



T/CECS G DXX-XX-222X

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction

Standardization

在役正交异性钢桥面板疲劳损伤 伤处治技术规程

Technical Specifications for Fatigue Damage Treatment of
In-Service Orthotropic Steel Bridge Decks

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

征求意见稿

中国工程建设标准化协会标准

在役正交异性钢桥面板疲劳损伤处治技术规程

Technical Specifications for Fatigue Damage Treatment of In-Service Orthotropic
Steel Bridge Decks

T/CECS G: DXX-XX-222X

主编单位：中交第二公路勘察设计研究院有限公司

发布机构：中国工程建设标准化协会

实施日期：202X年XX月XX日

人民交通出版社股份有限公司

北 京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2022 年第一批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字[2022]91 号）的要求，由中交第二公路勘察设计院有限公司承担《在役正交异性钢桥面板疲劳损伤处治技术规程》（以下简称“本规程”）的制订工作。

编写组在总结正交异性钢桥面板疲劳处治与性能提升领域十余年来工程经验和相关科研成果的基础上，以完善和提升正交异性钢桥面板疲劳检测、处治设计与实施及检验为核心，完成了本标准的编写工作。

本标准分为 8 章及 2 篇附录，主要内容包括：1 总则、2 术语、3 基本规定、4 在役 U 肋疲劳损伤检测方法、5 在役 U 肋疲劳裂纹处治设计、6 在役 U 肋增补内焊焊接工艺评定、7 在役 U 肋增补内焊焊接施工、8 在役 U 肋增补内焊焊接质量检验，附录 A 在役 U 肋内角焊缝仰位增补焊接实施流程，附录 B 在役 U 肋内角焊缝部分熔透焊缝超声波相控阵检测，附录 C 在役 U 肋内角焊缝超声导波检测。

请注意本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本标准提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本标准相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本标准由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由中交第二公路勘察设计院有限公司负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本标准日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或陈金州（地址：湖北省武汉市经济技术开发区创业路 18 号；邮编：430056；传真：027-84214365；电子邮箱：Bridge5209@126.com），以便修订时研用。

主 编 单 位：中交第二公路勘察设计院有限公司

参 编 单 位：哈尔滨工业大学

武汉锂鑫自动化科技有限公司

西南交通大学

上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司

福建省交通规划设计院有限公司

福建省高速公路科技创新研究院有限公司

主 编：冯鹏程

主要参编人员：余顺新 陈金州 周文松 郭福宽 张宏敏

陈楚龙 夏 飞 南军强 高 兴 赵庞远

崔 闯	顾奕伟	李雪峰	蔡 磊	吴大健
陈宏卓	于媛媛	陈智威	丁少凌	刘新华
戴少鹏	李红兰	王成林	刘晓龙	刘 忻

主 审：胡 钢

参与审查人员：赵君黎 雷俊卿 张 强 詹建辉 朱 斌
刘承亮

征求意见稿

目录

1. 总则	1
2. 术语和符号	2
3. 基本规定	4
4. 在役 U 肋疲劳损伤检测方法	6
5. 在役 U 肋疲劳裂纹处治设计	11
6. 在役 U 肋增补内焊焊接工艺评定	18
7. 在役 U 肋增补内焊焊接施工	20
8. 在役 U 肋增补内焊焊接质量检验	25
附录 A 在役 U 肋内角焊缝仰位增补焊接实施流程	27
附录 B 在役 U 肋内角焊缝部分熔透焊缝超声波相控阵检测	30
附录 C 在役 U 肋内角焊缝超声导波检测	32
用词说明	34

1. 总则

1.0.1 为指导在役正交异性钢桥面板的疲劳损伤处治设计与施工及检验，统一和规范在役正交异性钢桥面板的疲劳损伤的检测方法、结构与构造设计、处治实施流程和处治后进行质量检验等技术要点，满足安全适用、技术可靠、经久耐用、经济合理、减排环保的要求，制定本规程。

条文说明：我国现存大量采用 U 肋作为加劲肋的正交异性钢桥面板的钢结构桥梁，一方面部分钢桥由于设计年代久远，技术标准偏低并长期处于超负荷运营状态；另一方面，部分钢桥由于不能满足当前的交通需求，拓宽改造也将使荷载大幅增加。其锈蚀、变形、开裂等病害严重，疲劳损伤问题将日益凸显，成为影响桥梁结构安全和使用寿命的关键因素。因此，制定统一的、规范的检测、设计、施工及检验技术规程，对于确保在役正交异性钢桥面板的疲劳损伤得到有效处治，保障桥梁安全、可靠、经济、环保地运行具有重要意义。规程旨在通过明确技术要点，促进技术进步，提高工程质量，减少资源浪费，实现可持续发展。

1.0.2 本规程适用于采用 U 肋作为加劲肋的正交异性钢桥面板的在役桥梁，采用其它类型加劲肋的正交异性钢桥面板在役桥梁也可参考使用。

1.0.3 在役正交异性钢桥面板的疲劳损伤处治的设计与施工应树立全寿命周期成本的设计理念，贯彻“预防为主、防治结合”的方针，坚持“养早、养小、养好”的原则进行。

条文说明：本条提出了在役正交异性钢桥面板的疲劳损伤处治设计与施工应综合考虑建管养全过程中的直接成本、环境成本、社会成本等方面进行综合研究，降低全寿命周期成本、全方位减少碳排放。“预防为主、防治结合”的方针强调了在设计和施工过程中，应优先考虑预防措施，同时结合实际情况采取有效的防治措施，以减少疲劳损伤的发生和扩散。“养早、养小、养好”的原则则强调了早期干预的重要性，即在问题初期就进行处理，避免小问题演变成大问题，从而确保桥梁的长期稳定和安全。

1.0.4 在役正交异性钢桥面板的疲劳损伤处治的设计与施工宜积极采用新技术、新工艺、新材料和新理论。

1.0.5 在役正交异性钢桥面板桥梁的疲劳损伤处治除应满足本规程的规定外，尚应符合有关法律、法规和国家、行业现行有关标准、规范的规定。

2. 术语和符号

2.1. 术语

1.1.1. 疲劳损伤 **fatigue crack**

正交异性钢桥面板在循环载荷过程中的损伤累积，即构件在动荷载下，在某点或某些点产生累积性、永久性的局部损伤，并在一定时间后形成的裂纹等病害。

条文说明：疲劳损伤主要为应力值没有超过材料的强度极限，甚至比弹性极限还低的情况下发生破坏而产生的裂纹，这与因超出材料强度而产生的材料破坏在养护方式上有很大区别。与强度破坏需进行构件更换或处治措施相比，疲劳裂纹可通过去除材料缺陷或应力集中点等方式延长构件的疲劳寿命。

