

液态扩散焊制备泡沫铝夹芯板及其疲劳行为

王宇, 胡正飞*, 姚骋, 张振, 许婷

(同济大学材料科学与工程学院 上海市金属功能材料开发应用重点实验室, 上海 201804)

摘要: 采用超声辅助液态扩散焊接的方法制备冶金复合泡沫铝夹芯板, 利用光学显微镜(OM)和 SEM 观察冶金复合样品的界面组织和结构, 发现连接界面发生了侵蚀作用, 接头均匀连续; EDS 线扫结果表明, 连接界面处焊接合金(Zn-10Al)和铝基体间的元素扩散现象明显, 表明在超声作用下, 基体材料表面氧化膜被破坏, 枝晶在界面附着生长, 形成良好的冶金连接。将制备的冶金复合样品和胶黏泡沫铝夹芯板样品进行三点弯曲疲劳对比试验, 结果显示, 冶金复合样品和胶黏样品的疲劳极限分别达到 3 058 N 和 2 829 N。在相同载荷下, 冶金复合样品的疲劳寿命(S-N)远远长于胶黏样品。两种样品的疲劳破坏方式完全不同, 胶黏样品表现为面板和芯层黏接面的脱黏剪切破坏, 冶金复合样品的疲劳剪切破坏出现在泡沫铝芯层, 没有出现面板脱离现象。

关键词: 泡沫铝夹芯板; 冶金复合; 弯曲疲劳; 剪切断裂; 微观组织

中图分类号: TB331; O346.23

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2018)06-1652-09

Fabrication and fatigue behavior of aluminum foam sandwich via liquid diffusion welding

WANG Yu, HU Zhengfei*, YAO Cheng, ZHANG Zhen, XU Ting

(Shanghai Key Laboratory for R & D and Application of Metallic Functional Materials, School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Liquid diffusion welding method was used to prepare metallurgical bonding aluminum foam sandwich. The bonding interfacial microstructure was observed by optical microscope (OM) and SEM. Under the effect of ultrasonic vibration, the bonding seam is uniform and continuous. The ZnAl eutectic dendrite structure forms on the surfaces of Al foam core and Al sheet substrates. Furthermore, obvious erosion behavior can be seen on the bonding surfaces as ZnAl alloy filler melted. EDS line scan results show that the mutual diffusion of the main elements Zn and Al across the interface is extensive. All these characteristics imply that the oxide film on the substrates is destroyed and sound bonding achieves. Three point bending fatigue test was employed to the sandwich structure fatigue behavior. Comparing with the adhesive aluminum foam sandwich, the fatigue life (S-N) curves indicate that the metallurgical bonding samples have a better fatigue performance, and their fatigue limits are 3 058 N and 2 829 N respectively. Under the same load, the metallurgical bonding sample has much longer fatigue life than the adhesive sample. And the fatigue fracture mode for these two types samples are completely different in two ways, the failure mode for adhesive sample is shear debonding, but no debonding occurred for metallurgical bonding sample, which indicates that failure mode of metallurgical bonding sample due to foam core shear.

Keywords: aluminum foam sandwich; metallurgy composite; flexural fatigue; shear failure; microstructure

泡沫铝是一种新型轻量化材料,除了轻质、低密度的特点外,还具有高比强度、吸声吸能和良好的电磁屏蔽等特性,因而广泛应用在航天事业、交

通运输工业和电子工业等高科技领域^[1-3]。单纯的泡沫铝由于强度较低,无法直接应用于工程结构构件,与金属面板结合制备的泡沫铝夹芯板具有很好

收稿日期: 2017-06-16; 录用日期: 2017-09-25; 网络出版时间: 2017-10-18 10:08

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171018.001>

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAG19B01); 科技部重点专项资助(2017YFB0103700)

通讯作者: 胡正飞, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为金属复合材料与轻量化 E-mail: huzhengf@tongji.edu.cn

引用格式: 王宇, 胡正飞, 姚骋, 等. 液态扩散焊制备泡沫铝夹芯板及其疲劳行为[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1652-1660.

WANG Y, HU Z F, YAO C, et al. Fabrication and fatigue behavior of aluminum foam sandwich via liquid diffusion welding[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1652-1660 (in Chinese).

