

引用格式: 汪煜, 刘玉峰, 周磊, 等. 热处理冷却方式对 FGH96 粉末高温合金组织和力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2025, 45(4): 77-84.

WANG Yu, LIU Yufeng, ZHOU Lei, et al. Effect of cooling method during heat treatment on microstructure and mechanical properties of FGH96 powder metallurgy superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(4): 77-84.

热处理冷却方式对 FGH96 粉末高温合金 组织和力学性能的影响

汪煜^{1*}, 刘玉峰¹, 周磊¹, 王明礼², 宋晓俊¹, 孔令伟¹, 郑亮¹

(1. 中国航发北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095; 2. 航发优材(镇江)高温合金有限公司, 江苏镇江 212001)

摘要: 热处理是决定粉末高温合金构件性能最重要的热工艺过程, FGH96 合金是当前应用最广泛的镍基粉末高温合金。本工作研究固溶热处理后全过程风冷淬火和风冷+油冷组合淬火两种冷却方式对 FGH96 合金环件毛坯显微组织和力学性能的影响。结果表明: 采用两种冷却方式淬火后 FGH96 合金环件毛坯晶粒度相当, 为 6.5~7 级。采用全过程风冷淬火的环件毛坯二次 γ' 相尺寸分布较为均匀, 而风冷+油冷组合淬火的环件毛坯由于内侧冷却速率较低, 因此二次 γ' 相尺寸较外侧更为粗大且含量较低。淬火后期, 采用全过程风冷淬火的冷却速率低于风冷+油冷组合淬火方式, 晶界处析出尺寸介于二次和三次 γ' 相之间的细小 γ' 相, 晶界强化, 抗拉强度提高, 断后伸长率降低, 68 h 高温蠕变塑性伸长率也较低。由于全过程风冷淬火时环件毛坯各处冷却速率更为均匀, 因此表面残余应力较低且分布更均匀, 这更有利于增强环件零件加工过程的尺寸稳定性。

关键词: 粉末高温合金; 冷却方式; 显微组织; 力学性能; 残余应力

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000105

中图分类号: V252.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)04-0077-08

Effect of cooling method during heat treatment on microstructure and mechanical properties of FGH96 powder metallurgy superalloy

WANG Yu^{1*}, LIU Yufeng¹, ZHOU Lei¹, WANG Mingli², SONG Xiaojun¹,
KONG Lingwei¹, ZHENG Liang¹

(1. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. HFYC(Zhenjiang) Superalloy Co., Ltd., Zhenjiang 212001, Jiangsu, China)

Abstract: Heat treatment is the most critical thermal process determining the properties of powder metallurgy (PM) superalloy components, with FGH96 currently being one of the most prevalent PM Ni-based superalloys. This work investigates the effects of two distinct solution heat treatment cooling methods—full air cooling quenching and combined air-oil cooling quenching—on the microstructure and properties of FGH96 alloy ring parts. The results indicate that both cooling methods yield equivalent grain sizes, ranging from grade 6.5 to 7. Notably, full air-cooled rings exhibit more homogeneous distribution of secondary γ' phase. In contrast, rings subjected to combined air-oil cooling exhibit coarser secondary γ' phases, with reduced quantity on the inner side compared to the outer side, attributable to internally diminished cooling rate. During the later stage of quenching, ring parts undergoing full air cooling experience a slower cooling rate than those using combined air-oil cooling. Furthermore, fine γ' phases, possessing sizes between the secondary and tertiary γ' phases, precipitate along the grain boundaries using full air cooling method,

leading to grain boundary strengthening. This enhances tensile strength but reduces elongation and plastic elongation at 68 h in high-temperature creep tests. Additionally, due to the more uniform cooling rate throughout the ring during full air cooling quenching, the surface residual stress reduces with more uniform distribution, thereby augmenting dimensional stability during subsequent machining processes.

Key words: powder metallurgy superalloy; cooling method; microstructure; mechanical property; residual stress

粉末高温合金具有良好的高温强度、抗蠕变、耐腐蚀等优异性能,广泛应用于先进航空发动机用盘形件和环形件等关键热端部件^[1-3]。航空发动机用环形件结构复杂,壁薄且易变形,在高温、高压和高转速条件下服役,其性能和结构稳定性直接影响发动机服役可靠性^[4-5]。在粉末高温合金环件毛坯制备工艺流程中,热处理决定合金晶粒度、 γ' 相尺寸、形貌、分布及含量等^[6-7],因此为关键工序。其中固溶热处理后冷却过程直接决定 γ' 相析出,进而影响环件力学性能^[8-11]。对于环件毛坯这类大直径薄壁环类制件,由于淬火时冷速较快,易形成残余应力,影响后续机加工以及服役过程环件尺寸稳定性。 γ' 相是粉末高温合金主要强化相,而残余应力控制是大尺寸粉末高温合金环件制备的重要环节^[12-15],因此固溶热处理后冷却过程控制十分重要。

