

AZ31B 镁合金电子束焊接接头疲劳裂纹扩展速率分析*

马征征¹, 王文先¹, 许海鹰^{2,3}, 左从进^{2,3}, 崔泽琴¹, 杨宏伟¹

(1. 太原理工大学材料科学与工程学院, 太原 030024;

2. 中航工业北京航空制造工程研究所, 北京 100024;

3. 高能束流加工技术国防科技重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 对 AZ31B 镁合金母材及其电子束焊接接头疲劳裂纹扩展速率进行研究, 测试缺口位于母材、焊缝、热影响区(HAZ)时 3 组试验的裂纹扩展门槛值及扩展速率, 并对 3 种试样疲劳裂纹扩展断口进行 SEM 分析。结果表明: 缺口位于焊缝的裂纹扩展门槛值高于母材及 HAZ, 且疲劳裂纹扩展速率小于母材及 HAZ。AZ31B 镁合金母材及 HAZ 疲劳裂纹扩展断口都呈现河流状花样, 为准解理脆性断口; 焊缝的疲劳裂纹扩展断口中有许多撕裂棱、韧窝, 表现出一定韧性, 断口为以脆性为主的韧-脆混合断裂; 随着裂纹扩展速率增大, 三者断口中的解理台阶变粗大, 疲劳条带变宽。

关键词: 电子束焊接; AZ31B 镁合金; 裂纹扩展速率; 疲劳断裂

Fatigue Crack Propagation Rate Analysis of AZ31B Magnesium Alloy Electron Beam Welding Joints

MA Zhengzheng¹, WANG Wenxian¹, XU Haiying^{2,3}, ZUO Congjin^{2,3}, CUI Zeqin¹, YANG Hongwei¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China;

3. National Science and Technology Key Laboratory of High-Energy Beam Machining Technology, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] The fatigue crack propagation rate of AZ31B magnesium alloy and its electron beam welding joints are restudied. The threshold value and fatigue crack propagation rate of compact tension [C(T)] of notches located in the base metal, weld-seam, HAZ are investigated, and the three types of samples are analyzed by SEM. The experimental results indicate that the threshold value of the notch located in weld-seam is higher than those of base metal and HAZ. The fatigue crack propagation rate of notch located in weld-seam is less than those of base metal and HAZ. The fracture of the fatigue crack propagation of AZ31B base metal and HAZ is river shape pattern, which is quasi-cleavage brittle fracture. There are many torn edges and plastic dimple in the weld-seam fracture of fatigue crack propagation, which shows a certain degree of toughness, and fracture is mixed ductile-brittle but brittle is main. With the fatigue crack propagation rate increasing, the cleavage steps become bulky in the three kinds of fracture, and the fatigue stripes become wide.

Keywords: Electron beam welding; AZ31B magnesium alloy; Crack propagation rate; Fatigue fracture

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.06.080

基于镁合金轻质高强的优良特性^[1], 用镁合金制造并代替服役的一些结构或零部件, 可使整个结构的重量大幅度减轻, 因而镁合金在航空航天、汽车、铁路、3C 等领域倍受青睐^[2]。

熔点低、导热快、热膨胀系数大等特点使得镁合金焊接性比较差, 普通的焊接方法很难实现可靠的连接,

* 基金项目: 国家科技重大专项 (2010ZX04007-041); 航空科学基金项目 (20105429001)。

因此要真正实现镁合金在工业结构中大量应用, 其焊接技术十分关键。结合镁合金的特性, 只有采用能量密度较高且易于实现自动化的高能束流焊接, 才能有效地提高镁合金焊接接头力学性能^[3-4]。

目前大多数承载结构采用的是焊接结构, 并且需要承受动载负荷。整个焊接结构在交变或者脉动载荷作用下, 其结构的力学性能会大大降低, 发生疲劳断裂时往往无明显的塑性变形^[5], 因此焊接接头的疲劳寿命对

于整个焊接结构是至关重要的。目前关于镁合金疲劳断裂研究主要集中于母材疲劳性能^[6-7]、断裂机制^[8-9]及其疲劳裂纹扩展机制^[10-11]等。而关于镁合金电子束焊接接头的疲劳性能涉足较少,疲劳数据相当缺乏,这与镁合金电子束焊接结构应用于实际工程所要求的研究准备还有相当大的差距。

