

文章编号: 1000-582X(2003)02-0127-05

氢对 Ti-Al-V 钛合金的冲击韧性及组织的影响

李远睿, 黄本多, 何庆兵

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要:在分析和试验了 Ti-Al-V 钛合金锻材的化学成分、金相组织和室温机械性能后, 将其加工成冲击试样, 采用人工吸氢法使其获得了不同的氢含量。继而, 测出了该种钛合金的冲击韧性值(a_K)与氢含量的关系曲线。随后, 用氢含量为 48 ppm、137 ppm、361 ppm 和 666 ppm 的 4 个样品和它们各自的冲击断口, 分别进行了金相和扫描电镜(SEM)的分析工作, 获得了不同氢含量的此种钛合金的金相组织及其氢化物在组织中的分布和形态; 再结合对不同氢含量试样的冲击断口的 SEM 分析结果, 得到了氢化物呈细小的薄片状析出及其在此种合金内的析出特征。

关键词: 氢; 钛合金; 冲击韧性; 组织

中图分类号: TG146.2⁺3

文件标识码: A

Ti-Al-V 钛合金是近 α 钛合金(按合金元素的相当量计算^[1]), 合金元素 Al 为 α 稳定元素, 而 V 是 β 稳定元素。该合金具有中等强度、高的韧性、良好的焊接及冷成型性能, 可用于船舶、航空、航天和核反应堆中作一些构件的结构材料。当其在水及水溶液介质内承受高温高压的服役过程中, 会有 $2H_2O + Ti \rightarrow TiO_2 + H_2 \uparrow$ 反应, 部分氢被钛吸收后渐渐地在其内部形成氢化物。钛及其合金中的氢化物会对其塑性产生严重的影响, 极易造成氢损伤现象。研究该合金的冲击韧性与

氢含量的关系, 得出其对该项指标影响的临界含量; 分析氢在组织中的形态和分布; 认识氢化物的析出特征, 以设法控制并减少氢损伤的危害, 对该种钛合金的工程应用有重要的意义。

1 Ti-Al-V 钛合金

1.1 化学成分

对试验用的 Ti-Al-V 钛合金锻材进行化学成分分析, 结果如表 1 所列(合金元素 Al 和 V 含量略)。

表 1 试材的化学成分

元素	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Cr	Mo	Sn	Mn	Cu	Ni
含量	—	—	0.06	<0.04	0.01	0.01	0.001	0.05	0.03	<0.01	0.052	0.005	<0.01	0.002

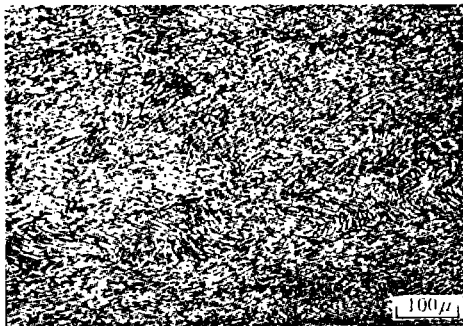


图 1 试材纵向金相组织

纵向取样并制样, 用 Kroll 试剂侵蚀后拍得其纵向组织如图 1 示。从此图看到, 组织没有明显的方向性, 但各 α 相群区域内的晶粒取向较为一致。晶粒细小, 均匀, 呈短杆状及等轴状, 按 YB27-64 标准评定, 实际晶粒度为 9.0~9.5 级。

1.2 力学性能

将所研究的 Ti-Al-V 钛合金锻材加工成标准试样, 在 Instron1332 设备和冲击韧性试验机上测得其室温机械性能如表 2 所示。

· 收稿日期: 2002-11-20

基金项目: 国家“九·五”项目(9821)

作者简介: 李远睿(1946-)男, 重庆人, 副教授, 从事金属材料的教学和科研工作。

表2 试材的室温机械性能

σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	Ψ /%	a_K /(J·cm ⁻²)
732	683	16.7	50.2	92.3

2 氢对 a_K 值的影响

2.1 人工吸氢

将加工好的一批 Ti - Al - V 钛合金夏氏冲击试样于 700 °C 下人工吸氢不同时间,于同温度下保温 2 h 并缓冷后取出,分析出各样品的氢含量如表 3 所列。

