

# 试析悬索桥钢箱梁疲劳裂纹深度检测方法

窦怡川<sup>1</sup> 孙亚泽<sup>2</sup>

1. 安徽省高速公路试验检测科研中心有限公司; 2. 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司

**摘要:**为解决悬索桥箱梁疲劳裂纹检测环节存在的精度不足、定位困难问题,规避由此引发的检测结果可靠性下降困境,保障悬索桥钢箱梁使用寿命的延长,文章进行了深入系统分析。先简要介绍试验设计思路,然后对裂纹特征检测结果、开裂位置检测结果进行归纳梳理。由试验总结出了一套针对钢箱梁疲劳裂纹长度、宽度、深度、倾斜角度等指标的综合性超声波深度检测方法,希望能为悬索桥钢箱梁运维管理提供借鉴。

**关键词:**悬索桥; 钢箱梁; 疲劳裂纹; 深度检测

**【DOI】** 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.08.048

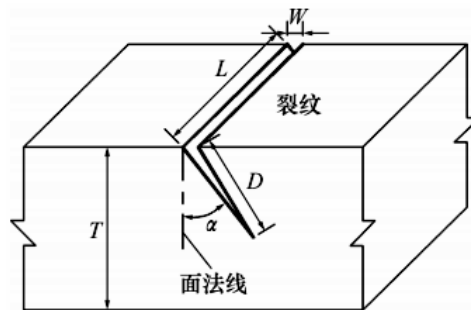


图1 钢箱梁裂纹特征模拟示意图

## 引言

钢箱梁又称钢板箱形梁,具有抗扭强度高、施工便捷快速等鲜明优势,在我国大跨径悬索桥项目中得到了广泛青睐。现阶段国内各悬索桥服役时间增加,桥体面临的交通负载和压力明显上升,如何提高悬索桥钢箱梁疲劳裂纹深度检测精度,如何精确获取疲劳裂纹的分布情况及发展趋势,成了诸多桥梁运维管理者关注的焦点问题,有必要进行系统专项研究。

### 一、试验设计

无损检测是当前悬索桥钢箱梁疲劳裂纹检测工作中较为常用的方法,渗透检测、磁粉检测、涡流检测等均是代表性手段。其中磁粉法检测范围大、效率高,但仅限于表层裂纹的检测,在深度检测项目中表现欠佳;涡流、射线检测法虽然能够满足深度检测需求,但重复性表现不好,容易受到多重因素的干扰与影响。基于此,本次试验设计时重点关注了超声波检测可用性,设置了多种特征裂纹试件,建立多指标、系统化的检测方法体系,希望能为悬索桥钢箱梁疲劳裂纹检测工作提供参考。试验所使用的钢材为Q345q,使用CO<sub>2</sub>保护焊焊接方式,借助电火花线切割加工技术模拟疲劳裂缝病害,模拟情况可见图1。其中W为裂纹宽度,不同组别的试验值分别定为0.10mm、0.15mm和0.20mm;L为裂纹长度,不同组别试验值为15mm、30mm以及40mm;D为裂纹深度,不同组别试验值为4mm、6mm和8mm;T为板厚,不同组别试验值为6mm和15mm;α为裂纹角度,试验值设定为0°、30°和45°。使用超声波检测技术展开分析,设备为SH650数字超声波探伤仪,厂家为北京时代四合科技有限公司。仪器工作频率为0.5~10MHz,声速范围为1000~15000m/s,垂直线性误差及水平线性误差分别小于3.0%和2.0%,配置4P8×12K2.5斜探头。试验开始前,按照说明书对仪器进行了调试运行,校准探头并涂抹CG-98耦合剂,将探头前沿参数设置为9.0mm,声束偏斜角设定为1°,下面对具体的试验结果进行阐述和分析。