随着断裂力学的出现,疲劳数据可以通过疲劳裂纹扩展速率来表示和说明。疲劳裂纹扩展速率是决定构件疲劳行为的重要特征参量,在评估结构的安全性、可靠性以及失效分析和寿命等方面有着重要的意义。因此本文对 AZ31B 镁合金电子束焊接接头进行疲劳裂纹扩展速率试验,重点研究焊缝、热影响区(HAZ)、母材的疲劳裂纹扩展特性。

1 试验材料及方法

本试验采用 10mm 厚的 AZ31B 镁合金热挤压成形的试件,其化学成分如表 1 所示。

电子束焊接试验采用型号为 ZD150—60C CV85M 的真空电子束焊机。焊前用机械打磨镁合金工件表面(尤其是对接表面)清除氧化膜,再用丙酮清洗以去除表面油污。焊接接头不开坡口,采用对接方式固定在工装夹具上,两板之间不留间隙。优化焊接工艺参数获得成形美观且均匀的焊缝。焊接工艺参数如表 2 所示。

表1 AZ31B镁合金化学成分(质量分数) %

Al	Zn	Mn	Ca	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
2.5~3.5	0.6~1.4	0.2~1.0	0.04	0.10	0.01	0.001	0.005	其余

表2 AZ31B镁合金电子束焊接工艺参数

加速电压 U / kV	焊接速度 v / (mm·s ⁻¹)	聚焦电流 I_f / mA	束流 I_B / mA
120	35	2188	33

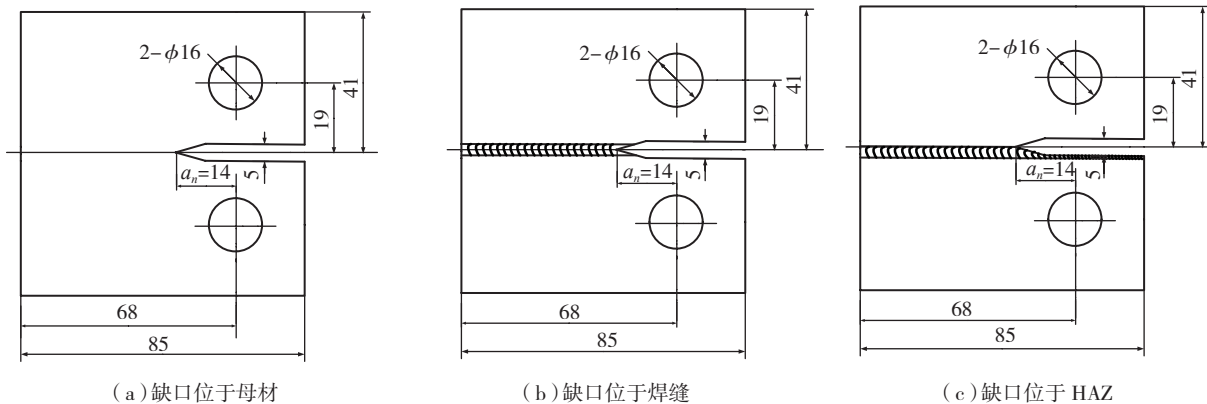


图1 AZ31B镁合金电子束焊接接头试样尺寸

Fig.1 Specimen dimensions of AZ31B magnesium alloy electron beam welding joints

疲劳裂纹扩展速率试验在 PLG—200D 高频拉压疲劳试验机上进行,疲劳试验机最大工作载荷为 200kN,所施加的载荷均为拉-拉载荷,应力循环比 $r=0.1$,振动频率 $f=100\text{Hz}$ 。

根据国家标准 GB/T 6398—2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》,试验采用标准 CT(紧凑拉伸)试样,其中宽度 $W=68\text{mm}$,厚度 $B=10\text{mm}$,切口长度 $a_i=14\text{mm}$,本试验采用恒 ΔP 试验,每组试验项目至少有 3 个有效试件。使用线切割进行切口加工。缺口分别开在母材、焊缝、热影响区的试样如图 1 所示。