2.2 氢含量与 a_K 值的关系

测出不同的氢含量的 Ti - Al - V 钛合金的冲击韧

性值后,绘出其 a_K 值随氢含量而变化的关系曲线如图 2 所示。

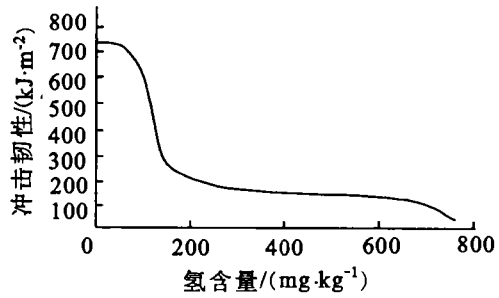


图2 含量与 a_K 值的关系曲线

表3 人工吸氢后各样品内的氢含量

编号	材料	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	D1	D2	E1	E2
氢含量	14	43	56	72	87	104	137	141	143	145	148	303	361	363	428	536	666	683

从图 2 看到,该种钛合金锻材中的氢含量在 75 ppm 以内时,起 a_K 值下降不明显;氢含量在 75 ~ 100 ppm 范围内,随着氢含量的增加, a_K 值开始降低;氢含量在 100 ppm 到 145 ppm 之间时冲击韧性值几乎呈垂直直线下降;而后,合金处于脆性状态,即是氢含量增多,其 a_K 值下降不明显。

3 组织分析

3.1 Ti - H 相图

图 3 是 Ti - H 二元系图。

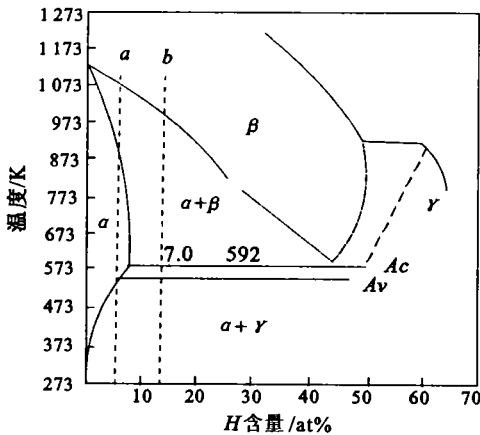


图3 Ti - H 二元系相图

从图 3 知,氢在 β - Ti 中的溶解度高达近 50% (at),而在 325 °C 时,在 α - Ti 中的溶解度仅约为 7.5% (at)。高温时溶于 β - Ti 中的氢,室温下几乎全部以硬而脆的 TiH_2 (γ 相) 化合物呈薄片状沿固溶体边界析出,使钛变脆^[2]。

由于氢化物的析出使其附近发生晶格畸变而产生应力场。浸蚀时,这些地方更容易被腐蚀。

3.2 氢含量 48 ppm 的组织

图 4 是氢含量 48 ppm 的 Ti - Al - V 钛合金的金相组织。组织为细小而均匀的短杆状及等轴状的 α 相和其间分布的少量的 β 相,但此金相照片还反应不出有氢化物的存在。

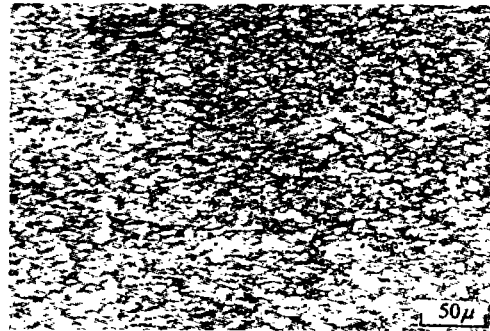


图4 氢含量为 48 ppm 的金相组织



图5 氢含量为 48 ppm 的冲击断口的 SEM 形貌

图 5 是该种氢含量的 Ti - Al - V 钛合金冲击断口的 SEM 照片:韧窝特点突出、撕裂棱高且顶部锐,是韧性断裂。但两晶或多晶交界处发现有微孔串及微裂纹,这是微量氢化物析出所致。

