T/CECSxxx-202x

中 国 工 程 建 设 标 准 化 协 会 标 准

**钢结构桥梁疲劳裂缝主动修复技术规程**

Technical Specification for Pro-active Rehabilitation on Fatigue Cracks of Steel Bridges

（**征求意见稿**）

（提交反馈意见时，请将有关专利连同支持性文件一并附上）

XXX出版社

中 国 工 程 建 设 标 准 化 协 会 标 准

**钢结构桥梁疲劳裂缝主动修复技术规程**

Technical Specification for Pro-active Rehabilitation on Fatigue Cracks of Steel Bridges

**T/CECS xxx－202x**

主编单位：同济大学

中国建筑金属结构协会

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202X年XX月XX日

中 国 X X出 版 社

202X年 北 京

##

## 前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2022年第二批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2022〕40号）的要求，由同济大学、中国建筑金属结构协会承担《钢结构桥梁疲劳裂缝主动修复技术规程》（以下简称“本规程”）的制订工作。

本规程包括10章和5个附录，主要内容包括总则、术语和符号、基本规定、材料、检测、评估、修复设计、修复施工、质量验收、运维、附录等内容。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利。本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会建筑与市政工程产品应用分会归口管理，由同济大学负责具体技术内容的解释。在执行过程中如有意见或建议，请寄送同济大学（地址：上海市杨浦区四平路1239号同济大学桥梁馆607室，邮政编码：200092）。

**主 编 单 位：**同济大学

 中国建筑金属结构协会

**参 编 单 位：**××××××××××××××

××××××××××××××

××××××××××××××

××××××××××××××

××××××××××××××

**主要起草人：**××× ××× ××× ××× ××× ××× ×××

××× ××× ××× ××× ××× ××× ×××

**主要审查人：**××× ××× ××× ××× ××× ××× ×××

**目次**

[1 总 则 1](#_Toc176175021)

[2 术语和符号 2](#_Toc176175022)

[2.1 术语 2](#_Toc176175023)

[2.2 符号 3](#_Toc176175024)

[3 基本规定 4](#_Toc176175025)

[3.1 一般规定 4](#_Toc176175026)

[3.2 修复设计计算 4](#_Toc176175027)

[4 材料 5](#_Toc176175028)

[4.1 一般规定 5](#_Toc176175029)

[4.2 CFRP片材 5](#_Toc176175030)

[4.3 SMA材料 6](#_Toc176175031)

[4.4 粘贴树脂材料 6](#_Toc176175032)

[4.5 高强螺栓连接副 8](#_Toc176175033)

[5 检测 9](#_Toc176175034)

[5.1 一般规定 9](#_Toc176175035)

[5.2 目视检测 9](#_Toc176175036)

[5.3 渗透检测 9](#_Toc176175037)

[5.4 磁粉检测 10](#_Toc176175038)

[5.5 超声波检测 10](#_Toc176175039)

[6 评估 12](#_Toc176175040)

[6.1 一般规定 12](#_Toc176175041)

[6.2 评估方法 12](#_Toc176175042)

[6.3 评估标准 12](#_Toc176175043)

[7 修复设计 14](#_Toc176175044)

[7.1 一般规定 14](#_Toc176175045)

[7.2 CFRP修复 14](#_Toc176175046)

[7.3 SMA修复 15](#_Toc176175047)

[8 修复施工 17](#_Toc176175048)

[8.1 一般规定 17](#_Toc176175049)

[8.2 表面处理 17](#_Toc176175050)

[8.3 施工工艺 17](#_Toc176175051)

[9 质量验收 20](#_Toc176175052)

[9.1 一般规定 20](#_Toc176175053)

[9.2 验收要求 20](#_Toc176175054)

[10 运维 23](#_Toc176175055)

[10.1 一般规定 23](#_Toc176175056)

[10.2 技术档案管理 23](#_Toc176175057)

[附录A 钢箱梁疲劳裂缝记录表和汇总表 25](#_Toc176175058)

[附录B 钢箱梁疲劳裂缝编码规则及案例 28](#_Toc176175059)

[B.1 裂缝分类说明 28](#_Toc176175060)

[B.2 裂缝编码规则 29](#_Toc176175061)

[用词说明 31](#_Toc176175062)

[引用标准名录 32](#_Toc176175063)

[附：条文说明 33](#_Toc176175063)

**Contents**

[1 General provisions 1](#_Toc176175021)

[2 Terms and symbols 2](#_Toc176175022)

[2.1 terms 2](#_Toc176175023)

[2.2 symbols 3](#_Toc176175024)

[3 Basic regulations 4](#_Toc176175025)

[3.1 general requirements 4](#_Toc176175026)

[3.2 repair design calculation 4](#_Toc176175027)

[4 Materials 5](#_Toc176175028)

[4.1 general requirements 5](#_Toc176175029)

[4.2 cfrp sheets 5](#_Toc176175030)

[4.3 sma materials 6](#_Toc176175031)

[4.4 resin material 6](#_Toc176175032)

[4.5 high strength bolt connection pair 8](#_Toc176175033)

[5 Detection 9](#_Toc176175034)

[5.1 general requirements 9](#_Toc176175035)

[5.2 visual inspection 9](#_Toc176175036)

[5.3 penetrant testing 9](#_Toc176175037)

[5.4 magnetic particle testing 10](#_Toc176175038)

[5.5 ultrasonic testing 10](#_Toc176175039)

[6 Evaluation 12](#_Toc176175040)

[6.1 general requirements 12](#_Toc176175041)

[6.2 evaluation methods 12](#_Toc176175042)

[6.3 evaluation criteria 12](#_Toc176175043)

[7 Repair design 14](#_Toc176175044)

[7.1 general requirements 14](#_Toc176175045)

[7.2 cfrp repair 14](#_Toc176175046)

[7.3 sma repair 15](#_Toc176175047)

[8 Repair construction 17](#_Toc176175048)

[8.1 general requirements 17](#_Toc176175049)

[8.2 surface treatment 17](#_Toc176175050)

[8.3 construction technology 17](#_Toc176175051)

[9 Acceptance 20](#_Toc176175052)

[9.1 general requirements 20](#_Toc176175053)

[9.2 acceptance requirements 20](#_Toc176175054)

[10 Maintenance 23](#_Toc176175055)

[10.1 general requirements 23](#_Toc176175056)

[10.2 technical file management 23](#_Toc176175057)

[Appendix A Record and summary of fatigue cracks in steel box beams 25](#_Toc176175058)

[Appendix B Coding rules and case studies for fatigue cracks in steel box girders 28](#_Toc176175059)

[B.1 crack classification description 28](#_Toc176175060)

[B.2 crack coding rules 29](#_Toc176175061)

[Explanation of wording 31](#_Toc176175062)

[List of quoted standards 32](#_Toc176175063)

[Addition：Explanation of provisions 3](#_Toc176175063)3

# 1 总 则

**1.0.1**为提升钢结构桥梁疲劳裂缝修复效果并延长桥梁服役寿命，指导钢结构桥梁疲劳裂缝修复工作，做到技术先进、安全适用、经济合理、经久耐用，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于公路、市政道路等钢结构桥梁，重点针对钢桥疲劳裂缝修复。

**1.0.3** 钢结构桥梁加固前，应按照有关要求及相关规范对钢结构部分的服役状态、承载能力进行检测、评定，并按照养护工程建设程序要求开展结构加固设计、修复施工和运营维护。

**1.0.4** 钢结构桥梁疲劳裂缝的主动修复，除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

# 2 术语和符号

**2.1 术语**

**2.1.1** 钢结构桥梁 Steel bridge

桥梁上部结构的主要承重部分由钢材制成，包括钢板梁桥、钢箱梁桥、组合梁桥、钢桁梁桥和钢拱桥，以下简称“钢桥”。

**2.1.2** 碳纤维增强复合材料 Carbon fiber reinforcement polymer

由连续碳纤维或碳纤维织物为增强相，聚合物树脂为基体相，两相材料通过复合工艺组合而成的聚合物基复合材料，简称碳纤维复材(CFRP)。适用于本标准为碳纤维片材和碳纤维布。

