

## 镍基铸造高温合金的热等静压处理\*

呼和

(北京航空材料研究院先进高温结构材料国防科技重点实验室, 北京 100095)

**摘要** 评述了镍基铸造高温合金的热等静压 (HIP) 处理对组织和力学性能的影响。镍基铸造高温合金由于存在着铸造工艺难以消除的气孔类缺陷, 严重影响着合金的使用可靠性和成品率。通过 HIP 处理后的合金, 不仅可有效地消除合金中的缺陷, 获得致密合金, 而且还可改善合金的显微组织, 提高合金的拉伸、持久和疲劳性能, 显著地减小性能分散度。

**关键词** 镍基铸造高温合金, 热等静压, 显微组织, 力学性能

**中图分类号** TG132.32, TG146.15 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2002)11-1199-04

## HOT ISOSTATIC PRESSING TREATMENT OF CAST Ni-BASE SUPERALLOY

HU He

National Key Lab. of High Temperature Structural Materials, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095

Correspondent: HU He, senior engineer, Tel: (010)62456622-5461, Fax: (010)62456925,

E-mail: feng.he@biam.ac.cn

Manuscript received 2002-04-17, in revised form 2002-07-27

**ABSTRACT** The effect of hot isostatic pressing (HIP) treatment on microstructure and mechanical properties of cast Ni-base superalloy as reviewed. Due to the existence of cast defects, such as pores, which are inevitable in cast processing, the reliability and the proportion of finished cast products are greatly depressed. Through HIP treatment, not only a compact alloy can be obtained because of the elimination of defects, but also the microstructure improved resulting in the increase in the stress rupture, tensile and fatigue properties, and the decrease in mechanical properties decentralization.

**KEY WORDS** cast Ni-base superalloy, hot isotatic pressing, microstructure, mechanical property

镍基铸造高温合金因具有高温强度高等特点, 主要用来制造航空发动机和工业燃气轮机的涡轮叶片和导向叶片等在高温下使用的部件。但是由于存在着铸造工艺难以消除的冶金缺陷, 如疏松和气孔, 尤其近年发展的细晶铸造高温合金工艺, 为保证合金晶粒度细小, 出现的气孔类缺陷更为突出, 这些均严重影响着合金的使用可靠性和铸件的成品率, 曾引起过相当数量的灾难性事故和惨重的经济损失。利用 HIP 技术来解决此类问题已得到国内外广泛的应用。通过高温高压的共同作用, HIP 处理不仅可以有效地消除合金中的缺陷, 还可以改善合金的微观组织和力学性能, 大大提高合金的使用可靠性, 增加经济效益。本文就镍基铸造高合金的 HIP 处理部分研究工作进行一些评述。

### 1 HIP 对合金缺陷的消除作用和对合金显微组织的影响

图 1 是细晶 K418 合金 HIP 处理前后的金相观察照片。从图 1a 中可见, 铸态合金存在着严重的疏松缺陷, 聚集在晶界或共晶边缘, 分布面很广; 而经 HIP 处理后的合金没有发现任何疏松存在, 如图 1b 和 c 所示。图 2 是细晶 K418 合金疲劳试样断口扫描电镜照片。由图 2a 中可见, 铸态试样断口上有明显的孔洞存在; 而 HIP 处理后的断口上呈致密状, 缺陷均被消除, 如图 2b 所示。对 5 个 K405 合金试样进行了 HIP 处理前后密度变化的测定, 结果表明, HIP 处理之前试样的平均密度为  $8.149 \text{ g/cm}^3$ , 而 HIP 处理后的平均密度为  $8.158 \text{ g/cm}^3$ 。通过 HIP 处理 5 个 K405 合金试样的密度平均提高约 1%, 这说明 HIP 处理可以消除合金中的气孔类缺陷, 使合金进一步致密化。