的应用前景^[4-6]。在应用过程中,泡沫铝夹芯板主要受到循环载荷的作用,因此对其疲劳行为及往复载荷下损伤机制的研究引起了广泛的关注。

最早的相关研究开始于国外,Burman和Zenkert等^[7]通过分析带有夹芯层复合材料的结构,得出了基于不同应力比下的疲劳-寿命(S-N)曲线的两参数Weibull方程,分析了不同应力比对材料疲劳性能的影响,并深入研究了疲劳裂纹的萌生和扩展。Sha等^[8]和Palano等^[9]对泡沫铝夹层梁进行了四点弯曲疲劳研究,前者主要分析了不同金属面板对夹层梁疲劳性能的影响,后者将实验数据和数值模拟结果相对比,主要研究了夹层梁结构厚度和跨距等参数的影响,实验和数值模拟结果具有较好的一致性。Vendra等^[10]设计实验对泡沫金属复合材料(Composite metal foam, CMF)的压-压疲劳性能进行了探究,区别于一般的泡沫金属材料,CMF的疲劳破坏过程主要由3个阶段构成,并且其S-N与样品孔径、孔厚及基体材料等因素有很大的相关性。Harte等^[11]对带有铝合金面板的泡沫铝夹芯板进行了四点弯曲疲劳研究,得出了夹芯板破坏的三种方式,破坏方式主要与面板和芯层的相对疲劳强度及夹芯板的几何尺寸有关。Yang等^[12]研究了PMI(Polymethacrylimide)作为芯层的夹心结构的疲劳性能和破坏方式,并且给出疲劳结果的预测公式,实验与模拟结果具有良好的一致性。姚进斌等^[13]研究了泡沫铝夹层梁的四点弯曲疲劳性能,对不同应力水平下样品的失效形式进行了分析,结果表明,样品在四点弯曲疲劳下主要的失效形式为表面凹陷和泡沫铝芯材剪切破坏。目前的研究主要关注试件尺寸和实验参数对泡沫铝夹芯板疲劳性能的影响,将夹芯板界面处的连接视为理想状态,然而胶黏泡沫铝夹芯板的连接为典型的物理连接,并且界面由于气孔的存在和收缩效应,导致其强度显著下降,因此研究夹芯面板与基体泡沫铝芯材的连接方式对泡沫铝夹芯板疲劳行为的影响具有很大的现实意义。本文首先介绍以自行设计的液态扩散焊工艺制备的泡沫铝夹芯板,实现了泡沫铝芯材与铝合金面板的冶金连接,形成铝面板-泡沫铝复合结构。结合复合界面的微观组织形貌,研究其在三点弯曲循环载荷下的疲劳断裂行为,并与胶黏泡沫铝夹芯板作对比,分析冶金复合对疲劳行为的影响,并对疲劳强度等特征进行探讨。

1 实验材料和方法

实验所用泡沫铝密度为0.4 g/cm³,孔隙率为85%,平均孔径为7 mm,孔洞壁平均厚度为0.5 mm,压缩强度为5.31 MPa,铝板为5056铝合金板。根据标准ASTM-C393-C393M-06^[14]对泡沫铝芯材和铝合金板材进行线切割裁切,芯层和面板的长度和宽度都是300 mm和50 mm,厚度分别是25 mm和1 mm。冶金复合前选用砂粒尺寸为0.127 mm SiC砂纸对泡沫铝芯材和铝合金面板的连接面进行打磨除去其表面氧化膜。焊料选用Zn-10Al合金,其液固相线温度分别为426.5℃和380.0℃,使用热浸镀的方法将合金均匀的涂覆在泡沫铝芯层和铝面板连接面上^[15-16],使用感应加热设备(JJZ-15KW,上海锦际感应设备制造厂)进行热压连接,加热温度约450℃。在热压过程中对铝合金面板施加压力和超声震动作用(YP5020-6Z,杭州成功超声设备有限公司,400~650℃/≤85% RH),作用时间约1 min,使泡沫铝芯材和铝合金面板的连接面与锌铝合金充分结合,形成泡沫铝为基体、铝板为增强材料的复合材料夹芯结构。胶黏泡沫铝夹芯板采用胶膜作为黏接剂,在80℃下经5 min热压黏结制得,形成铝板和泡沫铝胶黏复合界面。两种工艺制得的泡沫铝夹芯板样品宏观形貌如图1所示。

选用光学显微镜(OM, OlympusGX51,日本奥林巴斯)和扫描电子显微镜(SEM, FEINova Nano SEM450,美国FEI)对所制备的泡沫铝夹芯板连接界面微观组织形貌进行观察和分析,并利用X射线能谱仪(EDS)对连接接头处进行线扫描分析,分析界面处的元素分布情况。根据标准ASTM-C393-

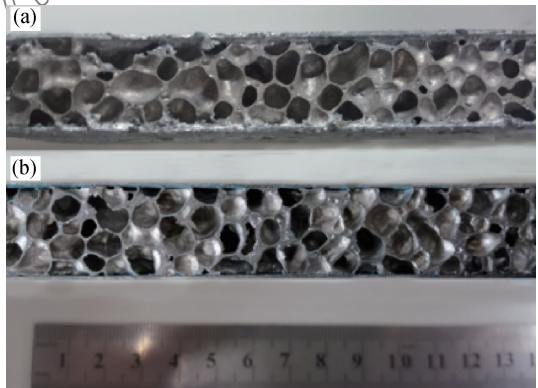


图1 两种工艺制备的泡沫铝夹芯板宏观形貌图

Fig.1 Macromorphology of two kinds of aluminum foam sandwich from different manufacturing process
(a)Metallurgical bonding; (b)Adhesive bonding)

C393M-06^[14]，采用三点弯曲疲劳试验方法对冶金复合样品和胶黏样品进行疲劳测试。疲劳试验在MTS809 疲劳试验机(美国 MTS 系统，常温)上进行，使用自行设计的疲劳夹具，如图 2 所示。跨距为 200 mm，载荷应力比为 $R = -0.1$ ，循环频率为 7 Hz，变化载荷对泡沫铝夹芯板样品进行疲劳试验，得到不同的挠度-循环次数曲线，样品断裂过程由数字照相机进行拍摄，探究试样疲劳破坏行为和机制。根据 GB/T 1457—2005 夹层结构滚筒剥离实验标准^[22]，直接测试了本实验中两种样品界面结合强度。剥离样品尺寸为 300 mm×80 mm×26 mm，剥离实验在 WDW-10 万能试验机上进行，

