γ 基体相中固溶强化元素Nb的含量^[25],导致在时效过程中 γ' 强化相的析出量增多,从而进一步提高了合金强度。

3 结语

以GH4169涡轮盘为研究对象,借助有限元模拟软件对涡轮盘在对击锤和液压机上锻造的变形过程进行探究,分析了不同模锻设备下盘锻件的热力参数差异。并将经模锻后的合金进行直接时效处理,对比分析了其组织和性能,揭示了2种锻造工艺对涡轮盘组织与性能的影响。

1) 成形结束后,2种工艺盘件的等效应变分布差异不大,液压机锻造盘件的温度与锤锻相比较高,且盘件温度分布的均匀性略优。

2) 在成形全过程中,液压机模锻盘件心部区域的应变和温度均随变形的进行呈线性增长;对击锤模锻盘件的应变随变形进行呈阶梯增长,在变形后期应变增长速率不断减慢至趋于稳定;其温度先缓慢升高再快速升温至最高温度后开始降低。

3) 与液压机锻造相比,锤锻GH4169合金盘件在成形过程中应变速率大,合金中留存高密度位错,有效促进了 γ' 相形核,终锻时刻合金内部析出的 γ' 相含量增多。

4) 经直接时效后,锤锻GH4169合金盘件性能更优异,具有更高的抗拉和屈服强度,蠕变性能也相对更好。

参考文献:

- [1] THOMAS A, EL-WAHABI M, BRERA J M, et al. High Temperature Deformation of Inconel 718[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177(1/2/3): 469-472.
- [2] LI R B, YAO M, LIU W C, et al. Isolation and Determination for δ , γ' and γ'' Phases in Inconel 718 Alloy[J]. Scripta Materialia, 2002, 46(9): 635-638.
- [3] 杜金辉, 吕旭东, 邓群, 等. GH4169合金研制进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31(12): 12-20.
DU Jin-hui, LYU XU-dong, DENG Qun, et al. Progress in GH4169 Alloy Development[J]. Materials China, 2012, 31(12): 12-20.
- [4] 师昌绪, 仲增墉. 中国高温合金40年[J]. 金属学报, 1997(1): 1-8.
- SHI Chang-xu, ZHONG Zeng-yong. Forty Years of Superalloy R & D in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997(1): 1-8.
- [5] 王会阳, 安云岐, 李承宇, 等. 镍基高温合金材料的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(2): 482-486.
WANG Hui-yang, AN Yun-qi, LI Cheng-yu, et al. Research Progress of Ni-based Superalloys[J]. Materials Reports, 2011, 25(2): 482-486.
- [6] 国为民, 冯涤, 张凤戈, 等. 盘件用FGH95镍基粉末高温合金[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(3): 30-34.
GUO Wei-ming, FENG Di, ZHANG Feng-ge, et al. Nickle-Base PM Superalloy FGH95 for Discs[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2002, 14(3): 30-34.
- [7] 孙兼, 邹金文, 刘培英. 盘件用粉末高温合金的研究与发展[J]. 航空工程与维修, 2001(1): 28-30.
SUN Jian, ZOU Jin-wen, LIU Pei-ying. Research and Development of Powder Superalloy for Disk Parts [J]. Aeronautical Engineering and Maintenance, 2001(1): 28-30.
- [8] WILKINSON N A. Forging of 718: The Importance of T.M.P[C]// Superalloys. 1989: 119-133.
- [9] 田素贵, 李振荣, 赵中刚, 等. 制备工艺对GH4169合金组织结构与蠕变行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(9): 1651-1656.
TIAN Su-gui, LI Zhen-rong, ZHAO Zhong-gang, et al. Influence of Deformation Technology on Microstructure and Creep Behavior of GH4169 Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(9): 1651-1656.
- [10] 孔永华, 胡华斌, 李龙, 等. GH4169合金不同锻造工艺的组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(S2): 225-228.
KONG Yong-hua, HU Hua-bin, LI Long, et al. Microstructure and Properties of GH4169 Alloy under Different Forging Processes [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S2): 225-228.
- [11] 孙伟. 近等温锻造工艺参数对GH4169合金晶粒度及性能影响规律研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007: 23-47.
SUN Wei. The Research of Influence Law of Near-Isothermal Forging Processing Parameter on Grain Size and Mechanical Behavior of GH4169 Alloy[D]. Northwestern Polytechnical University, 2007: 23-47.
- [12] 金泉林, 刘晓飞. 高温合金锤锻工艺的数值模拟与优化[J]. 航空工程与维修, 2001(3): 25-27.
JIN Quan-lin, LIU Xiao-fei. Numerical Simulation and Optimization of Hammer Forging Process for Superalloy [J]. Aeronautical Engineering and Maintenance, 2001 (3): 25-27.
- [13] SHIRGAOKAR M. Presses and Hammers for Cold and Hot Forging[M]. America: ASM International, 2005: 115-140.
- [14] 庄景云, 杜金辉, 邓群. GH4169合金及其锻件晶粒形貌的特点[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(s1): 44-48.
ZHUANG Jing-yun, DU Jin-hui, DENG Qun. Characteristics of Grain Morphology of GH4169 Alloy and Its Forgings [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2003,

