



变形参数对 GH500 高温合金热变形行为的影响

伏浩, 王旻石, 代朋超

(宝武特种冶金有限公司技术中心, 上海 200940)

摘要: 采用 Thermecmaster-Z 热模拟试验机, 设置不同变形温度、应变速率等参数进行热压缩试验, 结合应力应变曲线和金相组织进行分析, 系统研究 GH500 高温合金高温热变形行为及组织形貌演变规律。结果表明: 应力应变曲线呈现出加工硬化、动态回复和动态再结晶特点, 应力随变形温度的降低和应变速率的升高显著增加。应变速率为 1 s^{-1} , 随着变形温度的提升, 合金的微观组织由变形晶粒加细小团簇的晶粒演变成完全再结晶晶粒。当变形温度 $\geq 1130\text{ }^{\circ}\text{C}$, 随着应变速率的提升, 合金的动态再结晶晶粒体积分数及尺寸明显增加。变形温度 $1180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率 1 s^{-1} , 合金动态再结晶充分, 无变形晶粒, 晶粒细小均匀。根据热压缩试验得到的应力应变曲线和组织演变规律, 摸索出合适的模锻工艺, 加热温度 $1130\sim 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压下速度 $10\sim 15\text{ mm/s}$, 锻造过程应变速率为 $0.04\sim 0.06\text{ s}^{-1}$, 生产出的合金圆饼晶粒基本均匀, 合金圆饼经标准热处理后室温拉伸、硬度及高温持久性能满足标准要求。

关键词: 变形温度; 应变速率; 动态再结晶; 微观组织

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2024-00270 **中图分类号:** TG141

Effect of Deformation Parameters on Thermomechanical Behaviour of GH500 Superalloy

Fu Hao, Wang Minshi, Dai Pengchao

(Technology Center, Baowu Special Metallurgy Co., Ltd., Shanghai 200940, China)

Abstract: Different parameters such as deformation temperature and deformation rate were set for thermal compression tests, using the Thermecmaster-Z thermal simulation testing machine. The stress-strain curves and metallographic structures were analyzed to systematically study the high-temperature thermal deformation behavior and morphological evolution of the GH500 superalloy. The results showed that the stress-strain curves exhibited characteristics of work hardening, dynamic recovery, and dynamic recrystallization, with stress significantly increasing as the deformation temperature decreased and the deformation rate increased. At a deformation rate of 1 s^{-1} , as the deformation temperature increased, the microstructure of the alloy evolved from deformed grains and small clusters of grains into fully recrystallized grains. When the deformation temperature was $\geq 1130\text{ }^{\circ}\text{C}$, the volume fraction and size of the dynamic recrystallized grains of the alloy significantly increased with the rise in deformation rate. At a deformation temperature of $1180\text{ }^{\circ}\text{C}$ and a deformation rate of 1 s^{-1} , the alloy underwent complete dynamic recrystallization with no deformed grains, resulting in fine and uniform grains. Based on the stress-strain curves and microstructural evolution obtained from hot compression tests, suitable forging processes have been explored. The heating temperature was set between $1130\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the reduction speed was 10 mm/s to 15 mm/s with the deformation rate between 0.04 s^{-1} and 0.06 s^{-1} during the forging process. The produced alloy disc exhibit a basically uniform grain structure. After standard heat treatment, the room temperature tensile strength, hardness, and high-temperature durability of alloy disc meet the standard requirements.

Key Words: Deformation Temperature; Deformation Rate; Dynamic Recrystallization; Microstructure

高温合金是以铁、钴、镍为基体的奥氏体金属材料, 一般使用温度在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 能够承受复杂应力且具有表面稳定性^[1-2]。因其高合金化特点, 在国外又被称之为超合金 (Superalloy)^[3]。高温合金主要应用于航空发动机和燃气轮机的部件制备, 如涡轮盘、高压压气机盘、燃烧室、叶片等^[4]。随着现代飞机的推重比要求越来越高, 作为核心动力发动机热端部件的使用温度也在不断提高、工况更加恶劣, 相应的涡轮盘、高压压气机盘用高温合金的高