疲劳裂纹扩展长度的测量采用目测法,使用放大倍数为 30 倍的读数据显微镜记录裂纹扩展过程中的裂纹尺寸 a ,同时记录循环次数 N 。为了便于读取裂纹长度,使试件表面保持一定的光洁度,在试件上每隔 1mm 标记一次。以所测裂纹长度 a 为纵轴,载荷循环次数 N 为横轴,绘成 $a-N$ 曲线。由 $a-N$ 曲线中任一裂纹尺寸 a_i 处的斜率,即可知其扩展速率(da/dN);同时,由已知载荷 ΔP 和 a_i ,还可以计算相应的 ΔK_i 。这样就由 $a-N$ 曲线得到了一组 $[\Delta K_i, (da/dN)_i]$ 数据,进而可绘出 $da/dN-\Delta K$ 曲线。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (1)$$

其中, C 、 n 为疲劳裂纹扩展系数,它们是材料性能、微观组织结构、载荷频率、平均应力或载荷比、环境、加载方式、应力状态和试验温度的函数, ΔK 为强度因子幅值。

由 Paris 公式(1)可知,将 ΔK 和 da/dN 绘制在双对数坐标图中,然后用最小二乘法作线性回归分析,即可求出 Paris 公式中的 C 、 n 值。

2 试验结果及分析

2.1 缺口位于母材

母材疲劳裂纹扩展速率试验中 ΔP 以 4.0kN、3.8kN、

3.6kN 逐级加载,分别进行试验,裂纹的扩展方向垂直轧制方向,母材疲劳裂纹扩展试样 $a-N$ 、 $(da/dN)-\Delta K$ 试验结果如图 2~3 所示。

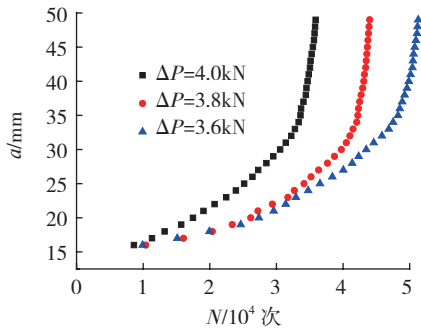


图2 母材试样的 $a-N$ 曲线
Fig.2 $a-N$ curves of base metal specimens

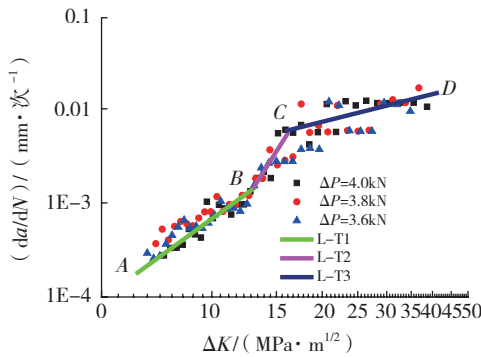


图3 母材试样的 $(da/dN)-\Delta K$ 曲线
Fig.3 $(da/dN)-\Delta K$ curves of base metal specimens

由图 3 可以看出母材试样的 $(da/dN)-\Delta K$ 曲线出现两个拐点,分 3 段进行拟合。 AB 段: $da/dN=1.01 \times 10^{-6} (\Delta K)^{2.83} (6.3 < \Delta K \leq 12)$; BC 段: $da/dN=1.89 \times 10^{-10} (\Delta K)^{6.18} (12 < \Delta K \leq 16.1)$; CD 段: $da/dN=3.90 \times 10^{-4} (\Delta K)^{0.98} (16.1 < \Delta K \leq 41.1)$ 。

由以上结果可知,当 ΔP 平行于挤压方向时,AZ31B 镁合金母材疲劳裂纹扩展在 AB 段为裂纹扩展的初期,斜率较小,扩展缓慢,从 AB 段可推算出裂纹在 ΔK 达到 2.21 开始扩展,并且扩展斜率 $k=2.83$ 。当 ΔK 达到 12.0,随着 ΔK 的增大裂纹扩展进入迅速扩展阶段 (BC),且 BC 段的斜率 $k=6.18$,斜率最大,扩展速度越来越大;在 CD 段进入疲劳裂纹扩展的最终阶段,速率变化很缓慢, CD 段的斜率 $k=0.98$,直到断裂速率为零。

