金属夹心 CFRP 复合材料超声检测方法

高晓进
(航天特种材料及工艺技术研究所，北京 100074)

摘要：新型机翼、弹翼等结构已采用金属夹心碳纤维增强(Carbon Fiber Reinfored Polymer, CFPR)复合材料结构。针对该类复合材料结构的材料组成和结构特点，分析和对比常用的超声穿透法和超声反射法能否对金属夹心 CFPR 复合材料内部质量进行检测，提出了先采用超声 C 扫穿透法确定缺陷的平面位置，然后采用高分辨率超声 A 扫反射法确定复合材料中分层缺陷及采用超声相位法确定复合材料与金属间的脱粘缺陷的方法。采用提出的方法检测带有预置缺陷的试样和实际产品。检测结果表明，提出的方法可准确检测试样中大小为 5 mm×5 mm 的预置人工分层和脱粘，且能准确检测实际产品中的缺陷。

关键词：复合材料；金属夹心；相位法；超声检测
中图分类号：TB559　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-3630(2019)-05-0526-06
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.05.008

An ultrasonic detection method for metal sandwich CFRP composite

GAO Xiao-jin
(*Research Institute of Aerospace Special Materials and Processing Technology*, *Beijing* 100074, *China*)

Abstract: The structure of metal sandwich carbon fiber reinfored polymer (CFRP) composite has been widely adopted in new aircraft wing, missile wing and others. The applicabilities of the common ultrasonic penetration and ultrasonic reflection methods for the detection of the metal sandwich CFRP composite are analyzed respectively according to its material and structure characteristics. On this basis, a method combining ultrasonic C-scan penetration method, high resolution ultrasonic A-scan reflection method and ultrasonic phase method is proposed. Experimental researches on the composite sample with artificial defects and on the actual products have been conducted respectively. The results show that the proposed combination method can detect all the 5 mm×5 mm artificial lamination and debonding defects in the sample and the lamination and debonding defects in the actual products.

Key words: composite; metal sandwich; phase method; ultrasonic method

0 引 言

碳纤维增强树脂基复合材料碳纤维增强(Carbon Fiber Reinfored Polymer, CFPR)是由碳纤维增强体、树脂基体复合而成的材料，具有强度高、密度低、抗疲劳性能好、一次成型等特点，已广泛应用于国防工业及民用航空领域[1-6]。

由 CFRP 制备的新型机翼、弹翼等结构，在受力较大的接头部分通常采用金属夹心 CFRP 结构，即内部为金属，外部为 CFRP，共固化成型。该类结构在复合材料内部易产生分层缺陷，在复合材料与金属粘接面易产生脱粘缺陷。接头部位的缺陷会影响机翼、弹翼的强度，严重时会导致复合材料断裂，或金属与复合材料分离，严重影响飞行安全。

超声检测是复合材料最成熟和最有效的无损检测技术[7]，本文研究并确定金属夹心 CFRP 复合材料的超声检测方法，对提高飞行器的机翼、弹翼的内部质量起到重要的作用。

1 超声检测方法的分析和确定

1.1 结构中的缺陷

图 1 为金属夹心 CFRP 复合材料典型结构，结构中复合材料的厚度范围为 2～10 mm，夹心金属与上下复合材料之间分别形成两个界面，即Ⅰ界面和Ⅱ界面，界面位置易产生脱粘缺陷，复合材料中纤维铺层之间易产生分层缺陷。

1.2 超声检测方法的分析

复合材料常用的超声检测方法有脉冲穿透法

收稿日期：2018-06-17; **修回日期：**2018-08-20
作者简介：高晓进(1987－), 男, 江西九江人, 硕士, 研究方向为复合材料无损检测。
通讯作者：高晓进, E-mail: gao19870311@163. com

和反射法[8]。本文所述的金属夹心 CFRP 复合材料中的金属夹心必须经过无损检测工序，禁止使用含有超标缺陷的金属，因此，金属夹心对复合材料结构的超声检测没有影响，金属的无损检测技术很成熟，本文不做研究。

