

公路桥梁钢箱梁疲劳裂纹检测、评定 与维护规范

Code for fatigue crack inspection, evaluation and maintenance of steel
box girder in highway bridges

2019-09-19 发布

2019-10-31 实施

江苏省市场监督管理局 发布

目 次

前 言..... II

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 基本规定..... 2

5 钢箱梁典型疲劳开裂部位与特征..... 3

6 疲劳裂纹编码..... 5

7 检测..... 5

8 评定..... 9

9 维护..... 10

10 质量验收..... 17

附录 A（资料性附录） 钢箱梁疲劳开裂典型案例..... 18

附录 B（资料性附录） 江阴大桥钢箱梁疲劳裂纹编码案例..... 20

附录 C（规范性附录） 钢箱梁疲劳裂纹检测结果记录表..... 22

附录 D（资料性附录） 典型部位磁轭检测方法..... 23

附录 E（规范性附录） 疲劳裂纹跟踪记录表..... 24

附录 F（规范性附录） 钢箱梁疲劳裂纹维护记录表..... 25

附录 G（资料性附录） 合格的气动冲击法维护处理表面..... 26

附录 H（资料性附录） 疲劳裂纹补焊法维护施焊流程..... 27

前 言

本标准按国标 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由江苏省交通运输厅提出并归口。

本标准主要起草单位：江苏扬子江高速通道管理有限公司、河海大学、江苏高速公路工程养护技术有限公司、江苏省交通运输综合行政执法监督局。

本标准主要起草人：吉伯海、吉林、饶建辉、姜竹生、袁周致远、陈雄飞、汪锋、傅中秋、孙洪滨。

公路桥梁钢箱梁疲劳裂纹检测、评定与维护规范

1 范围

本标准规定了公路桥梁钢箱梁疲劳裂纹检测、评定与维护的术语和定义、基本规定、典型疲劳开裂部位，以及疲劳裂纹编码、检测、评定、维护、验收等内容。
本标准适用于公路桥梁。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 714	桥梁用结构钢
GB/T 8118	电弧焊机通用技术条件
GB/T 9445	无损检测 人员资格鉴定与认证
GB/T 15822.1	无损检测 磁粉检测 第1部分：总则
GB/T 15822.2	无损检测 磁粉检测 第2部分：检测介质
GB/T 15822.3	无损检测 磁粉检测 第3部分：设备
GB/T 18851.1	无损检测 渗透检测 第1部分：总则
GB/T 18851.2	无损检测 渗透检测 第2部分：渗透材料的检验
GB/T 20967	无损检测 目视检测 总则
JG/T 203	钢结构超声波探伤及质量分级法
JB/T 7108	碳弧气刨机

3 术语和定义

3.1

疲劳裂纹 fatigue crack

构件在动荷载下，在某点或某些点产生局部损伤，并在一定时间后形成的裂纹。本规程所指裂纹均为疲劳裂纹。

3.2

疲劳裂纹源 fatigue crack source
疲劳裂纹萌生位置。

3.3

表面裂纹 surface crack
构件表面形成的肉眼可见的疲劳裂纹。

3.4

内部裂纹 internal crack
构件内部形成的肉眼不可见的疲劳裂纹。

3.5

疲劳裂纹尖端 fatigue crack tip
疲劳裂纹的前缘位置。

3.6

应力强度因子 stress intensity factor
反映裂纹尖端弹性应力场强弱的物理量。

3.7

气动冲击法 pneumatic impact treatment
通过对裂纹表面部位进行冲击，在裂纹表面部位附近产生塑性变形，使裂纹表面产生接触闭合的一种维护方法。

3.8

钻孔法 drilling hole method
采用在裂纹尖端附近打孔的方式，消除裂纹尖端的应力集中，阻止裂纹扩展的一种临时性措施。钻孔位置的选择由孔的圆心与疲劳裂纹尖端之间的距离确定。

3.9

补焊法 weld repairing
采用碳弧气刨、风铲等手段将裂纹边缘加工出坡口直至裂纹尖端，刨除裂纹，然后用焊接的方法填充坡口使之形成整体。

4 基本规定

- 4.1 钢箱梁疲劳裂纹开展的养护工作包括疲劳裂纹检测、评定与维护。
- 4.2 应对钢箱梁疲劳裂纹养护开展的工作制定有针对性规划。
- 4.3 应对检测发现的疲劳裂纹进行拍照，制作裂纹信息卡，并形成相关技术文档。信息卡内容见图 1。

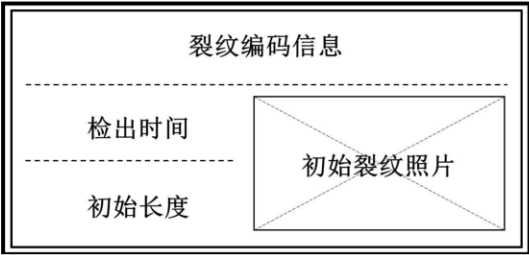


图 1 疲劳裂纹信息卡样式

- 4.4 疲劳裂纹信息卡应放置在对应裂纹附近，并能够长期保存。
- 4.5 疲劳裂纹维护工作结束后，应对维护部位进行拍照，照片中应包含疲劳裂纹信息卡。
- 4.6 应由专业队伍开展钢箱梁疲劳裂纹的养护工作，养护人员应至少满足以下要求：
熟悉钢箱梁主要结构形式、构件名称、疲劳裂纹的主要分布位置和特征；熟悉钢箱梁的相关制造工艺、工作条件、检测方法；熟悉相关规范、法规、设备和说明书。
疲劳裂纹检测人员应符合 GB/T 9445 要求。
疲劳裂纹维护人员应按照我国相关法规及行业要求取得相应资格，或进行相关专业培训，持证上岗。
- 4.7 仪器、耗材、辅助工具等应符合相关规范、计量认证和安全要求。
- 4.8 应遵守现场工作的安全要求。

5 钢箱梁典型疲劳开裂部位与特征

5.1 疲劳裂纹位置

钢箱梁典型疲劳裂纹位置如图 2 所示，主要包括：

- a) 顶板与 U 肋焊缝部位；
- b) 对接焊缝部位；
- c) 横隔板弧形缺口部位；
- d) 横隔板与顶板焊缝部位；
- e) 加劲肋焊缝部位 ‘

钢箱梁典型疲劳开裂案例见附录 A。

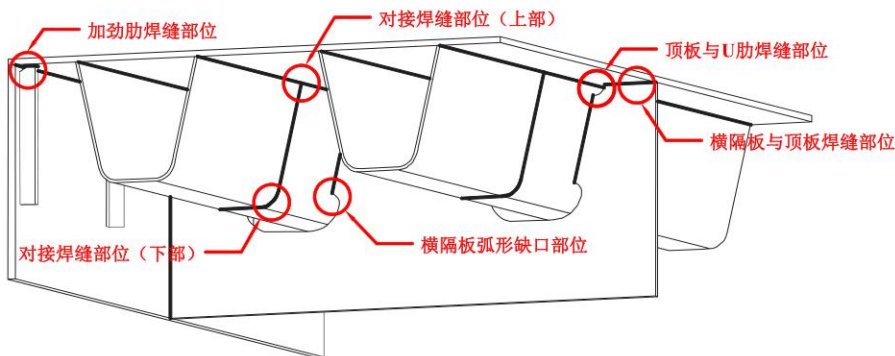
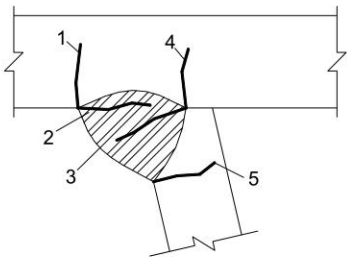


图 2 钢箱梁典型疲劳开裂位置

5.2 典型疲劳裂纹主要形式及特征

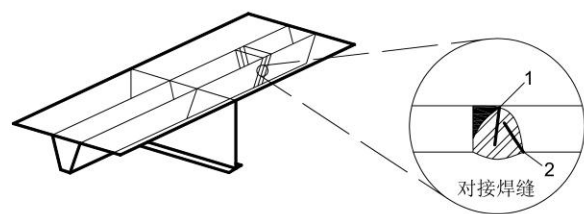
钢箱梁典型疲劳裂纹主要形式及特征见图 3 至图 7。



- 1—疲劳裂纹萌生于焊趾，沿顶板厚度方向扩展
- 2—疲劳裂纹萌生于焊趾，沿焊根方向扩展

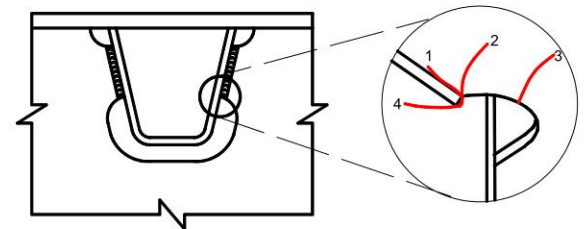
- 3—疲劳裂纹萌生于焊根，沿焊喉方向扩展
- 4—疲劳裂纹萌生于焊根，沿顶板厚度方向扩展
- 5—疲劳裂纹萌生于焊趾，沿 U 肋厚度方向扩展

