

Cr 含量对 GH648 合金组织及力学性能的影响

Effect of Chromium Content on Microstructure and Mechanical Properties of GH648 Alloy

颜晓峰, 马惠萍, 卢亚轩, 刘万生 (钢铁研究总院高温材料研究所, 北京 100081)

YAN Xiao-feng, MA Hui-ping, LU Ya-xuan, LIU Wan-sheng
(High Temperature Materials Research Institute,
Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

摘要: GH648 是一种时效硬化型镍基高温合金, 主要用作航空发动机的起动机 900 °C 以下的抗氧化承力件。本合金中的第二相有 α -Cr、 γ 和碳化物。针对第二相的主要形成元素 Cr, 利用金相、电镜以及物理化学相分析等手段, 探讨了其含量对合金的组织及性能的影响。结果表明, 随 Cr 含量 (质量分数, 下同) 的增加, 合金中的 α -Cr、 γ 和一次碳化物量也增加。当 Cr 含量控制在 32.0% ~ 33.0% 时, 合金具有良好的综合力学性能。

关键词: GH648 合金; 碳化物; α -Cr 固溶体; 力学性能

中图分类号: TG113.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2002) 03-0028-04

Abstract: GH648 is an aging-strengthening Ni-based superalloy, which is mainly applied as a mechanical part in the aviation motor and works below 900 °C. There exist several secondary phases such as α -Cr, γ and carbides in this alloy. Chromium plays a very important role in the form of the precipitates mentioned above, and the effect of Cr content on microstructure and mechanical properties of GH648 alloy is studied in this paper by means of light and electron microscope and physical-chemical analysis. Experimental results show: when Cr content increases, α -Cr and γ precipitates and primary carbides increases, and the alloy characterizes with good combination of mechanical properties when Cr content ranges from 32.0% to 33.0%.

Key words: GH648 alloy; carbide; α -Cr solid solution; mechanical properties

GH648 是一种时效硬化型变形高温合金。它是在前苏联 648 合金的基础上研制的, 主要用作航空发动机的 900 °C 以下的抗氧化承力件。通过对解剖件的分析, 原 648 合金组织中主要有 γ 、 α -Cr、 γ 和碳化物^[1]。为此, 我们主要研究了与上述组织形成相关的 Cr 元素的含量对本合金性能的影响, 并利用相分析、金相和电镜等手段分析了其组织, 以确定本合金中 Cr 元素的最佳控制范围。

1 试验材料及方法

为研究 Cr 元素对合金组织和性能的影响, 我们设计了 4 炉不同 Cr 含量 (质量分数, 下同) 的合金。试验用料采用 10kg 真空感应炉熔炼, 每炉锭重 5.5 Kg。Cr 含量由低到高顺次为: 30.46, 32.15, 33.46, 34.16。这些试验合金的其它元素含量基本一致, 其控制范围为: C < 0.1, W 4.30 ~ 5.30, Mo 2.30 ~ 3.30, Al 0.50 ~ 1.10, Ti 0.50 ~ 1.10, Nb 0.50 ~ 1.10, Mn < 0.50, Fe < 4.0。试验用料采用 10kg 真

空感应炉熔炼, 锭重 5.5kg。铸锭经锻造成直径为 15mm 的圆棒后, 经标准热处理, 加工成不同规格的试验用试样。标准热处理制度为: 固溶 1140 °C, 1 h 空冷; 时效 900 °C, 16h 空冷。对不同成份的合金, 分别测定了室温和高温 (800 °C) 的瞬时力学性能, 并测试了 800 °C、176MPa 的持久性能。用光学显微镜和电子显微镜观察了各合金的显微组织。金相试样采用盐酸+硝酸+甘油溶液进行电解腐蚀。电压为 6~8V, 电流密度为 $0.2\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 侵蚀时间为 10~15s^[2]。

