

# 风电叶片拉挤主梁的超声检测

孙玉明, 陆发青, 彭超义, 冯学斌, 苏世臣, 陈晨, 刘明波

(株洲时代新材料科技股份有限公司, 株洲 412000)

**摘要:** 风电行业正在向大叶型、轻量化方向发展, 复合材料拉挤板材应用愈发广泛。面对拉挤主梁多层板的新结构, 如何检测拉挤主梁层间的灌注缺陷, 成为业内亟待解决的新课题。对风电叶片行业中拉挤板成型主梁的超声检测方法进行研究, 对比了常规超声检测和相控阵超声检测结果, 总结了一套适合现场应用的超声检测方法。

**关键词:** 风电叶片; 拉挤主梁; 超声检测; 相控阵超声检测

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2022)12-0031-06

## Ultrasonic testing of pultruded main beam of wind turbine blade

SUN Yuming, LU Faqing, PENG Chaoyi, FENG Xuebin, SU Shichen, CHEN Chen, LIU Mingbo

(Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

**Abstract:** With the development trend of large-leaf and lightweight in the wind power industry, composite extrusion plates have been widely used. In the face of the new structure of the multi-layer plate of the pultruded main beam, how to detect the perfusion defect between the pultruded main beam has become a new problem that nondestructive testing technicians need to solve. The ultrasonic detection method of the forming main beam of the extrusion plate in the wind power blade industry is studied. The results of conventional ultrasonic detection and phased array ultrasonic detection are compared, and a set of ultrasonic detection methods suitable for field use are summarised.

**Key words:** wind turbine blade; pultruded main beam; ultrasonic testing; phased array ultrasonic testing

近年来, 随着风电行业相关产业技术的不断升级, 风电叶片的长度越来越长, 许多国内叶片厂家涉足长度超 100 m 叶片的制造。在此背景下, 迫切需要控制叶片的重量, 进行轻量化设计。采用拉挤板材制作主梁来降低叶片重量, 提高叶片强度, 以获得更优异的发电效率是行业的发展趋势。风电叶片行业常用的拉挤板材按增强材料区分主要有玻纤(玻璃纤维)拉挤板和碳纤维拉挤板。两种拉挤板材性能均较为优异, 但玻纤拉挤板在成本方面更具有优势, 近年来应用越来越广泛。

---

收稿日期: 2022-10-31

基金项目: 湖南省科技创新计划资助项目(2020RC4037)

作者简介: 孙玉明(1988—), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事质量管理和无损检测方面的研究工作

通信作者: 孙玉明, sunyuming0414@163.com

## 1 风电叶片拉挤主梁

### 1.1 拉挤板材的基本特性

玻纤拉挤板是(见图 1)一种连续纤维增强热固性材料, 采用传统的拉挤成型工艺制备而成, 包含基体树脂和增强材料等成分(树脂主要有环氧树脂、聚氨酯等类型, 增强材料主要为不同配方、不同拉伸模量的玻璃纤维), 主要应用于风电行业叶片主梁结构部件的制造。玻纤拉挤板可以根据实际的使用需求来切割长度, 厚度多为 5 mm, 宽度有 120, 141 mm 等规格, 厚度和宽度均可定制化供应。玻纤拉挤板材主要有以下几个特点: ① 高强度、高模量; ② 耐腐蚀; ③ 高体积含量; ④ 低孔隙率; ⑤ 纱线排列直线度高。

### 1.2 拉挤板成型主梁特性

风电叶片主梁制作的传统方式是先将玻纤丝编



(a) 成卷的拉挤板



(b) 开卷后的拉挤板

图 1 玻纤拉挤板实物

织成玻纤布,再铺设保压,最后灌注树脂成型,但该编织工艺不能完全发挥纤维的材料性能,因此近年来行业内都在探索拉挤成型工艺,并以此来制作风电叶片主梁。常见方法为先采用拉挤工艺制作标准尺寸的拉挤板材,然后在主梁模具中铺设拉挤板材(铺设截面见图 2),再通过真空灌注把拼装堆垛的拉挤板材黏接起来形成主梁(主梁截面见图 3),最后将主梁用于叶片壳体制作。但这种方法受拉挤板材铺设作业、灌注工艺及生产环境等影响,极易在拉挤板材层间出现灌注质量问题(主梁层间灌注缺陷示例见图 4)。