3.3 氢含量 137 ppm 的组织

图 6 是氢含量为 137 ppm 的 Ti-Al-V 钛合金的金相组织。 α 相呈短杆状和等轴状,少量的 β 相位于其间。 β 周围较暗,是由于氢化物从 β 相内析出并分布于 α/β 相界及 α 相晶内更容易侵蚀的结果。从图 7 所示的冲击断口的 SEM 形貌可以看到不仅两晶及多晶的界面上微孔增多韧窝变线,在剪切唇区还出现准解理现象;

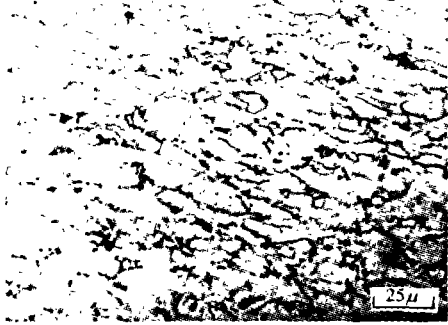


图 6 氢含量 137 ppm 的金相组织

象;另外,晶内出现微孔及二次裂纹等特征。这些都表明:氢的影响已较为严重。

3.4 氢含量 361 ppm 的组织

图 8 是氢含量为 361 ppm 的该合金的金相组织照片。清晰的看到:在 α 相内存在许多细针状的、彼此平行的氢化物。这说明,氢化物在此种钛合金中产生晶内析出时有惯析面特征。

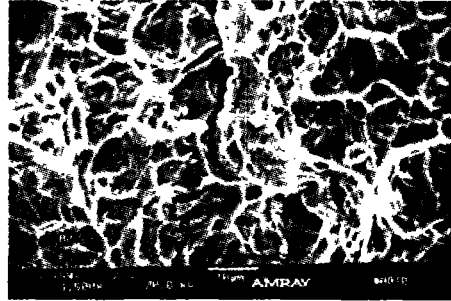


图 7 氢含量 137 ppm 的冲击断口的 SEM 形貌



图 8 氢含量 361 ppm 的金相组织

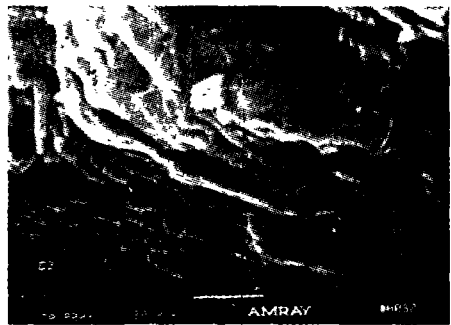


图 9 氢含量 361 ppm 的冲击断口的 SEM 形貌

图 9 为其冲击断口的 SEM 形貌, α 相呈现层状解理,层间还有氢化物的小碎片,表现出氢脆特征。

根据 α 相(hcp)的晶体结构特点,从图 8 和图 9 看,氢化物是以一定的惯析面析出的,故造成冲击时出现沿层状解理现象。

3.5 氢含量 666 ppm 的组织

该氢含量样品的金相组织如图 10 所示,可以清晰

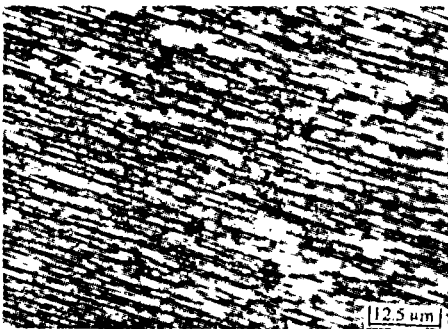


图 10 氢含量 666 ppm 的金相组织

地看到平行的 α 相条束间分布着大量的氢化物,反应出 $\beta \rightarrow \alpha + \gamma(\text{TiH}_2)$ 共析转变的特征。按 E.A 鲍利索娃^[1]的研究,这种组织的钛及钛合金的 α 相的基面 $\{0001\}_\alpha$ 是相互平行的,从而形成了相互平行的 α 束群。

