

# 复合板材的超声特征扫描成像检测

## Testing System for Multi-layer Composite Materials with Ultrasonic Feature Scan Imaging

李 庆, 王海芳, 陈以方, 陆铭慧

(清华大学 机械工程系, 北京 100084)

LI Qing, WANG Hai-fang, CHEN Yi-fang, LU Ming-hui

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**摘要:** 介绍特征扫描(F-scan)超声成像检测技术,研制复合薄壁板材的特征扫描超声自动成像检测系统,通过此系统提取复合材料中缺陷的特征参数,对检测结果进行多种形式(B, C, F, 相位特征)成像,在适当的判断条件下,实现缺陷的判断和识别。超声波层析图像表明:此设计实现层状复合材料层间粘结情况、层状材料中密度分布状态的分析和直观显示。

**关键词:** 特征扫描; 层状板; 复合材料

中图分类号: TG115.28<sup>+</sup>5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006)08-0052-05

**Abstract:** F-scan ultrasonic imaging testing technology was introduced. An F-scan ultrasonic imaging auto-testing system for multi-layer composite materials was developed successfully. The feature parameters of defects could be extracted accurately with the system. The results could be displayed by various imaging modes (B, C, F and phase feature imaging). Defects could be identified by setting proper decision conditions. The ultrasonic computerized tomography was studied. Detailed appraisal of agglutination between layers and density of composite materials can be seen directly from the imaging.

**Key words:** feature scan; sandwich plate; composite

随着现代科学技术的发展,人们对超声无损检测技术提出了更高的要求。在实际检测中,人们不再满足于缺陷的定性了解,而希望快速通过直观的图像显示缺陷,得到定量的分析结果。本工作研制了用于复合薄壁板材的超声特征扫描成像检测系统,能进行快速、准确的缺陷检测,实现数据存储以供复查,此外,还对复合层状薄板层间粘合状态以及复合材料各层密度分布进行了研究,该系统提高了工业部门对复合层状薄板的探伤精度和工作效率。

### 1 F 扫描技术

特征扫描(F-scan)包括两方面的特征,一是超声波波型的特征,主要指超声波形上升时间、下降时间、脉冲周期和频谱特性等;二是缺陷的特征,包括缺陷的类型、形状、大小等。F 扫描成像技术是 20 世纪 80 年代发展起来的新技术。Rose, Jeong 和 Avioli<sup>[1]</sup>介绍了复合材料检测中特征映射(F-mapping)的概念。Teagle<sup>[2]</sup>于 1983 年提出测量超声波波速、衰减和频率

变化来评定复合材料的内部结构特征。JB Nestle-  
roth<sup>[3]</sup>等在对复合材料的分层、夹杂和气孔等缺陷进行分类时,用了缺陷的四个特征,即回波幅度、波形的上升时间、脉冲持续时间及极值的反转率。JL Rose<sup>[4]</sup>在检测复合材料粘结质量时,采用的两个特征分别为幅度比和传递函数的面积比,采用的判据是双区域散射图表;在对焊接缺陷进行分类时,采用了脉冲的上升时间、下降时间和持续周期,利用 Fisher 判据区分平面状和体积状缺陷。

F 扫描集成了 B, C 扫描的优点和功能,其检测能力远远超过 B, C 扫描,除了传统扫描功能外,还能对检测信号进行频谱分析和数字滤波,通过对各种特征量的提取和重构,能实现缺陷的自动识别,从而提高定量精度,另外,所有检测信息都能自动存储在计算机当中,以供详细分析和复查。F 扫描技术的关键是待测工件缺陷特征的研究、提取和确定。需要专用换能器提取复合材料检测时的波形信息,进行检测信号的全波列采集,并存储在计算机里,通过计算机完成信号的处理,并以图像方式显示各种特征参量。

2 系统设计

2.1 总体方案设计

F 扫描成像系统框图如图 1 所示。可编程逻辑控制器(Programmable Logical Controller, PLC)控制系统控制一个三自由度的自动扫描装置,实现竖直方向探头的上下调整和水平方向的自动扫描,同步逻辑电路控制超声发射接收电路,以保证超声信号的触发采集与机械运动同步,超声发射接收电路激励并接收专用超声换能器的信号,经过滤波、程控放大后进入高速数据采集卡进行全波列采集,采集信号经过处理后送入计算机存储,最后由超声成像软件成像,整个系统由计算机统一管理。