**2.1.3** 粘贴树脂材料 Resins

包括加固时用于粘贴并浸透碳纤维布的浸渍树脂和用于在基材上粘结碳纤维片材和形状记忆合金的结构胶粘剂。

**2.1.4** 形状记忆合金 Shape memory alloy

一种由两种以上金属元素构成，通过马氏体相变及其逆变而具有形状记忆效应的新型功能材料，以下简称合金SMA。

**2.1.5** 主动修复Proactive repair

通过对构件或局部开裂部位施加预应力的方式进行裂缝修复，以提升裂缝修复效率，延长钢桥使用寿命。

**2.1.6** 被动修复 Passive repair

在钢桥局部开裂部位增设补强材料后，利用补强材料与母材共同变形而被动受力来共同承担活载，以达到裂缝修复的目的。

**2.1.7** 局部修复 Local repair

在局部开裂部位通过去除或降低裂缝尖端的应力集中，以提高裂缝附近的局部刚度和强度来延长钢桥的使用寿命。

**2.1.8** 母材裂缝 Base material crack

疲劳过程中沿着母材扩展的裂缝。

**2.1.9** 热激活 Thermal activation

通过热量输入来激发SMA材料相变反应的过程。

**2.1.10** 回复力 Recovery stress

SMA形变受约束时由于热激活导致的逆相变所产生的能量会以力的形式存在，该力称为回复力。

**2.1.11** 预应变 Pre-strain

SMA材料做预拉伸处理时伸长量与材料原有长度之比。

**2.2 符号**

λ——疲劳裂缝重要性系数

*ai*（*i*=1,2,3）——疲劳裂缝长度因素对应的分值

*bj*（*j*=1,2,3）——疲劳裂缝扩展速率因素对应的分值

*ck*（*k*=1,2,3）——疲劳裂缝尖端位置因素对应的分值

*D*——止裂孔直径

*L*f——CFRP片材沿纤维方向粘贴长度

*E*f——CFRP片材弹性模量

*t*f——CFRP片材计算厚度

*f*v——胶层抗剪强度

*B*f——CFRP片材沿宽度粘贴长度

*B*c——疲劳裂缝长度，若打孔则为两侧止裂孔边缘之间的长度

*B*0——CFRP片材超出裂缝区域的延伸长度

# 3 基本规定

**3.1 一般规定**

**3.1.1** 钢桥疲劳裂缝修复设计应与实际施工方法紧密结合，采取有效措施，确保补强材料与原结构连接可靠、协同受力，且应避免对未加固部分（其他构件或部件）造成不利影响。

**3.1.2** 制定钢桥疲劳裂缝修复方案时应遵循以下几点原则：

1 宜消除裂缝不利影响，确保结构性能达到开裂前水准；

2 对原结构不产生新的损伤或尽量减少损伤；

3 修复构造措施耐久性满足要求；

4 尽量降低对交通运营的干扰；

5 尽可能不影响原结构的外观。

**3.1.3** 修复设计使用年限宜遵循《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64相关规定。

**3.1.4** 对特大桥、大桥主要承重构件钢结构疲劳裂缝修复时，应做多方案的技术、经济、交通影响性比选。

**3.1.5** 在修复设计使用年限内，未经技术鉴定或设计许可，不得改变修复后结构的用途和使用环境。

**3.1.6** 规模较大或技术复杂的钢桥裂缝修复工程宜根据需要开展技术咨询、过程监测等第三方服务。

**3.2 修复设计计算**

**3.2.1**  钢结构修复设计承载能力和使用性能应满足原设计荷载标准要求，同时采用现行设计标准进行复核。

**3.2.2** 加固设计可采用线弹性分析方法计算结构的作用效应，并参照有关要求和相关规范对不同作用进行最不利组合。 除特殊规定外，各作用应采用标准值，作用分项系数应取为1.0。

**3.2.3** 疲劳荷载计算模型宜按照《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64相关规定执行。有特殊使用要求的桥梁，其荷载标准、加固设计基准期、功能要求应通过专项研究确定，并满足《公路桥涵设计通用规范》JTG D60和《城市桥梁设计规范》CJJ 11相关规定。

**3.2.4** 修复加固计算时，应考虑分阶段受力，在新加构件与原结构（构件）未有效结合前，其恒载（含新加材料重量）应由原结构截面承担，同时应充分考虑已开裂位置的卸载效应；有效结合后施加的荷载（恒载、活载、附加荷载）由加固后的组合截面承担。

# 4 材料

**4.1 一般规定**

**4.1.1** 本规程所涉及的工程材料包括CFRP材料、SMA材料、粘贴树脂材料、高强螺栓连接副等。

**4.1.2** CFRP材料和粘贴树脂材料应具有质检部门出具的安全性鉴定报告和产品合格证，SMA材料应具有质检部门的产品安全性能检测报告和产品合格证；当采用粘贴方式进行修复时，对配套的粘结树脂材料还应提供耐湿热老化性能指标及施工和使用环境要求，具体指标参照第4.4节。

**4.1.3** 采用外贴CFRP材料或SMA材料进行裂缝修复时，修复完成后的结构表面应进行防护处理。当修复对象处于特殊环境条件时，应根据具体情况选择表面防护材料（防腐材料、防火材料、防紫外线老化材料等）。

**4.1.4** CFRP材料出厂前应对外观、拉伸强度、拉伸弹性模量、断裂伸长率和密度进行出厂检验；SMA材料出厂前应对外观、抗拉强度、屈服强度、弹性模量和拉伸回复力进行出厂检验；粘结树脂材料出厂前应对外观、适用期、钢对钢拉伸抗剪强度进行出厂检验。

**4.1.5** CFRP材料应按工程用量一次进场到位。进场时，施工单位应会同监理人员对其品种、级别、型号、规格、包装、标志、产品合格证和出厂检验报告等进行检查，同时尚应对下列重要性能和质量指标进行见证取样复验：

1 纤维复合材的抗拉强度标准值、弹性模量和极限伸长率；

2 纤维织物（CFRP布）单位面积质量或预成型板（CFRP板）的纤维体积含量；

3 碳纤维织物的K数。

**4.1.6** SMA材料应按工程用量一次进场到位。进场时，施工单位应会同监理人员对其品种、级别、型号、规格、包装、中文标志、产品合格证和出厂检验报告等进行检查，同时尚应对抗拉强度、屈服强度、弹性模量和伸长率等四项重要性能指标进行见证取样复验。

**4.1.7** 粘结树脂材料应按工程用量一次进场到位。进场时，施工单位应会同监理人员对其品种、级别、批号、包装、中文标志、产品合格证、出厂日期和出厂检验报告等进行检查，同时应对其钢-钢拉伸抗剪强度、耐湿热老化性能等重要性能指标以及不挥发物含量进行见证取样复验；对抗震设防烈度为7度及7度以上地区使用的粘接树脂材料尚应进行抗冲击剥离能力的见证取样复验，若分批进场时，每批次进场均需进行相关检查和复检。

**4.2 CFRP片材**

**4.2.1** CFRP片材包括CFRP布和CFRP板。

**4.2.2** 裂缝修复用CFRP片材应符合《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728相关性能指标要求。

表4.2.2 CFRP片材主要力学性能指标

|  |  |
| --- | --- |
| 检验项目 | 鉴定合格指标 |
| CFRP布 | CFRP板 |
| 高强I级 | 高强II级 | 高强I级 | 高强II级 |
| 抗拉强度标准值（MPa） | ≥3400 | ≥3000 | ≥2400 | ≥2000 |
| 受拉弹性模量（GPa） | ≥230 | ≥200 | ≥160 | ≥140 |
| 伸长率（%） | ≥1.6 | ≥1.5 | ≥1.6 | ≥1.4 |
| 弯曲强度（MPa） | ≥700 | ≥600 | \_\_ | \_\_ |
| 层间剪切强度（MPa） | ≥45 | ≥35 | ≥50 | ≥40 |
| CFRP片材与基材正拉粘接强度（MPa） | 对钢基材：≥3.5，且不得为粘附破坏 |
| 单位面积质量（g/m2） | 人工粘贴 | ≤300 | \_\_ |
| 真空灌注 | ≤450 | \_\_ |
| 纤维体积含量（%） | \_\_ | ≥65 | ≥55 |

**4.3 SMA材料**

**4.3.1** SMA材料包括镍钛铌SMA丝材（以下简称NiTiNb-SMA）、镍钛SMA板材（以下简称NiTi-SMA）和铁基SMA板材（以下简称Fe-SMA），应符合国家现行有关产品标准的规定。

**4.3.2** 裂缝修复用SMA力学性能应符合表4.3.2的规定。

 表4.3.2 SMA主要力学性能指标

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 类型 | 屈服强度标准值（MPa） | 抗拉强度标准值（MPa） | 弹性模量（GPa） | 伸长率（%） | 回复力（MPa） |
| NiTiNb-SMA | ≥400 | ≥800 | ≥60 | ≥30 | ≥400（室温）≥200（-50℃~50℃） |
| NiTi-SMA | ≥350 | ≥700 | ≥50 | ≥30 | / |
| Fe-SMA | ≥400 | ≥800 | ≥150 | ≥35 | ≥240（室温）≥200（-50℃~50℃） |

