

超声 C 扫描在 C/SiC 复合材料与钛合金薄板 钎焊质量中的应用

罗 明 张 颖 吴时红 赵建华 何双起

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 通过超声水浸脉冲法对 C/SiC 复合材料的声阻抗进行测定,结果表明,其声阻抗介于 $(4.0 \sim 4.7) \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 之间;未焊合时界面反射系数约为 1,焊接良好时界面反射系数介于 0.71 ~ 0.74 之间。为使未焊合时界面反射信号幅度比焊接良好时至少相差 6 dB,C 扫描检测时应监测二次以上界面反射信号幅度,并采用金相的方法对 C 扫描结果进行验证,二者一致性较好。

关键词 超声 C 扫描,C/SiC 复合材料,钛合金薄板,钎焊质量

中图分类号:TB553

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.06.019

Application of Ultrasonic C-scan in the Brazing Quality of C/SiC Composite and Titanium Alloy

LUO Ming ZHANG Ying WU Shihong ZHAO Jianhua HE Shuangqi

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The sound impedance of C/SiC composite is measured by the method of ultrasonic immersing pulse echo, and which is between $4.0 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ and $4.7 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$. The relationship of reflection is about 1 when there is crack in brazing interface and it is between 0.71 and 0.74 when there is no crack. For the differential value of the amplitude of reflection wave is at least 6 dB between two status, the amplitude of more than second reflection wave will be monitored when C-scan. The result of C-scan is certified by metallographic analysis, and the uniformity of both is good.

Key words Ultrasonic C-scan, C/SiC composite, Titanium alloy, Brazing quality

0 引言

C/SiC 复合材料(以下简称 C/SiC)具有轻质、高模、高热导率、低热膨胀系数、高温抗氧化等优异性能,是很好的高温结构材料,被广泛应用于航空航天领域^[1-2],在国外,C/SiC 与钛合金钎焊复合结构已被应用于超然冲压发动机的主动冷却结构中^[3],而国内 C/SiC 与钛合金的连接技术研究还处于探索阶段,目前国内外对于此方面的研究内容鲜有报道^[4]。

由于 C/SiC 与钛合金在物化性质和力学性能方面存在较大差异,给其连接带来很大的困难,常出现孔洞、开裂等未焊合缺陷^[5-6]。该类缺陷往往平行于焊接面,呈线状或面状^[4],这类缺陷的存在对材料的

力学性能造成严重影响,因此,开展该结构钎焊质量的无损检测技术研究具有十分重要的意义,本文以 C/SiC 与钛合金薄板钎焊结构为研究对象,该结构采用 BNi68+Ti 复合钎料通过真空钎焊而成,将利用超声脉冲反射法对该结构钎焊质量开展无损检测技术研究。

1 检测原理

1.1 界面反射特征

鉴于 C/SiC 的结构特性,其对声波的衰减严重,若采用脉冲反射法,声波只能从钛合金一侧入射,通过监测钛合金(钎层)/C/SiC 界面反射信号幅度强弱判断焊接质量。式(1)表示了界面反射声压与声阻

收稿日期:2015-04-15

作者简介:罗明,1983 年出生,博士,主要从事超声无损检测技术研究
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 6 期

抗的关系,可知界面信号幅度强弱主要由界面两侧材料声阻抗决定。

$$\begin{cases} r = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \\ p_r = p_0 r \end{cases} \quad (1)$$

式中, r 为反射系数; z_1 为介质1的声阻抗; z_2 为介质2的声阻抗; p_r 为界面反射声波声压; p_0 为界面入射声波声压。

图1为C/SiC与钛合金焊合时和未焊合时界面反射的波形特征,由于钎料足够薄,且钎料声阻抗与钛合金接近,约等于 $2.7 \times 10^7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$,可将二者视为一体。当焊合时, z_1 为钛合金的声阻抗, z_2 为C/SiC声阻抗,由于C/SiC的声阻抗一定比0大,此时 $p_r < p_0$,界面反射信号会随着反射次数的增加而衰减,而未焊合时, z_2 为空气的声阻抗,由于空气的声阻抗几乎为零,此时 $p_r \approx p_0$,界面反射信号会随着次数的增加,缓慢衰减。

