

氢对 TC4 钛合金电子束焊接头疲劳裂纹扩展速率的影响

刘鹏涛¹, 赵秀娟¹, 刘昕², 齐健¹, 陈春焕¹, 王亚军², 任瑞铭¹

(1. 大连交通大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028 2 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘要: 采用充氢 CT 试样对 TC4 钛合金电子束焊接头的室温疲劳裂纹扩展速率进行了测定, 并对试样断口和接头各区显微组织进行了观察。试验结果表明: 充氢母材试样在低速扩展区和失稳扩展区的 da/dN 相对于未充氢试样有明显的提高, 但不同氢含量之间差别不大, 在稳态扩展区 (Paris 区), 氢对 da/dN 的影响很小。充氢焊缝试样在整个裂纹扩展过程中的 da/dN 明显提高, 且随着氢含量的增加而增加。断口分析结果表明氢的加入使得材料脆性增大, 促进了裂纹的扩展。在 Paris 区, 组织结构的转变对 da/dN 的影响显著, 电子束焊接头焊缝的针状马氏体组织比层片状 $\alpha + \beta$ 组织具有更高的抵抗裂纹扩展的能力。

关键词: 氢; TC4 钛合金; 电子束焊; 疲劳裂纹扩展速率; 断口

DOI 10.3969/j.issn.1005-5053.2011.3.010

中图分类号: TG 456.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2011)03-0052-04

电子束焊接是一种先进的高能束流加工技术, 具有能量密度高、加热范围窄、焊接变形小、焊缝熔深比大、生产效率高等常规焊接方法无法比拟的优点, 被广泛应用于航空、航天、电子及汽车等领域^[1]。钛合金因其具有比强度高、耐腐蚀性好、耐高温等优点, 成为航空航天行业不可或缺的结构材料。但钛合金的应用存在一个问题: 钛合金极易吸氢, 少量的氢可导致材料性能大幅度下降, 特别是当钛合金在氢气氛或在一些腐蚀性的液体环境中使用时, 容易因溶解的固溶氢或形成的氢化物造成氢脆^[2]。由于钛合金电子束焊接构件在设计的使用环境中存在吸氢的可能性, 因此, 研究氢对钛合金疲劳裂纹扩展速率 (da/dN) 的影响显得十分必要。

目前, 国内外学者关于氢影响钛合金疲劳裂纹扩展行为方面的研究较多, 已经有大量的研究成果^[3-9], 多数研究者认为氢对动载下钛合金的 da/dN 有明显的影 响, 并把疲劳裂纹扩展与氢化物联系起来。但氢对钛合金电子束焊接头疲劳性能影响方面的研究较少。疲劳裂纹扩展速率是决定构件疲劳行为的重要特征参量^[10], 为此, 本工作研究了含氢 TC4 钛合金电子束焊接头的疲劳裂纹扩展速率, 总

结了氢对 da/dN 的影响规律。

1 试验方法

试验材料为 20 mm 厚的 TC4 钛合金板材, 在 ZD150-15A 型电子束焊机上进行焊接。焊接工艺参数: 加速电压 150 kV, 聚焦电流 342 mA, 焊接速率 0.8 m/min, 电子束流 48 mA。焊接完成后, 在试板厚度方向的中间部位截取紧凑拉伸 (CT) 试样, 沿垂直于焊接方向分别截取焊缝试样和母材试样, 其中焊缝试样的缺口开在焊缝中心。采用标准 CT 试样, 其有效宽度 $W = 50$ mm, 厚度 $B = 10$ mm, 预制裂纹长度 $a_0 = 8.0$ mm。采用高温气体法进行充氢试验, 其工艺为: 750 °C /2h, 空冷至室温。通过调节氢气流速和充氢时间来获得不同的氢含量。试样充氢后采用高精度物理天平 (精确到 10^{-5} g) 测量含氢量, 3 组试样氢的质量分数 (下同) 分别为: 0.028%, 0.054%, 0.101%。

疲劳裂纹扩展试验按照 GB/T 6398—2000 进行, 采用恒载荷幅法, 波形为正弦波, 载荷应力比为 0.1。疲劳裂纹扩展速率 da/dN 采用割线法计算。C(T) 应力强度因子幅值 ΔK 按 ASTM E647 计算得出。

对不同氢含量的 TC4 钛合金母材和焊缝试样分别进行测试, 根据试验记录的数据, 绘制 da/dN -

收稿日期: 2010-09-07; 修订日期: 2010-10-18

作者简介: 刘鹏涛 (1980—), 男, 博士, 主要从事钛合金线性摩擦焊与电子束焊研究, (E-mail) liupp@163.com.

