

# 显微组织对 TiAl 基合金超塑性的影响

## Effect of Microstructure on the Superplasticity of TiAl-Based Alloy

邓忠勇, 黄伯云, 贺跃辉, 刘 咏

(中南工业大学粉末冶金研究所, 长沙 410083)

DENG Zhong-yong, HUANG Bo-yun, HE Yue-hui, LIU Yong

(Central South University of Technology, Changsha 410083, China)

[摘要] 研究了两种不同组织的 TiAl 合金在较低温度下的超塑性行为。结果表明, 原始显微组织对 TiAl 基合金的超塑性有很大影响, 其中非平衡的热变形态组织在 1075 ℃,  $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  条件下获得了 517% 的延伸率, 远高于平衡双态组织 (333%)。分析认为, 非平衡态组织中的高的位错密度使其在高温变形过程中容易发生位错缠结, 由此产生的硬化效应能促使缩颈转移, 从而获得高延性。

[关键词] TiAl 合金; 超塑性; 显微组织

[中图分类号] TG111 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4381 (1999) 12-0026-02

**Abstract:** The superplastic behavior of a Ti-46.7Al-2.2Cr (at%) alloy with two different microstructure was investigated under lower temperature (1075 ℃). The elongation obtained in hot-deformed material (517%) was much higher than that in duplex material (333%), which shows that the initial microstructure has great influence on the superplasticity of TiAl-based alloy. Dislocation network is easy to form in hot-deformed material during superplastic deformation because of the high density of initial dislocation and thus strengthened the material. In this way, the local necking will be transformed to other area and thus the uniformity of deformation is preserved.

**Key words:** TiAl alloy; superplasticity; microstructure

TiAl 基合金由于具有高的的高温强度和良好的高温抗蠕变性能, 并且比重较小, 因而被认为是很有发展前途的新一代高温结构材料。但是, 其较差的冷、热塑性变形能力阻碍了这种材料的实用化<sup>[1,2]</sup>。为了解决这个问题, 研究人员提出了许多特殊的成形工艺, 其中超塑性成形被认为是一种有效手段而引起广泛关注<sup>[3~5]</sup>。目前已开展的研究工作多集中在具有平衡态组织的双相 TiAl 基合金上; 本工作分别研究了具有平衡态和非平衡态显微组织的 TiAl 基合金材料在较低温度范围内超塑性行为<sup>[6]</sup>, 并比较了其异同。

### 1 实验过程

试验用合金的名义化学成分为 Ti-46.7Al-2.2Cr (at%), 采用水冷铜坩埚真空感应熔炼而成。为了保证

成分的均匀性, 铸锭制备时采用了重熔技术, 并在 1040 ℃ 进行 48h 的均匀化退火。采用电火花线切割从铸锭中切取尺寸为  $\phi 85 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的坯料, 经过 1250 ℃ 进行的 HIP 处理, 消除铸造过程中产生的疏松后, 再通过包套锻复合热机械处理<sup>[7,8]</sup> 获得锻坯。板状拉伸试样采用电火花线切割切取, 试样表面与锻造方向垂直, 标距尺寸为  $6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。其中热变形态组织试样直接从锻坯中切得, 双态组织试样则经 1250 ℃/4h 热处理后再进行切割。高温拉伸在 Shimadzu AG-100KNA 试验机上进行。试验所用加热炉为三段加热式, 控温精度为  $\pm 3$  ℃。由于试验是在空气中进行, 为防止 TiAl 基合金在试验温度下发生氧化而影响拉伸性能, 在试样标距部分涂覆了一层防氧化涂料。

超塑性拉伸试验在 1075 ℃ 以  $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的应变速率进行, 试验过程中通过不断调整夹头速率获得近似恒应变速率的条件。应变速率敏感系数采用步进式应变速率突变法测量。材料显微组织的观察在 Leica-Quantimet

[收稿日期] 1998-10-11; [修订日期] 1999-10-05

[基金项目] 863 高技术基金项目 (715-0050-0004)

型光学显微镜下进行, 采用的浸蚀剂为 2%  $\text{HNO}_3$ -1%  $\text{HF}$ -97%  $\text{H}_2\text{O}$  (vol % )。

## 2 实验结果

实验采用的热变形态 TiAl 基合金和双态组织 TiAl 基合金的显微组织如图 1 所示。由此图可看出, 经包套锻复合热机械处理后, 原始铸态粗大晶粒得到了显著细化, 并且在整个试样内组织都很均匀, 其中热变形态组织的名义晶粒尺寸小于  $10\mu\text{m}$ , 而双态组织的晶粒度在  $20\mu\text{m}$  左右。