**4.4 粘贴树脂材料**

**4.4.1** 粘贴树脂材料包括浸渍树脂、结构胶粘剂，必要时应根据使用环境的不同选用耐高温树脂和耐介质腐蚀树脂等。

**4.4.2** 钢结构桥梁裂缝修复用粘贴树脂材料宜选用环氧树脂或乙烯基酯树脂，不得使用不饱和聚酯或醇酸树脂。

**4.4.3** 所用粘结树脂材料应符合《纤维增强复合材料加固修复钢结构技术规程》YB/T4558性能指标要求。

**4.4.4** 浸渍树脂和结构胶粘剂玻璃化转变温度*T*g不应低于60℃，处于特殊环境的钢桥采用粘贴方式时，应选用耐介质腐蚀结构胶。当采用SMA粘贴修复时，结构胶玻璃化转变温度*T*g不应低于75℃。

**4.4.5** 采用CFRP片材对钢桥疲劳裂缝进行修复时，应采用与CFRP片材配套浸渍树脂或结构胶粘剂；采用SMA材料进行修复时，可根据设计要求选用耐高温粘钢结构胶。

表4.4.5 结构胶粘剂主要性能指标

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 检验项目 | 检验条件 | 技术指标 |
| 粘贴SMA材料 | 粘贴CFRP片材 |
| 胶体性能 | 抗拉强度（MPa） | 试件浇筑毕养护至7d，到期立即在（23±2）℃、（50±5）%RH条件下测试 | ≥50 | ≥50 |
| 受拉弹性模量（GPa） | ≥4 | 涂布胶：≥3.3；压注胶：≥2.5 |
| 伸长率（%） | ≥1.5 | 涂布胶：≥1.7；压注胶：≥2.0 |
| 抗弯强度（MPa） | ≥50,且不得呈碎裂状破坏 | ≥50,且不得呈碎裂状破坏 |
| 抗压强度（MPa） | ≥65 | ≥65 |
| 粘结能力 | 钢对钢拉伸抗剪强度（MPa） | 标准值 | 试件粘合后养护7d，到期立即在（23±2）℃、（50±5）%RH条件下测试 | ≥20 | ≥17 |
| 平均值 | （-45±2）℃；30min | ≥20 | ≥19 |
| 钢对钢对接接头抗拉强度（MPa） | 试件粘合后养护7d，到期立即在（23±2）℃、（50±5）%RH条件下测试 | ≥40 | ≥45 |
| 钢对钢T冲击剥离长度（mm） | ≤10 | ≤10 |
| 钢对钢不均匀扯离强度（kN/m） | ≥30 | ≥30 |
| 热变形温度（℃） | 使用0.45MPa弯曲应力的B法 | ≥65 | ≥65 |

表4.4.6 结构胶粘剂耐久性能指标

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 检验项目 | 检验条件 | 合格指标 |
| 耐环境作用 | 耐湿热老化能力 | 在50℃、95%RH环境中老化90d后，冷却至室温进行钢对钢拉伸抗剪强度试验 | 与室温下短期实验结果相比，其抗剪强度降低率（%）：不大于12% |
| 耐热老化能力 | 在（60±2）℃恒温环境中老化90d后，以同温度进行钢对钢拉伸抗剪强度试验 | 与同温度短期实验结果相比，其抗剪强度平均降低率（%）不大于5% |
| 耐冻融能力 | 在-25℃⇋35℃冻融循环温度下，每次循环 8h，经50次循环后，在室温下进行钢对钢拉伸抗剪强度试验 | 与室温下短期实验结果相比，其抗剪强度平均降低率（%）不大于5% |
| 耐应力作用能力 | 耐长期应力作用能力 | 在最高使用温度下，承受5.0MPa剪应力，持续作用210d | 钢对钢拉伸抗剪试件不破坏，且蠕变的变形值小于0.4mm |
| 耐疲劳作用能力 | 在室温下，以频率为5Hz、应力比为5:1、最大应力为5.0MPa的疲劳荷载下进行钢对钢拉伸抗剪试验 | 经5×106次等幅正弦波疲劳荷载作用后，试件为破坏 |

表4.4.7 结构胶粘剂耐介质侵蚀性能指标

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 检验性能 | 介质环境及处理要求 | 与对照组相比强度下降率（%） | 处理后的外观质量要求 |
| 耐盐雾作用 | 5%NaCl溶液；喷雾压力0.08MPa；试验温度（35±2）℃；每0.5h喷雾一次，每次0.5h；盐雾应自由沉降在试件上；作用持续时间90d；到期进行钢对钢拉伸抗剪强度试验 | ≤5 | 不得有裂纹或脱胶 |
| 耐碱性介质作用 | Ca(OH)2饱和溶液；试验温度（35±2）℃；浸泡时间60d；到期进行钢对混凝土正拉粘结强度试验 | 不下降，且为混凝土破坏 | 不得有裂纹、剥离或起泡 |
| 耐酸性介质作用 | 5%H2SO4溶液；试验温度（35±2）℃；浸泡时间30d；到期进行钢对混凝土正拉粘结强度试验 | 混凝土破坏 | 不得有裂纹或脱胶 |

**4.4.6**粘贴树脂材料施工温度宜控制在0℃以上，若确需在0℃以下施工，施工现场应采取适合有效的升温措施。对于寒冷地区施工环境，应采用低温固化粘贴树脂材料，并通过耐冻融能力检验。

**4.5 高强螺栓连接副**

**4.5.1** 高强度螺栓连接副指的是高强度螺栓和与之配套的螺母、垫圈的总称。

**4.5.2** 高强度螺栓的质量及检验应符合现行《钢结构用高强度大六角头螺栓》GB/T 1228、《钢结构用高强度大六角螺母》GB/T 1229、《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》GB/T 3632、《钢结构用高强度垫圈》GB/T 1230和《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》GB/T 1231的规定。

# 5 检测

**5.1 一般规定**

**5.1.1** 钢桥疲劳裂缝检测前应收集钢桥设计施工图纸、竣工资料、历史检测记录、养护报告等资料。

**5.1.2** 钢桥疲劳裂缝的检测方法包括目视检测和无损检测。局部目视检测不确定时应进行渗透、磁粉或超声波等无损检测方法进行验证。

**5.1.3** 疲劳裂缝检测应委托专业检测机构承担，检测频率应按照有关要求及相关规范的规定执行，检测部位应覆盖钢桥所有构件、连接节点及焊缝等部位。

**5.1.4** 现场进行疲劳裂缝检测时，应在相关记录表上记录准确的病害信息以及相关说明，现场检查记录详细说明见附录A。检测结束后应及时对现场记录信息进行整理和电子化，形成电子技术档案。

**5.1.5**  钢桥疲劳裂缝检测时宜根据桥梁结构的特点对裂缝进行科学编码。典型的钢箱梁疲劳裂缝编码方法见本规程附录B。

**5.1.6** 钢桥疲劳裂缝无损检测方法可按照现行国家标准《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621的相关规定执行。

**5.1.7** 检测记录及报告结果应至少包括下列内容：

1 检测基本情况；

2 钢桥现场环境记录表；

3 裂缝数量汇总表；

4 钢桥裂缝分布与展示图；

5 检测结果分析与维修建议。

**5.2 目视检测**

**5.2.1** 人工目视检测时需注意区分涂装开裂和钢结构本体开裂，必要时需结合打磨进行判断。

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

**5.2.3** 进行目视检测时，应配备手电筒、照明灯、相机等观察和记录设备，做好现场记录。

**5.2.4** 针对重要焊缝部位或可疑部位，宜采用5倍放大镜进行检查。

**5.3 渗透检测**

**5.3.1** 钢桥疲劳裂缝渗透检测宜按照现行国家标准《无损检测渗透检测第1部分:总则》GB/T 18851.1、《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621的相关规定执行。