常规的固溶后淬火冷却方式为风冷+油冷组合淬火,风冷获得较低入油温度,降低淬火应力,油冷可形成较大温度梯度,实现制件快速冷却和 γ' 相充分析出^[16-18]。然而随着航空发动机粉末高温合金部件制造水平的提升和绿色制造理念的推广,采用全过程风冷淬火冷却方式已成为国内外粉末高温合金部件制造的关键工艺。目前固溶热处理后冷却方式的相关研究较少,因此有必要针对新型全过程风冷淬火方式进行研究。通过对比分析,揭示新

型全过程风冷淬火方式对合金显微组织和力学性能的影响规律,探索新工艺的应用前景。因此,本工作对比不同淬火方式环件毛坯残余应力水平和分布。

1 实验材料与方法

实验所用材料为第二代损伤容限型 FGH96 粉末高温合金,其化学成分和典型力学性能参照文献[19]。合金的主要制备工艺流程如下:采用真空感应熔炼(vacuum induction melting, VIM)制备 FGH96 母合金,采用氩气雾化(argon gas atomization, AA)法制备合金粉末,经筛分和真空除气后将粉末装入不锈钢包套,包套封焊后经热等静压(hot isostatic pressing, HIP)成形锭坯,锭坯经热挤压(hot extrusion, HEX)获得锻坯,锻坯经等温锻造(hot isostatic forging, HIF)形成细晶盘坯。盘坯加工后形成环件毛坯,并进行固溶+时效热处理,具体热处理工艺见表1。其中固溶热处理是在 γ' 相固溶温度(约 1120 °C)^[20-21]以上加热并保温,使 γ' 相充分回溶,随后分别采用全过程风冷淬火和常规风冷+油冷组合淬火方式对环件毛坯进行淬火,促使析出均匀细小的 γ' 相。固溶热处理后不同冷却方式的环件毛坯均经过 760 °C/16 h 时效热处理,随后炉冷。

表1 FGH96 合金环件毛坯热处理工艺
Table 1 Heat treatment of FGH96 superalloy ring billets

Sample	Solution heat treatment			Aging heat treatment		
	Temperature/°C	Time/h	Quenching method	Temperature/°C	Time/h	Quenching method
1 [#]	1150	2	Full air	760	16	Furnace cooling
2 [#]	1150	2	Combined air-oil	760	16	Furnace cooling

采用全过程风冷淬火方式时,环件毛坯上下周向对称设置3组直径为10 mm的喷管,每组18支,如图1(a)所示。喷管出口风速约为80 m/s,对环件毛坯进行强制换热。环件毛坯以12 r/min的速度旋转,保证各部位冷速均匀。采用常规的风

冷+油冷组合淬火方式时,利用风扇单方向对环件毛坯吹风,如图1(b)所示。风冷过程环件毛坯同样以12 r/min的速度旋转。当环件毛坯温度降低至接近 γ' 相析出温度时入油,使 γ' 相快速形核,析出均匀细小的 γ' 相。

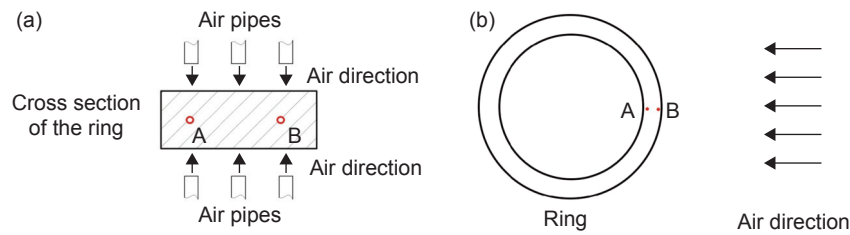


图1 不同淬火方式的风冷过程示意图 (a)全过程风冷淬火; (b)风冷+油冷组合淬火

Fig. 1 Schematic diagrams of the forced-air process using different quenching methods
(a) full air cooling quenching; (b) combined air-oil cooling quenching