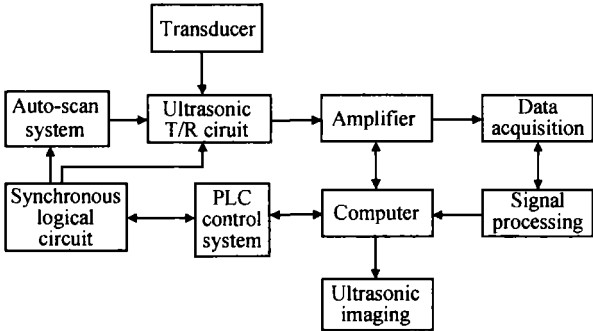


图 1 系统总体框图  
Fig. 1 Schematic diagram of integrated design

2.2 专用换能器设计

由于复合材料是层状非均匀介质材料,对超声波的衰减比较大<sup>[5,6]</sup>,因此,要求超声波具有较强的穿透性。另外,多层散射使超声波穿过试件时出现许多回波,因而,要把缺陷与噪声(非缺陷回波)区分开来是很困难的,要求有高灵敏度检测用换能器。在检测小缺陷时,需要高的分辨力。高的分辨力是和高的频率相联系的,频率越高,超声波在复合材料中的衰减越严重,这是一个难题。普通商用换能器无法满足要求,只有使用窄脉冲、灵敏度和分辨力高的换能器才能使超声波穿透复合材料,从而了解缺陷和组织的细观状态,完成其内部结构的评价。

针对需要,本工作专门研制了 10MHz 有源自聚焦型超声换能器,焦距为 15~20mm。图 2 为专门制作的一个宽带窄脉冲聚焦换能器在实际检测复合薄板中所采集到的波形图(见图 2a)和频谱图(见图 2b),始脉冲宽度小于两个周期,该换能器具有良好的穿透能力,保证了检测信息的提取。

2.3 超声发射接受装置

系统采用了高性能数字化超声发射接收装置,主

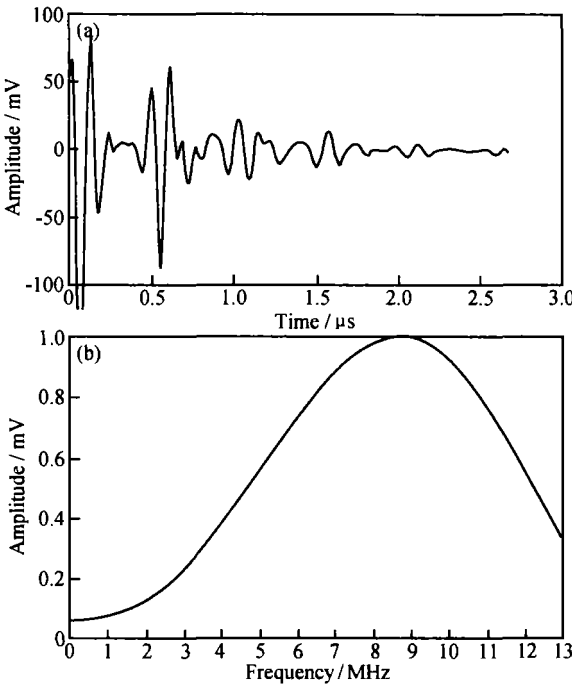


图 2 专用换能器的实测波形图(a)和频谱图(b)  
Fig. 2 Waveform image (a) and spectrum image (b) of the special sensor

要性能指标如下:提供高达 350V 的发射电压幅值、脉宽可调的脉冲方波;可为频率为 5~20MHz 的传感器提供激励脉冲信号;接收带宽为 30MHz; -40~+50dB RF 增益控制范围,调整步长为 1dB;可配备低通/高通滤波模块用于噪声抑制。

2.4 机械系统设计

机械系统配备三台伺服电机,主要由伺服电机、水平方向的 X 和 Y 向移动架、导轨、滚珠丝杆以及竖直方向(Z 向)安装探头的滑块组成,其中 Y 向导轨固定在机架上,电机通过滚珠丝杆驱动 X、Y 向移动架沿 X、Y 向移动实现平面扫描,Z 向电机驱动滑块上下移动,用于调节探头位置,示意图如图 3 所示。

