

# 用热化学处理改善 ( $\alpha + \beta$ ) 型钛合金的组织 and 力学性能<sup>①</sup>

宫 波

(中国科学院金属研究所, 沈阳 110015)

赖祖涵

(东北大学, 沈阳 110006)

新家光雄 小林俊郎

(日本丰桥技术科学大学)

## 摘 要

研究了以氢为临时合金元素的热化学处理(TCP)对( $\alpha + \beta$ )型钛合金的组织、拉伸性能和断裂韧性的影响。结果表明,几种TCP工艺对Ti-6Al-4V合金的魏氏组织和Ti-5Al-2.5Fe合金的锻造组织均有显著的细化作用,明显提高合金的屈服强度。作者提出的新工艺可提高Ti-5Al-2.5Fe合金的延伸率。TCP降低Ti-6Al-4V合金的断裂韧性( $J_{IC}$ ),但明显改善Ti-5Al-2.5Fe合金的断裂韧性。

**关键词:** Ti合金 热化学处理 氢 显微组织 力学性能

Ti合金的热化学处理(TCP),是近年来出现的利用氢作为临时合金化元素的新技术<sup>[1]</sup>,其应用之一是细化钛合金的显微组织,提高合金的强度。新近报道的几种组织细化工艺有:高温氢处理(HTH)<sup>[2]</sup>,相图固溶处理(CST)<sup>[3]</sup>, $\beta$ 固溶氢处理( $\beta$ Q-HDH)<sup>[4]</sup>。TCP一般可明显提高合金的拉伸强度,但却导致不同程度的塑性损失<sup>[5]</sup>。目前,TCP对Ti合金断裂韧性的影响尚不十分清楚。本文研究并比较几种TCP工艺对( $\alpha + \beta$ )型钛合金的组织、拉伸性能和断裂韧性的影响。在一定条件下,合金的综合性能可用TCP获得改善。

## 1 实验方法

实验材料为Ti-6Al-4V板材(25mm)和Ti-5Al-2.5Fe锻材( $d$  60mm),合金的化学成份见表1。两合金的初始组织分别为魏氏组织和锻

造组织。

表1 实验所用钛合金的化学成份(wt.-%)

合金	Al	V	Fe	C	N	O	H
Ti-6Al-4V	5.96	4.09	0.15	0.010	0.093	0.0034	0.005
Ti-5Al-2.5Fe	4.99	<0.01	2.37	0.01	0.016	0.100	0.0023

上述二种合金采用的TCP工艺及渗氢后试样的氢含量列于表2。在流动氢气氛下进行渗氢处理,氢压为0.1MPa。Ti-6Al-4V和Ti-5Al-2.5Fe在氢气氛下的 $\beta$ 转变点分别为1063K和1023K<sup>[6]</sup>。真空( $1.33 \times 10^{-3}$  Pa)退火后试样的最终氢含量小于0.002wt.-%。表中TCP1和TCP2(TCP2')与文献报道的工艺相似,均包含 $\beta$ 固溶处理;TCP3(TCP3')和TCP4(TCP4')为作者新提出的工艺<sup>[6]</sup>,其特点是在( $\alpha + \beta$ )双相区对合金进行TCP处理。

沿合金的轧制方向加工试样。拉伸试样标距部分的尺寸为 $d$  4mm $\times$ 20mm,拉伸实验在室温下进行,拉伸速率为 $8.33 \times 10^{-3}$  mm $\cdot$ s<sup>-1</sup>。

① 收稿日期:1993年4月6日

用三点弯曲试样测量断裂韧性  $J_{IC}$ , 试样的尺寸为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 55\text{ mm}$ 。通过直流电位差法确定裂纹的起始开裂点。

