● 材料改性 Material Propertiest ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.05.019

固溶处理温度对 GH738 合金组织和性能的影响

曾维虎[1],周晓明[1],方 波[2],李 钊[1],牛 静[2],曹一超[2],王 涛[1],宋玺玉[2]

(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. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司,辽宁 沈阳 110043)

摘 要: 采用金相显微镜、扫描电镜和材料试验机研究了 GH738 合金在不同固溶热处理制度下的显微组织和性能。结果表明,随着固溶温度的提高,合金的晶粒尺寸随之增大、未溶入基体的 γ' 相逐渐减少,新析出的 γ' 相逐渐长大;GH738 合金中的第二相有 MC 和 $M_{23}C_6$,MC 主要分布在晶内,$M_{23}C_6$ 主要分布在晶界;GH738 合金的室温拉伸强度、屈服强度及洛氏硬度随二次固溶温度的升高而减小。

关键词:热处理;GH738 合金;显微组织;第二相

中图分类号: TG156; TG113 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)05-0500-04

Effect of Solid Solution Treatment Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of GH738 Alloy

ZENG Weihu[1], ZHOU Xiaoming[1], FANG Bo[2], LI Zhao[1], NIU Jing[2], CAO Yichao[2], WANG Tao[1], SONG Xiyu[2]

(1. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Shengyang Liming Aero Engines Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

Abstract: The microstructure and properties of GH738 alloy under different solid solution heat treatment systems were studied by means of metallographic microscope, scanning electron microscope and material testing machine. The results show that with the increase of the solid solution temperature, the grain size of the alloy will increase, the γ' phase which is not dissolved in the matrix decreased, and the new γ' phase will grow up. In the second phase of GH738 alloy, MC and $M_{23}C_6$ are mainly distributed in the crystal, while $M_{23}C_6$ is mainly distributed in the grain boundary. The tensile strength, yield strength and rockwell hardness of GH738 alloy decreased with the increase of the secondary solution temperature.

Key words: heat treatment; GH738 alloy; microstructure; second phase

GH738 是以 γ' 相沉淀硬化的镍基高温合金,具有良好的耐燃气腐蚀能力、较高的屈服强度和疲劳性能,工艺塑性良好,组织稳定,广泛用于航空发动机转动部件,使用温度不高于 815 ℃。可以生产冷轧和热轧板材、管材、带材和锻件、铸件、紧固件。GH738 合金的显微组织包括 γ 基体相,γ' 和碳化物析出相。不同的热处理制度对 γ' 相和碳化物的形态、分布、大小和数量有明显影响。因此,热处理制度是该材料能否获得良好综合性能的重要环节[1-5]。本文针对 GH738 丝材开展的热处理制度研究。

目前,GH738 的固溶处理主要有高于 γ' 相溶解度线和低于 γ' 相溶解度线这两种,时效处理均采用二级时效。本文对不同固溶处理温度下的显微组织进行了研究分析,并测试了室温拉伸和室温洛氏硬度,以找到最佳的热处理工艺。

收稿日期: 2018-11-17

作者简介: 曾维虎(1984-),江西南昌人,工程师. 主要从事高温合金研究. E-mail: zengweihu_2016@163.com

1 实验材料及方法

GH738 合金丝材通过冶炼、开坯锻造、热轧成方坯、多道次冷轧和退火等工序获得的,合金的化学成分如表 1。GH738 合金中的 γ' 相固溶温度约为 1 040 ℃, 在 γ' 相固溶温度上下按一定温度间隔选择进行 995、1 010、1 040、1 080 ℃固溶处理,然后进行相同的稳定化处理和时效处理:845 ℃/4 h/ 空冷 +760 ℃/16 h/ 空冷,热处理制度如表 2 所示。

表1 GH738合金的化学成分 w(%)

Tab.1 Chemical composition of GH738 alloy

C	Mn	Cu	Si	P	S	Cr	Ti
0.06	<0.10	<0.10	<0.15	<0.015	<0.015	19.69	3.00
Al	Co	Mo	Fe	B	Zr	Ni	
1.40	14.68	4.43	1.12	0.007	0.05	Bal.	