图 11 是其冲击断口的 SEM 形貌:解理面上原 β 晶粒内 α 相呈平行片状分布,其间有大量凸出的氢化物细薄片。显然,这与其金相组织所反应出的情况一致。

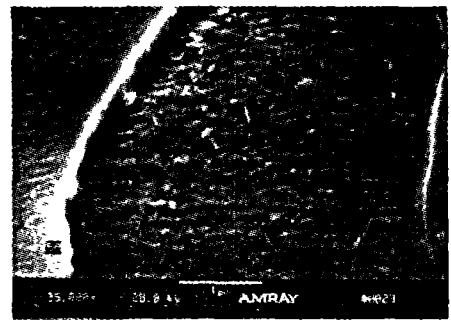


图 11 氢含量 666 ppm 的冲击断口的 SEM 形貌

4 讨 论

随着 Ti-Al-V 钛合金中氢含量的增加,组织中氢化物渐渐增多,而且析出和分布情况也在发生变化:氢含量较低时,微量的氢化物较多地存在于 α/β 相界面,而晶内尚难以从金相组织中发现,故合金呈韧性,仅晶界上有少量微孔存在;氢含量较多时,不仅晶界面上,在 α 相晶内也看到了氢化物,因而断口的 SEM 形貌上反应出晶界出现微孔及微孔串、韧窝变浅,有二次裂纹产生,甚至呈现出准解理现象等;当氢含量增高时,氢化物在晶内的析出量大增,并显示出以惯析面的析出特征,断口亦呈现层状解理状态。

钛及钛合金内的氢化物类型是多样的,但形态均为薄片状。其晶体结构各不相同,多数是面心立方(fcc)结构的氢化物。此外,还有面心四方(fct)的,有的至今尚未完全弄清楚其结构。钛合金的氢脆解理面常发生在 α 相(hcp)的(0001)_α和与基面偏呈 $14^\circ - 16^\circ$ 角的近基面 $\{10\bar{1}7\}$ _α或 $\{1018\}$ _α上^[3]。另外的资料^[4]也发现离基面约 $13^\circ - 14^\circ$ 角的面和靠近面 $\{10\bar{1}0\}$ _α、 $\{01\bar{1}0\}$ _α和 $\{1\bar{1}00\}$ _α等棱柱面上发生氢脆解理现象。

尽管钛及钛合金的基体 α 相具有 hcp 晶体结构,但其轴比 $c/a < 1.63$,所以它的易滑面不仅是基面 $\{0001\}$ _α,还可以是 $\{10\bar{1}0\}$ _α、 $\{01\bar{1}0\}$ _α和 $\{1\bar{1}00\}$ _α等棱柱面。室温下片状氢化物的析出主要沿着易滑面产生^[1]。在从 α 相(hcp)到氢化物的 fcc 或 fct 结构的改变可以通过(0001)_α面上的原子经过 $1/3 < 10\bar{1}0 >$ 的偏位错来实现,并满足 B 型氢化物的位向关系^[3],亦可通过 $\{10\bar{1}0\}$ _α 面上的原子经过 $1/6 < \bar{1}210 >$ 偏位错来完成结构的变化,并满足 γ 氢化物同基体 α 相间的位相关系^[5]。在 Ti-Al 合金中,随氢含量的增加,将有利于棱柱面的滑移,有利于 γ 氢化物的变形习性^[4]。

在低氢浓度的钛合金中, γ 氢化物为 fcc 结构,按其沉淀方式可将其分为 I 和 II 型两类氢化物^[6]。

当钛及其合金内存在足够的温度差或一定的应力时,即是氢含量仅 $35 \sim 40$ ppm,氢会向低温区和应力集中处聚集而析出氢化物,造成局部氢损伤现象。

从图 4 到图 7 表明:随着该钛合金中氢化物增加,氢化物开始仅仅是在晶界面上析出而晶内还难以从金相组织中确认,渐渐地金相组织中出现了氢化物在 α 相中的晶内析出;其冲击断口的撕裂棱由尖锐到呈现“卷叶”状,韧窝亦慢慢变浅;再逐步会呈现二次裂纹和准解理现象,多晶交界处有微孔聚集,从而使该种钛合金的冲击韧性开始显著降低(图 2)。

从图 8 可看到,合金中氢含量较高(361 ppm)时,氢化物在 α 相晶内呈细针状大量析出并近乎于平行分布。图 9 则反应出 α 相内因大量的氢化物从平行的惯析面间析出而产生层状解理特征,层间还可见到氢化物的小薄片存在。Meyn. D. A.^[3]和 Lazon. J. C.^[4]等人的研究认为这种氢含量的钛合金中氢化物析出的惯析面为 α 相的 $\{0001\}$ _α。基面和近基面(与基面呈 $13^\circ \sim 16^\circ$ 角)。