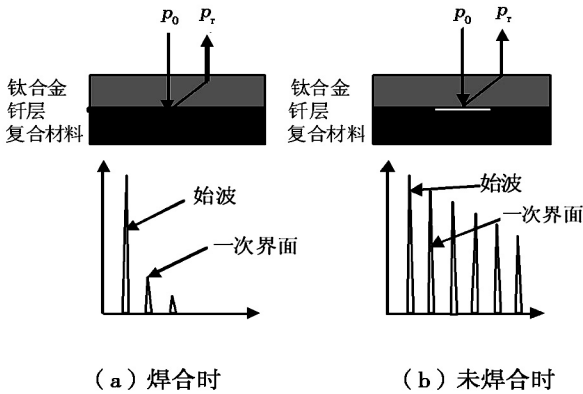


图1 C/SiC与钛合金焊合时与未焊合时界面反射的特征波形

Fig. 1 Characteristic reflection wave from welding interface of C/SiC and titanium alloy

1.2 C/SiC声阻抗对选择界面信号的影响

C/SiC为各向异性材料,声衰减大、频散严重,C/SiC声阻抗的测试方法按图2所示方法进行,测试原理如式(2)所示。

$$\begin{cases} z_{C/SiC} = \frac{A+R}{A-R} z_{\text{water}} \\ R = \frac{z_{\text{steel}} - z_{\text{water}}}{z_{\text{steel}} + z_{\text{water}}} \\ A = \frac{P_{\text{steel}}}{P_{C/SiC}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $z_{C/SiC}$ 为C/SiC的声阻抗; z_{steel} 为钢的声阻抗 $4.5 \times 10^7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$; z_{water} 为水的声阻抗 $1.5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 。

$s; p_{\text{steel}}$ 为钢上表面的反射波高; $p_{C/SiC}$ 为C/SiC上表面的反射波高。

测试前,先将等厚度的C/SiC试样和不锈钢试样表面磨平抛光成镜面,比较相同检测灵敏度(分贝值)下不锈钢试块上表面与C/SiC试样上表面反射信号的幅度,并通过式(2)得到C/SiC的声阻抗。

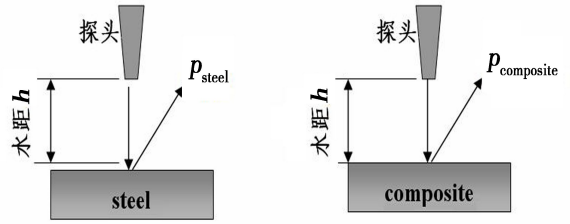


图2 反射法测量C/SiC声阻抗示意图

Fig. 2 Diagram of the pulse-echo method for testing the acoustic impedance of C/SiC

C/SiC声阻抗的测试结果如图3所示,可以看出,与钢不同的是,各向异性的C/SiC,组织不均匀,各测试点的密度和声速不是定值,因此材料的声阻抗也不是定值,图中C/SiC的声阻抗在 $(4.0 \sim 4.7) \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 变化,由式(1)可知,焊接良好时一次界面反射系数在 $0.71 \sim 0.74$,因此,为了使焊接良好与未焊合时界面反射信号相差至少6 dB,检测时应选择二次以上界面回波。

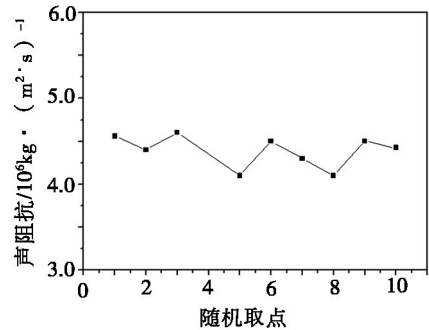


图3 C/SiC声阻抗测试结果

Fig. 3 Result of the acoustic impedance of C/SiC

2 实验

在制作试样时,人工缺陷是通过在相应区域不填充钎料的方法制得,成型后人工缺陷处的金属层与C/SiC之间形成空腔,模拟未焊合缺陷,实验共制作2件试件,试样外观及人工缺陷位置如图4所示。其中预置的人工缺陷形状呈三角形,用于考察检测分辨力,缺陷尺寸如表1所示。

实验采用仪器为USIP40超声波探伤仪,15 MHz喷水探头,自主研发的C扫描检查系统。
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015年 第6期