在经不同热处理后的丝材上取样, 进行机械磨光和抛光, 用化学试剂对合金进行腐蚀后,在 DM4000 型金相显微镜和 LEICA 图像分析仪进行晶粒组织观察, 在 HITACHI S-4800 型扫描电子显

表 2 选取的不同热处理制度

Tab.2 Heat Treatment process for GH738 alloy

不同热处理制度	固溶处理	稳定化处理	时效处理
HT1	995 ℃/2 h/AC	845 ℃/4 h/AC	760 ℃/16 h/AC
HT2	1 010 ℃/2 h/AC		
HT3	1 040 ℃/2 h/AC		
HT4	1 080 ℃/2 h/AC		

微镜上进行碳化物的观察。用 γ′相电解腐蚀剂电解腐蚀后，在 HIITACHI S-4800 型扫描电子显微镜上进行 γ′相的观察和分析。对不同热处理制度的 GH738 合金进行了室温力学性能和洛氏硬度的测试。

2 实验结果与分析

2.1 热处理后的显微组织对比

GH4738 合金丝材标准中规定，合金的固溶处理温度为 995~1 040 ℃。图 1 为经不同固溶温度+稳定化+时效处理后的 GH738 合金的光学金相显微组织图。HT1 的固溶处理温度为 995 ℃，在该温度下固溶处理，丝材发生了再结晶，但晶粒比较细小，没有长大；HT2 固溶温度为 1 010 ℃，与 HT1 比较晶粒没有明显长大，HT3 的固溶温度为 1 040 ℃，此时晶粒较 1 010 ℃固溶处理已有明显长大；HT4 的固溶温度为 1 080 ℃，此时晶粒继续长大，晶粒度达到 ASTM4.5 级。经 HT3 和 HT4 固溶处理后的合金存在部分的退火孪晶，这是由于合金在热变形后发生再结晶形成的。文献[1]表明，变形 GH738 合金在 1 020 ℃前晶粒度基本没有变化，超过 1 020 ℃时晶粒开始长大。

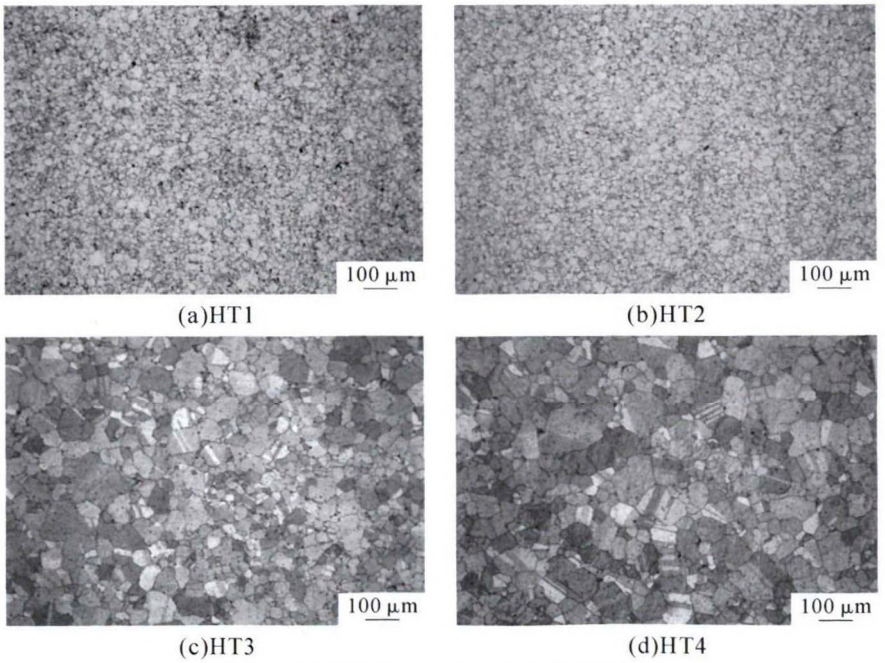
利用 SEM 对 GH738 合金中的碳化物进行了分析，经不同固溶处理后合金的碳化物分布情况如图所示，在晶界处析出微量的细小颗粒状碳化物没有明显的差别，这是由于晶界处的碳化物主要是在时效过程中产生的，固溶过程不会影响合金碳化物的析出。