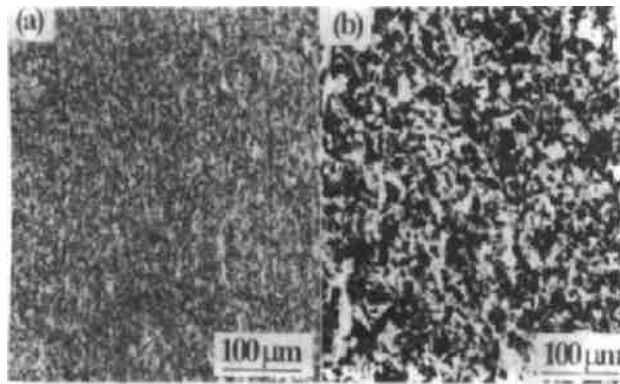


图 1 TiAl 基合金显微组织的金相照片

(a) 热变形组织; (b) 双态组织

Fig. 1 Micrograph image of TiAl matrix alloy

(a) hot-deformed; (b) duplex

图 2 所示为步进式应变速率突变法实验的结果。结果表明两种组织的材料在较宽的应变速率范围内都表现出高的应变速率敏感性 ( $m > 0.3$ ), 具有良好的超塑性变形潜力。

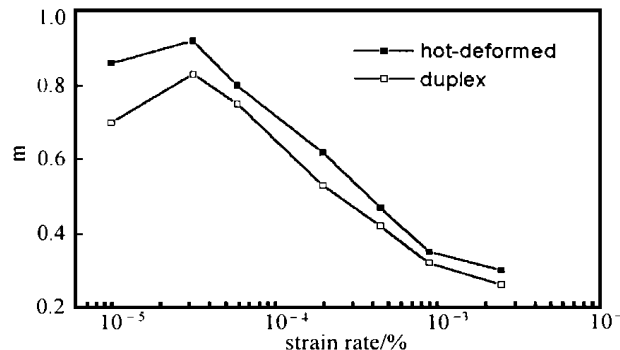


图 2 TiAl 基合金  $m$  值与应变速率的关系曲线

Fig. 2 Relationship between  $m$  and strain rate of TiAl alloy

两种组织的试样分别在 1075 以  $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的应变速率进行超塑性拉伸。其中双态组织试样的最终延伸

率为 333%, 而热变形组织的最终延伸率高达 517%, 说明两种组织都具有较好的超塑性变形能力, 并且组织的差异对超塑性有很大影响。

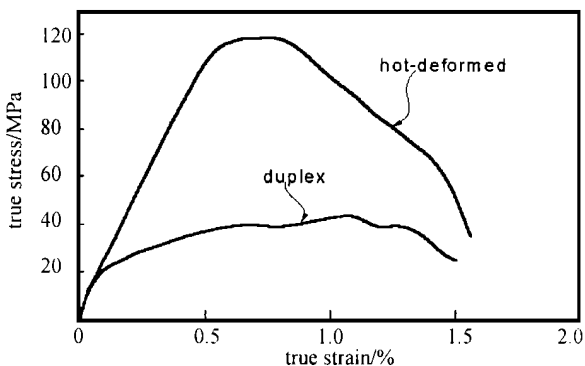


图 3 TiAl 基合金在超塑性拉伸过程中的应力-应变曲线

Fig. 3 The stress-strain curve of TiAl alloy at tension

## 3 讨论

TiAl 基合金铸锭经包套锻复合热机械处理后, 显微组织得到显著细化, 其中热变形组织的名义晶粒尺寸小于  $10\mu\text{m}$ , 而经过后续热处理获得的双态组织, 其晶粒尺寸也不超过  $25\mu\text{m}$ 。超塑性拉伸试验表明两种组织都具有较高的应变速率敏感性, 并且都获得了较高的拉伸延伸率, 其变形行为具有明显的细晶超塑性的特点。从实验结果来看, 处于非平衡状态的热变形组织的超塑性变形潜力更大。分析认为这是两个方面的原因造成的: 首先, 由于热变形组织更加细小, 虽然在高温拉伸过程中晶粒会有所长大, 但由于温度较低, 其晶粒尺寸仍比双态组织的小。从细晶超塑性的特点出发, 晶粒越细小, 对应的超塑性越好, 所以热变形组织表现出更高的延伸率; 其次, 由于超塑性变形是在特殊条件下进行的 (高温, 低应变速率), 其变形行为与常规变形有很大不同。W. B. Lee 等<sup>[3]</sup>在研究中发现, TiAl 基合金在高温拉伸时, 其流变曲线应变硬化的趋势越明显, 则表现出的超塑性越好, 延伸率越高。而图 3 的结果显示, 热变形态组织比双态组织表现出更加明显的应变硬化的特点, 这是由于热变形态组织未经过中间热处理, 晶粒内保留了较高的位错密度, 在随后的慢速热变形过程中, 随着新位错的不断产生, 就容易形成位错缠结, 而引起应力水平的升高; 另外, 当试样中出现了局部缩颈时, 会导致该区域内的应变速率升高, 如果材料的  $m$  值高, 则应变速率的升高会使缩颈区内的材料产生强化, 使变形向