## 二、裂纹特征检测结果

### (一) 裂纹长度

裂纹长度检测环节,主要使用了绝对灵敏法,按照前述方法设置12组面板切割裂纹及焊缝切割裂纹,模拟悬索桥钢箱梁长期运行后出现的疲劳裂纹病害,使用探头对准裂纹边缘,并计算返回声压。从数学模型上看,这种返回声压共由两步分组成,即裂纹边界返回声压 $P_{B1}$ 和裂纹内部返回声压 $P_{B2}$ ,带入计算后发现,返回声压 $P_B$ 和入射声压 $P$ 之间实际上存在 $P_B=3/8P$ 的关系,再加上超声波检测中,返回声压 $P_B$ 与回波高度比例 $H$ 存在正相关关系<sup>[1]</sup>,因此可以知晓,超声波应用于裂纹边缘检测时,所产生的回波高度比例是相对较小的,比裂纹内部回波高度比例低3/8,可以据此判定疲劳应力发生情况。在此基础上选择几个裂纹长度规格不同的试件,按照设计要求进行超声波检测,对应定位缺陷最高回波。发现回波异常后及时调节灵敏度参数,确保最高回波高度比例稳定在70%左右,此时观察边缘回波高度比例,做好实时记录工作。从分析结果上看,探头处于不同探测位置时,超声波回波高度比例变化是较为明显的,其中中部区域的回波高度比例最高,上边缘、下边缘相对较低,当探头移动到裂纹边缘时,回波高度比例会降低到谷值,探头一旦越过裂纹边缘,回波立刻消失。深入分析不同位置的数据记录后发现,最高回波、最低回波之间是存在一定关系的,高度差大约在1/3左右(见图2),为方便后期计算和分析检测,这里直接取近似值1/3,将其作为悬索桥疲劳裂纹边缘部位的判定标准,当同一轴线上的超声波返回声压出现该种特质时,即判定为裂纹边缘。以该方法为指引进行多次验证试验,发现检测结果表现好,相对误差可以控制在5%以内,能够悬索桥钢箱梁疲劳裂纹检测需求。

### (二) 裂纹宽度

裂纹宽度同样是悬索桥钢箱梁疲劳裂纹检测的重点指标之一,检测时采用了当量法。当量法评估裂缝尺寸的思路较为多样,通常包含试块比较法、计算法和AVG曲线法,本次使用计算方法,先借助公式计算出规则反

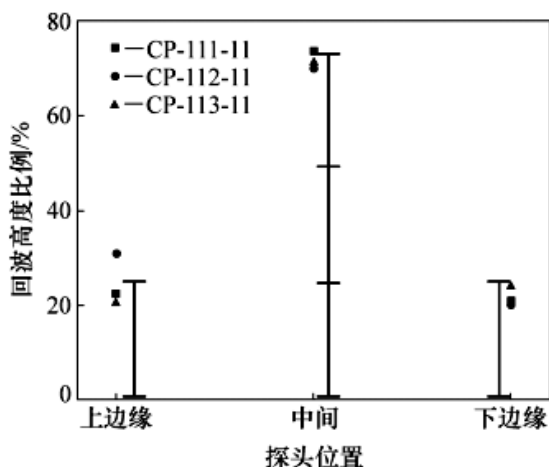


图2 探头处于不同位置时超声波返回声压高度比例曲线图

射体理论回波声压，然后推算出缺陷的当量尺寸。计算方法为：

$$P_{\phi} = P \times \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\phi}{2X}}$$

$$\phi = 2X \times \left( \frac{2P_{\phi}}{P} \right)^2$$

其中  $P_{\phi}$  为返回声压； $P$  为入射声压； $X$  为水平距离； $\phi$  为裂纹当量。选定3条宽度不同的模拟疲劳裂纹，分别命名为A1、B1、C1三组，三组使用的入射声压一致。对其回波高度比例进行分析和对比，并计算得出不同的裂纹当量，结果发现A组回波高度比例为47%，水平距离为21.79mm，计算得到的裂纹当量参数为173.32mm。B组回波高度比例为60%，水平距离为21.67mm，计算得到的裂纹当量参数为282.51mm。C组三项参数分别为69.5%、21.82mm和380.71mm，将收集到的结果数据进行比较分析，发现其当量比为1:1.6:2.2。测得三个组别的实际裂纹宽度，通过进行比例计算，结果为1:1.5:2.0，两比例较为接近，进一步验证了超声波当量法测量疲劳裂纹宽度的可行性。不过，当量法推算裂纹宽度时，结果精确度与计算精确度存在较大关联<sup>[2]</sup>，实践应用环节要做好质量把控，引入自动化技术提高处理速度和可靠性。

### (三) 裂纹深度及水平位置

考虑到钢箱梁本身的构造较为特殊，疲劳裂纹分布位置也难有规律可循，实际测量环节经常会处于各种难测区域，因此试验中模拟现实情境，采用了单探头方法。单探头探伤时，返回的参数主要包含三类，即水平距离 $X$ 、指示深度 $Y$ ，以及声程 $S$ ，其中指示深度 $Y$ 即为裂纹深度。具体操作环节，可用的探伤方法又分为直射法、一次反射法，为验证两者的使用效果，本次选定同一条裂纹作为被试，分别使用两种技术进行检测，试验结果可见图3。从图中可以发现，直射法缺陷回波的波峰表现更加明显，回波高度比例相对较高，可以较好地降低判断识别难度，因此常规情况下，推荐优先使用直射法检测悬索桥钢箱梁疲劳裂纹。但直射法也存在一定局限性，特殊部位比如U肋与顶板连接部位焊缝检测