温性能要求也越来越高^[5-6]。为了满足发动机的使用要求, 高温合金的合金化程度也越来越高, 但是高合金化是一把双刃剑, 在带来优异高温性能的同时也会对组织调控和热变形带来不利^[7-9]。

GH500 合金是一种铸、锻两用的 Ni-Cr-Co 基高温合金, 该合金加入 Mo 元素进行固溶强化, 加入 Al、Ti、Nb 元素进行时效强化, 加入 B、Zr 元素进行晶界强化。GH500 高温合金具有优异的高温热强性能、良好的抗腐蚀性能及长期使用组织稳定性, 使

用温度小于 870 °C,主要用于制备某型发动机 I、II 级涡轮盘、自由涡轮盘等高温热端部件。GH500 合金化程度较高 (Al+Ti 之和高达 6.0%), γ' 相含量约 33~36%,对棒材制备及模锻带来不利的影响,主要表现在热加工温度范围窄、热塑性差等方面。因此,有必要对 GH500 高温合金的热加工性能进行研究,以热压缩试验为基础,研究变形温度、变形量、应变速率对合金变形抗力、热塑性及显微组织影响,为热加工过程工艺优化提供支撑。

1 试验材料及方法

试验材料是宝武特冶采用真空感应炉(公称容量 1 t)冶炼 $\phi 290$ mm 电极棒+真空自耗冶炼 $\phi 355$ mm 自耗锭,合金成分见表 1,自耗锭经快锻+径锻制成棒材,在成品棒材切取加工热压缩试样, $\phi 8$ mm \times 12 mm。在 Thermocaster-Z 热模拟试验机上进行热压缩试验。将压缩试样以 20 °C/s 升温至 1 200 °C 保温 5 min,确保加热后试样组织趋于一致,以降低原始组织差异对热压缩实验的影响。在 1 200 °C 保温 5 min 结束后,将试样以 20 °C/s 降温至目标温度保温 3 min,目标温度设置为 1 070、1 090、1 110、1 130、1 150、1 180 °C,以 0.01、0.1、1 s⁻¹ 应变速率进行热压缩,压缩变形量为 50%,压缩后空冷至室温。

表 1 GH500 高温合金的主要化学成分(质量分数)

Table 1 The main compositions of GH500 superalloy%					
C	Al	Ti	Cr	Co	Mo
0.02~0.10	2.80~3.20	2.80~3.25	18.1~19.5	16.0~19.0	3.10~4.50

经 Thermecmaster-Z 压缩后的试样呈现出鼓型,沿纵向进行线切割,将试样打磨抛光后,采用盐酸(30 mL)+酒精(30 mL)+双氧水(3 mL)腐蚀剂进行腐蚀,金相试样纵剖面如图 1 所示。

2 试验结果

2.1 变形温度对热压缩应力-应变曲线影响

以压缩速率设定为 1 s⁻¹ 为例,试样以不同的变形温度进行热压缩,其应力应变曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看出,流变应力随变形温度的升高呈现下降趋势。当变形温度为 1 070 °C,热压缩过程中流变应力快速达到峰值为 269 MPa,然后呈现快速下降趋势。当变形温度提高至 1 090 °C,热压缩过程中流变应力快速达到峰值为 220 MPa,然后呈现缓慢下降趋势。当变形温度达到 1

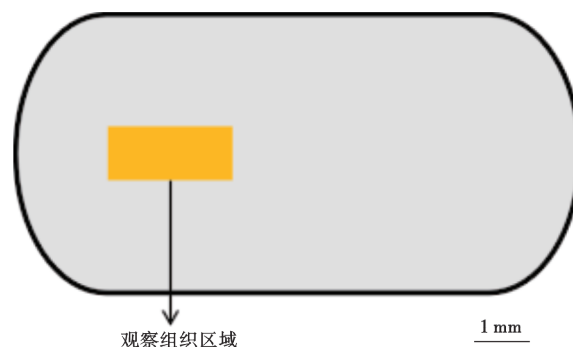


图 1 GH500 合金热压缩后合金的金相试样纵剖面

Fig. 1 GH500 alloy longitudinal section of metallographic sample after hot compression alloy

