

钛合金电子束焊接接头的氢行为

王亚军¹, 唐晓青¹, 刘 皓², 关 桥²

(1 北京航空航天大学, 北京 100083 2 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘 要: 采用恒载电解充氢的方法和 X 射线衍射分析方法, 研究了 Ti1023 电子束焊接接头引起氢致开裂氢含量阈值以及 Ti1023 合金基体与焊缝中由于相成分的不同造成对氢致开裂的敏感性的差异; 同时通过扫描电镜分析了不同充氢状态下试件的断口特征。采用等效人工时效的方法, 借助离子探针分析技术, 对 Ti1023 合金电子束焊接接头中氢的动态行为进行了研究。

关键词: Ti1023 钛合金; 电子束焊接; 氢致开裂

中图分类号: TG456.3 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2005)11-93-04



王亚军

0 序 言

β 钛合金是应用最广泛的一类钛合金。其中亚稳态 β 钛合金 Ti1023 经过适当加工处理后, 其强度、韧性和高周疲劳性能组合最佳, 近年在先进的战斗机和先进的民用飞机结构件上得到应用, 但大多是整体锻件加工结构。随着飞机结构件减重、降低制造成本等的进一步需求, Ti1023 合金需要用于焊接结构。而钛合金焊接结构往往面临氢致延迟开裂的危险, 在长期的使用过程中可能造成突发性破坏事故, 因此引起飞机设计师和工程师的关注。由于氢是造成接头延迟开裂最主要的因素, 所以研究氢在焊接接头中的行为就显得非常必要^[1]。

在钛合金发生的许多过程中, 氢的扩散是非常重要的。如各种加工处理过程的渗氢, 焊接时氢的再分配, 真空退火时的脱氢以及氢脆的扩展等。氢的扩散机理与氧和氮的扩散机理也不同。氧和氮原子离子化后的尺寸与晶格节点间距的尺寸差不多, 而这时晶格中的氢则像一个被电子气体遮蔽的质子, 在低温时, 质子从一个节点到另一个节点的跨越大大有利于氢的扩散。科学家们的研究表明, 氢在 β 相中扩散时的活化能大大小于在 α 相中的。因此具有 β 组织的钛合金的氢的扩散系数较低^[2]。

焊接形成的最大氢浓度比金属母材的平均氢浓度大 1~2 倍, 加上焊接残余力以及焊接缺陷, 造成焊接结构延迟裂纹倾向大, 因此对亚稳态 β 钛合金 Ti1023 焊接结构的氢致延迟开裂问题不容忽视。

1 Ti1023 电子束焊接接头引起氢致开裂氢含量阈值

1.1 试验方法

试验采用 1 mm 厚 Ti1023 合金板, 为锻造状态和固溶时效状态 (760 °C 2 h 水淬 + 520 °C 8 h 空冷), 化学成分见表 1。电子束焊接工艺参数见表 2。焊后线切割取 12 mm × 80 mm 拉伸试样, 焊缝位于试样中心。试样浸泡在电解质溶液中充氢, 改变电解液成分 (或加毒化剂) 和电流密度大小, 可改变充氢快慢和浓度。观察试样断裂过程, 记录滞后断裂时间, 若长时间未断 (通常以 100 h 为限) 则认为氢含量在临界浓度以下。

试验过程发现恒载充氢试件均在远离焊缝的基体上断裂, 为了鉴别焊接接头相成分的差别, 用 X 射线衍射方法进行物相成分分析, 并用扫描电镜观察拉伸断口形貌。

1.2 试验结果与讨论

1.2.1 恒载电解充氢试验

试验采用的电解质溶液是 H_2SO_4 或 $NaOH$ 溶液, 为提高吸氢速度和饱和吸氢量, 适当在电解质溶液中加入少量的毒化剂 As_2O_3 , 施加的电流密度在 1~500 mA/cm² 范围内调整。充氢断裂时间与充氢量之间的关系见图 1。

图 1 中直线部分趋向于氢的阈值, 因 100 h 为足够长的充氢时间, 则试验 I 中临界氢含量应在 110 h 附近, 为 $0.35 \times 10^{-3} C_w$ (重量分数浓度) 左右; 试验 II 中后两次之间的平均氢含量为临界氢浓度,

表 1 Ti023 合金的化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of 1023 Titanium alloy

Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Y	Ti
2.9	10.85	1.7	<0.04	0.01	0.02	0.001	0.07	<0.003	基体