**5.3.2** 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，且应符合现行国家标准《无损检测渗透检测第2部分:渗透材料的检验》GB/T 18851.2规定。

**5.3.3** 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。

**5.3.4** 渗透检测流程宜按下图5.3.4开展。

****

图5.3.4 渗透检测流程

**5.4 磁粉检测**

**5.4.1** 钢桥疲劳裂缝磁粉检测宜按现行国家标准《焊缝无损检测 磁粉检测》GB/T 26951、《焊缝无损检测 焊缝磁粉检测 验收等级》GB/T 26952、《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621的相关规定执行。

**5.4.2** 磁粉检测之前，应对焊缝及热影响区进行打磨，清除飞溅、铁锈等，然后在探伤部位均匀喷涂反差增强剂，对磁粉探伤仪进行灵敏度测试后，对试件进行磁化并喷洒磁悬液观察磁痕。

**5.4.3** 钢桥疲劳裂缝磁粉检测宜采用油性磁悬液。

**5.4.4** 磁粉检测流程宜按图5.4.4开展。



图5.4.4 磁粉检测流程

**5.5 超声波检测**

**5.5.1** 超声波检测可采用常规超声波检测、超声衍射时差法检测 (TOFD) 以及超声相控阵检测等技术，应根据待检部位特征和方法适用性选择不同的检测技术。

**5.5.2** 采用常规超声波检测技术时，宜按现行国家标准《焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定》GB/T 11345、现行行业标准《钢结构超声波探伤及质量分级法》JG/T 203的相关规定执行。

**5.5.3** 采用超声相控阵检测技术时，仪器设备宜符合《无损检测仪器 相控阵超声设备的性能与检验 第1部分:仪器》GB/T 42399.1和《无损检测仪器 相控阵超声设备的性能与检验 第2部分:探头》GB/T 42399.2的有关规定。

**5.5.4** 超声波检测流程宜按图5.5.4开展。



图5.5.4 超声波检测流程

# 6 评估

**6.1 一般规定**

**6.1.1** 疲劳裂缝修复之前应对每一类疲劳裂缝进行评估。

**6.1.2** 评估应包括疲劳裂缝的状况调查（历史、工况、环境等）、裂缝特征、裂缝成因分析以及必要的试验与计算等。

**6.1.3** 疲劳性能评定宜根据构造特征及受力情况区分重点位置和次要位置，重点位置及次要位置宜符合下表6.1.1的规定。

表6.1.1 钢桥疲劳重点区域和次要区域

|  |  |
| --- | --- |
| **分类** | **说明** |
| 重点位置 | 轮迹线正下方位置 |
| 主梁下翼缘对接连接位置 |
| 纵肋嵌补段连接位置 |
| 隔板与节点板交接位置 |
| 钢板组合梁下翼缘 |
| 次要位置 | 非迹线正下方位置 |
| 横隔板 |
| 纵隔板 |

**6.1.4**  对于特殊、异常情况，评估应通过专家论证。

**6.2 评估方法**

**6.2.1** 疲劳裂缝评估宜采用裂缝现场跟踪方法进行动态评估。

**6.2.2** 现场跟踪与定期检查相结合，宜采用目视检测或自动化监测设备跟踪监测。

**6.2.3** 应根据现场跟踪观测结果对疲劳裂缝进行阶段性评估。

**6.2.4** 其他评估方法可经论证后实施。

**6.3 评估标准**

**6.3.1** 疲劳裂缝等级划分建议按疲劳裂缝重要性系数λ作为评估指标，按下式计算：

$λ=\frac{1}{9}\left(a\_{i}+b\_{j}+c\_{k}\right)$ （6.3.1）

式中 *ai*（*i*=1,2,3）—疲劳裂缝长度因素对应的分值，见表6.3.1-1；

 *bj*（*j*=1,2,3）—疲劳裂缝扩展速率因素对应的分值，见表6.3.1-2；

 *ck*（*k*=1,2,3）—疲劳裂缝尖端位置因素对应的分值，见表6.3.1-3。

表6.3.1-1 疲劳裂缝长度因素

|  |  |
| --- | --- |
| **长度（mm）** | **分值*ai*** |
| [0,100] | 1 |
| (100,150] | 2 |
| >150  | 3 |

表6.3.1-2 疲劳裂缝扩展速率因素

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

表6.3.1-3 疲劳裂缝尖端位置因素

|  |  |
| --- | --- |
| **尖端位置** | **分值*ck*** |
| 位于焊趾/焊根 | 1 |
| 位于焊缝高度内 | 2 |
| 位于母材 | 3 |

**6.3.2** 根据疲劳裂缝重要性系数，将疲劳裂缝分为A、B、C三级，见表6.3.2。

表6.3.2 疲劳裂缝等级划分

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **λ** | **评估等级** | **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 |

**6.3.3** 对于修复后继续扩展的疲劳裂缝，可参照本章评估方法执行。

# 7 修复设计

**7.1 一般规定**

**7.1.1** 本规程中钢桥疲劳裂缝修复设计均属于局部修复。裂缝修复设计应根据钢桥疲劳裂缝所在位置和特征合理选材，选择正确的施工工艺和方法，构造设计应力求简洁、传力直接明确，不引起过大的应力集中。

**7.1.2** 钢桥裂缝修复宜在疲劳开裂部位两侧实施补强，母材等平整的开裂部位宜采用CFRP板材或SMA材料进行修复，当裂缝修复可操作空间较小且需施加局部预应力时，宜优先选用SMA板材进行修复；焊缝等不平整的开裂部位宜采用粘贴CFRP布进行修复。

**7.1.3** 对于发展至构件母材的疲劳裂缝，宜在距离裂缝尖端0.5D～D处钻一个止裂孔后与其他修复方法组合使用。疲劳裂缝长度小于150mm时，宜钻取直径12～14mm的止裂孔；长度大于150mm后宜钻取直径18mm的止裂孔。

**7.1.4** 修复后的钢构件宜根据被修复部位的降低后应力状态进行疲劳验算。

**7.2 CFRP修复**

**7.2.1** CFRP片材修复包括无预应力CFRP粘贴修复和预应力CFRP板修复，可根据钢桥结构和病害特点选择合理修复方式。

**7.2.2** 进行裂缝修复设计时，宜采用粘贴CFRP片材修复，纤维方向宜垂直于构件既有裂缝的扩展方向或平行于应力集中处的主拉应力方向。

**7.2.3** 粘贴CFRP片材应完全覆盖疲劳裂缝（图7.2.3），其中沿纤维方向粘贴长度和沿宽度粘贴长度可按下列公式计算：

 （7.2.3-1）

 （7.2.3-2）

式中 *L*f——CFRP片材沿纤维方向粘贴长度；

 *E*f——CFRP片材弹性模量；

 *t*f——CFRP片材计算厚度；

 *f*v——胶层抗剪强度；

 *B*f——CFRP片材沿宽度粘贴长度；

 *B*c——疲劳裂缝长度，若打孔则为两侧止裂孔边缘之间的长度；

 *B*0——CFRP片材超出损伤的延伸长度，不少于100mm；



图7.2.3 CFRP片材有效粘贴范围

**7.2.4** 采用粘贴CFRP布或CFRP板进行裂缝修复时，应符合下列规定：

1 粘贴CFRP布的单位面积质量不应低于200g/m2，不宜高于300g/m2。

2 CFRP布层数应根据具体情况进行合理选择，一般情况下，层数不多于4层。

3 一般情况下CFRP布不宜搭接，若CFRP布确需搭接时,其搭接部位应避开构件应力较大区段，CFRP布沿纤维方向搭接长度不宜小于150mm，且各条带搭接位置应相互错开。

