第 12 卷 第 4 期 复 合 材 料 学 报 Vol. 12 No. 4
1995 年 12 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Dec. 1995

复合材料结构敲击法无损检测的灵敏度研究

冷劲松 杜善义 王殿富 李全龙
(哈尔滨工业大学复合材料研究室，哈尔滨 150001))

摘 要 本文研究了应用敲击法(coin-tap method)对复合材料结构进行无损检测的基本原理，并建立了典型的损伤检测判据，同时对含不同大小损伤 GFRP 复合材料的最小可检测损伤进行了详细分析。

关键词 敲击法，复合材料，灵敏度，无损检测

1 引 言

随着先进材料在航空航天工业中广泛应用，对航天航空结构的无损检测，已成为提高航天工业水平，实现质量控制，保证航天结构安全使用必不可少的重要手段，目前，世界各国都十分重视无损检测技术的发展，美国政府在 1979 年的政府工作报告中提出建立六大技术中心，其中之一就是无损检测中心。

对金属材料进行无损检测的方法已日趋成熟，由于复合材料是非均质各向异性材料，内部结构复杂，因此，对复合材料进行无损检测更加困难，需要探求一些新方法。应用于复合材料的无损检测技术很多，如射线法、涡流法、激光全息干涉法、热像技术、声全息、超声 C-扫描、声发射、纤维光学法[1]、应力波技术[2]等，但这些方法所用的仪器昂贵，操作复杂，且多数为实验室方法，对周围环境有严格要求，因此，很难适用于对大型航天器中复合材料构件的现场检测。

近年来，一种新的振动无损检测方法——敲击法，被用于对复合材料结构进行检测[3,4]，由于该方法设备简单，操作方便，且不受周围环境的影响，因此，很适用于大型复合材料结构的现场检测。

2 敲击法无损检测技术简介

很早以前，铁路工人就用小锤敲击铁轨、机车车体来检测机车结构是否存在损伤，该方法考虑的是敲击在整体结构上的一个点所产生的整体响应，通过观察固有频率和阻尼的变化而导致的“回声”的变化，来判断结构是否异常。但该方法只能确定结构有无损伤，却不能确定损伤存在的位置，这就给工程结构维修带来很多麻烦。我们知道，当一个结构被敲击时，在振动主结构模态的频率上产生的声音是比较主要的，这些模态取决于激励位置的结构特性，因此，如果一个相同的敲击作用在一有损伤结构和一无损伤结构上，得到总体响应不同，据此可判断有无损伤，但如果一个相同的敲击作用在同一结构的有损伤区和无损伤区上，产生的总体响应是相近的，只有敲击力变化才能引起敲击在结构有损伤区和无损伤区产生的总体响应的变化。这就是铁路工人敲击机车和铁轨只能检测结构有无损伤，却不能确定损伤位置的原因。因此，要

本文于 1994 年 3 月 27 日收到修改稿，1993 年 11 月 1 日收到初稿

确定结构损伤的位置，必须考虑敲击在结构有损伤区和无损伤区的局部响应的变化。

众所周知，当结构被一个小锤敲击时，敲击特性取决于结构的局部组抗和所使用的小锤。如果结构的某一部位存在缺陷，如脱层、脱粘等，就会导致该部位的局部刚度的降低，从而导致该部位结构固有特性的改变，据此，我们就可以通过逐点敲击来检测结构的损伤位置，这就是敲击法的原理，图 1 所示为敲击在CFRP 复合材料层板无损伤区和脱粘区的时域曲线，从中可以看出，敲击在结构的无损伤区的撞击持续时间比有损伤区的撞击持续时间短，峰值力比有损伤区的峰值力高，并且在峰值附近，敲击在无损伤区的峰值力更尖锐。利用快速付里叶变换(FFT)可以将时域曲线变换到频域，如图 2 所示，从中可以看出，随着频率的增加，敲击在有损伤区的力幅值随频率的增加衰减较快，而敲击在无损伤区的衰减则较慢，敲击在有损伤区的一