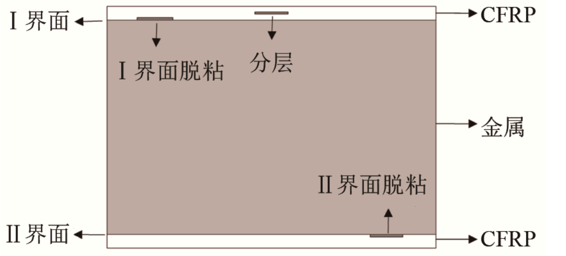


图 1　金属夹心 CFRP 复合材料结构
Fig.1　The structural representation of the metal sandwich CFRP composite

采用超声穿透法检测时，耦合方式为采用喷水水柱进行耦合，发射探头发射的超声波传播经过金属夹心复合材料后被接收探头接收。如果复合材料层中出现分层缺陷或复合材料/金属界面(Ⅰ界面、Ⅱ界面)出现脱粘缺陷，这些缺陷会对超声波造成严重的衰减，使得超声波的幅值消失或降低。检测时根据超声波的幅值来判断材料内部的缺陷情况，该方法可确定缺陷的平面位置，但无法确定缺陷的深度。

结构中的复合材料的厚度较薄(2～10 mm)，且与金属之间有粘接界面，普通的超声反射法难以检测复合材料中的分层缺陷和界面脱粘缺陷。图 2 是中心频率为 5 MHz 的常用的超声平探头，从结构的一侧检测得到的反射信号 A 扫图，由图 2 可知，检测分辨率不足以分辨出结构的表面和粘接面。

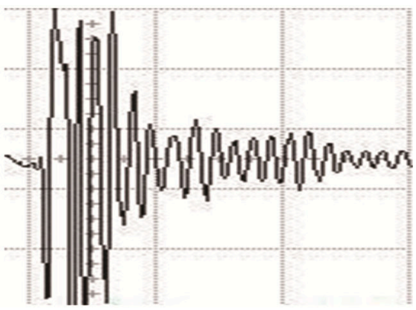


图 2　超声平探头检测信号
Fig.2　The detection signal of plat ultrasonic probe

为增加检测分辨率，采用中心频率为 5 MHz、高阻尼、配有延迟块的超声探头[9]，对金属夹心复合材料(金属夹心为钢)从Ⅰ界面一侧进行检测，界面由 CFRP 复合材料和钢组成，CFRP 复合材料和钢的声阻抗 Z(材料密度×声速)的值见表 1。

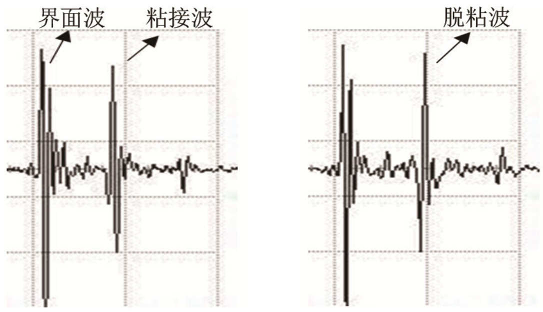
根据声学反射原理可知，界面的反射率 $R=\frac{z_2-z_1}{z_2+z_1}$ (z_2 为被入射材料声阻抗，z_1 为入射材料声阻抗)。

表 1　各材料的参数
Table 1　Parameters of material

材料	密度/(g·cm^{-3})	声速/(km·s^{-1})	声阻抗/(kg·cm^{2}·s^{-1})
CFRP 复合	1.29	2.7	348.3
材料钢	7.90	5.9	4 661.0

根据反射率公式可计算出 CFRP/钢界面(未脱粘)的超声信号反射率 R=86%。采用超声反射法检测 CFRP/钢界面的脱粘时，脱粘处的超声信号反射率≈100%。脱粘处和未脱粘处的超声反射信号的幅值比为 100/86=1.16，即脱粘处和未脱粘处的反射波高相差较小。

高分辨超声探头的检测信号如图 3 所示。



(a) 正常区域　　(b) 脱粘区域
图 3　高分辨超声探头的检测信号
Fig.3　The detection signal of high resolution ultrasonic probe