4 CFRP板材厚度不应小于1.0mm，不宜大于2.0mm。

5 对于长裂缝，若单条CFRP板无法覆盖疲劳裂缝，可采用多条CFRP板组合使用。

**7.2.5** 采用预应力CFRP板修复钢桥疲劳裂缝时，应符合下列规定：

1 预应力CFRP板材宽度不宜大于100mm。

2 预应力CFRP板的张拉控制应力建议值为0.25～0.50。

3 锚固区域应尽量设置在受力较小处，应避开结构受力较大的关键部位。

4 锚具设计应满足安全可靠、受力明确、施工简便等要求。

**7.3 SMA修复**

**7.3.1** SMA修复包括CFRP/NiTiNb-SMA丝组合贴片修复和Fe-SMA板修复，可根据钢桥结构和病害特征选择合理修复方式。



图7.3.1 SMA修复

**7.3.2** SMA首先需进行预拉伸处理。采用NiTi-SMA和NiTiNb-SMA丝材时，建议预应变为10%～16%；采用Fe-SMA板时，建议预应变为4%～6%。

**7.3.3** 热激活SMA时，建议加热温度为160℃～200℃。加热设备可采用热风枪或电炉子，加热激活区域为中间带修复裂缝区域两侧各25～50mm。

**7.3.4** 为避免粘贴锚固区域失效，加热期间需对两侧锚固区域进行隔热或降温处理。

**7.3.5** 采用SMA修复时，不宜搭接，应按设计尺寸一次完成下料。

**7.3.6** 采用NiTiNb-SMA丝材时，应符合下列规定：

1 应配合CFRP布一起使用，丝材的埋置方向与纤维方向一致。

2 丝材直径不宜小于1.0mm，丝材布置间距宜为1.0mm。

3 丝材根数应根据裂缝区域特征选取。

4 完成激活后宜再粘贴一层CFRP布，CFRP布要求应满足本规程相关规定。

**7.3.7** 采用Fe-SMA板材时，应符合下列规定：

1 Fe-SMA板材厚度不宜小于2.0mm；

2 粘接Fe-SMA板材胶层厚度宜为2.0～3.0mm。

3 Fe-SMA的粘贴锚固长度不宜小于150mm。

4 对于长裂缝，若单条合金板无法覆盖疲劳裂缝区域，可采用多条合金板组合使用。

5 栓接Fe-SMA板时，高强螺栓数量需特别计算，对于复杂构造宜采用有限元计算。

# 8 修复施工

**8.1 一般规定**

**8.1.1** 钢桥疲劳裂缝修复在施工前应进行全面检测，检测方法及比例应符合本规程第5章检测的条文规定，并根据检测结果及设计要求编制施工技术方案，施工工艺应符合本章的规定。

**8.1.2** 钢桥疲劳裂缝修复施工如需在箱内作业的，应根据有限空间作业规定先进行通风检测，检测合格后方可进场作业。

**8.1.3** 修复施工前应依据施工方案准备好加固材料、施工机具和施工平台等，修复用材料应具有产品合格证、检测报告等，并符合本规程第4章材料的条文规定。

**8.1.4** 配制结构胶时应严格按产品使用说明书规定的配比进行配制，应使用电动搅拌器使其搅拌均匀、无气泡，使用时需严格控制施胶时间，如修复工作量较大应按需要分批配置。

**8.1.5** 采用粘贴补强材料进行疲劳裂缝修复时，施工环境的温度不宜低于5℃，否则需采用低温固化型的结构胶粘剂或采取加温措施。

**8.1.6** 修复材料具有导电性，施工操作时应远离电气设备及电源，避免与周围的电器设备接触，发生触电事故。

**8.2 表面处理**

**8.2.1** 采用粘贴补强材料进行裂缝修复之前，钢基材表面处理应符合下列规定：

1 宜采用打磨机、砂纸等工具对裂缝待修复区域进行表面处理，去除表面涂层、铁锈等以使钢表面露出金属光泽，打磨方向应与受力方向垂直，手工除锈应达到St3.0级。

2 可使用直磨机、角磨机等工具使表面产生粗糙度，然后清除碎屑和粉尘。有条件时宜采用喷砂方法处理，喷砂除锈应达到Sa2.5级，粗糙度为Rz30μm～50μm。

3 涂胶前应对粘胶面进行清洗（酒精/稀释剂），干燥后方可涂胶作业。

**8.2.2** 表面处理后的钢基材应立即进行粘贴修复，停放时间不宜超过4小时。

**8.2.3** 采用栓接补强材料进行裂缝修复之前，栓接板面、螺栓孔应干净、干燥、平整，高强螺栓连接摩擦面的抗滑移系数宜满足设计要求。

**8.2.4** 补强材料表面应确保清洁无污染，其中CFRP材料应用干净的布将纤维布表面的灰尘擦净，SMA材料应清除表面的铁锈、油漆或其他污渍。

**8.3 施工工艺**

**8.3.1** 钻止裂孔的实施步骤如图8.3.1所示，施工工艺应符合下列规定：

1 钻孔设备可用手电钻或磁座钻，应优先使用磁座钻。

2 可先用小直径钻头进行“定位孔”标记，然后再用大直径钻头钻孔。

3 钻孔时保证钻孔方向垂直于钢板表面，且不应对附近其它部位造成损伤。

4 钻孔后应对孔壁清除毛刺，确保止裂孔内光滑无缺陷。

5 对于贯穿型疲劳裂缝，钻孔应从裂缝较长一侧的表面进行。



图8.3.1 钻止裂孔实施流程

**8.3.2** 采用外贴CFRP布修复钢桥疲劳裂缝时，应按下列步骤和要求进行：

1 按8.2条文进行表面处理，如需钻止裂孔则按8.3.1条文执行。

2 采用电动剪刀按设 计要求尺寸裁剪CFRP布。

3 配制并涂刷配套的纤维浸渍胶。

4 粘贴CFRP布时应采用滚轮顺纤维方向进行多次滚压，使浸渍树脂充分浸透CFRP布，确保表面没有任何气泡。

5 多层粘贴时应重复第3和第4步骤，并应在纤维表面的浸渍胶指触干燥后尽快进行下一层粘贴，最后一层纤维布的表面也应均匀涂抹纤维浸渍胶，加压养护。

6 根据现场环境要求进行表面防护。

**8.3.3** 采用外贴CFRP板材时，施工步骤与8.3.2条文类似，但需注意以下几点要求：

1 对于表面没有保护膜的纤维增强复合材料板，应先采用中等目径的细砂纸或喷砂处理来增加表面的粗糙度。

2 涂胶时粘贴区域中部涂胶量略多，边缘区域略少。

3 CFRP板材端部形成溢胶，避免应力集中。

**8.3.4** 采用CFRP/NiTiNb-SMA丝组合贴片修复，应按下列步骤和要求进行：

1 按设计尺寸切割NiTiNb-SMA丝材和CFRP布，并进行预拉伸处理；

2 按8.2条文进行表面处理，如需钻止裂孔则按8.3.1条文执行；

3 配制并涂刷配套的结构胶，将NiTiNb-SMA丝粘贴到指定位置，然后粘贴两侧锚固区CFRP布，并用刮板按压清除多余胶水，宜加压静置3天待胶水固化；

4 使用加热设备对NiTiNb-SMA丝加热激活到设定温度，加热时应充分均匀加热，停止加热并等待冷却至室温；

5 在SMA丝表面在覆盖粘贴1层CFRP布,确保CFRP布表面被胶黏剂充分浸润。

6 根据现场环境要求进行表面防护。

**8.3.5** 采用粘贴Fe-SMA板材时，应按下列步骤和要求进行：

1 按设计尺寸切割Fe-SMA板材，并进行预拉伸处理；

2 按8.2条文进行表面处理，如需钻止裂孔则按8.3.1条文执行；

3 配制并均匀涂刷结构胶黏剂，涂胶时粘贴区域中部涂胶量略多，边缘区域略少；

4 粘贴Fe-SMA板材并挤压多余胶水，加压静置3天待胶水固化；

5 使用加热设备对Fe-SMA板材加热激活到设定温度，加热时应充分均匀加热，停止加热并等待冷却至室温；

6 根据现场环境要求进行表面防护。

**8.3.6** 采用栓接Fe-SMA板材时，应按下列步骤和要求进行：

1 按8.2条文进行表面处理，如需钻止裂孔则按8.3.1条文执行；

2 安装固定Fe-SMA板材，用扭矩扳手或专用工具施拧高强螺栓，确保终拧扭矩符合要求，并不得出现板材滑动；

3 使用加热设备对Fe-SMA板材加热激活到设定温度，加热时应充分均匀加热，停止加热后等待冷却至室温；

4 根据现场环境要求进行表面防护。

# 9 质量验收

**9.1 一般规定**

**9.1.1** 钢桥疲劳裂缝修复施工的过程控制和施工质量检验，除应执行本标准外，尚应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205和《公路养护工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》JTG 5220中相关规定。在进行试验研究后，可进一步提出具体的验收标准。

**9.1.2** 疲劳裂缝修复作业后质量验收，应先进行外观验收，要求如下：

1 钢桥构件周围环境应整洁，无积水、垃圾、杂物等；

2 构件、连接部位及螺栓无腐蚀、开裂或局部变形等情况；

3 涂装应遵循相关的施工规范和标准，确保涂层质量；涂装验收包括外观检查、涂层厚度测量和附着力测试。

**9.1.3** 钢桥疲劳裂缝修复工程验收应具备以下资料：

1 工程概况及疲劳裂缝检测评估报告；

2 裂缝修复设计文件；

3 施工资料，包括施工组织设计、施工工艺及过程质量控制记录、材料和工程量统计、加固修复后图纸等；

4 监理资料，过程控制记录；

5 原材料检测报告、现场质量检验报告等。

**9.2 验收要求**

**9.2.1** 钻止裂孔施工质量检验及验收标准应符合下列规定：

1 钻孔结束后应立即进行检查，确保裂缝尖端已经彻底去除。 若仍残留裂缝尖端，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，直到裂缝尖端去除。