电机选用交流伺服电机,带增量型编码器,平直带键轴端,PLC 选用三菱 FX1N 60MT 型 PLC,具有 24 个输入点,24 个输出点,0.08μs 指令执行时间,满足系统要求。特别需要指出的是,其具有的高速处理功能和脉冲捕捉功能,普通 PLC 内的一般计数器在扫描周期内动作,因此其响应速度一般为数 10Hz 左右,而 FX 系列 PLC 内置的高速计数器,对来自特定的输入继电器脉冲进行中断处理,因此与扫描时间无关,可进行高达 60kHz 的计数,并可靠的捕捉脉冲宽度超过 20μs(输入端口 0~1)或者 50μs(输入端口 2~5)的信号,这两个功能在系统中有重要的应用。

选择专用于 FX 系列 PLC 的“FXGP-WIN-C”软

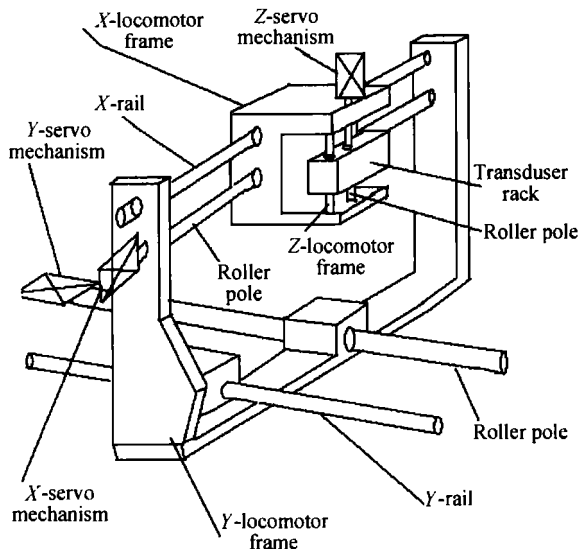


图 3 自动扫查装置结构示意图

Fig. 3 Sketch map of auto scan-system

件为编程工具,采用梯形图方式编程。使伺服电机在 PLC 的控制下,带动探头在  $X$ - $Y$  二维平面上做“之”字型运动,其中  $X$  方向做速度、距离可调的连续运动, $Y$  方向做步进。探头接收的信号通过数据采集板进入计算机,经处理后产生与之相应的图像。作为安全措施,在系统中采用了四个光电开关进行限位,其中水平方向的  $X$ ,  $Y$  向各两个。

机械扫查装置的扫查参数如下:最大扫查范围为  $1400\text{mm} \times 600\text{mm}$ ;最小扫查间距为  $0.1\text{mm}$ ;最大扫查速度为  $120\text{mm/s}$ 。

## 2.5 同步逻辑

在超声成像检测中,一个很重要的方面是要保证超声成像过程中图像与被测工件的正确映射关系,即每一列检测信号与被测工件的每一点位置相对应,使换能器接收的信号与采集的信号相对应,这就要求机械扫描与换能器的发射信号以及信号采集卡的触发信号完全同步。

实现同步的原理是统一指令系统,在这套薄板检测系统中,计算机通过界面程序设定扫查区域的长度、宽度以及扫查速度,经由 PLC 控制伺服电机进行  $X$  方向速度可调的匀速运动和  $Y$  方向的步进来实现二维扫查。伺服电机在运动过程中其内置旋转编码器根据其转速不同输出频率不同的脉冲,利用三菱 PLC 优异的高速处理功能和脉冲捕捉功能,脉冲信号经过分频后通过 PLC,作为激励超声发射和接收的触发信号,同时也作为高速数据采集卡的外触发信号。这样机械扫查的步进、超声波的发射和接收及采集卡外触发信号统一起来,扫查速度与返回脉冲数相对应,形成

图像与被测工件形状上的正确映射关系。

同步逻辑系统中还需要进行脉冲信号的降压、分频变换。PLC 控制扫查的脉冲信号为  $24\text{V}$  不稳定信号,经过分压电路降到  $12\text{V}$  进行分频,分频后的信号经过单稳态触发器实现脉宽调制,得到稳定的脉宽为数微秒的脉冲信号,作为同步信号用来控制超声发射接收系统和数据采集卡的外触发。