根据图 3 可知，高分辨超声探头能够分辨出入射界面波和粘接波信号，即纵向分辨率能够达到检测要求。正常区域的粘接波幅值为满幅的 68%，脱粘区域的粘接波(脱粘波)幅值为 72%，从正常区域到脱粘区域，粘接波幅值从 68%增加到 72%，二者的倍数为 72%/68%=1.06，比理论值 1.16 小。因为理论上需要满足脱粘区域与正常区域的粘接波幅值比值大于 2 的条件时[10]才能确定有无缺陷，所以难以判断是否脱粘。

由上述可知，超声穿透法和反射法都无法检测结构中的缺陷。根据结构特点，本文先采用超声 C 扫穿透法确定缺陷的平面位置，然后采用高分辨超声 A 扫反射法确定复合材料中分层缺陷及采用超声相位法确定复合材料与金属间的脱粘缺陷。

超声 C 扫穿透法和高分辨超声 A 扫反射法较成熟，不做讨论。本文讨论超声相位法检测原理。

如图 4 所示，入射超声信号 P_0 经过 CFRP 传播至 CFRP/金属粘接面，经粘接面反射形成反射信号 P_1。P_1 受到 CFRP 和粘接面的影响，信号 P_1 的频谱

与信号 P_0 的频谱的关系为

$$P_1(f)=P_0(f)\cdot C(f)\cdot B(f) \tag{1}$$

式中，$P_1(f)$ 为信号 P_1 的频谱，$P_0(f)$ 为信号 P_0 的频谱，$C(f)$ 为 CFRP 复合材料对超声信号的传递频率响应，$B(f)$ 为粘接界面对超声信号的传递频率响应。

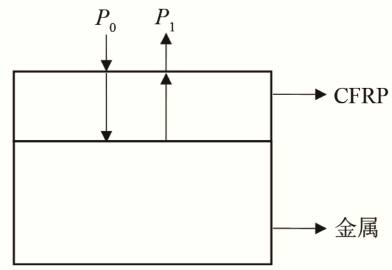


图 4 超声相位检测法信号传播路径
Fig.4 The signal propagation path in ultrasonic phase detection method

根据式(1)可得到信号 P_1 的相位谱与信号 P_0 的相位谱的关系为

$$\angle P_1(f)=\angle P_0(f)+\arctan\frac{\mathrm{Im}[C(f)]}{\mathrm{Re}[C(f)]}+\arctan\frac{\mathrm{Im}[B(f)]}{\mathrm{Re}[B(f)]} \tag{2}$$

式中，$\angle P_1(f)$ 为信号 P_1 的相位谱，$\angle P_0(f)$ 为信号 P_0 的相位谱。

超声信号在同一材料内部传播时，超声信号的相位 $\arctan\frac{\mathrm{Im}[C(f)]}{\mathrm{Re}[C(f)]}$ 是不变的[11]，代入式(2)中可以得到：

$$\angle P_1(f)=\angle P_0(f)+\arctan\frac{\mathrm{Im}[B(f)]}{\mathrm{Re}[B(f)]} \tag{3}$$

由超声波传播的理论可知[12]，超声信号在界面的反射率为

$$R=\frac{\rho_2c_2-\rho_1c_1}{\rho_2c_2+\rho_1c_1} \tag{4}$$

式中，R 为反射率，ρ_2 为第二种介质的密度，c_2 为第二种介质的声速，ρ_1 为第一种介质的密度，c_1 为第一种介质的声速。

当 CFRP/金属粘接界面粘接良好时，金属的密度、声速均大于 CFRP，$\rho_2c_2>\rho_1c_1$，$R>0$，式(3)中的 $\arctan\frac{\mathrm{Im}[B(f)]}{\mathrm{Re}[B(f)]}=0$。当 CFRP/金属粘接界面脱粘时，界面变为 CFRP/空气界面，空气的密度、声速均小于 CFRP，$\rho_2c_2<\rho_1c_1$，$R<0$，式(3)中的 $\arctan\frac{\mathrm{Im}[B(f)]}{\mathrm{Re}[B(f)]}=\pi$。由分析可知，CFRP/金属粘接界面脱粘和粘接良好时，超声信号的相位相差 180°，即超声信号的时域波形会出现明显反转，可根据超声信号波形是否反转来判断粘接质量。