图 3 顶板与 U 肋焊缝部位疲劳裂纹



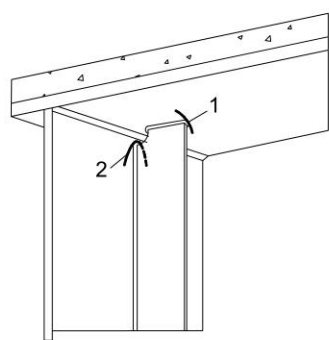
- 1—疲劳裂纹萌生于焊缝内侧，沿外部扩展
- 2—疲劳裂纹萌生于焊缝外侧，沿内部扩展

图 4 对接焊缝疲劳裂纹



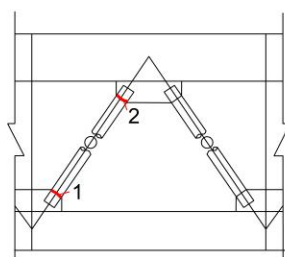
- 1—疲劳裂纹萌生于焊缝包脚处，紧贴焊缝方向扩展
- 2—疲劳裂纹萌生于焊缝包脚处，沿横隔板母材扩展
- 3—疲劳裂纹萌生于弧形缺口部位，沿横隔板母材扩展
- 4—疲劳裂纹萌生于焊缝包脚处，在 U 肋母材上扩展

图 5 横隔板弧形缺口部位疲劳裂纹



- 1—疲劳裂纹萌生于焊缝包脚处，在顶板母材部位扩展
- 2—疲劳裂纹萌生于焊缝包脚处，在腹板母材部位扩展

图 6 竖向加劲肋焊缝部位裂纹



1—疲劳裂纹萌生于桁架式加劲肋连接焊缝部位，紧贴焊缝方向扩展

2—疲劳裂纹萌生于桁架式加劲肋连接焊缝部位，沿横隔板母材扩展

图 7 桁架式加劲肋连接焊缝疲劳裂纹

6 疲劳裂纹编码

6.1 应对钢箱梁疲劳裂纹进行科学编码，便于养护工作人员现场快速识别和定位。

6.2 疲劳裂纹编码应充分考虑钢箱梁结构形式、疲劳裂纹产生位置和扩展方向，并能够准确反映疲劳裂纹形式及特征。

6.3 钢箱梁疲劳裂纹编码方法参见附录 B。

6.4 可根据自身桥梁结构特点，结合附录 B 的基本要求，制定某一桥梁特有的编码方案。

7 检测

7.1 一般规定

7.1.1 宜根据钢箱梁疲劳裂纹特征，选择合适的无损检测方法，以目视检测为主。

7.1.2 目视检测应覆盖钢箱梁所有构件、连接节点、焊缝等部位，每年应至少开展 1 次。当出现疲劳裂纹后，应提高检测频率，每年应不少于 2 次。

7.1.3 渗透检测、磁粉检测和超声波检测，每年应至少开展 1 次，每次应至少选择钢箱梁典型疲劳开裂部位焊缝数量的 25% 进行检测。

7.1.4 技术条件允许时，应对疲劳裂纹长度、深度、表面平整度进行测量，并对疲劳裂纹尖端位置进行检测、标记。

7.1.5 采用两种或两种以上的检测方法对同一部位进行检测时，检测结果应按各自的方法进行判定。如果检测结果不一致，应以危险度大的结果为准。

7.1.6 应做好疲劳裂纹检测结果记录，见附录 C，并编制检测报告。

7.2 目视检测

7.2.1 目视检测通常分为一般目视检测和局部目视检测。

7.2.2 首先应进行一般目视检测，对一般目视检测可疑部位宜进行局部目视检测。

7.2.3 一般目视检测时，眼睛与被检部位表面距离大于 600 mm；局部目视检测距离宜在 600 mm 以内，并且眼睛与被检部位表面的观测视角不小于 30°。

7.2.4 疲劳裂纹目视检测时应使用便携式照明工具，照明要求参见 GB/T 20967。

7.2.5 局部目视检测时可借助放大镜、内窥镜等辅助检测工具。放大镜放大率应在 5 倍以上。

7.2.6 检测时应注意焊缝的起弧处、腐蚀、锈蚀、油漆剥落部位、几何突变部位，并充分考虑疲劳裂纹多种可能的扩展路径。

7.2.7 对局部目视检测仍难以判断时,可采用渗透检测、磁粉检测或超声波检测等方法协助检测。

7.3 渗透检测

3

7.3.1.1 钢箱梁疲劳裂纹渗透检测宜参照 GB/T 18851.1 相关规定执行。

7.3.1.2 应科学选择渗透方法提高现场渗透检测效率,可同时对多个部位实施渗透检测。

7.3.1.3 渗透检测剂应符合 GB/T 18851.2 规定。

7.3.1.4 渗透检测剂应具有良好的检测性能,对钢材、焊缝和涂层无明显腐蚀作用。

7.3.1.5 应使用同一厂家生产的同一系列配套探伤液,不应将不同种类的探伤液混合使用。

7.3.2 检测流程

7.3.2.1 渗透检测的主要步骤如下:

- a) 表面准备;
- b) 施加渗透剂;
- c) 多余渗透剂去除;
- d) 施加显像剂;
- e) 观察;
- f) 复验;
- g) 后处理。

7.3.2.2 表面准备

被检表面应做适当的清理,应使用刷、擦的方法去除污垢、熔渣、铁锈、灰尘等,不能有影响渗透检测的残留物,确保被检表面清洁、干燥。

处理区域应从检测部位四周向外扩展不少于 25 mm。

7.3.2.3 施加渗透剂

采用喷罐均匀喷洒渗透剂施加的方法,应保证被检部位完全被渗透剂覆盖,并在整个渗透时间内保持湿润状态。

在规定温度范围内,渗透时间不得少于 10 min 或按照渗透剂使用说明书中规定的渗透时间执行。在渗透时间内,应保持渗透剂把被检表面润湿。

7.3.2.4 多余渗透剂去除

施加去除剂时应避免将裂纹内部的渗透剂也去除掉。可采用湿布、干净无绒毛的布进行擦除。

擦除后一般可用自然蒸发或用热风进行干燥。干燥时被检表面温度不应大于 50 °C,干燥时间通常为 5 min ~ 10 min。

7.3.2.5 施加显像剂

应尽快施加显像剂,显像剂的厚度应适当,并保持均匀。显像时间宜在 10 min ~ 30 min 之间。

7.3.2.6 观察

施加显像剂时,应仔细观察被检表面的迹痕显示情况,并在渗透剂渗出后 1 小时内完成评定。

观察到迹痕之后,应首先确定这些迹痕中哪些是由裂纹引起,哪些是由非裂纹的因素引起。对于细小显示,可使用 5 倍 ~ 10 倍放大镜进行观察。必要时应重新进行检验或用其它方法进行验证。

疲劳裂纹检测结果呈连续线状显示。

7.3.2.7 复验

当出现下列情况之一时,宜进行复验:

- a) 难以确定迹痕是由裂纹引起还是由非裂纹的因素引起时;
- b) 检测结束时,用规范试块验证检测灵敏度不符合要求;

- c) 发现检测过程中操作方法有误或技术条件改变时;
- d) 供需双方有争议或有其它需要时。

7.3.2.8 后处理

检测完毕后, 应进行清洗, 去除有害残留物, 并做好被检表面的防护处理。

7.4 磁粉检测

7.4.1 基本要求

7.4.1.1 钢箱梁疲劳裂纹磁粉检测方法宜采用磁轭法, 参照 GB/T 15822.1 执行。

7.4.1.2 应考虑钢箱梁涂层的影响, 根据实际涂层厚度对磁粉检测灵敏度进行验证, 并适当补偿。

7.4.1.3 磁粉检测介质宜采用油性磁悬液, 并应满足 GB/T 15822.2 规定。

7.4.1.4 磁粉检测设备 宜使用交流磁化设备, 若现场条件无法满足, 可使用直流磁化或永久磁体设备。相关设备应满足 GB/T 15822.3 规定。

7.4.2 检测流程

7.4.2.1 磁粉检测主要步骤如下:

- a) 表面准备;
- b) 施加磁悬液;
- c) 磁化;
- d) 观察;
- e) 退磁;
- f) 后处理。

7.4.2.2 表面准备

被检表面应无脏物、氧化皮、松散铁锈等。任何清理或表面准备都不应影响磁痕的形成。

应做适当准备使相关显示能清晰区别于伪显示, 必要时可施加反差增强剂。

7.4.2.3 施加磁悬液

应采用连续法对被检部位进行检测。被检部位的磁化、施加磁粉以及观察磁痕都应在磁化通电时间内完成。

应采用喷罐喷洒的方法施加磁悬液, 使整个检测面湿润。

7.4.2.4 磁化

磁化时, 有效的通电时间为 1 s ~ 3 s, 停施磁悬液至少 1 s 后方可停止磁化。为保证磁化效果应至少反复磁化两次。

钢箱梁典型部位磁化方法参见附录 D。

7.4.2.5 观察

磁痕的观察应在磁痕形成后立即进行。

磁痕的观察应考虑不同构造部位疲劳裂纹产生位置和扩展路径。

钢箱梁焊缝表面会形成不连续的磁痕, 不应将此类显示作为裂纹。

当辨认细小磁痕时, 可使用 2 倍~10 倍放大镜检查。

7.4.2.6 退磁

交流检测后的剩磁通常很低, 一般不需要进行退磁处理。

要求退磁时, 应按限定的方法和预先得定的等级实施。

7.4.2.7 后处理

检测完毕后, 应对所有喷涂部位进行清理, 去除原有检测介质, 并做好被检表面的防护处理。

7.5 超声波检测

7.5.1 基本要求

- 7.5.1.1 在实施超声波检测前，应对现场进行调查，找出所有可能影响检测灵敏度和精度的因素，并通过相关手段尽可能避免这些因素的干扰。
- 7.5.1.2 超声波检测设备应至少满足 JG/T 203 的规定，并应在检测前进行校准。
- 7.5.1.3 宜采用无腐蚀性和低流淌性的耦合剂。
- 7.5.1.4 标定和校核各项参数时，使用的耦合剂应与现场检测部位使用的耦合剂相同。
- 7.5.1.5 在满足检测灵敏度的前提下，宜使用高频率、短前沿、小晶片的横波斜探头。
- 7.5.1.6 应根据被检部位特征有针对性的选择不同角度的斜探头，宜尽量选用大角度的斜探头。

7.5.2 检测流程

7.5.2.1 超声波检测主要步骤如下：

- a) 检测准备；
- b) 施加耦合剂；
- c) 检测；
- d) 判定；
- e) 裂纹特征检测；
- f) 后处理。

7.5.2.2 检测准备

检测前，应对探伤仪的时基线和探测灵敏度进行标定，并绘制与被检构件相对应的 DAC 曲线。
被检表面应平整，对于锈蚀、飞溅和污物等都应予以清除，必要时可进行打磨，其表面粗糙度应符合检测要求。

7.5.2.3 施加耦合剂

检测前，应在钢构件和检测探头之间涂抹一层均匀的耦合剂，使整个检测面湿润，保证超声波在空气界面处不衰减。

7.5.2.4 检测

为确定裂纹的位置、形状、方向，判别裂纹信号和伪缺陷信号，可采用前后、左右、转角、环绕四种基本扫查方式，见图 8。
探头扫查速度不应大于 150 mm/s，相邻的两次扫查之间至少应有探头晶片宽度 10%的重叠。
探头应垂直于焊缝中线，并做锯齿形扫查，在扫查的同时还应作 10°~15°的摆动，见图 9。

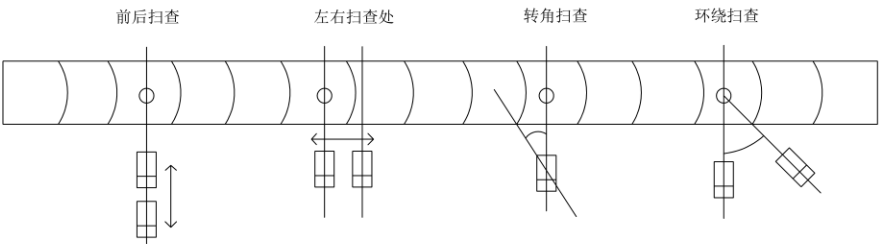


图 8 基本扫查方式

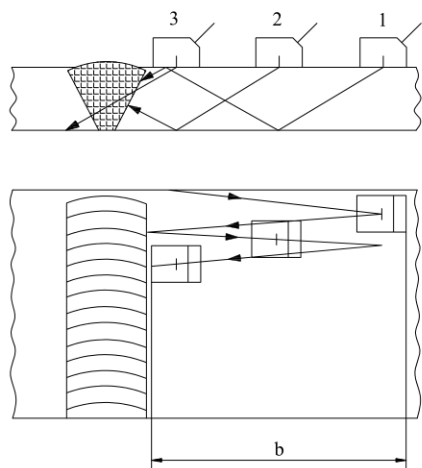


图9 锯齿形扫查

7.5.2.5 判定

在检测过程中,发现以下情况之一时,可判定为疲劳裂纹:

- a) 缺陷一次回波高度不小于满刻度的 50%;
- b) 当底波高度未达到满刻度,而缺陷一次回波高度与底波高度之比不小于 50%。

7.5.2.6 裂纹特征检测

检出裂纹后,应在裂纹周围继续进行检测,以确定裂纹的延伸情况、裂纹的长度和深度等特征。

疲劳裂纹尖端在母材上时,可采用绝对灵敏度法对疲劳裂纹进行测长,即移动探头使裂纹一次回波下降到探测灵敏度下满刻度的 30%,或使裂纹一次回波与底波高度之比为 50%。此时探头中心点可视为裂纹尖端。两个裂纹尖端之间的长度即为裂纹的指示长度。

宜采用直射法对裂纹深度及距离进行检测。

当采用二次波和底面二次波评定裂纹特征时,应以相应的二次波来校准。

7.5.2.7 后处理

检测完毕后,应对所有涂抹耦合剂的部位进行清洗,并做好被检表面的防护处理。

8 评定

8.1 一般规定

- 8.1.1 钢箱梁疲劳裂纹评定应采用动态评定方法。
- 8.1.2 疲劳裂纹评定应综合考虑各因素的影响。
- 8.1.3 对于维护后继续扩展的疲劳裂纹,可参照本章评定方法执行。

8.2 评定方法

- 8.2.1 应采用疲劳裂纹现场跟踪方法进行评定。
- 8.2.2 现场跟踪宜采用目视检测,跟踪时间应不少于 3 个月,每月至少 1 次,并填写疲劳裂纹跟踪记录表,见附录 E。
- 8.2.3 应根据每次跟踪结果对疲劳裂纹进行阶段性评定。

8.3 评定指标

以疲劳裂纹重要性系数 λ 作为评定指标，按下式计算：

$$\lambda = \frac{1}{9}(a_i + b_j + c_k)$$

式中：

- a_i ($i=1,2,3$) —疲劳裂纹长度因素对应的分值，见表 1；
- b_j ($j=1,2,3$) —疲劳裂纹扩展速率因素对应的分值，见表 2；
- c_k ($k=1,2,3$) —疲劳裂纹尖端位置因素对应的分值，见表 3。

表 1 疲劳裂纹长度因素

长度（mm）	分值 a_i
[0,100]	1
(100,150]	2
>150	3

表 2 疲劳裂纹扩展速率因素

平均每月扩展速率（mm/月）	分值 b_j
不扩展	1
0 mm ~ 5 mm	2
>5 mm	3

表 3 疲劳裂纹尖端位置因素

尖端位置	分值 c_k
位于焊趾/焊根	1
位于焊缝高度内	2
位于母材	3

8.4 评定结果

根据疲劳裂纹重要性系数，将疲劳裂纹分为 A、B、C 三级，见表 4：

表 4 疲劳裂纹等级划分

λ	评定等级	应对措施
(0.3, 0.5)	A	定期观察，至少半年 1 次
(0.5, 0.7)	B	密切跟踪，至少每月 1 次
(0.7, 1.0)	C	及时维护

9 维护

9.1 一般规定

- 9.1.1 钢箱梁疲劳裂纹经评定后才可实施维护工作。
- 9.1.2 钢箱梁疲劳裂纹维护工作应综合考虑疲劳裂纹开裂部位、尖端位置、扩展路径等因素。

- 9.1.3 应考虑疲劳裂纹维护工作对钢箱梁截面的损伤累积效应，科学制定维护方法。
- 9.1.4 可采用两种或两种以上的维护方法对同一裂纹进行维护，工艺和要求按照各自的方法实施。
- 9.1.5 应做好疲劳裂纹维护记录，见附录 F，并编制维护报告。
- 9.1.6 疲劳裂纹维护工作结束后，应进行不少于 3 年的跟踪观测，至少 1 次/2 月，做好跟踪记录，见附录 E，并编制年度跟踪报告。
- 9.1.7 跟踪观测以目视检测为主，参照本规范 7.2 节执行。

9.2 气动冲击法

9.2.1 基本要求

- 9.2.1.1 气动冲击法适用于长度不大于 150mm 的疲劳裂纹。
- 9.2.1.2 气动冲击法适用于钢板厚度不小于 4 mm，材料屈服强度不大于 620 MPa 的部位。
- 9.2.1.3 气动冲击法维护过程中应佩戴隔音耳塞、护目镜等防护设备。