2 钻孔技术参数允许误差不应超过1mm。

3 孔边缘应平整光滑、无杂物、无尖锐毛刺。

**9.2.2** 采用粘贴补强材料进行钢桥疲劳裂缝修复时，外观质量应符合下列规定：

1 CFRP板材、SMA板材各边缘胶体饱满无空洞。

2 CFRP布无起泡，表面浸渍胶无漏涂、流挂、起皮。

**9.2.3** 粘贴CFRP片材施工质量检验及验收标准应满足下列规定

1 所用的CFRP片材、结构胶黏剂等材料的品种、规格和质量应符合相关技术规范的规定并满足设计要求。

2 CFRP片材粘贴质量见表9.2.3要求。

表9.2.3 CFRP片材粘贴质量检验实测项目

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **项次** | **检验项目** | **合格标准** | **检验方法** | **频数** |
| 1 | CFRP布粘贴误差 | 中心线偏差≤10mm | 钢尺测量 | 全部 |
| 2 | CFRP布粘贴数量 | ≥设计数量 | 计算 | 全部 |
| 3 | 粘贴质量 | 空鼓面积之和与总粘贴面积之比 | 小于5% | 小锤敲击法 | 全部或抽样 |
| 结构胶厚度 | 板材 | 2mm±1.0mm | 钢尺测量 | 每构件3处 |
| 布材 | ＜2mm |
| 硬度（布材） | ＞70HRC | 测量 | - |

**9.2.4** 粘贴Fe-SMA板材施工质量检验及验收标准应满足下列规定：

1 所用的Fe-SMA板、结构胶等材料的品种、规格和质量应符合相关技术规范的规定并满足设计要求。

2 Fe-SMA板材粘贴质量见表9.2.4要求。

表9.2.4 Fe-SMA板材粘贴质量检验实测项目

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **项次** | **检验项目** | **合格标准** | **检验方法** | **频数** |
| 1 | 粘贴误差 | 中心线偏差≤5mm | 钢尺测量 | 全部 |
| 2 | 粘贴数量 | ≥设计数量 | 计算 | 全部 |
| 3 | 粘贴质量 | 空鼓面积之和与总粘贴面积之比 | 小于5% | 小锤敲击法 | 全部或抽样 |
| 结构胶厚度 | 误差±0.5mm | 钢尺测量 | 每构件3处 |

**9.2.5** 栓接Fe-SMA板施工质量检验及验收标准应满足下列规定：

1 高强螺栓连接副的规格、质量、扭矩系数应满足设计要求并符合相关规范的规定，施拧扳手应标定，标定扭矩偏差不得大于使用扭矩的5％。

2 Fe-SMA板的材质、规格、质量应满足设计要求。

3 现场处理的高强度螺栓摩擦面，应按照现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205的规定进行摩擦面抗滑移系数试验，其结果应符合设计要求。

4 Fe-SMA板与连接构件板面之间的间隙处理应符合相关技术规范的规定。

5 高强螺栓的施拧顺序和初拧、终拧扭矩应满足设计要求，并符合现行标准《钢结构高强度螺栓连接技术规程》JGJ 82的相关规定。

# 10 运维

**10.1 一般规定**

**10.1.1** 应定期对疲劳裂缝修复部位进行跟踪观测，建议频次为每个月1次，跟踪观测时间不少于12个月。

**10.1.2** 钢桥疲劳裂缝修复后，每个月对修复处裂缝进行1次外观检查，内容如下：

1 加固系统可靠性：补强材料是否脱胶，高强螺栓是否松动；

2 裂缝的发展趋势：裂缝是否沿止裂孔孔边扩展，或绕过止裂孔扩展等；

3 裂缝的发展速度：记录裂缝扩展长度，计算发展速率；

**10.1.3** 建议采取数字化监测方式对特殊重要部位进行分类监测，重点关注：初始病害较多、裂缝长度增长较快及数量激增的梁段区域。

**10.2 技术档案管理**

**10.2.1** 桥梁管理（养护）单位应当按照“一桥一档”建立钢桥裂缝修复技术档案。

**10.2.2** 裂缝修复技术档案应至少包括以下内容：

1 裂缝修复设计施工图及结构计算分析报告；

2 裂缝修复施工过程中试验检测及科研资料；

3 裂缝检测资料；

**10.2.3** 宜建立符合自身特点的钢桥养护信息化管理系统，用以辅助养护工程师开展检测、养护与维修工作。

# 附录A 钢箱梁疲劳裂缝记录表和汇总表

**A.0.1** 检测记录主要包含构造细节、裂缝信息以及检测时间三大要素。若裂缝存在维修，则需给出相应裂缝维修的具体特征，包括对应的维修方法、时间以及裂缝是否进一步扩展。

**A.0.2** 检查步骤可按以下进行：

1 检查钢箱梁内部环境：应确认钢箱梁附属设施是否正常运行、设施有无缺损；

2 检查钢箱梁结构与构造，宜按照构件类型及编号顺序进行；

3 应对存在缺损和病害情况进行说明，并拍照记录，可参照信息卡片记录结果。

**A.0.3** 每一条疲劳裂缝应具有专属的信息记录卡片，同时每一箱室应具有一个箱室疲劳裂缝信息示例表如表A.0.3-1和A.0.3-2所示。其中记录行数可根据需求进行增减。

表A.0.3-1 钢箱梁单条疲劳裂缝信息记录卡

|  |  |
| --- | --- |
|  **钢箱梁单条疲劳裂缝信息记录卡** |  |
| **裂缝编号** | NB10-L-HG2-100-U15 |
| **检测时间** | **裂缝类型** | **裂缝特征** | **备注** | **检测单位** | **签字** |
| **21年1月1日** | DZ3 | L=30cm | 未扩展 | XXX | XXX |
| **年 月 日** |  |  |  |  |  |
| **年 月 日** |  |  |  |  |  |
| **年 月 日** |  |  |  |  |  |
| **年 月 日** |  |  |  |  |  |
| **注：备注应根据实际现场裂缝情况填写“是否扩展”、“是否维护，维护状况如何”** |

表A.0.3-2 一个箱室疲劳裂缝信息记录卡

|  |  |
| --- | --- |
|  **一个箱室疲劳裂缝信息记录卡** |  |
| **检测单位** | XXX检测单位 | **签字复核** | XXX |
| **检测时间** | **裂缝编号** | **裂缝类型** | **裂缝特征** | **备注** |
| **21年1月1日** | NB10-L-HG2-100-U15 | DZ3 | L=30cm | 未扩展 |
| **年 月 日** |  |  |  |  |
| **年 月 日** |  |  |  |  |
| **年 月 日** |  |  |  |  |
| **年 月 日** |  |  |  |  |
| **注：备注应根据实际现场裂缝情况填写“是否扩展”、“是否维护，维护状况如何”** |

**A.0.4** 当完成裂缝信息卡填写后，将疲劳信息卡放入指定位置的磁吸亚克力板卡槽当中，以备下次检测继续填写和长期保存。若填满后可继续插入另一张信息卡。磁吸亚克力板卡槽大小可根据需求进行定制，如图A.0.4所示。



图 A.0.4 磁吸亚克力卡槽示意

**A.0.5** 在对裂缝进行拍照时，拍照视角应处于常规正视视角，确保照片内各个构件能够清楚辨认，同时应确保裂缝在照片里清晰可见（即能看清裂缝走向及尖端大致位置），若整体照片表现不出来裂缝具体特征，则需补拍一张局部裂缝高清晰图片来反映裂缝特征。照片示例如图A.0.5所示。

 

