

高体积分数 $Mg_2B_2O_{5w}$ /AZ91D 复合材料的 热疲劳性能

丁雨田¹, 王府¹, 金培鹏^{1,2}, 胡勇¹, 万国顺¹, 李静²

(1. 兰州理工大学甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

2. 青海大学镁技术工程研究所, 青海 西宁 810016)

摘要:用真空气压渗流装置成功制备了硼酸镁晶须体积分数为 52% 的 $Mg_2B_2O_{5w}$ /AZ91D 镁基复合材料。观察了该材料在 30~350℃ 热循环条件下热疲劳裂纹扩展的形貌, 并分析了热疲劳短裂纹的产生和扩展机制。结果表明, 材料的热疲劳裂纹的扩展与热循环的次数以及材料的内部结构有关。

关键词:晶须; 热疲劳; 裂纹扩展; 镁基复合材料

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2009)01-0041-05

金属基复合材料由于其高比弹性模量、高比强度、耐疲劳、耐磨损、低能耗、低膨胀系数等特点, 可广泛应用在军事、汽车、交通、航天、航空、冶金、化学、化工、机械、电子等各种领域, 从而近 50 多年来受到了各方面的关注; 尤其在美国、加拿大、日本等发达国家投入了大量的人力和物力来竞相研究开发和生产这一类高性能的材料^[1-4]。将增强体加入塑性基体可提高材料的强度和刚度, 但是当复合材料用做电子封装材料等高精度情况时, 其使用温度是经常发生变化的^[5-6], 这时材料的断裂韧性、抗疲劳性能就成为零件设计时考察可靠性的重要指标。由于大多数复合材料中两相的热膨胀系数不同, 多次热循环后在复合材料中引起了较大的微区热残余变形, 同时引起较大的微区蠕变, 这些因素都可能导致金属基复合材料的不稳定损伤。关于 MMCs 的疲劳裂纹的扩展大多都是在高周疲劳条件下研究的^[7-8], 而关于低周疲劳的研究看到了徐文娟、吴申庆研究了 Al_2O_3 /ZL109

复合材料的热疲劳裂纹的扩展^[9]。本工作选用硼酸镁晶须增强 AZ91D 镁合金复合材料, 进行热疲劳实验, 观察了裂纹的形貌, 研究了其热疲劳短裂纹的形成及扩展行为与机理。

1 材料的制备及实验方法

1.1 复合材料的制备

实验所用基体合金为 AZ91D 镁合金, 增强相是长度为 10~50 μm , 直径为 0.5~2 μm 的硼酸镁晶须。其物理性能参数如表 1 所示^[10]。

实验所用复合材料 $Mg_2B_2O_{5w}$ /AZ91D 制备的具体流程如图 1 所示。

真空气压渗流的试验原理如图 2。其实验步骤如下: (1) 将晶须预制块和基体合金按顺序放在不锈钢的坩埚中, 插入热电偶, 密封电阻炉; (2) 在加热炉以 10℃ /min 加热的同时, 启动真空泵, 使真空气压室中的试样在抽真空的

收稿日期: 2008-08-11; 修回日期: 2009-01-06

基金项目: 中科院 2005 年度“西部之光”人才培养计划项目“硼酸铝(镁)晶须增强镁基复合材料的应用研究”; 青海省重大科技攻关项目, 编号: 2008-J-532; 教育部重点科研项目, 项目编号: Z2007-1-81003

作者简介: 丁雨田(1962-), 男, 甘肃兰州人, 教授, 博士, 研究方向: 新型合金及复合材料。E-mail: dingy@lut.cn

表 1 基体合金与硼酸镁晶须的物理性能参数

Table 1 Physical parameters of the matrix alloy and whisker

材料	弹性模量 / GPa	泊松比	拉伸强度 / GPa	相对密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	熔点 / K	热膨胀系数 / ($10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$)
AZ91D	45	0.33	0.15	1.75	650	25.2
$\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5$	264.6	0.3	3.92	2.91	1 360	10

