

GH4169 合金超塑性及其复杂构件超塑成形

航天材料及工艺研究所 姚草根 吕宏军 卢焰 贾新朝
哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 张凯锋

[摘要] 对 GH4169 高温合金板材超塑性及超塑成形进行了研究。研究表明:在典型的超塑成形应变速率范围(10^{-3} ~ 10^{-4} s $^{-1}$)内,细晶 GH4169 合金在较宽的温度范围(920℃~980℃)内的延伸率都高于 250%,最高延伸率可达 513%,应变速率敏感性指数 m 值都大于 0.3;合金在超塑过程中发生了晶粒动态长大,并且超塑变形后仍为等轴晶;利用超塑成形方法研制出了飞行器用 GH4169 合金燃气歧管,并通过了 30MPa 液压压力、保压 10min 的打压试验及 20MPa、保压 5min 的气密试验。

关键词: 高温合金 GH4169 超塑性 超塑成形

超塑成形广泛用于制造钛合金、铝合金飞行器构件,是一种制造复杂形状构件的理想工艺^[1-2]。应用超塑成形能够提高构件的性能和可靠性,同时减少构件的制造工序。GH4169 高温合金被广泛用于制造发动机部件,如压气机和涡轮盘、环,涡轮轴,排气管件,热气管道和紧固件等,但采用传统的制造工艺很难成形这种高温合金,因此制造这种合金的复杂形状构件的成本非常高。近来许多研究人员研究了一些高温合金的超塑性,如 Torisaka 研究 In-100 高温合金时发现,经热等静压制坯,然后轧制再退火后的 In-100 合金的延伸率最高可达 560%^[3]。Mahoney 和 Crooks 研究变

形与粉末细晶 Inconel 718 合金发现,变形与粉末细晶 Inconel 718 合金的延伸率最高分别可达到 500%和 150%^[4]。

本课题对 GH4169 高温合金的超塑性及组织变化作了初步的研究,并对飞行器用 GH4169 合金复杂形状构件进行了超塑成形研究。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为 2mm 厚的细晶 GH4169 合金板材,其化学成分如表 1 所示。

表 1 GH4169 高温合金的化学成分

$w/\%$

| C | Si | Mn | Cr | Ni | Co | Ti | Al | Mo | Nb | Fe | S | P | Mg | Cu | B |
|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.061 | 0.08 | 0.03 | 19.26 | 53.07 | 0.05 | 1.13 | 0.55 | 3.26 | 5.38 | 16.98 | 0.005 | 0.008 | <0.01 | 0.072 | 0.006 |

1.2 超塑性试验

为表征该合金的超塑性性能,对其进行了拉伸试验,试验在空气中进行,并保持恒定的拉伸速度。温度范围为 920~980℃,初始应变速率范围为 1.6×10^{-4} ~ 1.2×10^{-3} s $^{-1}$ 。采用 Gleeble-1500 热力模拟试验机测定了合金的应变速率敏感性指数 m 值,方法为 Backofen 提出的速度突变法。

1.3 显微组织观察

合金超塑成形前后,利用光学显微镜对试样的组织进行了观察分析。

1.4 复杂形状构件超塑成形

对复杂形状的 GH4169 合金燃气歧管进行了超塑成形试验,并对超塑成形出的 GH4169 合金燃气歧管进行了液压及气密试验。

2 结果与讨论

2.1 GH4169合金的超塑性性能

图 1 所示为不同初始应变速率下试验温度对 GH4169 合金延伸率的影响。由图 1 可知,对于本试验中所有的试验条件,合金的延伸率都高于 250%,并且合金在 $t=950$ ℃、初始应变速率为 1.6×10^{-4} s $^{-1}$ 的拉伸变形条件下,获得了最高延伸率 $\delta=513\%$ 。在典型的超塑成形应变速率范围(10^{-3} ~ 10^{-4} s $^{-1}$)内,合金在较宽的温度范围(920~980℃)内的延伸率都高于 250%,这非常有利于 GH4169 合金超塑成形在工程上的应用。