1.1.2. 疲劳极限状态 **fatigue limit state**

也称为耐久极限状态。当整个结构或结构的一部分在动荷载长期作用下，经过多次交变应力循环而不发生疲劳破坏时的临界状态。

1.1.3. 疲劳损伤度 **fatigue limit degree**

所考虑的疲劳交变应力循环数与在该应力水平的常幅交变载荷下的直到疲劳极限状态时的循环次数（疲劳寿命）的比值。

1.1.4. 疲劳安全系数 **fatigue strength safety factor**

当整个结构或结构的一部分在动荷载长期作用下，反映结构疲劳安全程度的系数。

1.1.5. 疲劳寿命评估 **fatigue life assessment**

当整个结构或结构的一部分在动荷载长期作用下，对结构疲劳性能的寿命评估。

1.1.6. 疲劳寿命预测 **fatigue life prediction**

当整个结构或结构的一部分在动荷载长期作用下，对结构全周期使用寿命的预测。

1.1.7. U 肋内角焊缝 **fillet weld in U-rib**

正交异性钢桥面板中U型加劲肋与顶板之间连接细节部位的内侧角焊缝。

1.1.8. U 肋增补内焊焊缝型式 **supplementary internal welding seam type of U-rib**

在U型加劲肋内部，对U肋内角焊缝进行增补焊接时的焊缝型式。

1.1.9. U 肋增补内焊名义熔透率 **penetration rate of U-rib internal welding**

进行U肋内角焊缝增补内焊的焊接工艺时，U肋内角焊缝的熔透率，以熔深与板厚的百分比表示。

1.1.10. 内部裂纹 internal crack

构件内部形成的肉眼不可见的疲劳裂纹。

条文说明：部分疲劳裂纹由内部萌生并扩展，如顶板与 U 肋角焊缝裂纹从焊根位置萌生并沿顶板扩展，处于封闭 U 肋内部，肉眼无法发现和直接观察，需借助专业检测设备。

2.2. 符号

2.2.1. 材料性能有关符号

f_{vd} ——钢材的抗剪强度设计值；

$f_{o,vd}$ ——原结构钢材的抗剪强度设计值；

f_{cd} ——钢材的端面承压强度设计值；

$f_{o,f}^w$ ——原结构角焊缝的强度设计值。

2.2.2. 作用效应和抗力有关符号

$\sigma_{o,z,I}$ ——处治前原构件的局部应力；

$\sigma_{z,II}$ ——处治后构件的新增局部应力；

$\tau_{o,I}$ ——处治前原构件的腹板剪应力；

τ_{II} ——处治后构件的新增腹板剪应力。

2.2.3. 几何参数有关符号

$W_{o,y,eff}$, $W_{o,z,eff}$ ——处治前原构件有效截面相对于 y 轴和 z 轴的截面模量；

$W_{y,eff}$, $W_{z,eff}$ ——处治后构件有效截面相对于 y 轴和 z 轴的截面模量。

2.2.4. 计算系数及其他有关符号

χ ——处治后轴心受压构件的整体稳定折减系数；

$\chi_{LT,y}$, $\chi_{LT,z}$ ——处治后构件弯扭失稳模态的整体稳定折减系数；

η_{cs} ——被处治构件的强度修正系数。

3. 基本规定

3.1. 一般规定

3.1.1. 在役正交异性钢桥面板 U 肋疲劳损伤应进行检测、评定，确认结构不满足安全或正常使用要求且通过处治能恢复其功能要求的，方可进行处治，处治工作的内容及范围应根据评定结论和使用要求确定。

条文说明：在役正交异性钢桥面板 U 肋疲劳损伤处治所面临的不确定因素远比新建工程多且复杂，处治前应通过检测、评定确认结构真实状态，通过综合评估确认通过处治可以达到既定目标时，方可进行处治。有关桥梁技术状况评定和承载能力评定可参考现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64)、《公路桥涵养护规范》(JTG H11)、《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21)、《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21)、《铁路桥梁检定规范》(铁运函[2004]120 号)、《城市桥梁养护技术规范》(CJJ 99)和《城市桥梁检测与评定技术规范》(CJJ/T 233)等。

3.1.2. 对具有文物保护价值的桥梁，宜修旧如旧，并应满足文物保护主管部门的要求。

3.2. 在役 U 肋疲劳损伤检测

3.2.1. 在役正交异性钢桥面板 U 肋疲劳损伤处治设计前，应对原桥施工过程进行检测分析，评估桥梁处治前的受力状态。

3.2.2. 在役正交异性钢桥面板处治前，需要对顶板与 U 肋连接区、顶板母材、U 肋母材等区域进行检测，重点检查重载车道、轻重载混合车道各细节（重点是车轮设定走行轨迹线附近 0.8m 范围内），以及轻载车道设定轨迹线 0.6m 范围内各细节。

条文说明：作为桥梁结构中的关键受力部位，顶板与 U 肋的连接区域易产生疲劳裂纹；由于重载车辆对桥梁的冲击较大，重载车道上车轮设定走行轨迹线附近 0.8m 范围内的区域的细节损伤尤为关键；轻重载混合车道的受力情况复杂，既有重载车辆的冲击，也有轻载车辆的持续作用，同样需要关注车轮设定走行轨迹线附近 0.8m 范围内的细节损伤。虽然轻载车辆对桥梁的冲击较小，但长期作用也可能导致损伤。检测时，应检查设定轨迹线 0.6m 范围内的细节。因此，上述区域应作为检测的重点，仔细检查焊缝质量、母材状况及连接部位的完整性。

3.2.3. 在役正交异性钢桥面板 U 肋疲劳损伤应采用目视检测，对于目视检测可疑部位宜采用局部目视检测。对局部目视检测难以判断或不具备目视检测的损伤，宜根据结构特征，进一步选用超声波检测、超声相控阵检测、超声导波检测、磁粉检测或涡流检测。目视检查 and 无损检测无法精准判定裂纹尖端位置和裂纹源深度时，可采用探孔切削检查。

3.3. 在役 U 肋疲劳损伤处治设计

3.3.1. 在役正交异性钢桥面板 U 肋疲劳损伤的处治设计，应综合分析其技术经济效果，避免处治适修性很差的结构。

条文说明：适修性很差的在役正交异性钢桥面板疲劳损伤处治桥梁，一般指其处治总费用达到新建桥梁总造价 30% 以上的桥梁，但不包括文物桥梁和其他有历史价值或艺术价值的桥梁。

3.3.2. 在役正交异性钢桥面板 U 肋抗疲劳设计荷载、荷载效应组合和验算方法应按现行《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的规定计算。

3.3.3. 在役正交异性钢桥面板疲劳损伤处治设计，应根据疲劳损伤特点，结合裂纹产生原因，进行相应的结构强度、变形、稳定性、疲劳验算分析后，选择合理的处治设计方案。

条文说明：处治设计应紧密结合疲劳损伤的特点和裂纹产生的原因，进行针对性的分析和处理；通过对损伤部位的详细检查和评估，明确损伤的类型、程度和范围，为处治设计方案决策提供准确依据。对于部分裂纹，单一维护方法效果不佳的情况下，可采用两种或两种以上的方法，如同时采用补焊和打孔，钢板补强和打孔等，实施工艺和验收要求可按照各自方法实施。

