

# 自动化无损检测技术 及其应用\*

Automated Non-destructive Testing Techniques and Its Applications

北京航空制造工程研究所 刘松平 刘菲菲 李乐刚 白金鹏 曹正华 谢富原 郭恩明



刘松平

俄罗斯莫斯科国立大学理学博士, 研究员, 中国无损检测学会常务理事, 《无损检测》杂志副主编。一直从事新材料及其结构、焊接可视化成像等无损检测技术的研究与应用开发, 发表论文 80 余篇。

无损检测技术已广泛应用于航空、航天、电力、石化、石油、电子、冶金、机械、建筑、压力容器等领域。为了解决各种材料及结构的无损检测, 国内外先后研究采用了多种无损检测技术, 从初期的目视检测、渗透检测、磁粉检测, 发展到目前的超声检

测、射线检测、涡流检测、声发射检测、泄漏法检测、热图像检测等<sup>[1-2]</sup>。不同被检测对象或者应用场合, 通常需要研究采用针对性的检测方法和检测技术, 比如, 焊接结构的无损检测, 目前主要采用超声和射线 2 种检测方法<sup>[1-4]</sup>, 复合材料的无损检测则以声学检测方法为主<sup>[5]</sup>。为了实现被检测材料或结构的 100% 覆盖检测, 常常需要研究采用合理的方法或技术, 通过合理的方式移动检测换能器, 进行覆盖扫查。传统的方法主要是通过手工移动换能器, 检测人员通过观察仪器的显示信号进行缺陷判别, 缺陷判别受检测人员主观因素的影响, 容易漏检, 缺陷定量和分布确定困难。有效的技术途径就是采用自动化无损检测技术。

为了提高检测的可靠性和缺陷

诊断的准确性、提高检测效率、降低检测成本, 发展自动化无损检测技术是近年来国外研究的一个主要技术方向。针对不同的被检测对象和应用场合, 技术思路主要有 2 种: 一种是基于单个换能器扫查的自动化无损检测技术; 另一种是基于多换能器的自动化无损检测技术。前者可以通过改进扫查速度, 提高自动化检测的效率; 后者主要是通过增加换能器检测通道数, 提高自动化检测效率。

20 世纪 80 年代, 我国对自动化无损检测技术显示出了明显的技术需求, 经过几十年的发展和自主研究, 目前已经形成了颇具特色的自动化无损检测方法、无损检测技术、无损检测仪器设备, 并有了广泛的应用。先后取得了一批实用性较强的自动化无损检测技术成果, 有一批稳定的科技队伍从事自动化无损检测

\* 国家自然科学基金项目(60727001 和 60572099)

技术研究,为我国无损检测自动化技术工程应用和技术发展起到了重要的支撑作用。

## 自动化无损检测技术

### 1 特点与思路

自动化无损检测技术的基本设计思想就是利用已有或者新开发的检测方法、检测原理,通过电子、计算机、机械、控制和信号处理等技术,使检测过程实现自动化,甚至植入一些人工智能要素,参与对检测结果判别,是无损检测技术与自动化技术交叉互融的一门专业技术,它显著的特点是,首先,自动化无损检测技术的应用和实施,强烈依赖于检测方法。一些在自动化领域,也许是非常容易实现的,但要与所采用的具体检测方法融为一体,则往往会带来许多额外的技术困难,甚至是不能实现或者实现成本太高。也有一些是因受到无损检测方法自身的技术限制,难以实现自动化无损检测。其次,不同的检测和应用对象,需要采用不同的无损检测方法,在确保能够有效提取或者得到有效的检测信号或信息基础上,才能考虑如何或者是否有可能实现自动化无损检测,因此,它属于典型个例技术设计模式。第三,自动化无损检测技术的研究和设计应用的专业性很强,仅靠简单的硬件设计或组合,难以真正解决自动化无损检测,它需要密切结合被检测对象,以检测方法为技术支撑,以实际应用为经验,将声、光、电等检测方法与计算机、自动化等相关专业技术有机结合。第四,自动化无损检测技术的设计与应用的合理性,强烈取决于长期的自身技术积累和沉淀,必须有系统技术和专业技术作为基础。第五,在实际应用中必须有一个合理的技术观,一方面,自动化无损检测技术不能解决所有的检测问题;另一方面,不是所有场合和应用对象都适合自动化检测,必须结合检测对象和应用