(下转第 43 页)

盘件的水平 ( 见表 3 ) 。经某机超转及额定转速状态下的强度计算表明, 应力储备明显优于国内目前综合性能最好的涡轮盘材料 GH4169。粉末盘的最小破裂转速为

73575r/ min, 最小破裂比 1.64。低循环寿命也能满足设计任务书的要求。本项目在 B752 高速超转和疲劳试验器上按国军标涡轴发动机通用规范, 成功地进行了高转

表 3 合金及盘件性能数据对比

Table 3 Comparison of properties of Rene 95 and FGH 95

	室 温 拉 伸				650    拉 伸				650 / 1034MPa		538 R= - 1
	$\sigma_b$ / M P a	$\sigma_{0.2}$ / M P a	$\delta$ / %	$\psi$ / %	$\sigma_b$ / M P a	$\sigma_{0.2}$ / M P a	$\delta$ / %	$\psi$ / %	$t$ / h	$\delta$ / %	$\Delta\epsilon$ = 0.78%
Rene 95 A 级标准	1586	1241	10	12	1427	1151	8	10	> 50	> 3	> 6000
FGH95 合金	1728 ~ 1731	1331 ~ 1344	16.4 ~ 17. 0	15. 3 ~ 16. 0	1513 ~ 1534	1220~ 1228	10. 0 ~ 10. 8	13. 5 ~ 16. 1	96 ~ 126	3. 6 ~ 5. 2	> 40000
Rene 95 同类发动机 实测值	1558 ~ 1654	1234	11 ~ 17	15 ~ 19	1468 ~ 1510	1082~ 1144	14	17			
FGH95 某机盘 实测值	1637 ~ 1680	1250 ~ 1331	17. 4 ~ 20. 0	24. 4 ~ 29. 3	1569 ~ 1651	1134 ~ 1220	10. 4 ~ 20. 7	15. 3 ~ 20. 7	73 ~ 186	4. 8 ~ 6. 8	> 100000

速、高负荷、复杂结构粉末盘件的超转 ( 115% ) 、低循环疲劳 ( 9000r/ min ~ 45000r/ min ) 及振动模态试验, 试验后盘件经过荧光无损检测未发现异常。装有粉末涡轮盘的发动机试车性能达到了设计指标, 通过了国家评审。

[ 作者简介 ] 汪武祥 ( 1941- ) , 男, 高级工程师, 长期从事粉末高温合金和粉末材料的研究工作。联系地址: 北京 81 信箱 15 分箱 100095

\*\*\*\*\*

( 上接第 27 页 )

未缩颈区转移; 由于缩颈的发展受到阻碍, 从而延缓了断裂的发生; 而热变形材料的  $m$  值比双态材料的高, 因而强化效果更好。正是以上几个方面的原因, 使得热变形态组织表现出更高的塑性。直接采用热变形态组织进行超塑性变形既省去了一道热处理工序, 又能获得更大的变形率, 这无疑对 TiAl 基合金的工业化生产具有十分重要的意义。

4 结论

- (1) TiAl 基合金经包套锻复合热机械处理细化晶粒后, 在高温拉伸过程中表现出良好的超塑性。
- (2) 原始显微组织对 TiAl 基合金的超塑性有很大影响。其中非平衡态组织在 1075 和  $8 \times 10^{-5}s^{-1}$  应变速率条件下延伸率达到 517%, 而同等条件下平衡态组织仅能获得 333% 的延伸率。
- (3) 非平衡态热变形组织中保留了较高的位错密

度, 在超塑性变形过程中容易形成位错网络, 由此产生的应变硬化效应有助于缩颈的转移; 并且其晶粒较细,  $m$  值较高, 因而表现出更好的超塑性。

参考文献

[ 1 ] Kim Y. W. JOM, 1994 ( 7 ): 30.  
[ 2 ] 贺跃辉等. 矿冶工程, 1993, ( 13 ) 4: 60.  
[ 3 ] Cheng S. C. et al. Metal. Trans. A, 1992, 23A: 1509.  
[ 4 ] Lee W. B. et al. Scripta Metal. Mater., 1993, 23: 1403.  
[ 5 ] Koeppe C. et al. Mater. Sci. Eng., 1995, A 201: 182.  
[ 6 ] 黄伯云等. 金属学报, 1998, 34 ( 11 ): 1173.  
[ 7 ] 贺跃辉等. 中南工业大学学报, 1997, 28 ( 4 ): 355.  
[ 8 ] 黄伯云等. 中国有色金属学报, 1996, 6 ( 2 ): 52 ~ 55.

[ 作者简介 ] 邓忠勇 ( 1970- ) , 男, 硕士, 讲师, 从事 TiAl 基合金成形技术方面的研究。联系地址: 湖南长沙中南工业大学粉冶所 ( 410083 ) 。电话: ( 0731 ) 8877391