表 2 Ti023 合金电子束焊接工艺参数
Table 2 EB welding parameters of 1023 Titanium alloy

项目	真空室顶部距离 试样表面的高度 h /mm	加速电压 U /kV	聚焦电流 I_f /mA	焊接速度 v ($m \cdot min^{-1}$)	电子束流 I_b /mA
试验 I	270	140	351	1.2	2.5
试验 II	325	140	351	1.2	2.5

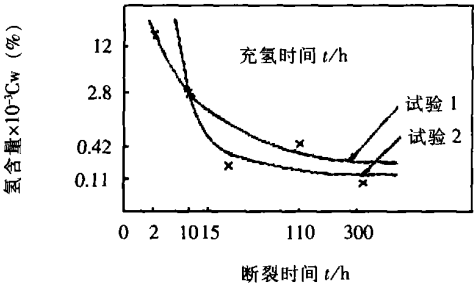


图 1 充氢断裂时间与氢含量的关系
Fig. 1 Relationship between fracture time and hydrogen content

估计为 0.25×10^{-3} 左右。即两种状态下氢含量的门槛值约为 $0.25 \times 10^{-3} \sim 0.35 \times 10^{-3} C_w$ (重量分数浓度) 之间。

1.2.2 X 射线衍射物相分析

所有充氢拉伸试验的试样滞后断裂均发生在远离焊缝的基体上, 表明基体对氢致滞后断裂的敏感性比焊缝更强, 这主要是由于焊缝与基体在相组织上有一定差异^[3]。

从表 3 可看出, 焊缝中 α 相在 40% 左右, 基体中锻造状态下 α 相占 62%, 固溶时效状态下也达到 51%。Ti023 合金基体中含有大量的 α 相 (包括初生 α 相和弥散次生 α 相), 这是构成氢脆的一个重要因素; 而在焊缝中, 因电子束产生高温熔池, 且冷却速度极快, 使大量高温 β 相保留到室温。这样在焊接接头大量充氢的情况下, 焊缝中 β 相溶氢量大; 而基体中因含有大量 α 相, 氢易于过饱和, 甚至生成氢化物, 极易引起氢致开裂。

1.2.3 断口分析

充氢试样拉断后对断口进行了扫描电镜观察, 所有断口均发现了氢脆特征^[4,5], 见图 2~图 5。在试验 I 中, 第一种充氢条件下, 充氢电流最大, 充氢

速度最快, 充氢量高达 $12 \times 10^{-3} C_w$, 其断口见图 2 为典型的沿晶断裂; 第二种充氢条件下, 充氢速度也很快, 充氢量达到 $2.8 \times 10^{-3} C_w$, 见图 3, 具有沿晶和准解理特征; 而在第三种情况下, 充氢速度很慢, 110 h 才断, 充氢量 $0.42 \times 10^{-3} C_w$, 见图 4、5 在断裂源区发现氢脆引起的二次裂纹, 裂纹产生以后, 断裂扩展区出现大量的韧窝网。综上所述, 充氢试样的断口具有明显的氢脆特征, 如沿晶、解理、准解理等^[6], 而且随充氢速度或充氢量的改变, 断口形貌也有一定的变化。

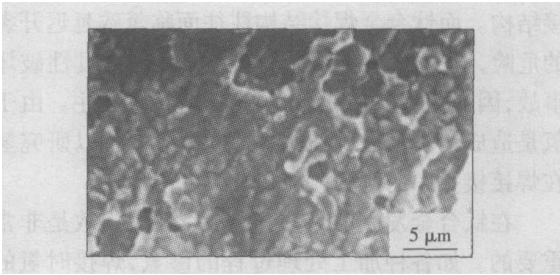


图 2 第一种充氢条件下断裂源特征
Fig. 2 Characters of fracture source in the first hydrogen charging condition

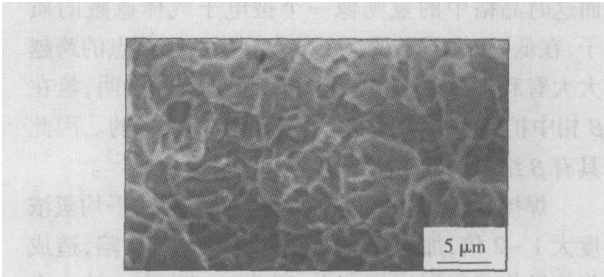


图 3 第二种充氢条件下断裂源特征
Fig. 3 Characters of fracture source in the second hydrogen charging condition