2 检 测

2.1 试样设计

根据验收技术条件要求，该结构需检出缺陷的最小尺寸为 5 mm×5 mm，所以采用尺寸为 5 mm×5 mm 的两层聚四氟乙烯薄膜预置在蒙皮与 CFRP 粘接的Ⅰ界面和Ⅱ界面模拟脱粘缺陷，置于 CFRP 内部模拟分层缺陷，如图 5 所示。

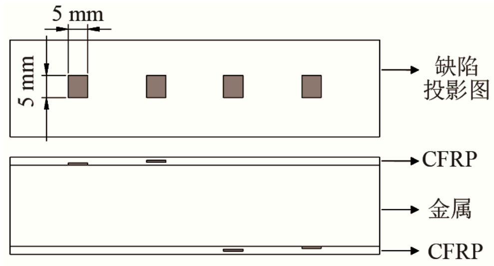


图 5 设置人为缺陷的复合材料试样示意图
Fig.5 Schematic diagram of the composite sample with 5mm×5mm artificial defects

2.2 检测结果

2.2.1 超声 C 扫穿透法

(1) 检测参数

检测设备：喷水耦合超声穿透 C 扫系统；发射探头和接收探头中心频率为 2.25 MHz、直径为 10mm 平探头；扫查步进为 1 mm；耦合方式为喷水耦合；阈值定义为穿透波幅值为 20%；灵敏度定义为调整超声仪的 dB 值使正常区域处穿透波幅值为 80%；扫查速度≤100 mm·s^{-1}。检测示意图如图 6 所示。

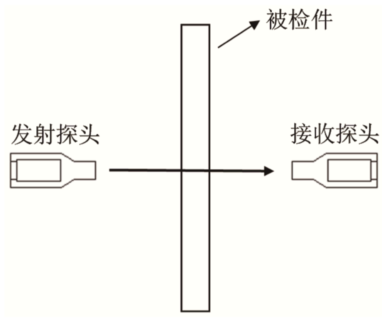


图 6 超声 C 扫穿透法检测示意图
Fig.6 Schematic diagram of the ultrasonic C-scan penetration detection method

(2) 检测结果

按照确定的检测参数对试样进行超声 C 扫穿透法检测，检测结果如图 7 所示。依次对缺陷面积进行测量，测量结果填入表 2，经计算，预置人工缺

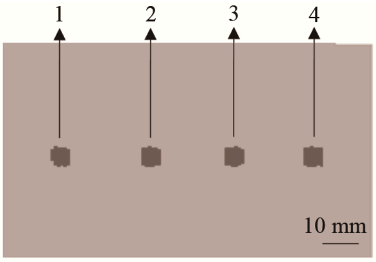


图 7　试样超声 C 扫图
Fig.7　Ultrasonic C-scan picture of the sample

表 2　试样超声 C 扫图中缺陷的面积值
Table 2　Area values of defects in ultrasonic C-scan picture

缺陷编号	缺陷类型	测量值/mm²	理论值/mm²	误差/%
1	Ⅰ界面脱粘	24.2	25	3.2
2	分层	25.9	25	3.6
3	分层	25.5	25	2.0
4	Ⅱ界面脱粘	25.7	25	2.8

陷面积值与实际值误差均小于 4%，表明超声 C 扫穿透法检测结果能准确显示缺陷。之后在实际结构上对缺陷的位置进行标记并分别编号。

2.2.2　高分辨率超声 A 扫反射法和超声相位法

(1) 检测参数

检测设备：超声探伤仪；探头：中心频率为 5 MHz、晶片直径 Φ 为 6mm 延迟块高阻尼(高分辨)超声探头；扫查步进为 1 mm；耦合方式为接触水耦合；灵敏度定义为调整超声仪的 dB 值使正常处的粘接波幅值为 70%；高分辨超声 A 扫反射法检测分层的边界阈值定义为分层波幅值等于 40%；超声相位法检测脱粘判据为：粘接波相位先负后正时为脱粘；扫查速度≤50 mm·s^{-1}。检测示意图如图 8 所示。