3.3.4. U 肋内侧焊缝的焊脚长度不应小于 4mm（t 为 U 肋板厚），外侧焊缝的焊脚长度不小于 6mm；部分熔透焊的单侧有效焊喉高度不小于 0.55t。

条文说明：

1) 焊脚长度直接影响焊缝的承载能力和抗疲劳性能。较短的焊脚长度可能导致焊缝在承受循环载荷时提前失效。考虑到 U 肋内部空间狭小，焊接操作受限，但仍需保证足够的焊脚长度以满足设计要求。4mm 的焊脚长度是一个经过实践验证的、既能保证焊接质量又便于施工操作的合理值。

2) 外侧焊缝直接暴露于外部环境，更易受到腐蚀和疲劳损伤，因此需要更强的抗疲劳性能。较大的焊脚长度有助于分散焊缝处的应力集中，提高焊缝的疲劳寿命。6mm 的焊脚长度在保证焊接质量的同时，也考虑了施工的可操作性和经济性。

3) 有效焊喉高度是评价部分熔透焊缝质量的重要指标之一，它直接影响焊缝的强度和稳定性。0.55t 的设定值是基于焊缝熔透率与疲劳性能关系的研究结果，该值能够确保焊缝在承受循环载荷时具有足够的抗疲劳性能。考虑到焊接过程中的各种因素（如焊接电流、电压、速度等）可能对熔透率产生影响，因此设定了不低于 0.55t 的最小值，以确保焊缝质量的一致性。

3.3.5. 在役正交异性钢桥面板疲劳损伤处治，应按照腐蚀环境、构件工作条件、维护条件等进行涂装防腐设计，特别是关键节点、连接处的构造。

条文说明：钢构件的耐久性及使用性能直接影响到结构安全，处治时应重视其涂装防腐设计。

3.4. 在役 U 肋疲劳损伤处治施工

3.4.1. 在进行裂纹修复前，应通过技术手段（如临时卸载、应力释放装置等）尽可能使修复区域处于无应力或低应力状态，避免在修复过程中因应力集中或产生过大的约束应力而导致修复失败或加剧损伤。针对因裂纹导致的结构或连接变位、错位，应优先采用构件支承或其他有效方法，将受损部位复位至设计或安全允许的位置状态，确保结构整体稳定性。

条文说明：钢桥面成桥处于受力状态，发生裂纹后，可能使结构或连接产生变位、错位，应借助构件支承等方法，使之复位，并尽可能使局部修复部位处于无应力或低应力状态，否则易导致应力集中或者产生很大的约束应力。

3.4.2. 根据裂纹类型（焊根萌生、焊趾扩展等）及结构状态，选择补焊、栓接补强或碳纤维加固等工艺，并通过小范围试验验证工艺可行性。

3.4.3. 处治过程中，应实时监测，发现异常时需立即暂停施工。

4. 在役 U 肋疲劳损伤检测方法

4.1. 一般规定

4.1.1. 在役 U 肋疲劳损伤检测应重点覆盖超车道、快车道与重车道等车辆轮迹线下方的 U 肋与面板角焊缝连接构造附近。

条文说明：在横桥向上，较早出现在车轮作用下的 U 肋与面板角焊缝连接构造附近，超车道与紧急停车带出现裂纹的概率较小，且出现裂纹后对结构的影响不明显。裂纹主要分布在车流量较大的快车道与重车道上，同时车辆轮迹线下方纵肋的疲劳裂纹数量较多。在纵桥向上，支承梁段、设置阻尼器的梁段，是出现疲劳裂纹概率较高的部位。此外，纵隔板、吊索等构造的设置也会影响疲劳裂纹的分布。

4.1.2. 在役正交异性桥面板常见的 U 肋与面板角焊缝疲劳裂纹，应按下列类型进行分类：

1. 从 U 肋与面板间角焊缝面板处焊根处起裂，沿纵向焊缝扩展并逐渐裂至 U 肋内侧桥面板的裂纹（U 肋内侧焊根萌生裂纹）；
2. 从 U 肋与面板间角焊缝焊趾处起裂，沿纵向焊缝扩展并逐渐裂至 U 肋外侧桥面板的裂纹（U 肋外侧焊趾萌生裂纹）；
3. 沿 U 肋与面板间角焊缝焊根处裂透焊缝后，沿纵向开裂的裂纹（U 肋内侧焊根扩展裂纹）；
 - （a）仅仅沿焊缝纵向开裂的裂纹；
 - （b）沿焊缝裂纹裂至 U 肋母材的裂纹；
 - （c）沿焊缝裂纹裂至面板母材的裂纹；
4. 从 U 肋与面板间角焊缝 U 肋处焊趾起裂，往 U 肋板厚方向扩展的裂纹（U 肋外侧焊趾扩展裂纹）。

4.1.3. 疲劳病害检测技术主要包括：目视检测、磁粉检测、渗透检测与超声波检测，检测技术的选取宜符合下列要求：

- 1 裂纹尖端可见时，应优先采用磁粉检测，不便于磁化时采用渗透检测。
- 2 无法从构件表面确认是否存在裂纹时，应采用超声波等技术检测。

4.1.4. 钢箱梁疲劳病害检测可采用相控阵技术、超声波衍射时差法（TOFD）等先进技术。

条文说明：U 肋内侧焊根萌生裂纹：优先采用超声相控阵检测，辅以探孔切削法验证；钢桥面板纵向裂纹：需结合红外热成像与超声波导波技术快速筛查。

4.2. 目视检测方法

4.2.1. 在正交异性钢桥面板底面可借助脚手架接近易发裂纹部位等易抵部位宜进行人工抵近检测，仔细观察焊缝及其附近有无裂纹、油漆有无开裂，若开裂，应铲除油漆，用低倍放大镜、渗透液法或磁粉探伤法确认裂纹。对于疑似裂纹，用硬质合金磨头逐层切削进一步确认。人工抵近困难部位宜采用高清摄像技术检查，技术实施过程中检查结果应能实时反馈给检查人员，对检查结果进行现场判断，检查结果应能存档记录。

4.2.2. 目视检查应注意焊缝的起熄弧处、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。

条文说明：焊缝的起熄弧处是应力集中区，易于产生裂纹；腐蚀、锈蚀和油漆剥落不仅影响美观，还可能掩盖潜在的裂纹；几何突变部位如截面变化、转角等也是裂纹易发区。检测时应全面考虑这些区域，并理解疲劳裂纹可能沿不同路径扩展，以确保不遗漏任何潜在缺陷。

4.2.3. 对于角焊缝裂纹，应用硬质合金磨头和渗透液检测法探明裂纹深度和裂纹尖端，直至完全消除。

条文说明：角焊缝由于其结构复杂性和应力状态，裂纹一旦形成可能迅速扩展。使用硬质合金磨头逐层切削可以逐步揭露裂纹的深度，同时结合渗透液检测法可以更准确地定位裂纹尖端，为后续的修复或处治措施提供精确信息。

