

雷达天线罩外场敲击检测技术研究

王铮，李硕宁，郭广平

(中航工业北京航空材料研究院，北京，100095)

摘要：本文通过对某雷达天线罩的敲击检测试验，详细分析了不同敲击检测方法工作原理、雷达罩敲击检测对比样件的制作及雷达天线罩外场敲击检测方法的可行性，为雷达天线罩服役过程中的外场检测提供了有力的技术支持。

关键词：雷达天线罩，敲击检测

雷达天线罩是雷达系统的重要组成部分，对保证雷达正常运行具有积极作用。雷达天线罩通常使用蜂窝结构复合材料制作，主要结构形式有 A 夹层、B 夹层、C 夹层等^[1, 2]。随着我国雷达天线罩的大量装机使用，其服役过程中的外场检测技术越来越为人们所关注，该类制件的外场快速检测技术具有广泛的应用前景。

敲击检测方法是通过硬币、小锤或仪器对被检件进行敲击，利用敲击声音或仪器信号显示来判断制件中是否存在分层或脱粘缺陷。该方法是一种简单、快速的无损检测方法。本文通过对某雷达天线罩的敲击检测试验，详细分析了不同敲击检测方法的工作原理和检测能力的异同，并介绍了敲击检测对比样件的制作方法。

1 敲击检测方法

波音公司有关敲击检测标准中规定使用的工具有硬币、小锤、WP-632 啄木鸟敲击检测仪及一些其他工具和专用仪器。本文论述的敲击检测方法主要为小锤敲击和 WP-632 啄木鸟敲击检测仪方法两种。

小锤敲击检测方法是由检测人员通过小锤敲击被检件发出声音的频率高低判断被检部位是否存在缺陷。声音频率较正常部位低（声音沉闷），认为对应部位存在粘接异常；声音频率较正常部位高（声音清脆），认为对应部位粘接良好。使用小锤敲击检测，要求检验人员具有较好的听力和一定本方法检测经验，且不允许工作场所有较大干扰噪音。

WP-632 啄木鸟敲击检测仪是通过比较敲击探头与被检件表面的撞击持续时间来判断被检件的脱粘程度。如图 1 所示，所谓撞击持续时间是指当小锤敲击在被检件上，记录起始时间，小锤弹起脱离表面，记录结束时间，这一过程为小锤工作的撞击持续时间^[3]。

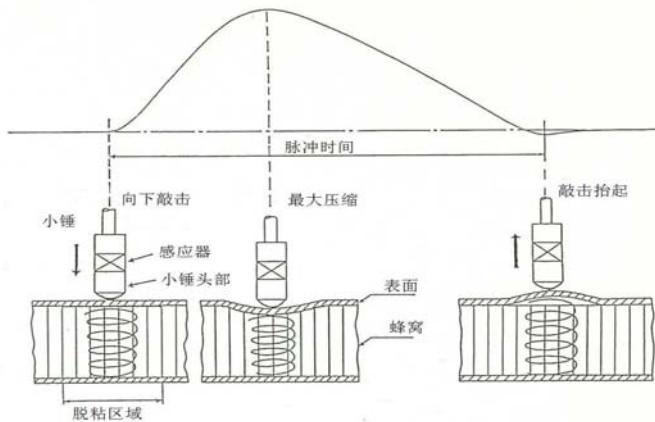


图 1 小锤动态行为与波形对应关系

敲击探头在无损伤区的撞击持续时间比有损伤区的撞击持续时间短。探头敲击制件良好部位的撞击持续时间作为标准参考值 T_0 ，敲击被检结构其它部位的撞击持续时间记为 T ，将比值 $(R = (T - T_0) / T_0 \times 100\%)$ 作为判断被检部位脱粘程度的依据^[4]。仪器通过一串发光二级管和声音同时进行声光警报来表征材料的脱粘程度，如表 1 所示。

表 1 声光报警与脱粘程度关系

R 值范围	报警灯显示	声音显示	脱粘程度
$R < 8\%$	绿灯	无	正常
$8\% \leq R < 16\%$	黄灯	无	警告
$16\% \leq R < 40\%$	红灯 1	报警声	脱粘
$40\% \leq R < 80\%$	红灯 2	报警声	脱粘
$80\% < R$	红灯 1+ 红灯 2	报警声	脱粘