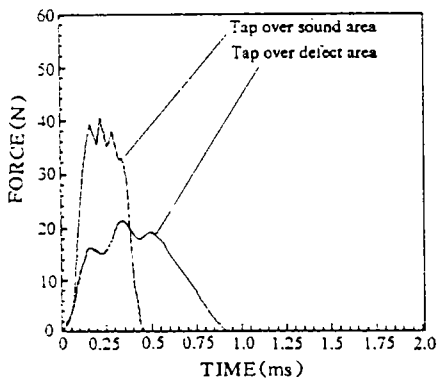

图 1 敲击在 CFRP 试件无损伤区和有损伤区的时域曲线

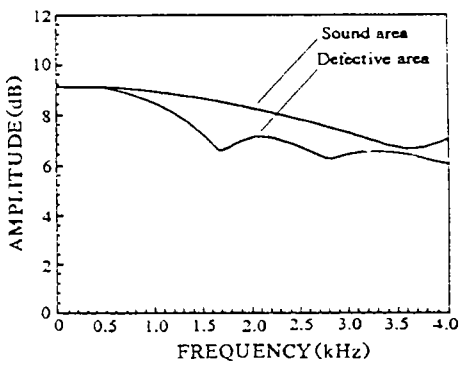

图 2 敲击在 CFRP 试件无损伤区和有损伤区的频域曲线

阶固有频率比敲击在无损伤区的一阶固有频率更低，这表明，敲击在有损伤区不能产生象敲击在结构无损伤区那么高的结构模态，因此，敲击产生的声音不包含较高的频率，结构产生的声音也较“闷”。由于该方法考虑的是结构局部响应，因此，不受背景噪声的影响。目前该方法已广泛用于对复合材料层合结构、蜂窝结构、胶接结构及金属结构等工程结构的无损检测中，本研究开发的检测系统框图如图 3 所示，为保证每次撞击的速度相同，含传感器的敲击锤为一个电磁铁控制的电动锤，并且每次撞击前，撞击锤头与被撞物表面距离一定，这样可以保证结构撞击力基本相同，由于撞击的速度很低(约为 0.25m/s)，撞击头的质量约为 87g，因此，撞击能量很低(约 2.7mJ)，不足以使复合材料结构产生损伤。

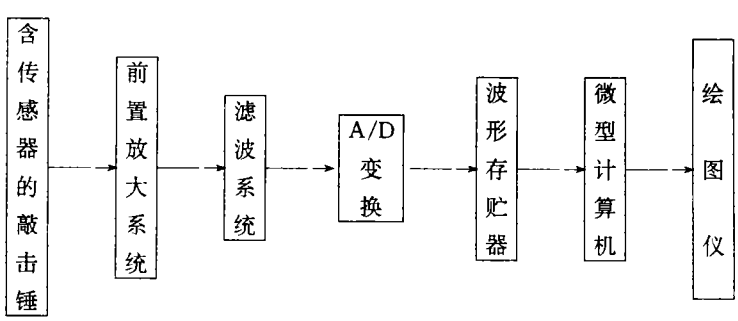

图 3 敲击法无损检测设备框图

3 基本原理

当一个结构被敲击敲击锤在有损伤区时,我们用一弹簧来模拟一个脱粘或脱层,如图 4 所示,该弹簧的刚度是损伤区上一层层板的刚度,假设为 K_d。实际上,当结构没有损伤存在时,弹簧的刚度 K_d 是无限大的,当损伤出现并扩大,或损伤区向结构表面移动时,弹簧的刚度 K_d 则减小,假设结构无损伤区的接触刚度为 K_c,则损伤区的有效接触刚度为:

$$K_{eff} = \frac{K_c K_d}{K_c + K_d} \tag{1}$$

从中可以看出,当弹簧刚度 K_d 增加时,损伤区的有效接触刚度 K_{eff} 也随之增加,且更接近于无损伤区的刚度 K_c,这样,损伤就更难检测,对于图 5 所示的损伤区,其等效直径为:

$$d = \sqrt{Y_Z Y_R} \tag{2}$$

(对于一个圆形损伤区,d 为该损伤区的直径)假设该损伤区为一封闭损伤区,刚度为 K_d,则:

