



T/CECS G P51-01: 202X

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

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

(草稿)

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

中華人民共和國
法律

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 G: P51-01-202X

主编单位：同济大学、中国建筑金属结构协会

批准部门：中国工程建设标准化协会

实施日期：2024年XX月XX日

xxx 出版社股份有限公司

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、中建金属结构协会承担《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、维护、附录等内容。本规程是在总结近年来各高校和科研单位的研究成果的基础上，结合各设计单位和施工单位针对钢结构疲劳裂缝修复的实践经验，参考相关资料，以细化完善、规范提升此类桥梁养护工作为目标，完成了本规程的编写工作。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，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，请函告本规程日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会，以便修订时研用。

主编单位：同济大学、中国建筑金属结构协会

参编单位：

主 编：

主要参编人员：

主 审：

参与审查人员：

1 总则

1.0.1 为提升疲劳裂缝修复效果和延长钢结构桥梁服役寿命，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。

条文说明：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时，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，在满足铁路桥规范下可参考借鉴本规程。

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技术状况、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

一种具有很高比强度、刚性和轻质的纤维材料，以下简称 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结构胶粘剂。

2.1.3 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。

2.1.4 主动修复 Proactive repair

通过对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。

2.1.5 被动修复 Passive repair

在钢桥局部开裂部位增设补强材料后，利用补强材料被动受力来协助承担活载应力，达到裂缝修复的目的。

2.1.6 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，增加裂缝附近的局部刚度和强度来延长钢桥的使用寿命。

2.1.7 母材裂缝 Base material crack

疲劳过程中沿着母材扩展的裂缝。

2.1.8 热激活 Thermal activation

通过热量来激发 SMA 材料相变反应的过程。

2.1.9 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。

2.1.10 预应变 Pre-strain

SMA 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 片材超出损伤的延伸长度

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。

条文说明：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的影响。

3.1.3 修复设计使用年限宜遵循《钢结构加固设计标准》GB 51367 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可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 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，同时采用现行设计规范进行使用复核。

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《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）、《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）、《城市桥梁设计规范》（CJJ11）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、功能要求应通过专门研究确定。

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。

条文说明：加固过程中不卸载，应考虑活载效应。

4 材料

4.1 一般规定

4.1.1 本规程所涉及的工程应用的材料包括 CFRP 材料、SMA 材料、粘贴树脂材料、高强螺栓连接副。

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、弹性模量和伸长率进行出厂检验；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和钢对钢对接接头拉伸强度进行出厂检验。

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、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。

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。

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。

4.1.6 对设计使用年限为 30 年的粘结树脂材料，应通过耐湿热老化能力的检验；对使用年限为 50 年的粘结树脂材料，应通过耐湿热老化能力和耐长期应力能力的检验。

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

4.2.3 CFRP 片材宜选用高弹性模量 CFRP 片材。

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。

条文说明：裂缝修复用 SMA 出厂前应进行完全退火处理（或准完全退火处理），以去除超弹性和提高合金塑性。这是因为 SMA 材料在加工的过程中经过冷拉拔处理，合金内部晶粒晶格发生畸变进而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是不利的，同时，冷变形后合金丝的塑性低，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 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 (%)
NiTiNb-SMA	≥400	≥800	≥60	≥30
NiTi-SMA	≥350	≥700	≥50	≥30
Fe-SMA	≥400	≥800	≥150	≥35

条文说明：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

4.4.1 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°C，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。

条文说明：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。

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	≥ 50
	受拉弹性模量 (GPa)	立即在 (23±2) °C、(50±5) %RH 条件下测试	≥ 4 涂布胶： ≥ 3.3 ； 压注胶： \geq

		伸长率 (%)		≥1.5	2.5 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) °C、(50±5) %RH 条件下测试	≥20	≥17	
		平均值		≥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) °C、(50±5) %RH 条件下测试	≥40	≥45	
				≤10	≤10	
	钢对钢不均匀扯离强度 (kN/m)			≥30	≥30	
热变形温度 (°C)		使用 0.45MPa 弯曲应力的 B 法		≥65	≥65	

检验项目		检验条件	合格指标
耐	耐湿热老化能力	在 50°C、95%RH 环境中老化 90d	与室温下短期实验结果相比,

环 境 作 用		后, 冷却至室温进行钢对钢拉伸抗剪强度试验	其抗剪强度降低率 (%) : 不大于 12%
	耐热老化能力	在 (60±2) °C 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°C ≈ 35°C 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强度试验	经 5×10^6 次等幅正弦波疲劳荷载作用后, 试件为破坏

表 4.4.6 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) °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	Ca(OH) ₂ 饱和溶液; 试验温度 (35±2) °C	不下降, 且为混	不得有裂纹

质作用	；浸泡时间 60d；到期进行钢对混凝土正拉粘结强度试验	混凝土破坏	、剥离或起泡
耐酸性介 质作用	5%H ₂ SO ₄ 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。对于寒冷地区使用的粘贴树脂材料，应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。

条文说明：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、技术状况的情况，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、技术状况差、通行交通量大、重车比例高的桥梁应加大检查频率和每次检测的覆盖范围。