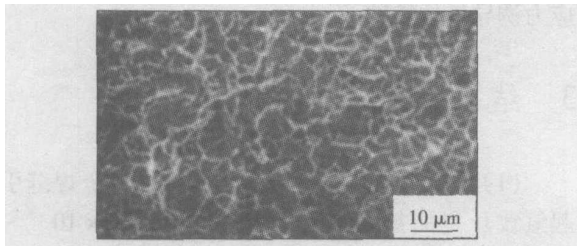


图 4 第三种充氢条件下断裂源特征

Fig 4 Characters of fracture source in the third hydrogen charging condition

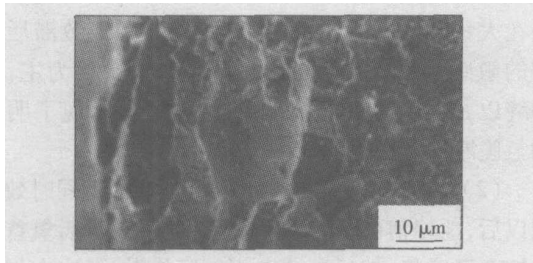


图 5 第三种充氢条件下边缘特征

Fig 5 Characters of grain in the third hydrogen charging condition

表 3 X射线衍射物相分析 (%)
Table 3 Analysis of x ray diffraction

位置	α 相含量
焊缝	36.41
锻造状态基体	45.37
固溶时效基体	62.51

2 Ti1023合金电子束焊接接头中氢的动态行为

2.1 试验方法

在电子束焊接的锻造状态 10 mm 厚的 Ti1023 圆板上切取焊缝两侧 10 mm 以内的焊接接头作成若干试片, 用 MA-2A 型离子探针分析仪线扫描, 测试焊接接头中不同时效状态下氢的连续分布情况和焊缝区残余应力的峰值。

2.2 试验结果与讨论

2.2.1 人工时效温度的确定

取若干 Ti1023 的小试块, 在高温电阻炉中设定成 150℃、200℃、250℃、300℃四个不同的温度, 分别保温一天。时效完毕后, 连同未处理的试块一起测定试样中氢含量的变化, 得到表 4 所示的结果。试验发现随着人工时效温度的增加, 试样中氢含量逐渐减少, 而 300℃处理时, 氢含量变化反而不大, 故选定 300℃为人工时效的温度。

表 4 Ti1023 合金电子束焊接接头人工时效试验的氢含量值

Table 4 Hydrogen contents of artificial aging of 1023 Titanium alloy weld

时效温度 $T/^\circ\text{C}$	氢含量 $\times 10^{-3} \text{ } \rho_w$
未处理	58
150	48
200	43
250	43
300	51

2.2.2 离子探针分析仪测试氢扩散再分布

对焊后未作人工时效的接头和人工时效 300℃分别保温 14 h、29 h、38 h 的接头制备成带焊缝的试样, 用离子探针分析仪沿接头横截面的上部进行线扫描, 得到一条连续的二次离子谱线, 见图 6^[7]。

由图 6a 可见, 焊完冷却到室温以后, 焊缝中心出现氢含量的一个低谷, 在焊缝两侧 (焊缝宽 1.2 mm) 的熔合线上, 成对出现氢的峰值; 而基体上氢分布平整而均匀。这是由于氢在钛及钛合金中的溶解度随温度升高而降低, 熔池中部的氢易向温度较低的熔池边缘扩散, 加上电子束焊接冷却速度快, 到达熔合区的氢来不及向外溢出, 焊后出现氢的第一次再分布。由于电子束焊缝窄, 热影响区很小, 所以基体中的氢分布均匀。

由图 6b 所示, 人工时效 14 h 以后, 熔合区的氢峰逐渐向焊缝中心迁移, 焊缝中心的氢含量回升, 基体保持稳定; 而图 6c、d 则显示到了 29 h 和 38 h 以后, 氢峰完全集中到焊缝中心。试验给出的氢含量是一个相对值, 实际上是氢含量对应的溅射二次离子谱线的高低。由于测试过程中离子束每次打在样品上都有电荷的积累, 造成电位差异, 使图中基体上氢含量差别较大, 实际上试样基体中的氢含量在人工时效过程中几乎没有变化。

2.2.3 人工时效等效性的验证

研究表明, 在 300℃人工时效过程中试样氢含量逸出较少, 基本上在接头中重新分布, 分布规律类似于自然时效过程。

为研究时效对残余应力的影响, 选取了人工时效 14 h 和 38 h 两试样。在作离子探针试验之前, 用 X 射线衍射的方法测量焊缝表面的残余应力, 分别取焊缝中点和近缝区内的同一点比较其残余应力的变化情况, 结果表明随着时效时间的延长, 焊缝区的纵向应力 σ_x 、横向应力 σ_y 有所下降, 但仍然保持拉应力状态, 这样在人工时效过程中, 焊缝中总存在残余拉应力, 与氢的应变场发生交互作用, 即产生所谓