表2 实验采用的 TCP 工艺

合金	TCP*	H 含量 (wt.-%)
Ti-6Al-4V	TCP1: 1 123K, 2h + H <sub>2</sub> ( $\beta$ 固溶处理) → 923K, 2h + H <sub>2</sub>	1.46
	TCP2: 1 123K, 2h + H <sub>2</sub> ( $\beta$ 固溶处理)	0.76
	TCP3: 1 053K, 2h + H <sub>2</sub>	0.98
	TCP4: 1 023K, 2h + H <sub>2</sub>	1.12
Ti-5Al-2.5Fe	TCP2': 1 053K, 2h + H <sub>2</sub> ( $\beta$ 固溶处理)	1.11
	TCP3': 1 023K, 2h + H <sub>2</sub>	1.26
	TCP4': 1 003K, 2h + H <sub>2</sub>	1.32

\* 真空除氢条件为: 948 K, 2h,  $1.33 \times 10^3\text{ Pa}$

## 2 结果与讨论

### 2.1 TCP 对合金组织的影响

TCP 对 Ti-6Al-4V 合金显微组织的影响示于图1。该合金的初始组织为粗大的魏氏组织, 见图1(a)。合金经表2中的 TCP 工艺处理后, 组织均显著细化, 见图1(b)~(e)。应指出的是, 在  $\beta$  (H) 转变点以下进行氢处理的 TCP3 和

TCP4 也取得了较好的细化效果。但是, 以上这些工艺均无法消除原始  $\beta$  晶界, 即组织细化只是发生在  $\beta$  晶粒内。

Ti-5Al-2.5Fe 合金 TCP 前后的显微组织示于图2。该合金的原始组织为粗大的变形组织, 见图2(a)。合金经 TCP 处理后, 组织也同样得到显著细化, 见图2(b)~(d)。与 Ti-6Al-4V 合金不同的是, 该合金在 TCP 过程中要发生形变再结晶。因此, 原始  $\beta$  晶界可以消除。但由于 TCP2' 含有  $\beta$  固溶处理, 组织中又出现了的  $\beta$  晶界, 见图2(b)。在  $\beta$  (H) 转变点附近进行氢处理的 TCP3' 使组织部分  $\beta$  化, 但不十分明显, 见图2(c)。而在  $\beta$  (H) 转变点以下进行氢处理的 TCP4' 则有效地避免了  $\beta$  晶界的产生。

### 2.2 TCP 对合金拉伸性能的影响

TCP 对 Ti-6Al-4V 和 Ti-5Al-2.5Fe 合金的屈服强度 ( $\sigma_{0.2}$ ) 和延伸率 ( $\delta$ ) 的影响示于图3。二种合金经不同的 TCP 工艺处理后, 屈服强度均有不同程度的提高: Ti-6Al-4V 合金的平均提高幅度为 19%; Ti-5Al-2.5Fe 相对退火态 (973K, 2h) 提高约 11%, 相对锻造态提高 6%。上述二合金在强度方面的提高, 显然应归结于

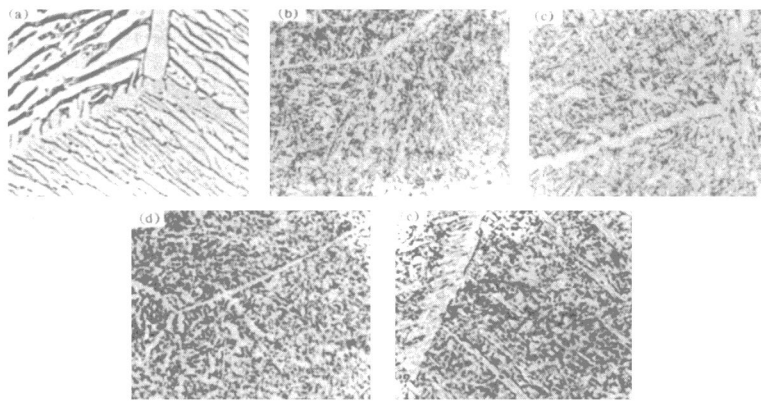


图1 TCP 对 Ti-6Al-4V 合金组织的影响 ( $\times 800$ )