## 3 系统软件设计

系统软件包括数据采集、信号处理和图像显示处理等模块。系统在 Windows 98/Windows NT 平台上利用 Visual Basic 开发。软件实现了对超声波脉冲的发射/接收控制、全波列信号的采集、数字信号的处理以及缺陷图像的显示。对超声信号进行高速、高精度的全波形数字化采样,并向计算机进行高速传输。在计算机上实现数字化探伤仪的功能,检测结果以特征扫描的二维成像方式显示出来。

### 3.1 数据采集

采用单通道高速数据采集卡采集信号。其主要性能如下:最高采样率为  $200\text{MSPs}$ ;采样分辨率为  $8\text{bit}$ ;数据记录长度为  $1\text{MB}$ ;触发方式为外触发、信号触发、内触发;具有程控增益功能:增益范围为  $-10 \sim 30\text{dB}$ 。

### 3.2 超声成像

#### 3.2.1 幅值特征图像

选取一个波高作为阈值,用超过阈值的波幅值来打点画图,显示缺陷的图像,这就是通常的 C 扫描。在这套 F 扫描成像系统中选取一个幅值作为参考阈值,将其余各点不同的幅值按照相对于阈值的百分比赋予不同的颜色,做出幅值特征的彩色图,直观显示出复合层状材料表面缺陷的大小和深度特征。

#### 3.2.2 相位(深度)特征图像

对于体积型缺陷而言,由于其各点至表面距离并不相同,超声波在各点的相位也是不同的,其深度的变化引起相位的变化。可以从存储的数据中抽取出缺陷各点距离表面的深度,并用不同的颜色表示不同的形状,形成缺陷的相位特征彩图。

#### 3.2.3 频谱特征图像

对记录的数据作频谱分析,根据每一点的频谱幅度,做出频谱的空间分布,用不同的颜色就可以做出其彩色图像。频谱特征主要用于识别薄板复合材料的缺陷,在对薄板进行 C 扫描时,因材料透声性对超声频率的限制,用常规换能器和仪器无法获得低频窄脉冲检测波,致使前后界面波与缺陷波混叠在一起,在频域内观察不出其内部质量的情况,但在 F 扫描中对它们

进行频谱变换后,可以较容易地在频域里识别出缺陷,单点信号频谱见图 2 的幅值谱图。

3.2.4 超声层析图像

计算机层析( Computerized Tomography, CT) 或称计算机断层扫描成像,是获取试件截面图像的一种无损检测技术。目前,作为透射试件用的能源是 X 射线(或 γ 射线) 源。在这套特征扫描成像系统中,采用超声波为辐射源,把回波信号中的幅值特征按材料的深度一层层地显示出来,就构成了超声层析图像显示,可以看到材料任意一个截面的检测情况,这在 C 扫描中是无法实现的。实际操作时,需根据需要调整波形的起始深度、终止深度和闸门高度,层析处理界面如图 4 所示。

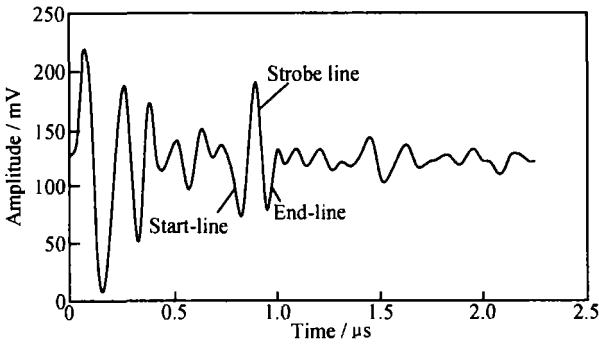


图 4 超声层析处理界面

Fig. 4 Operation interface for ultrasonic CT

4 样品成像检测实验

C 扫描只提取一列波中某一点的幅度信息,而 F 扫描对检测信号进行了全波列采集,包含所有的检测信息,可根据检测和评定需要进行多种方式的处理和显示,为全面评定复合材料提供可靠的数据。

4.1 缺陷检测

样品 1 中,缺陷为 6 个等间距深度不同、大小不同的平底孔,当量直径最小为 1.2mm,最大为 2mm,示意图如图 5 所示。检测中,设定扫描尺寸为 100mm × 20mm,扫描速度为 50mm/s,扫描间距为 0.2mm,采样频率为 100MHz,结果如图 6 所示。由图 6 可知,大片的正常的上表面回波信号幅值较高,其间可以非常清楚地看到 6 个等间距的缺陷,由于缺陷的存在,导致回波幅值大幅度降低,除 6 个等间距缺陷外,还有几个较小的斑点,经仔细检查确认为材料加工过程中造成的表面缺陷。