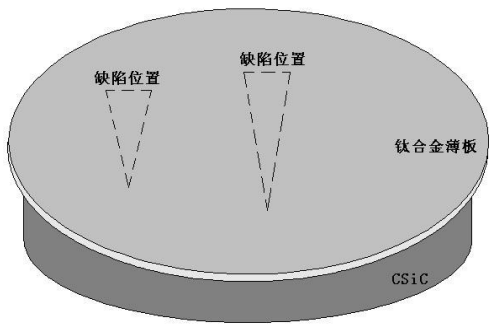


图4 试样外观及缺陷位置示意图

Fig. 4 Diagram of the sample configuration and the defect position

表1 试样人工缺陷测试尺寸与设计尺寸的对比

Tab.1 Comparison of the defect's testing size and design size

平板试样	设计尺寸/mm ²	测试尺寸/mm ²
1#	A: 15×50/2, B: 10×25/2	A: 16×60/2, B: 12×20/2
2#	A: 20×50/2, B: 10×25/2	A: 20×75/2, B: 12×52/2

3 结果分析

图5是采集人工试样第四次界面回波的超声波C扫描结果,图中白色区域为人工缺陷,超声C扫描测试得到的人工缺陷尺寸与设计尺寸的对比结果如表1所示。可以看出,表1中测试结果与设计尺寸存在一定的差异,可能原因与钎料流动造成缺陷变形有关。与1#试样相比,2#试样中除人工缺陷的部分颜色较浅,其中图5(b)A、B处为缺陷区,C处为颜色较浅区,D处为颜色较深区,图6为三区域典型的超声信号特征,图7为三区域的金相结果。从信号特征和金相结果可以看出,人工缺陷处的回波界面为钛合金/空气,因此信号幅度高,反射次数多;C区处钎料融化后与钛合金钎着良好,但与C/SiC未钎着上,这是在焊接过程中的自然缺陷,此时的回波界面为钛合金(钎料)/空气,可以看出界面不平整,因此信号幅度较低,反射次数较少,且回波信号的位置向后移;D区为焊接良好区,此时的回波界面为钛合金(钎料)/C/SiC,声波部分透射入C/SiC内部,因此信号幅度最低,反射次数最少,由于焊接界面不平整,信号幅度比理论结果偏低。

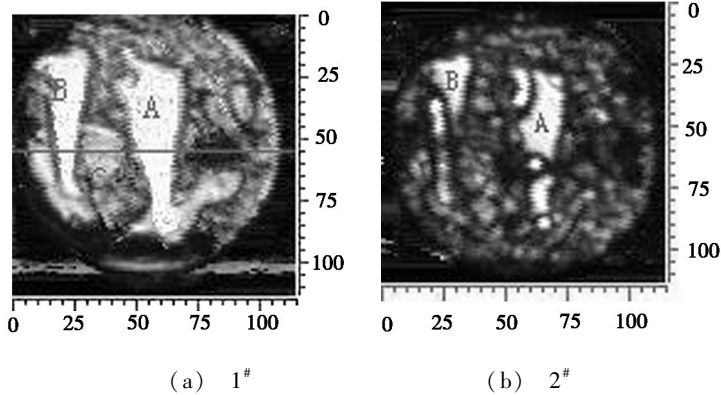


图5 试样超声C扫描结果
Fig. 5 Result of the sample's ultrasonic C-scan

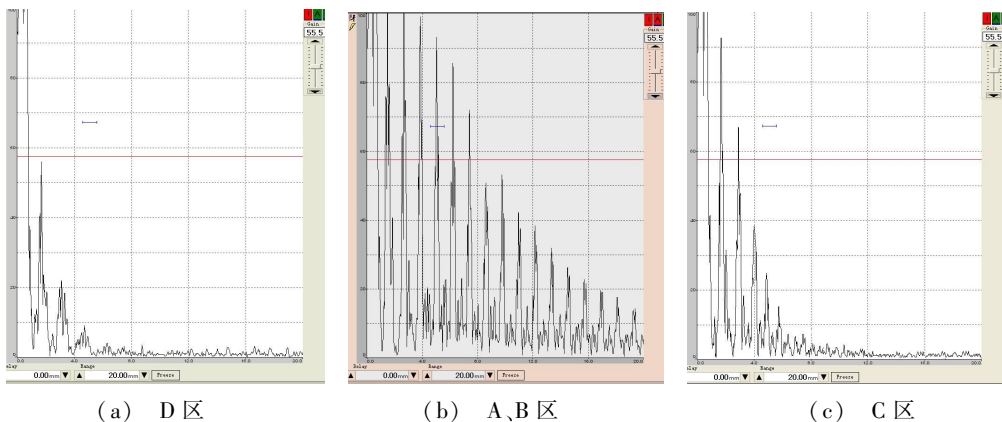
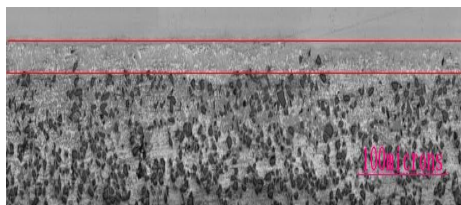
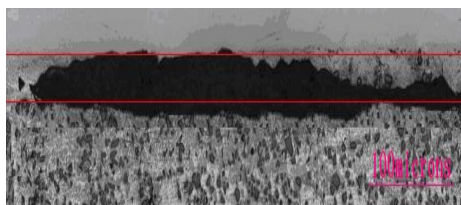