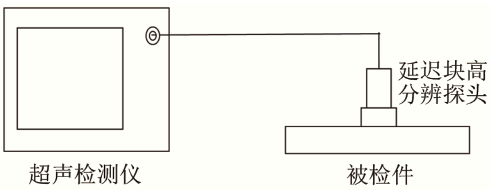


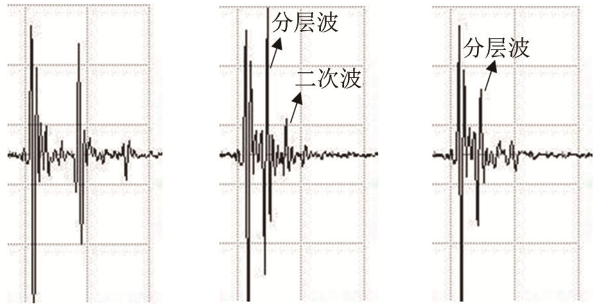
图8　高分辨超声A扫反射法及超声相位法检测示意图
Fig.8　Schematic diagram of the ultrasonic high resolution A-scan reflection method and phase method

(2) 检测结果

① 分层缺陷：

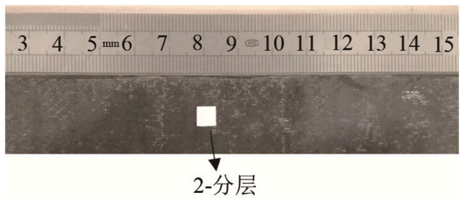
采用高分辨率超声 A 扫反射法，按照确定的检测参数检测试样，对 2 号(分层)缺陷从界面Ⅰ一侧进行检测，从界面Ⅱ一侧对标记好的 3 号(分层)缺陷进行检测。得到分层处和分层边界处的反射信号，如图 9 所示(2 号和 3 号缺陷的反射信号相同)。

从界面Ⅰ一侧检测的结果如图 10(a)所示，从界面Ⅱ一侧检测的结果如图 10(b)所示。

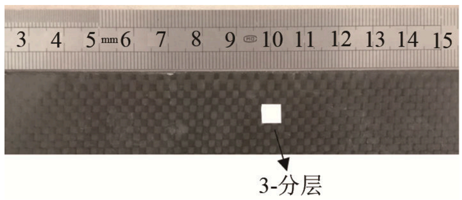


(a) 正常处　(b) 分层处　(c) 分层边界处
图 9　试样的高分辨率超声 A 扫反射法超声 A 扫信号
Fig.9　The ultrasonic A-scan signals displayed in high resolution ultrasonic A-scan reflection method for sample detection

由图 10 中的检测结果可知，采用高分辨率超声 A 扫反射法检测出的分层缺陷的边界与实际情况一致，即该方法能有效检测金属夹心 CFRP 复合材料中的分层缺陷。



(a) 从Ⅰ界面侧检测



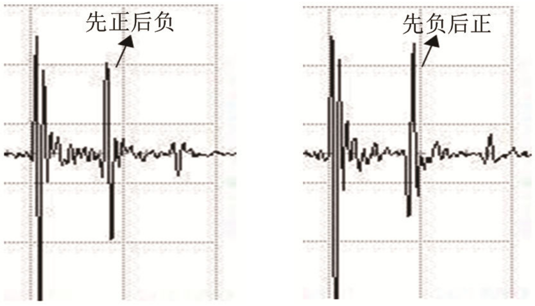
(b) 从Ⅱ界面侧检测
图 10　试样的高分辨率超声 A 扫反射法检测结果
Fig.10　Results of the high resolution ultrasonic A-scan reflection method for sample detection

② 脱粘缺陷：

按照检测参数对试样进行超声相位法检测，从界面Ⅰ一侧对 1 号(脱粘)缺陷进行检测，从界面Ⅱ一侧对标记好的 4 号(脱粘)缺陷进行检测。得到脱粘处的反射信号，如图 11 所示(1 号和 4 号缺陷的反射信号相同)。

由图 11 可知，正常处的粘接面反射波的相位为先正后负，脱粘处的粘接面反射波的相位为先负后正，二者的相位相反，即粘接面反射波相位先负后正时为脱粘缺陷，粘接面反射波相位先正后负时为粘接良好。