2.2 缺口位于焊缝

焊缝疲劳裂纹扩展速率试验中 ΔP 以 5.4kN、5.2kN、5.0kN、4.8kN 逐级加载, $a-N$ 曲线、 $(da/dN)-\Delta K$ 曲线如图 4~5 所示。

由以上结果可知,当 ΔP 垂直作用于焊缝时,AZ31B 镁合金电子束焊接接头疲劳裂纹扩展在 AB

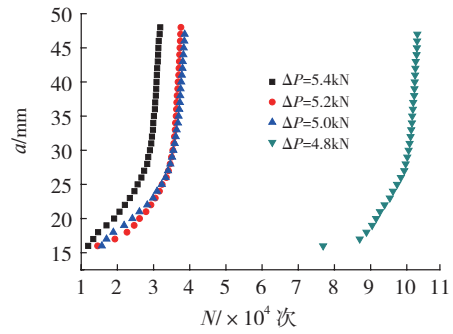


图4 焊缝试样的 $a-N$ 曲线
Fig.4 $a-N$ curves of weld-seam specimens

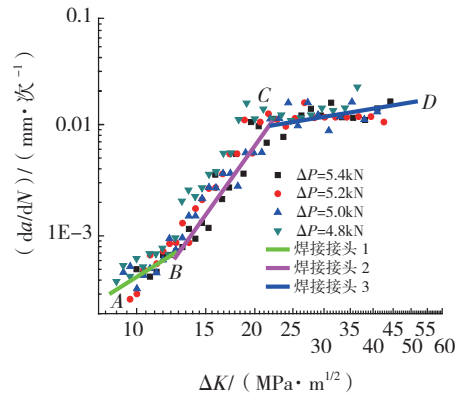


图5 焊缝试样的 $(da/dN)-\Delta K$ 曲线
Fig.5 $(da/dN)-\Delta K$ curves of weld-seam specimens

段,为裂纹扩展的初期,斜率较小,扩展缓慢,从 AB 段可推算出裂纹在 ΔK 达到 2.52 开始扩展, AB 段斜率 $k=2.21$ 。当 ΔK 达到 13.0 左右时,开始进入迅速扩展阶段 (BC),且 BC 段的斜率 $k=4.96$,斜率最大,扩展速度越来越大;在 CD 段进入疲劳裂纹扩展的最终阶段,速率变化很缓慢, CD 段的斜率 $k=0.59$,直到断裂速率为零。

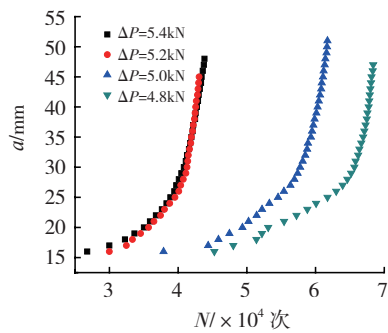
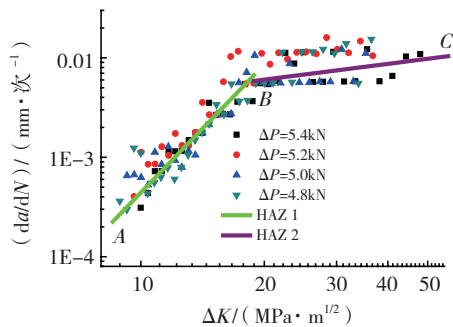
2.3 缺口位于HAZ

HAZ 疲劳裂纹扩展速率试验中 ΔP 加载同焊缝试验一致,HAZ 试样的 $a-N$ 、 $(da/dN)-\Delta K$ 曲线如图 6~7 所示。

由图 7 可以看出,缺口位于 HAZ 的疲劳裂纹扩展试样的 $(da/dN)-\Delta K$ 曲线出现一个拐点,分两段进行拟合。 AB 段: $da/dN=2.31 \times 10^{-8} (\Delta K)^{4.28} (8.5 < \Delta K \leq 18)$; BC 段: $da/dN=1.25 \times 10^{-3} (\Delta K)^{0.53} (18 < \Delta K \leq 42.1)$ 。