110 °C 和 1 130 °C,两者的峰值应力为 203、202 MPa。当变形温度进一步提高 1 150 °C 和 1 180 °C,流变应力峰值下降至 169 MPa 和 159 MPa。

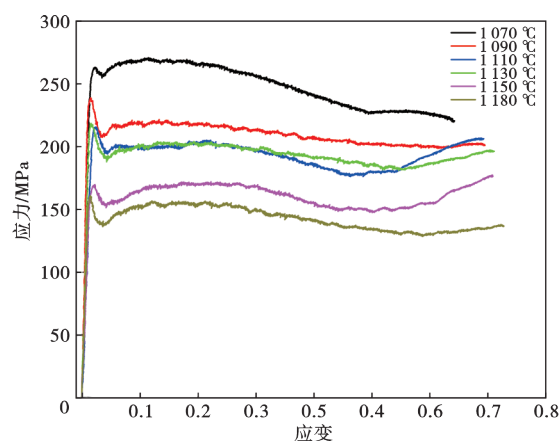


图 2 GH500 合金 1 s⁻¹ 应变速率不同变形温度的热压缩应力-应变曲线

Fig. 2 GH500 alloy stress-strain curve hot compression at different deformation temperature under 1 s⁻¹ deformation rate

为了进一步研究同一应变速率不同变形温度下应力差异,需对热变形的试样进行组织观察,寻找组织演变规律。图 3 中可以看出,当变形温度为 1 070 °C 时,试样中存在明显的未再结晶晶粒和细小团簇的再结晶晶粒,随着变形温度升高至 1 090~1 150 °C,试样中依然存在少量未再结晶晶粒,再结晶晶粒有明显长大趋势,再结晶晶粒体积分数增加,说明再结晶越充分,其对应的峰值应力也越小。当变形温度进一步升高至 1 180 °C,试样中显微组织呈现出完全再结晶特点,再结晶晶粒均匀,峰值应力达到最低。