4.2.4. 检查时，应注意纵肋肋脚处、横肋/横梁处、纵梁腹板及竖向加劲肋与面板焊接处，所有面板侧过焊孔处的铺装层裂纹，并对铺装层裂纹作详细记录，反映到箱内相应位置。

4.2.5. 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°。

条文说明：参考《无损检测 目视检测 总则》（GB/T 20967）中 5.1 节目视检测的相关要求，当眼睛可置于距离被检工件表面 600 mm 以内，并且眼睛与被检工件表面不小于 30° 视角时适于目视检测。可以使用镜子改善视角，还可以借助放大镜、内窥镜、光纤等设备协助检测。

4.2.6. 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。

条文说明：参照《公路桥涵养护规范》（JTG H11-2017）3.3 节中对检查周期的确定方法，检查周期根据技术状况确定，最长不得超过三年。重要部（构）件的缺损明显达到三、四、五类技术状况时，应立即安排一次定期检查。同时，考虑到缆索结构桥梁多为重要交通通道，对缆索结构体系桥梁的检查周期宜为 1 年。

4.3. 超声检测方法

4.3.1. 超声检测方法宜选用超声导波和超声相控阵检测技术。对于较大范围疲劳裂纹的快速排查，宜选用超声导波技术；对于局域已确认裂纹的高精度成像宜选用超声相控阵技术。

条文说明：超声导波技术因其能在材料中长距离传播且对缺陷敏感，适用于大范围快速筛查结构中的疲劳裂纹。而超声相控阵技术通过控制多个阵元的发射和接收时序，可以形成灵活的声束，实现对特定区域的高精度成像，特别适合于已确认裂纹位置的详细检测和评估。超声导波技术由于其传播距离远和检测效率高的特点，非常适合在大面积或长距离的结构中进行快速筛查，以快速定位可能存在裂纹的区域。而一旦裂纹被初步定位，超声相控阵技术可以提供更详细的裂纹图像，包括裂纹的形状、大小、方向和深度等，为后续的修复决策提供关键信息。

4.3.2. 采用超声波检测时，应在被检构件表面涂抹甘油、机油、水基耦合剂等耦合介质。

4.3.3. 采用超声波检测前，应与标准试块进行标定，检测后与探测值对比进行校验。

条文说明：标定是确保超声波检测准确性的重要步骤。通过与已知缺陷的标准试块进行比对，可以调整检测设备的参数，如增益、频率和灵敏度等，使其适应被检材料的特性。检测完成后，将实际探测值与标定结果进行对比，可以评估检测的准确性和可靠性，并据此对检测结果进行必要的修正。

4.3.4. 采用超声检测方法时，可采用图 4.3.1 所示的回波法检测方式，用斜角探头检出裂纹尖端，当探头置于顶板上缘面时，裂纹检测深度应大于 6.5mm；当探头置于顶板下缘面时，检测深度约为 $>2.5\text{mm}$ 。

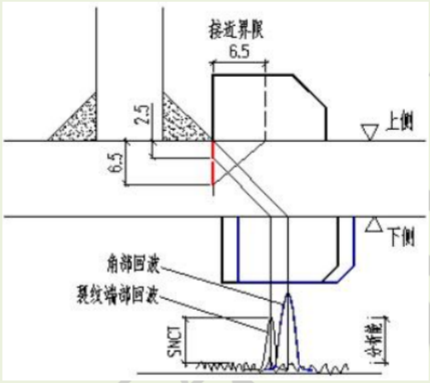


图 4.3.1 回波法检测裂纹尖端和角部

条文说明：回波法是超声波检测中常用的一种方法，它利用超声波在材料中遇到缺陷时产生的反射回波来检测缺陷的位置和大小。斜角探头能够产生斜向传播的超声波，适用于检测与材料表面成一定角度的裂纹。检测深度取决于探头的放置位置、超声波的频率和材料的声速等因素。在顶板的上缘面检测时，由于声波需要经过更长的路径才能到达裂纹并返回，因此检测深度相对较大（如大于 6.5mm）。而在顶板下缘面检测时，声波路径较短，检测深度相应减小（如大于 2.5mm）。这些数值是根据经验和实验数据得出的，实际检测时应根据具体情况进行调整。

4.3.5. 处治施工前一周内，应采用超声相控阵详细复查裂纹状态和裂纹扩展长度，并用硬质合金磨头消除裂纹深度和裂纹尖端。

条文说明：在决定进行裂纹处治施工前，必须确保对裂纹的当前状态和扩展情况有准确的了解。超声相控阵技术因其高精度和高分辨率的特点，能够生成裂纹的详细图像，包括裂纹的长度、宽度、深度以及形状等关键信息。这些信息对于制定有效的处治方案至关重要。因此，在施工前一周内进行详细的超声相控阵复查，可以确保施工团队掌握裂纹的最新情况，从而做出正确的决策。

在确定了裂纹的具体位置和形态后，需要采取措施消除裂纹，以防止其进一步扩展并影响结构的安全性。硬质合金磨头是一种常用的工具，它可以通过逐层切削的方式，精确地去除裂纹所在的材料部分。这种方法不仅可以有效地消除裂纹的深度和尖端，还可以减少因处理不当而对周围材料造成的损伤。因此，在超声相控阵复查后，使用硬质合金磨头对裂纹进行精确处理是一种有效的处治手段。

4.4. 探孔切削检查

4.4.1. 探孔切削法宜采用硬质合金磨头切削法和钻孔切削法。

条文说明：探孔切削法是一种有效的裂纹检测方法，通过切削的方式暴露裂纹，以便进一步观察和评估。硬质合金磨头切削法因其高硬度和耐磨性，适用于对金属结构进行精确的切削操作。钻

孔切削法则通过钻孔的方式暴露裂纹，适用于较深的裂纹检测。在实际应用中，应根据裂纹的位置、深度和形状等因素，选择最适合的切削方法。

4.4.2. 对 U 肋角焊缝裂纹采用探孔切削法时，应先探明图 5.4.1 所示的 U 肋角焊缝各类裂纹扩展形貌，以方便探明 U 肋角焊缝源于焊跟并向焊喉或面板厚度方向扩展的裂纹深度和裂纹尖端，以及源于面板侧并向面板厚度方向扩展的裂纹深度和裂纹尖端。