9.2.2 设备

- 9.2.2.1 气动冲击法维护设备一般由空气压缩机、气动工具、冲击棒等组成。
- 9.2.2.2 空气压缩机应轻质便携，散热快，具备长时间持续供气的能力。
- 9.2.2.3 空气压缩机应与气动工具相匹配。
- 9.2.2.4 气动工具应具备较高的冲击频率、轻质便携、便于握持。
- 9.2.2.5 冲击棒所用材料要求硬度高、冲击韧性好，可选用高速钢。
- 9.2.2.6 冲击棒端部棱角处应进行倒角处理。

9.2.3 技术参数

- 9.2.3.1 气动冲击法主要技术参数包括冲击频率 f 、冲击棒头部面积 S 、单点冲击时间 t 。
- 9.2.3.2 气动冲击法参数选择可参考表 5 执行，也可通过相同材料的人工裂纹工艺试验来确定。

表 5 气动冲击法维护参数选择

频率 f /Hz	冲击棒头部面积 S /mm ²	单点冲击时间 t /s
60~150	10~50	5~20
注：一般情况下，冲击部位钢材的屈服强度越高，硬度越大，则应增大冲击频率，减小冲击棒头部面积，增加处理时间，一般只需要改变几种工艺参数即可适应不同的维护要求。		

- 9.2.3.3 应根据疲劳裂纹萌生位置合理制定冲击棒头部形状。
- 9.2.3.4 气动冲击法处理范围应连续，并能完全覆盖疲劳裂纹。冲击范围宽度应不小于 5 mm，冲击范围长度应超过裂纹尖端不少于 10 mm，见图 10。



图 10 气动冲击范围（单位：mm）

9.2.4 实施流程

- 9.2.4.1 一般情况下，气动冲击法实施流程如下：
 - a) 表面准备；
 - b) 确定冲击参数；
 - c) 实施冲击处理；

d) 后处理。

9.2.4.2 表面准备

表面应相对平坦，且无杂物、氧化皮、松散铁锈和任何其它外来物。若不满足要求，则应采用机械打磨方式处理表面，直到满足要求。

9.2.4.3 确定冲击参数

根据实际情况，参照 9.2.3 节选择合理的冲击参数。

可采用记号笔标大致画出整个气动冲击范围的边界位置。

9.2.4.4 实施冲击处理

一般情况下，气动冲击法维护中应按照以下要求实施：

- 将冲击棒置于疲劳裂纹表面部位，冲击棒头部边缘与裂纹表面边缘对齐；
- 冲击过程中冲击棒应与表面垂直，若因特殊原因无法垂直冲击时，有效角度偏差不宜超过 10° ；
- 冲击过程中冲击棒应紧贴裂纹表面开口边缘位置，缓慢移动，使表面能够产生显著塑性变形；
- 应对气动工具施加一定的压力，以保证冲击过程的平稳，尽可能避免冲击棒头部打滑；
- 冲击过程中应仔细观察裂纹表面塑性变形情况，必要时可调整冲击位置和移动速度；
- 可一次冲击成型，也可多次反复冲击以适应疲劳裂纹复杂的扩展路径；
- 不可对同一部位进行长时间的冲击。

一般情况下，气动冲击法实施步骤见图 11。

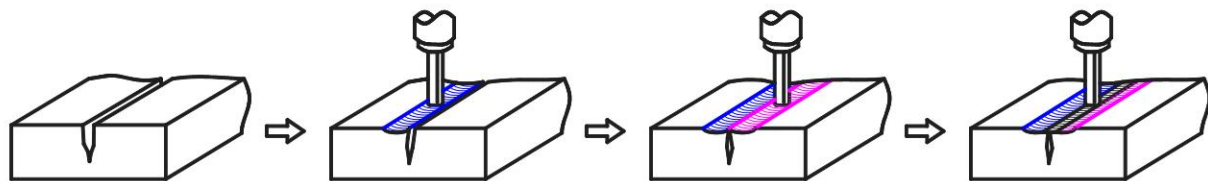


图 11 气动冲击法维修的基本步骤

对于裂纹表面其中一侧受到阻挡无法实施冲击时，可仅在裂纹表面一侧进行冲击，但需要在同一侧位置紧贴着进行再一次冲击，见图 12。冲击范围宽度应满足 9.2.3.4 规定。

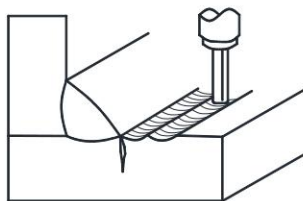


图 12 同一侧连续两次冲击示意图

9.2.4.5 后处理

气动冲击后应对被冲击部位表面进行打磨和防腐处理。

9.2.5 质量检验

9.2.5.1 应至少针对以下内容进行检验：

- 采用目视或 5 倍放大镜观察凹槽，裂纹表面肉眼不可见；
- 冲击范围内应实现全面覆盖；
- 冲击表面应无明显损伤。

9.2.5.2 维护完成后，合格的维护表面应为一条连续、均匀、光亮的凹槽，见附录 G。

9.2.5.3 若裂纹表面仍可见，可先采用相同技术参数在未闭合区域再次冲击；若冲击后仍无法闭合，可适当提高冲击频率，减小冲击棒头部面积。

9.3 钻孔法

9.3.1 基本要求

- 9.3.1.1 钻孔法可单独使用于裂纹尖端在构件母材上，长度不大于 300 mm 疲劳裂纹。若疲劳裂纹长度大于 300 mm，应与其他维护方法综合使用。
- 9.3.1.2 应在疲劳裂纹扩展路径上进行钻孔，并能够有效去除裂纹尖端。
- 9.3.1.3 钻孔应垂直穿透钢板厚度，且不对附近其它部位造成损伤。
- 9.3.1.4 钻孔过程中应做好钻头降温工作。

9.3.2 设备

- 9.3.2.1 钻孔设备主要包括钻机、钻头和辅助钻孔装置等。
- 9.3.2.2 钻机可用手电钻或磁座钻（也称磁力钻），应优先使用磁座钻。
- 9.3.2.3 钻机功率应在 800W 以上，空载转速不应低于 1000r/min。
- 9.3.2.4 应根据现场操作空间大小，合理选择钻头长度。
- 9.3.2.5 可采用相关辅助定位装置确保钻孔距离的准确。
- 9.3.2.6 可采用钻头限位环控制钻孔深度。
- 9.3.2.7 可根据实际需求采用实心钻头或空心钻头进行钻孔。

9.3.3 技术参数

9.3.3.1 钻孔法主要技术参数包括钻孔位置距离 l 、钻孔孔径 D 和钻孔偏心距 e ，见图 13。

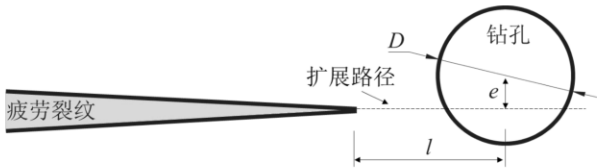


图 13 钻孔参数

9.3.3.2 应根据以下情况合理选择钻孔位置距离：

- a) 一般情况下，钻孔位置距离 l 应不小于 $0.5D$ （ D 为孔径），不大于 20 mm；
- b) 裂纹源尖端可见时，钻孔位置距离应取下限；裂纹源尖端不可见时，应适当增大钻孔位置距离；
- c) 对于贯穿型疲劳裂纹，应以构件上下表面最远位置处的疲劳裂纹尖端作为钻孔位置距离参考，见图 14。

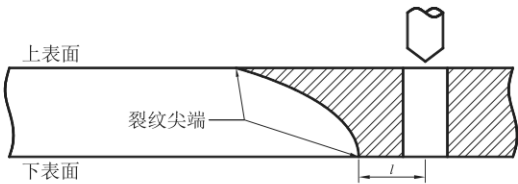


图 14 贯穿型疲劳裂纹钻孔位置距离确定方法

9.3.3.3 应根据疲劳裂纹长度选择合理的钻孔孔径，见表 6。

表 6 钻孔孔径

疲劳裂纹长度 /mm	孔径 /mm
(0,100]	10
(100,200]	14
>200	18

9.3.3.4 钻孔时圆心宜在疲劳裂纹扩展路径上，最大允许偏差不应超过 5 mm。

9.3.4 实施流程

9.3.4.1 一般情况下，钻孔法主要实施步骤如下：

- a) 表面准备；
- b) 确定技术参数；
- c) 钻孔位置定位；
- d) 钻孔；
- e) 后处理。

9.3.4.2 表面准备

钻孔表面应无脏物、氧化皮、松散铁锈和任何其它外来物。

9.3.4.3 确定技术参数

根据实际情况，考虑疲劳裂纹断面特征，参照 9.3.3 节选择合理的钻孔参数。

9.3.4.4 钻孔位置定位

在疲劳裂纹扩展路径上，依据所确定的钻孔位置距离，标记出圆心位置。

采用对应孔径的圆形贴纸贴于所标记的圆心位置，用于钻孔定位，见图 15。



图 15 钻孔定位用的圆形贴纸

9.3.4.5 钻孔

将钻头尖端对准圆形贴纸的圆心部位。

钻机应保持稳定，确保一次钻透。

对于贯穿型裂纹，观察条件允许时，宜先钻孔径为 4 mm 的参考孔，以判断裂纹另一侧尖端是否能够被去除，若无法去除，则应适当调整钻孔距离。对于非贯穿型裂纹，可直接进行钻孔。