2.2 应变速率对热压缩应力-应变曲线影响

在热压缩过程中,除了变形温度,应变速率也

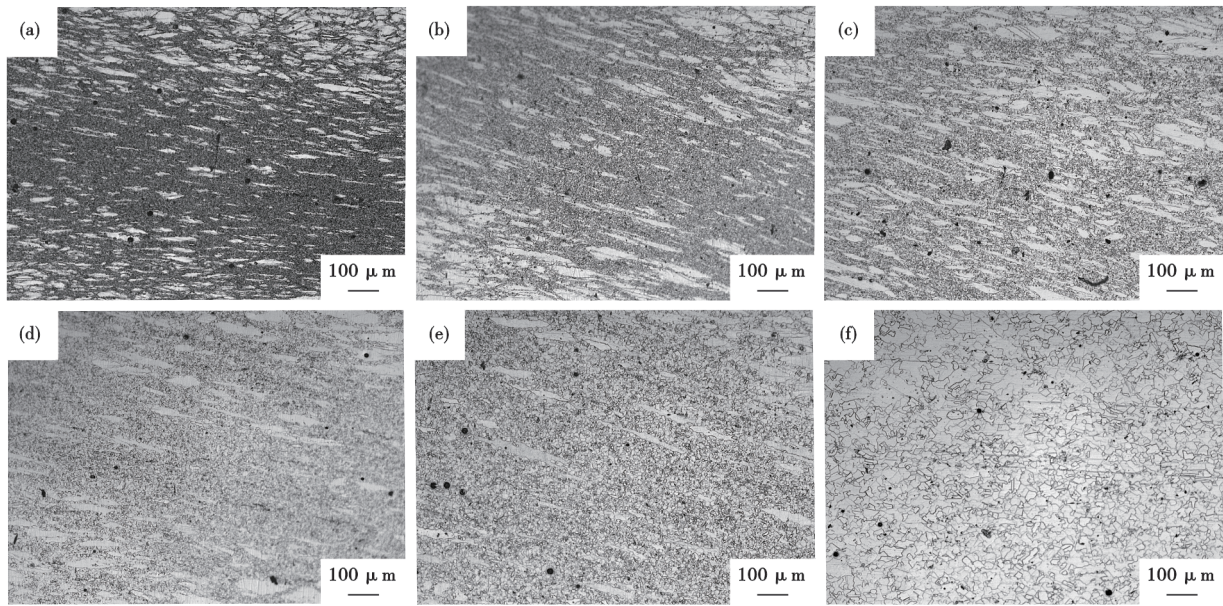


图3 GH500合金 1 s^{-1} 不同变形温度热压缩金相组织:(a)1070 °C, (b)1090 °C, (c)1110 °C, (d)1130 °C, (e)1150 °C, (f)1180 °C

Fig. 3 GH500 alloy metallographic structure hot compression at different temperature under 1 s^{-1} , (a)1070 °C, (b)1090 °C, (c)1110 °C, (d)1130 °C, (e)1150 °C, (f)1180 °C

会对合金的动态再结晶和组织演变产生重大影响。以变形温度 1130、1150、1180 °C 为例,其流动应力-应变曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出,当变形温度为 1130 °C,当应变速率 0.01 s^{-1} 时其峰值应力为 103 MPa,当应变速率 0.1 s^{-1} 时,其峰值应力 142 MPa,当应变速率 1 s^{-1} 时,其峰值应力 216 MPa;当变形温度升高至 1150、1180 °C,应力变化趋势相同。上述数据表明,应变速率提高,热压缩过程中的峰值应力增加明显,在应变末期,部分应力-应变曲线出现翘头现象。

1130、1150、1180 °C 变形温度下不同应变速率金相组织如图 5 所示。从图 5 中可以看出,在同一变形温度下随着应变速率增加,试样中的再结晶晶

粒体积分数明显增加,动态再结晶过程更充分,再结晶晶粒尺寸均匀有明显长大趋势。

3 分析讨论

从应力-应变曲线的变化趋势来看,基本分为三个阶段。第一阶段,在热压缩过程中应力快速增加,后逐步缓慢升高至峰值应力,其应力对应的应变小于 0.1,此阶段称之为加工硬化阶段。在此阶段,位错大量塞积,加工硬化效果明显。随着应变增加,合金内部产生动态软化,即动态回复和动态再结晶,加工硬化与动态软化相互作用使得流变应力会缓慢升高至峰值应力。第二阶段为应力下降阶段,合金内部的位错密度降低,动态软化作用明显。第三阶段,随着应变增加,原先已经完成再结晶的

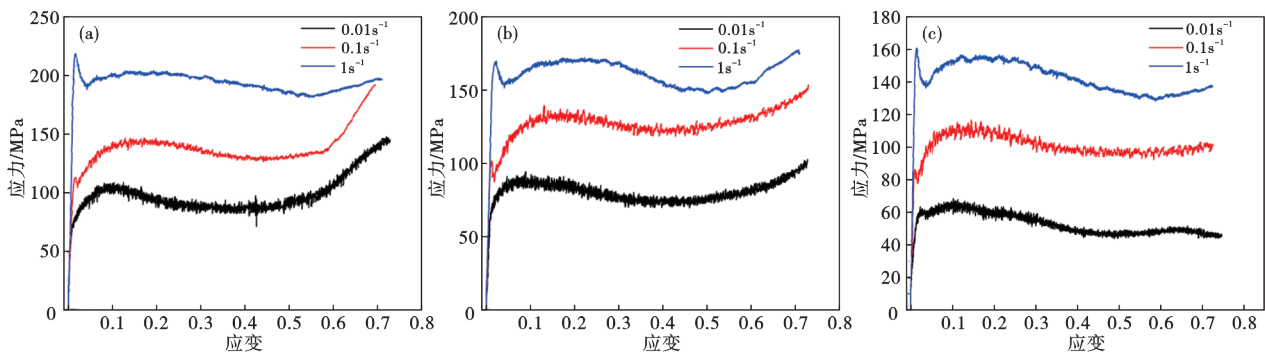


图4 GH500合金不同应变速率的热压缩应力-应变曲线:(a)1130 °C, (b)1150 °C, (c)1180 °C

Fig. 4 GH500 alloy stress-strain curves of hot compression at different deformation rates : (a)1130 °C, (b)1150 °C, (c)1180 °C