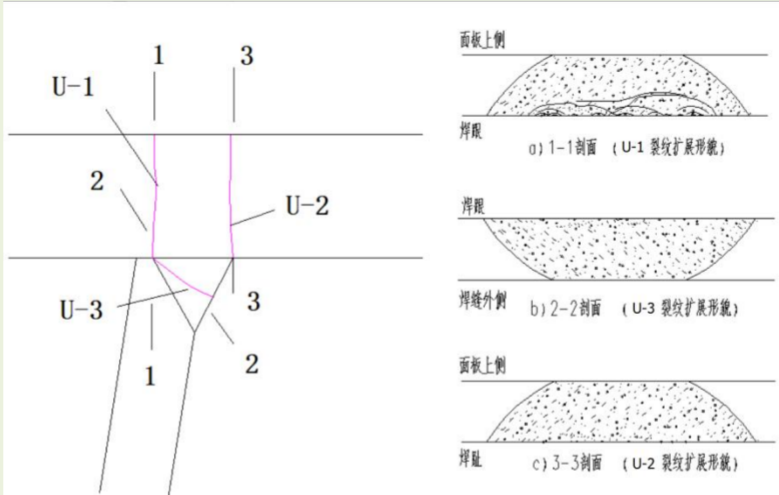


图 5.4.1 U 肋角焊缝各类裂纹扩展形貌

4.4.3. 采用硬质合金磨头切削法时，磨头端部应为圆锥形。采用硬质合金磨头切削法时，角焊缝表面裂纹切削状态如图 5.4.2 所示，磨头夹角宜为 45° ，便于渗透液检测时观察。

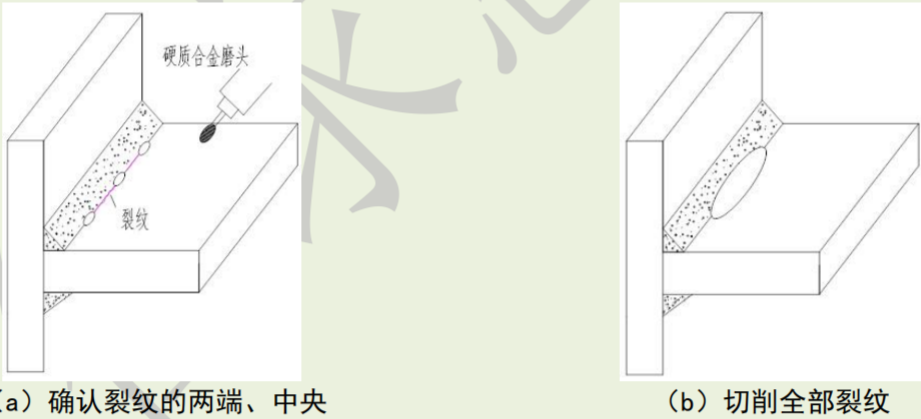


图 5.4.2 角焊缝表面裂纹切削状态

条文说明：硬质合金磨头切削法的切削效果很大程度上取决于磨头的形状和尺寸。圆锥形磨头能够更好地适应不同深度和宽度的裂纹，半径和直径的选择应根据裂纹的实际情况进行。同时，磨头的夹角也是影响切削效果的重要因素， 45° 的夹角不仅便于切削操作，还能在渗透液检测时提供更好的观察角度。

4.4.4. 选择探孔位置时，应在裂纹两端前方约 10mm 处和 5mm 处；如裂纹深度和尖端未消除，应继续向前方磨削，直至裂纹消失。对于未贯穿板厚的裂纹，不应磨穿钢板，以免给焊接修复造成困难。

条文说明：在裂纹两端前方约 10mm 处和 5mm 处设置探孔，可以确保切削操作能够覆盖到裂纹的扩展区域，从而准确评估裂纹的深度和尖端位置。如果切削后发现裂纹深度和尖端未消除，应继续向前方磨削，直至裂纹完全消失。然而，对于未贯穿板厚的裂纹，应避免磨穿钢板，以免破坏结构的完整性，给后续的焊接修复带来困难。

4.5. 检测结果记录

4.5.1. 对于确认的裂纹，应详细记录检查日期、裂纹类型、裂纹所处部位、裂纹源、裂纹走向及裂纹长度，以及裂纹所处部件的编码，并按给定的比例尺绘制和文字说明，包括裂纹所在部位与汽车轮载设定位置之间的关系；同时，在梁上标明裂纹长度和检查日期，以便以后检查时可计算裂纹扩展速度。

4.5.2. 对确认的裂纹拍照存档，成像应尽可能表明构造细节特征、裂纹源、裂纹走向和裂纹长度，以及裂纹所处部件编号。

4.5.3. 在役正交异性钢桥面板 U 肋疲劳损伤处治施工前，施工单位应充分理解设计文件、提前掌握现场具体情况，施工过程中若发现与设计不符的情况，应立即与设计沟通，制定的施工方案及工艺应保证设计的实施。

条文说明：在役正交异性钢桥面板 U 肋疲劳损伤处治施工与新桥建设有所不同，已服役多年的钢结构桥梁，可能存在实桥与原设计图纸不符、原设计图纸缺失、存在未知损伤等问题，设计单位在进行处治设计时可能无法全面、真实的掌握桥梁的具体情况，当施工单位在施工过程中发现现场与设计文件不符的情况时，应立即与设计沟通，切不可盲目按照设计文件施工。

4.5.4. 在役正交异性钢桥面板 U 肋疲劳损伤处治宜避免损伤原结构，在有应力状态下进行处治，应慎用大热量线输入的焊接工艺，防止焊接施工诱发新病害或使原病害加重。

4.5.5. 在役正交异性钢桥面板 U 肋疲劳损伤处治施工应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650、《公路桥梁处治施工技术规范》JTG/T J23 中的有关规定，并对关键施工工序进行监控。

5. 在役 U 肋疲劳裂纹处治设计

5.1. 一般规定

5.1.1. 在役正交异性钢桥面板处治设计应依据原桥梁设计图、竣工图及检测评估报告进行，并经现场核对，信息缺失时应补充检测。

条文说明：现场验证是不可或缺的环节。现场验证应包括对桥梁实际状态的全面检查，如结构完整性、材料性能、裂纹分布等。当发现资料信息缺失或与实际不符时，应立即补充进行专业的检测与评估，确保设计依据的完整性和准确性。

5.1.2. 裂纹处治方案和施工工艺的设计应遵循下列原则：应力集中程度较小、各类施工缺陷较少、施工工艺产生的残余应力较小、对原结构损伤较小、利于后续处治与维护等。

条文说明：通过合理的结构设计，减少裂纹处治过程中可能产生的应力集中现象，避免新的裂纹产生或原有裂纹的进一步扩展。

5.1.3. 采用 U 肋增补内焊法时，应明确桥面板疲劳裂纹的数量、位置、长度、深度以及锈蚀情况等。

条文说明：采用 U 肋增补内焊法对在役正交异性钢桥面板进行疲劳裂纹处治时，需全面掌握裂纹的几何特征与状态参数，其核心目的在于为修复设计提供精准的定量依据，确保焊接处治方案的科学性与安全性。

5.2. U 肋外侧显性疲劳损伤处治设计

5.2.1. 当正交异性桥面板 U 肋与面板角焊缝出现少量疲劳裂纹时，可采用裂纹焊合法、手工钨极氩弧焊重熔法、冲击裂纹闭合修复法、栓接钢板等对裂纹进行处治。各处治方法的适用对象如下表 5.2.1 所示。