(a)——魏氏组织; (b)——TCP1; (c)——TCP2; (d)——TCP3; (e)——TCP4

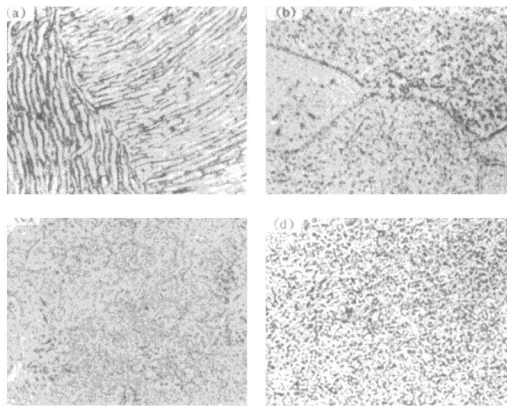


图2 TCP对Ti-5Al-2.5Fe合金组织的影响(×200)  
(a)—锻造态; (b)—TCP2; (c)—TCP3; (d)—TCP4

TCP所产生的组织细化。Ti-6Al-4V合金经TCP处理后, 延伸率均下降, 见图3(a)。其原因

与β晶界和晶内组织形态有关<sup>[3]</sup>。TCP对Ti-5Al-2.5Fe合金延伸率的影响分两种情况: 在β(H)转变点以上进行氢处理的TCP2<sup>'</sup>降低合金的延伸率, 而在β(H)转变点及β(H)转变点以下进行氢处理的TCP3<sup>'</sup>和TCP4<sup>'</sup>则提高合金的延伸率(无论相对退火态还是锻造态)。因此, TCP3<sup>'</sup>和TCP4<sup>'</sup>不仅可提高Ti-5Al-2.5Fe合金的强度, 还可以改善其塑性。主要原因是这些工艺在细化组织的同时消除了β晶界, 见图2(d)。

在TCP工艺中, 渗氢温度对合金的最终拉伸性能影响较大, 见图4。当渗氢温度选择在略低于合金的氢化β转变点时, 合金的强度和塑性具有最佳的配合。

2.3 TCP对合金断裂韧性的影响

TCP对Ti-6Al-4V和Ti-5Al-2.5Fe合金的断裂韧性 $J_{IC}$ 的影响示于图5。Ti-6Al-4V合金经几种TCP工艺处理后,  $J_{IC}$ 均较大幅度地下降, 且强度越高, 韧性越低。但Ti-5Al-2.5Fe合金经TCP处理后, 断裂韧性却得到了明显的改善(与退火态相比)。

一般而言, 合金在强度得到提高时, 往往

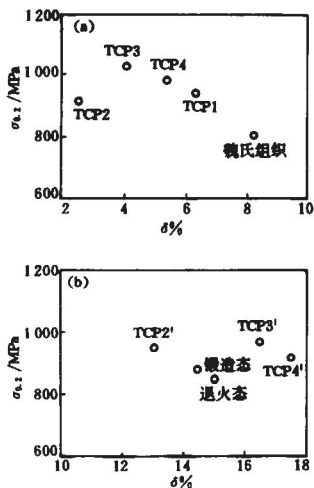


图3 TCP对(α+β)型钛合金的拉伸性能的影响  
(a)—Ti-6Al-4V; (b)—Ti-5Al-2.5Fe

伴随着韧性下降。对于  $(\alpha + \beta)$  型钛合金, 组织粗大时, 裂纹的扩展易于曲折或分枝, 消耗较多的能量, 因而对应较高的断裂韧性。合金的组织较为细小时, 裂纹的走向平直, 故对应于较低的断裂韧性<sup>[7]</sup>。从 Ti-6Al-4V 合金 TCP

前后的组织变化来看, 初始态组织粗大, TCP 处理后组织弥散细小, 因此, TCP 降低合金的断裂韧性与 Ti 合金的一般规律相同。但是, 由 Ti-5Al-2.5Fe 合金所得到的结果与此相反, 原因有待进一步查明。应当指出的是, 该合金的初始状态为锻造态, 组织为变形组织。经高温渗氢, 真空除氢的 TCP 循环后, 合金实际上经历了双重退火处理。形变 Ti 合金经双重退火后, 断裂韧性一般比简单退火有较大幅度的提高<sup>[8]</sup>。关于 TCP 对不同初始状态 Ti 合金断裂韧性的影响还需深入研究。