2 试验结果及分析

2.1 不同 Cr 含量合金的组织

经标准热处理后, 不同 Cr 含量合金的金相组织示于图 1。由相分析可知, GH648 合金经标准热处理后, 除基体组织 γ 外, 第二相主要有 γ 、碳化物 (MC 和 M_{23}C_6) 以及富铬的 α -Cr 固溶体, 有关 α -Cr 析出相的研究已有报道^[3,4]。扫描电镜的能谱表明, 晶内分布的针状析出物为体心立方的 α -Cr 固溶体, 其透射衍

射花样如图 2 所示。颗粒状析出物主要为复杂面心立方的 $M_{23}C_6$ 。图 3 示出了不同 Cr 含量合金的固溶态金相组织。由图 3 可知, 该合金在固溶状态下, 随着 Cr 含量的上升, 大尺寸碳化物增多, 这是固溶处理时未

溶的一次碳化物。这些碳化物在固溶处理时对晶界的迁移具有阻碍作用, 因此可以使合金晶粒得到一定的细化^[5]。合金经标准热处理后, Cr 含量对各第二相的组成结构及其析出量的影响如表 1 所示。

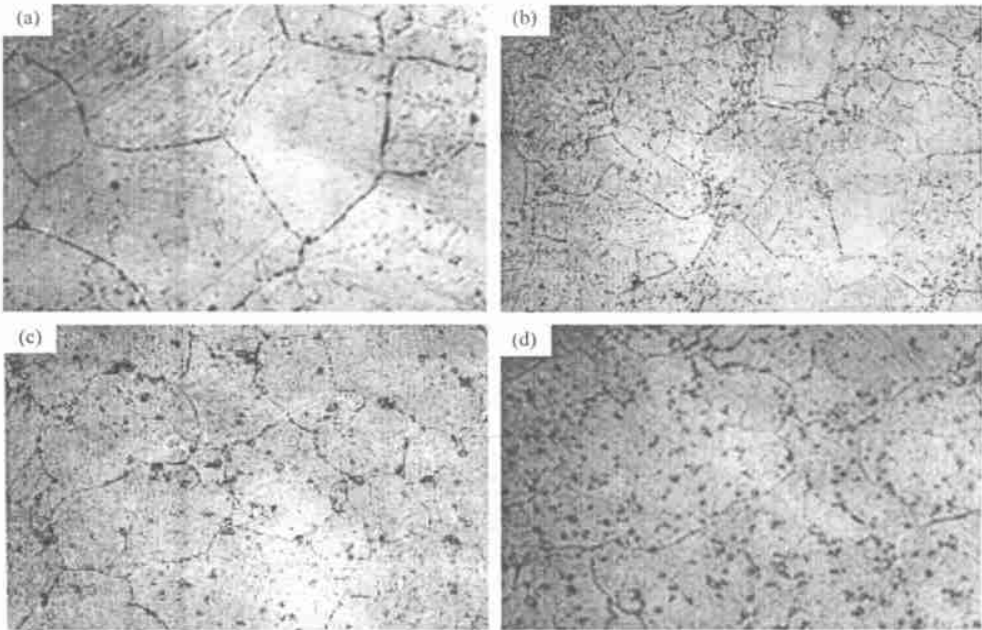


图 1 标准热处理后, 不同 Cr 含量合金的金相组织 (a) 30.46Cr; (b) 32.15Cr; (c) 33.46Cr; (d) 34.16Cr
Fig. 1 After standard heat treatment, Effect of Cr content on the optical microstructure of the GH648 alloy

表 1 标准热处理后, 合金中的第二相分析结果

Table 1 Analysis results of the secondary phases in superalloy after standard heat treatment