WP-632 敲击检测仪的参数主要有：敲击频率和采样平均值。敲击频率越高，检测时探头可移动的速度可以越大。采样平均值越大，采用的检测速度相应越慢，但对于误报警的抑制能力越强。WP-632 敲击检测仪的扫查方式有：定点式扫查和移动式扫查。在被检件表面较粗糙的情况下，移动式扫查得到检测数值较定点式大，故在选择参考值 T_0 和进行检测时应采用同一种扫查方式；在被检件表面较光滑时，两种扫查方式数值基本相同。

2 敲击检测用对比样件制作及对比样件敲击检测结果

使用敲击法检测蜂窝结构制件时，对蒙皮厚度在三层以下的制件可以不使用对比样件而直接进行检测，对蒙皮厚度大于三层的制件需要制作与被检件结构相同或相似、带有人工缺陷的对比样件，作检测前校准使用。本文检测的雷达天线罩蒙皮厚度为 6 层，需要制作相应

的对比样件。参照国内外有关标准中蜂窝夹层结构人工缺陷类型^[5, 6]，设计制作了一批对比样件，现列举其中有代表性的两个如图 2、图 3 所示。

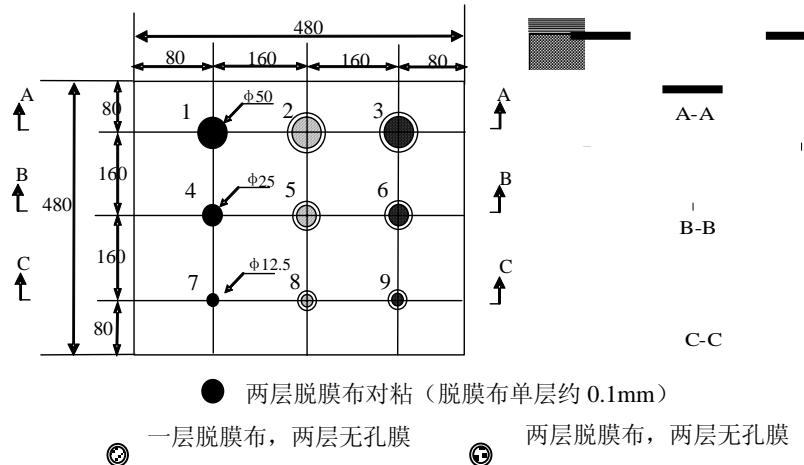


图 2 试样 2K-U-3#-2009 缺陷分布示意图

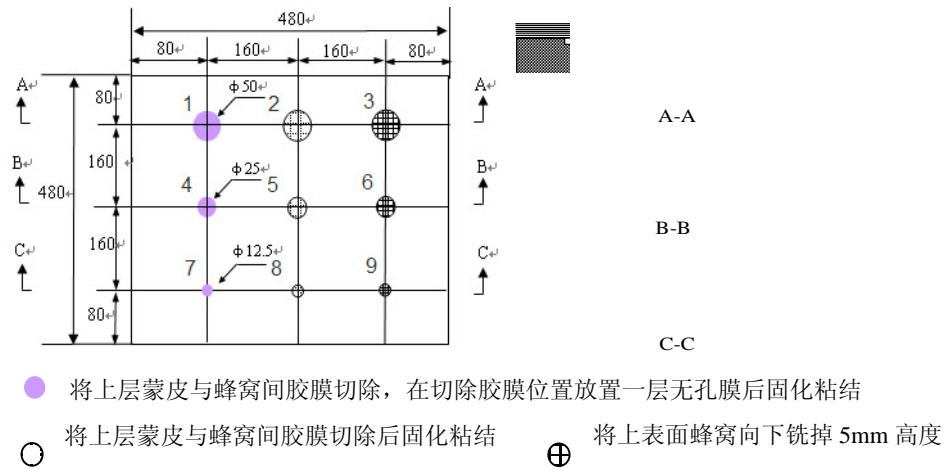


图 3 试样 2K-U-4#-2009 缺陷分布示意图

4#试样中的 3、6、9 号人工缺陷为铣蜂窝人工缺陷，模拟明显分层、脱粘缺陷；3#与 4#试样中的其他人工缺陷为夹膜或去胶膜人工缺陷，模拟紧贴型缺陷。对上述样件分别使用小锤敲击法和 WP-632 敲击检测仪进行检测，使用仪器检测时，由于试样表面状态较好，点动式与移动式扫查方式检测数值基本相同，检测结果见表 2。