表 2 给出了合金在 920℃、950℃和 980℃时的不同初始应变速率下的应变速率敏感性指数 m 值。由表可知,在所有的试验条件下, m 值都高于 0.3,表现出了典

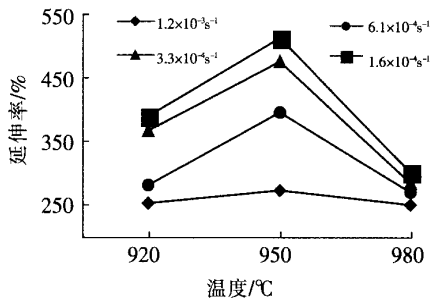


图1 不同初始应变速率下的试验温度对合金延伸率的影响

Fig.1 Effect of test temperature on percentage elongation of superalloy at different initial strain rates

表2 不同温度、不同初始应变速率下的应变速率敏感性指数 *m* 值

| 温度/°C | 初始应变速率 s ⁻¹ | 应变速率敏感性指数 <i>m</i> |
|-------|------------------------|--------------------|
| 920 | 1.0×10 ⁻⁴ | 0.447 |
| | 3.2×10 ⁻⁴ | 0.386 |
| | 9.6×10 ⁻⁴ | 0.309 |
| 950 | 1.0×10 ⁻⁴ | 0.458 |
| | 3.2×10 ⁻⁴ | 0.361 |
| | 9.6×10 ⁻⁴ | 0.306 |
| 980 | 1.0×10 ⁻⁴ | 0.398 |
| | 3.2×10 ⁻⁴ | 0.353 |
| | 9.6×10 ⁻⁴ | 0.302 |

型的超塑性。

2.2 显微组织

图2为GH4169合金板材超塑成形前的超细晶组织。由图可知,它是ASTM 13级的超细晶组织。

图3所示为GH4169合金板材在 $t=950^{\circ}\text{C}$ 、初始应变速率为 $6.1 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 的拉伸变形条件下,超塑拉伸变

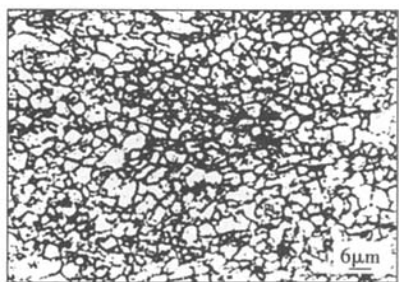


图2 GH4169合金板材超塑成形前的超细晶组织
Fig.2 Ultra microstructure of the GH4169 alloy sheet before superplastic forming

形后 ($\delta=395.5\%$) 的显微组织。由图3可知,超塑拉伸后,试样的晶粒仍为等轴晶。对比图3和图2可知,该合金在超塑性变形过程中晶粒发生了动态长大。对于超塑性材料,在超塑性变形过程中,晶粒长大是很普遍的。晶粒长大,可用扩散过程加以解释:空穴扩散到平行于拉伸轴方向的晶界,相应有一股原子流扩散到垂直于拉伸轴方向的晶界^[9]。然而超塑变形后仍为等轴晶组织,必定还有其他的机理在起作用,即GH4169合金在超塑变形过程中还发生了动态再结晶。

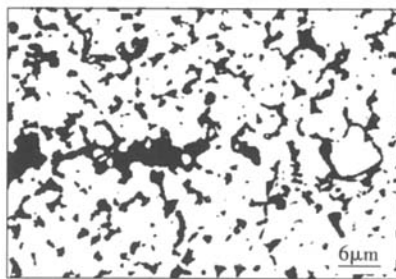


图3 GH4169合金板材在 950°C 、初始应变速率为 $6.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 的条件下超塑变形后 ($\delta=395.5\%$) 的显微组织

Fig.3 Microstructure of the GH4169 superalloy sheet after superplastic deforming at 950°C and the initial strain rate of $6.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ($\delta=395.5\%$)