由以上结果可知,当 ΔP 垂直作用于缺口位于 HAZ 的焊缝试样, ΔK 达到 1.78 时 HAZ 试样的疲劳裂纹开始扩展,斜率 $k=4.28$,扩展迅速。在 BC 段进入疲劳裂纹扩展的最终阶段,速率变化很缓慢, CD 段的斜率 $k=0.59$,直到断裂速率为零。

通过对比分析 3 组疲劳裂纹扩展速率试验,缺口分

图6 HAZ试样的 $a-N$ 曲线Fig.6 $a-N$ curve of HAZ specimens图7 HAZ试样的 $(da/dN)-\Delta K$ 曲线Fig.7 $(da/dN)-\Delta K$ curves of HAZ specimens

别位于母材、焊缝、HAZ 疲劳裂纹扩展门槛值(ΔK)分别为 2.12、2.52、1.78。HAZ 的门槛值最低,裂纹扩展抵抗力最小,缺口位于焊缝的试样门槛值略高于母材,裂纹扩展抵抗力最大。

Paris 公式(1)中 n 值反映的就是疲劳裂纹扩展每个阶段的斜率, n 值越大曲线斜率就越大,表示在相同的 ΔK 作用下裂纹扩展的就越快。对比缺口分别位于母材、焊缝、HAZ 疲劳裂纹在扩展阶段的斜率可知,在相同的 ΔK 作用下焊缝的疲劳裂纹扩展速率最慢,HAZ 的最快,母材介于两者之间。

这是由于 AZ31B 电子束焊接接头 HAZ 晶粒长大,降低了裂纹扩展的门槛值,增大了裂纹扩展速率;而焊缝区晶粒明显细化,焊缝高的抗拉强度和屈服强度增强了接头裂纹扩展的抵抗力,从而使得疲劳裂纹的萌生被延迟,裂纹扩展的门槛值增大,扩展速度减慢。

3 断口分析

如图 8 所示,对缺口位于母材的试样沿着裂纹扩展方向的端口进行 SEM 分析。图 8 (a)、(c)、(e)分别为裂纹扩展从开始到断裂的 3 个阶段的扫描断口,整体都呈现出河流状花样,断口为由解理台阶组成的准解理断裂。图 8 (b)、(d)、(f)分别为图 8 (a)、(c)、(e)局部放大图。可以发现在裂纹扩展初期,图 8 (b)为细小的