选取环件毛坯内侧(图1中标记A)和外侧(图1中标记B)两处位置取样进行显微组织和力学性能分析。利用 LEICA DM8000 M 型光学显微镜对 FGH96 合金环件毛坯进行显微组织观察, 所用试样腐蚀液为 $10\text{ gCuCl}_2+50\text{ mL C}_2\text{H}_5\text{OH}+50\text{ mL HCl}$ 的混合溶液, 腐蚀时间为 90 s , 按 GB/T 6394—2017 进行晶粒度评级。采用 FEI Nova Nano SEM450 型场发射扫描电子显微镜观察 γ' 相形貌, 试样采用电化学法制备, 其中电解抛光试剂为 80% (体积分数, 下同) $\text{CH}_3\text{OH}+20\%\text{HCl}$ 的混合溶液, 电压为 25 V , 时间为 15 s ; 电解腐蚀试剂为 $170\text{ mL H}_3\text{PO}_4+10\text{ mL H}_2\text{SO}_4+15\text{ gCr}_2\text{O}_3$ 的混合溶液, 电压为 5 V , 时间为 $1\sim 3\text{ s}$ 。采用 Instron 5982 型电子万能试验机进行拉伸性能测试, 在 RDL100 型电子蠕变持久试验机进行 $704\text{ }^\circ\text{C}/690\text{ MPa}$ 蠕变

性能测试, 采用 PROTO LXR D 型残余应力测试仪对环件毛坯表面残余应力进行测试。

2 结果与分析

2.1 不同淬火方式的显微组织

2.1.1 晶粒组织

固溶热处理后不同淬火方式制备的 FGH96 合金环件毛坯金相组织如图2所示, 合金微观组织为等轴晶, 采用全过程风冷淬火方式的环件毛坯 A 和 B 处晶粒度等级均为 7 级, 采用风冷+油冷组合淬火方式的环件毛坯 A 和 B 处晶粒度等级分别为 6.5 级和 7 级。可见无论采用全过程风冷淬火还是风冷+油冷组合淬火方式, 环件毛坯晶粒度基本相同, 且各位置晶粒度分布均匀。这是由于 FGH96

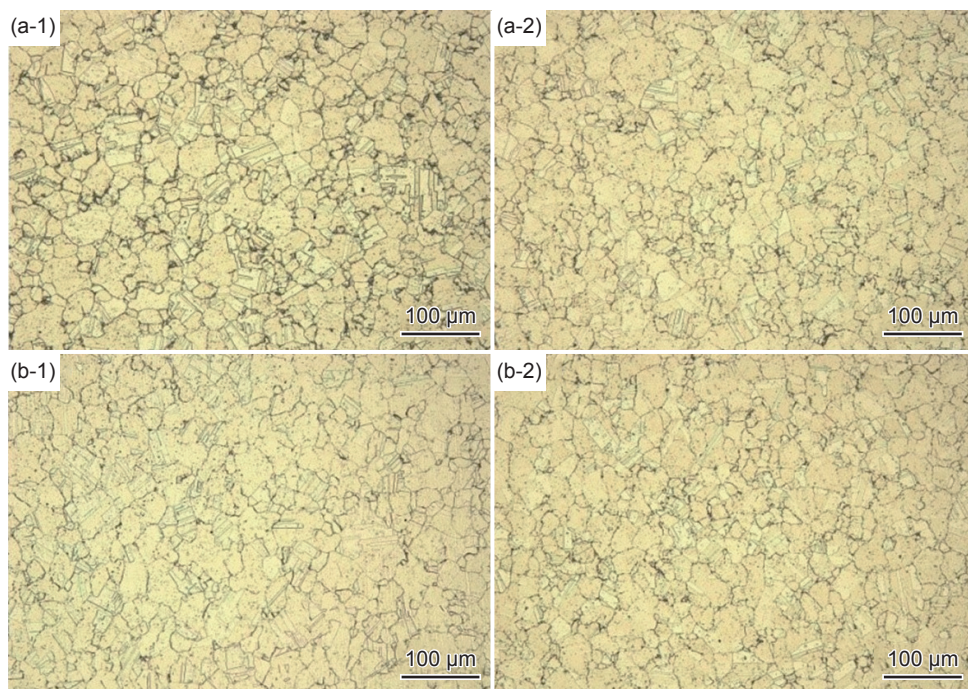


图2 不同淬火方式制备的 FGH96 合金金相组织 (a)全过程风冷淬火; (b)风冷+油冷组合淬火;
(1)位置 A; (2)位置 B

Fig. 2 Microstructure of FGH96 superalloys using different quenching methods (a) full air cooling quenching;
(b) combined air-oil cooling quenching; (1) position A; (2) position B

合金晶粒度主要受固溶温度和保温时间影响,固溶温度越高,保温时间越长,合金晶粒尺寸越粗大,而固溶后淬火以及后续时效热处理主要影响 γ' 相析出^[22-23]。固溶热处理后不同淬火方式制备的环件毛坯采用的固溶热处理温度和时间均相同,因此形成的晶粒尺寸基本相同。