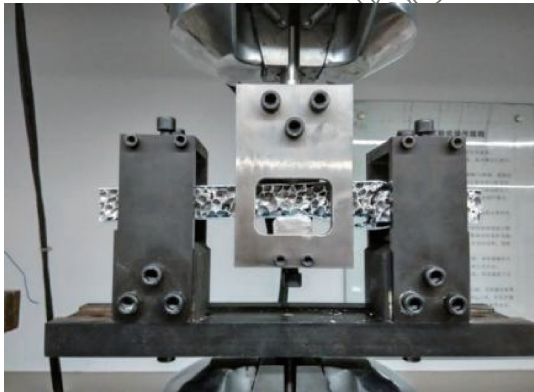


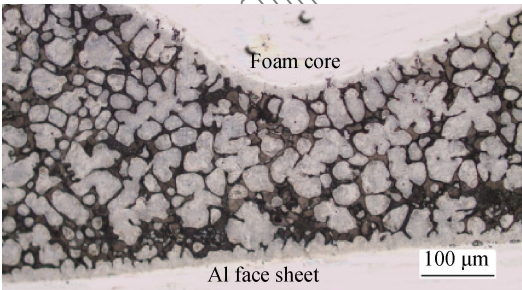
图 2 泡沫铝夹芯板疲劳试验样品及夹具装截图
Fig. 2 Loading diagram of aluminum foam sandwich sample and fixture for fatigue test

加载速度为 25 mm/min。通过微观理论和 S-N 曲线探究冶金复合泡沫铝夹芯板的疲劳强度和断裂方式与连接界面处微观结构的关系，并与普通胶黏泡沫铝夹芯板样品做对比。

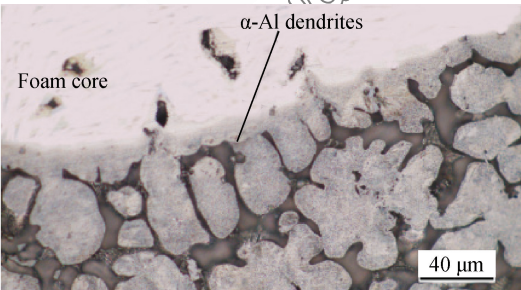
2 实验结果与讨论

2.1 泡沫铝夹芯板样品连接界面微观形貌

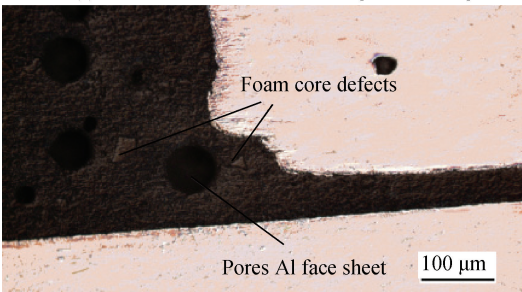
图 3 为两种不同黏接方式泡沫铝夹芯板样品连接界面处的光学显微图像。从图 3(a)和图 3(b)可以看出，Zn-10Al 合金作为焊料，其组织结构为典型的枝晶与共晶结构。在铝基体表面， α -Al 枝晶在铝基体表面形核并向 Zn-10Al 合金熔合区内生长^[17]。这表明熔融的锌铝合金在铝基体表面形成了良好的润湿，且连接合金与铝基体的界面全部贴合紧密，熔合区域密实连续，没有明显的宏观缺陷。图 3(c)和图 3(d)分别为胶黏样品在连接界面附近和连接界面内部的金相照片。可以看到，胶黏样品的连接界面为典型的物理连接，胶膜中出现许多气孔和形状不规则杂质。气孔产生的原因，一方面在于泡沫铝热压胶黏夹芯板时无法完全清除连接面上的空气残留；其次是热塑性的胶膜重溶固化过程中，在发挥胶黏性作用时会放热并产生收缩效应而产生气孔，从而影响连接面的强度。图 4 为冶金结合样品的熔合区的 SEM 图像和 EDS 图谱分析。可以看出铝基体和锌基合金熔合区界面处元素的分



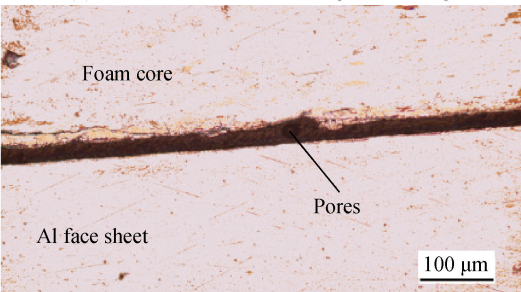
(a) Interface structure of metallurgical bonding



(b) Interface details of metallurgical bonding



(c) Boundry interface of adhesive bonding



(d) Internal interface of adhesive bonding

图 3 冶金复合泡沫铝夹芯板样品和胶黏泡沫铝夹芯板样品的光学显微图像

Fig. 3 Optical microscope images of metallurgical bonding and adhesive bonding aluminum foam sandwich sample