时，直射法很难保证精确性，此时更推荐一次反射法。在确定应用场景、技术方向的基础上，本次还设计了裂纹深度检测比较试验，选定不同深度的裂纹试件，分别使用两种方式进行检测，并记录检测结果。发现直射法测量条件下，测得的裂纹深度值往往偏大，而一次反射法测得值往往偏小。分析后认为，这种情况的发生与超声波束特性有关，由于波束具有扩散角，在实际传递过程中可能会受到各种障碍物的反射，因此最高回波未必是裂纹尖端，且近场区条件下，一次反射法的检测受限程度通常要比直射法小<sup>[3]</sup>。本次将两种方法测得的裂纹深度值相加，计算出平均数，结果发现其与实际测量值不相上下，说明结果与实际吻合良好。因此在悬索桥钢箱梁疲劳裂纹的检测工作中，提倡使用直射法、一次反射法同时检测，并计算出平均数作为检测结果值，以提高检测判定的精确性。

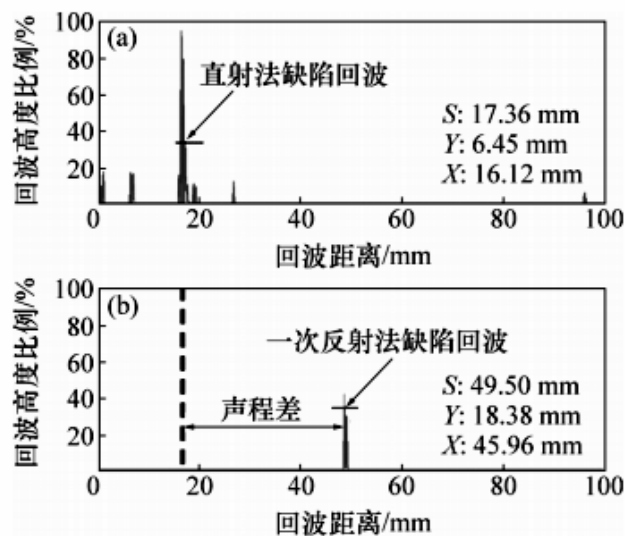


图3 裂纹深度检测结果示意图

### (四) 裂纹角度

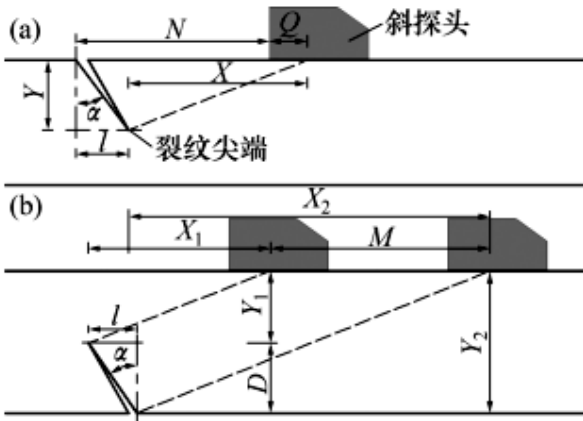
本次设计了多组别裂纹角度检测试验，最后确定检测方案如下：先观察悬索桥钢箱梁疲劳裂缝形式，判定其为可见裂纹还是隐蔽裂纹，然后选定探头并涂抹界面剂，按照图4所示操作探头进行探伤。图中， $N$ 为探头前端与可见裂纹边缘的距离； $Q$ 为探头前沿； $l$ 为裂纹水平投影长度； $X_1$ 和 $X_2$ 分别为探头在裂纹尖端、裂纹开口时的指示水平距离； $Y_1$ 和 $Y_2$ 则为两种状态下的指示深度。探伤过程中持续收集超声波回馈信息，并按照下式进行裂纹角度计算（其中 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 分别为可见裂纹角度和隐蔽裂纹角度）：

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{N+Q-X}{Y}\right)$$

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{X_1+M_1-X_2}{Y_2-Y_1}\right)$$

本次选取5个角度不同的疲劳裂纹试件进行检测试验，不同组别分别命名为A2、B2、C2、D2、E2，分别收集其超声波检测结果，计算倾斜角度值。结果发现A2~D2组的计算结果精度较高，与实际测量值相接近，

误差可以控制在±10°之内，但E2组别的裂纹倾斜角度检测结果精度较差，与实际值相差达到了21°，判定结果并不理想。经过分析发现，这种情况的发生主要是因为E2组的裂纹倾斜角度较大，超声波检测环节，声束无法在裂纹尖端形成良好反射，再加上该组别裂纹垂直深度较小，难以满足检测距离需求<sup>[4]</sup>，进而导致了检测精度过低的问题，实践中要加以注意，适当配合其他无损检测技术进行验证分析。