2.1.2 γ' 相

固溶热处理后不同淬火方式制备的 FGH96 合金环件毛坯 A 和 B 处晶粒内部 γ' 相形貌如图 3 所示,可以看出均存在二次和三次 γ' 相。对位置 A 的 γ' 相形貌(图 3(a-1)和(b-1))进行分析,二次和三次 γ' 相平均尺寸和含量受淬火方式影响较为明显,采用全过程风冷和风冷+油冷组合淬火方式的环件毛坯二次 γ' 相平均尺寸分别约为 120 nm 和 150 nm。采用全过程风冷淬火的环件毛坯二次 γ' 相呈球形,而采用风冷+油冷组合淬火方式的环件毛坯二次 γ' 相则呈规则立方状。采用全过程风冷和风冷+油冷组合淬火方式的环件毛坯三次 γ' 相平均尺寸分别约为 12 nm 和 5 nm。采用全过程风冷和风冷+油冷组合淬火方式的环件毛坯 A 处 γ' 相含量分别约为 41% 和 38%。对位置 B 的 γ' 相形貌(图 3(a-2)和(b-2))进行分析,二次 γ' 相受淬火方式较位置 A 影响相对较小,平均尺寸均约为 130 nm,且三次 γ' 相平均尺寸与 A 处相近。但

采用全过程风冷淬火方式的环件毛坯二次 γ' 相呈规则方形,而采用风冷+油冷组合淬火方式的环件毛坯二次 γ' 相则呈圆角方形或球形。固溶热处理后不同淬火方式制备的环件毛坯 B 处 γ' 相含量基本相同,均约为 42%。

固溶热处理后淬火过程中,二次 γ' 相主要在低于 γ' 相固溶温度析出,三次 γ' 相则主要在淬火后期以及时效过程补充析出^[24-25]。采用全过程风冷淬火时,环件毛坯内外的冷却速率差别不大,因此 A 和 B 处析出的 γ' 相平均尺寸和含量相近。采用风冷+油冷组合淬火时,由于淬火油流动较慢,使环件毛坯 A 和 B 处冷却速率不同,靠近环件毛坯内侧 A 处区域流动较外侧慢,因此 A 处冷却速率较小,合金过饱和度较低, γ' 相形核率较小,因此析出的二次 γ' 相尺寸较大,含量较小。从相尺寸可以看出,高温时,全过程风冷环件毛坯冷却速率介于风冷+油冷环件毛坯内外侧之间。而淬火后期,全过程风冷的冷却速率低于风冷+油冷方式,使三次 γ' 相更加充分地析出并长大。

固溶热处理后不同淬火方式制备的 FGH96 合金环件毛坯 A 和 B 处晶界 γ' 相形貌如图 4 所示,可见相同淬火方式的环件毛坯 A 和 B 处晶界 γ' 相形貌相同。采用全过程风冷淬火的环件毛坯晶界较窄,且析出较多尺寸介于二次和三次 γ' 相之间

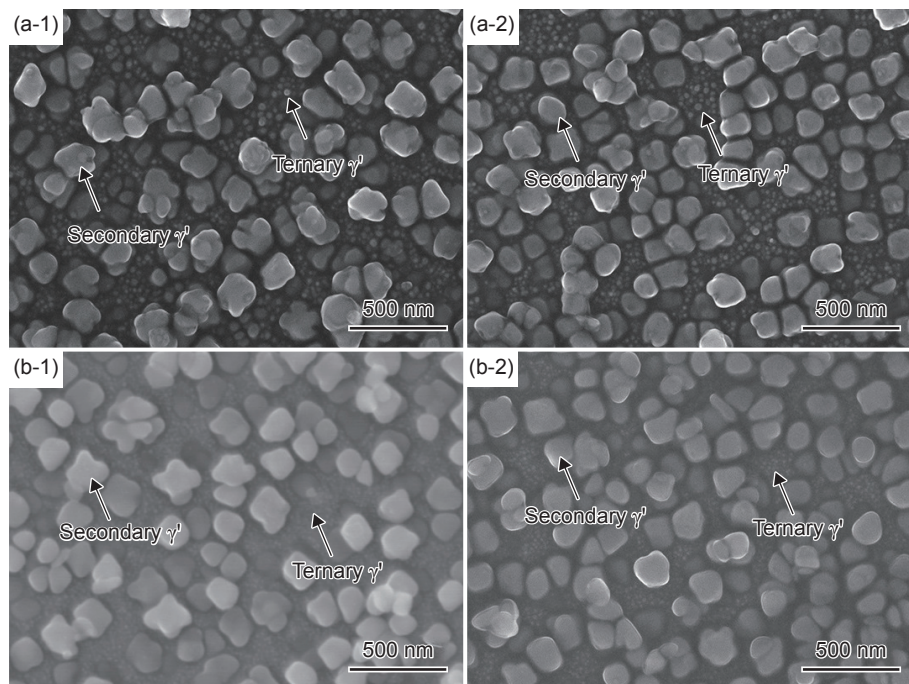


图3 不同淬火方式制备的 FGH96 合金晶粒内部 γ' 相形貌 (a)全过程风冷淬火;(b)风冷+油冷组合淬火;(1)位置 A;(2)位置 B

Fig. 3 γ' phase micromorphology in grains of FGH96 superalloys using different quenching methods (a) full air cooling quenching; (b) combined air-oil cooling quenching; (1) position A; (2) position B