表 2 小锤敲击法与 WP-632 敲击检测仪检测结果比较

2K-U-3#-2009				2K-U-4#-2009			
缺陷编号	敲击仪检测		小锤检测	缺陷编号	敲击仪检测		小锤检测
	仪器读数	检测结果			仪器读数	检测结果	
无损区域	0.3~0.42.	校准点	校准点	无损区域	0.3~0.40.	校准点	校准点
1	0.37~0.42	不能识别	不能识别	1	0.35~0.39	不能识别	不能识别
2	0.33~0.38	不能识别	不能识别	2	0.35~0.39	不能识别	不能识别
3	0.36~0.39	不能识别	不能识别	3	0.51~0.63	可以识别	可以识别
4	0.37~0.42	不能识别	不能识别	4	0.36~0.39	不能识别	不能识别
5	0.32~0.36	不能识别	不能识别	5	0.35~0.38	不能识别	不能识别
6	0.35~0.38	不能识别	不能识别	6	0.41~0.48	可以识别	可以识别
7	0.38~0.41	不能识别	不能识别	7	0.35~0.39	不能识别	不能识别
8	0.30~0.33	不能识别	不能识别	8	0.35~0.38	不能识别	不能识别
9	0.36~0.37	不能识别	不能识别	9	0.38~0.40	不能识别	不能识别

由表 2 数据可以看到, 采用敲击检测仪与小锤敲击检测能力相同, 能够检测 $\phi 25\text{mm}$ 和 $\phi 50\text{mm}$ 的明显脱粘缺陷, 而对 $\phi 12.5\text{mm}$ 的明显脱粘缺陷和其它尺寸的紧贴型缺陷均不能识别。

3 雷达天线罩外场检测试验及结果分析

试验对 10 余个雷达天线罩进行了敲击检测试验, 试验方案如图 4 所示。检测过程中没有发现异常部位, 下文数据均是在粘接良好区域检测得到的, 用来比较不同敲击检测方法的适用性。

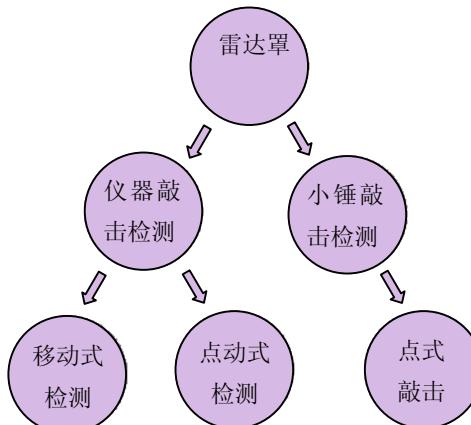


图 4 外场敲击试验方案

3.1、雷达罩仪器敲击定点式检测

在每个雷达罩上随机采集的定点检测数据不少于 10 个，检测结果及分析如表 3。

表 3 WP-632 敲击检测仪外场定点检测实测数据

雷达罩编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.42	0.44	0.43	0.45	0.44	0.45	0.41	0.40	0.40	0.47	0.40	0.42
2	0.45	0.43	0.43	0.45	0.46	0.47	0.46	0.41	0.43	0.42	0.40	0.45
3	0.44	0.45	0.44	0.42	0.43	0.40	0.42	0.38	0.39	0.41	0.42	0.41
4	0.48	0.47	0.46	0.45	0.43	0.44	0.40	0.44	0.40	0.46	0.39	0.42
5	0.50	0.45	0.42	0.44	0.46	0.44	0.41	0.42	0.42	0.45	0.40	0.42
6	0.46	0.49	0.47	0.46	0.42	0.45	0.43	0.41	0.40	0.45	0.39	0.42
7	0.47	0.44	0.46	0.43	0.41	0.44	0.41	0.40	0.39	0.43	0.38	0.40
8	0.52	0.45	0.47	0.44	0.43	0.43	0.42	0.41	0.40	0.45	0.42	0.33
9	0.46	0.46	0.46	0.42	0.45	0.42	0.44	0.40	0.42	0.46	0.41	0.43
10	0.49	0.44	0.45	0.43	0.42	0.43	0.45	0.41	0.39	0.47	0.41	0.41
11							0.43				0.40	0.40
12							0.41				0.42	0.35
13							0.40				0.42	0.37
平均值	0.47	0.45	0.45	0.44	0.44	0.44	0.42	0.41	0.40	0.45	0.40	0.40
标准差	0.03	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03
总体平均值	0.43											

实测定点检测数据，有以下特点：

- 1) 同一个雷达罩的 10 或 13 个测点数据的波动范围大约在 $\pm 10\%$ 以内 (2 , 95% 置信度)；
- 2) 不同雷达罩平均检测读数为 0.43, 不同雷达罩之间平均读数的波动在 $\pm 10\%$ 以内。