表 5.2.1 各处治方法的适用对象

序号	方法	适用对象
1	裂纹焊合法	适用于表面裂纹或浅层裂纹，且裂纹未扩展至热影响区以外。
2	手工钨极氩弧焊重熔法	适用于精密修复，尤其对 U 肋内部狭小空间或复杂几何部位的裂纹处理。
3	冲击裂纹闭合修复法	适用于微裂纹或闭合性裂纹的早期干预，可结合其他修复方法使用。
4	栓接钢板	适用于深层裂纹或裂纹密集区域，可显著提高结构承载力。

条文说明：当正交异性钢桥面板 U 肋与面板角焊缝出现少量疲劳裂纹时，需根据裂纹特征及工程条件选择适宜的处治方法，以实现高效修复并控制二次损伤风险。

5.2.2. 为准确修复裂纹，可采用超声波法和探孔法等方法，探明隐性裂纹位置、长度、发展方向和裂纹尖端。对于 U 肋外侧焊趾扩展裂纹，应对疑似裂纹位置准确探伤，根据探伤结果制定具体处治措施。

5.2.3. 采用探孔法时，应按照图 5.2.3 中 a)、b)所示的方式在裂纹两端钻制探孔；对于拐离、偏离焊缝的裂纹，应按照图 5.2.3 中 c)、d)所示的方式在裂纹中间增加探孔，以便探明裂纹实际扩展位置。

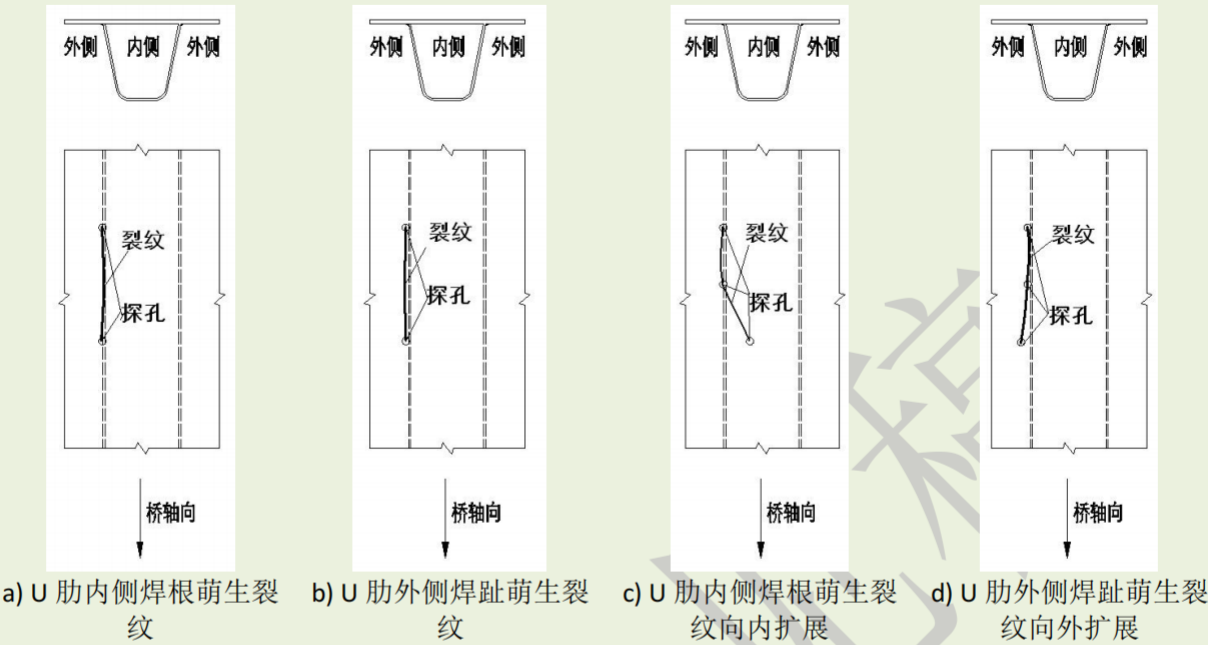


图 5.2.3 裂纹扩展方向及钻制探孔

5.2.4. 探明裂纹尖端后，可采用图 5.2.4 所示的方式，用碳弧气刨刨去面板裂纹，成 V 型坡口状，V 型坡口角度一般取 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ，需根据板厚调整（板厚 $>16\text{mm}$ 时角度取下限），以确保焊缝熔透性。同时，裂纹两端成 1:5 斜坡，坡口底部圆弧半径应 $\geq 4\text{mm}$ ，避免应力集中。

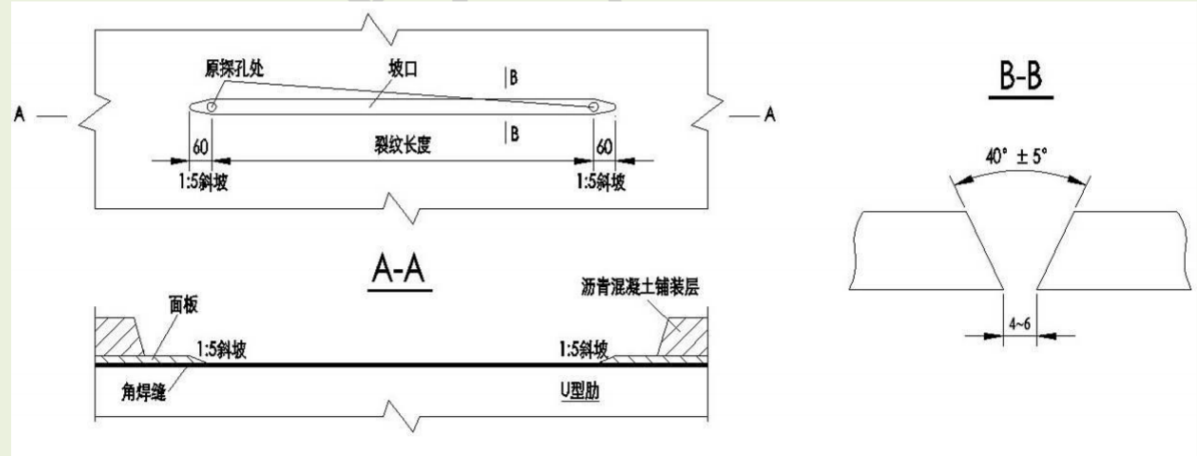


图 5.2.4 碳弧气刨范围及坡口尺寸

条文说明：刨开的 V 型坡口应用砂轮打磨至光滑匀顺，并采用着色渗透检测裂纹是否已完全切除。

5.2.5. 当 U 肋与面板间的角焊缝裂纹宽度 $>1\text{mm}$ 或不规则时，应用砂轮打磨匀顺，打磨后裂纹边缘与母材过渡圆角半径应 $\geq 2\text{mm}$ ，以利于贴陶瓷衬垫时密贴和减少焊接残余应力集中。同时，宜采用图 5.2.5 所示的方式，清除施焊处的锈蚀、油漆、水等。