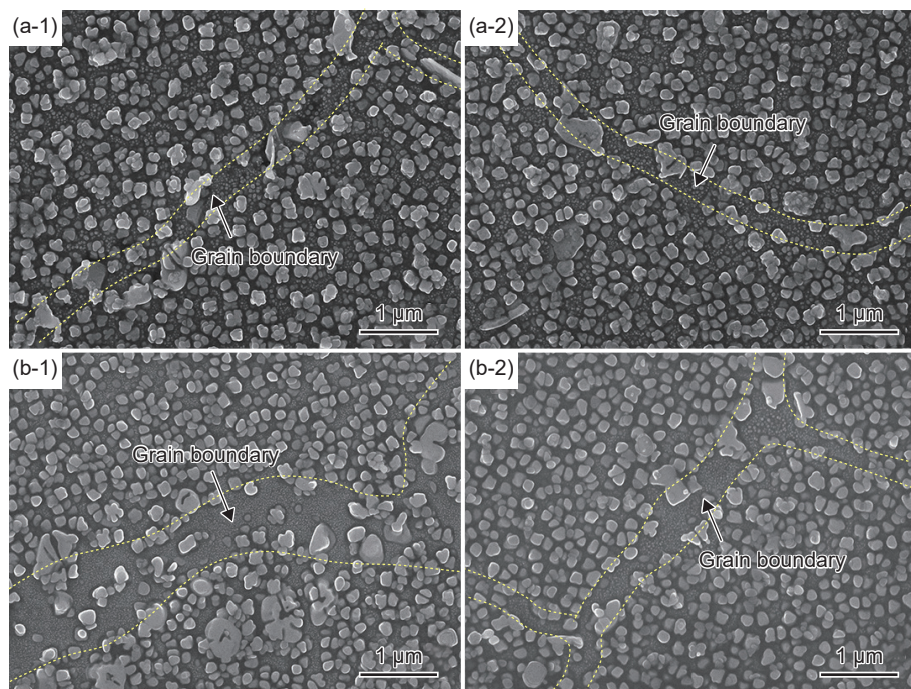


图4 不同淬火方式制备的 FGH96 合金晶界 γ' 相形貌 (a) 全过程风冷淬火; (b) 风冷+油冷组合淬火; (1) 位置 A; (2) 位置 B

Fig. 4 γ' phase micromorphology at grain boundary of FGH96 superalloys using different quenching methods (a) full air cooling quenching; (b) combined air-oil cooling quenching; (1) position A; (2) position B

的细小 γ' 相。采用风冷+油冷组合淬火方式的环件毛坯晶界较宽, 析出少量比二次 γ' 相更粗大的 γ' 相以及三次 γ' 相。

2.2 不同淬火方式的拉伸性能

2.2.1 拉伸性能

从不同淬火方式制备的 FGH96 合金环件毛坯 A 和 B 处切取拉伸试样分别进行室温和 650 °C 高温拉伸性能测试, 结果如表 2 所示。室温下, 不同淬火方式制备的 FGH96 合金环件毛坯拉伸性能相近; 650 °C 时, 采用全过程风冷淬火方式的环件毛坯拉伸强度高于风冷+油冷组合淬火方式, 尤其是

屈服强度。

进一步分别对不同淬火方式制备的 FGH96 合金环件毛坯进行室温、100、200、300、400、500、600、650、700 °C 和 750 °C 拉伸性能分析, 详见图 5。采用全过程风冷淬火方式的环件毛坯拉伸强度整体上高于风冷+油冷组合淬火方式, 抗拉强度最大差距可达 65.5 MPa (300 °C), 屈服强度最大差距可达 57 MPa (200 °C)。600 °C 及以下时, 不同淬火方式制备的环件毛坯断后伸长率呈交替变化; 当温度高于 600 °C 时, 采用风冷+油冷组合淬火方式的环件毛坯断后伸长率明显高于全过

表 2 不同淬火方式制备的 FGH96 合金拉伸性能
Table 2 Tensile property of FGH96 superalloys using different quenching methods