4.2 层状结构分析

样品为三层的层状复合金属材料,上下两层是厚度为 0.4mm 左右的同种材料金属板,中间为 0.5mm

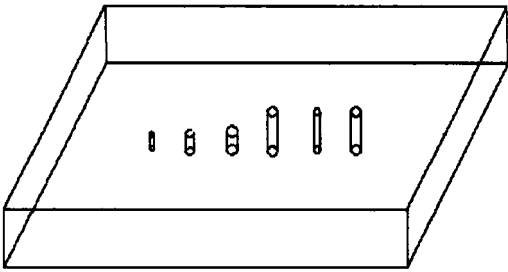


图 5 被测带缺陷样品示意图

Fig. 5 Sketch map of sample with defects

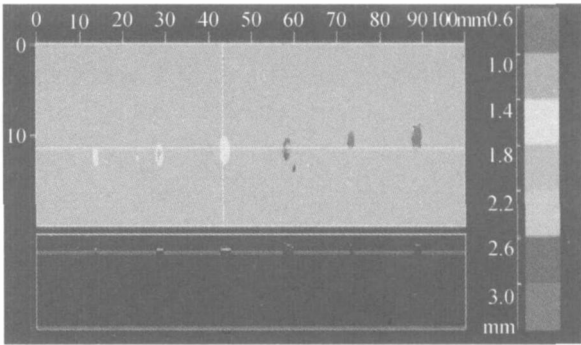


图 6 缺陷扫描图像

Fig. 6 Testing result of defects

左右的金属板,材料不同于上下两层,并且位于中间部位。检测中,设定扫描尺寸为 140mm × 100mm,扫描速度为 50mm/s,扫描间距为 0.5mm,采样频率为 100MHz,扫描结果如图 7 所示。由图 7 可知,被测层状复合材料中,中间夹层呈条状,位于复合材料中部。

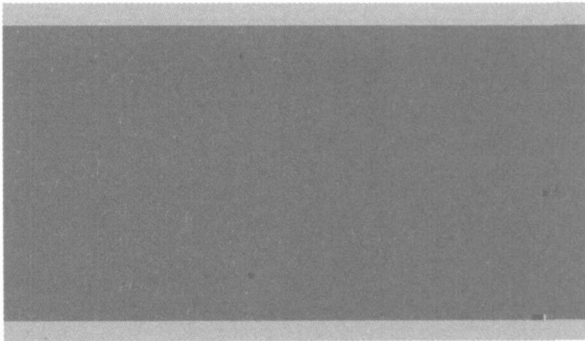


图 7 复合材料层状结构成像结果

Fig. 7 Imaging of multi-layer material

4.3 粘合层分析

层状复合材料中,一个很关心的问题是层间粘合情况的好坏,通过选取适当的判定条件,对存储的特征扫描检测数据进行重新成像,可以看到复合材料中间层金属的上下表面粘合状况,相对单一的颜色图像说明整体粘合层状况良好,而散布其中的斑点表示了粘

结层在某些点上还不尽如人意,正是由于粘接时一些夹杂或者气孔的引入导致了对超声波的衰减和散射,从而使得回波信号发生变化,可见从以上色彩的不均匀可直接看出粘合层粘合状态的不均匀。

#### 4.4 密度分析

由于该材料的特殊用途,要求中间层的金属密度不能有太大偏差。由无限大各向同性均匀固体中的纵波声速公式<sup>[5]</sup>(式 1)可知:固体媒质的密度越小,声速就越高,声程越短,反映在特征扫描中的结果就是底波反射的先后有区别,在进行多次实验后,发现在适当的判断条件下,可以通过深度特征图像直观地看出密度分布的差别。

$$\lambda = \frac{E(1-\sigma)}{\rho_0(1+\sigma)(1-2\sigma)} \quad (1)$$

式中:  $E$  为弹性模量;  $\sigma$  为泊松比;  $\rho_0$  为介质的密度。

检测中,设定扫描尺寸为  $80\text{mm} \times 50\text{mm}$ ,扫描速度为  $20\text{mm/s}$ ,扫描间距为  $0.2\text{mm}$ ,采样频率为  $150\text{MHz}$ 。密度分析结果如图 8 所示。由图 8 可知,不同的颜色表示密度分布的不同,在设定的图谱(见图 8 右侧)上,颜色越靠上说明该处密度越小,声速越高;反之,颜色越靠下的说明该处密度越大,声速越低。