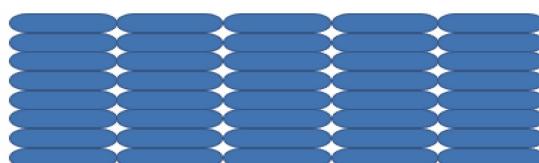


图 2 拉挤板材铺设截面示意

针对拉挤板成型后主梁层间灌注缺陷的检测,目前已知的最有效,最快捷的检测手段是超声无损检测。行业中常用的拉挤板材有玻纤拉挤板材和碳纤维拉挤板材,笔者以玻纤拉挤板成型主梁为对象



图 3 拉挤板材主梁截面示意

进行研究,使用的技术和方法同样适用于碳纤维拉挤板成型主梁。

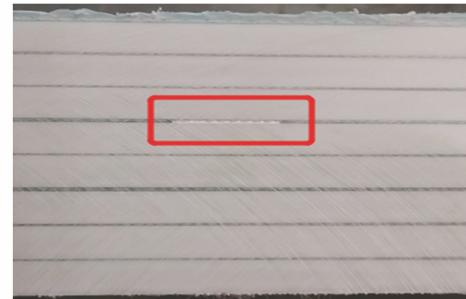


图 4 主梁层间灌注缺陷示例

## 2 拉挤主梁的常规超声检测

采用常规超声检测对拉挤板主梁进行无损检测,检测设备为 Olympus Epoch 650 型检测仪,配合 Olympus V101(0.5 MHz)/V102(1 MHz)型直探头,以水为耦合剂,采用直接接触法检测。检测前需使用相同结构、工艺预制的阶梯试块完成检测设备零点和声速的校准。

### 2.1 拉挤板堆垛区域检测

将探头置于主梁拉挤板材堆垛区域时,仪器显示界面可以清晰显示出 8 层拉挤板材的界面回波(见图 5)。以拉挤板材堆垛区域无缺陷完好部位的底波来进行灵敏度调节,将底波调整到屏幕满刻度的 80%,并以此作为检测灵敏度。使用半波高度法(6 dB 法)进行缺陷定量,通过观察各层拉挤板材界面回波的波幅变化来确定缺陷的深度。但该方法存在如下缺点:① 对检测人员技能和经验要求较高,检测过程中操作人员需要时时关注各个界面回波波幅的变化;② 检测所用探头直径为 25.4 mm,待检区域尺寸一般为 90 m×0.6 m(长×宽),检测操作时还需要考虑区域搭接,检测工作量过大,手动检测效率低,不适用于现场产品的批量检测。

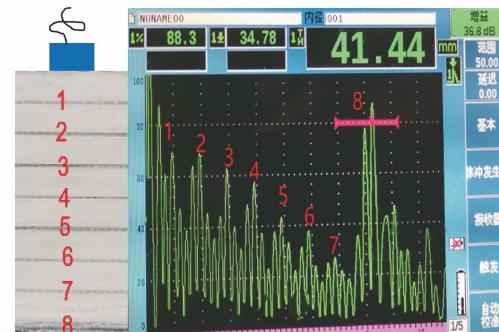


图 5 拉挤主梁堆垛区域检测回波示意

## 2.2 拉挤板拼接缝区域检测

将探头置于拉挤板材拼接缝区域, 仪器显示界面出现了回波信号丢失的现象(见图 6), 此现象可以用波的衍射现象解释。拉挤板材主梁中声速约为  $3400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 探头频率为 1 MHz, 根据波长公式计算得到其波长约为 3.4 mm, 而拼接缝的间隙基本为 1~3 mm, 满足发生明显衍射现象的条件。故此区域发生衍射现象后, 底面反射回波减少, 因此出现了底波信号丢失的现象。因为每层拉挤板材的拼接缝均会产生衍射现象, 所以直探头检测时拼接缝区域的灌注缺陷很容易漏检。可以通过研制定制的带角度探头以及改变探头频率, 对拼接缝区域的缺陷检测进行深入研究。