由于 HIP 处理多在  $\gamma'$  相溶解温度左右进行, 它实际上相当一次高温固溶或均匀化处理, 所以 HIP 处理后的

\* 收到初稿日期: 2002-04-17, 收到修改稿日期: 2002-07-27

作者简介: 呼和, 男, 1957 年生, 蒙古族, 高级工程师

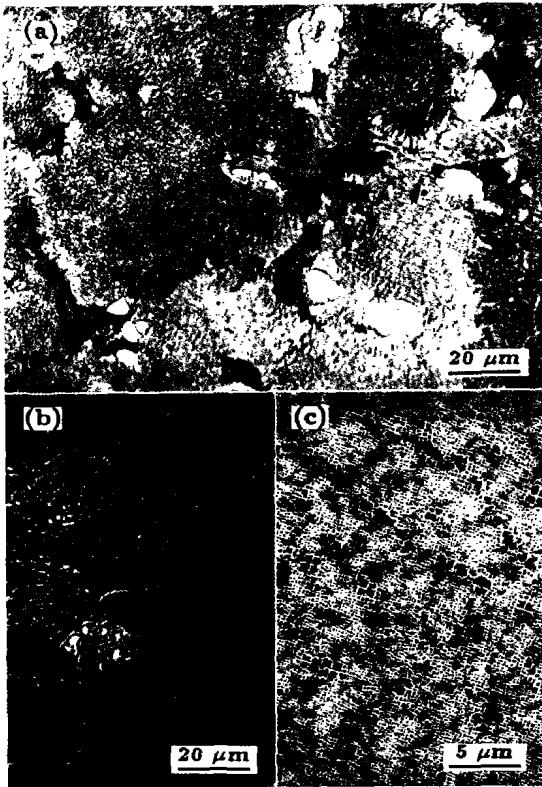


图 1 细晶 K418 合金 HIP 前后的金相组织

Fig.1 Microstructures of fine grain K418 alloy before (a) and after (b, c) HIP treatment  
(a, b) micrographs of K418 alloy (c) SEM micrograph of K418 alloy

合金显微组织发生了较大的变化。从图 1 中 HIP 前后的金相观察结果可见, HIP 前的合金存在数量较大的  $\gamma + \gamma'$  共晶相 (见图 1a), 而 HIP 后的合金 (见图 1b), 共晶相大部分溶解, 数量明显减少, 少量的残存也由以前的光板状和花瓣状变成粒状, 这说明 HIP 处理后合金偏析减小, 更加的均匀。主要的强化相  $\gamma'$  在高温高压下部分溶解, 在冷却过程中重新析出细小、较有规律排列的二次  $\gamma'$  相。HIP 处理后  $\gamma'$  相的尺寸大小及形态变化与 HIP 温度和冷却速度有着密切的关系<sup>[1,2]</sup>。

通常, 在超过  $\gamma'$  相溶解温度以上 HIP 处理时, 铸态的一次  $\gamma'$  相会全部溶解, 在随后的冷却过程中重新析出

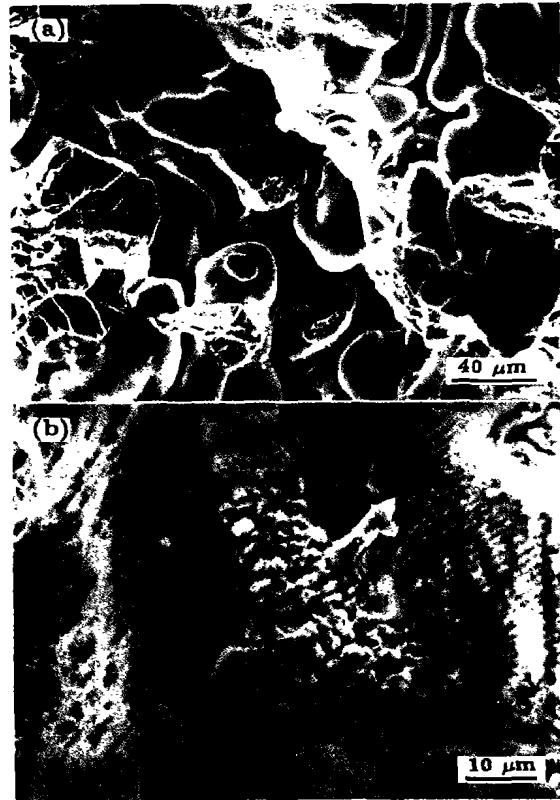


图 2 细晶 K418 合金 HIP 前后扫描电镜观察的疲劳断口

Fig.2 SEM fatigue fractographs of fine grain K418 alloy before (a) and after (b) HIP treatment

二次  $\gamma'$  相。这种重新析出的二次  $\gamma'$  相尺寸受 HIP 冷却速度控制,  $\gamma'$  相尺寸随着冷却速度的增加而减小, 它与  $\gamma'$  相的长大规律相一致。当 HIP 温度低于  $\gamma'$  相溶解温度时, 原铸态的一次  $\gamma'$  相不会溶解, 同时尺寸长大。如果在  $\gamma'$  相溶解温度附近进行 HIP 处理, 铸态的一次  $\gamma'$  相会有部分溶解而形成二次  $\gamma'$  相, 这时就存在两种不同尺寸的  $\gamma'$  相, 见图 1c。HIP 后  $\gamma'$  相与力学性能之间的关系在此不进行详细讨论。