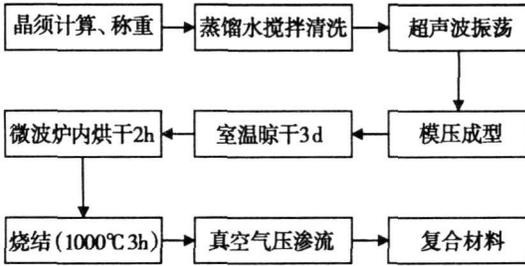


图 1 复合材料制备流程图

Fig. 1 Flow chart of the preparation of MMCs

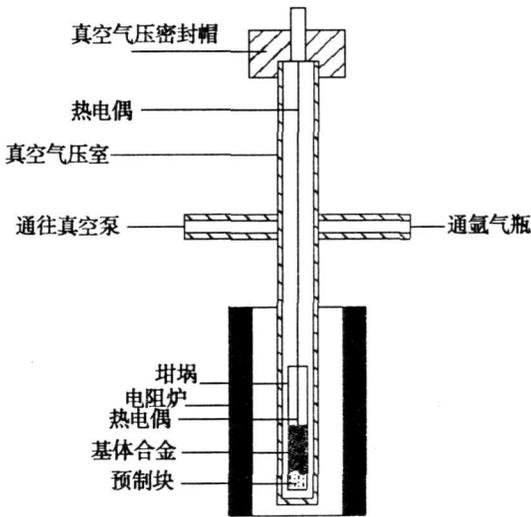
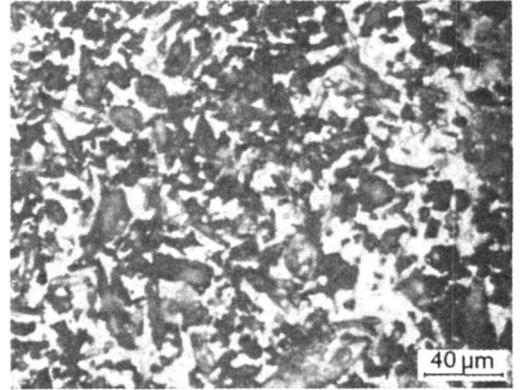
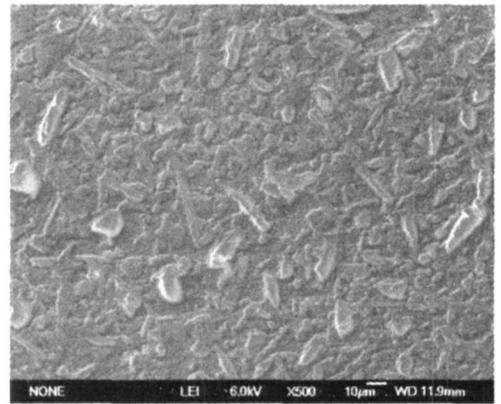


图 2 真空气压渗流装置简图

Fig. 2 Vacuum gas pressure infiltration equipment

同时被加热,保证在合金熔化前排除真空室内气体;(3)在一定真空度条件下基体合金熔化,此时在合金液下面的预制块亦处于一定的真空度条件下,待合金熔化并保持一定时间后,关闭真空泵的同时,打开氩气阀,使合金液在一定的氩气压力作用下实现真空气压渗流。图 3 图 4 分别为复合材料在光学及 SEM 下的组织照片,可以看出用这种方法可以制得比较均匀的复合材料。

图 3 $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5w}$ /AZ91D 镁基复合材料的光学组织照片Fig. 3 OM micrograph of $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5w}$ /AZ91D matrix composite图 4 $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5w}$ /AZ91D 镁基复合的 SEM 照片Fig. 4 SEM micrograph of $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5w}$ /AZ91D matrix composite