$$K_d = \frac{PEh^3}{d^2} \tag{3}$$

这里 E 是损伤区上表层的弹性模量,h 为损伤区在结构中的深度,P 是一个常数,它的大小取决于损伤区周围的有效边界条件和损伤区上一层材料的泊松比。当 K_d 达到某一 K'_d 时,K_{eff} 与 K_c 极为接近,K'_d 即为极限刚度,对于给定一定深度的损伤

$$d_{min} = \sqrt{\frac{PE}{K'_d}} \cdot h^{3/2} \tag{4}$$

这样,可检测的 最小损伤面积就确定了。从(3)式可见,对于给定损伤区深度 h 时,若损伤区有效直径增加,则损伤区上层刚度 K_d 和损伤区有效接触刚度 K_{eff} 都减小,因此,根据结构接触刚度的不同,就可以检测结构中不同大小的损伤。我们知道,结构有损伤区和无损伤区的接触刚度的不同,将导致敲击在该部位的撞击力和撞击持续时间的变化,因此,只需确定结构不同部位的撞击力、撞击持续时间,通过比较就可以确定结构的损伤区。

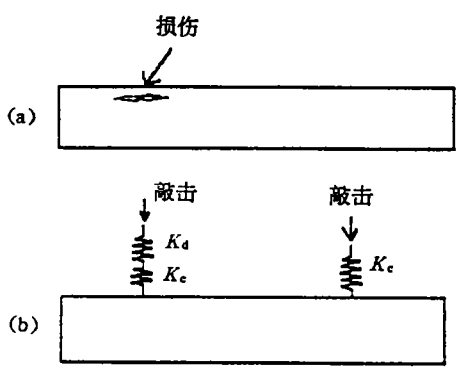

图 4　(a)典型的脱层损伤,(b)敲击法分析的损伤模型

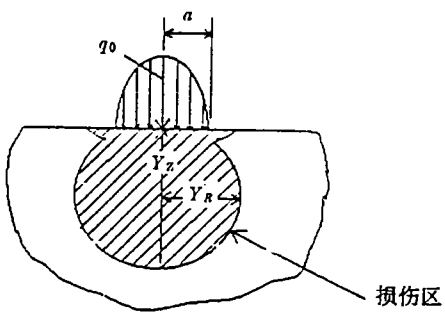

图 5　撞击产生的损伤区示意图

4 敲击法无损检测损伤判据的建立

我们知道当敲击在结构有损伤区时,由于损伤区脱层、脱粘的存在,导致了损伤区有效接

触刚度的减小，从而引起有损伤区的撞击时域曲线不同于无损伤区的时域曲线。

通过比较有损伤区与无损伤区的撞击力的时域曲线或相应的频谱，就可以检测出损伤。但如果要进行实际检测，则需要确定一个用于区别结构无损伤区与损伤区的客观标准。前面的结果指出，损伤减小了力的峰值，增加了撞击脉冲的宽度，并减小了高频时力幅值的分量（与无损伤结构在同一点测试相比较）。因此，如果将结构每一个感兴趣的位置的测试结果都存贮并与无损伤结构相应位置的结果进行比较，通过比较这些量的变化，就可以检测出损伤。但是，如果被测结构很大，这个过程需要存贮大量的数据，并且测试过程变得比较复杂。如果对于无损伤结构定义一个简单的判别指标，则实际检测将比较简单。对于一个无损伤的结构，若随着位置的改变撞击特性没有明显改变，则对于该结构可以很快地检测出损伤。但是当结构柔性比较强时，对一个无损伤结构，结构不同位置（如边缘和中央）的时域曲线会出现一定程度的交叉。因此，如果把所有位置的撞击持续时间超过一个给定数值做为划分损伤区的标准，那么许多无损伤区也会被划进去，相反地，较高刚度的损伤不能被发现。因此，需要建立一个标准，使其能检测较高刚度的损伤，并不把无损伤区划入有损伤区。