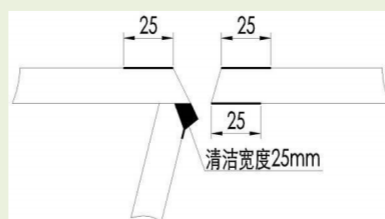
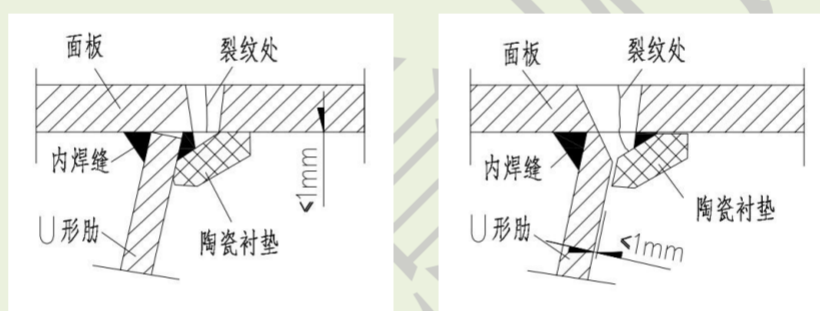


图 5.2.5 清除范围

条文说明：结合南京长江二桥钢桥面维修工程实践，通过严格的预处理工艺，可显著提升焊缝成型质量，降低疲劳裂纹复发率至 5% 以下（实测数据）。宽裂纹（ $>1\text{mm}$ ）通常伴随明显的应力集中与微观组织损伤，直接焊接易因熔池流动性不足导致未熔合、气孔等缺陷。

5.2.6. 当桥面板纵向加劲肋与面板连接焊缝裂纹贯通桥面板时，根据加劲肋与面板连接焊缝的疲劳开裂位置，进行裂纹铣刨或碳弧气刨开坡口处理后，可采用图 5.2.6 所示的方式进行补焊修复。其中，裂纹铣刨适用于桥面板厚度 $\leq 8\text{mm}$ 的工况，通过机械铣削去除裂纹及周边硬化层；碳弧气刨适用于桥面板厚度 $> 8\text{mm}$ 的工况，通过电弧熔化金属并吹除熔渣形成坡口。铣刨或气刨后需用 5 倍以上的放大镜观察坡口底部，确认无裂纹残留。



a)-焊趾裂纹

b)-焊根裂纹

图 5.2.6 面板与 U 肋连接区焊趾处裂纹补焊处治示意图

条文说明：结合南京长江四桥钢桥面维修工程实践，通过严格的裂纹处理与焊接工艺控制，可确保修复后焊缝疲劳强度达到母材的 85% 以上，实测疲劳寿命延长 3~5 倍。

5.2.7. 当桥面板 U 肋与面板角焊缝裂纹扩展至面板上时，根据面板贯穿裂纹位置，进行碳弧气刨开坡口处理后，可采用图 5.2.7 所示的方式进行补焊修复。

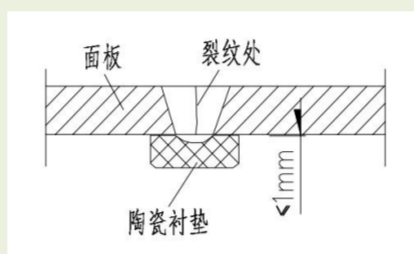


图 5.2.7 面板贯穿裂纹补焊处治示意图

条文说明：因顶板贯穿裂纹成为悬臂板，补焊处治应采用刚性固定法，在焊缝两侧 100mm 范围内设置马板，间距 $\leq 500\text{mm}$ ；厚板焊接时采用分段退焊法，每段长度 $\leq 300\text{mm}$ ，减少焊接应力集中。

5.3. U 肋内侧隐性疲劳损伤处治设计

5.3.1. 对于 U 肋内侧焊根扩展裂纹型裂纹，可采用刨除重新施焊、栓接钢板、粘贴高强材料等方式处治。

条文说明：对于 U 肋内侧焊根萌生裂纹拐弯 U 肋内侧桥面板的裂纹，宜通过在 U 肋底部开手孔的方式为修复施工提供操作空间。U 肋底部手孔的宽度宜为 80mm，手孔的长度应根据实际裂纹长度开设。为避免手孔开设过长，对 U 肋横截面削弱面积过大，宜采用开设交错手孔的方式，两相邻手孔净间距不小于 200mm。

5.3.2. 当发现 U 肋内侧焊根扩展裂纹位于焊缝位置时，可先采用超声波探伤或探孔检查后，根据探测出来的裂纹尖端位置钻孔止裂或刨除原有开裂焊缝进行重新施焊处理。

5.3.3. 当发现 U 肋内侧焊根扩展裂纹位于 U 肋母材上时，可采用图 5.3.3 所示的方式用栓接钢板对 U 肋进行补强，或采用裂纹尖端钻孔止裂，且拐点位置需钻圆形止裂孔。

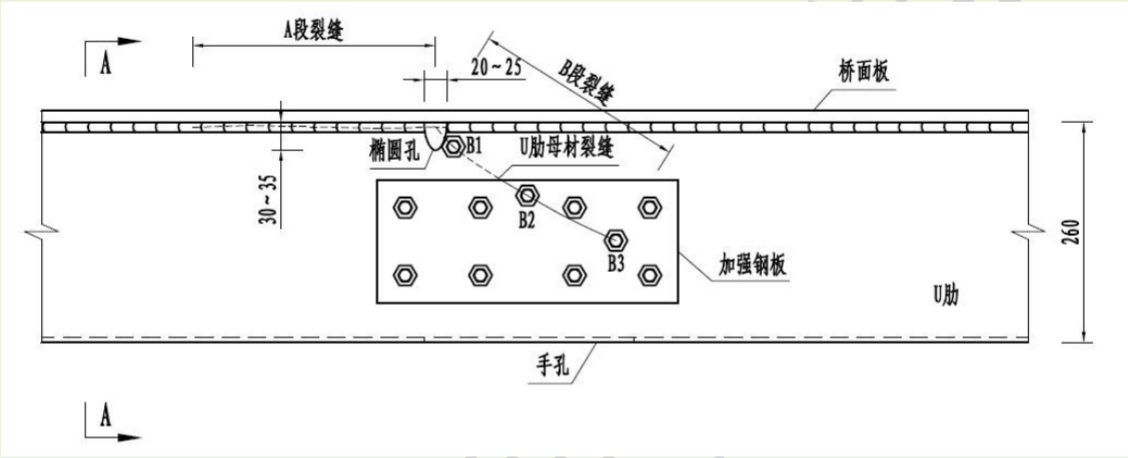
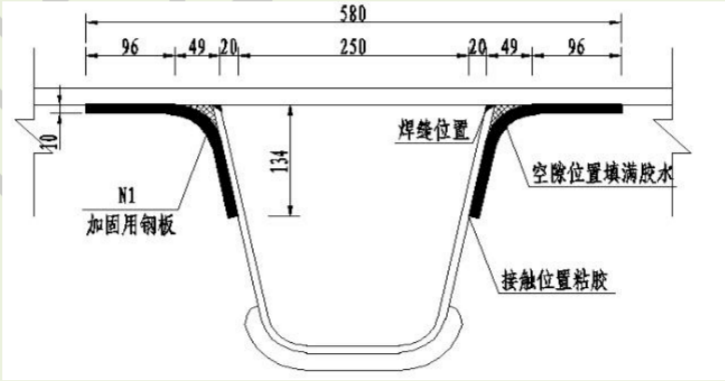