## 2 HIP 对合金力学性能的影响

表 1 是 HIP 处理前后细晶 K418B 合金室温和 450 °C 拉伸性能对比结果。表 2 是 K405 合金 HIP 处理前后持久性能的对比结果。从表 1 中的结果可以看出, 室

表 1 细晶 K418B 合金 HIP 处理前后 20 °C 和 450 °C 拉伸性能对比

Table 1 Comparison of the tensile strength of fine grain K418B alloy before and after HIP treatment at 20 and 450 °C

Process	Temp., °C	$E$ , GPa	$\sigma_{0.2}$ , MPa	$\sigma_b$ , MPa	$\delta_{10}$ , %	$\psi$ , %
Cast	20	204	760	960	5.8	10.1
HIP	20	208	862	1068	8.6	9.9
Cast	450	175	784	1041	8.5	13.2
HIP	450	173	821	1152	14.0	14.7

表 2 K405 合金 HIP 处理前后的持久性能  
Table 2 Stress rupture of fine grain K405 alloy before and after HIP treatment

Process	650 °C /836 MPa			700 °C /763 MPa			750 °C /686 MPa			900 °C /314 MPa		
	$\tau$ , h	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\tau$ , h	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\tau$ , h	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\tau$ , h	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Cast	140	4.6	8.1	147	4.0	4.1	62	3.2	3.5	111	6.0	10.0
HIP	>466	-	-	414	4.0	7.6	201	6.4	7.84	159	8.8	15

室温的弹性模量 ( $E$ )、屈服强度 ( $\sigma_{0.2}$ )、抗拉强度 ( $\sigma_b$ ) 和延伸率 ( $\delta_{10}$ ) 经 HIP 处理后都比处理前有一定幅度的提高, 持久塑性 ( $\psi$ ) 也与铸态相当. 450 °C 时, HIP 处理后  $E$  与铸态相当, 而  $\sigma_{0.2}$  和  $\sigma_b$  在 HIP 处理后都比处理前有一定幅度的提高,  $\delta_{10}$  提高的幅度较大.

由表 2 的对比结果表明, HIP 处理后的 K405 合金, 650, 700 和 750 °C 的持久寿命 ( $\tau$ ) 比处理前成倍地增加, 900 °C 的持久性能 ( $\delta$ ) 也比处理前有较大的提高, 持久塑性 ( $\psi$ ) 也均有一定的提高.

表 3 是一组 K405 合金 HIP 处理前后旋转变曲疲劳性能. 结果表明, HIP 处理后的合金疲劳寿命 ( $N$ ) 明显高于处理前的寿命, 而且数据分散度也非常小.

表 3 K405 合金 HIP 处理前后直径为 4 mm 的试样旋转变曲疲劳性能

Table 3 Rotating-bending fatigue properties of K405 alloy specimen with 4 mm diameter before and after HIP treatment

Process	Temp., °C	$\sigma_{-1}$ , MPa	$N$ , cyc
Cast	700	373	$3.0 \times 10^5$
		372	$2.25 \times 10^5$
		352	$>1.03 \times 10^7$
		352	$9.455 \times 10^6$
		352	$5.675 \times 10^6$
HIP	700	372	$>1.052 \times 10^7$
			$>1.130 \times 10^7$
			$>1.025 \times 10^7$
			$>1.023 \times 10^7$
			$>1.023 \times 10^7$

图 3a 和 b 分别是细晶 K418B 合金 HIP 处理前后 450 和 650 °C 的低周疲劳性能曲线. 表 4 给出了一组细晶 K418B 合金 HIP 处理前后的低周疲劳寿命 ( $N_f$ ) 和寿命提高的倍数 ( $N_2/N_1$ ). 由图 3 和表 4 可看出, HIP 处理后的 450 和 650 °C 低周疲劳性能均比处理前铸态的性能成倍提高. 这种提高随着应变变化而变化不大. 450 °C 当应变  $\Delta\epsilon_t/2=0.6\%$  时, HIP 处理后比处理前寿命提高了 6 倍, 而在应变  $\Delta\epsilon_t/2=0.3\%$  时, 寿命提高了 5.6 倍. 650 °C 当应变  $\Delta\epsilon_t/2=0.6\%$  时, HIP 处理