这里可供比较的有两个撞击的时域和频域曲线。三个典型的方法是比较峰值力、撞击持续时间和在频率范围中央随频率增加力幅值的衰减率，但是所有这些方法都具有明显的缺点。如果应用峰值力进行比较，最重要的是保证敲击锤直接撞击前的速度的准确控制，否则，一个以标准速度撞击在无损伤区的脉冲就会与一个以高速度撞击在有损伤区的脉冲混淆。实际上，好象很难改进完全准确的控制，特别是如果锤在操作时沿不同方向进行时。当应用撞击持续时间作为判别损伤的标准时，关键在于精确测量脉冲时间，实际上，这比较困难，况且，如果撞击持续时间出现'拖尾'时，如图 6 所示，撞击持续时间将更难被精确测量，这种情况下，脉冲的幅值将很接近系统噪声的水平，这将导致主要测量数据的不准确。

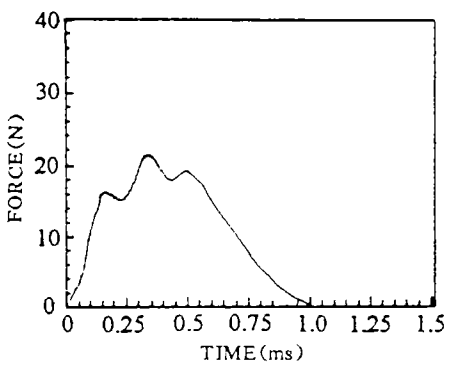

图 6 敲击在 CFRP 试件产生拖尾的时域曲线

类似的，如果应用力随频率变化衰减率做比较的标准，则需要在某一特定的频率进行比较，因为在该位置有损伤区力幅值随频率的衰减率高于无损伤区的衰减率，但在其它位置（如较高的频率位置），则二者的衰减率几乎相同。

上述的所有方法都在试图寻找一个能检测损伤的方法，这种方法只需用我们所测到的时域和频域里很少的数据。该方法不仅能区分有价值的信息，还使结果对危险数据点的随机性更加灵敏。几种克服这些困难的可能方法被研究过，最成功的如图 7 所示。这包括用 FFT 程序得到的力脉冲的频谱。图 7 所示为一力脉冲的频谱，频谱下的面积被分为 A、B，一个比例系数 R 被定义为

$$R = B/(A + B)$$

由于撞击在有损伤区具有比撞击在无损伤更小的高频力分量，因此，R 值就较小。位于 A、B 面积分界点的频率 f_c 是任意设的，但范围在最大频率 f_{max} 的 20%到 50%之间，在撞击在结构无损伤区的频谱上，出现的第一阶固有频率最接近的满刻度频率，就是 f_{max} 最合适的选择。由于撞击力变化计算的结果需要用一个标准的结果来解释，因此，两个曲线的幅值在零频时应是相