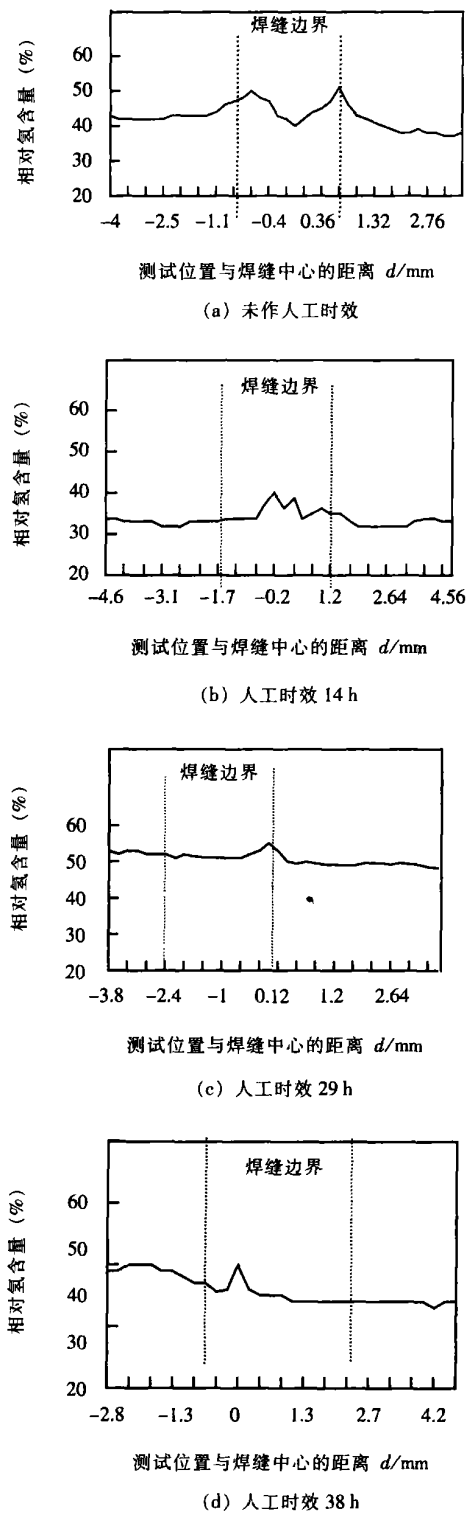


图 6 不同时效条件下的氢扩散再分布

Fig 6 Redistributon of hydrogen after d ifferent artificial aging conditons

应力诱导氢的扩散。

3 结 论

(1) 电解充氢试验估测出 Ti1023 合金焊缝引起氢致开裂的氢含量门槛值约在 $0.25 \times 10^{-3} \sim 0.35 \times 10^{-3} C_w$ 以上, 尽管试验采用的 Ti1023 材料平均含氢量很低, 但在粗晶区或焊接缺陷等有缺口效应的地方, 氢的富集程度若超过氢含量门槛值, 仍然有可能造成氢致开裂; Ti1023 合金电子束焊接接头在大量充氢的情况下, 基体对氢脆和氢致滞后开裂的敏感性大于焊缝, 是因为基体以 α 相为主, 而焊缝以 β 相为主; 通过断口形貌观察, 发现了明显的氢脆断裂特征。

(2) 用离子探针分析仪精确测量了不同时效时间以后, 氢峰值的位置和聚集程度, 发现焊后氢首先在熔合区富集, 然后逐渐向焊缝区扩散, 最终在焊缝区中央形成氢的峰值; 焊接接头人工时效结果的研究可模拟自然时效过程中氢的扩散和再分布规律。

(3) 通过 Ti1023 合金电子束焊接接头氢的行为研究, 为研究 β 和亚稳态 β 钛合金氢致延迟开裂的机理打下一定的基础。

参考文献:

[1] Christoph Leyens Manfred Peters Titanium and Titanium Alloys [M]. Wiley VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, 2003
[2] Колачев Б. А. Вакуумный от и г титановых [M], Конструкций, Москва, М АШИНОСТРОЕНИЕ, 1991. 213 с
[3] 褚武扬. 氢损伤和滞后断裂 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
[4] 王世中, 臧鑫士, 现代材料研究方法 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991
[5] 李华瑞. 材料 X 射线衍射分析实用方法 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994
[6] 田 燕. 焊接区断口金相分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
[7] 吴希孟, 朱英发, 李香波, 等编译. 前苏联轻合金焊接 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991