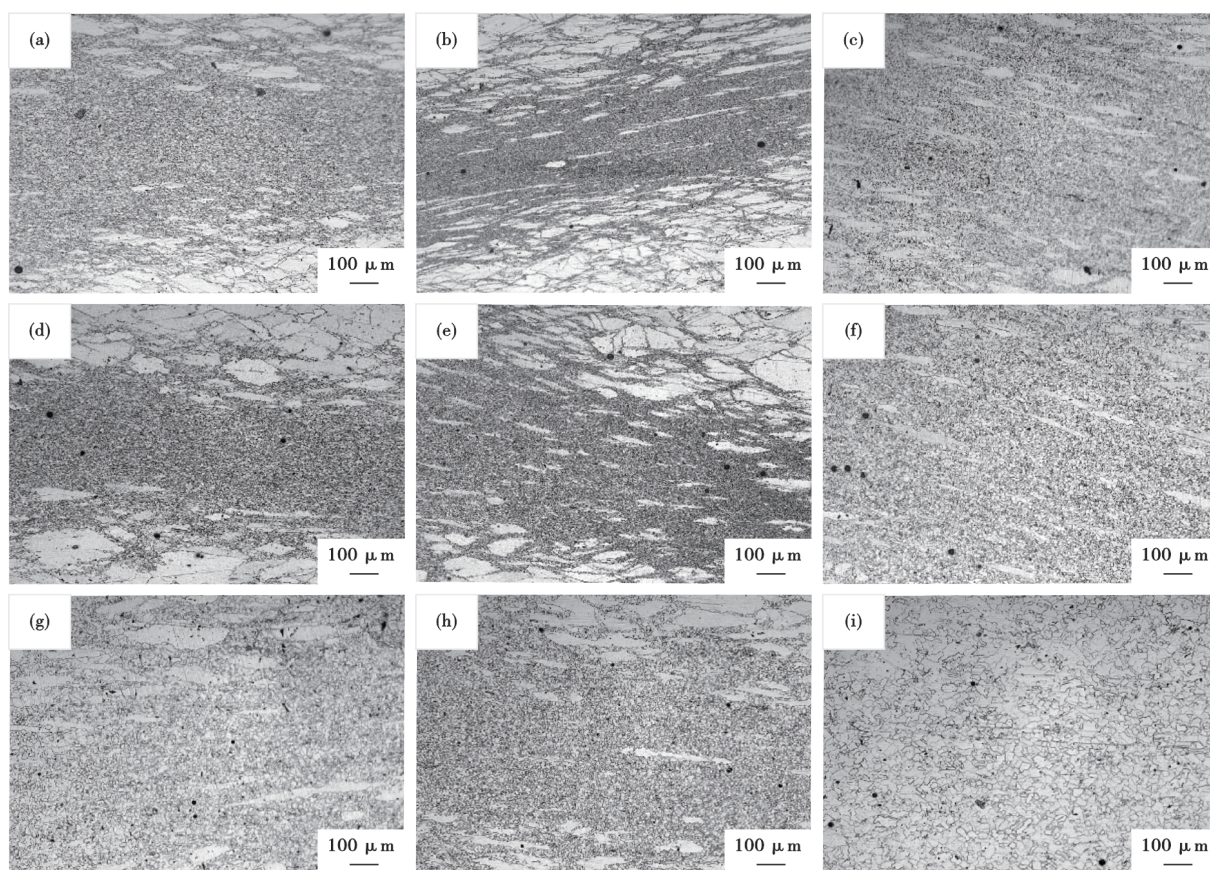


图5 GH500合金不同应变速率热压缩金相组织, (a)1 130 °C、0.01 s⁻¹, (b)1 130 °C、0.1 s⁻¹, (c)1 130 °C、1 s⁻¹, (d)1 150 °C、0.01 s⁻¹, (e)1 150 °C、0.1 s⁻¹, (f)1 150 °C、1 s⁻¹, (g)1 180 °C、0.01 s⁻¹, (h)1 180 °C、0.1 s⁻¹, (i)1 180 °C、1 s⁻¹