同的，这样，如图 8 所示，S 是一个损伤区的标准曲线，T 是测试结果，在 R 计算完成前，应将 T 移到 T_O。

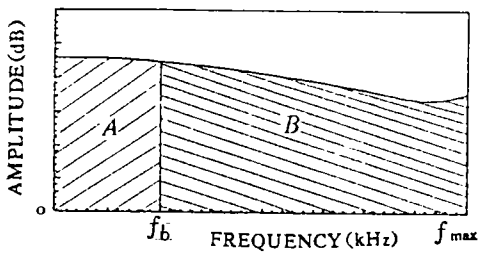

图 7　撞击力的频谱曲线

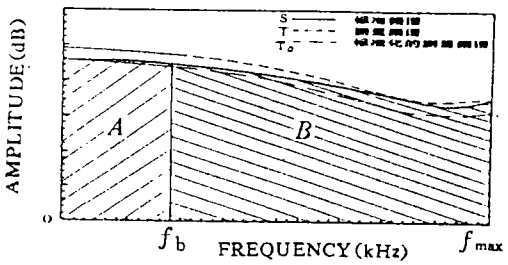

图 8　损伤判据的建立

5　敲击法无损检测的灵敏度分析

为了将敲击法应用到实际结构无损检测中，必须对敲击法无损检测的灵敏度进行分析，以确定对于不同工程结构，敲击法可检测的最小损伤的范围。

为了确定敲击法无损检测灵敏度，不只需要考虑结构损伤存在时损伤判据的变化，还应确定在一个无损伤结构上，损伤判据随位置的变化而变动的范围。如果在一个无损伤结构上，随位置的变化，撞击特性只有很小的变化，那么通过比较有损伤区与无损伤区损伤判据的变化，就可以灵敏地检测出损伤，也即该法具有较高的灵敏度，反之则方法的灵敏度较低。因此，需要分析一个结构不同位置被撞击的撞击响应，对于有损伤位置，可认为其有效接触刚度降低。我们为了确定敲击法检测复合材料结构损伤的灵敏度，以确定其灵敏度，我们检测了含不同大小损伤的 GFRP 复合材料试件，试件大小为 250×250×2mm³，共预埋了十个圆形损伤，损伤为在复合材料层板中埋放聚乙烯薄膜以模拟脱层、脱粘等损伤，分别为 1#，2#，…10#，其直径大小见表 1。

表 1　各损伤区直径 d

损伤区	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
d(mm)	30	25	22	30	18	16	14	12	10	20

其中 9#、10# 损伤区距边界是 20mm，这是为了研究边界效应而设计的。我们分别应用超声 C-扫描和敲击法对该试件进行了损伤检测，图 9 为预埋损伤分布图，图 10 为试件的超声 C-扫描图，实验中无损伤复合材料试件被分别用橡皮筋吊起，以实现自由边界条件，实验结果列于下表中。

表 2　含不同大小损伤 GFRP 试件的损伤判据（f_{max}＝4.0kHz、　f_b＝0.25f_{max}）

损伤判据 R 值	无损伤区		有损伤区									
	远离边界	距边界 20mm	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
	0.53	0.58	0.4	0.46	0.50	0.48	0.49	0.51	0.52	0.51	0.57	0.54
撞击力(N)	28.4	30.0	13.6	21.2	21.6	20.0	22.0	26.0	22.0	28.6	28.6	24.2
撞击时间(ns)	693	594	1188	825	792	792	759	726	726	726	627	660

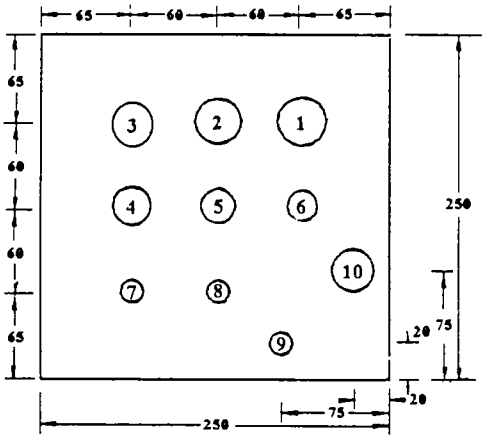

图 9 GFRP 试件预埋损伤分布图

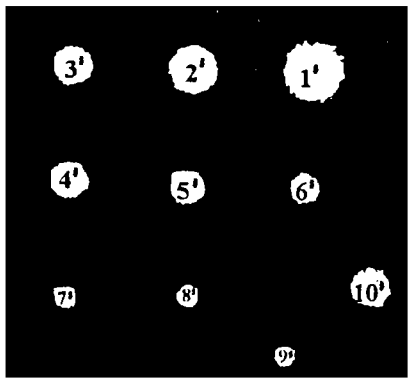

图 10 CFRP 试件超声 C-扫描图

从中我们发现，当损伤面积明显增加时，撞击持续时间增加了，且峰值力变小了，但有些较大损伤区峰值力高于较小损伤区的峰值力，这也表明了应用峰值力作为损伤判据的危险性。除了离边界较近的 9#、10# 损伤区外，我们发现，所有损伤区的撞击持续时间均高于远离边界无损伤区的撞击持续时间，但从 6#、7#、8# 损伤区的时域及频域曲线看，撞击持续时间基本相同，这也表明了大小相近的损伤区，其有效接触刚度相差不大。由于接近板边界时，撞击特性变化较大，因此，如果以远离边界无损伤区曲线作为标准，9#，10# 损伤较难检测，从中我们也发现，9#、10# 损伤的撞击持续时间均小于远离边界的无损伤区的撞击持续时间，因此，我们给出了距边界 20mm 无损伤区的时域及频域曲线，由于 9#、10# 损伤区的撞击持续时间大于距边界 20mm 无损伤区的撞击持续时间，因此以此为标准，可有效地检测出损伤。