1.2 实验方法

将制得的晶须体积分数为 52% 的复合材料加工成 $d 18 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的圆盘试样,并沿圆周 180° 对称开深 2 mm 的 V 型口且中心打 $\Phi 1.5 \text{ mm}$ 的圆孔(增加应力集中,有利于裂纹的

形成)如图 5 所示,用于研究热疲劳短裂纹的

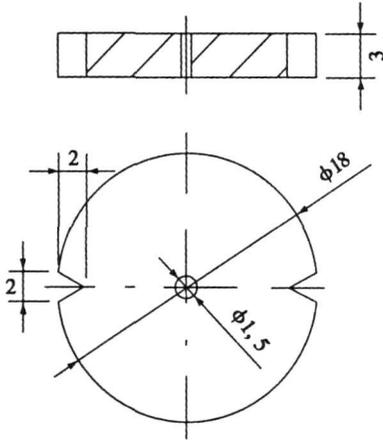


图 5 试样简图

Fig 5 Sketch of the sample

扩展行为。在富士电波工机株式会社生产的热模拟检测仪上进行热循环试验,热循环温度范围为 $30\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$,热循环周期为 5 min/cycle (加热速率为 $80\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 冷却速率为 $320\text{ }^{\circ}\text{C/min}$)。用 MeF3 大型金相显微镜和 JSM-6700F 场发射扫描电镜观察裂纹的数量和扩展路径。

