

DOI: CNKI:33-1331/TJ.20110704.2233.007 网络出版时间: 2011-07-04 22:33  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/33.1331.TJ.20110704.2233.007.html>

## 涡轮叶轮用铸造高温合金的热等静压处理研究

张树才<sup>1</sup>, 郭志俊<sup>1</sup>, 王跃旗<sup>1</sup>, 李爱民<sup>1</sup>, 王晋伟<sup>2</sup>, 冯云虎<sup>3</sup>

(1.中国兵器科学研究院 宁波分院, 浙江 宁波 315103; 2.中国兵器工业第七〇研究所, 山西 大同 037036;  
3.大同北方天力增压技术有限公司, 山西 大同 037036)

**摘 要** 对涡轮叶轮用铸造高温合金进行热等静压处理。结果表明, 通过热等静压处理, 铸造高温合金的疏松缺陷减少, 显微组织均匀细化, 合金致密度提高, 而且力学性能得到了改善。

**关键词** 涡轮叶轮; 铸造高温合金; 热等静压

**中图分类号** TG146.15

**文献标识码** A

**文章编号** 1004-244X(2011)04-0067-03

### Hot isostatic pressing treatment of cast superalloy used in turbine wheels

ZHANG Shucui<sup>1</sup>, GUO Zhijun<sup>1</sup>, WANG Yueqi<sup>1</sup>, LI Aimin<sup>1</sup>, WANG Jinwei<sup>2</sup>, FENG Yunhu<sup>3</sup>

(1.Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, China;

2.No.70 Institute of China Ordnance Industries, Datong 037036, China;

3.Datong North Great Power Turbocharging Technology Limited Company, Datong 037036, China)

**Abstract** Hot isostatic pressing treatment (HIP) process was investigated for cast superalloy used in turbine wheels. The results show that through HIP treatment, the defects of cast superalloy are eliminated and microstructure is refined. In the meantime, a compact alloy can be obtained and mechanical properties can be improved.

**Key words** turbine wheel; cast superalloy; HIP

涡轮叶轮作为涡轮增压器的关键零件, 其工作条件相对比较恶劣, 涡轮转速较高, 达到200 000 r/min以上, 高温工作温度850 ℃以上, 压比达到4.5以上, 因此涡轮叶轮的材料选择比较苛刻。目前国内选用镍基高温合金材料, 镍基铸造高温合金因具有高温强度高等特点, 主要用来制造发动机和燃气轮机的涡轮叶片和导向叶片等在高温下使用的部件。但是由于存在铸造工艺难以消除的冶金缺陷, 如: 疏松和气孔, 均严重影响合金的使用可靠性和铸件的成品率。利用热等静压技术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, 热等静压处理不仅可以有效地消除合金中的缺陷, 还可以改善合金的显微组织和力学性能, 大大提高合金的使用可靠性, 增加经济效益。

用热等静压处理对镍基高温合金的铸造缺陷消除及对显微组织和力学性能的改善作了研究。

## 1 试验方法

### 1.1 原材料

本研究用的镍基铸造高温合金根据标准HB5162—80(K18合金锭)的成分要求提供。标准要求成分, 见表1。

表1 铸造高温合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of cast superalloy

| 元素 | 质量分数/%    | 元素 | 质量分数/%      |
|----|-----------|----|-------------|
| C  | 0.08~0.16 | B  | 0.008~0.020 |
| Cr | 11.5~13.5 | Zr | 0.06~0.15   |
| Ni | 余         | Mn | ≤0.5        |
| Mo | 3.8~4.8   | Si | ≤0.5        |
| Al | 5.5~6.4   | P  | ≤0.015      |
| Ti | 0.5~1.0   | S  | ≤0.01       |
| Fe | ≤1.0      | Pb | ≤0.001      |
| Nb | 1.8~2.5   | Bi | ≤0.000 1    |

### 1.2 设 备

试验用254-762-207/2000型热等静压机, 德国UHDE生产, 最高温度为2 000 ℃, 最大压力为200 MPa, 传压介质为N<sub>2</sub>或Ar。

### 1.3 工 艺

在不同的温度、压力、保温时间下, 对材料进行热等静压处理。工艺参数为: 温度800~1 200 ℃; 压力80~120 MPa; 时间0.5~2 h。

处理后试样按GB/T228—2002加工拉力样, 按GB/T2039—1997加工持久性能样。

### 1.4 测试方法

拉伸强度在INSTRON125 I 拉力试验机上进行测

收稿日期: 2011-03-09; 修回日期: 2011-05-16

作者简介: 张树才, 男。E-mail: zsc252@qq.com。

通信作者: 郭志俊, 研究员; 从事难熔金属材料及工艺研究。E-mail: guo-zhijun@tom.com。

试,金相试验在 Neopht-2 光学显微镜上观察形貌,观察了缺陷消除和显微组织变化的情况。持久性能在国家钢铁测试中心测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 对合金显微疏松缺陷消除的作用