相类型	试样号	相中各元素占合金的质量分数/ %										质量分数之和/ %
		Ni	Fe	Cr	W	Mo	Ti	Nb	Al	N	C	
γ	32.15Cr	1.287	0.058	1.252	0.343	0.082	0.092	0.109	0.076	—	—	3.299
	34.16Cr	1.970	0.044	1.269	0.354	0.083	0.180	0.139	0.129	—	—	4.168
$M_{23}C_6$	32.15Cr	0.026	0.001	0.540	0.076	0.049	—	—	—	—	0.037	0.692
	34.16Cr	0.022	0.001	0.500	0.045	0.026	—	—	—	—	0.033	0.594
α -Cr	32.15Cr	0.132	0.024	4.868	0.421	0.279	—	—	—	—	—	5.724
	34.16Cr	0.519	0.014	8.128	0.838	0.552	—	—	—	—	—	10.051
MC	32.15Cr	—	—	0.004	0.001	0.001	0.023	0.006	—	—	0.0077	0.043
	34.16Cr	—	—	0.004	0.001	0.001	0.026	0.011	—	—	0.009	0.052
相类型	试样号	组 成 结 构 式										
γ	32.15Cr	(Ni0.525 Fe0.025 Cr0.450) ₃ (Cr0.380 W0.134 Mo0.061 Ti0.138 Nb0.084 Al0.203)										
	34.16Cr	(Ni0.625 Fe0.015 Cr0.360) ₃ (Cr0.283 W0.108 Mo0.049 Ti0.210 Nb0.084 Al0.267)										
$M_{23}C_6$	32.15Cr	(Ni0.037 Fe0.002 Cr0.8883 W0.035 Mo0.043) ₂₃ C ₆										
	34.16Cr	(Ni0.035 Fe0.002 Cr0.914 W0.023 Mo0.026) ₂₃ C ₆										
α -Cr	32.15Cr	α - (Ni0.022 Fe0.004 Cr0.922 W0.023 Mo0.029)										
	34.16Cr	α - (Ni0.050 Fe0.001 Cr0.890 W0.026 Mo0.033)										
MC	32.15Cr	(Cr0.120 W0.008 Mo0.016 Ti0.751 Nb0.102) C										
	34.16Cr	(Cr0.103 W0.007 Mo0.013 Ti0.723 Nb0.157) C										

由表 1 和图 1 可知, Cr 含量增加时, 合金中 α -Cr 析出相明显增多, 同时 γ 相也有所增加。这是由于 Cr

是 α -Cr 和 γ 的主要形成元素, 增加的 Cr 含量会加大这些相的形成趋势。另外, 由表 1 和图 1 还可知, 随铬含量的升高, 碳化物总量 (一次碳化物+ 二次碳化物) 基本不变, 合金中二次碳化物析出量有所降低。

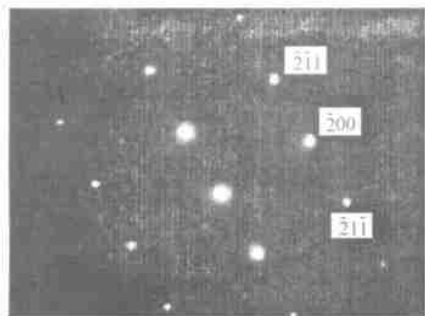


图 2 GH648 合金中 α -Cr 析出相的电子衍射斑点

Fig. 2 TEM diffraction pattern of α -Cr precipitate in GH648 alloy

2.2 不同 Cr 含量合金的力学性能

含不同 Cr 含量合金的力学性能如图 4、图 5 和图 6 所示。图 4 显示的合金的室温力学性能表明, 合金的屈服强度 ($\sigma_{0.2}$) 和抗拉强度 (σ_b) 随 Cr 含量的增加而升高。这主要是由于强化基体的第二相 γ 和 α -Cr 增多了, 见图 1 和表 1。但当 Cr 含量超过 33.0% 之后, 合金强度增加不明显。当 Cr 含量在 30.5% ~ 33.0% 范围时, 冲击韧性 (A_K) 和表征合金塑性的伸长率 (δ) 基本不变, 然而当合金中的 Cr 含量超过 33.0% 以后, 合金的冲击韧性和延伸率下降明显。图 5 显示了 Cr 含量对合金 800 拉伸性能的影响。随 Cr 含量的升高, 拉伸强度先升高后下降。当 Cr 含量在 32% ~ 33% 范围时, 合金的高温屈服强度和抗拉强度取得较大值, 分别在 510 ~ 550 MPa 和 610 ~ 620 MPa 范围内, 此时合金的塑性虽然较低, 但仍在要求的范围内。过高的 Cr 含量 (> 33.5%) 会使能强化晶界的二次碳