2.3 火箭发动机用GH4169合金燃气歧管超塑成形

用GH4169合金材料和超塑成形工艺制作了形状复杂的火箭发动机燃气歧管,如图4所示。歧管不同部位的厚度分布情况见表3。

由表3可以看出,经超塑成形的歧管的壁厚有一定的变化,但最大壁厚差 $\Delta t=0.2\text{mm}$,满足设计所规定的 $\Delta t \leq 0.3\text{mm}$ 的要求。

超塑成形出的GH4169合金燃气歧管通过了

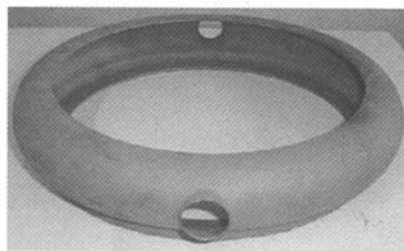


图4 超塑成形出的GH4169合金燃气歧管
Fig.4 Superplastically formed GH4169 alloy fuel manifold

表3 歧管壁厚测量部位分布

| | | | | | | |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 歧管 壁厚 测量 部位 图形 | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 壁厚/mm | 1.92 | 1.82 | 1.74 | 1.72 | 1.80 | 1.90 |

30MPa 液压压力、保压 10min 的液压试验以及 20MPa、保压 5min 的气密试验,达到了设计要求。

3 结论

(1)在典型的超塑成形应变速率范围($10^{-3}\sim 10^{-4}s^{-1}$)内,细晶 GH4169 合金在较宽的温度范围(920~980℃)内的延伸率都高于 250%, 最高延伸率可达 513%;并且应变速率敏感性指数 m 值都高于 0.3, 说明该合金具有好的超塑性性能。

(2)GH4169 合金在超塑成形过程发生了动态晶粒长大,并且超塑成形后仍为等轴晶。

(3)利用超塑成形,成形出了形状复杂的火箭发动机用 GH4169 合金燃气歧管, 其最大壁厚差 $\Delta t=0.2mm$,并且通过了 30MPa 液压压力、保压 10min 的液压试验及 20MPa、保压 5min 的气密试验。

参 考 文 献

- 1 Smith G D, Yates D H, Comley P N, et al. Microstructural and mechanical property characterization of superplastically formed inconel alloy 718SPF, Superalloys 1992. In: Antolovich S d, Stusrud R W, Mackay R A, et al. The Minerals, Metals & Materials Society. 1992. 43~52
- 2 Yeh M S, Tsau C W, Chuang T H. Evaluation of the superplastic formability of SP-Inconel 718 superalloy. Journal of Materials Engineering and Performance, 1996, 5(1): 71~77
- 3 Torisaka Y. Superplasticity and internal friction of Nickel-base superalloy. Acta Metal, 1991, 39: 937
- 4 Mahoney M W, Crooks R. Superplastic forming of inconel 718. In: Superplasticity in Aerospace. Heikkinen H C, McNelley T R Ed. The Metallurgical Society, 1988. 331~345
- 5 Murray W Mahoney. Mechanisms of superplastic flow in inconel 718. Superplasticity and Superplastic Forming, The Minerals, Metals & Materials Society, 1988. 73~77 (责编 晓煜)

Superplasticity and Superplastic Forming of GH4169 Superalloy for Complicated Shape Component

[ABSTRACT] The superplasticity and superplastic forming of GH4169 superalloy sheet are studied. The result shows that in the range of typical superplastic forming strain rates ($10^{-3}\sim 10^{-4}s^{-1}$), the percentage elongation of the fine-grain GH4169 superalloy are higher than 250% within wider temperature scope (920~980℃), and the maximum elongation can be up to 513%. The strain rate sensitivity m is higher than 0.3. Dynamic grain growth of superalloy appears during superplastic forming. And after superplastic deforming, the grain of the GH4169 superalloy is still equiaxial. A GH4169 fuel manifold of an aircraft is superplastically formed, and the superplastically formed GH4169 manifold is tested by 30MPa hydraulic pressure for 10min and by 20MPa air pressure for 5min.

Keywords: Superalloy GH4169 Superplasticity Superplastic forming