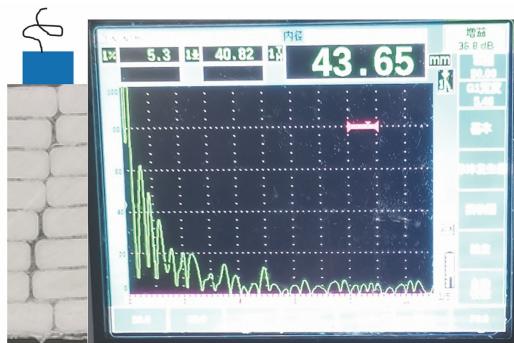


图 6 拉挤主梁拼接缝区域检测回波示意

## 3 拉挤主梁的相控阵超声检测

采用相控阵超声对拉挤板主梁进行无损检测, 手动扫查时采用 Olympus OmniScan SX/MX2/X3 检测仪, 配合 Olympus 0.5L64 (0.5 MHz)/1L64 (1 MHz)型复合材料相控阵探头以及单轴迷你编码器(见图 7)。批量检测时可使用半自动扫查系统(见图8), 以提高检测效率。同样以水作为耦合剂, 使

用直接接触法(探头表面需贴探头膜减少磨损)进行检测, 检测前需使用相同结构、工艺预制的阶梯试块完成检测设备零点和声速的校准。



图 7 相控阵超声检测设备实物



图 8 相控阵超声半自动扫查系统

### 3.1 拉挤板堆垛区域检测

将探头置于拉挤板材堆垛区域, 仪器可以清晰显示出各层拉挤板材的界面回波, 以堆垛区域无缺陷完好部位底波来进行灵敏度调节, 将底波调整到屏幕满刻度的 80%, 并以此作为检测灵敏度。调用两个闸门, 分别套住底面回波和各界面回波。通过手动 TCG(时间校正增益)设置, 调节底波前各界面回波波幅(建议各界面回波不超过屏幕满刻度的 40%), 底波之后的杂波可使用手动 TCG 调节降至最低, 拉挤板材主梁相控阵超声检测基础图像如图 9 所示。

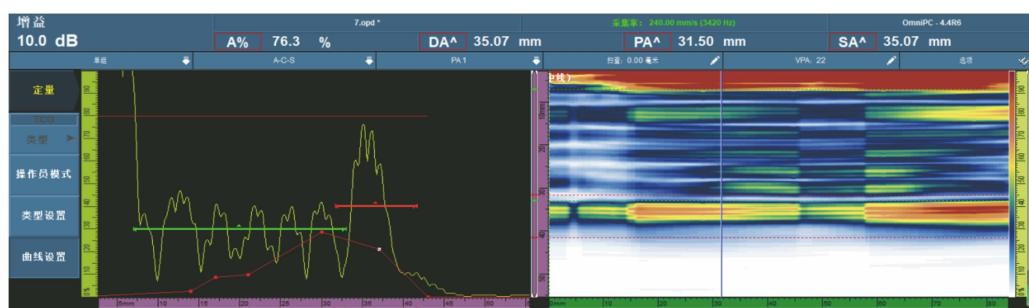


图 9 拉挤主梁相控阵超声检测基础图像

检测过程中, 底面回波以不超过满屏刻度为宜(建议波幅控制在满屏刻度的 60%~80%)。若出现超出满屏情况, 可适当降低增益, 或者后期在数据分析时使用软件增益功能将底波增高至满屏刻度

80%。当遇到层间灌注缺陷时, 可在相控阵检测仪显示器 D 扫图中看到明显的缺陷显示(见图 10), 待完成整个检测面的扫查后, 将数据拷贝至计算机, 使用数据分析软件进行数据判读。