场合、环境条件、批量程度和技术成本等科学的考虑。特别值得指出的是,现代自动化无损检测技术,在大部分应用场合,需要对检测结果进行可视化成像显示记录,因此,在自动化设计时,必须考虑实时位置数据的传递与检测系统的信息交换问题。此外,自动化无损检测技术设备的设计和应用,还需要有自身显著的文化内涵和艺术内涵。

正是由于上述特点,我国的自动化无损检测技术,必须在能够拥有的国际技术资源基础上,加强自我研发的能力。

### 2 方法与问题

从广义上讲,自动化无损检测技术可以分为两大类。

第1类是基于点扫描检测原理的自动化无损检测技术,主要是所选用的检测方法和被检测对象、应用场合、环境条件和技术要求等,通过扫描机械与控制系统的技术设计,实现自动化无损检测,也可以是对某个检测工序或过程实现自动化,还可以是用于原材料、制造过程中的产品或生产过程中的在线自动化无损检测。例如,早期的超声管棒材超声自动扫查检测,就是在人工扫查检测基础上,通过设计专门的扫查机构设计,实现换能器对被检测管棒材的自动化扫查检测的。其显著的技术特点是需要根据所选用的检测方法,针对被检测对象的几何特征,进行扫描机构和运动控制系统的设计。被检测对象的几何特征越复杂,意味着扫描机构与运动控制系统的实现成本越高,例如,管棒材的超声自动化扫查检测,通常设计2个运动坐标的扫查机构,即可以实现其自动化检测,而对于曲面结构或零件,则需要具有3个以上运动坐标的扫查机构。理论上,实现曲面零件的自动化加工并不难,但要有效地解决曲面零件的自动化无损检测,还有许多技术问题需要解决,比如曲面跟踪扫描,尽管目前

国际上也有一些借助CAD/CAM、机器人示教、仿形等相关领域的技术成果来实现被检测零件曲面跟踪扫描,但实际应用效果并不理想。其原因之一,是自动化无损检测,通常需要实时反馈位置数据,而且被检测零件到了检测工序,原先的理论模型难以真正用于计算机的几何形面跟踪,因为参考点也不再是原来设计或者形成的位置零点。更为重要的是,被检测件的几何形面在自由状态下通常已与原来数据模型所描述的几何形面有了明显的变化(至少被检测的复合材料蒙皮、壁板类的零件属这种情况)。在众多的无损检测方法中,超声、涡流、电磁等可以通过这种点扫描方式实现自动化无损检测,其中超声是目前最易实现自动化的无损检测方法,而且已得到了广泛的应用,目前较为复杂的超声自动化无损检测设备甚至达到了12个轴,用以解决不同几何特征的结构或零件的自动化无损检测。

第2类是基于无损检测方法本身的物理信号就能够对被检测对象进行面积扫描的自动化无损检测技术,这种方法对扫描运动机构和控制系统的设计、制造相对简化。例如,基于超声导波、数字式X射线成像、相控阵等检测技术,通常只需要解决一维、最多是二维的自动化扫描机构与运动控制系统的设计、制造问题。不过,单从自动化无损检测适应性考虑,基于点扫描方式的自动化无损检测方法,灵活性更好,适应性更强。而基于面扫描方式的自动化无损检测方法,有利于提高检测效率,但其灵活性、适应性要明显差,适合能够进行面扫描的被检测对象,但基于面扫描的自动化无损检测技术,目前在换能器技术、耦合技术、检测分辨率和检测灵敏度等方面有不少的技术问题需要进一步研究和改进。