作者简介: 王亚军, 女, 1963 年 6 月出生, 博士研究生, 自然科学研究员, 发表论文 30 余篇。

Email wybantrf@sina.com

status of joint were evidently affected by changing of h , (i. e. beam offset on steel side), a small quantity of metal QCr0.8 melted down into weld as value of h was less, a large difference of microstructures and chemical composition existed in comparison of weld with base metal QCr0.8. With increasing of h , the microstructure distribution of joint becomes homogeneous gradually, but the bad fusion's status happened to QCr0.8 side in weld due to unbalanced heat input and rapid heat conduction of QCr0.8. Even if h increased in little range, base metal QCr0.8 may not be fusion, which resulted in forming joint of local fusion or lack of fusion.

Key words: electron beam welding; microstructure; phase composition

Hydrogen behavior in titanium alloy EBW joints WANG Ya-jun^{1,2}, TANG Xiao-qing¹, LIU Hao², GUAN Qiao² (1. Beijing hangkong university, Beijing 100083, China; 2. Beijing aeronautical manufacture technology research institute. Beijing 100024, China). p93 – 96

Abstract: The electrolytic hydrogen charging with constant current and X – ray diffraction were used to investigate the hydrogen content threshold of the hydrogen induced cracking for Ti1023 titanium alloy EBM joints and the effect of the microstructure phase on sensitivity of hydrogen induced cracking. The scanning electronic microscopy was employed to observe the fracture appearance on different hydrogen charging condition. By means of the artificial aging and ion probe analysis, the dynamic behavior of hydrogen in Ti1023 titanium alloy EBM joints was also studied in this paper.

Key words: Ti1023 titanium alloy; EBM; hydrogen induced cracking

Application of fuzzy-PID control on seam tracking for welding-robot

YE Jian-xiong, ZHANG Hua (school of Mechanical and Electronic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330029, China). p97 – 100

Abstract: A convenient and effective close loop control scheme, had been proposed to satisfy the aim of seam tracking based on the analysis of the welding-robot modeling and its control link in this paper. With the introduction of fuzzy controller and PID controller and with the adoption of the simulation on the differentiated modeling, the characteristics of the hybrid manipulator were illuminated. In the end, some conclusions were drawn on the base of analysis of the different response curves.

Key words: fuzzy; PID; hybrid-manipulator; self-adaptation; simulation

Ultrasonic signal analyses of spot welds in thin steel sheet ZHAO

Xin-yu, GANG Tie, YUAN Yuan (State key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p101 – 105

Abstract: The quality of spot welds in galvanized sheet metal was evaluated by using ultrasonic water immersion focusing method. The A-scan signal, B- and C-scan image features of spot welds were analyzed. The feasibility of evaluating the quality of spot welds by using the B-scan image was provided. By using the method, not only the kiss bonding and the perfect joint could be evaluated qualitatively, but also the pressure mark depth of the upper-bottom surface and the spot weld diameter could be calculated quantitatively. The accuracy of testing result was verified by contrasting the metallographs of actual spot welds cross section.

Key words: ultrasonic test; water immersion focusing; resistance spot weld

Comparison of fatigue property for TIG welding of TC4 and TA15

titanium alloy WANG Xiang-ming (Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China). p106 – 108

Abstract: As the researched objects, TIG welded test specimens of titanium TC4 and TA15 were selected, and their fatigue tests were done under different constant amplitude spectrums with four stress levels, respectively. According to the contrast analysis for the fatigue test results by use of three-parameter-model of fatigue life founded in this paper, the fatigue property of TA15 TIG weld was better than TC4 TIG weld appreciably in $10^4 \sim 10^6$ region. The possible affected factors were discussed.

Key words: Titanium; weld; fatigue

Experimenteal research on high Temperature CTOD of electron

beam welded joints of GH4169 alloy WU Bing¹, ZUO Cong-jin¹, LI Jin-wei¹, ZHANG Yan-hua², XIONG Lin-yu² (1. BAMTRI, Key laboratory for high energy density beam processing technology, Beijing 100024, China; 2. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China). p109 – 112

Abstract: In accordance with GB/T 2358-94, CTOD (crack-tip opening displacement) tests were conducted at 650 °C for electron beam welded joints of GH4169 alloy. According to the requirements of the standard, the specimen was a standard SE(B) (three point bending), the results were calculated using the P-V curves of parent material and weld metal. Finally, the test results were summarized and analysed.

Key words: electron beam welding; GH4169; high temperature; CTOD