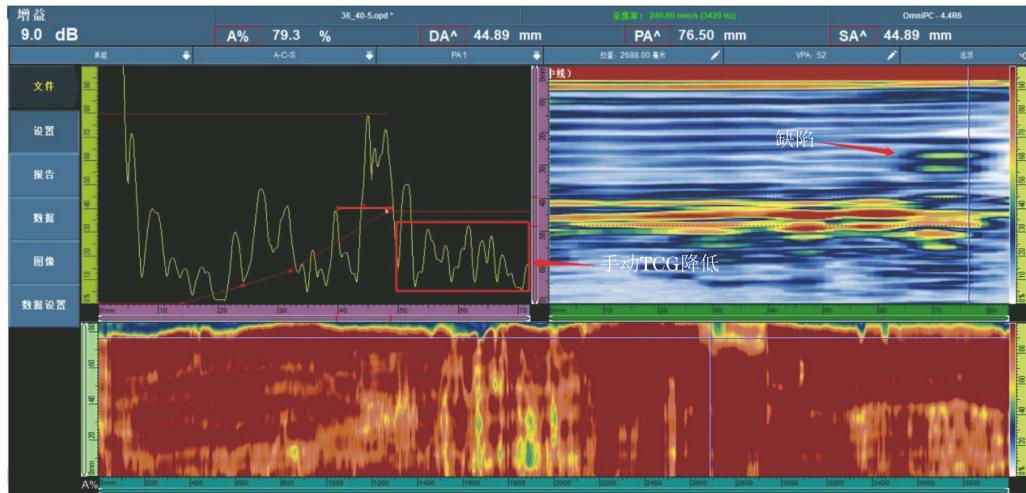


图 10 拉挤主梁灌注缺陷显示

为方便检测数据的分析, 推荐使用 Olympus TomoView 软件进行数据分析, 可在 B 扫图中测量缺陷长度, 在 D 扫图中测量缺陷宽度, 结合 A 扫图, 可使用半波高度法(6 dB 法)进行缺陷定量。

### 3.2 拉挤板拼接缝区域检测

当将探头置于拉挤板材拼接缝区域时, 同样

受到衍射现象的影响, 可以从 C 扫图以及 D 扫图中清晰发现衍射现象的影响区(见图 11)。利用软件的测量线和参考线可以读取衍射现象影响区的宽度。因此, 在使用相控阵检测技术检测拉挤板材主梁拼接缝区域时, 灌注缺陷也很容易漏检。

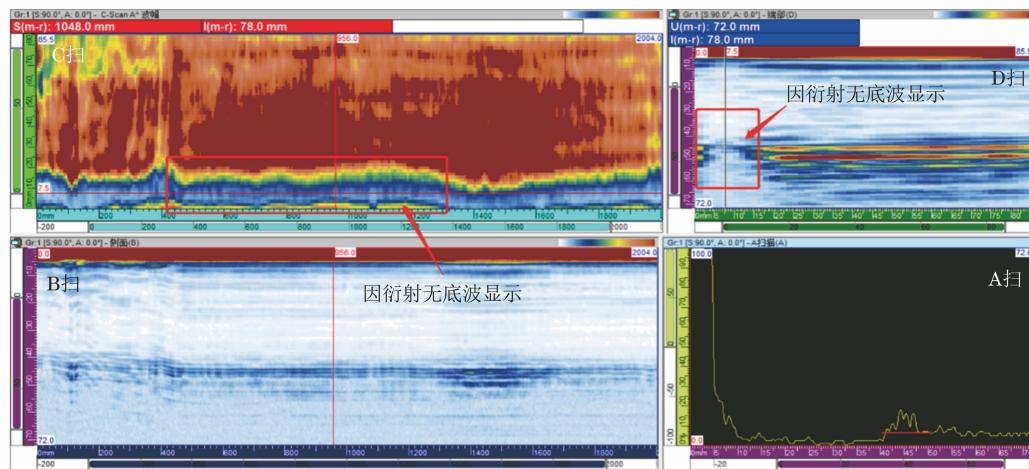


图 11 主梁拼接缝区域的相控阵超声检测图像

## 4 拉挤主梁相控阵超声检测现场应用

通过以上研究可知, 针对拉挤板成型主梁的超声检测, 推荐使用相控阵超声检测技术。该方法可以快速、有效地检测出拉挤板材层间缺陷, 结合相控阵数据分析软件, 可以较准确地对缺陷进行定量和定位。但对于拼接缝区域的黏接情况, 受衍射现象影响, 超声检测暂时没有很好的办法解决这个问题, 但可以在生产过程中对拼接缝区域每层拉挤板材对接间隙加以控制, 通过制程管控, 降低拼接缝区域产生缺陷的几率。