### 3 发展与回顾

自动化无损检测已成为现代工

业的重要支撑技术,国外在 20 世纪 70 年代前后就已经进入非常活跃的技术发展时期,我国自动化无损检测技术的发展则经历了以下几个重要阶段:

(1) 20 世纪 50 ~ 60 年代,随着新中国的成立和建设规模的全面铺开,航空、冶金、钢铁等领域的研究和生产活动不断发展,对自动化无损检测技术开始有了一些初步想法,但尚处于探索阶段。

(2) 20 世纪 60 ~ 70 年代,自动化检测技术主要以实现扫描工序的自动化为特征,特别是对当时已经形成一定批量生产和需求的原材料进行无损检测,开展了超声和涡流自动化无损检测技术的研究和应用,其主要特点是结合具体的应用对象,通过专门的机械扫描机构,解决无损检测过程中的自动扫描与检测,自动化无损检测技术在航空、机械、钢铁等领域开始有了针对性研究和实际应用,由于当时的科研环境在经济利益方面的考核不像现在这样明显,使得科研单位与工厂的合作研究与试验相对要容易和密切得多。例如,北京航空制造工程研究所(625 所)与声学所、703 所、320 厂等许多单位都曾在这个时期有着非常密切的研究合作。基于超声和涡流检测方法是这个时期研究采用的重要原材料自动化检测方法。

(3) 20 世纪 80 ~ 90 年代,是自动化无损检测技术研究较为活跃和明显发展阶段。随着改革开放的全面实现和进展,我国科学技术和工业化领域实现了建国以来最为快速的发展,特别是航空航天、机械、电子、冶金、钢铁等工业部门的全面振兴与发展,推动了自动化无损检测技术的发展与应用。一方面,由于改革开放给科学研究与工业应用领域带来活力,另一方面,由于工业技术水平的明显进步与发展、工程化生产程度的明显提高,人们对国民经济建设关

键领域中产品的质量与可靠性要求明显提高,自动化无损检测逐渐成为材料工艺研究与工业应用部门的支撑技术,从而也成为较为活跃的研究领域。自动化无损检测技术逐渐在航空、航天、能源、核工业等重要部门得到应用。自动化无损检测主要以实现自动扫描成像为技术特征。例如 625 所先后研究成功了管棒材的超声自动化检测系统,复合材料结构超声自动扫描成像检测系统,并得到了实际应用。

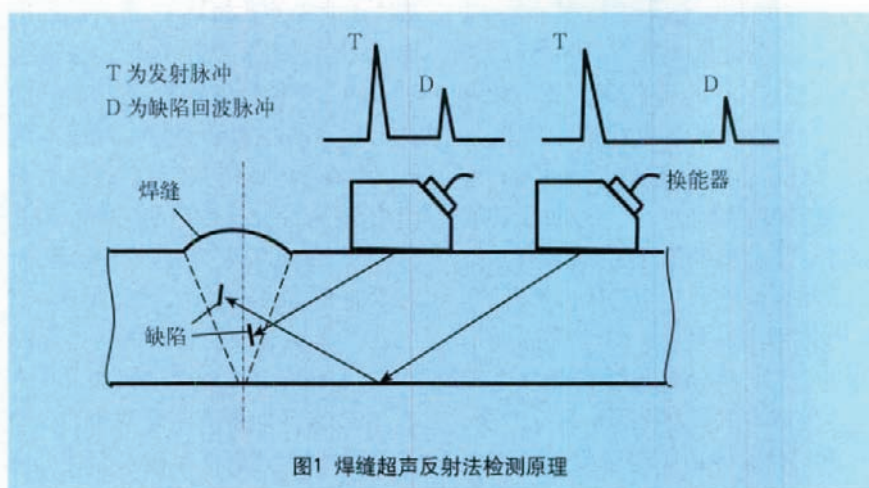
(4) 进入 21 世纪,随着我国经济的全面快速发展,科技水平和经济实力的全面提升,工业化水平的提高和批生产步伐的加快,一方面传统的新材料及其结构进入批量使用,各种涉及国泰民安的工程和在线设备进行服役维护,其质量与可靠性要求不断提高;另一方面,新材料新工艺新结构不断批量装机应用,更加追求高质量、高可靠性、长寿命、高性能、低成本,对自动化无损检测技术有了比以往更高的要求,不仅要求实现检测过程自动化,还要求检测结果可视化,不仅能进行自动化无损检测,还需要更多地考虑自动化无损检测的效率、可靠性和成本。因此,自动化无损检测技术有了十分快速的发展。自动化无损检测技术主要以快速高效可视化为主要技术特点<sup>[6]</sup>。检测方法以超声为主,包括基于传统超声