### 3 结论

(1) 本文研究的几种 TCP 工艺均可显著地细化 Ti-6Al-4V 合金的魏氏组织和 Ti-5Al-2.5Fe 合金的锻造组织。

(2) 各种 TCP 工艺均能明显提高合金的屈服强度。Ti-6Al-4V 合金经 TCP 处理后延伸率下降; Ti-5Al-2.5Fe 合金经新工艺处理后延伸率得到提高。

(3) TCP 降低魏氏组织的 Ti-6Al-4V 合金的断裂韧性 ( $J_{IC}$ ), 但可改善锻造组织的 Ti-5Al-2.5Fe 合金的断裂韧性。

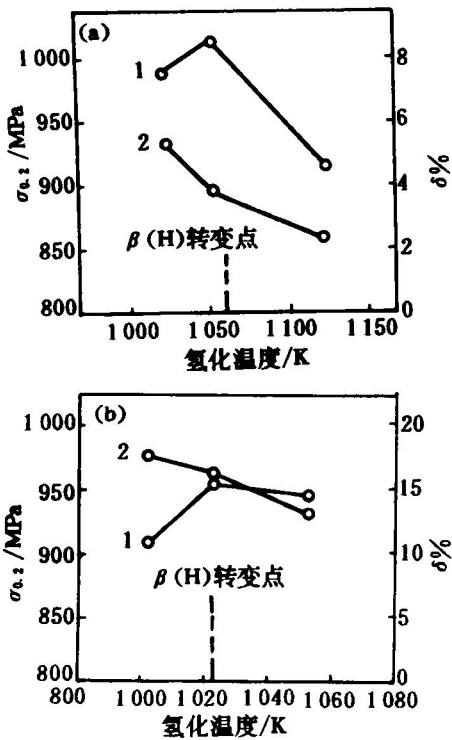


图4 氢化温度对  $(\alpha + \beta)$  型钛合金拉伸性能的影响  
(a) - Ti-6Al-4V; (b) - Ti-5Al-2.5Fe; 1 -  $\sigma_{0.2}$ ; 2 -  $\delta\%$

### 参考文献

- 1 Froes F H *et al.* JOM, 1990, 42(3): 26.
- 2 Eylon D, Yolton C F, Froes F H. In: Lacombe P, Tricot R, Beranger G (eds), Titanium Science Technology and Applications. Paris: Les Editions de Physique, 1989, 1523.
- 3 Smickley R J, Dardi L E. U S 4505764. 1985.
- 4 Levin L, Vogt R G, Eylon D *et al.* In: Lutjering, Zwicker U, Bunk W (eds), Titanium Science and Technology. DGM, Oberursel, 1985, 4: 2107.
- 5 Kohn D H, Ducheyne P. J Mater Sci, 1991, 26: 328.
- 6 宫波等. 金属学报, 1992, 28(10): 431.
- 7 Niinomi M *et al.* ISIJ International, 1991, 31(8): 848.
- 8 有色金属及其热处理. 北京: 国防工业出版社, 1981, 256.

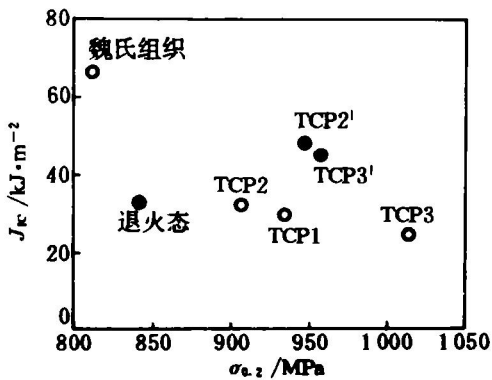


图5 TCP 对 Ti-6Al-4V 和 Ti-5Al-2.5Fe 合金  $J_{IC}$  的影响  
○ - Ti-6Al-4V; ● - Ti-5Al-2.5Fe