把整个涡轮切成两半,将其中一半进行热等静压处理,处理后与另一半未进行热等静压处理的涡轮进行对比。

将被观察面磨平,用  $\text{CuCl}_2$  12.5 g、 $\text{FeCl}_2$  12.5 g、 $\text{HNO}_3$  50 mL、 $\text{HCl}$  200 mL 加水配成 1 000 mL 的液体进行腐蚀。图1是热等静压处理前后的低倍观察照片。

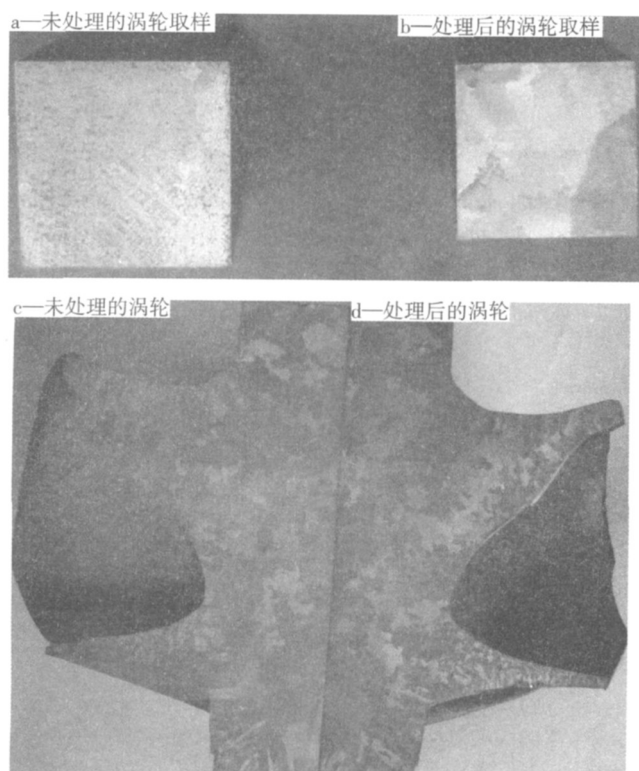


图1 热等静压处理前后的低倍观察照片 100×

Fig.1 Low magnification photos of alloy before and after HIP treatment 100×

图1a、c是未经热等静压处理的涡轮及涡轮上的取样,图1b、d是经过热等静压处理的涡轮及涡轮上的取样。可以看出:未进行处理的涡轮有明显可见的疏松,聚集在晶界边缘,有较大的枝晶;处理后的涡轮看不到疏松,枝晶比较少而碎。

从低倍显微图片看出,热等静压处理工艺可以消除疏松缺陷。

### 2.2 热等静压处理对合金显微组织的影响

铸造高温合金的热等静压处理温度一般在 $\gamma'$ 相溶解线  $55^\circ\text{C}$  左右范围内,是对合金进行一次固溶或均匀化处理,处理后的合金显微组织发生较大的变化。

图2为热等静压处理前后合金显微组织的变化。可以看出,热等静压处理前,合金的组织结构是典型的铸造组织结构,铸造合金的晶界有许多的亮点,由不熔物杂质组成,这样造成沿晶界断裂,材料强度及韧性降低。还可看出铸造合金的碳化物形态呈连续状,枝晶明显。而热等静压处理后的合金,共晶相大部分溶解,数量明显减少,晶界处亮点大幅减少,显微组织发生了均匀性变化,连续的碳化物断开,组织均匀,没有枝晶。

### 2.3 对合金力学性能的影响

对高温合金的铸态试样进行热等静压处理,处理后得到试样室温拉伸性能为:抗拉强度  $R_m$  970~1 000 MPa,延伸率  $A$  9.0%~15.0%。根据试样的试验结果确定热等静压处理工艺参数。

在确定的热等静压处理工艺参数下对试样进行热等静压处理,处理前后的试样进行拉伸试验,结果列于表2。可以看出,在室温拉伸性能中,对于抗拉强度  $R_m$ 、延伸率  $A$  来说,热等静压处理后都比铸态合金有一定的提高,拉伸强度提高的较少,延伸率得到明显的提高。

在热等静压处理工艺参数下对涡轮叶轮解剖件进行热等静压处理,从处理前后的涡轮叶轮上取样,进行

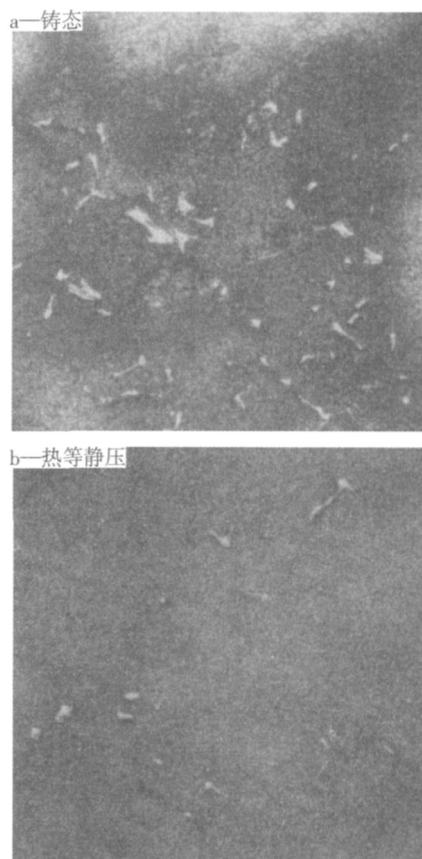


图2 热等静压处理前后的高倍金相观察照片 400×

Fig.2 High magnification microstructures of alloy before and after HIP treatment 400×