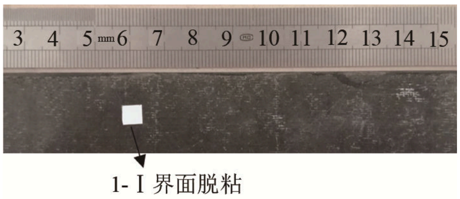
从界面Ⅰ一侧检测的结果如图 12(a)所示，从界面Ⅱ一侧检测的结果如图 12(b)所示。



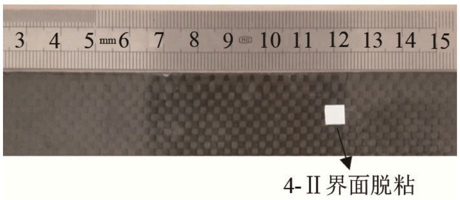
(a) 正常处 (b)脱粘处

图 11 超声相位法检测试样时显示的超声 A 信号

Fig.11 The ultrasonic A-scan signals displayed in ultrasonic phase method for sample detection



(a) 从Ⅰ界面侧检测



(b) 从Ⅱ界面侧检测

图 12 超声相位法检测试样的结果

Fig.12 Results of the ultrasonic phase method for sample detection

由图 12 可知，利用超声相位法检测出的脱粘缺陷的边界与实际的情况一致，即该方法能有效检测金属夹心 CFRP 复合材料中的脱粘缺陷。

2.2.3 实际产品检测

按照 2.2.1 节中确定的超声 C 扫穿透法和参数检测某实际产品，得到超声 C 扫图(见图 13)，图 13 的深色区域为缺陷。按照 2.2.2 节中确定的高分辨超声 A 扫反射法、超声相位法和参数检测缺陷区域，发现界面Ⅰ一侧的复合材料中出现分层信号，对缺陷处进行物理解剖并做金相分析，金相图如图 14 所示，可知实际分层与检测结果相同。

图 13 复合材料产品超声 C 扫图

Fig.13 Ultrasonic C-scan picture of the composite product

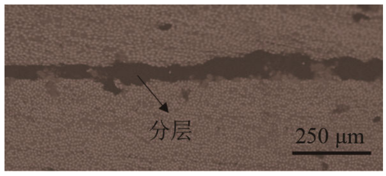


图 14 复合材料产品内缺陷处金相图

Fig.14 Metallographic diagram at the defect area in composite product

按照 2.2.1 节中确定的超声 C 扫穿透法和参数检测另一件实际产品，得到超声 C 扫图(见图 15)，图 15 的深色区域为缺陷。按照 2.2.2 节中确定的高分辨超声 A 扫反射法、相位法和参数检测缺陷区域，发现Ⅱ界面出现脱粘信号，对缺陷处进行解剖，得到的解剖图如图 16 所示，表明实际脱粘与检测结果相同。

图 15 复合材料产品超声 C 扫图

Fig.15 Ultrasonic C-scan picture of the composite product

图 16 实际产品Ⅱ界面解剖图

Fig.16 The interface anatomical picture of the composite productⅡ

3 结 论

(1) 采用超声穿透法、反射法都无法检测金属夹心复合材料，本文提出了先采用超声 C 扫穿透法确定缺陷的平面位置，然后采用高分辨率超声 A 扫反射法确定复合材料中分层缺陷及采用超声相位法确定复合材料与金属间的脱粘缺陷的方法。

(2) 检测结果表明，采用提出的方法可准确检测试样中大小为 5 mm×5 mm 的预置人工分层和脱粘，且能准确检测实际产品中的缺陷。

参 考 文 献

[1] 张锐，陈以方，付德永．复合材料手动扫描超声特征成像检测[J]．材料工程, 2003(4): 34-35.
ZHANG Rui, CHENG Yifang, FU Deyong. Manual scan ultrasonic feature imaging testing of composite material[J]. Journal of Materials Engineering, 2003(4): 34-35.

[2] 葛邦，杨涛，高殿斌，等．复合材料无损检测技术研究进展[J]．玻璃钢/复合材料, 2009(6): 67-71.
GE Bang, YANG Tao, GAO Dianbin, et al. Advances of nondestructive testing of composite materials[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(6): 67-71.