图A.0.5 裂缝照片示例

**A.0.6** 在完成现场检测记录后，需要将裂缝相关信息及现场检测照片汇总于记录表中。记录表应信息齐全、数据真实可靠，具有可追溯性。示例记录表可如表A.0.6所示。

表 A.0.6 裂缝信息检查记录汇总表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 裂缝信息 | 检测结果照片 |
| 1 | 裂缝编号 | NB10-L-HG2-14-U15 | F:\DCIM\372_0518\IMG_3251.JPG |
| 裂缝类型 | DZ3 |
| 长度 | L=30cm |
| 深度 | - |
| 上次检测长度 | L=25cm |
| 备注 | 有扩展5cm |
| 2 | 裂缝编号 |  |  |
| 裂缝类型 |  |
| 长度 |  |
| 深度 |  |
| 上次检测长度 |  |
| 备注 |  |
| 检测人员： 复核人员： 日期： 年 月 日 |

注：

（1）深度一栏若有检测则如实填写，若无则不填；

（2）上次检测长度一栏则填写上次检测裂缝长度（检测时间），若有信息遗漏或者新增裂缝则不填；

（3）备注一栏则填写分为“无扩展”、“有扩展”，并紧跟填写扩展长度；若有维护则填写维护情况，分为“XX维护良好”和“XX维护失效”，XX指具体维护措施，如钻孔、补焊、钢板补强等。

# 附录B 钢箱梁疲劳裂缝编码规则及案例

**B.1 裂缝分类说明**

**B.1.1** 钢箱梁常见疲劳开裂部位主要包括：顶板与纵肋焊缝交叉部位、纵肋对接焊缝、横隔板与纵肋交叉部位、顶板与横隔板焊缝交叉部位、竖向加劲肋焊缝部位等，如图B.1.1所示。



图 B.1.1 钢箱梁常见疲劳损伤构造

**B.1.2** 钢箱梁常见疲劳损伤构造位于以下部位时，为重点检测部位：

1 重车道、快车道，以及车辆轮迹线下方纵肋；

2 纵隔板所在U肋及相邻的纵肋；

3 附属设施（阻尼器、纵隔板等构造）所在梁段；

4 支承设施所在梁段；

5 吊索连接部位。

**B.1.3** 按照焊缝和钢板母材开裂病害所在的区域和开裂特点对其进行分类，钢箱梁典型疲劳裂缝主要形式及特征见表B.3.1所示。

表 B.1.3 钢箱梁典型疲劳裂缝位置分类说明

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **裂缝分类** | **裂缝描述** | **位置示意图** |
| DZ | 1 | 裂缝萌生自焊根并沿顶板发展 |  |
| 2 | 裂缝萌生自焊趾并沿顶板发展 |
| 3 | 裂缝萌生自焊根并沿焊喉发展 |
| 4 | 裂缝萌生自焊趾并沿肋板发展 |
| HZ | 1 | 裂缝萌生自纵肋焊趾并沿肋板发展 |  |
| 2 | 裂缝沿焊缝开裂 |
| 3 | 裂缝萌生自横隔板焊趾并沿横隔板发展 |
| 4 | 裂缝萌生自弧形切口圆弧处 |
| ZP | 1 | 纵肋拼接焊缝裂缝自焊趾往板厚扩展 |  |
| 2 | 纵肋拼接焊缝裂缝自焊根往板厚扩展 |
| DS | - | 顶板与竖向加劲肋连接焊缝开裂 |  |
| DH | - | 顶板与横隔板连接焊缝裂缝 |  |
| QT | - | 除上述几类外其他的疲劳开裂 | - |
| 注：D—顶板；Z—纵肋；H—横隔板；P—拼接；S—竖向加劲肋；QT—其他 |

**B.1.4** 当修复面不平整时，宜采用粘贴CFRP布进行修复，如顶板-U肋交叉焊缝、曲面U肋对接焊缝等；当裂缝修复可操作空间较小且需施加局部预应力时，宜优先选用SMA板材进行修复；当修复面为平整钢板且裂缝两侧不具有隐蔽性时，宜采用CFRP板材或SMA材料进行修复，如横隔板母材裂缝等。

**B.2 裂缝编码规则**

**B.2.1** 钢桥疲劳裂缝应按照先整体后局部原则进行编码。

**B.2.2** 在设计图纸编号的基础上，钢箱梁疲劳裂缝编码格式可参照如下：

梁段号-左（右）幅-横隔板号-距横隔板的距离（cm）-纵肋号-疲劳 裂缝特征符号

示例：NB10-L-HG2-100-U15-DZ3表示裂缝位于NB梁段左幅距第2号横隔板100cm的第15号U肋处。值得注意的是，当距离为0时，即表明裂缝位于横隔板上。

**B.2.3** 对于位于两横隔板之间的疲劳裂缝，可采用距离一端裂缝尖端最近的横隔板组我诶该裂缝的横隔板号，其他保持一致。

# 用词说明

为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”， 反面词采用“不应”或“不得”。

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

# 引用标准名录

本规程引用下列标准。其中，注日期的，仅对该日期对应的版本适用于本规程；不注日期的，其最新版适用于本规程。

《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205

《纤维增强符合材料工程应用技术标准》GB 50608

《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621

《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728

《钢结构加固设计标准》GB 51367

《钢结构用高强度大六角头螺栓》GB/T 1228

《钢结构用高强度大六角螺母》GB/T 1229

《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》GB/T 3632

《钢结构用高强度垫圈》GB/T 1230

《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》GB/T 1231

《无损检测渗透检测第1部分:总则》GB/T 18851.01

《无损检测渗透检测第2部分:渗透材料的检验》GB/T 18851.2

《焊缝无损检测 磁粉检测》GB/T 26951

《焊缝无损检测 焊缝磁粉检测 验收等级》GB/T 26952

《焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定》GB/T 11345

《无损检测仪器 相控阵超声设备的性能与检验 第1部分:仪器》GB/T 42399.1

《无损检测仪器 相控阵超声设备的性能与检验 第2部分:探头》GB/T 42399.2

《表面粗糙度比较样块 第3部分：电火花、抛（喷）丸、喷砂、研磨、锉、抛光加工表面》GB∕T 6060.3

《钢结构高强度螺栓连接技术规程》JGJ 82

《钢结构超声波探伤及质量分级法》JG/T 203

《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64

《纤维增强复合材料加固修复钢结构技术规程》YB/T4558

中国工程建设标准化协会标准

钢结构桥梁疲劳裂缝主动修复技术规程

T/CECS xxx-202x

条 文 说 明

**制 定 说 明**

本规程《钢结构桥梁疲劳裂缝主动修复技术规程》制定过程中，编制组进行了钢结构桥梁疲劳裂缝主动修复的项目研究，总结了我国钢结构桥梁疲劳裂缝主动修复的实践经验，同时参考了相关的先进技术，并取得了钢结构桥梁疲劳裂缝主动修复技术成果。

为便于广大技术和管理人员在使用本规程《钢结构桥梁疲劳裂缝主动修复技术规程》时能正确理解和执行条款规定，编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条款规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项等进行了说明。本条文说明不具备与规程正文及附录同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。

**目 次**

[1 总则 1](#_Toc178255438)

[3 基本规定 2](#_Toc178255439)

[3.1 一般规定 2](#_Toc178255440)

[3.2 修复设计计算 2](#_Toc178255441)

[4 材料 3](#_Toc178255442)

[4.3 SMA材料 3](#_Toc178255443)

[4.4 粘贴树脂材料 3](#_Toc178255444)

[5 检测 4](#_Toc178255445)

[5.1 一般规定 4](#_Toc178255446)

[5.5超声波检测 4](#_Toc178255447)

[7 修复设计 5](#_Toc178255448)

[7.1 一般规定 5](#_Toc178255449)

[7.2 CFRP修复 5](#_Toc178255450)

[7.3 SMA修复 5](#_Toc178255451)

[8 修复施工 7](#_Toc178255452)

[8.2 表面处理 7](#_Toc178255453)

[8.3 施工工艺 7](#_Toc178255454)

[9 质量验收 8](#_Toc178255455)

[9.1 一般规定 8](#_Toc178255456)

**1 总 则**

**1.0.2**对于其他钢结构等有专门要求的工程行业需要疲劳裂缝修复的，应结合具体情况参照本标准执行。铁路桥梁中正交异性钢桥面板的疲劳裂缝修复，在满足铁路桥梁规范的条件下可参考借鉴本规程。

**3 基本规定**

**3.1 一般规定**

**3.1.2**在役钢桥疲劳裂缝的修复过程受通行交通的影响，难以保证完全在卸荷状态下进行结构修复，制定修复方案时应充分考虑到上述因素。

**3.2 修复设计计算**

**3.2.4**加固过程中不卸载，应考虑活载效应。在加固过程中不卸载，意味着原结构在加固前已经处于受力状态，这种状态下的结构行为与完全不受力的情况有所不同。因此，在进行修复加固时，必须考虑这种预先存在的荷载状态，特别是活载效应，以确保加固后的结构能够安全、有效地承受所有作用在其上的力。在修复加固中，必须仔细分析原结构的受力状态，以及加固后结构的整体受力性能，以确保加固后的结构能够满足要求。