检测方法、激光超声和电磁超声检测方法的自动化检测技术,同时基于涡流和 X 射线成像检测方法的自动化检测技术也有了明显的发展。一些基于超声方法的自动化检测技术还在室外得到了成功的实际应用。例如 625 所研究的大型复合材料结构自动化超声检测系统,可达 20 通道,可用于 6000mm×7500mm 以上规格的大型结构件的自动化扫描成像检测。

### 自动化无损检测技术的需求与应用

20 世纪中叶前后,对自动化无损检测技术有了明显的需求,其中一个重要应用是管棒材的自动化检测,主要是采用超声和涡流自动化检测方法。近 20 多年来,自动化无损检测技术得到了快速发展,这主要得益于工业化程度的提高和电子、计算机、机械、控制等相关领域的快速发展,例如,管棒材的自动化无损检测、板材的自动化无损检测、复合材料结构的自动化无损检测、焊缝的自动化无损检测以及航空航天等领域各种重要结构或者零部件的自动化无损检测,都是自动化无损检测技术近年来非常活跃且得到重要应用的实例。自动化无损检测技术在工业部门的应用主要分为以下几个方面:

(1) 用于原材料自动化无损检



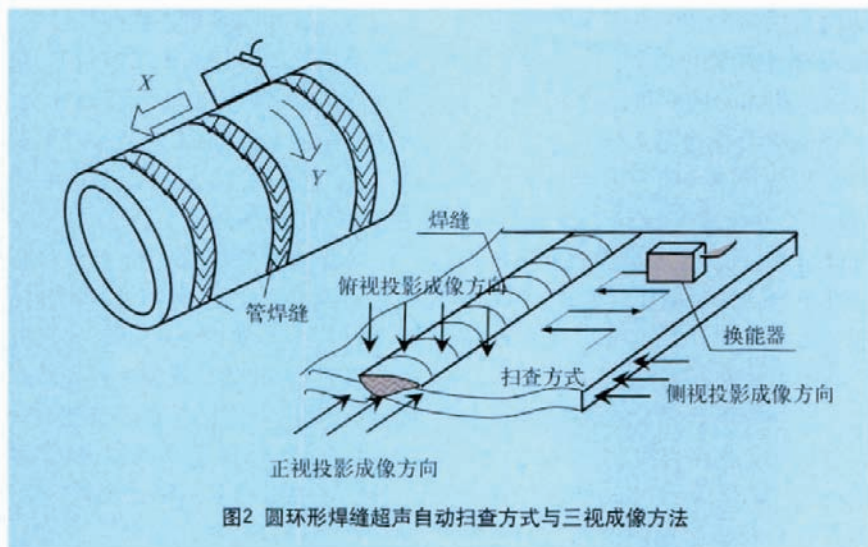


图2 圆环形焊缝超声自动扫查方式与三视成像方法

测,主要是针对生产过程中的批量原材料的检测特点,设计采用超声和涡流等检测方法,实现自动化无损检测,例如管棒板材的超声自动化检测、薄壁管材和丝材的涡流自动化检测等。