[3] 王耀先．复合材料结构设计[M]．北京：化工工业出版社, 2011.
WANG Yaoxian. Structure design of composites[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.

[4] 彭金涛，任天斌．碳纤维增强树脂基复合材料的最新应用现状[J]．中国胶粘剂, 2014, **23**(8): 48-52.
PENG Jintao, REN Tianbin. The latest application status of carbon fiber reinforced resin matrix composites[J]. China Adhesives, 2014, **23**(8): 48-52.

[5] 李威，郭权锋．碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]．中国光学, 2011, **4**(3): 201-212.
LI Wei, GUO Quanfeng. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields[J]. Chinese Journal of Optics, 2011, **4**(3): 201-212.

[6] 魏建义．航空复合材料无损检测应用研究[J]．现代制造技术与装备, 2016, (230): 82-83.
WEI Jianyi. Research on nondestructive testing of aviation composite materials[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2016, (230): 82-83.

[7] 沈建中，林俊明．现代复合材料的无损检测技术[M]．北京：国防工业出版社, 2016: 109-112.
SHEN Jianzhong, LIN Junming. Nondestructive testing technology of modern composite materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 109-112.

[8] 史亦韦．超声检测[M]．北京：机械工业出版社, 2009: 85-88.
SHI Yiwei. Ultrasonic testing[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 85-88.

[9] 徐浪，潘勤学，王超，等．碳纤维－铝多层结构胶接质量的超声检测[J]．计测技术, 2015, **35**(3): 34-35.
XU Lang, PAN Qinxue, WANG Chao, et al. Bonding test of carbon fibers by ultrasonic[J]. Metrology & Measurement Technology, 2015, **35**(3): 34-35.

[10] 张祥林，谢凯文，姜迎春．复合材料板-板粘接结构超声检测[J]．无损探伤, 2011, **35**(4): 18-21.
ZHANG Xianglin, XIE Kaiwen, JIANG Yingchun. Ultrasonic testing of composite plate bonding structure[J]. Nondestructive Testing, 2011, **35**(4): 18-21.

[11] 郑晖，林树青．超声检测[M]．北京：中国劳动社会保障出版社, 2008: 32-35.
ZHENG Hui, LIN Shuqing. Ultrasonic testing[M]. Beijing: China Labor Social Security Press, 2008: 32-35.

[12] 杜功焕，朱哲民，龚秀芬．声学基础[M]．南京：南京大学出版社, 2001: 131-140.
DU Gonghuan, ZHU Zhemin, GONG Xiufen. Acoustic Foundation[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2001: 131-140.

《噪声与振动控制技术手册》已由化学工业出版社出版发行

由中船第九设计研究院工程有限公司牵头，联合清华大学、北京市劳动保护科学研究所组织编写的《噪声与振动控制技术手册》（主编吕玉恒，副主编燕翔、魏志勇、邵斌、孙家麒、冯苗锋）已由化学工业出版社于 2019 年 9 月出版发行。全书约 260 万字、1700 页，由 18 个单元及 5 个附录等组成，荟萃了本世纪以来噪声与振动控制行业的部分最新成果。全书主要内容包括：基础知识；噪声源数据库；噪声的生理效应、危害以及噪声标准；听力保护；噪声与振动测量方法和仪器；噪声源的识别、预测及控制方法；声源降噪与低噪声产品；经典而常用的隔声、吸声、消声、隔振、阻尼减振、室内声学等；有源噪声控制以及国内外噪声与振动控制技术新进展等。本手册还提供了 300 多种常用的声学设备和材料的性能、参数等，列举了 40 多个噪声与振动控制污染治理成功案例，附录中给出了本行业已出版的书籍、标准、生产厂家、科研设计教学单位的部分名录等，是一本大型、综合、实用的工具书，也是参与编著的 10 个单位、27 名作者多年来工作实践成果汇编。本手册可为读者提供科学、严谨、新颖、可信赖的专业知识和应用技术，可供工程设计、环境保护、职业安全卫生、基本建设等领域从事研究开发、生产制造、监测评价、工程管理等工程技术人员以及有关专业师生使用、参考。

中船第九设计研究院工程有限公司　冯苗锋