- 15(S1): 44-48.
- [15] 王春光, 王东哲, 万红, 等. 锻造及热处理工艺对 GH4169 合金组织与性能的影响[J]. 锻压技术, 2014(12): 14-18.
WANG Chun-guang, WANG Dong-zhe, WAN Hong, et al. Influence of Forging and Heat Treatment on Structure and Property of GH4169 Alloy[J]. Forging & Stamping Technology, 2014(12): 14-18.
- [16] 李建军, 黄茂林, 彭谦之, 等. 锻造技术的发展现状及趋势[J]. 热处理技术与装备, 2015, 36(3): 57-62.
LI Jian-jun, HUANG Mao-lin, PENG Qian-zhi, et al. Development Status and Trend of Forging Technology[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2015, 36(3): 57-62.
- [17] FISK M, ION J C, LINDGREN L E. Flow Stress Model for IN718 Accounting for Evolution of Strengthening Precipitates During Thermal Treatment[J]. Computational Materials Science, 2014, 82: 531-539.
- [18] 顾青. GH4169 机匣环锻件制坯工艺及强化机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019: 45-47.
GU Qing. Research on Aero-Engine Case Ring Pre-forming and Strengthening Mechanism of GH4169 [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019: 45-47.
- [19] KIRMAN I, WARRINGTON D H. The Precipitation of Ni_3Nb Phases in a Ni-Fe-Cr-Nb Alloy[J]. Metallurgical Transactions, 1970, 1(10): 2667-2675.
- [20] 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 Traceelement Carbon on Properties of GH4169 Alloy[J]. Forging & Stamping Technology, 2019, 44(12): 153-158.
- [21] 谢锡善, 董建新, 付书红, 等. γ'' 和 γ' 相强化的 Ni-Fe 基高温合金 GH4169 的研究与发展[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1289-1302.
XIE Xi-shan, DONG Jian-xin, FU Shu-hong, et al. Research and Development of γ'' and γ' Strengthened Ni-Fe-based Superalloy GH4169[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(11): 1289-1302.
- [22] 刘臣, 田素贵, 王欣, 等. 一种 GH4169 镍基合金的组织结构与蠕变性能[J]. 材料工程, 2017, 45(6): 43-48.
LIU Chen, TIAN Su-gui, WANG Xin, et al. Microstructure and Creep Property of GH4169 Nickel-base Superalloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(6): 43-48.
- [23] 申佳林, 韦贤毅, 徐平伟, 等. δ 相对 GH4169 合金强韧性的影响规律[J]. 稀有金属材料与工程, 2019(5): 1467-1475.
SHEN Jia-lin, WEI Xian-yi, XU Ping-wei, et al. Influence of δ on Strength and Toughness of GH4169 Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019(5): 1467-1475.
- [24] 王建国, 刘东, 王海平, 等. GH4169 合金晶界 δ 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. Kinetic Analysis of δ Phase Precipitation in Grain Boundary of GH4169 Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(4): 1148-1154.
- [25] 张程, 王哲, 李博, 等. GH4169 合金中影响 γ'' 相析出的因素分析[J]. 北华航天工业学院学报, 2016(26): 10-13.
ZHANG Cheng, WANG Zhe, LI Bo, et al. Analysis of Factors Affecting γ'' Phase Precipitation in GH4169 Alloy [J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2016(26): 10-13.