(2) 用于零部件的自动化无损检测,主要用于生产和制造过程中,各种重要零部件的自动化无损检测,例如制造过程中重要铸、锻件的自动化超声扫描检测,焊缝的超声自动化扫描检测和基于射线方法的成像检测,集成电路的超声扫描成像检测等。

(3) 用于新材料新工艺新结构的超声自动化无损检测,特别是近年来,随着复合材料、固相焊接等新材料新工艺在航空航天等重要工业领域的批量装机应用,给自动化无损检测技术带来新的活力和应用。

(4) 用于科学研究中的材料微结构表征、缺陷评估和试验研究。

(5) 用于产品和服役过程中的质量监控和缺陷检测,包括各种重要管道、特种设备、服役设备的自动化无损检测等。

### 1 焊接自动化无损检测技术及其典型应用

焊缝自动化检测目前主要是采用超声方法,基于超声波在焊缝中的传播规律,当在被检测焊缝区发现缺

陷时,声波将会在其周围产生反射/折射/衍射,利用换能器接收超声信号的变化判别缺陷,如图1所示。为了有效地检出材料中的缺陷,通常要求声束方向尽可能与缺陷取向垂直。为了解决接焊缝的100%覆盖自动

化检测,需要根据被检测焊接结构的特点,设计合理的自动扫查方式对焊缝进行自动扫查检测,例如,对于圆环形焊缝,需要设计采用(X, Y)两自由度自动扫描技术实现超声自动化检测,检测结果可以通过超声三视投影成像显示<sup>[2,7]</sup>,如图2所示。

图3是一管道焊缝的超声自动扫描多维成像检测结果,图中给出了管道焊缝的C-扫描(图3(a))和三维投影成像(即P-扫描)结果——侧视投影成像(图3(b))、俯视投影成像(图3(c))和正视投影成像(图3(d)),对应当前选择的一焊缝断面正视投影成像中的最大缺陷回波信号(图3(e))。管道焊缝的直径为273mm,焊缝厚度为25mm,通过焊接工艺控制的方法在焊缝中预制有未焊合缺陷。超声换能器的频率为2.5MHz,采用625所生产的MUI-