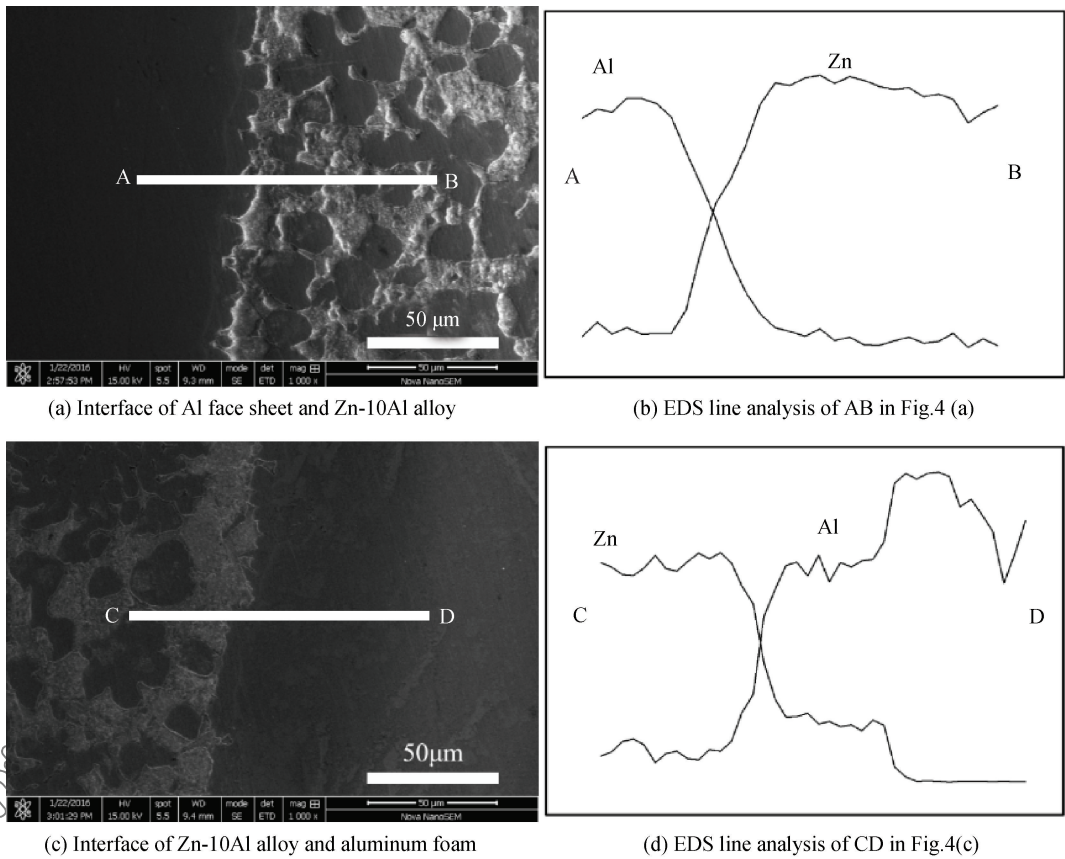


图 4 冶金复合泡沫铝夹芯板样品界面的 SEM 图像((a)、(c))及 EDS 线扫描分析((b)、(d))

Fig. 4 SEM images of metallurgical bonding aluminum foam sandwich sample ((a), (c)) and EDS line analysis across the interface((b), (d))

布情况。铝基体的主要构成元素 Al 和 Zn 基合金熔合区的主要构成元素 Zn 在界面处连续分布,说明 Al 原子和 Zn 原子在热浸镀和冶金连接的过程中发生了相互扩散。从富锌的基体到富铝面板 Zn 原子和 Al 原子含量并未发生突变,而是有一个梯度,在一定的扩散距离内呈线性变化,说明铝基体和锌基合金熔合区之间形成了良好的冶金结合,也表明在热浸镀和冶金连接过程中熔融的 Zn-10Al 合金在铝基体表面实现了良好的润湿和扩散。这种原子成梯度的扩散使 Zn 和 Al 两种原子产生相互作用形成较大的结合力,大大提高了泡沫铝夹芯板的连接强度。

2.2 泡沫铝夹芯板 S-N 曲线

为了探究冶金界面对夹芯板样品疲劳性能的影响,对其进行三点弯曲疲劳试验,图 5 为冶金连接和胶黏泡沫铝夹芯板在不同应力幅值下的 S-N 曲线。可以看出,泡沫铝夹芯板的 S-N 随载荷的增加而减小,并且在相同载荷水平下,冶金连接样品的

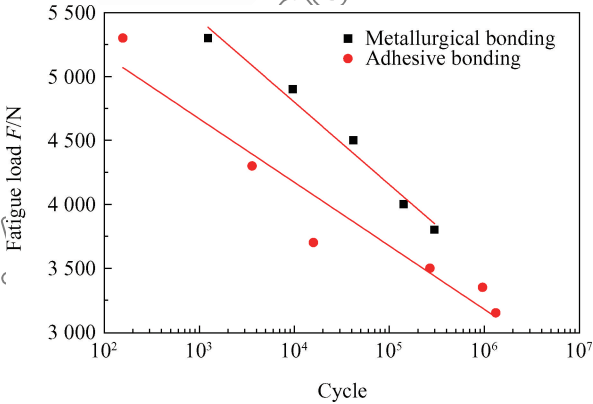


图 5 冶金复合和胶黏泡沫铝夹芯板样品的 S-N 曲线
Fig. 5 S-N curves of metallurgical bonding and adhesive bonding sandwich samples

S-N 远远优于胶黏样品,说明在相同使用条件下,特别是在较大载荷作用下,冶金连接样品具有更长的使用寿命。姚进斌等^[13]和 Harte 等^[18]通过 S-N 曲线拟合公式定义一定循环周次下所对应载荷推算样品的疲劳极限,通过对比疲劳极限的大小表征不

同参数的影响。同理，在半对数坐标系下对本实验曲线进行拟合，得到冶金连接样品(1)和胶黏样品(2)的经验公式：

$$S = 7\,380 - 645.2 \log N \tag{1}$$

$$S = 6\,162 - 497.5 \log N \tag{2}$$

式中， N 为循环周次，定义循环周次为 5×10^6 次时的应力水平为泡沫铝夹芯板的疲劳极限^[19]，可以得出冶金样品的疲劳极限(S)为 3 058 N，胶黏样品的 S 为 2 829 N。

图 6 为两种样品在不同载荷条件下疲劳失效后的形貌对比。可以看出，胶黏样品的破坏形式主要是面板脱离和芯层剪切破坏，表现为面板和芯层连接的不紧密性，且脱胶现象在上下面板都有发生，通过实验过程记录可以得出，胶黏样品的破坏方式是泡沫铝芯层与面板先发生脱离，然后才是芯层内部的剪切断裂，说明面板的脱离导致夹芯板样品的承载能力大大下降；而冶金复合样品的破坏形式都是压头下方基体与面板的共同剪切断裂，并未发生面板脱离，断裂是从基体开始衍生到面板断裂，表