9.3.4.6 后处理

钻孔完毕后，应及时清除钢渣，并对两侧孔边进行打磨。

可采用同尺寸的橡皮塞堵住钻孔部位。当孔径较大时，也可采用螺栓对钻孔部位进行加固。

必要时，可在原钻孔部位采用冷扩孔技术以进一步提高钻孔效果。

9.3.5 质量检验

9.3.5.1 钻孔结束后应立即进行检查，确保裂纹尖端已经彻底去除。若仍残留裂纹尖端，可紧贴着打孔位置继续钻同尺寸的孔，或采用更大直径的钻头进行扩孔，直到裂纹尖端去除。

9.3.5.2 钻孔技术参数允许误差不应超过 1 mm。

9.3.5.3 孔边应平整光滑、无杂物、无尖锐边缘。

9.4 补焊法

9.4.1 基本要求

9.4.1.1 补焊法一般适用于气动冲击法和钻孔法维护后仍继续扩展且长度超过 150 mm 的疲劳裂纹。

9.4.1.2 补焊法宜适用于未贯穿板厚的疲劳裂纹。对于贯穿型疲劳裂纹，不宜在无法实施双面焊接的部位采用。

9.4.1.3 补焊前应采用机械或碳弧气刨等方法彻底清除裂纹，再实施焊接。

- 9.4.1.4 现场补焊时，可采用手工电弧焊。
- 9.4.1.5 补焊前应开展相应材质的工艺评定，并按工况特殊要求补充工艺试验。
- 9.4.1.6 施焊时应保证环境空气流通。

9.4.2 设备与耗材

- 碳弧气刨机应满足 JB/T 7108 要求。
- 焊接设备应轻质便携，并满足 GB/T 8118 要求。
- 应使用具有低温抗裂韧性的焊条。

9.4.3 技术参数

- 9.4.3.1 应根据疲劳裂纹产生位置、板厚、扩展长度等，制定严格的焊接工艺及操作流程。
- 9.4.3.2 采用碳弧气刨清除裂纹时，应根据钢板厚度选取合适的碳棒直径，见表 7。

表 7 钢板厚度与碳棒直径之间的关系

钢板厚度 t (mm)	碳棒直径 D (mm)
(4,6]	4
(6,8]	6
(8,12]	8
(12,20]	10

- 9.4.3.3 碳弧气刨时，其电流大小 I (单位：A) 与碳棒直径 D (单位：mm) 可参照下列公式：
 $I = (30 \sim 50) D$ 。

- 9.4.3.4 补焊时，坡口底层焊焊条直径不应大于 3.2 mm，并与底层根部焊道的最小尺寸适应，其它部位焊条直径不应大于 4 mm。焊接电流大小可参照表 8 选用。

表 8 焊条与电流匹配参数

焊条直径 (mm)	1.6	2.0	2.5	3.2	4.0
电流 (A)	25~40	40~60	50~80	100~130	160~210

9.4.4 实施流程

- 9.4.4.1 一般情况下，补焊法主要步骤如下：

- a) 表面准备；
- b) 清除疲劳裂纹；
- c) 确定补焊参数；
- d) 预热；
- e) 焊接；
- f) 后处理。

9.4.4.2 表面准备

- 补焊表面应无脏物、氧化皮、松散铁锈和任何其它外来物，必要时进行机械清除。

9.4.4.3 清除疲劳裂纹

- 清除疲劳裂纹前应确定疲劳裂纹的长度和深度。
- 采用坡口形式清除疲劳裂纹，其范围应至少包括裂纹全长。
- 清除裂纹时，应在裂纹尖端位置附近钻孔，防止裂纹延伸。钻孔操作可参考 9.3 节的相关规定。
- 坡口的形式可采用“V 型”或“U 型”坡口，见图 16，坡口深度应大于裂纹深度。

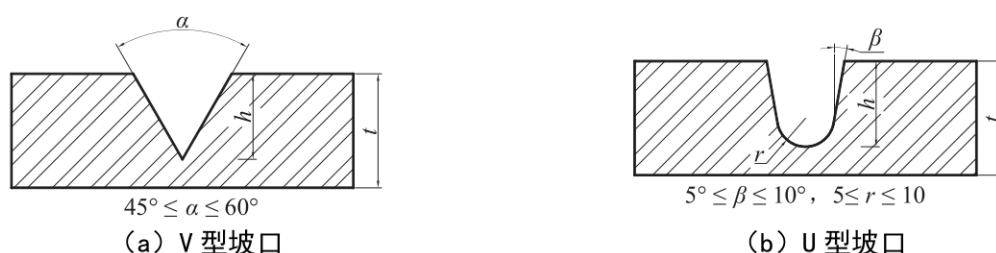


图 16 补焊法坡口型式

对于贯穿型裂纹，宜采用双面焊接，单侧坡口深度应不小于板厚的 $3/4$ ，即 $h \geq 3/4t$ 。

宜采用角向磨光机修正刨口表面渗碳层，经着色检验合格后才能进行焊接。

9.4.4.4 确定补焊参数

补焊参数选择可参照 9.4.3 节执行。

若补焊前开展了相关工艺试验，可依据试验结果确定补焊参数。

9.4.4.5 预热

若焊接钢材温度在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时，在焊接前应对表面进行预热。

焊前预热方法应根据所采用的补焊工艺方法而定，并采用表面温度仪测温。

预热温度可选 $80\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，预热范围为焊缝两侧各 100 mm 范围内。

9.4.4.6 焊接

施焊时应尽可能用小直径焊条、低电流、多层多道，分段退焊的方法。

对接坡口焊每道焊的焊脚尺寸不应大于 4 mm ，角焊缝每道焊的焊脚尺寸不应大于 6 mm 。

前一道焊温度冷却至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下后，方可施焊下一道。

除底层焊道不锤击外，其余各层在清渣后均需进行锤击。

典型部位补焊法维护见附录 H。

9.4.4.7 后处理

补焊后应清除熔渣、焊瘤和飞溅物等。补焊金属表面应平整，并平滑过渡到母材。

对接焊缝补焊后将焊缝表面顺应力方向抹平；角焊缝应具有凹状的表面成形。

在条件允许时，可按相关规定进行退火处理。

待补焊部位冷却至室温后，应使用原涂装体系及时进行防腐处理。

9.4.5 质量检验

9.4.5.1 补焊后不应存在裂纹、未熔合、未焊透和气孔、夹渣以及低于相邻母材表面质量要求的缺陷。

9.4.5.2 补焊后应对焊缝外观进行检查，必要时可采用磁粉或超声波探伤。

9.5 钢板补强法

9.5.1 基本要求

9.5.1.1 钢板补强法一般适用于长度超过 300 mm 且表面错位超过 1 mm 的疲劳开裂部位。

9.5.1.2 应通过计算分析科学制定钢板补强方案，避免结构出现刚性突变或产生新的应力集中。

9.5.1.3 钢板补强方案应进行审批后实施。

9.5.1.4 宜在疲劳开裂部位两侧实施补强。

9.5.1.5 钢箱梁疲劳裂纹钢板补强法应采用高强螺栓方式连接。

9.5.2 补强材料

9.5.2.1 钢箱梁钢板补强法所需材料包括补强钢板、螺栓等。

9.5.2.2 补强钢板的品种、质量和性能应符合下列要求：

- a) 补强钢板屈服强度应不低于构件钢材屈服强度；
- b) 补强钢材质量应满足 GB/T 714 的相关要求。

9.5.2.3 补强钢板边缘应作倒角处理，不应有尖锐边缘存在。

9.5.3 技术参数

9.5.3.1 补强钢板的尺寸规格选择应充分考虑构造细节特征、裂纹形态、连接方式。

9.5.3.2 补强钢板厚度应不小于开裂部位截面厚度。

9.5.3.3 钢板尺寸宜完全覆盖疲劳裂纹，每边均应超出疲劳裂纹开裂区域宜不少于 150 mm。

9.5.3.4 宜采用小直径螺栓，疲劳裂纹每侧用双排螺栓。

9.5.3.5 螺栓最大间距宜为 24 倍钢板厚度，最小间距宜为 3 倍螺栓孔径。螺栓中心距钢板边缘的最大距离宜为 8 倍钢板厚度或 120 mm 中的较小者，最小间距宜为 2 倍螺栓孔径。