Quenching method	Sampling position	Testing temperature/°C	Ultimate tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%
Full air	A	Room temperature	1581	1178	21.5
		650	1492	1061	19.5
	B	Room temperature	1569	1161	21.4
		650	1517	1075	16.4
Combined air-oil	A	Room temperature	1558	1132	22.4
		650	1483	1018	22.2
	B	Room temperature	1580	1144	20.9
		650	1513	1033	18.4

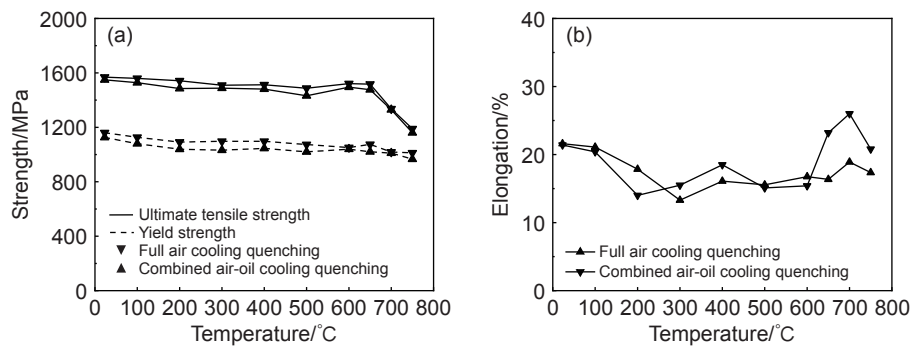


图5 不同温度不同淬火方式制备的FGH96合金拉伸性能 (a)抗拉和屈服强度;(b)断后伸长率
Fig. 5 Tensile property of FGH96 superalloys using different quenching methods under different temperatures
(a)ultimate tensile and yield strength; (b)elongation

程风冷淬火方式。

采用全过程风冷淬火方式的环件毛坯晶界较窄且析出较多 γ' 相,阻碍位错运动,对晶界起到强化作用,因此合金拉伸强度较高;但晶界强度的提高导致拉伸过程中相邻晶粒之间协调变形能力变差,因此合金塑性降低,尤其是高温下,晶界作为薄弱区域是变形的主要区域,较窄的晶界和较多 γ' 相削弱晶界变形能力,导致合金高温下断后伸长率降低。

2.2.2 蠕变性能

从FGH96合金环件毛坯A和B处切取蠕变试样进行704 °C/690 MPa蠕变性能测试,结果如

表3所示,不同淬火工艺制备的环件毛坯蠕变性能均符合指标要求。环件毛坯A和B处68 h蠕变塑性伸长率大致相同,采用全过程风冷和风冷+油冷组合淬火方式制备的环件毛坯分别约0.05%和0.08%。造成伸长率差异的主要原因仍为不同淬火方式带来的晶界 γ' 相形貌不同,高温蠕变过程中,晶界作为薄弱区域承担主要变形,全过程风冷淬火方式制备的环件毛坯晶界较窄且存在较多 γ' 相,强化晶界,阻碍形变产生,从而降低伸长率。蠕变应变为0.2%时的时间受固溶热处理后淬火方式影响较小,两种淬火方式制备的环件毛坯均高于150 h。

表3 不同淬火方式制备的FGH96合金蠕变性能
Table 3 Creep property of FGH96 superalloys using different quenching methods

Quenching method	Sampling position	Elongation at 68 h/%	Duration of 0.2% strain/h
Full air	A	0.041	157.5
	B	0.052	158.0
Combined air-oil	A	0.074	150.7
	B	0.089	179.6

2.2.3 残余应力

对时效热处理后不同淬火方式制备的FGH96合金环件毛坯进行表面残余应力分析,结果见表4。采用全过程风冷淬火方式制备的环件毛坯比风冷+油冷组合方式表面残余应力平均低35 MPa,采用全过程风冷淬火方式的环件毛坯表面各处残余

应力分布较为均匀,标准差仅28 MPa,远远小于风冷+油冷组合方式表面残余应力标准差。因此采用全过程风冷淬火方式可提高环件毛坯在固溶冷却过程中的冷速均匀性,降低环件毛坯各处的残余应力分布差异,且残余应力较低,有利于后续零件机加工的尺寸稳定性。

表4 不同淬火方式制备的FGH96合金环件毛坯表面残余应力
Table 4 Surface residual stress of FGH96 superalloys using different quenching methods

Quenching method	Average/MPa	Standard deviation/MPa	Minimum/MPa	Maximum/MPa
Full air	395	28	341	460
Combined air-oil	430	106	243	641