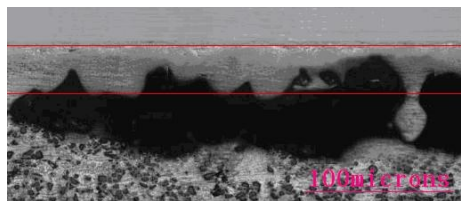
图6 三类区域对应的信号特征
Fig. 6 Signal character of three region



(a) D区



(b) A、B区



(c) C区

图7 2#人工试样的金相结果

Fig. 7 Result of metallographic analysis of 2# sample

4 结论

本文首先通过实验的方法对 C/Si 复合材料的声阻抗进行了测定,发现其声阻抗不是一定值,而是介于 $(4.0 \sim 4.7) \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 。未焊合时界面反射系数

(上接第 81 页)

3 结论

采用超声波扫描显微镜对不同焊接工艺条件下的不锈钢点焊接头进行无损检测,分析了接头的 C 扫描图像及 A 扫描信号。得出以下结论:(1)C 扫描图像不仅能够反映不同焊接工艺条件下焊核内部形貌特征及图像演变特征,而且可以甄别焊接过程中产生的飞溅、过烧等缺陷;(2)C 扫描图像的各特征区域表现出不同的 A 扫描信号特征,通过 A 扫描波形特征可以识别点焊接头缺陷;(3)基于超声波 C 扫描图像测量法测得的焊核直径范围为 $4.39 \sim 5.25 \text{ mm}$,与实际测量结果吻合。

参考文献

[1] 陈振华,卢超,陆铭慧,等. 基于声-超声检测的薄钢板多焊点结构完整性评价技术[J]. 机械工程学报, 2013, 49(16): 57-61

[2] 张柯柯,杜宜乐,邱然锋,等. A6061 铝合金与 Q235

约为 1,焊接良好时界面反射系数介于 $0.71 \sim 0.74$ 。为使未焊合时界面反射信号幅度比焊接良好时至少相差 6 dB,C 扫描检测时应监测二次以上界面反射信号幅度。同时,为避免选择信号次数过高而带来其他干扰信号,文中选择四次界面反射信号进行 C 扫描,并采用金相的方法对 C 扫描结果进行验证,二者一致性较好。

参考文献

[1] Krenkel W. Ceramic matrix composites fiber reinforced ceramics and their applications[M]. Germany: Wiley-VCH2008

[2] 韩秀峰. 碳改性 C/SiC 的结构与性能[D]. 西安:西北工业大学,2006

[3] Bouquet C, Lacombe A, Hauber B, et al. Ceramic matrix composites cooled panel development for advanced propulsion systems[R]. AIAA, 2004-1998

[4] 吴永智,李海刚,等. C/SiC 与 TC4 钎焊接头的热震性能[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(5): 64-68

[5] Daniel L, Tumino G, Henriksen T, et al. Advanced composite technology in reusable launch vehicle (RLV) [C]. Space 2004 Conference and Exhibit [R]. San Diego, California USA AIAA 2004-5825, 2004

[6] 张建艺. 陶瓷基 C/SiC 在喷管上的应用[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(4): 14-16

(编辑 任涛)

钢电阻点焊接头组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(12): 64-67

[3] 张勇,付玉生. 白车身电阻点焊质量控制技术[J]. 电焊机, 2012, 4(11): 90-93

[4] 刘凯,刚铁. 铝合金点焊焊点超声回波信号特征与熔核直径测量方法[J]. 焊接学报, 2011, 32(8): 105-108

[5] 钱昌明. 双相钢电阻点焊熔核特征分析及质量检测方法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2014

[6] Thornton M, Han L, Shergold M. Progress in NDT of resistance spot welding of aluminium using ultrasonic C-scan[J]. NDT&E International, 2012, 48: 30-38

[7] 陈振华,史耀武,赵海燕. 薄镀锌钢板点焊超声成像分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 274-278

[8] 赵雪梅. 铝合金搅拌摩擦焊接头超声信号特征与质量评价方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010

(编辑 任涛)