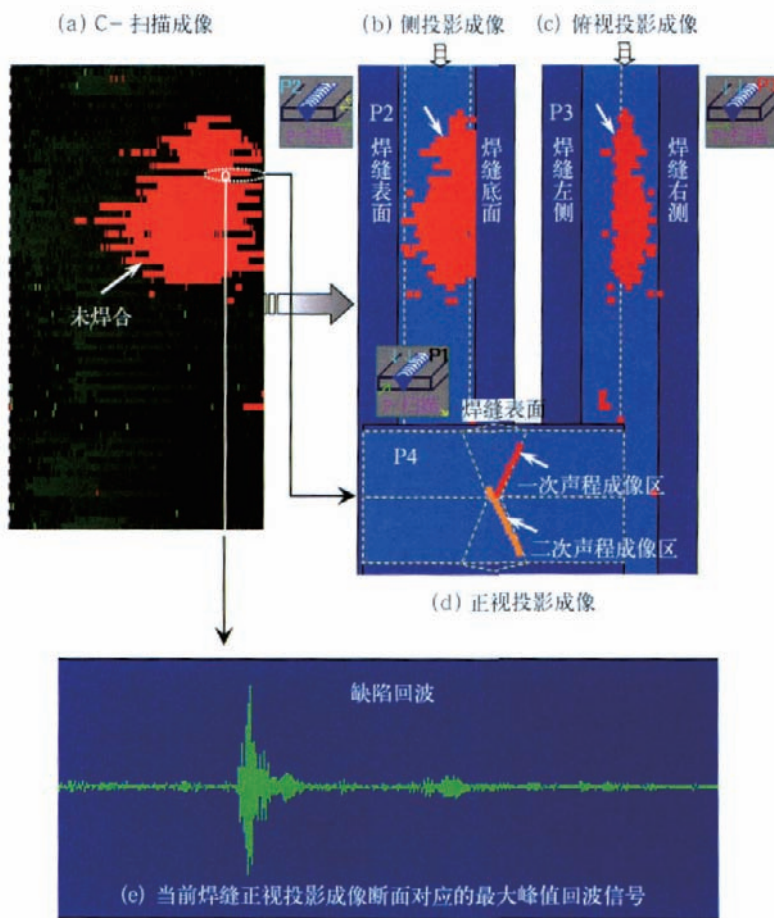


图3 典型管道焊缝超声自动扫描多维成像检测结果

21A 便携式管道焊缝超声自动扫描检测系统。探头沿着管道焊缝轴向扫描,沿周向步进。图 3 (a) 中的超声 C-扫描结果清晰地再现了焊缝坡口未焊合,如图 3 (a) 中白色箭头所标示的红色区域(注:本文给出的检测结果均为彩色图像)。在 C-扫描图像中每一扫描行对应一个焊缝剖面,为了观察缺陷在整个焊缝断面的分布,可以通过三视投影成像得到焊缝缺陷的三维分布,如图 3 (b)、图 3 (c) 和图 3 (d) 所示。从这些三视投影成像可以清晰地判断缺陷的三维投影分布,如,从图 3 (b) 中的侧视投影成像 P2 可以清晰地看出缺陷在焊缝厚度方向的分布,如图中白色箭头所指示的红色区域。从图 3 (c) 中的俯视投影成像 P3 可以清晰地看出缺陷分布在焊缝的右半部分,如图中白色箭头所指示的红色区域,这表明缺陷位于右侧坡口附近的一侧,这与实际预制的未焊合缺陷位置一致。这一结果也可以从图 3 (d) 正视投影成像 P4 得到验证,如图中白色箭头所指示的红色区域,是对应 C-扫描缺陷区其中所标示位置的一焊缝断面的投影成像,从图中可以清晰地看出,未焊合从根部开始一直扩展到焊缝的中部偏上的部位。从图 3 (d) 中的正视投影成像结果中还可以看出,未焊合主要是通过声波的二次反射检出的。图 3 (e) 中还给出了对应该投影成像断面中对应最大缺陷反射的回波脉冲信号。

## 2 复合材料自动化无损检测技术及其典型应用

随着复合材料在航空航天等重要工业领域的批量装机应用,要求 100% 对复合材料结构进行无损检测,由于复合材料结构尺寸越来越大,例如,一个机身蒙皮的检测,在单通道扫描条件下,可能需要几十个工时;同时复合材料也不断用于重要承力结构和复杂结构,对复合材料质量和可靠性要求越来越高。因此,自

动化无损检测技术在复合材料应用领域有着迫切的需求。与传统金属材料结构的无损检测显著不同的是,复合材料无损检测必须结合复合材料及其结构特点研究针对性的检测方法、检测技术与自动化检测设备,例如,针对目前已经批量装机应用的碳纤维增强树脂基复合材料,要求表面盲区达到 0.125mm,这在常规超声检测中是难以实现的。

复合材料自动化检测技术目前主要是基于超声方法,例如 NASA、Boeing、Lockheed Martin、Airbus 等在复合材料结构制造和生产过程中,针对不同复合材料构件,利用扫描机构设计技术和数控技术,通过专门的技术设计和设备研发,解决复合材料构件的超声自动化无损检测。目前,复合材料超声自动化检测技术可分为超声穿透法和超声反射法两大类。在超声穿透法自动化检测中,利用入射声波在穿过复合材料时能量的衰减变化进行缺陷识别与检测,西方比较青睐超声穿透法,超声换能器分别安装在 2 个对称的多轴扫描机构上,在数控系统作用下,通过运动编程控制,使 2 个探头对被测复合材料构件进行自动扫描检测。采用穿透法检测,对超声换能器和仪器的分辨率和检测盲区要求相对较低,但