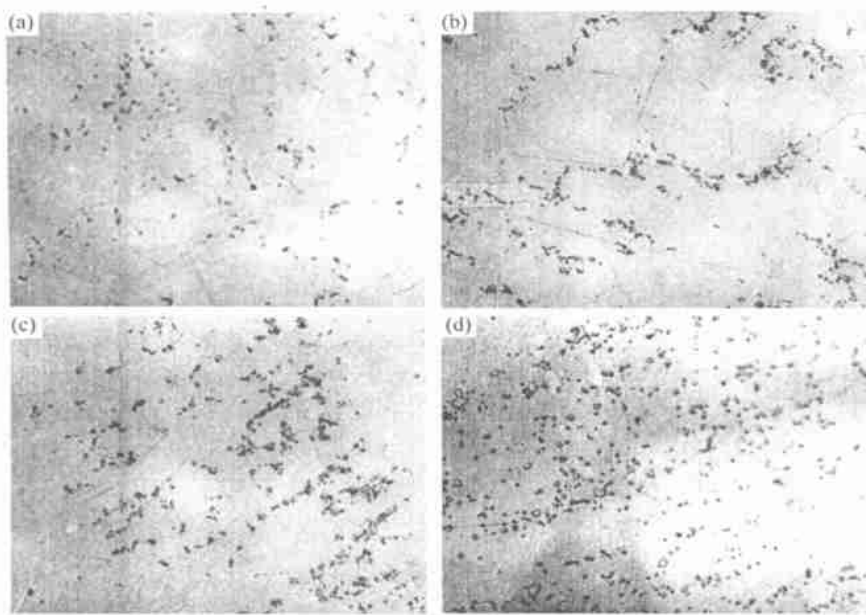


图 3 固溶处理后, 不同 Cr 含量合金的金相组织 (a) 30.46Cr; (b) 32.15Cr; (c) 33.46Cr; (d) 34.16Cr

Fig. 3 Effect of Cr content on the optical microstructure of the GH648 alloy after standard heat treatment

化物析出量减少, 从而导致高温拉伸强度的降低。

图 6 示出的不同 Cr 含量对合金持久性能的影响表明, 随 Cr 含量的减少, 合金的持久寿命逐渐升高。然而当 Cr 含量过低 (< 32.0%) 时, 合金的持久塑性也较低。由图 6 可见, Cr 含量为 32.5% 左右时, 合金具有较好的持久性能。高的 Cr 含量 (> 33.5%) 会给合金的持久性能带来不利影响。当 Cr 含量适当升高, 可以适当增加 α -Cr 和 γ 的析出量, 有利于晶内与晶界的协调变形和降低微裂纹的形成倾向, 从而使合金

的持久塑性增加。然而过高的 Cr 含量 (> 33.5%) 会使合金中大尺寸的一次碳化物含量急剧增多, 见图 3。一次碳化物与基体间的相界面, 在外力作用下, 其中与外力垂直的地方容易产生裂口, 见图 7。裂口的两端, 在外力持续作用下, 要产生集中滑移, 促使裂口沿着两端继续扩展, 从而缩小了试样承力的实际面积, 增大了应力, 结果使试样提前断裂, 持久寿命下降。另外, Cr 含量的增加使基体晶粒细化在一定程度上也会降低合金的持久寿命。

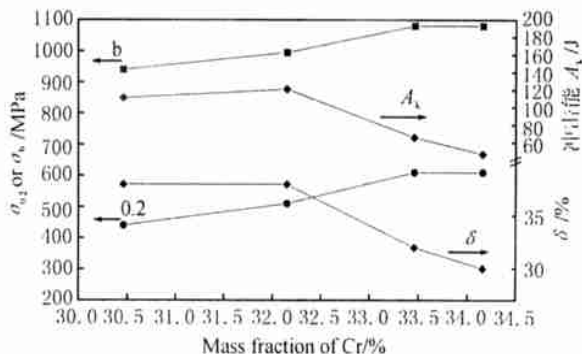


图4 不同 Cr 含量对合金室温 (20) 拉伸性能的影响

Fig.4 Effect of chromium on room temperature tensile properties and impact energy of investigated alloys