现出冶金复合夹芯板结构良好的抗疲劳性能。

2.3 泡沫铝夹芯板样品疲劳跨中挠度及破坏机制

为了深入了解材料在三点弯曲疲劳试验中的力学行为变化，由疲劳实验过程中挠度随循环次数的变化，得到冶金复合和胶黏泡沫铝夹芯板样品在不同应力水平下挠度随周次的变化曲线，如图 7 所示。可以看出，两种样品在不同载荷水平下的挠度变化规律基本一致，二者曲线均由缓慢的应变积累阶段和快速断裂两阶段构成。疲劳实验初期，在经过最初加载时的不稳定阶段后，泡沫铝夹芯板样品内部应力趋于均匀，斜率基本保持不变，进入挠度的平稳增长阶段，阶段内主要是样品内部的微观损伤缓慢发展，疲劳裂纹随着循环载荷的作用进行低速扩展。此阶段为样品工作的有效时长，随着时间的延长，载荷基本保持不变，该阶段越长表明其抗疲劳能力越强。当微观损伤发展到一定程度到达临界失稳值时，其内部裂纹会发生快速扩展，到达应变快速积累阶段，此时样品跨中斜率发生明显变化，样品内部局部区域损伤急剧增大，使承载能力迅速下降，挠度大幅上升，此时样品承载极不稳定，在极短的时间内造成断裂破坏使实验马上结束。由图 7(a)和图 7(b)对比可以看出，挠度突变

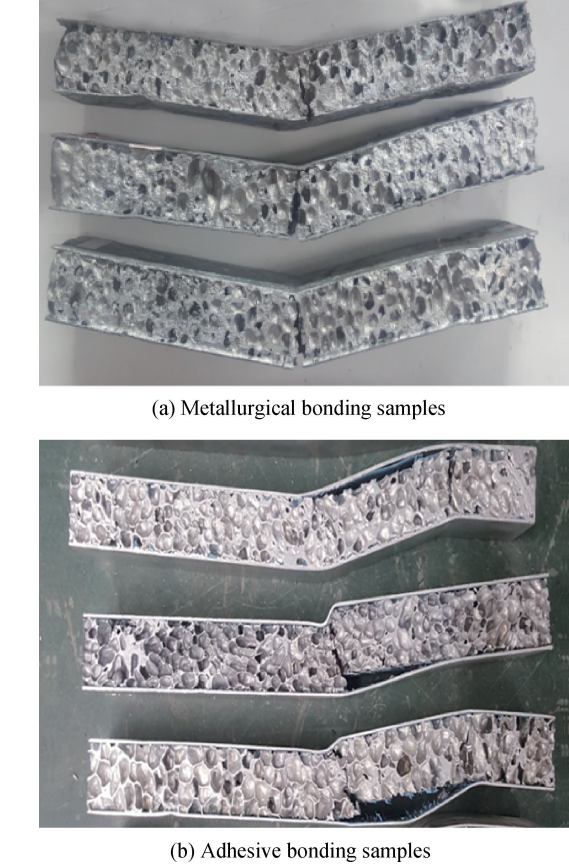


图 6 冶金复合和胶黏泡沫铝夹芯板样品的疲劳破坏形貌
Fig. 6 Fatigue fracture morphology of metallurgical bonding and adhesive bonding aluminum foam sandwich samples

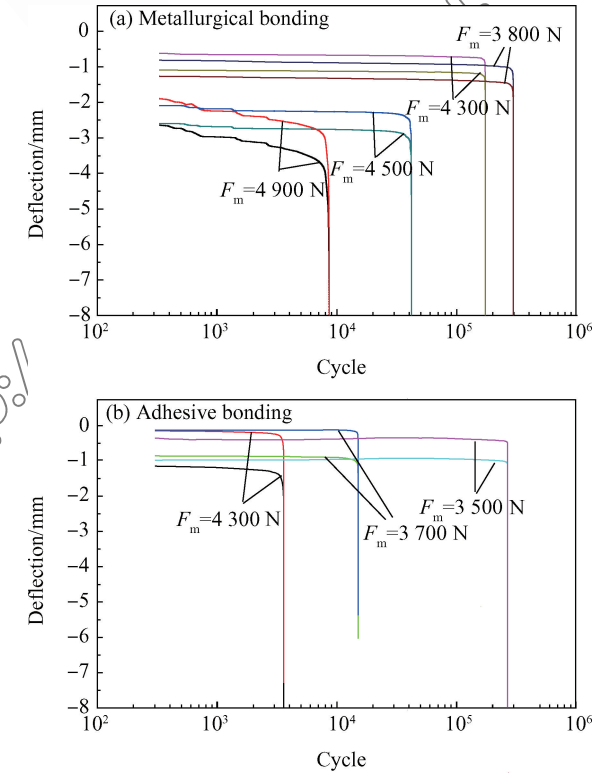


图 7 冶金复合和胶黏夹芯板样品的挠度-循环周次曲线
Fig. 7 Deflection versus number of cycles of metallurgical bonding and adhesive bonding sandwich samples

点的出现周次随着循环载荷最大力 F_m 的减小而延后, 对应于 $S-N$ 的延长。在相同载荷 ($F_m = 4\ 300\text{ N}$) 作用时, 冶金复合样品的挠度突变点周次远长于胶黏样品, 同时在相同破坏周次下冶金复合样品比胶黏样品能承受更大的循环载荷, 说明冶金复合样品在相同载荷下拥有更好的疲劳寿命, 相较于胶黏样品有更好的疲劳承载能力。