3 结论

(1) 采用全过程风冷淬火和风冷+油冷组合淬火方式制备的 FGH96 合金环件毛坯晶粒度相当, 为 6.5 ~ 7 级。

(2) 采用全过程风冷淬火方式制备的环件毛坯内侧和外侧二次 γ' 相尺寸分布均匀且含量相当, 平均尺寸为 120 ~ 130 nm, 含量为 41% ~ 42%; 采用风冷+油冷组合淬火方式的环件毛坯内侧与外侧二次 γ' 相平均尺寸分别为 150 nm 和 130 nm, 含量分别为 38% 和 42%。

(3) 采用全过程风冷淬火方式制备的环件毛坯晶界较窄, 晶界处析出尺寸介于二次和三次 γ' 相之间的细小 γ' 相, 对晶界起到强化作用, 因此拉伸强度提高, 断后伸长率降低, 68 h 高温蠕变塑性伸长率也降低。

(4) 全过程风冷淬火方式制备的环件毛坯表面残余应力平均值比风冷+油冷组合淬火方式低 35 MPa, 且残余应力分布更为均匀。因此, 全过程风冷淬火方式是一种具有应用前景的粉末高温合金部件制备工艺。

参考文献:

- [1] 王旭青, 彭子超, 罗学军, 等. 时效制度对挤压+锻造工艺路线 FGH95 粉末高温合金组织和性能的影响[J]. 材料工程, 2020, 48(5): 120-126.
WANG X Q, PENG Z C, LUO X J, et al. Effect of aging treatment on microstructure and properties of HEX+HIF FGH95 superalloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(5): 120-126.
- [2] 李佳琳, 杨杰, 穆春辉, 等. 一种无机盐铝涂层涂覆镍基粉末高温合金的高温氧化组织分析[J]. 航空材料学报, 2023, 43(5): 67-75.
LI J L, YANG J, MU C H, et al. High temperature oxidation microstructure analysis of Ni-based P/M superalloy coated with an inorganic aluminum coating[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2023, 43(5): 67-75.
- [3] 徐鹤, 汪煜, 刘德林, 等. 粉末高温合金 FGH4095 和 FGH4096 的抗高温氧化性能[J]. 材料工程, 2023, 51(4): 122-131.
XU H, WANG Y, LIU D L, et al. High temperature oxidation resistance of PM superalloys FGH4095 and FGH4096[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(4): 122-131.
- [4] 李寿华, 薛长旺, 宋丙新, 等. 某型航空发动机低压涡轮盘前封严环件毛坯打磨故障分析和排除措施[J]. 航空维修与工程, 2021(12): 94-95.
LI S H, XUE C W, SONG B X, et al. Analysis and troubleshooting on the collision and wear of LPT disk front sealing baffle for a certain type of aero-engine[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2021(12): 94-95.
- [5] 万秀屏, 边景全, 于璐. 盘后封严挡板零件加工变形质量控制方法[J]. 中国新技术新产品, 2017(1): 60.
WAN X P, BIAN J Q, YU L. Deformation-control methods for the post-machining sealing baffle[J]. China New Technologies & Products, 2017(1): 60.
- [6] 陈阳, 田高峰, 杨杰, 等. 变形参数对挤压成型镍基粉末高温合金固溶热处理晶粒组织的影响[J]. 航空材料学报, 2019, 39(4): 19-25.
CHEN Y, TIAN G F, YANG J, et al. Effect of deformation parameter on solution heat-treated microstructure of extruded Ni-based powder metallurgy superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(4): 19-25.
- [7] 吴凯, 刘国权, 胡本芙, 等. 固溶冷却速度和前处理对新型镍基粉末高温合金组织与显微硬度的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(4): 685-691.
WU K, LIU G Q, HU B F, et al. Effect of solution cooling rate and pre-heat treatment on the microstructure and microhardness of a novel type nickel-based P/M superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(4): 685-691.
- [8] DING H H, HE G A, WANG X, et al. Effect of cooling rate on microstructure and tensile properties of powder metallurgy Ni-based superalloy[J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2018, 28(3): 451-460.
- [9] GROH J R. Effect of cooling rate from solution heat treatment on waspaloy microstructure and properties[J]. Superalloys, 1996, 1996: 621-626.
- [10] SCHIRRA J J, REYNOLDS P L, HURON E S, et al. Effect of microstructure (and heat treatment) on the 649 °C properties of advanced P/M superalloy disk materials[J]. Superalloys, 2004: 341-350.
- [11] 卢毓华, 王海舟, 付锐, 等. 不同固溶冷速 GH4096 高温合金在高温蠕变测试中 γ' 相的演变行为[J]. 金属热处理, 2021, 46(9): 173-179.
LU Y H, WANG H Z, FU R, et al. Behavior of γ' precipitates under high temperature creep of GH4096 superalloy with different solution treatment cooling rates[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(9): 173-179.
- [12] 谢永富, 李玉凤, 苏春民. GH141 镍基高温合金环形件生产工艺优化[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(7): 168-170.
XIE Y F, LI Y F, SU C M. Research on processing optimization of miniature ring forging with GH141 alloy[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(7): 168-170.
- [13] 邹金文, 刘东, 柳百成, 等. 涡轮盘风冷过程数值模拟研

