



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 XX 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
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	基本规定	4
3.1	一般规定	4
3.2	修复设计计算	4
4	材料	5
4.1	一般规定	5
4.2	CFRP 片材	5
4.3	SMA 材料.....	6
4.4	粘贴树脂材料	6
4.5	高强螺栓连接副	8
5	检测	9
5.1	一般规定	9
5.2	目视检测	9
5.3	渗透检测	10
5.4	磁粉检测	10
5.5	超声波检测	10
6	评估	12
6.1	一般规定	12
6.2	评估方法	12
6.3	评估标准	12
7	修复设计	14
7.1	一般规定	14
7.2	CFRP 修复	14
7.3	SMA 修复.....	15
8	修复施工	17
8.1	一般规定	17
8.2	表面处理	17
8.3	施工工艺	17
9	质量验收	20
9.1	一般规定	20
9.2	验收要求	20

10 运维	23
10.1 一般规定	23
10.2 技术档案管理	23
附录 A 钢箱梁疲劳裂缝记录表和汇总表	25
附录 B 钢箱梁疲劳裂缝编码规则及案例	28
B.1 裂缝分类说明	28
B.2 裂缝编码规则	29
用词说明	31
引用标准名录	32
附：条文说明	32

Contents

1	General provisions	1
2	Terms and symbols	2
2.1	TERMS	2
2.2	SYMBOLS	3
3	Basic regulations	4
3.1	GENERAL REQUIREMENTS	4
3.2	REPAIR DESIGN CALCULATION	4
4	Materials.....	5
4.1	GENERAL REQUIREMENTS	5
4.2	CFRP SHEETS.....	5
4.3	SMA MATERIALS	6
4.4	RESIN MATERIAL	6
4.5	HIGH STRENGTH BOLT CONNECTION PAIR	8
5	Detection	9
5.1	GENERAL REQUIREMENTS	9
5.2	VISUAL INSPECTION.....	9
5.3	PENETRANT TESTING	10
5.4	MAGNETIC PARTICLE TESTING.....	10
5.5	ULTRASONIC TESTING	10
6	Evaluation	12
6.1	GENERAL REQUIREMENTS	12
6.2	EVALUATION METHODS.....	12
6.3	EVALUATION CRITERIA	12
7	Repair design.....	14
7.1	GENERAL REQUIREMENTS	14
7.2	CFRP REPAIR	14
7.3	SMA REPAIR	15
8	Repair construction	17
8.1	GENERAL REQUIREMENTS	17
8.2	SURFACE TREATMENT	17
8.3	CONSTRUCTION TECHNOLOGY	17
9	Acceptance	20
9.1	GENERAL REQUIREMENTS	20
9.2	ACCEPTANCE REQUIREMENTS	20
10	Maintenance	23
10.1	GENERAL REQUIREMENTS	23
10.2	TECHNICAL FILE MANAGEMENT	23
Appendix A	Record and summary of fatigue cracks in steel box beams.....	25
Appendix B	Coding rules and case studies for fatigue cracks in steel box girders ..	28
B.1	CRACK CLASSIFICATION DESCRIPTION.....	28

B.2 CRACK CODING RULES	29
Explanation of wording.....	31
List of quoted standards	32
Addition: Explanation of provisions	323

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

a_i ($i=1,2,3$) ——疲劳裂缝长度因素对应的分值

b_j ($j=1,2,3$) ——疲劳裂缝扩展速率因素对应的分值

c_k ($k=1,2,3$) ——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/m ² ）	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
	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 5×10^6 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 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ ；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	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和溶液；试验温度 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ ；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% H_2SO_4 溶液；试验温度 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ ；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°C 以上，若确需在 0°C 以下施工，施工现场应采取适含有效的升温措施。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。