9.5.4 实施流程

9.5.4.1 一般情况下，钢板补强法主要步骤如下：

- a) 放样；
- b) 表面准备；
- c) 打止裂孔；
- d) 打螺栓孔；
- e) 拧紧螺栓；
- f) 后处理。

9.5.5.1 放样

参照 9.5.2 节确定合适的钢板材料。

根据疲劳裂纹长度确定合适的钢板放样尺寸，并在工厂内切割成型。

9.5.5.2 表面准备

清理构件表面灰尘，打磨补强部位可能的凸点。

补强部位表面应平整，若有较为严重的变形，应采取相关手段矫正。

9.5.5.3 打止裂孔

钢板补强前，应按照 9.3 节相关规定，在疲劳裂纹尖端位置附近钻孔。

9.5.5.4 打螺栓孔

依据疲劳裂纹形态，按照 9.5.3.4 和 9.5.3.5 条文确定螺栓孔位布置方式，并在补强钢板上钻孔。

依据螺栓孔位，在补强部位表面相同位置钻两个定位孔，定位孔允许误差应在 ± 1 mm 以内。

用定位孔临时固定补强钢板，再对补强部位剩余螺栓孔进行钻孔。

9.5.5.5 拧紧螺栓

采用扳手进行初步的拧紧，然后采用扭矩扳手等类似工具，对螺栓进行紧固。

每个螺栓的紧固力应基本相同，相互之间偏差不应超过 5%。

9.5.5.6 后处理

应对补强部位进行适当补漆，以防止表面锈蚀。

9.5.6 质量检验

补强用钢板应与开裂部位截面应紧密接触，不应有明显缝隙。

10 质量验收

10.1 应及时组织验收。验收不通过时，由合同执行单位承担责任，并实施返修。

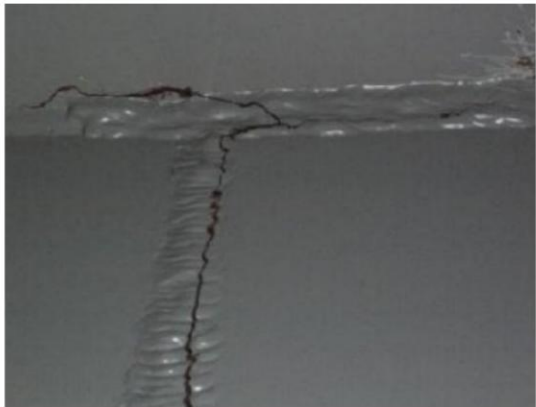
10.2 疲劳裂纹评定工作验收应按照相关规定执行。

10.3 疲劳裂纹维护工作验收依据参照《公路工程养护管理办法》（2018）执行

附录 A
(资料性附录)
钢箱梁疲劳开裂典型案例



a) 底部裂纹



b) 侧面裂纹

图 A.1 对接焊缝部位疲劳裂纹



a) 长度较短时



b) 长度较长时

图 A.2 顶板与纵肋焊缝部位疲劳裂纹



a) 紧贴焊缝焊缝扩展



b) 沿横隔板母材扩展

图 A.3 纵肋与横隔板焊缝部位疲劳裂纹



a) 垂直扩展



b) 水平扩展

图 A. 4 顶板与横隔板焊缝部位疲劳裂纹



a) 竖向和纵向加劲肋焊缝



b) 加劲肋与隔板焊缝

图 A. 5 钢箱梁加劲肋焊缝部位疲劳裂纹

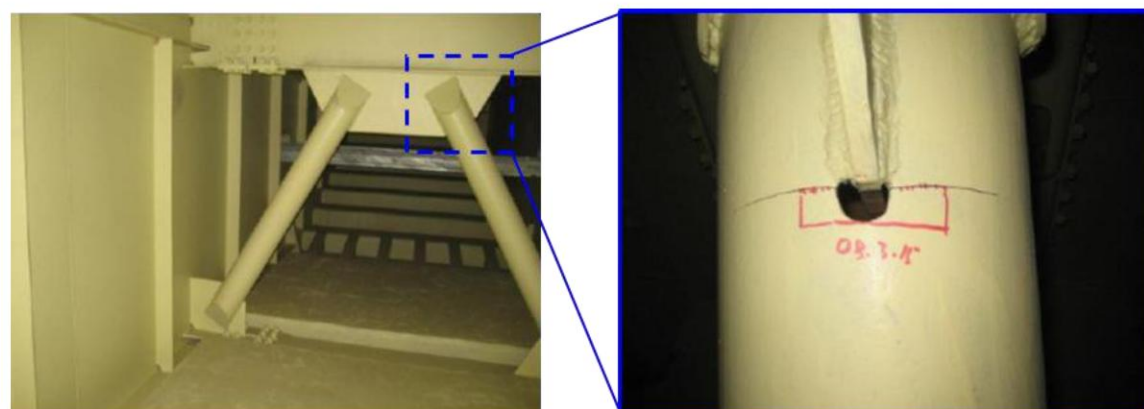


图 A. 6 钢箱梁桁式斜撑端部焊缝疲劳裂纹

附录 B
(资料性附录)
江阴大桥钢箱梁疲劳裂纹编码案例

B.1 基本要求

- B.1.1 根据江阴大桥 GIS 地理位置信息，确定大桥东南西北四个方向。
- B.1.2 以钢箱梁断面中轴线为基准划分上行车道（靖江至江阴）和下行车道（江阴至靖江）。
- B.1.3 由北向南，分别对纵桥向横隔板，依次采用阿拉伯数字进行编号。
- B.1.4 以钢箱梁两侧边缘位置的 U 肋作为 1 号 U 肋，由外向内依次进行编号。上行车道对应的 U 肋编号采用“+”表示（正号一般可略写），下行车道对应的 U 肋采用“-”表示（负号不可略写）。
- B.1.5 对钢箱梁主要构件进行命名，见表 B.1。

表 B.1 钢箱梁典型构件符号（示例）

细节	英文名称	指代字母
顶板	Deck	D
U 肋	U-rib	U
横隔板	Diaphragm	Di
加劲肋	Stiffener	S

- B.1.6 对焊缝进行命名，以该焊缝所连接构件字母组合表示，见表 B.2。

表 B.2 钢箱梁典型构造细节焊缝符号（示例）

部位	英文名称	符号
顶板与 U 肋焊缝	Deck to U-rib joint	DU
U 肋与横隔板焊缝	U-rib to Diaphragm joint	UDi
U 肋对接焊缝	U-rib to U-rib joint	UU
横隔板加劲肋焊缝	Diaphragm to Stiffener joint	DiS