(a) 可见裂纹角度检测；(b) 隐蔽裂纹角度检测

图4 疲劳裂纹角度判定方法

### 三、开裂位置检测结果

#### (一) 检测方法

在疲劳裂纹的检测过程中，开裂位置的检测判断是十分关键的，能够为后续的结构分析、养护管理提供依据。考虑到悬索桥钢箱梁结构中，U肋和面板之间最容易出现裂纹，且裂纹的具体形式较为多样，位置确定难度较大，因此设计了6种类型的裂纹模拟试件，使用直射法、一次反射法等展开研究，裂纹模拟情况可见图5，其中序号(a)~(f)为不同裂纹形式编号，虚线部分为探头探测方向。其中(a)、(b)、(c)三组裂纹开裂结构较为简单，方向较为垂直，直接使用直射法或者一次反射法即可；(d)和(e)组的开裂方向接近水平，使用常规探测方法时回波收集较为困难，因此调整了检测方案，决定从U肋处检测，同样使用一次反射法。(f)组的裂纹情况较为理想，相对于U肋来说几近垂直，因此可以使用直射法进行检测。将收集到的回波数据进行整合、筛选，并绘制成可视化的裂纹回波参数点阵图，分析其参数点分布状况。结果发现，(a)、(b)、(c)三组中，回波参数点的位置是比较接近的，再加上裂纹本身的起裂位置较为接近，因此很难直接完成区分。而(d)、(e)、(f)组回波参数点较为分散，区分难度较低。

#### (二) 开裂位置判别

从前述分析中可以得知，使用超声波技术进行疲劳裂纹位置判定时，会受到裂纹形式、裂纹分布间距等因素的影响，可能会造成判定失误问题，因此实际操作过程中，还需要采取一定的判别修正措施。修正对象主要为距离间隔较小、区分难度较高的(a)、(b)、

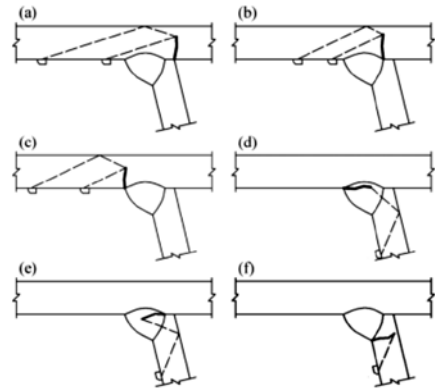


图5 U肋疲劳裂纹模拟情况

(c)组别。实践中应当细致分析不同组别之间的差异，并对应确定区分方向，本次使用的区分方案如下：先测得探头前端与焊趾之间的距离Z，然后推算出裂纹与焊趾之间的距离K，将之与U肋和顶板之间的焊缝高度 $h_f$ 进行比较，当K值大于 $h_f$ 时，判定为裂纹(c)；当K值约等于 $h_f$ 时，判定为裂纹(b)；当K值小于 $h_f$ 时，判定为裂纹(a)，其中K的计算方法为：

$$K = X - Z - Q$$

在理论分析基础上再次进行了试验验证，结果发现判定结果与实际情况高度相符，较好地解决了(a)、(b)、(c)三组裂纹位置识别困难的问题，提高了超声波检测适用性，实践中可以根据裂纹形式、裂纹状态等设计K法实施方案，降低判别难度的同时保证识别检测结果的精确性<sup>[5]</sup>。

#### 结论

综上所述，悬索桥钢箱梁疲劳裂缝隐蔽性较强，技术把控不当很容易带来检测精度下降、状态评估失误等状况，实践中务必要给予充分重视。要积极利用超声波1/3测长法定位裂纹边缘位置，借助当量科学分析裂纹宽度状况，同时融合一次反射法对检测结果进行修正。在此基础上探索裂纹倾斜角、特殊部位疲劳裂纹的检测技术要点，做好不同裂纹形式的差异化检测方案设计工作，灵活运用K值进行裂纹位置的识别判定，最大限度提高检测结果可靠性，为悬索桥钢箱梁安全评估及运维管理提供可靠依据。

#### 参考文献

- [1] 孟林, 杨辉. 悬索桥钢箱梁焊缝开裂发展规律分析[J]. 机电信息, 2022(16): 54-57.
- [2] 梁柱. 跨江悬索桥钢箱梁应变监测及疲劳分析[J]. 工程与建设, 2020, 34(05): 863-866.
- [3] 雷步虎. 大跨度桥梁钢箱梁疲劳裂纹特征分析及检测技术研究[J]. 现代物业(中旬刊), 2020(02): 42-43.
- [4] 张中平, 郑舟军. 钢箱梁U肋嵌补段疲劳开裂机理与养护措施研究[J]. 世界桥梁, 2020, 48(01): 53-58.
- [5] 仇潞, 龙进军, 刘强. 钢箱梁焊缝疲劳裂纹原因分析与维护技术研究[J]. 中国设备工程, 2020(02): 63-64.