需要有很好的同步与扫描控制技术,超声换能器需要从两侧接近工件,超声换能器同步控制和型面跟踪复杂,对于复杂的零件,通常只能采用单通道工作,需要通过提高换能器的扫描速度来改进检测效率。

基于超声反射法的复合材料自动化无损检测技术,利用入射声波在复合材料中传播产生的反射信息进行缺陷识别与评估,欧洲比较青睐这种检测方法,超声换能器安装在多轴扫描机构上,通过运动编程,换能器在数控系统作用下,对被检测复合材料构件进行自动扫描检测。通常复合材料单个铺层厚度约 0.13mm,因此,采用反射法检测,对超声换能器和仪器的分辨率和检测盲区要求较高,检测灵敏度比穿透法高,超声换能器只需要从一侧接近被检测工件、不需要有同步扫描机构,超声换能器型面跟踪要求高,可采用多通道检测,提高检测效率。

针对复合材料及其结构特点,625 所一直在进行超声自动化无损检测技术的研究与应用开发,先后研制成功了不同系列的复合材料超声自动化扫描检测系统,图 4-5 是用于平面类复合材料结构的 MUI-20E 超声自动化无损检测系统。该系统采用超声反射法,一次最大扫描



图4 MUI-20E复合材料结构超声反射法自动化扫描检测系统控制部分

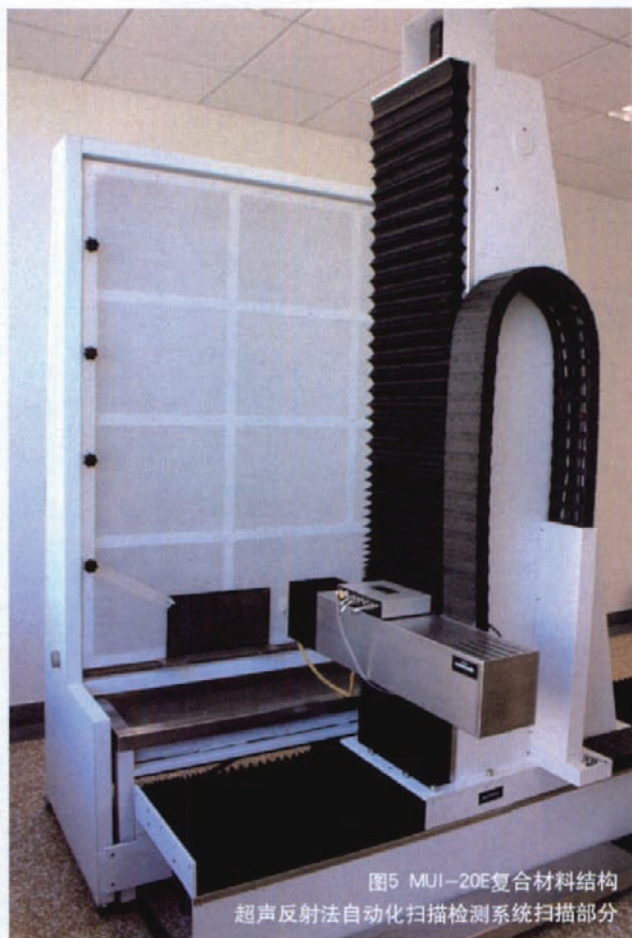


图5 MUI-20E复合材料结构  
超声反射法自动化扫描检测系统扫描部分

面积可达 $1500\text{mm} \times 1500\text{mm}$ , 具有极好的信噪比, 可实现复合材料结构的A、B、C、T自动扫描检测。用于非曲面类复合材料结构的MUI-21超声自动化无损检测系统, 采用超声穿透法和反射法, 一次最大扫描面积可达 $4000\text{mm} \times 2500\text{mm}$ , 具有很好的同步扫描技术, 可实现复合材料结构的B、C、T自动扫描检测。用于大型复合材料结构的超声自动化无损检测系统, 采用超声反射法, 一次最大扫描面积可达 $7500\text{mm} \times 6000\text{mm}$ , 有20个检测通道, 具有独特的扫描跟踪技术, 可实现大型复合材料结构的B、C、T自动扫描检测。此外, 625所还开发了CUS-21复合材料构件复杂部位超声检测系统、CUS-22超声自适应检测设备、CUS-2F复合材料缠绕超声自动检测技术设备等, 为国内复合材料研究和工业应用部门提供