2 实验结果与分析

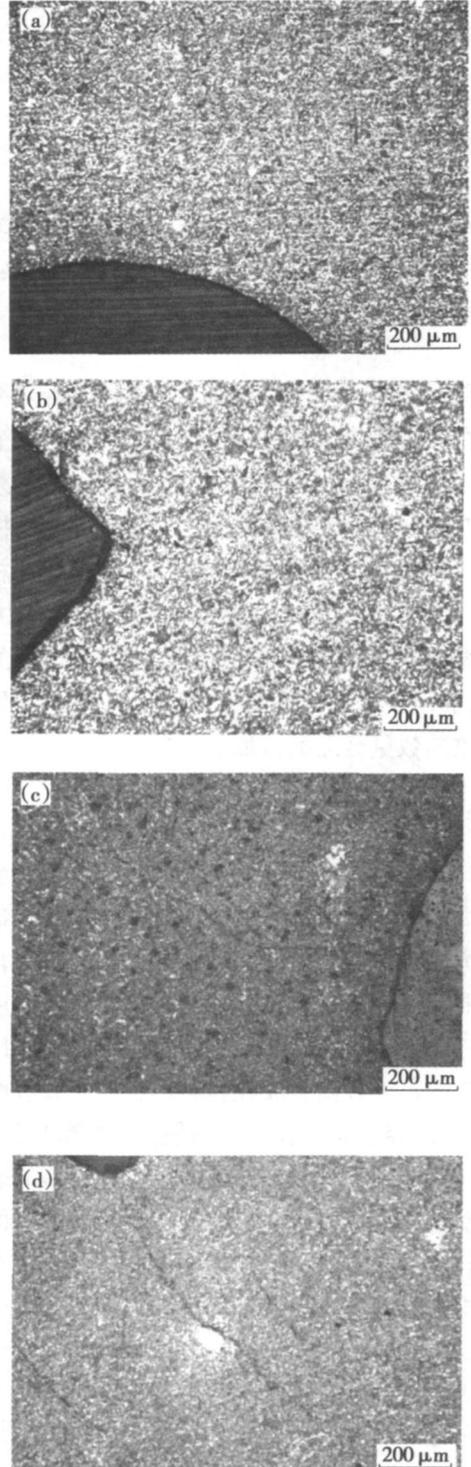
2.1 热疲劳裂的产生原因分析

在实验中,裂纹均起始于 V 型口和中心的圆孔周围。其原因:(1)从表 1 中看到 $MgB_2O_{5w}/AZ91D$ 复合材料是热力学非平衡体系,其中硼酸镁晶须与 $AZ91D$ 镁合金的热膨胀系数相差约 $15.2\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$,在 $30\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热循环条件下有较大的内部应力;(2)由于材料边缘加工的缺口,造成了应力集中,缺口尖端越尖越有利于裂纹的诱发;(3)从表 1 中还可以看到 $AZ91D$ 基体合金的抗拉强度远低于增强相硼酸镁晶须的抗拉强度,使得裂纹容易在基体合金内诱发产生;(4)基体 $AZ91D$ 合金由 $\alpha\text{-Mg}$ 与 $\beta(\text{Al}_2\text{Mg}_7)$ 两个基本相组成,在热疲劳条件下, $\beta(\text{Al}_2\text{Mg}_7)$ 相具有较大的应力集中,应变能力差,也创造了裂纹起始的条件;(5)在 $30\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热循环下,由于非对称应力松弛的原因,每次热循环过程中都会引起尺寸

的净变化,当塑性变形达到一个临界值时就会萌发裂纹;(6)热疲劳裂纹具有缺口敏感性,因此热疲劳裂纹将首先从缺口处开始产生,并沿着表面的弱相或缺陷扩展。

2.2 裂纹数量的增加

从图 6 中可以看到,在热循环过程中,材料



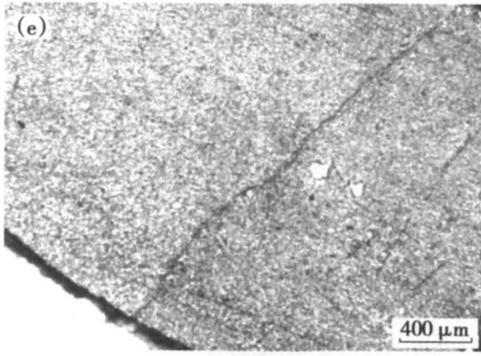


图 6 热疲劳裂纹金相观察

Fig 6 Micrographs of thermal fatigue crack under thermal cycling condition between 30 °C and 350 °C (a) 0 cycles (b) 100 cycles (c) 200 cycles (d) 300 cycles (e) 400 cycles of sample 52% Mg₂B₂O_{7w} /AZ91D

内部又萌生了一些小的裂纹,而且随着热循环次数的增加,小裂纹的数量有明显的增加趋势。由于晶须端部界面结合强度的不同,在晶须端部与基体合金结合弱的地方在热循环条件下,会有晶须拔出或者插入的现象,相当于在材料内部的界面处形成了缺口,造成了应力集中,在热循环条件下形成裂纹;而且随着热循环的进行,晶须拔出或者插入的现象逐渐增多,所以小裂纹的数量会逐渐增加。

2.3 裂纹的扩展路径

在裂纹扩展过程中,裂纹都是在缺口处产生向材料中的弱相或缺陷扩展的,裂纹尖端的应力集中是裂纹扩展的驱动力,但是基体合金与晶须界面的结合强度又会抑制裂纹的向前扩展,所以裂纹不是以直线形式扩展的。另外,从图 7 中也能看到裂纹在材料内扩展主要有两种途径,即穿过晶须和绕过晶须,其中穿过晶须的裂纹就造成了晶须的断裂,而绕过晶须的裂纹就造成了晶须的脱落,说明该复合材料界面的结合不是很强,从而加强界面的结合强度有利于提高材料的抗疲劳能力。

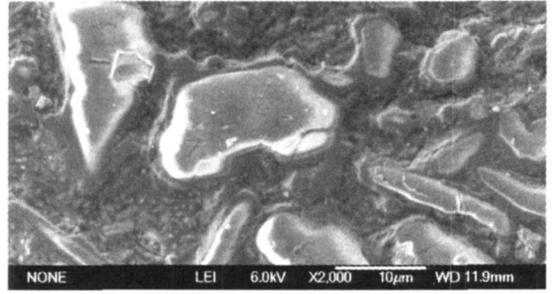


图 7 热疲劳裂纹形貌的 SEM 观察

Fig 7 SEM micrograph of thermal fatigue crack morphology of 52% Mg₂B₂O_{7w} /AZ91D after 100 cycles under thermal cycling condition between 30 °C and 350 °C