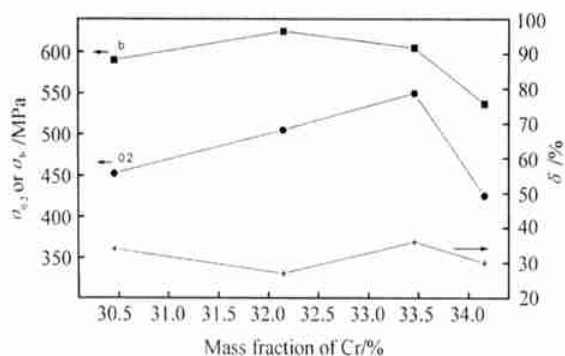


图5 不同 Cr 含量对合金高温 (800) 拉伸性能的影响

Fig.5 Effect of chromium on 800 °C tensile properties of investigated alloys

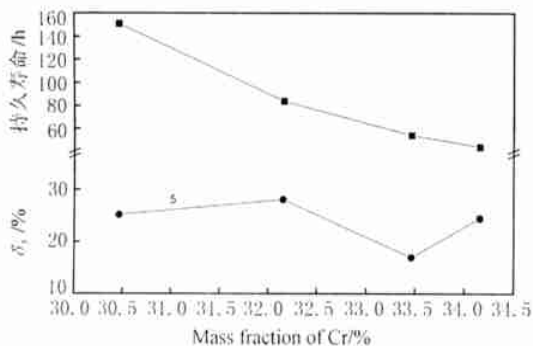


图6 不同 Cr 含量对合金持久

($\sigma = 176 \text{ MPa}$, $t = 800$) 拉伸性能的影响

Fig.6 Effect of chromium on stress rupture properties of investigated alloys



图7 33.46% Cr 合金持久试样中微裂纹萌生于一次碳化物相与基体界面

Fig.7 Micro-cracks were born at the interface between primary carbides and γ in superalloy rupture specimen containing 33.46% weight Cr

3 结论

(1) 在经标准热处理后的 GH648 合金中, 存在的第二相有 α -Cr、 γ 和碳化物 ($M_{23}C_6$ 和 MC)。经固溶处理后, 仍还存在一定量的未溶一次碳化物。

(2) 随 Cr 含量的增加, α -Cr、 γ 以及一次碳化物数量增多, 二次碳化物析出量有所下降, 而碳化物总量 (一次碳化物+ 二次碳化物) 基本保持不变。

(3) 随 Cr 含量的增加, 合金的室温拉伸强度提高, 持久寿命 (800 °C, 176MPa) 降低。

(4) 当 Cr 含量在 32.5% 左右时, 合金具有良好的综合力学性能。因此建议 Cr 含量最好控制在 32.0% ~ 33.0% 范围内。

参考文献

- [1] 马惠平等. 648 样件分析报告. 内部资料, 2000.
- [2] 黄乾尧, 李汉康等. 高温合金 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [3] J F Radavich. Effect of Alpha Chromium on Long Time Behavior of Alloy 718. Proceedings of the International Symposium on Superalloy 718, 625, 706 and Various Derivatives, 1996, 409—416.
- [4] 王改莲, 吴翠微, 董建新等. IN718 (GH169) 合金中 α -Cr 析出相的研究进展 [J]. 材料工程, 2001, (6): 44—47.
- [5] 毛卫民, 张新兵. 金属再结晶与晶粒长大 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.

收稿日期: 2001-10-15; 修订日期: 2002-01-21

作者简介: 颜晓峰 (1974—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高温耐蚀合金的研究与制备工作, 联系地址: 北京钢铁研究总院高温材料研究所 (100081)。

因此, 为改善合金的综合性能, 加入的 Cr 不宜过多。Cr 含量为 32.5% 左右时, 合金具有良好的综合性能。为便于实际生产操作, 建议 Cr 含量最好控制在 32.0% ~ 33.0% 范围内。