**4 材料**

**4.3 SMA材料**

**4.3.1**裂缝修复用SMA出厂前应进行完全退火处理，以去除超弹性，提高合金塑性。这是因为SMA材料在加工的过程中经过冷加工，合金内部晶粒晶格发生畸变进而会出现大量位错和缺陷，这些晶格位错和缺陷虽然有益于超弹性和合金强度增加，但对约束态下相变及回复力的稳定性有不利作用；同时，冷加工后合金丝的塑性低，不利于加固应用。因此，为了改善SMA的性能，需要进行完全退火处理。

**4.3.2**本表数值是根据国内外试验研究综合评估而来。

**4.4 粘贴树脂材料**

**4.4.4**当采用耐高温结构胶时，可不受此规定限制。如若在高温、高湿、侵蚀介质等特殊环境下使用粘贴修复方式，需选用耐介质腐蚀结构胶和采取相应的防护措施，并经由专业部门做相应的检测和认证后方可使用。

**5 检测**

**5.1 一般规定**

**5.1.3**对于桥梁结构的检测频率、覆盖范围应按照铁路、公路、市政桥梁不同行业的有关要求和相关规范的规定执行，宜以专项检测的形式组织开展。检测应充分考虑到结构的养护等级、技术状况等情况，特别是应结合实际通行交通状况确定。对于养护等级要求高、运营状况差、通行交通量大、重车比例高的桥梁应加大检查频率和检测覆盖范围。

**5.1.5**对钢箱梁疲劳裂缝进行编码时，应充分考虑钢箱梁结构形式、疲劳裂缝产生位置和扩展规律，能够准确反映疲劳裂缝形式及特征，便于养护工作人员现场快速识别和定位。

**5.1.7**疲劳裂缝检测具体内容可根据分析需求而定。建议分别统计各种类型裂缝的总数、各个钢箱梁节段的裂缝数量总数、各个车道的裂缝数量总数等。为了直观清楚的展现裂缝分布示意，建议给出相关裂缝分布展示图。检查结果分析建议应至少包含但不限于以下内容：相比上期检查，裂缝是否新增；原有旧裂缝是否存在进一步发展，扩展长度及大小如何。旧裂缝是否进行维护，维护措施效果如何。同时对各个类型裂缝的长度数量占比、范围大小等等进行分析。

**5.5超声波检测**

**5.5.1**超声波(UT)、射线(RT)、磁粉(MT)和渗透（PT）等是目前钢结构制造中检验焊缝的常规无损检测方法，超声波和射线主要用于探测焊缝的内部缺陷。由于超声波的操作较为简单、快速，对焊缝的裂缝和未熔合处的检测灵敏度较高，且对检测环境无过高要求，因此通常作为无损检测中最主要的手段。对构造复杂或厚板构件的焊缝，采用超声波等常规方法进行无损检测时其准确性要差一些，因此相控阵和超声波衍射时差法（TOFD）已在一些工程中开始得到应用，相控阵检测方法对构造复杂构件的焊缝有其独特的优势；对厚板构件的焊缝，TOFD检测方法则更为有效。由于这两种检测方法尚无相应的国家标准和公路行业标准，本规范暂未将其列入，为促进钢结构桥梁制造与安装中无损检测的技术发展，具备条件的单位可以考虑将其作为一种辅助的技术手段进行无损检测，但在采用这两种检测技术时，需参照相关行业的标准。

**7 修复设计**

**7.1 一般规定**

**7.1.2**国内外研究表明在疲劳开裂部位两侧实施补强对疲劳寿命提升效果最为有效。因此，当修复面为平整钢板且裂缝两侧不具有隐蔽性时，可以在裂缝两侧实施补强，如横隔板母材裂缝等。当修复面不平整，如顶板-U肋交叉焊缝、曲面U肋对接焊缝等，采用CFRP布进行修复以适应形状构造的要求，达到修复目的。

**7.1.3**对焊缝上的疲劳裂缝不宜直接进行钻孔，避免对顶板等重要构件造成破坏。允许的钻孔偏心距离不超过5mm。

**7.2 CFRP修复**

**7.2.1**无应力CFRP粘贴修复加固钢结构是一种被动修复方式，由于弹性模量与钢材接近，在正常使用状态下，CFRP的强度得不到充分利用。而采用预应力CFRP板修复可在裂缝区域施加预应力实现主动修复，通过有效降低应力水平、减小裂缝发展速率来提升裂缝修复效果。

**7.2.3**粘结CFRP片材在纤维方向上应确保一定的粘贴锚固长度，可按简化公式进行计算，其中和分别为CFRP片材的弹性模量和计算厚度，为结构胶的抗剪强度。国内外文献表明CFRP片材与钢材的有效粘结长度约为100～150mm，为保守起见，计算结果宜不小于150mm。此外，补强材料实际尺寸需根据裂缝所处位置和可操作空间进行合理确定。

**7.2.4**国内外文献表明，粘贴CFRP层数大于4层时，疲劳性能提升效率有限，同时施工难度和工艺要求也会显著增加，不利于现场实施和质量控制，设计中超过4层时可考虑采用粘贴CFRP板材。

**7.2.5**预应力CFRP板能够显著提高钢桥的疲劳寿命，但是预应力CFRP板材的宽度并不是越宽越好，过宽的板材可能会导致应力分布不均匀，从而影响加固效果。

**7.3 SMA修复**

**7.3.1** SMA修复适用于张拉预应力困难、操作空间较狭小的疲劳开裂部位，其主要包括CFRP/NiTiNb-SMA丝组合贴片修复和Fe-SMA板修复，如图7.3.1所示。其中CFRP/NiTiNb-SMA丝组合贴片修复由于丝材自身刚度小，对截面刚度的贡献有限，因此适用于厚度小于10mm的钢板疲劳裂缝修复；相比之下，Fe-SMA修复兼具施加预应力和提高截面刚度的作用，适用范围较广。

**7.3.2** SMA材料具有形状记忆效应，即冷拉塑性变形后的SMA在受到一定温度热激励后会恢复变形。因此选择合适的预应变是材料能充分发挥性能的关键因素。根据国内外试验研究结果，NiTi基SMA材料在10%～16%预应变下能获得较大的回复力，Fe-SMA材料在4%～6%预应变下能获得较大的回复力。SMA预拉伸处理可根据材料长短选择万能拉力试验机或特定的冷拉设备。施工过程中，宜进行应力监测，以确保粘贴修复的有效性。

**7.3.3**一般情况下，随着加热温度升高，SMA的回复力越大。但为避免温度过高造成结构胶层软化，加热温度需控制在一定范围内。根据相关试验研究，NiTiNb-SMA丝的加热温度一般为160℃，Fe-SMA板的加热温度一般为200℃。

**8 修复施工**

**8.2 表面处理**

**8.2.1**粘结强度与表面粗糙度有关，适当将表面粗糙化能提高粘结强度。一方面表面粗糙度增加相当于增加了粘结表面积，另一方面结构胶与表面凸起物之间形成了微观机械咬合力并提高了粘结界面的摩擦力。喷砂表面粗糙度建议遵循《表面粗糙度比较样块 第3部分：电火花、抛（喷）丸、喷砂、研磨、锉、抛光加工表面》GB∕T 6060.3相关规定。

**8.2.2**经过表面处理后的钢材表面具有较高的活性，容易再次受到空气、水蒸气及其他杂质的污染。

**8.2.3**栓接板面、螺栓孔的干净、干燥、平整是确保栓接补强施工质量和安全的关键步骤。

**8.3 施工工艺**

**8.3.2**粘贴时树脂涂刷要均匀，并用力刮平，将气泡挤出来，以免形成空鼓和脱胶，影响加固补强的效果。若检查发现部分粘贴出现了空鼓现象，可采取注入环氧树脂法等措施予以弥补。

**8.3.3**为保证胶层厚度，可酌情在板四周和中心放置等直径小玻璃珠。

**9 质量验收**

**9.1 一般规定**

**9.1.1**针对重大工程的验收，宜按照相同的工艺、材料进行小试件修复施工，并完成抗拉、抗弯试验，确保粘结力、强度能达到原钢板母材的性能要求。