GH738 合金的碳化物主要偏聚于晶界，形成颗粒状不连续碳化物阻止晶界滑动和裂纹形成，有利于持久时间和持久塑性，如图 2 所示。能谱分析结果表明碳化物主要有两类：MC 型富 Ti 的碳化物和 $M_{23}C_6$ 型富 Cr 的碳化物。MC 型碳化物主要分布在晶内，$M_{23}C_6$ 型碳化物是时效过程中析出的二次碳化物，主要以不规则的块状分布在晶界，如图 3 所示。

γ′相是 GH738 合金的主要强化相，通过固溶+时效处理可以使 γ′相均匀弥散地在 γ 基体中析出。经不同的固溶处理后合金的 γ′相形貌有较大的不同，图 4 为 GH738 合金经四种不同的热处理后 γ′相电解腐蚀的 SEM 形貌。由图可知，经 HT1 和 HT2 制度处理后的合金中存在大小不同的两种 γ′相，经 HT1 处理后的一次 γ′相数量比经 HT2 处理后的要多，随着固溶温度的提高，一次 γ′相不易析出，二次 γ′相逐渐长大，当固溶温度达到 1 040 ℃时，一次 γ′相基本全部溶解。

2.2 力学性能测试

图 5(a)和(b)分别为 GH738 合金经不同热处理后的室温拉伸和硬度性能。由图可知，随着固溶温度的升高，合金的室温拉伸性能和室温硬度略呈下降趋势，但相差不是很明显。这主要是由于固溶温度的