B.2 典型疲劳裂纹特征符号

- B.2.1 横隔板构件母材疲劳裂纹，由东向西按逆时针方向依次编号，如图 B.1。

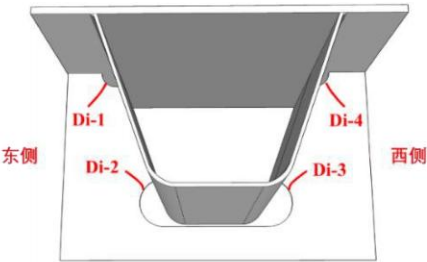


图 B.1 横隔板母材疲劳裂纹特征符号

- B.2.2 U 肋与横隔板焊缝部位 U 肋构件母材疲劳裂纹，由东向西按逆时针方向依次编号，如图 B.2。

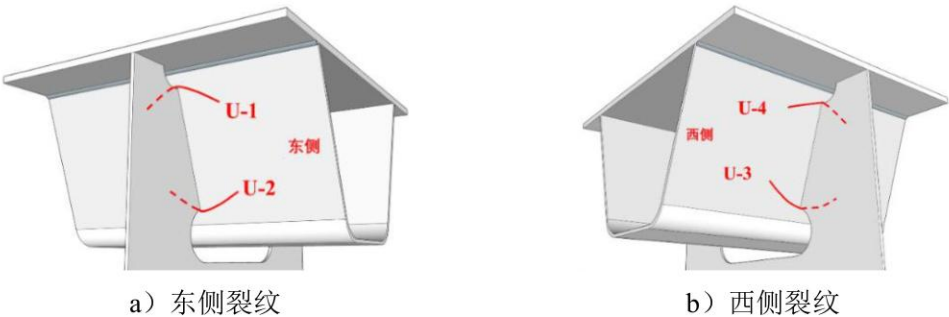


图 B. 2 U 肋与横隔板焊缝疲劳裂纹特征符号

B. 2. 3 顶板与 U 肋焊缝疲劳裂纹，东侧焊缝开裂记为 DU-1，西侧记为 DU-2，如图 B.3。

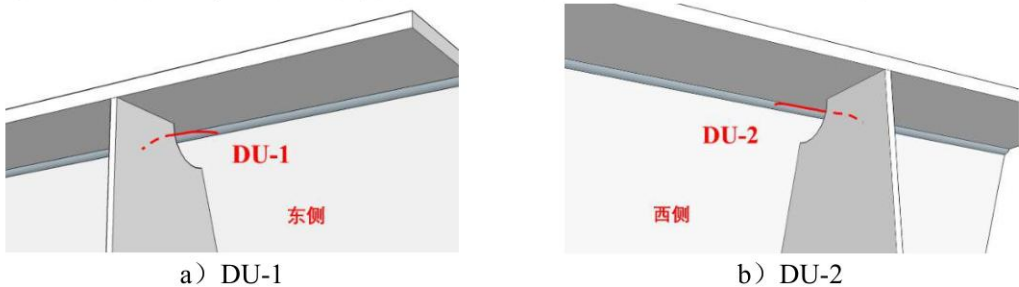


图 B. 3 顶板与 U 肋焊缝疲劳裂纹特征符号

B. 3 疲劳裂纹编码规则

B. 3. 1 按照先整体后局部原则进行编码。

B. 3. 2 钢箱梁疲劳裂纹编码格式可参照如下：

横隔板号+U 肋号+疲劳裂纹特征符号+扩展方向

B. 3. 3 对接焊缝疲劳裂纹，可采用相邻横隔板编号的中间数值作为该裂纹横隔板号，其它保持一致。

B. 3. 4 当裂纹产生位置与 U 肋较远，可采用对应的 U 肋编号进行横向定位。

B. 3. 5 钢箱梁疲劳裂纹编码实际应用案例见图 B.4。

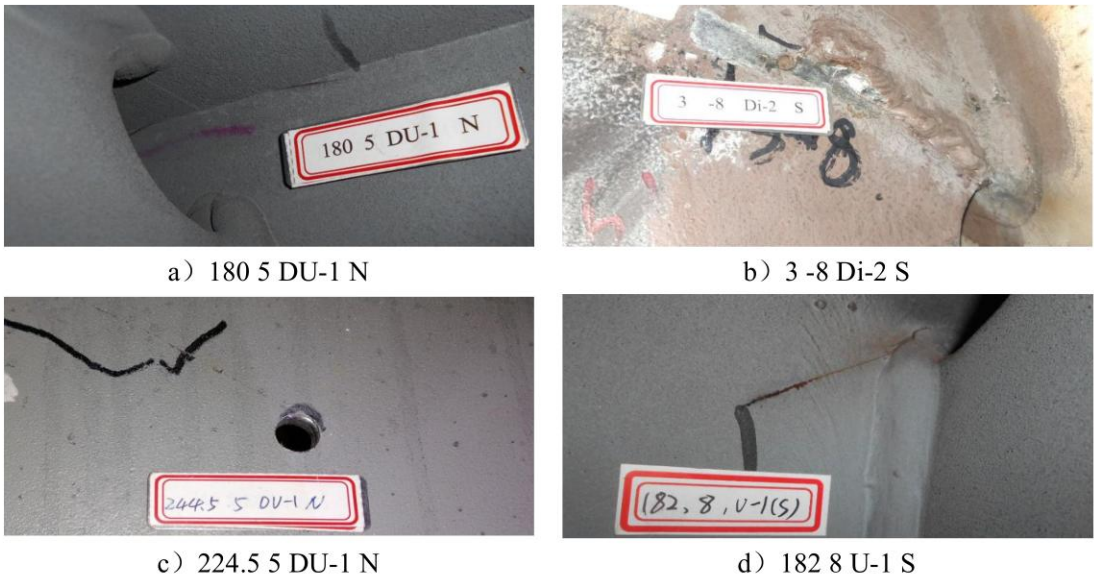


图 B. 4 钢箱梁疲劳裂纹编码案例

图 B.4a 编码信息表示该疲劳裂纹产生于第 180 号横隔板，上行车道第 5 号 U 肋，是顶板与 U 肋东侧焊缝疲劳裂纹，沿北侧扩展的部位。

图 B.4b 编码信息表示该疲劳裂纹产生于第 003 号横隔板，下行车道第 8 号 U 肋，是横隔板弧形缺口东侧下方疲劳裂纹，沿南侧扩展的部位。

图 B.4c 编码信息表示该疲劳裂纹产生于第 224 号和 225 号横隔板之间，上行车道第 5 号 U 肋对接焊缝部位，是顶板与 U 肋焊缝东侧疲劳裂纹，沿北侧扩展的部位。

图 B.4d 编码信息表示该疲劳裂纹产生于第 182 号横隔板，上行车道第 8 号 U 肋，是 U 肋与横隔板焊缝东侧上方疲劳裂纹，沿南侧扩展的部位。

附录 C
(规范性附录)
钢箱梁疲劳裂纹检测结果记录表

表 C.1 钢箱梁疲劳裂纹检测结果记录表

委托单位		工程名称	
检测时间		检测方法	
检测部位		执行规范	
技术参数			
检测结果照片		裂纹信息	
		序号	
		编码	
		长度	
		深度	
		备注	
		序号	
		编码	
		长度	
		深度	
		备注	
检测人员		审核人员	

附录 D
(资料性附录)
典型部位磁轭检测方法

D.1 磁轭法示意图如下：

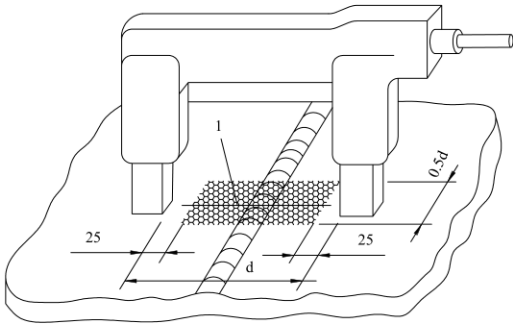
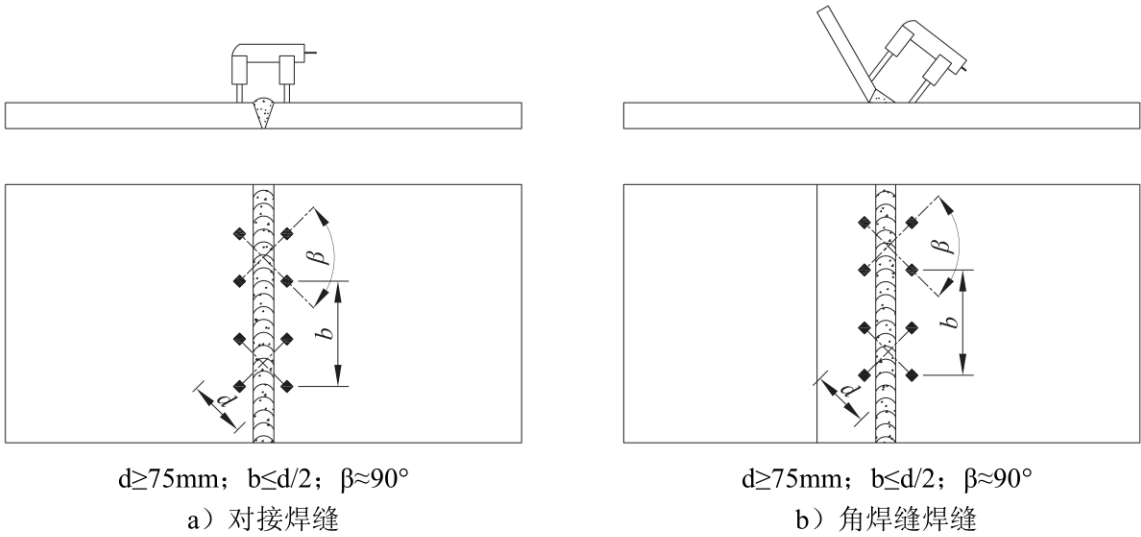


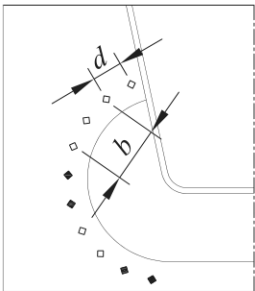
图 D.1 磁轭法

D.2 钢箱梁典型部位焊缝磁轭法检测示意图：



$d \geq 75\text{mm}; b \leq d/2; \beta \approx 90^\circ$
a) 对接焊缝

$d \geq 75\text{mm}; b \leq d/2; \beta \approx 90^\circ$
b) 角焊缝焊缝



$d \geq 75\text{mm}; b \leq d/2$
c) 弧形缺口部位

图 D.2 典型部位磁粉检测方法

附录 E
(规范性附录)
疲劳裂纹跟踪记录表

表 E.1 疲劳裂纹跟踪记录表

跟踪人员名单:

日期:

疲劳裂纹位置			维护情况	尖端位置	上次情况	本次情况	备注
横隔板号	U 肋号	裂纹特征					

- 注:
- ① 维护情况: 按“未维护”、“冲击”、“钻孔”、“补焊”、“补强”五种情况填写;
 - ② 尖端位置: 填写疲劳裂纹尖端位置, 分为“焊趾/焊根”、“焊缝高度内”、“母材”。
 - ③ 上次情况: 记录上一次跟踪的疲劳裂纹扩展情况, 分为“无扩展”、“有扩展”, 并填写扩展长度;
 - ④ 本次情况: 记录本次跟踪的疲劳裂纹扩展情况, 分为“无扩展”、“有扩展”, 并填写扩展长度;