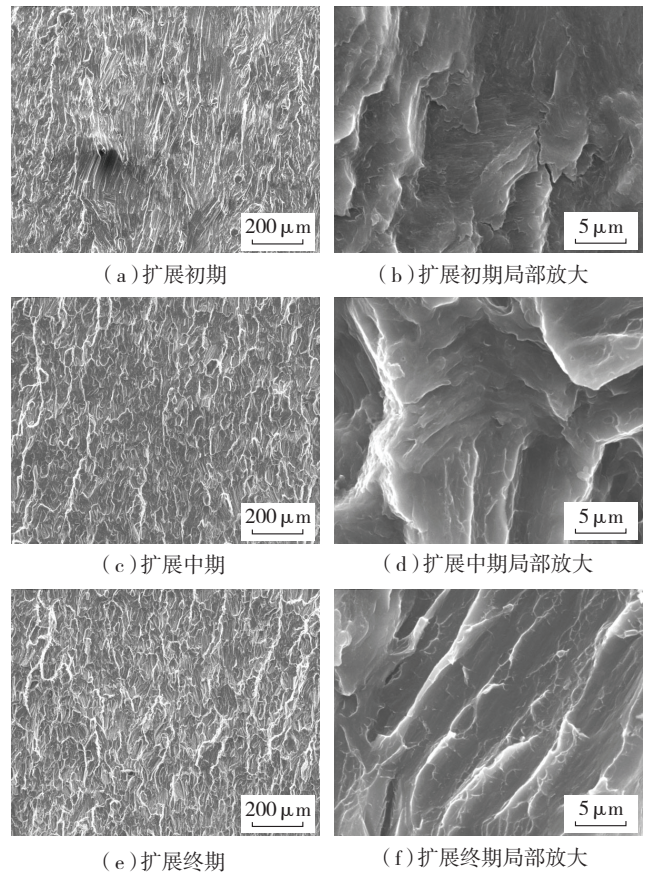


图8 AZ31B镁合金母材疲劳裂纹扩展断口

Fig.8 Fracture of fatigue crack propagation of AZ31B magnesium alloy base metal

解理台阶,疲劳条纹之间的宽度较窄。当扩展到第二阶段后,解理台阶逐渐变粗大,如图 8 (d)所示,疲劳条纹变明显,之间的距离拉大,表明扩展的速度相比第一阶段速度增大。从图 8 (f)可以观察到很明显的疲劳条带,解理台阶粗大,表明这个阶段扩展速度已经很大。从图 8 (b)还能看到二次裂纹,可知 AZ31B 镁合金疲劳断裂主要表现为脆性断裂。

如图 9 所示,对缺口位于焊缝的试样沿着裂纹扩展方向的端口进行 SEM 分析。图 9 (a)、(c)、(e)分别为沿着裂纹扩展方向从开始到断裂的 3 个阶段的扫描断口,在裂纹扩展初期断口中存在较多撕裂棱,细小的解理台阶,如图 9 (a),相比母材(图 8 (a))塑性得到一定的提高,这与焊缝裂纹扩展门槛值略高于母材相一致。图 9 (c)、(e)整体都呈现出河流状花样,随着 ΔK 增大(图 9 (e)),断口中韧窝增多,断口为由解理台阶组成的准解理断裂。图 9 (b)、(d)、(f)分别为图 9 (a)、(c)、(e)局部放大图。可以发现在裂纹扩展初期,图 9 (b)为细小的解理台阶,疲劳条纹之间的宽度较窄。当扩展到第二阶段后,解理台阶逐渐变粗大,如图 9 (d)所示,疲劳

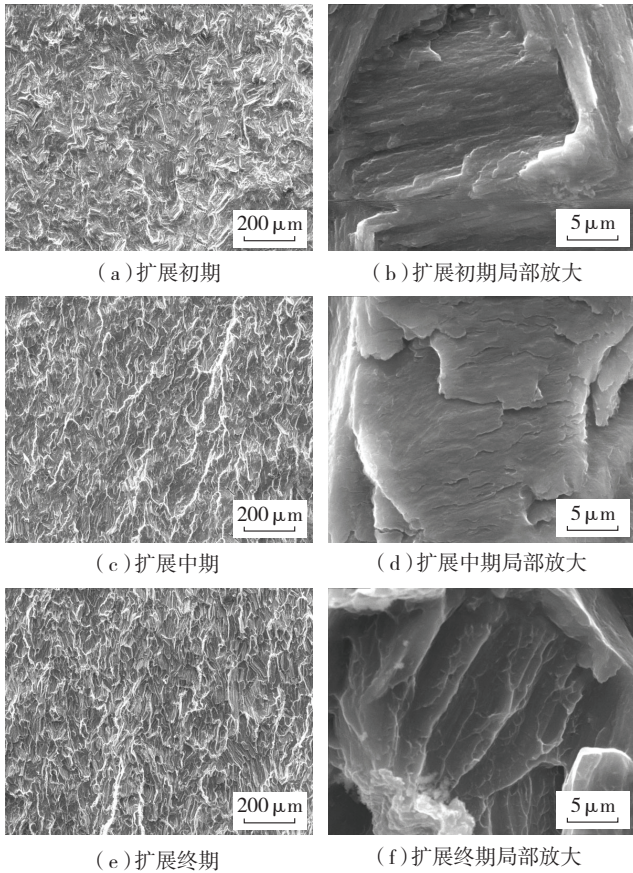


图9 AZ31B 镁合金电子束焊接接头焊缝疲劳裂纹扩展断口
Fig.9 Fracture of fatigue crack propagation of AZ31B magnesium alloy electron beam welding joint weld-seam