- 究[J]. 材料工程, 2009(10): 7-10.
- ZOU J W, LIU D, LIU B C, et al. Simulation of wind chill process for turbine disk[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2009(10): 7-10.
- [14] 张家锋, 邹金文, 康进武, 等. FGH96 粉末高温合金涡轮盘淬火过程界面换热系数的研究[J]. *航空材料学报*, 2010, 30(1): 26-29.
- ZHANG J F, ZOU J W, KANG J W, et al. Study on surface heat transfer coefficients of FGH96 P/M superalloy disk during heat-treatment process[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2010, 30(1): 26-29.
- [15] 孙兼, 刘培英, 张洪涛. Rene'88DT 粉末高温合金组织及 γ' 相析出动力学研究[J]. *金属热处理*, 2001, 26(7): 13-17.
- SUN J, LIU P Y, ZHANG H T. Study on microstructure and γ' precipitation dynamics of Rene'88DT P/M superalloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2001, 26(7): 13-17.
- [16] 程俊义, 刘朝峰, 马向东, 等. 一种新型镍基粉末高温合金涡轮盘的双性能热处理工艺研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2024, 53(9): 2614-2623.
- CHENG J Y, LIU C F, MA X D, et al. Study on dual-microstructure heat treatment process for a novel nickel based powder metallurgy superalloy turbine disk[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2024, 53(9): 2614-2623.
- [17] 柳翔宇, 李超, 谢仲豪. 固溶冷却速率对镍基粉末高温合金组织性能的影响[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2025, 53(1): 125-132.
- LIU X Y, LI C, XIE Z H. Effect of solid solution cooling rate on the microstructure and properties of nickel-based powder superalloy[J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2025, 53(1): 125-132.
- [18] 程体娟, 于鸿垚, 毕中南, 等. 固溶处理对新型镍钴基高温合金显微组织及力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2023, 48(4): 97-103.
- CHENG T J, YU H Y, BI Z N, et al. Effect of solution treatment on microstructure and mechanical properties of a novel nickel-cobalt-based superalloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2023, 48(4): 97-103.
- [19] 《中国航空材料手册》委员会. 中国航空材料手册(第2版)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [20] 刘湘斌, 段波, 于苏洋, 等. 冷却速率对 FGH96 粉末高温合金微观组织的影响[J]. *热加工工艺*, 2022, 51(22): 126-129.
- LIU X B, DUAN B, YU S Y, et al. Influence of cooling rates on microstructure of FGH96 powder superalloy[J]. *Hot Working Technology*, 2022, 51(22): 126-129.
- [21] 田高峰, 贾成厂, 温莹, 等. 粉末高温合金涡轮盘不同部位冷却 γ' 相的析出和强化[J]. *材料热处理学报*, 2008, 29(3): 126-130.
- TIAN G F, JIA C C, WEN Y, et al. Cooling precipitation and strengthening for different locations of a powder metallurgy nickel-base superalloy disk[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2008, 29(3): 126-130.
- [22] 刘健, 叶飞, 王旭青, 等. 粉末高温合金 Udimet720Li γ' 强化相析出行为[J]. *粉末冶金技术*, 2021, 39(6): 499-525.
- LIU J, YE F, WANG X Q, et al. Precipitation behavior of γ' phase in P/M superalloy Udimet720Li[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2021, 39(6): 499-525.
- [23] 吴凯, 刘国权, 胡本芙, 等. 固溶冷却速率和后处理对新型 FGH98 I 镍基粉末高温合金 γ' 相析出和显微硬度的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(7): 1267-1272.
- WU K, LIU G Q, HU B F, et al. Effect of solution cool rate and post treatment on γ' precipitation and microhardness of a novel nickel-based P/M superalloy FGH98 I [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(7): 1267-1272.
- [24] LI P, CHEN L, BU H, et al. Effect of cooling rate on the morphological changes in the secondary γ' precipitation in FGH97 nickel-based PM superalloy[J]. *Intermetallics*, 2024, 171: 108344.
- [25] RIELLI V V, PHAM T D, GODOR F, et al. Effects of standard heat treatment on micro-tonanostructure heterogeneities in a Rene 65 Ni-based superalloy billet[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 913: 147069.

收稿日期: 2025-06-11; 录用日期: 2025-07-01

通讯作者: 汪煜(1976—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为粉末高温合金, 联系地址: 北京市 81 信箱 1 分箱 (100095), E-mail: wangyu-hit@sohu.com

(本文责编: 陈 卉)