ΔK 曲线。采用 JSM-6360LV 型扫描电镜观察断口形貌及接头各区显微组织, 用 H-800 型透射电镜选区衍射技术分析相结构。

2 结果与分析

2.1 氢对裂纹扩展速率的影响

图 1 为不同氢含量的 TC4 钛合金母材试样的 $da/dN-\Delta K$ 曲线, 由图可见, 母材试样的疲劳裂纹扩展过程明显分为三个区, 即低速扩展区, 稳态扩展区 (也称 Paris 区) 和失稳扩展区。在低速扩展区, 未充氢试样的疲劳裂纹扩展速率最低, 氢含量 0.028% 试样的裂纹扩展速率略高于未充氢试样, 当氢含量增加到 0.054% 以上时, 裂纹扩展速率明显提高。在稳态扩展区 (Paris 区), 氢对裂纹扩展速率的影响较小, 不同氢含量试样的裂纹扩展速率非常接近。在失稳扩展区, 与未充氢试样相比, 充氢后裂纹扩展速率明显提高, 但不同氢含量之间裂纹扩展速率的差别不大。

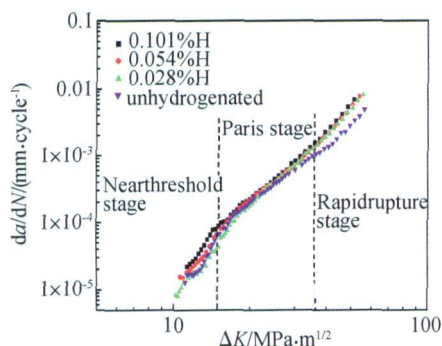


图 1 不同氢含量的母材试样的 $da/dN-\Delta K$ 曲线
Fig 1 $da/dN-\Delta K$ curves of base metal specimens with different hydrogen contents

不同氢含量的焊缝试样的 $da/dN-\Delta K$ 曲线如图 2 所示。在低速扩展区, 相同的应力强度因子幅值 ΔK 下, 充氢试样的裂纹扩展速率均高于未充氢试样, 但不同氢含量试样之间的裂纹扩展速率差别不明显。随着 ΔK 的降低, 未充氢试样的裂纹扩展速率迅速降低, 而充氢试样却降低缓慢, 因此, 充氢试样将有更低的裂纹扩展门槛值。在 Paris 区, 充氢试样的裂纹扩展速率明显高于未充氢试样, 且随着氢含量的增加, 裂纹扩展速率提高, 只是在氢含量由 0.054% 增加到 0.101% 时, 提高幅度变小, 但仍显示出氢的影响。在失稳扩展区, 氢含量对裂纹扩展速率的影响明显增大, 氢含量越高, 裂纹扩展速率越大。总之, 在裂纹扩展的全过程, 充氢焊缝试样的疲劳裂纹扩展速率均明显高于未充氢试样。

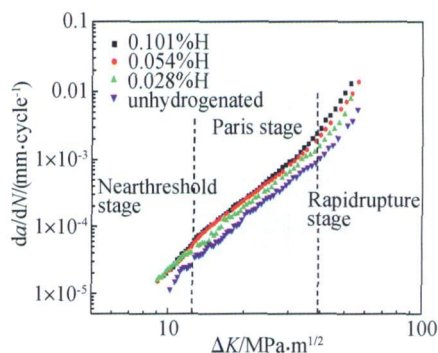


图 2 不同氢含量的焊缝试样的 $da/dN-\Delta K$ 曲线
Fig 2 $da/dN-\Delta K$ curves of weld bead specimens with different hydrogen contents