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。

条文说明：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。

5.1.6 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。

条文说明：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；原来的旧裂缝是否存在进一步发展，扩展长度大小如何。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。

5.2 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开裂，必要时需结合打磨进行判断。人工目视检测应明确裂缝为涂装开裂或钢材裂纹开裂，无法明确判断时应打磨后再进行目视检测。

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。

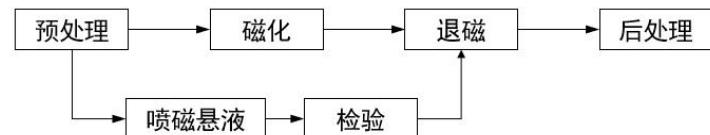


图 5.4.4 磁粉检测流程

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。

条文说明：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。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。

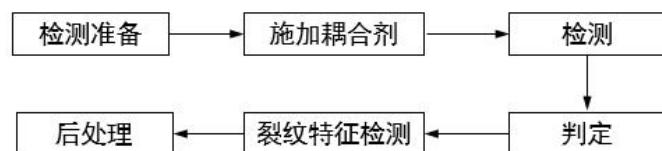


图 5.5.4 超声波检测流程

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、必要的试验与计算等。

6.1.3 疲劳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

	隔板与节点板交接位置
次要位置	非迹线正下方位置

	横隔板

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。

6.2.3 应根据每次跟踪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:

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

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

条文说明: 本条文是参照江苏省地方标准《公路桥梁钢箱梁疲劳裂纹检测、评定与维护规范》DB32/T 3644 第 8.3 条文。

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，构造设计应力求简单、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，焊缝等不平整的开裂部位宜采用粘贴 CFRP 布进行修复。

条文说明：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 肋对接焊缝时，采用 CFRP 布进行修复能适应形状的要求，达到修复目的。

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。

条文说明：若采用有效检测方法探明裂缝尖端，可在裂缝尖端钻孔。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。

7.1.4 修复后的钢构件宜根据被修复部位的降低后应力水平进行疲劳验算。

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。

条文说明：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。

7.2.2 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；

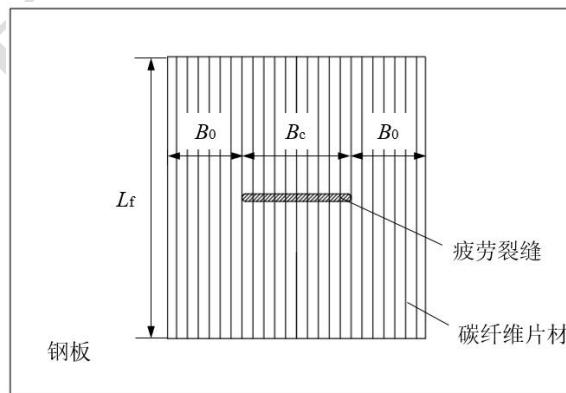


图 7.2.3 CFRP 片材有效粘贴范围（图需补充 B_f 的标注）

条文说明：粘结 CFRP 片材纤维方向应确保一定的粘贴锚固长度，可按 $L_0 = \sqrt{E_f t_f / f_v}$ 简化公式进行计算，其中 E_f 和 t_f 分别为 CFRP 片材的弹性模量和计算厚度， f_v 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空间进行合理确定。

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 $200\text{g}/\text{m}^2$ ，不宜高于 $300\text{g}/\text{m}^2$ 。
 - 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。
- 条文说明：国内外文献表明，一般粘贴 CFRP 层数大于 4 层，疲劳提升效率有限。同时施工难度和工艺要求也会显著增加，不利于施工的实施和质量的控制，超过 4 层后可考虑粘贴 CFRP 板材。
- 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最大区段，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 $0.25 f_{\text{lk}} \sim 0.50 f_{\text{lk}}$ 。
- 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、施工简便的要求。

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点选择合理修复方式。

条文说明：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。

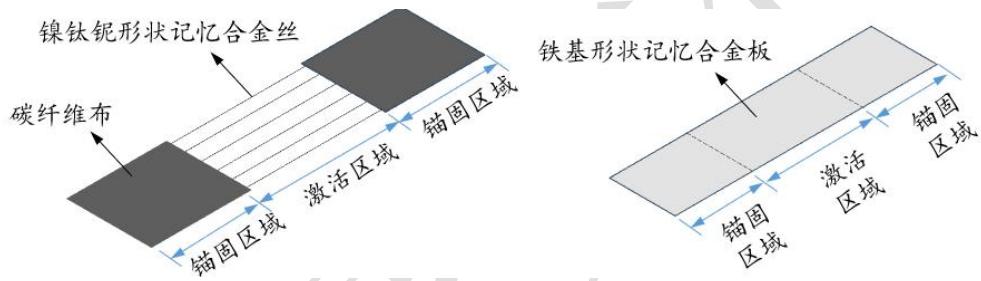


图7.3.1 SMA修复

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%。

条文说明：SMA是一种新型功能材料，具有形状记忆效应，即变形后的SMA在受到一定温度作用后会恢复变形。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。根据国内外试验结果，大部分NiTiNb-SMA材料在10%~16%预应变下能获得较大的回复力，大部分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张拉装置。施工过程中，宜选取5%位置处进行应力监测，以确保粘贴修复的有效性。