了强有力的技术支持, 在航空型号研制和生产中一直在发挥重要作用。

采用自动化超声检测技术, 可以通过直观的图像方式再现被检测复合材料结构内部缺陷的详细分布和整个结构的内部质量情况, 进行缺陷的量化评估, 如图6所示, 是利用625所的超声自动化检测技术得到的典型RTM复合材料结构冲击损伤的检测结果, 通过评估结果可以直观地得到缺陷的量化分布情况。

### 3 其他自动化无损检测技术及其应用

自动化无损检测技术除了在复合材料和焊接方面得到十分重要和广泛的应用外, 在其他材料、在役设备等方面也得到了越来越多的应用。例如金属管棒板材的超声自动化无损检测技术目前已经在航空航天、电力、核能和交通等重要工业领域的型号研制和产品设计制造中得到重要应用。由于原材料是很多领域从事高新尖产品开发的基础, 将缺陷的检测提前到原材料阶段进行质量把关, 具有非常重要的技术经济意义和作用。由于其批量大、规格多, 往往人工扫描检测困难、易漏检, 因此, 通常需要对具体的被检测对象和应用环境进行设计, 采用合理有效的自动化

无损检测技术。目前主要是采用超声和涡流自动化扫描检测。

### 结束语

自动化无损检测技术已成为现代工业生产和科学研究的重要支撑和保障技术, 研究建立合理有效的自动化无损检测技术, 已经成为工业生产水平发达国家重要的研究课题。

自动化无损检测技术是一门专业依赖性很强的综合技术, 特别是自动化无损检测设备的研发, 需要有成熟的检测方法和丰富的系统经验, 需要结合具体的应用对象进行针对性研究和设计。

我国自动化无损检测技术经过几十年的发展和积累, 有了长足的进展和进步。目前我国自主研发的自动化无损检测技术已经在复合材料、焊接、原材料等方面得到了很好的应用。

实现自动化检测, 不是仅靠盲目地购买国外先进检测设备就能解决的, 必须得结合我国工业化程度、生产的特点、文化内涵等元素, 研究适合自身技术特点的自动化无损检测技术, 开发相应的自动化无损检测技术装备。625所经过几十年的研究和技术积累, 已经有了可喜的进展并积累了丰富的经验。

注: 本文有参考文献7篇, 因篇幅所限, 未能一一列出, 读者如有需要, 请向编辑部索取。

(责编 金卯)

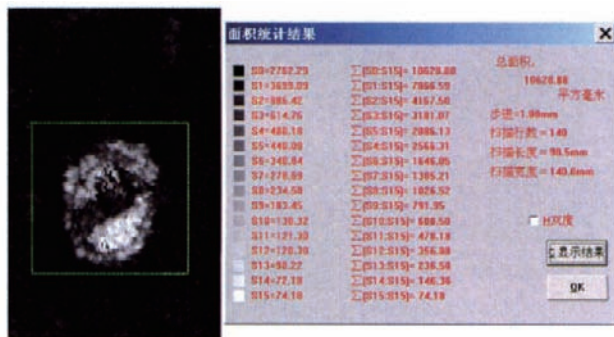


图6 典型的RTM复合材料冲击损伤的超声自动扫描成像检测结果