2.2 断口分析

观察结果发现, 氢对母材试样和焊缝试样断口形貌的影响规律基本相同, 各区的变化特点也趋于一致。在裂纹扩展的第 1 阶段, 即预裂区, 不同氢含量试样的断口形貌特征基本相同, 为解理断裂, 可看到河流花样和解理台阶, 同时也可看到二次裂纹。充氢试样比未充氢试样的二次裂纹多且尺寸大。在稳态扩展区, 不同氢含量的试样均有明显的疲劳条带, 并伴有大量的二次裂纹。充氢试样比未充氢试样的疲劳条带略宽, 随着氢含量的增加, 二次裂纹的数量增多, 裂纹宽度增大, 甚至有大块状脱落出现, 如图 3。这表明氢使得材料脆性增大。在失稳扩展区, 不同氢含量的试样均为典型的韧性断裂, 主要为等轴韧窝, 氢对这一区域断口形貌的影响不大, 只是充氢试样的韧窝较浅, 说明充氢后材料变脆, 如图 4 所示。我们知道, 影响裂纹扩展速率的因素很多, 但材料韧性的降低将会促进裂纹的扩展。

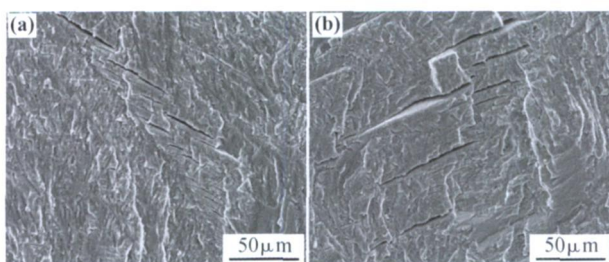


图 3 不同氢含量焊缝试样断口稳态扩展区形貌
(a) 氢含量 0.028%; (b) 氢含量 0.101%
Fig 3 Fracture morphologies in the stable crack growth region of weld bead specimens with different hydrogen contents (a) 0.028% H; (b) 0.101% H

2.3 显微组织分析

原始 TC4 钛合金母材组织为双态组织, 见图 5a 暗色为 α 相, 亮色为 β 相。观察充氢后母材的显

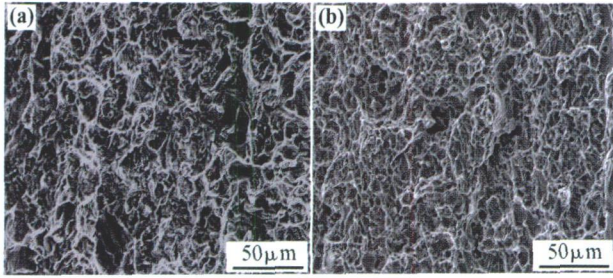


图 4 不同氢含量母材试样失稳扩展区形貌
(a)未充氢; (b)氢含量 0.101%

Fig. 4 Fracture morphologies in the rapid cracking region of base metal specimens with different hydrogen contents
(a) non-hydrogenated (b) 0.101% H

微组织发现,当氢含量从 0.028% 增大到 0.101% 时,母材的显微组织形貌变化不大,只是随着氢含量的增加,两相颜色趋近而不易区分,如图 5b 所示,这是因为氢的加入使得 α 和 β 两相的电势差接近,金相腐蚀后两相差别变得不明显^[11]。原始 TC4 钛合金电子束接头的焊缝组织是单一的由较粗大的原始 β 相转变而成的 α' 相,即密排六方马氏体,见图 6a,因为充氢试验是一个高温气相充氢过程,加热温度达到 750°C,相当于对钛合金进行了真空退火,焊缝的马氏体会发生分解,分解方式为 $\alpha' \rightarrow \beta + \alpha$ 图 6b 为氢含量 0.101% 的接头焊缝组织,可以看出,充氢后焊缝的组织转变成层片状 $\alpha + \beta$ 。对充氢试样的焊缝区组织进行选区电子衍射分析,证实了焊缝的马氏体发生了分解, α 相与 β 相交替析出,生成层片状 $\alpha + \beta$ 组织,如图 7 所示。随着氢含量从 0.028% 增加到 0.101%,焊缝区组织形貌变化不大。