结合图 6 的样品疲劳破坏形式及实验过程中所观察到的样品最先断裂位置, 分析可知胶黏样品承受循环载荷到达一定周次后发生面板与泡沫铝基体的脱离。这种脱离造成了样品后续的受力不均, 加剧了泡沫铝芯层的裂纹生成和扩展, 最终导致芯层发生剪切断裂。

通过前期的工作^[17]和相关文献^[20-21]中对两种结合方式力学性能的研究结果, 表明冶金复合样品的结合强度远大于胶黏样品。两种样品的剥离强度实验结果如图 8 所示。其中冶金复合样品的剥离强度为 $140.0\text{ N}\cdot\text{mm}/\text{mm}$, 胶黏样品的剥离强度为 $27.50\text{ N}\cdot\text{mm}/\text{mm}$, 冶金复合泡沫铝夹芯板剥离强度远高于胶黏样品。图 9 为两种样品剥离实验后样品失效的形貌。从图 9(a) 可以看到, 冶金复合样品的铝基体表面的热浸镀层并没有被剥离开来, 主要破坏位置为泡沫铝芯材, 在剥离开来的铝板表面可以观察到撕裂的泡沫铝, 这说明冶金复合的泡沫铝夹芯板中, 芯层和面板之间的连接强度高于芯层的强度, 热浸镀层在铝基体表面形成了良好的连接。而图 9(b) 中胶黏样品的剥离铝板表面只有很少的撕裂胶膜, 显示胶膜与铝板几乎完全脱离, 表明胶膜和铝板的结合强度低于胶膜本身的强度, 这应与胶膜热压过程及铝板没有进行良好的表面处理有关。

有关研究^[13, 23]指出, 泡沫铝夹芯板在受到循

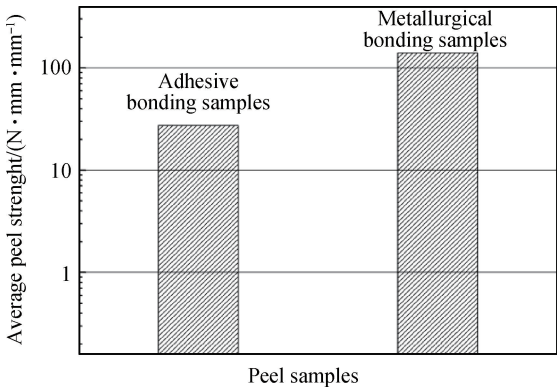
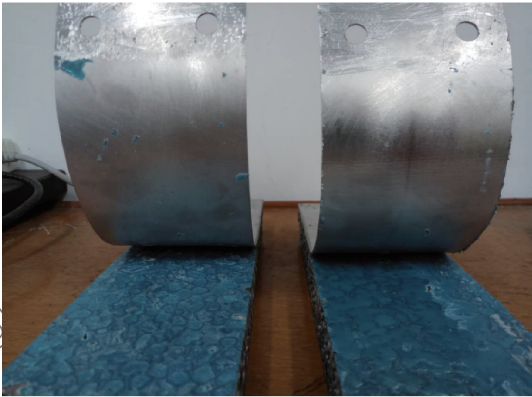


图 8 冶金复合和胶黏泡沫铝夹芯板样品的平均剥离强度对比
Fig. 8 Average peel strength of metallurgical bonding and adhesive bonding sandwich samples



(a) Metallurgical bonding samples



(b) Adhesive bonding samples

图 9 冶金复合和胶黏泡沫铝夹芯板样品剥离实验破坏形貌
Fig. 9 Peel fracture morphology of metallurgical bonding and adhesive bonding aluminum foam sandwich samples

环载荷时, 不同位置的位移矢量存在差异。事实上, 在疲劳应力的作用下, 由于面板和泡沫铝芯层的弹性模量及压缩模量等存在差异, 面板和芯层之间存在一定大小的应变差值, 这部分应变由锌铝合金连接界面区来承受, 起到将面板和芯材连接、在外力载荷下协同工作的作用。随着变形量的增加, 锌铝合金层所承受的力随之增加。当泡沫铝夹芯板进入塑性变形阶段时, 基于铝合金的塑性变形行为及泡沫铝的塑性变形行为差异, 相同应力下铝合金面板内的变形量小于泡沫铝芯层, 因此锌铝合金层所承受的力会随着变形量的增加而增加, 且下面板熔合区比上面板熔合区承受更大的力。在胶黏样品中, 由于连接强度较低, 随着变形量的增加, 维持夹芯板连接的应力水平不足, 优先发生面板脱离, 继而由于受力不均, 泡沫铝芯材会迅速开裂破坏。冶金复合样品由于锌铝合金层有足够的连接强度, 在较高的应力水平下, 因没有发生界面脱离, 压头下方样品直接开裂破坏。因此, 可认为泡沫铝夹芯

板发生脱胶的临界条件是连接层受到形变而产生的应力大于界面结合强度。

2.4 冶金复合泡沫铝夹芯板样品连接面强化机制

铝合金面板和泡沫铝基体首先进行预处理，除去了表面杂质和氧化膜，在热浸镀的过程中，泡沫铝基体和铝合金面板的连接面都和熔融态 Zn-10Al 直接接触，在此高温温度区，焊料铝和锌相互具有较大的固溶度，因此发生明显的互扩散行为^[24-25]。如图 10 所示，Zn 原子由熔融 Zn-10Al 合金向泡沫铝基体和铝合金面板内部扩散，基体中的 Al 向 Zn-10Al 合金扩散。因基体表层中锌固溶量的提高降低了其熔点^[26]。随着基体表层因 Zn 固溶度提高而熔化，基体表面氧化膜会随之破碎而遭到破坏，并进入熔融的锌铝合金中。在热浸镀过程中，合金原子的互扩散及氧化膜有效去除，促进了铝基体连接面形成与其基体形成良好的冶金结合的均匀致密的锌铝基合金镀层，为后一步夹芯结构制备创造了良好的条件。