故 WP-632 敲击检测仪定点检测数据较稳定，不受制件表面粗糙度影响。

3.2、雷达罩仪器敲击移动式检测

使用敲击检测仪进行移动式检测，检测数据在 0.43~0.57 范围内波动，R 值在 0%~33% 范围内波动，报警现象频繁。造成该现象的主要原因是雷达罩表面粗糙度影响。WP-632 敲击检测仪移动式检测数据受制件表面粗糙度影响较大，当使用该方法检测粗糙表面制件时，可适当提高检测参考值 T_0 的设置，使之即满足能检测出要求检出的最小脱粘缺陷，又不产生过多

误报警为宜。

3.3、雷达罩小锤敲击检测

使用小锤敲击法对相同粘接质量的粗糙表面和光滑表面组件进行检测时，二者被敲击产生的声音无明显区别，可见小锤敲击法检测受被检件表面状态影响较小。

综上所述，在被检组件表面状态较好时，使用小锤敲击和仪器敲击的两种扫查方式均可进行检测；在被检组件表面状态不好时，小锤敲击和仪器定点式检测可正常使用，仪器移动式检测受表面状态影响较大，使用时需将检测参考值 T_0 适当提高。

4 仪器敲击检测法与小锤敲击检测法比较

仪器敲击与小锤敲击两种检测方法对不同类型、不同大小缺陷的识别能力相同，不同之处主要体现在其操作方式和外界对检测的干扰方面，不同点直接影响两种敲击检测方法的检测效率。为了比较两种敲击检测方法的检测效率，在 $480 \times 480\text{mm}$ 的对比样件上分别进行敲击检测试验，仪器敲击采用定点式和移动式检测方式，小锤敲击采用点式敲击，检测间距均为 16mm 左右，表 4 给出了各检测方法所用时间。

表 4 不同敲击检测方法检测效率比较

检测方法	仪器敲击检测		小锤敲击检测
敲击方式	定点式检测	移动式检测	点式敲击
所用时间	8 分 34 秒	2 分 44 秒	2 分 43 秒

由表 4 数据可以看到，在不存在表面粗糙度干扰的平面对比试样上检测，仪器定点式检测效率较移动式检测低；敲击仪移动式检测与小锤点式敲击检测效率基本相同。

表 5 给出了两种敲击检测方法综合能力的比较。

表 5 仪器敲击检测法与小锤敲击检测法比较

	相同点	不同点	
		优点	缺点
仪器 敲击 法	1、对蒙皮厚度较大的组件检测能力下降。 2、对不同类型、不同大小缺陷的识别能力相同	1、可数字化显示缺陷的信号； 2、可对检测数据进行存储和传输； 3、可在噪声环境中使用； 4、操作简单，人为因素影响小。	1、移动过程中探头角度变化可能使检测信号值产生波动； 2、表面粗糙度可能使信号值波动； 3、由于对外界干扰敏感而易导致检测效率降低。
小锤 敲击 法		1、检测用设备简单； 2、检测中敲击响应基本不受表面粗糙度的影响。	1、检测环境不允许有较大噪声干扰； 2、人为因素影响较大，操作者要求有一定敲击检测经验。

5 结论

本文通过对某雷达天线罩进行的敲击检测试验及分析, 可得到以下结论:

- 1) 仪器敲击检测法与小锤敲击检测法具有相同的缺陷识别能力, 能够识别明显的空隙类缺陷, 不能识别紧贴型缺陷;
- 2) 仪器敲击检测法与小锤敲击检测法各有优缺点, 检测时可以互相补充, 对表面状态较好、曲率不大的部位或检测环境噪音较大时, 优先选用移动式仪器敲击检测方法; 当制件表面状态较差或被检部位曲率较大时, 优先选用小锤敲击检测方法。

参考文献:

- [1] Ku~Kz 波段地面雷达天线罩应用展望及设计要点[J]。纤维复合材料, 2008 年 9 月, 第 3 期。
- [2] 舒卫国, 杨博等。雷达天线罩技术综述[J]。航空制造技术, 2007 年第 z1 期。
- [3] Technical Report No. 2 V1 for Woodpecker.
- [4] WP-632 啄木鸟敲击检测仪操作手册。
- [5] GJB 1038. 1A-2004, 纤维增强复合材料无损检测方法, 第 1 部分 超声波检验。
- [6] BAC 5980, NONDESTRUCTIVE INSPECTION OF COMPOSITE PARTS AND STRUCTURES.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>