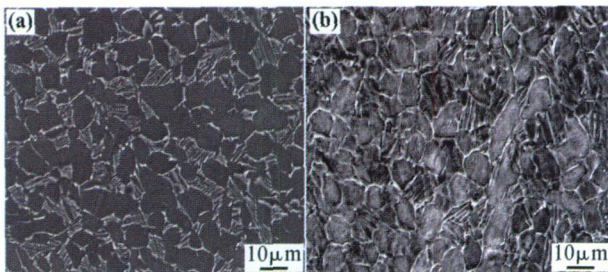


图 5 未充氢和充氢 0.101% 试样母材显微组织对比
(a)未充氢; (b)氢含量 0.101%

Fig. 5 Microstructures of base metal specimens
(a) non-hydrogenated (b) 0.101% H

在进行 TEM 观察时,接头显微组织中没有观察到氢化物析出,说明在氢含量较低时 ($\leq 0.1\%$),钛合金中的氢大部分以固溶方式存在,氢对钛合金疲劳性能的影响是一种氢致延迟断裂的方式。根据文献 [12],在疲劳裂纹扩展时,钛合金中固溶的氢在

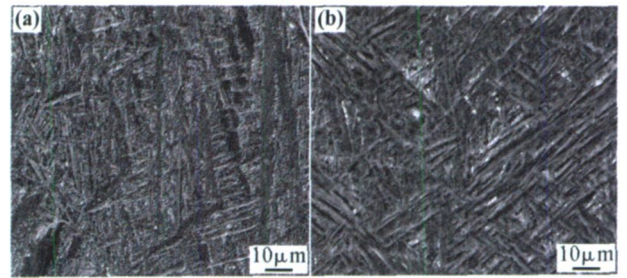


图 6 未充氢和充氢 0.101% 试样焊缝显微组织对比
(a)未充氢; (b)氢含量 0.101%

Fig. 6 Microstructures of weld bead specimens
(a) non-hydrogenated; (b) 0.101% H

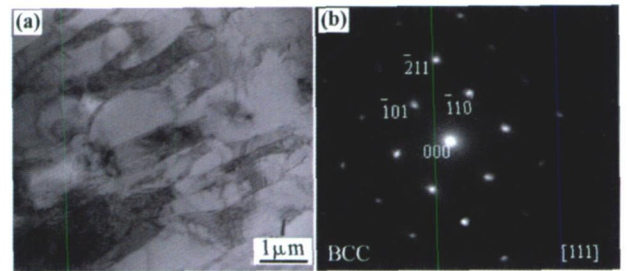


图 7 充氢 0.071% 焊缝组织 TEM 分析
(a) $\alpha + \beta$ 层片组织; (b) 相应 β 相的选区电子衍射分析

Fig. 7 TEM micrographs of weld bead of the joint with 0.071% H (a) BF image of $\alpha + \beta$;
(b) corresponding SAED pattern of β phase

应力梯度作用下向应力较高地区(裂纹尖端)扩散和聚集,导致在裂纹尖端析出氢化物,这种脆性氢化物相的析出导致和促进裂纹扩展。但氢原子的扩散需要时间,当氢原子在裂纹尖端扩散聚集形成氢化物的速率跟不上裂纹扩展的速率时,氢对裂纹扩展速率的影响较小。结合本次试验的结果得出,在稳态扩展区,不同氢含量母材试样的 da/dN 曲线非常接近,说明循环加载对材料造成的损伤大于固溶氢的影响,氢对 da/dN 的影响很小。对于充氢焊缝试样,在稳态扩展区,充氢试样的裂纹扩展速率要高于未充氢试样,因为充氢钛合金的焊缝组织结构发生了变化,由针状马氏体分解为层片状 $\alpha + \beta$,充氢后试样的裂纹扩展速率升高,说明显微组织的转变对稳态扩展区裂纹扩展速率影响显著。另一方面,这也说明了针状马氏体组织比细小的层片状 $\alpha + \beta$ 组织具有更高的抵抗裂纹扩展的能力。

3 结论

(1) 充氢母材试样的 $da/dN - \Delta K$ 曲线分为 3 个

区,在低速扩展区,当氢含量增加到 0.054% 以上时,裂纹扩展速率明显提高。在 Paris 区,氢对试样裂纹扩展速率的影响较小。在失稳快速扩展区,氢的存在明显提高了试样的裂纹扩展速率,但不同氢含量之间裂纹扩展速率的差别不大。对于焊缝试样,充氢试样的疲劳裂纹扩展速率在裂纹扩展的全过程均明显高于未充氢试样。