附录 F
(规范性附录)
钢箱梁疲劳裂纹维护记录表

表 F.1 钢箱梁疲劳裂纹维护记录表

委托单位		工程名称	
维护时间		维护方法	
维护部位		技术参数	
裂纹编码		备 注	
维护前照片		维护后照片	
裂纹编码		备 注	
维护前照片		维护后照片	
维护人员		审核人员	

附录 G
(资料性附录)

合格的气动冲击法维护处理表面

气动冲击法处理后，裂纹表面部位不合格和合格的外观表面如图 G.1 所示。



a) 不合格：有独立压痕，尖锐过度、有咬边现象



b) 不合格：过度冲击，造成表面损伤



c) 合格：充分覆盖，凹槽连续光滑

图 G.1 气动冲击处理后裂纹表面外观效果

附录 H
(资料性附录)
疲劳裂纹补焊法维护施焊流程

H.1 常规疲劳裂纹补焊流程如下：

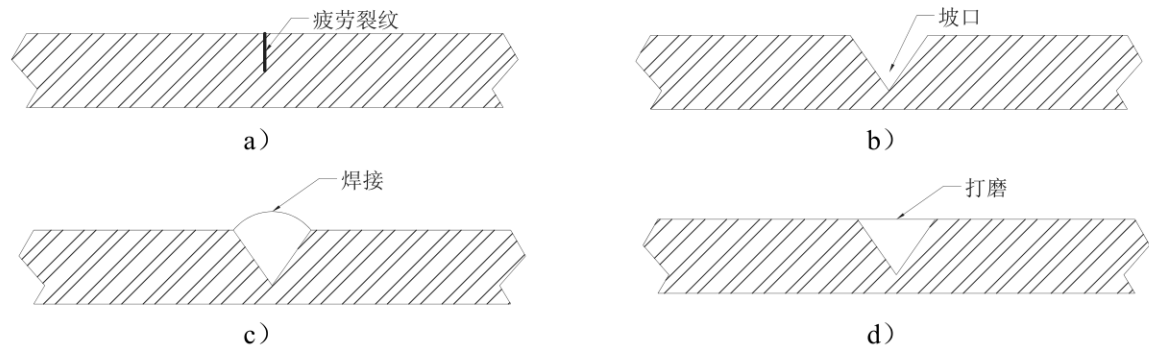


图 H.1 常规疲劳裂纹补焊流程

H.2 贯穿型疲劳裂纹补焊流程如下：

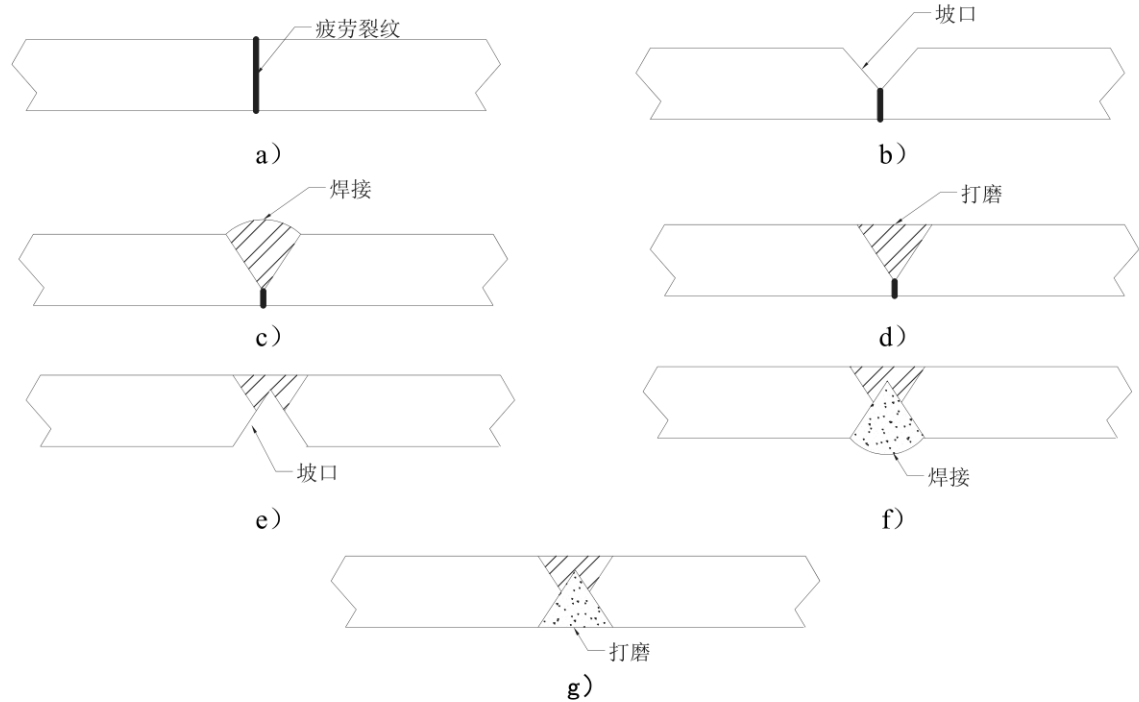


图 H.2 贯穿型疲劳裂纹补焊流程

H.3 顶板焊缝焊趾疲劳裂纹（未贯穿）补焊法维护流程如下：





图 H.3 桥面板焊趾疲劳裂纹（未贯穿）补焊流程

H.4 顶板焊根疲劳裂纹（贯穿）补焊维护流程如下：

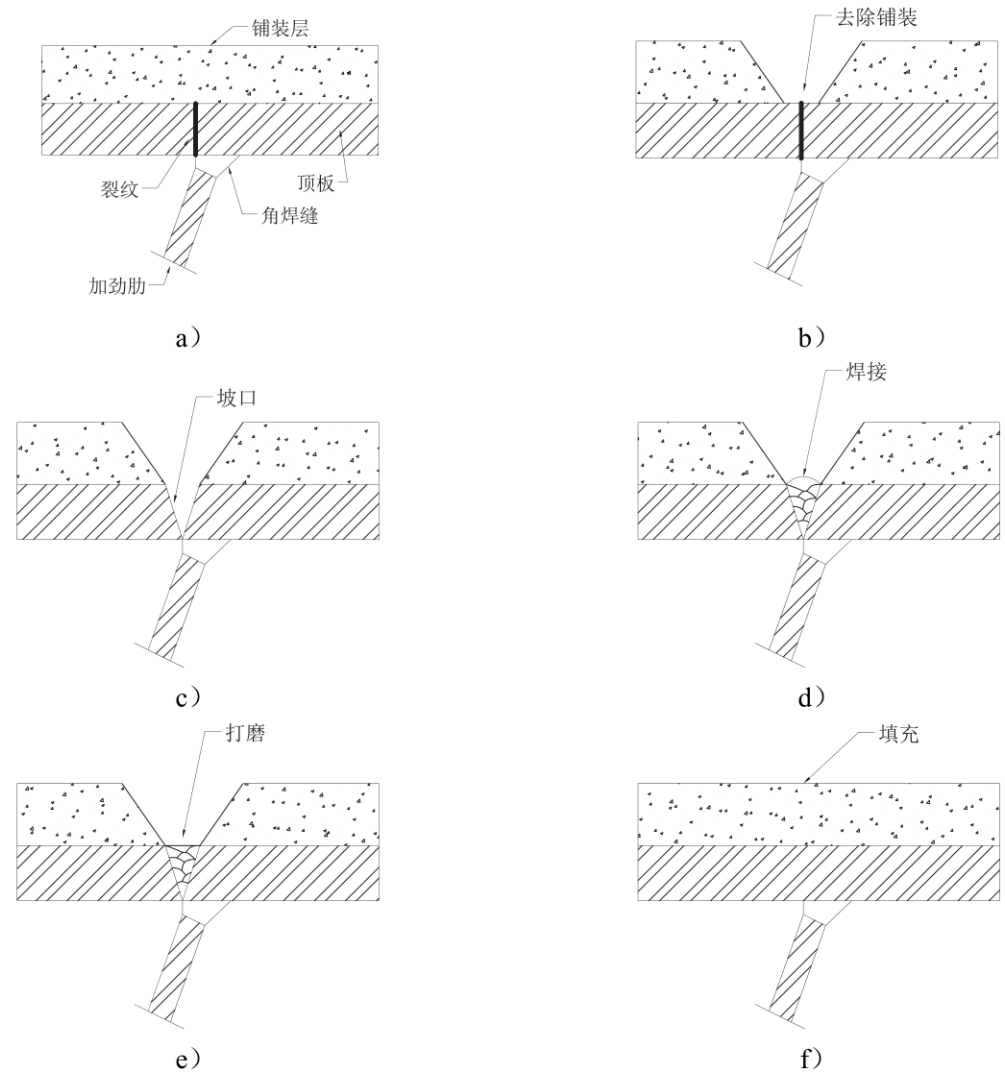


图 H.5 顶板焊跟疲劳裂纹（贯穿）补焊流程