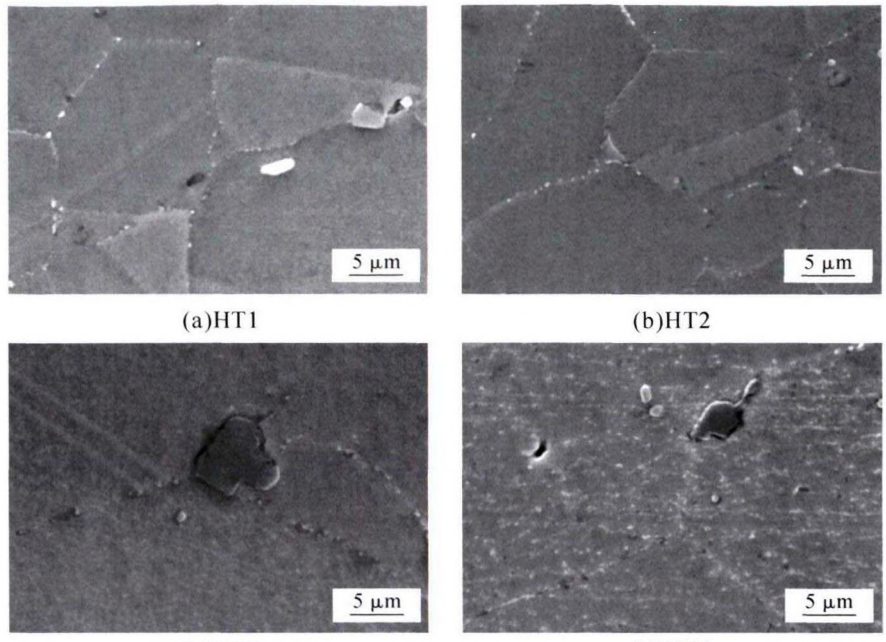


(a)HT1　(b)HT2

(c)HT3　(d)HT4

图 1 不同热处理后 GH738 合金的晶粒组织

Fig.1 Microstructure of GH738 after different heat treatment

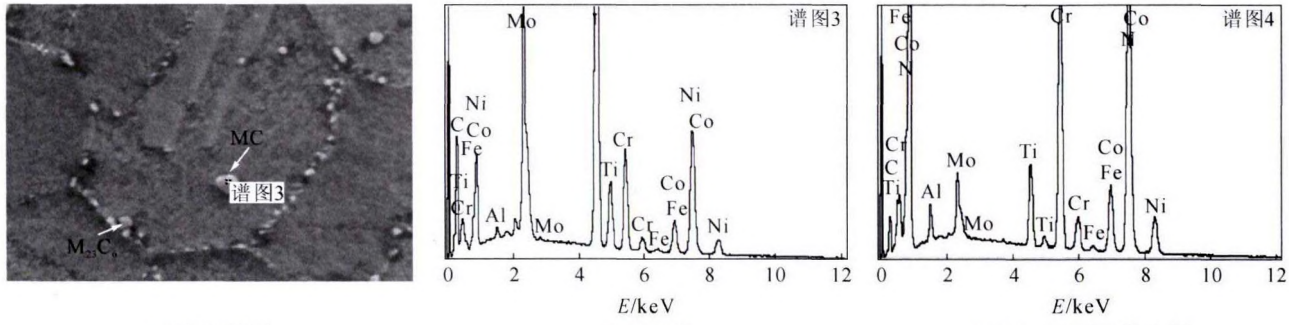


(a)HT1　(b)HT2

(c)HT3　(d)HT4

图 2 不同热处理后 GH738 合金的晶界碳化物

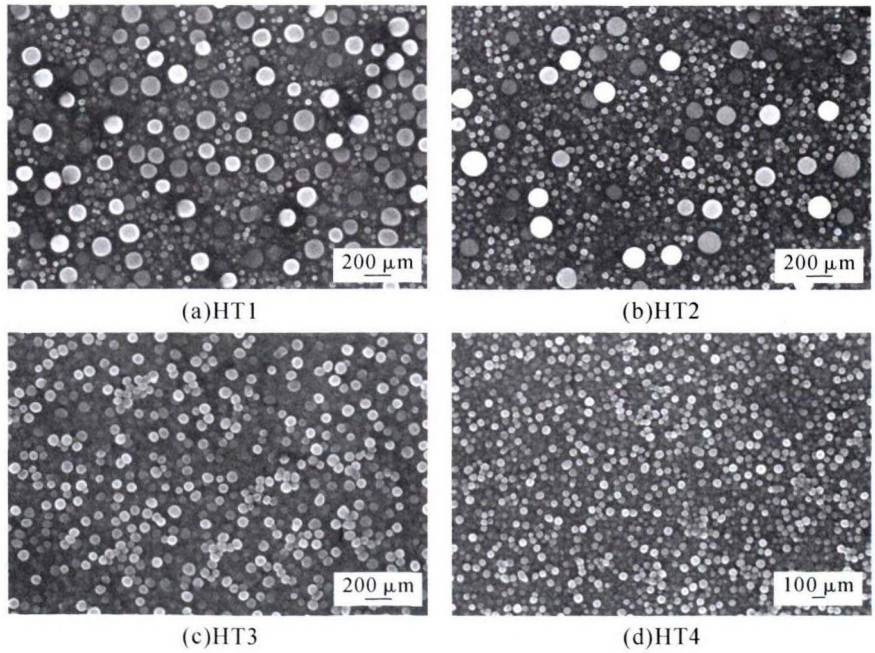
Fig.2 Carbide of GH738 after different heat treatment