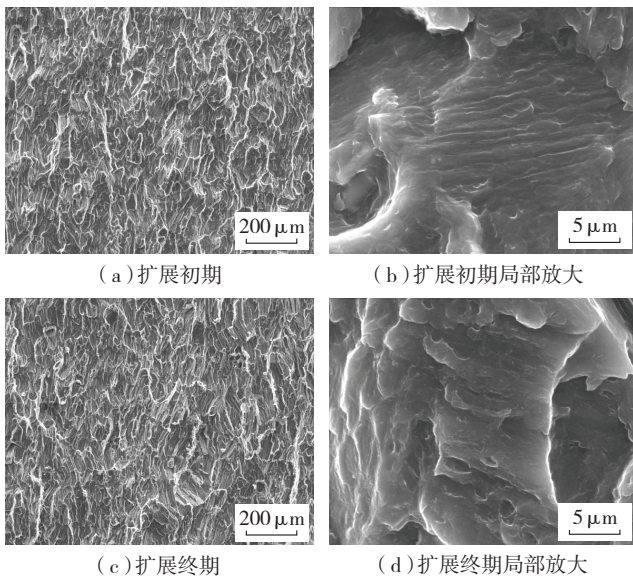


图10 AZ31B镁合金电子束焊接接头HAZ疲劳裂纹扩展断口
Fig.10 Fracture of fatigue crack propagation of AZ31B magnesium alloy electron beam welding joint HAZ

条纹变明显,之间的距离拉大,表明扩展的速度相比第一阶段增大。从图 9(f)可以观察到很明显的疲劳条带,

解理台阶粗大,表明这个阶段扩展速度已经很大。但是相比图 8 (b)、(d)来说,疲劳条带之间的距离要窄,说明裂纹扩展在不同阶段扩展速率都要小于母材。可知 AZ31B 镁合金电子束焊接接头表现出一定的塑性,疲劳断裂主要表现为以脆断为主的韧 - 脆混合断裂。

如图 10 所示,对缺口位于 HAZ 的试样沿着裂纹扩展方向的端口进行 SEM 分析。图 10 (a)、(c)分别为裂纹扩展从开始到断裂的两个阶段的扫描断口,断口为具有河流状花样特征的解理断裂。图 10 (b)、(d)分别为图 10(a)、(c)局部放大图,裂纹沿着解理面进行扩展,并且可以观察到粗大的解理台阶,断口面不平滑,在相同的 ΔK 作用下裂纹扩展速率大,对比图 8 (b)、(d)、(f) HAZ 裂纹扩展速率高,疲劳裂纹扩展门槛值低于母材。

4 结论

(1) 缺口分别位于母材、焊缝、HAZ 的试样疲劳裂纹扩展门槛值(ΔK)分别为 2.12、2.52、1.78; HAZ 的门槛值最低,裂纹扩展抵抗力最小,缺口位于焊缝的试样门槛值略高于母材,裂纹扩展抵抗力最大。

(2) 在相同的 ΔK 作用下,HAZ 的裂纹扩展速率最快,焊缝的裂纹扩展速率最慢,母材介于两者之间。这是由于电子束焊接接头晶粒细化,高的疲劳强度和抗拉强度增强了裂纹扩展的抵抗力,使得裂纹萌生被延迟,门槛值增大,扩展速率降低。

(3) 焊缝的疲劳裂纹扩展断口中有许多撕裂棱、韧窝,解理台阶细小、疲劳条带相对于母材及 HAZ 要窄,表现出一定韧性,为以脆断为主的韧 - 脆混合断裂; AZ31B 镁合金母材及 HAZ 疲劳裂纹扩展断口都呈现河流状花样,为准解理脆性断口。随着裂纹扩展速率增大,三者断口中的解理台阶都变得粗大,疲劳条带之间距离都变宽。

参 考 文 献

[1] 刘正,张奎,曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
LIU Zheng, ZHANG Kui, ZENG Xiaoqin. Magnesium matrix of lightweight alloy theory and its application[M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, 2002.
[2] ROBERT E. Magnesium alloys and their applications[J]. Light Metal Age, 2001, 6: 54-58.
[3] 冯吉才,王亚荣,张忠典. 镁合金焊接技术的研究现状及应用[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(2):165-178.
FENG Jicai, WANG Yarong, ZHANG Zhongdian. Status and expectation of research on welding of magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(2):165-178.

(下转第87页)