7.3.3 热激活SMA时，建议加热温度为160°C~200°C。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。

条文说明：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，因此加热温度需控制在一定范围。根据相关试验研究，NiTiNb-SMA丝的加热温度一般为160°C，Fe-SMA板的加热温度一般为200°C。

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阻热或降温处理。

7.3.5 当采用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 必须配合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。
- 3 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板材粘贴厚度宜为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，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，对于复杂结构时宜利用有限元计算

。

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条检测的条文规定，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，检测合格后方可进入作业。

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，并复合第4条材料的条文规定。

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，使用时需严格控制使用时间，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°C，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 钢桥裂缝修复施工应严格遵守安全操作规程，建立健全安全操作管理制度。

8.1.7 CFRP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。

条文说明：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。

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。

条文说明：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 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。

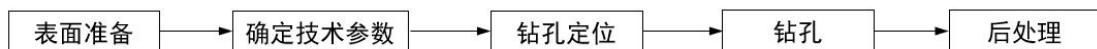


图 8.3.1 钻止裂孔实施流程

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。
- 条文说明: 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** 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。

- 条文说明: 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。
- 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, 停止加热并等待冷却至室温;
- 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 涂装要求

9.1.3 钢桥疲劳裂缝修复工程验收应具备以下基本资料：

- 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、无尖锐边缘。

9.2.2 采用粘贴补强材料进行钢桥疲劳裂缝时，外观质量应符合下列规定：

1 CFRP 板材、SMA 板材各边缘胶体应饱满无空间。

2 CFRP 布应无起泡、表面浸渍胶应无漏涂、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	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）		>70°C	测量	-	

条文说明：此条文是参考《公路桥梁加固施工技术规范》JTG/T J23 第 6.7.3 条文。

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 CFRP 片材粘贴质量见表 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≤10mm	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
		结构胶厚度	2mm±1.0mm	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型连接的摩擦面，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 的规定。

10 运维

10.1 一般规定

10.1.1 应定期对修复部位进行跟踪观测，建议频次为每个月 1 次，跟踪时间不少于 12 个月。

。

10.1.2 对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：

- 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：是否沿止裂孔圆心方向，是否绕过止裂孔等；
- 3 裂缝的发展速度：-记录裂缝向前发展的长度，计算发展速率；

10.1.3 建议采取数字化监测的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、长度增长较快及数量增加较快的梁段。

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 修复技术档案应至少包括以下内容：

- 1 修复设计施工图及结构计算分析报告；
- 2 修复施工过程中试验检测剂科研资料；
- 3 裂缝检测资料；
- 4 裂缝修复资料。

10.2.3 宜建立符合自身特点的钢桥养护信息管理系统，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				

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	
	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 钢箱梁疲劳裂纹编码规则及案例

B.1 裂纹分类说明

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 7.1 所示。

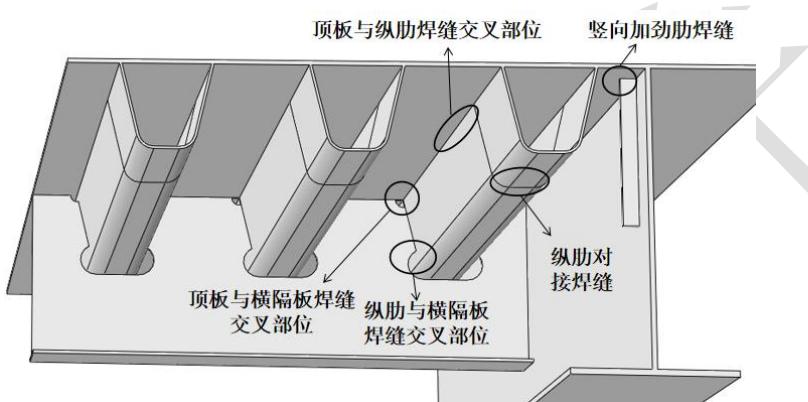


图 B.1.1 钢箱梁常见疲劳损伤构造

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，钢箱梁典型疲劳裂纹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.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读该裂缝的横隔板号，其他保持一致。

引用标准名录

《钢结构加固设计标准》 GB 51367

《纤维增强复合材料工程应用技术标准》 GB 50608

《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》 GB 50728

《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

《钢结构现场检测技术标准》 T/CECS1009

《无损检测 渗透检测第1部分:总则》 GB/T 18851.1

《无损检测 渗透检测第2部分:渗透材料的检验》 GB/T 18851.2

《无损检测 渗透检测和磁粉检测 观察条件》 GB/T 5097

《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

《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

《公路桥梁钢箱梁疲劳裂纹检测、评定与维护规范》 DB32/T 3644

《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

《钢结构工程施工质量验收规范》 GB 50205

《公路养护工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》 JTG 5220

《公路桥梁加固施工技术规范》 JTG/T J23

《钢结构高强度螺栓连接技术规程》JGJ 8

第十一章

中華人民共和國
法律