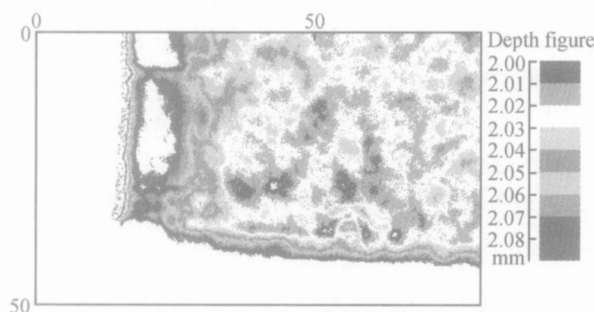


图 8 密度分析成像结果

Fig. 8 Analysis of density

## 5 结论

(1) 针对特殊复合层状薄板进行了超声特征扫描成像检测技术的研究,设计并完成了工程化的超声特征扫描成像检测系统。

(2) 此系统最大扫查范围为  $1400\text{mm} \times 600\text{mm}$ ,定位精度为  $0.1\text{mm}$ ,最高扫查速度为  $120\text{mm/s}$ ,能快速、准确地检测到直径为  $1.2\text{mm}$  平底孔当量的缺陷,直观的给出层间粘结情况及密度分布图。实现了全自动探伤及复检,使用方便,操作简单。

(3) 此系统的研制成功对于层状复合材料的缺陷检测、粘接状态分析及密度分析相关理论和应用具有重要的意义,并成功地应用于工程实际检测中。

#### 参考文献

- [1] BARCOHEN Y, CRANE RL. Acoustic back scattering imaging of subcritical defects in composites[J]. Materials Evaluation, 1982, 40(9): 970-971.
- [2] TEAGLE PR. The quality control and non-destructive evaluation of composite aerospace components[J]. Composites, 1983, 14(4): 115-116.
- [3] NESTLE ROTH JB, ROSE JL, BASHYAM M. Physically based ultrasonic feature mapping for anomaly classification in composite materials[J]. Materials Evaluation, 1985, 43(5): 541-542.
- [4] ROSE JL. A feature based ultrasonic system for reflector classification[A]. Proceedings of the Germany-US Workshop[C]. 1983.
- [5] 冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999.
- [6] 美国无损检测学会. 美国无损检测手册 超声卷[M]. 上海: 世界图书出版公司, 1996.

收稿日期: 2005-11-09; 修订日期: 2006-05-20

作者简介: 李庆(1979-), 男, 硕士, 主要从事超声无损检测的研究和探伤系统设备开发, 联系地址: 北京清华大学机械工程系焊接馆 322 (100084)。

## 欢迎订阅 2006 年度《材料工程》

《材料工程》创刊于 1956 年,由中国航空工业第一集团公司北京航空材料研究院主办,是国内外公开发行的技术刊物。

《材料工程》主要刊登有关材料科学与工程方面的学术论文,同时刊登综合性评述,报道新材料、新工艺、新产品信息,及时、准确反映国内材料领域最新成就和最新进展。《材料工程》是美国工程索引(EI)收录期刊,是中国科技论文统计分析用刊,同时入选《中文核心期刊要目总览》、中国科学引文数据库、中国学术期刊综合评价数据库、中国学术期刊(光盘版)及万方数据网和中国期刊网。在国内外材料科技期刊中有一定的地位和影响。本刊设有“研究与应用”、“测试与表征”、“表面工程”、“工艺”、“综述”等栏目。同时欢迎国内外厂商刊登广告,价格优惠。

《材料工程》为月刊,大 16 开本,精美印刷,每期 10.00 元,全年 12 期 120 元。需订阅者可向本刊编辑部索取订单,或直接汇款至编辑部即可。

地址: 北京 81 信箱 62 分箱《材料工程》编辑部

邮编: 100095

电话: (010) 62496276