表2 热等静压处理前后试样和涡轮解剖件的室温拉伸性能

Table 2 Tensile properties of sample and turbine wheel before and after HIP treatment at room temperature

| 材料     | 试样         |        | 涡轮         |        |
|--------|------------|--------|------------|--------|
|        | $R_m$ /MPa | $A$ /% | $R_m$ /MPa | $A$ /% |
| 铸态     | 955        | 7.0    | 810        | 6.0    |
| 热等静压处理 | 970        | 9.0    | 875        | 6.5    |

表3 热等静压处理后涡轮解剖件的高温持久性能

Table 3 Stress rupture of turbine wheel after HIP treatment at high temperature

|        | 温度 $t$ /°C | 应力 $\sigma$ /MPa | 持续时间 $\tau$ /h | 持久断后伸长率 $\delta$ /% |
|--------|------------|------------------|----------------|---------------------|
| 热等静压处理 | 800        | 490              | 51.1           | 4.0                 |
| 指标要求   | 800        | 490              | $\geq 45$      | $\geq 3.0$          |

常温拉伸和高温持久试验,结果见表2、3。

从表2可以看出,涡轮叶轮热等静压处理后的室温拉伸性能比铸态合金有一定的提高,拉伸强度提高了8.0%,延伸率提高了8.3%。从表3可以看出经热等

静压处理后涡轮件的高温持久性能高于指标要求。

上述数据说明铸造高温合金中存在疏松和气孔类缺陷,致使合金断裂的应力集中,严重影响了合金的力学性能。热等静压处理后,合金中的缺陷被有效地消除,材料进一步得到了致密化处理,显微组织得到一定改善,从而使合金的综合力学性能提高。

### 2.4 对合金断口形貌的影响

对铸态合金的拉伸断口及热等静压处理后合金的高温持久性能断口进行了断口形貌分析。图3为扫描电镜断口照片。

可以看出,铸态试样断口沿晶断裂,可能是杂质原子在晶界上偏聚或脆性析出等造成材料韧性降低,而热等静压处理后的拉伸断口呈致密状,断裂面是由细小的窝坑构成,韧窝较多,是延性断裂。持久性能试样断口上有部分穿晶断裂,基体的韧性得到了增强。

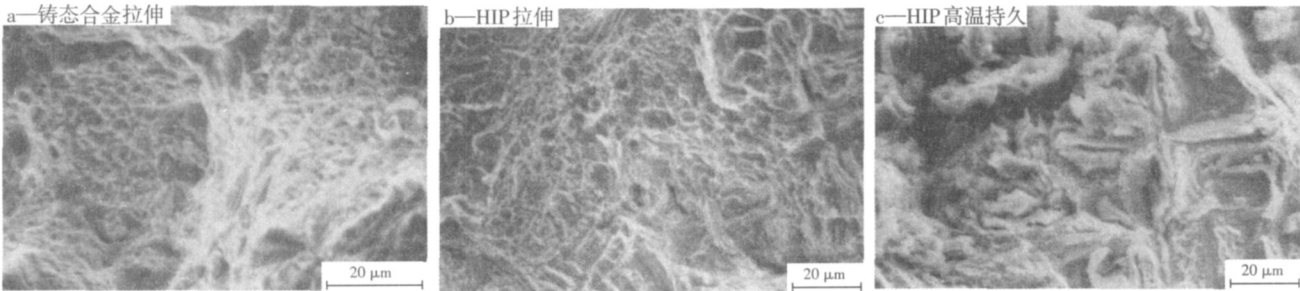


图3 扫描电镜断口照片

Fig.3 SEM fractographs

### 3 结 论

- 1) 热等静压处理技术可以有效地消除铸造合金的疏松和气孔缺陷,从而使合金致密化。
- 2) 热等静压处理后铸造合金的显微组织发生了较大的变化,枝晶消失,碳化物连接断开,组织均匀细化;合金的室温拉伸性能得到了提高,持久性能满足使用要求。

### 4 参考文献

[1] 马福康. 等静压技术[M]. 北京:冶金工业出版社,1992:

298-324.

[2] 北京钢铁学院高温合金教研组. 高温合金材料[M]. 北京:北京钢铁学院,1974:95-105.

[3] 汤鑫,于保正,呼和,等. K418B合金控晶铸造整体叶轮热等静压和热处理工艺研究[J]. 材料工程,2003(9):41-47.

[4] 呼和. 镍基铸造高温合金的热等静压处理[J]. 金属学报,2002(11):1199-1202.

[5] 刘晓功,饶洋,肖程波,等. 热等静压后炉冷对K488合金显微组织和力学性能的影响[J]. 航空材料学报,2008(3):24-27.

[6] 于保正,汤鑫. 细晶铸造K418B合金热等静压工艺研究[J]. 机械工程材料,2003,27(3):24.