(a)SEM照片　(b)MC相　(c)$M_{23}C_6$相能谱分析

图 3 碳化物的 SEM 形貌和 EDS 分析结果

Fig.3 SEM image of carbide and EDS results

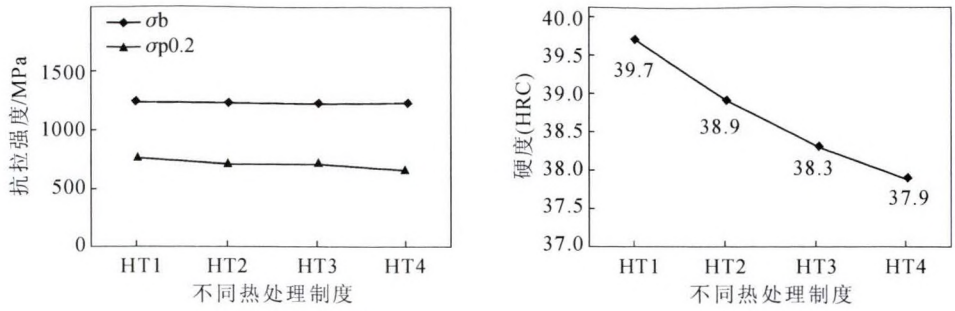


(a)HT1　(b)HT2

(c)HT3　(d)HT4

图 4 不同热处理后 GH738 合金的 γ′相形貌

Fig.4 SEM images of γ′ phase after different heat treatment



(a)室温拉伸性能　　(b)室温硬度

图 5 不同热处理后 GH738 合金力学性能

Fig.5 Tensile properties and hardness of GH738 at room temperature

改变对合金的 γ′相数量析出没有明显的影响，γ′相析出数量主要由时效阶段决定。因此，不同固溶温度对合金的室温抗拉强度和硬度无明显影响。

γ′相是决定沉淀强化高温合金强度的决定因数，是高温合金强化的根本保障，无论是共格应变强化机制、切割机制，还是高温蠕变的攀移机制，γ′相的数量越多，强化效果越好，强度越高。本文中的热处理对 γ′相的总量影响不大，故拉伸性能和室温硬度差别不是很大。随着固溶温度的升高，合金的室温拉伸强度、屈服强度和室温硬度都有一定的下降趋势。

γ′相尺寸在沉淀强化高温合金中也是一重要参数。当 γ′相数量一定时，γ′相尺寸对不同沉淀强化机制的高温合金的强度影响有所不同。对位错切割机制，存在一个 γ′相的临界尺寸，小于临界尺寸，γ′相尺寸越大，强化效果越好，强度越高。超过临界尺寸，则 Orowan 机制起主要作用，γ′相尺寸愈大，强化效果愈差。对共格强化和攀移机制，γ′相尺寸愈大，强度愈高。当合金的 γ′相数量较低时，γ′相的大小和间距对合金性能影响更大。

3 结论

(1)固溶温度在小于 1 040 ℃时，合金的晶粒尺寸变化不明显，当固溶温度超过 1 040 ℃时，晶粒开始明显长大，在 1 080 ℃固溶时，晶粒尺寸发生明显长大，达到 ASTM4.5 级。

(2)随着固溶温度的提高，γ′相逐渐减少，新析出的 γ′相逐渐长大，并在基体中保持均匀分布。

(3)随着固溶温度的升高，合金的室温抗拉强度和室温硬度略呈下降趋势，但相差不明显，但合金室温屈服强度下降较明显，下降约 100 MPa。

参考文献：

[1] 李克. 某航空发动机用 GH738 材料热处理工艺探讨 [J]. 热处理技术与装备，2008(29)：56-58.

[2] Hardy M. Creep data for waspoly at 650℃ [J]. Rolls-Royce plc, 1999, private communication.

[3] Smith W F. Structure and properties of engineering alloys[M]. Mc-Graw-Hill Education, NY, 1993.

[4] ASTM. Standard test methods for determining average grain size [S], E112-96, 1996, 243.

[5] Xie J, Tian S G, Zhou X M, et al. Microstructure and creep behavior of FGH95 nickel-based superalloy [J]. Materials Science and Engineering(A), 2011, 528：2076-2084.

技术资料邮购

《铸造实用生产技术集锦》

《铸造实用生产技术集锦》本书由李德臣教授级高工编著。共七章：1、重大铸件生产技术；2、耐热耐磨产品生产技术；3、耐蚀耐磨产品生产技术；4、耐磨产品生产技术；5、铸造工艺设计；6、铸造用辅助产品生产技术；7、铸造与哲学。特快专递邮购价：97元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071