(2) 氢对 TC4 钛合金母材和焊缝断口形貌的影响规律基本相同,在裂纹预裂区和稳态扩展区,随着氢含量的增加,二次裂纹数量增多,且裂纹宽度增大,表明材料脆性增大。在失稳快速扩展区,不同氢含量的试样都为典型韧性断裂,充氢试样的韧窝较浅。

(3) 在 Paris 区,组织结构的转变对裂纹扩展速率有显著影响,电子束焊接头焊缝的针状马氏体组织比层片状 $\alpha + \beta$ 组织具有更高的抵抗裂纹扩展的能力。

参考文献:

- [1] 王亚军. 高能束流加工技术—电子束焊接 [J]. 机电信息, 1998 (2): 13–15.
- [2] NAKASA K, SATOH H. The effect of hydrogen-charging on the fatigue crack propagation behavior of β -titanium alloys [J]. Corrosion Science, 1996, 38(3): 457–468.
- [3] 唐志平, 彭楚峰, 何晓, 等. 氢对 Ti-2Al-2.5Zr 钛合金疲劳裂纹扩展速率的影响 [J]. 核动力工程, 1999, 24(6): 555–558.
- [4] 何晓, 沈保罗. 氢对 Ti-4Al-2V 钛合金疲劳裂纹扩展速

率的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4): 924–927.

- [5] BOYER R R, SPURR W F. Characteristics of sustained-bad cracking and hydrogen effects in Ti-6Al-4V [J]. Metallurgical and Materials Transaction (A), 1978, 9(1): 23–29.
- [6] CLARKE C F, HARDIE D, KEDA B M. The effect of hydrogen content on the fracture of pre-cracked titanium specimens [J]. Corrosion Science, 1994, 36(3): 487–509.
- [7] NAKASA K, HORITA M, SATOH H. Effects of hydrogen-charging on the fatigue crack propagation behavior of Ti-13V-11Cr-3Al alloy [J]. Japan Society of Materials Science, 1992, 41: 1248–1254.
- [8] NAKASA K, SHIMIZU T. Effects of hydrogen-charging on the fatigue crack initiation and propagation behavior of Ti-15 pctV-3 pctCr-3 pctAl-3 pctSn alloy [J]. Journal of Light Metals, 1995, 45(11): 643–648.
- [9] YEH M S, HUANG J H. Hydrogen-induced subcritical crack growth in Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science and Engineering (A), 1998, 242(1–2): 96–107.
- [10] 刘昌奎, 刘新灵. TA15 钛合金焊缝及热影响区疲劳扩展行为 [J]. 失效分析与预防, 2007, 5(1): 10–13.
- [11] 李晓华, 牛勇, 侯红亮, 等. 置氢 Ti-6Al-4V 合金显微组织演变与高温变形行为 [J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(8): 1414–1420.
- [12] 褚武扬. 氢损伤与氢致开裂 [M]. 北京: 冶金出版社, 1988.

Effects of Hydrogen on Fatigue Crack Propagation Rate of TC4 Alloy Electron Beam Welded Joint

LIU Peng-tao¹, ZHAO Xiu-jian¹, LIU Xin², QI Jian¹, CHEN Chun-huan¹, WANG Ya-jun², REN Ruiming¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning China; 2. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract The hydrogenated CT specimens were adopted to measure the fatigue crack propagation rate (da/dN) of TC4 alloy electron beam welded joints at room temperature, and the fracture surface morphologies of specimens as well as the microstructures of joints were observed. The results indicated that the da/dN of hydrogenated base metal specimens were higher than the non-hydrogenated ones in near-threshold stage and rapid rupture stage, but the specimens with various hydrogen contents were little differed from each other, and hydrogen showed little effects on da/dN in stable crack propagation stage (Paris stage). During the whole crack propagation process, the da/dN of hydrogenated weld bead specimens was obviously enhanced and increased with the increment of hydrogen content. The analysis results of fracture surface morphologies showed that the crack propagation was promoted by hydrogen owing to the increase of brittleness of titanium alloy. In Paris stage, the transition of microstructure of the material has an apparent effect on da/dN , and the acicular martensite at the weld bead zone of electron beam welded joint has a higher resistance to crack propagation than lamellar $\alpha + \beta$ structure.

Key words hydrogen; TC4 alloy; electron beam welding; fatigue crack propagation rate; fracture morphology