对于表中的损伤判据 R，我们发现，除 9#，10# 损伤外的所有损伤的 R 值均小于远离边界无损伤区的 R 值，而损伤区 9#，10# 的 R 值则小于靠近边界 20mm 无损伤区的 R 值，但却高于远离边界无损伤区的 R 值，这也证实了边界效应对检测损伤的影响。

从上面分析可以看到，当损伤区直径减小到 10mm 时，有损伤区的撞击持续时间与无损伤区的近乎相同，而 R 值也分别为 0.57 和 0.58。这说明，当损伤区直径再减小时，由于有损伤区的有效接触刚度增加到与无损伤区的接触刚度几乎相同，达到极限有效接触刚度，此时将不能再检测出损伤，因此，我们认为，敲击法可有效地检测 2mm 厚复合材料层板 10mm 直径的脱粘、脱层等损伤，并且该方法尤其适用于蒙皮结构，蜂窝结构的损伤检测。

6 总 结

从上述分析和实验可以看到，敲击法的优点在于被测结构和敲击锤之间不再需要耦合剂，而其它超声方法都需要耦合剂，如水、油等，这就使敲击法更适用于野外现场检测。同时，测试只需要被测结构敲击力的时域曲线，这通过敲击锤中的传感器就可完成，因此，不需将传感器固定在结构上。由于该方法不需要监测结构振动后扩散的声音，因此，该方法对背景噪声不敏感，可用于较差环境条件下。总之，敲击法具有以下优点：

(1) 传感器与被测结构之间不需要耦合剂；

(2) 不需要将传感器固定在被测结构上；

(3) 不受环境噪声的影响；

(4) 尤其适合检测蒙皮结构、多孔蜂窝结构等复合材料结构,对于薄的蒙皮结构,比其它方法如机械阻抗法具有更高的灵敏度;

(5) 仪器便宜,操作简便,且适用于野外现场检测。

应用敲击法对实际结构进行检测时,如果结构复杂,如导弹弹翼中的蒙皮和加筋部分,应先在标准结构上对不同部位进行标定,建立损伤检测标准,然后再进行批次无损检测。目前,我们已完成以该方法为原理的 CM-1 型无损检测仪,可检测复合材料结构 10mm 直径、1cm 深的脱层,脱粘等损伤,相信必将广泛地用于工程结构的现场测试中。

参 考 文 献

1 杜善义,冷劲松. 先进复合材料的纤维光学法无损评价. 宇航材料工艺, 1992; 5: 11—18

2 杜善义,冷劲松,顾震隆. 用应力波技术对配橡胶内衬的复合材料板壳进行无损检测. 复合材料学报, 1993; 10(1): 65—69

3 Cawley P, Adams R D. The mechanics of the coin-tap method of non-destructive testing. Journal of Sound and Vibration, 1988; 122(2): 299—316

4 Leng J S, Du S Y, Gu Z L. A new consideration of non-destructive testing for composite structures. ISCMS Ⅱ, Beijing, 1992

SENSITIVITY OF THE COIN-TAP METHOD OF NONDESTRUCTIVE TESTING FOR COMPOSITE STRUCTURES

Leng Jinsong　　Du Shanyi　　Wang Dianfu　　Li Quanlong

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract　The physical basis of nondestructive testing for composite structures using the coin-tap method has been investigated. A typical criterion of inspecting defects is established. Meantime, the minimum detectable defect for GFRP composite laminates including different defects has been analyzed in detail. A defect of 10mm diameter under a 2mm thick laminate is at the margin of detectability. Therefore, the method is particularly attractive for use in the field and on laminate structures that may be porous.

Key words　coin-tap method, composite materials, sensitivity, nondestructive testing

(上接第 89 页)

1989	○ 金井车轮工业开发 FRP 轮盘	压塑	大学等)	
	○ 住重就 ACM 的高速成型技术与外国公司合作	SMC	○ 混凝土补强用 FRP 塔子筋的开发和应用(大日本硝子工业)	连续
			○ 低比重高强度 SMC 应用于汽车零部件(纤维玻璃)	SMC
			○ 拉挤成型新型材介绍(三井东压化学)	拉挤

(下转第 118 页)