目前, 国内叶片厂商主要采用以下两种方式将

拉挤板成型主梁制成叶片壳体。第一种是在主梁模具中先制作主梁, 再将拉挤板成型主梁随壳体材料一同铺层、灌注, 最终制成叶片壳体。第二种是直接将拉挤板材铺放在叶片壳体模具中, 将拉挤板材随壳体材料一同铺层、灌注, 最终制成叶片壳体。考虑到叶片整体成型周期的要求, 未来可能主要使用第二种方式进行成型。但随之而来的检测难点是, 拉挤板材直接铺层在壳体模具内, 缺少了主梁模具挡边的约束, 拉挤板材拼接缝的间隙会放大, 使得整体的拼接缝影响区域变宽, “检测盲区”增大。第一种成型方式拼接缝影响区域为 10 mm 左右, 而第二种成型方式拼接缝影响区域会增大到 20~30 mm。

此时需要技术人员重新评估检测盲区内存在缺陷的概率,并在制程中对拼接缝间隙进行管控。

风电叶片的壳体是由结构胶将腹板与 PS 壳体和 SS 面壳体黏接而成的,结合部位是腹板和壳体上主梁区域的黏接结构,叶片截面如图 12 所示。腹板与拉挤板成型主梁的黏接结构如图 13 所示,该结构同样可以使用相控阵超声检测技术进行检测。

当使用相控阵超声检测技术检测腹板和主梁黏接情况时,以黏接完好无缺陷的腹板底波来进行灵敏度调节,将底波调整到屏幕满刻度的 80%,并以此作为检测灵敏度。调用两个闸门,分别套住腹板回波和各主梁界面回波。通过手动 TCG 调节,可以提高或降低各界面回波波幅(建议各主梁界面回波不超过屏幕满刻度的 30%,腹板回波在屏幕满刻度的 60%左右,数据分析时使用软件增益功能将腹

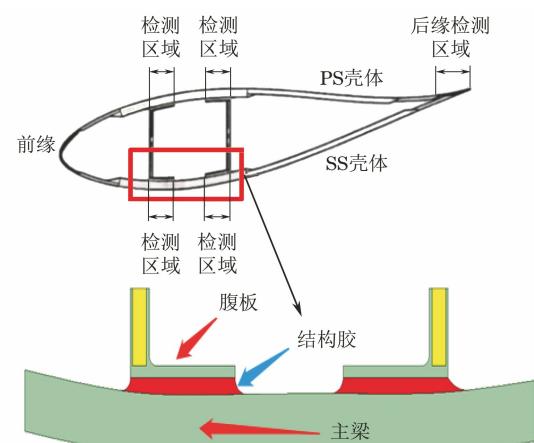
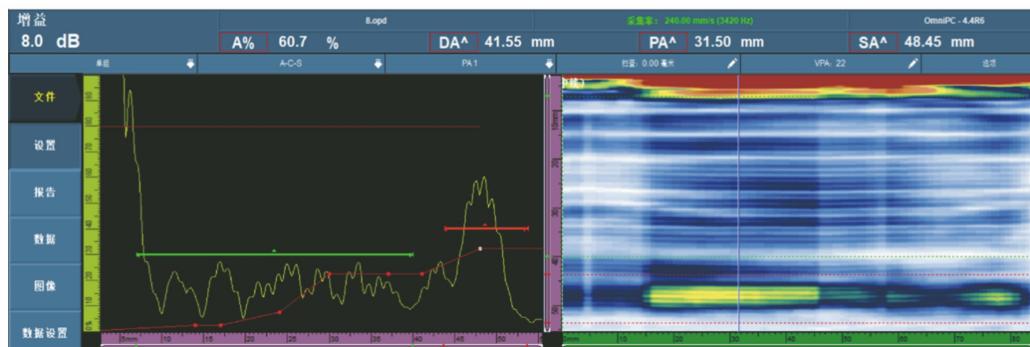