在夹芯结构热压复合过程中，锌基合金在高温下再次熔化，由于在热浸镀阶段铝基体表面的氧化膜已部分去除，Zn 原子对铝基体有很强的浸润性，熔融状态下很容易扩散入铝基体，占据氧化膜和部分 Al 原子的位置，实现 Zn 和 Al 原子更频繁的扩散。随着 Zn 原子向铝基体内部的扩散，铝基体表层的 Zn 和 Al 成分对比发生变化。随着锌含量的升高，铝合金的熔点降低，最终会导致靠近缺口的部分氧化膜下的铝基体熔融成为液态，由于氧化膜的密度很小，导致其漂浮在熔融的合金中而脱离铝基体表面，达成锌基合金对铝基体良好的润湿。为了去除漂浮的氧化膜，在连接的过程中，通过添加超声使泡沫铝基体和铝合金面板发生震动，此时由

于锌基合金处于熔融态，震动使其扩散效果加强。研究表明，功率超声作用在金属熔体时，会在其中诱发空化效应^[25, 27-28]。空化效应会在金属熔体中引发例如声流、冲击波等力学作用^[29-30]，这些力学作用会进一步彻底破坏氧化膜，从而达到完全的润湿。同时空化效应引发的力学作用还会起到类似搅拌的作用^[29]，排除熔融锌铝合金中夹杂的气体，使最终的锌铝合金熔合区密实连续，无气孔等缺陷存在。功率超声的添加实现锌基合金和铝基体进一步的原子结合，在受到疲劳作用时很难发生泡沫铝夹芯板和面板的脱离，提高了其疲劳极限和疲劳承载周次。

3 结 论

使用 Zn-10Al 锌铝合金作为焊料，采用热浸镀和超声振动热压的方法制备了冶金复合泡沫铝夹芯板样品，形成了铝板-锌铝合金-泡沫铝复合界面，对该界面和胶黏样品连接界面进行了微观分析，并对两种样品进行三点弯曲疲劳试验，分析比较实验结果，得出以下结论：

(1) 冶金复合泡沫铝夹芯板的界面区焊料密实连续，没有明显的连接缺陷。泡沫铝基体和贴面铝板表面出现因锌铝合金熔融造成的明显侵蚀现象。相应的 EDS 线扫描分析表明，Zn 和 Al 原子在界面处发生互相扩散并形成连续分布，表明界面形成了良好的冶金结合。

(2) 冶金连接泡沫铝夹芯板疲劳极限显著高于胶黏样品，分别为 3 058 N 和 2 829 N。两种疲劳试样的断裂方式明显不同，胶黏样品的疲劳失效方式为泡沫铝基体和面板的剪切脱胶破坏，而冶金复合样品在三点弯曲疲劳过程中没有发生面板与芯材分离，而是因泡沫铝芯材达到承载极限后发生剪切断裂后扩展到面板造成整个样品失效，表明冶金复合泡沫铝夹芯板样品的弯曲疲劳性能优于胶黏样品。

(3) 剥离实验结果表明，冶金复合样品的结合强度远高于胶黏样品，剥离强度分别为 140.0 N·mm/mm 和 27.50 N·mm/mm。超声振动热压造成冶金复合界面熔合区密实连续，基材表面氧化膜被清除，界面结合强度高，在疲劳过程中不容易发生界面剪切破坏；而胶黏样品的胶接层则因界面物理结合强度相对较弱，对循环载荷更加敏感，在疲劳过程中容易发生界面剪切破坏，形成脱胶现象。

(4) 冶金复合和胶黏泡沫铝夹芯板的挠度随疲

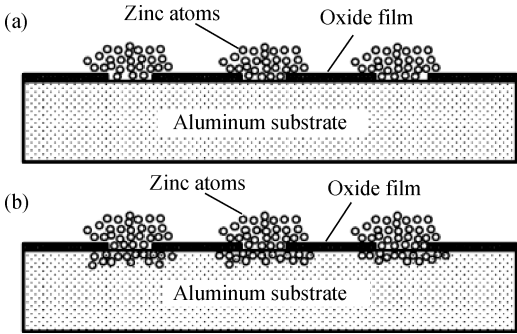


图 10 冶金复合机制示意图

Fig. 10 Schematic diagrams of mechanism of metallurgical composite process

((a) before diffusion; (b) after diffusion)

劳周次的变化在不同载荷下规律基本一致,在疲劳实验前期,挠度随周次缓慢增长,在接近疲劳寿命的时候突然破坏,挠度大幅增加。其疲劳损伤过程主要分为缓慢的疲劳裂纹积累孕育和裂纹快速扩展至断裂两阶段。

参考文献:

- [1] ASHBY M F, LU T J. Metals foam: A survey[J]. Science China, 2003, 46(6): 521-532.
- [2] DAVIES G J, ZHEN S. Metallic foams: Their production, properties and applications[J]. Journal of Materials Science, 1983, 18(7): 1899.
- [3] ALVANDI-TABRIZI Y, WHISLER D A, KIM H, et al. High strain rate behavior of composite metal foams[J]. Materials Science and Engineering, 2015, 631: 248-257.
- [4] JING L, WANG Z H, ZHAO L M. Dynamic response of cylindrical sandwich shells with metallic foam cores under blast loading numerical simulations[J]. Composite Structures, 2016, 99(5): 213-223.
- [5] 李永强, 李锋, 何永亮. 四边固支铝基蜂窝夹层板弯曲自由振动分析[J]. 复合材料学报, 2011, 28(3): 210-216.
LI Y Q, LI F, HE Y L. Flexural vibration analysis of honeycomb sandwich plate with completely clamped support[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(3): 210-216 (in Chinese).
- [6] SUGIMUR Y, MEYER J, HE MY, et al. On the mechanical performance of closed cell Al alloy foams[J]. Acta Materialia, 1997, 45(12): 5245-5259.
- [7] BUIMAN M, ZENKERT D. Fatigue of foam core sandwich beams-1: Undamaged specimens[J]. International Journal of Fatigue, 1997, 19(7): 551-561.
- [8] SHA J B, YIP T H, WONG S K M. In situ surface displacement analysis of fracture and fatigue behaviour under bending conditions of sandwich beam consisting of aluminium foam core and metallic face sheets[J]. Materials Science and Technology, 2006, 22(1): 51-60.
- [9] PALANO F, NOBILE R, DATTOMA V, et al. Fatigue behaviour of aluminium foam sandwiches[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2013, 36(12): 1274-1287.
- [10] VENDRA L, NEVILLE B, RABIEI A. Fatigue in aluminium-steel and steel-steel composite foams[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 517(1): 146-153.
- [11] HARTE A M, FLECK N A, ASHBY M F. The fatigue strength of sandwich beams with an aluminium alloy foam core[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(6): 499-507.
- [12] YANG F P, LIN Q Y, JIANG J J. Experimental study on fatigue failure and damage of sandwich structure with PMI foam core[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2015, 38(4): 456-465.
- [13] 姚进斌, 沙江波. 含泡沫铝芯的复合板弯曲疲劳行为的研究[J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(1): 79-83.
YAO J B, SHA J B. Study on fatigue behavior of sandwich beams consisted of aluminum foam core under bending condition[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2007, 25(1): 79-83 (in Chinese).
- [14] American Society for Testing and Materials. Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure: ASTM-C393-C393M-06[S]. Conshohocken: ASTM International, 2006.
- [15] 车淳山, 曾发明, 孔纲, 等. 热浸镀锌铝系列合金镀层的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(8): 135-138.
CHE C S, ZENG F M, KONG G, et al. Research progress of hot-dip Zinc-Aluminum alloy coatings[J]. Materials Review, 2013, 27(8): 135-138 (in Chinese).
- [16] 李会谦, 许更国, 马江虹, 等. 热浸镀技术及其应用[J]. 有色金属, 2008(s1): 17-19.
LI H Q, XU G G, MA J H, et al. Technology and application of hot-dip method[J]. Nonferrous Metals Extractive Metallurgy, 2008(s1): 17-19 (in Chinese).
- [17] 单既万, 胡正飞, 王宇, 等. 泡沫铝冶金连接及其界面结构与力学性能研究[J]. 材料导报, 2017, 31(4): 94-97.
SHAN J W, HU Z F, WANG Y, et al. Interfacial characteristics and mechanic properties of aluminum foam joined by different methods[J]. Materials Review, 2017, 31(4): 94-97 (in Chinese).
- [18] HARTE A M, FLECK N A, ASHBY M F. Fatigue failure of an open cell and a closed cell aluminum alloy foam[J]. Acta Metallurgica, 1999, 47(8): 2511-2524.
- [19] ROOSEN D. Fatigue behaviour of sandwich foam core materials: comparison of different core materials[J]. Journal of Advanced Materials, 2005, 37(2): 16-20.
- [20] KITAZONO K, KITAJIMA A, SATO E, et al. Solid state diffusion bonding of closed-cell aluminum foams[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2002, 327(2): 128-132.
- [21] CHEN N N, FENG Y, CHEN J, et al. Vacuum brazing processes of aluminum foam[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(6): 1118-1122.
- [22] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. 夹层结构滚筒剥离强度试验方法: GB/T 1457—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
National Technical Committee on Fiber Reinforced Plastic of

- Standardization Administration of China. Test method for climbing drum peel strength of sandwich constructions: GB/T 1457—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005 (in Chinese).
- [23] SHA J B, YIP T H. In situ surface displacement analysis on sandwich and multilayer beams composed of aluminum foam core and metallic face sheets under bending loading[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 386(1-2): 91-103.
- [24] WANG H, YANG D, HE S, et al. Fabrication of open-cell Al foam core sandwich by vibration aided liquid phase bonding method and its mechanical properties[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2010, 26(5): 423-428.
- [25] WAN L, HUANG Y, LV S, et al. Fabrication and interfacial characterization of aluminum foam sandwich via fluxless soldering with surface abrasion[J]. Composite Structures, 2015, 123: 366-373.
- [26] FENG J I, XUE S, LOU J, et al. Microstructure and properties of Cu/Al joints brazed with Zn-Al filler metals[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2): 281-287.
- [27] DAS A, KOTADIA H R. Effect of high-intensity ultrasonic irradiation on the modification of solidification microstructure in a Si-rich hypoeutectic Al-Si alloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 125(3): 853-859.
- [28] XU Z, YAN J, ZHANG B, et al. Behaviors of oxide film at the ultrasonic aided interaction interface of Zn-Al alloy and Al₂O₃p/6061Al composites in air[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 415(1): 80-86.
- [29] ZHANG S, ZHAO Y, CHENG X, et al. High-energy ultrasonic field effects on the microstructure and mechanical behaviors of A356 alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 470(1): 168-172.
- [30] ZHENG D S, CHEN R R, MA T F, et al. Microstructure modification and mechanical performances enhancement of Ti44Al-16Nb1Cr alloy by ultrasound treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 710: 409-417.