图 10 的组织是以 $\{0001\}$ _α 基面相互平行的 α 相条束群为基体^[1],而氢化物处于其间的组织形态。图 11 为其冲击断口的 SEM 形貌,更清楚的反应出了这种组织的特征:解理面上,氢化物碎薄片存在于层状 α 相间。C. Hammond^[5]等人研究认为:氢含量在 600 ppm 以上的钛合金中,氢化物的惯析面为 $\{0001\}$ _α。显然,对氢含量为 666 ppm 的样品的分析后,得到与 C. Hammond^[5]等人的研究相同的结果。

5 结 论

1) Ti-Al-V 钛合金中的氢的含量在 75 ppm 以内时,其冲击韧性不会明显下降;氢含量在 $75 \sim 145$ ppm 范围内,随着氢含量的增加,其冲击韧性几乎呈直线下降;氢含量达到 145 ppm 以上之后该种钛合金处于脆性状态。

2) 氢化物在该种钛合金的晶界和晶内析出,氢含量很低时金相组织中晶内析出不明显;随着氢含量的增加,其晶内析出特征渐渐显著,并呈现出惯析面特征。

参 考 文 献:

- [1] E. A. 鲍利索娃. 钛合金金相学[M]. 陈石卿译. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [2] 崔昆. 钢铁材料及有色金属材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [3] HAMMOND C, SARLING R A, PATON N E. Hydride Precipitation and Dislocation Substructures in Ti-5PctAl - 25PctSn [J]. METALLURGICAL TRANSACTIONS A, 1984, 813 - 815.
- [4] 陈常强, 李守新. 纯钛中 I 型氢化物的沉淀相及其疲劳行为[J]. 金属学报(增刊), 2000, 9: 241 - 243.
- [5] TSAI M M, HOWE J M. Lengthening Kinetics of $(01\bar{1}0)\gamma - \text{TiH}$ Precipitates in $\alpha\text{-Ti}$ in the Temperature Range of 25°C to 80°C [J]. METALLURGICAL TRANSACTIONS A, 1995, 2: 219.
- [6] 张延杰. 钛合金相变的电子显微镜研究(VI)——钛合金中的氢化物[J]. 稀有金属材料与工程, 1990, (1): 13 - 16.

Influence of Hydrogen on Impact strength and Microstructure of the Titanium Alloy Ti—Al—V

LI Yuan-ru, HUANG Ben-duo, HE Qing-bing

(College of Materials Science and Engineering in Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: After analyzed and tested the composition, microstructure and the mechanical property for the forging timber of the titanium alloy Ti—Al—V, Processed it into lash test samples, and made the samples having different hydrogen-content by the way of artificial hydrogen-absorption. Next, measured the impact strength values (a_k) of the titanium alloy in different hydrogen-content, and drawn the relation curve between the impact strength and the hydrogen-content.

Afterwards, four samples and themselves impact fractographies whose hydrogen-contents are 48ppm, 137ppm, 361ppm and 666ppm have been used for phases and the sweep electron microscopes, Known microstructures and shapes of the hydrogenate of the different hydrogen-content titanium alloy and that the hydrogenate is sheet and its distribution in the titanium alloy.

Key words: hydrogen; titanium alloy; impact strength; microstructure

(责任编辑 陈移峰)

~~~~~  
(上接第 109 页)

## Fracture Occurrence Mechanism and Control Measure Research of Generator and Compressor Bracket

XIONG Wei, DENG Zhao-xiang, CHU Zhi-gang, LIU Jian

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** During a minibus's practical road driving and engine test rig test for vehicle and engine reliability, the phenomenon of generator-compressor bracket fracture appears and leads the generator-compressor-crankshaft belt rupture. It seriously affects the vehicle's operation performance. The article carries through engine test rig test and analysis, using frequency and spectrum technology to identify the bad vibration source combining FEA. It also researches vibration's occurrence, formation, propagation and fracture mechanism. Based on this, the authors put forward countermeasure, which improves the dynamic characteristic of the system, decreases the vibration intensity and avoids the fracture of bracket and belt.

**Key words:** FEA; fracture; test analysis; resonance

(责任编辑 张小强)