3 结 论

(1)随着热循环次数的增加,材料内部热疲劳裂纹的数量和长度都在增加;

(2)热疲劳裂纹扩展过程中不是以直线形式扩展的,而是趋向于向材料内部的弱相或者缺陷部位扩展;

(3)提高材料的界面结合强度有利于提高材料的抗疲劳性能。

参考文献:

- [1] 郑明毅,吴昆,赵敏,等.不连续增强镁基复合材料的制备与应用[J].宇航材料工艺,1997,27(6):6-10.
- [2] 张强,孙东立,武高辉.电子封装基片材料研究进展[J].材料科学与工艺,2000,8(4):66-72.
- [3] 克莱因 T W,威瑟斯 P J 金属基复合材料导论[M].余永宁,等译.北京:冶金工业出版社,1996:428-442.
- [4] 赵渠森.复合材料[M].北京:国防工业出版社,1979:6-12.
- [5] 喻学斌,吴人洁,张国定.金属基电子封装复合材料的研究现状及发展[J].材料导报,1994(3):64-66.
- [6] 武金有.电子技术领域的金属基复合材料[J].电子工艺技术,1992(6):11-12.
- [7] Vasudevan A K, Sadananda K. Fatigue crack growth behavior of composites[J]. Metall Mater Trans A. 1995, 26(12): 3199-3210.
- [8] Li C S Ellyin F. Short crack growth behavior in a particulate-reinforced aluminum alloy composite[J]. Metall Mater Trans A. 1995, 26(12): 3177-3182.
- [9] 徐文娟,吴申庆. Al₂O₃sf /ZL109 复合材料的热疲劳短裂纹的扩展行为[J].中国有色金属学报,2000,10(2):155

[10] 史训兵. 真空气压渗流法制备硼酸镁晶须增强镁基复

Study on Thermal Fatigue Behavior of High Volume Fraction $Mg_2B_2O_{5w}/AZ91D$ Composites

DING Yu-tian¹, WANG Fu¹, JIN Pei-peng^{1,2}, HU Yong², WAN Guo-shun¹, LI Jing²

(1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Institute of Magnesium Technology, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: Vacuum-gas pressure infiltration process was developed for the preparation of $Mg_2B_2O_{5w}/AZ91D$ ($\varphi_B = 52\%$). Thermal fatigue crack propagation appearances of the composites were observed under thermal cycling condition between $30^\circ C$ and $350^\circ C$. The mechanism of initiation and propagation of thermal fatigue crack was investigated. The results showed that the thermal fatigue crack is related to the number of thermal cycling and the micro structure of the composites.

Key words: Whisker; Thermal fatigue; Crack propagation; Magnesium matrix composite

欢迎订阅 2009年《盐湖研究》 全国唯一的研究盐湖科学和技术的专业性学术期刊

《盐湖研究》是国家科委批准的学术类自然科学期刊, 由中国科学院青海盐湖研究所主办, 科学出版社出版, 1993年创刊并在国内外公开发行人。

《盐湖研究》是国内唯一的研究盐湖科学和技术的专业性期刊。面向国内外报导交流盐湖、地下卤水、油田水、海水等基础、应用、开发和技术及管理的研究报告、论文和成果, 探讨其资源的分离提取技术与综合利用途径。

《盐湖研究》为季刊, A4开本, 72页, 每季末月 5日出版发行。单价: 8.00元/本, 全年订价: 32.00元。中国标准刊号: ISSN1008-858X; CN63-1026/P。邮发代号: 56-20。全国各地邮局均可订阅, 也可直接与《盐湖研究》编辑部联系, 联系电话: 0971-6301683。