图 12 叶片截面示意

板底波增高至满屏刻度 80%),腹板底波之后的杂波可使用手动 TCG 降至最低,腹板与拉挤板材主梁黏接拼接缝区域相控阵超声信号如图 14 所示。



图 13 腹板与拉挤板成型主梁的黏接结构示意



(a) 基础图像

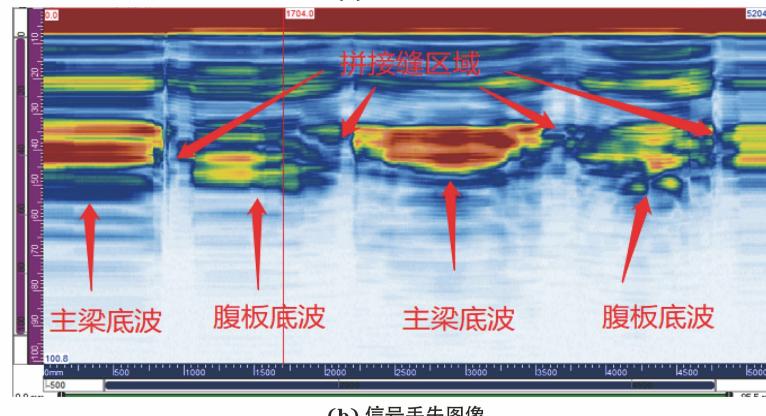


图 14 腹板与拉挤主梁黏接拼接缝区域相控阵超声信号

需要注意的是,该结构同样会受到拉挤板材拼接缝衍射现象的影响,无法显示出拼接缝影响区域的腹板底波(拼接缝区域无回波信号),腹板与主梁黏接的拼接缝区域同样存在检测盲区问题[腹板与拉挤板材主梁黏接拼接缝区域信号丢失图像见图14(b)],故还需要开发其他检测方法对其实施有效检测。

## 5 结语

对风电叶片行业中拉挤板成型主梁的超声检测

(上接第20页)

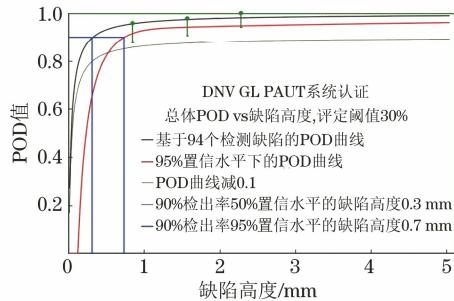


图8 30%评定阈值条件下的POD评定曲线

检出率条件下,可靠检出的缺陷高度为0.7 mm,满足标准要求,该PAUT检测工艺可使用DNV标准中经验验收标准进行缺陷质量验收。

## 4 结语

试验结果表明,PAUT可有效检测出不同位置

进行了研究,对比了常规超声检测和相控阵超声检测结果,总结了一套适合现场应用的超声检测方法。该方法可为风电叶片产品的可靠性提供支撑,为拉挤板成型主梁的推广应用提供一定保障。

本文获“2022 Evident 杯超声检测技术优秀论文评选”活动优胜奖。

焊接缺陷,当评定阈值为30%时,95%置信水平,90%检出率条件下,可检出的缺陷最小尺寸为0.7 mm,5%机率漏检的最小缺陷尺寸为0.9 mm,满足标准要求。

经评定后的PAUT检测工艺可应用于海底管道铺设过程的无损检测,使用DNV标准经验验收标准进行焊缝质量验收,可替代传统的射线检测,大幅提升现场检测效率,规避潜在辐射危害,同时,可为海底管道的PAUT工艺认证提供一些经验与借鉴。

本文获“2022 Evident 杯超声检测技术优秀论文评选”活动三等奖。

## 参考文献:

[1] 黄晶. 超声相控阵理论及其在海洋平台结构焊缝缺陷检测中的应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2005.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告