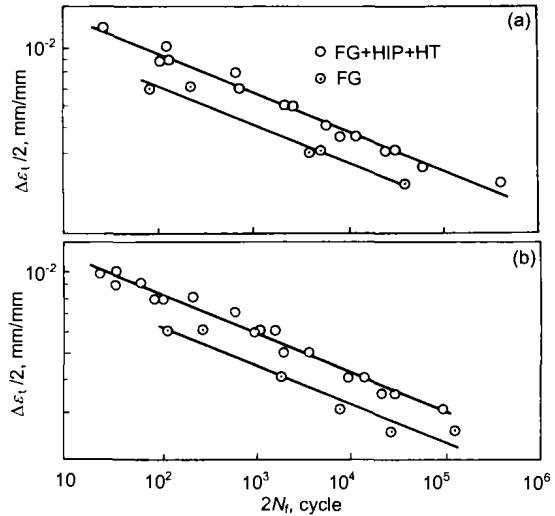


图 3 细晶 K418B 合金 HIP 处理前后 450 和 650 °C 低周疲劳曲线

Fig.3 LCF curves of the fine grain K418B alloy before and after HIP at different temperatures (stress ratio  $R=-1$ )

(a) 450 °C (b) 650 °C

表 4 细晶 K418B 合金 HIP 处理前后低周疲劳寿命和寿命提高的倍数

Table 4 Increase in LCF life of fine grain K418B alloy before and after HIP treatment

Temp. °C	$\Delta\epsilon_t/2$ %	$N_f$ , cyc		Multiplication factor $\frac{N_2}{N_1}$
		Cast ( $N_1$ )	HIP ( $N_2$ )	
450	0.6	176	1055	6.0
	0.3	16879	94195	5.6
650	0.6	80	448	5.6
	0.3	7219	43841	6.1

Note:  $\Delta\epsilon_t/2$ —strain range,  $N_f$ —low cycle fatigue (LCF) life

后比处理前寿命提高了 5.6 倍, 应变量为  $\Delta\epsilon_t/2=0.3\%$  时, 寿命提高了 6.1 倍.

表 5 是对 K405 合金 650 °C 持久和 20 °C 拉伸延伸率的性能数据统计分析结果. 从表中可看出, HIP 处理后对减小性能分散度是非常有效的.

表 5 K405 合金 HIP 处理前后 650 °C 持久性能和 20 °C 拉伸延伸率的统计分析

Table 5 Statistical analysis of stress rupture life and stress rupture elongation at 650 °C and elongation at 20 °C of K405 alloy before and after HIP treatment

Property	Process	$\bar{x}$	$S_x$	$C_v$	$n$
Stress rupture life $\tau$ , h (650 °C /856 MPa)	Cast	739	316	0.42	5
	HIP	1246	289	0.23	11
Stress rupture elongation $\delta$ , % (650 °C /856 MPa)	Cast	5.68	3.09	0.54	5
	HIP	9.85	1.55	0.15	8
Tensile elongation $\delta_5$ , % (20 °C)	Cast	4.6	1.22	0.26	10
	HIP	6.5	0.84	0.13	15

Note:  $\bar{x}$ —average value,  $S_x$ —standard difference,  $C_v$ —scatter coefficient,  $n$ —sample number

### 3 结论

通过 HIP 处理来提高镍基铸造高温合金的质量是一种非常有效、可行的方法, 它可明显的提高合金拉伸、持久和疲劳性能; 显著地降低性能分散度, 因而使合金的力学性能整体水平相应地得到很大的提高, 进一步发挥合金的潜能. 合金力学性能的提高主要归功于两方面, 第一是 HIP 处理可使合金中疏松和气孔类缺陷被有效的消除, 进一步得到致密化, 去除这些缺陷对合金带来的危害作用, 其次是 HIP 处理通过合理的工艺还可大大地改善合金的

微观组织, 从而提高了合金力学性能. 同时 HIP 处理也可大大提高铸件的成品率, 因而可有效的增加经济效益.

### 参考文献

- [1] Hu H. *Development and Application of Materials*, 1996; 6: 27  
(呼 和. 材料开发与应用, 1996; 6: 27)
- [2] Hu H. *The Development of HIP Technique*. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1996: 187, 195  
(呼 和. 等静压技术进展. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 187, 195)