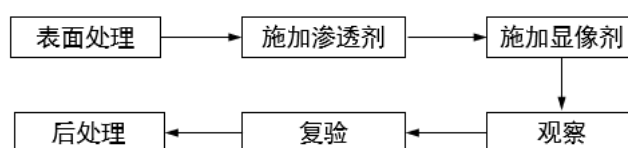


图 5.3.4 渗透检测流程

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。

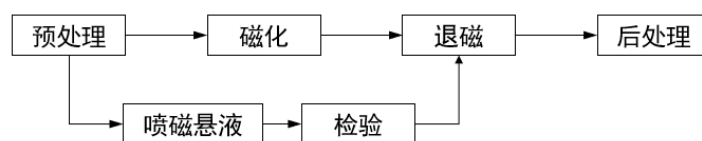


图 5.4.4 磁粉检测流程

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。

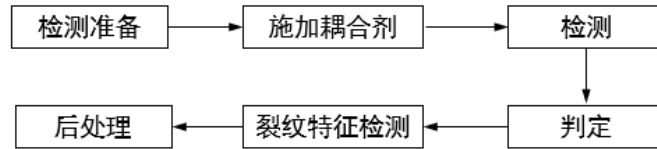


图 5.5.4 超声波检测流程

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：

$$\lambda = \frac{1}{9}(a_i + b_j + c_k) \quad (6.3.1)$$

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

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

c_k ($k=1,2,3$) —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 a_i
[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 b_j
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 c_k
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 $0.5D \sim D$ 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：

$$L_f = 2\sqrt{E_f t_f / f_v} \quad (7.2.3-1)$$

$$B_f = B_c + 2B_0 \quad (7.2.3-2)$$

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；

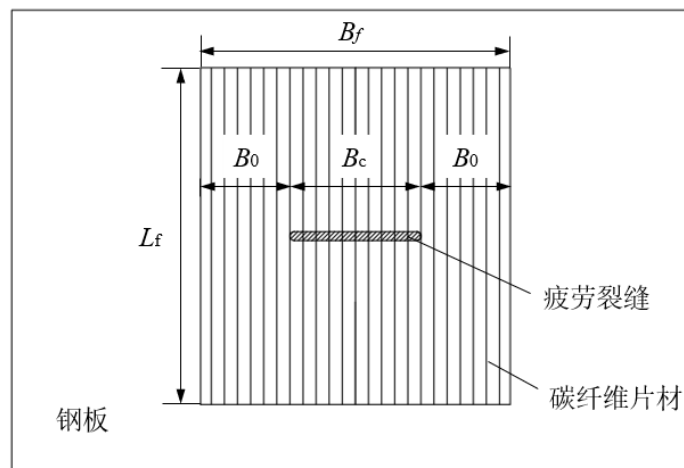


图 7.2.3 CFRP 片材有效粘贴范围

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/m^2 ，不宜高于 300g/m^2 。
- 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 $0.25 f_{fk} \sim 0.50 f_{fk}$ 。
- 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。

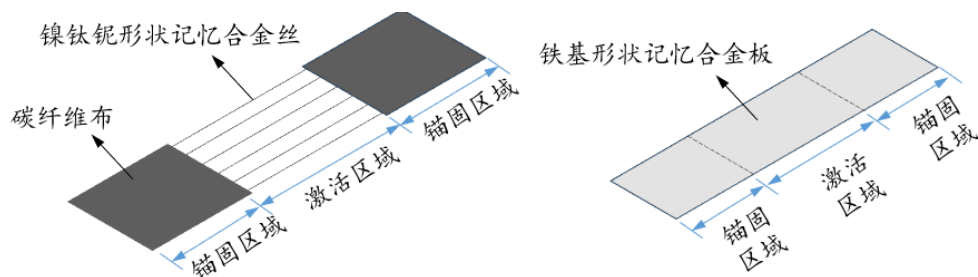


图 7.3.1 SMA 修复

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。

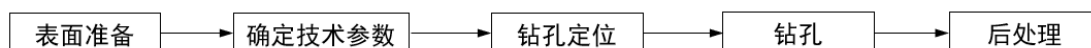


图 8.3.1 钻止裂孔实施流程

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；

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/658034014054006140>