Fig. 5 GH500 alloy metallographic structure hot compression at different deformation rates, (a)1 130 °C, 0.01 s⁻¹, (b)1 130 °C, 0.1 s⁻¹, (c)1 130 °C, 1 s⁻¹, (d)1 150 °C, 0.01 s⁻¹, (e)1 150 °C, 0.1 s⁻¹, (f)1 150 °C, 1 s⁻¹, (g)1 180 °C, 0.01 s⁻¹, (h)1 180 °C, 0.1 s⁻¹, (i)1 180 °C, 1 s⁻¹

晶粒产生二次变形,导致位错密度再次显著增加,加工硬化随之得到强化,当两者相互作用达到动态平衡,应力应变曲线会趋于平稳;当再结晶晶粒二次变形产生的加工硬化强于动态软化,应力应变曲线出现翘头现象^[10-11]。

根据应力应变曲线可知,合金在热压缩中的流变应力受变形温度和应变速率两个因素影响。合金的热变形是一个热激活过程,在此过程中原子会产生热振动,原子热振动的程度与变形温度的高低有很大关联。随着变形温度提高,合金中的变形储能增加,原子热振动更剧烈,动态回复和再结晶更加充分,使得流变应力相应降低。

在变形温度不变的情况下,应变速率越低,动态再结晶时间越充分,整体动态软化效果明显,流变应力明显下降。当应变速率提升,合金发生塑性变形的时间越短,导致动态软化作用滞后于加工硬化作用,流变应力也相应增加^[12]。但从金相组织

图可以看出,当变形温度 $\geq 1\ 130\ ^\circ\text{C}$ 以上,应变速率为1 s⁻¹,合金的动态再结晶晶粒明显长大,基本均匀,变形晶粒较少,合金的动态再结晶效果明显。结合本试验的热压缩应力应变曲线和金相组织图,合金在变形温度1 180 °C、应变速率1 s⁻¹时,动态再结晶程度最高。

4 对工业生产指导

上述热压缩试验的结果是在实验室中理想的环境下取得的,在实际工业大生产过程中, GH500高温合金热加工过程会受现实环境诸多因素影响。因此根据试验结果并结合现场实际影响因素,制定合理的加热温度和应变速率,得到较为理想的显微组织。根据现场的加热炉及模锻压机实际情况,经多批次生产最终摸索出合适的模锻工艺。现场生产的模锻压机吨位2000T,压下速度0.02~200 mm/s。当加热温度在1 130~1 150 °C,保温时间 $\geq 2\ \text{h}$,坯料迅速从加热炉转移至压机,时间控制在30 s以内,避

免转移时间过长导致坯料表面温度迅速下降;模具预先加热至 300~400 °C,压机压下速率控制在 10~15 mm/s,坯料高度 240 mm,圆饼高度 85 mm,锻造过程应变速率为 0.04~0.06 s⁻¹,在实际生产过程中应变速率超过 0.1 s⁻¹圆饼表面易产生开裂;坯料上下端面覆盖保温棉,模锻出的圆饼晶粒基本均匀,如图 6 所示。圆饼经标准热处理:(1 120±10)°C×2 h,空冷+(1 080±10)°C×4 h,空冷+(845±5)°C×24 h,空冷+(760±5)°C×16 h,空冷,室温拉伸、维氏硬度及高温持久性能满足标准要求,分别见表 2、表 3。

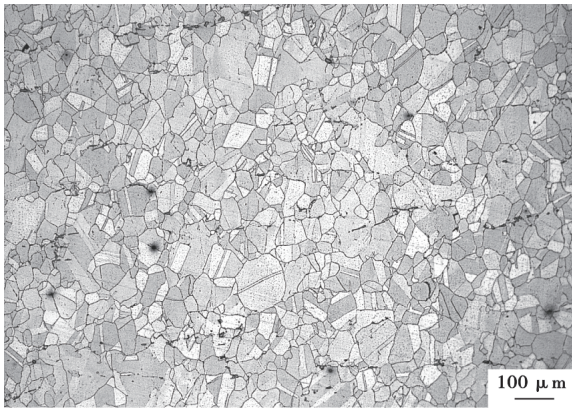


图 6 模锻圆饼的锻态组织
Fig. 6 Microstructure of forged disc

5 结论

1)GH500 合金热压缩的应力应变曲线呈现出加工硬化、动态回复和动态再结晶特点,流变应力随着变形温度的降低和应变速率增加而升高。

参考文献

- [1] 王志刚,王立,曹政. Nb在变形高温合金中的作用[J]. 特殊钢, 2023, 44(6):1-7.
- [2] 江河,董建新,张麦仓,等. 800 °C以上服役涡轮盘用难变形镍基高温合金研究进展[J]. 航空制造技术, 2021, 61(1): 62-73.
- [3] 周舸. 镍基高温合金高温变形行为及变形机理研究[D]. 沈阳:东北大学, 2013.
- [4] 谷雨,杨树峰,赵朋,等. 镍基高温合金 GH4738 的凝固偏析和碳化物析出行为[J]. 中国冶金, 2021, 31(7): 13-21.
- [5] Zhao G D, Yu L X, Yang G L, et al. The role of boron in modifying the solidification and microstructure of nickel-base alloy U720Li [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 686: 194-203.
- [6] Jia L, Cui H, Yang S F, et al. As-cast microstructure and homogenization kinetics of a typical hard-to-deform Ni-base superalloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23:

表 2 热处理后 GH500 合金圆饼室温拉伸及硬度

Table 2 Room temperature tensile strength and hardness of GH500 alloy disc after heat treatment

项目	Rm/MPa	Rp0.2/MPa	A/%	Z/%	维氏硬度(HV)
要求	≥1 100	≥750	≥10	-	≥350
试样 1	1 251	840	12	13	453
试样 2	1 246	828	15	12	447
试样 3	1 240	854	14.5	18	459
试样 4	1 253	880	13	13	441
试样 5	1 277	829	14	23	401

表 3 热处理后 GH500 合金圆饼高温持久

Table 3 High-temperature durability of GH500 alloy disc after heat treatment

项目	试验温度/°C	应力/MPa	断裂时间/h	伸长率/%
试样 1	870	215	133.05	25
试样 2			166.30	25
试样 3			154.46	21
试样 4			135.56	15
试样 5			120.71	18
要求			≥50	≥9

2)GH500 合金在变形量为 50% 的热压缩过程中,变形温度为 1 180 °C、应变速率为 1 s⁻¹时,发生完全再结晶行为。

3)以上热压缩试验为依据摸索的工业化模锻工艺即加热温度 1 130~1 150 °C、压机压下速率 10~15 mm/s,锻造过程应变速率为 0.04~0.06 s⁻¹,生产合金圆饼的晶粒度基本均匀,合金圆饼经标准热处理后室温拉伸、硬度及高温持久满足标准要求。

5368-5381.

- [7] 杨树峰,贾雷,鄢宇灿,等. 镍基变形高温合金裂纹形成及控制研究进展[J]. 特殊钢, 2024, 45(4): 13-25.
- [8] 张瑞,刘鹏,崔传勇,等. 国内航空发动机涡轮盘用铸锻难变形高温合金热加工研究现状与展望[J]. 金属学报, 2021, 57(10): 1215-1228.
- [9] 张勇,李鑫旭,韦康,等. 850 °C 涡轮盘用新型变形高温合金 GH4975 挤压棒材热变形规律研究[J]. 金属学报, 2020, 56(10): 1401-1410.
- [10] 杨金龙,马向东,李远,等. 一种新型镍基粉末高温合金不同状态热变形行为[J]. 稀有金属材料与工程, 20, 51(2): 651-660.
- [11] 霍万晨,刘建涛,张明,等. 一种新型镍基粉末高温合金热变形行为研究[J]. 粉末冶金工业, 2021, 31(6): 104-109.
- [12] 王婷婷,秦学智. 一种铁镍基高温合金的热加工性能研究[J]. 宝钢技术, 2020(5): 33-37.