图 5.3.3 U 肋内侧焊根扩展裂纹栓接钢板处治示意图

5.3.4. 当发现 U 肋内侧焊根扩展裂纹长度在 200~600mm 时，可采用图 5.3.4 所示的方式在纵向焊缝开裂处纵桥向粘贴弯曲钢板进行处治，弧形钢板与顶板、U 肋母材采用结构胶进行粘结，弧形弯曲钢板能够与原 U 肋应保证密贴，且每段处治用钢板的长度不应超过 1.5m，同一横隔板内粘贴多块处治钢板时，钢板之间应预留观察口。



(a) 横桥向示意图

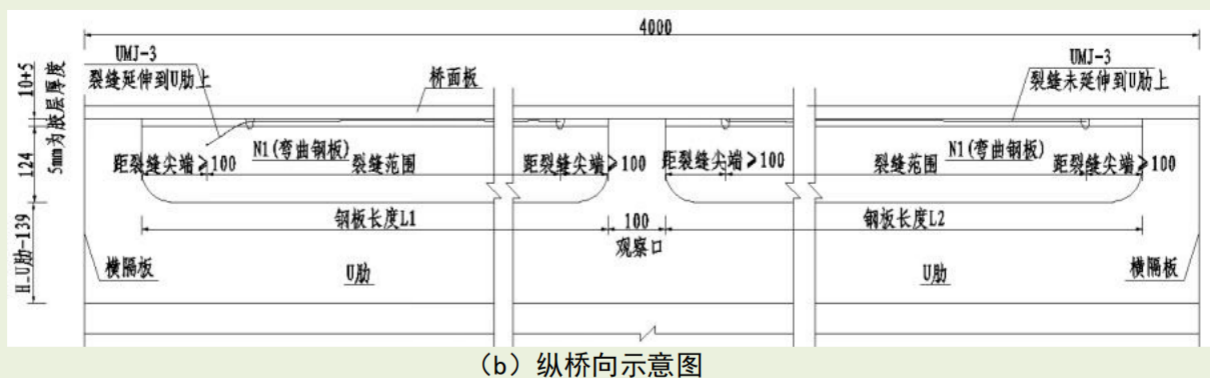


图 5.3.4 U 肋内侧焊根扩展裂纹粘贴弧形弯曲钢板处治示意图

5.3.5. 当发现 U 肋内侧焊根扩展裂纹 $\geq 600\text{mm}$ 时，可采用图 5.3.5 所示的方式在纵向焊缝开裂处纵桥向粘贴碳纤维布（CFRP）进行处治，处治时采用包覆处治。

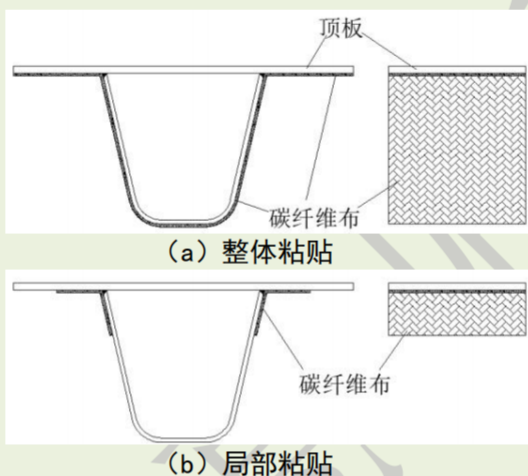


图 5.3.5 U 肋内侧焊根扩展裂纹粘贴碳纤维布处治示意图

条文说明：采用粘贴碳纤维布（CFRP）进行 U 肋内侧焊根扩展裂纹处治时，应先开展若干模型试验，进一步确定处治构造尺寸及施工工艺后进行实施，同时结合实桥试验跟踪情况，调整处治措施及施工工艺。

5.4. 焊接材料

5.4.1. 处治用钢材、焊材的力学性能（如屈服强度、延伸率）需与原结构匹配，避免因材料差异引发界面应力集中；但嵌补段修复时，材料强度等级应比原结构提高一级。

条文说明：嵌补段材料强度等级应比原结构提高一级，并预留 0.5~1.0mm 装配间隙以释放焊接变形。

5.4.2. U 肋增补内焊采用的焊接材料，应具有高粘稠、高韧性的特点，且能特别适应密闭环境的仰位焊接作业。

5.4.3. U 肋增补内焊所用焊接材料，宜选取药芯焊丝。

5.5. 设计计算

5.5.1. 采用有限元计算时应选择形状规则的单元进行网格划分，并通过试算确定网格大小，使验算部位应力计算结果的相对误差控制在 5%之内；网格尺寸应根据 U 肋板厚确定，建议焊趾附近网格尺寸为板厚的 1/5~1/10，其他区域可适当放宽至板厚的 1/2。

5.5.2. 进行正交异性钢桥面板承载能力极限状态设计计算时，桥面板局部汽车荷载的冲击系数宜采用 0.4；当铺装层温度超过 70℃或存在严重损伤时，冲击系数应修正为 0.5，并重新验算疲劳性能。

条文说明：桥面板局部汽车荷载冲击系数 0.4 的设定，基于车桥耦合动力模型分析，综合考虑铺装层温度（≤70℃）、车速（60~80 km/h）及路面不平顺度的影响。

5.5.3. 在车辆荷载作用下，正交异性钢桥面板的挠跨比不应大于 1/700，其中：挠度为顶板的竖向变形值，跨度为 U 肋的开口宽度。

条文说明：验算时需考虑车辆荷载的动态分布效应，采用最不利轮载位置组合进行校核。

5.5.4. U 肋内焊缝尺寸应验算其强度和疲劳性能，参见《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）；对于开孔区域，应额外验算应力集中系数，确保 $SCF \leq 2.0$ 。

条文说明：疲劳验算采用 Miner 线性累积损伤理论，疲劳寿命预测需基于实测动态荷载谱，并结合有限元分析结果。

5.5.5. U 肋内焊前应对 U 肋腹板进行开孔，宜按照短暂状态考虑，开孔尺寸大小、位置等应通过计算分析确定，必要时按照偶然状态进行补充计算分析优化。U 肋腹板开孔宜设置在距横隔板 1/4 纵肋跨径处，并宜选择嵌补连接段所在端。

条文说明：需通过有限元分析验证孔边应力分布均匀性。

5.5.6. U 肋内焊前应经过有限元分析或试验，科学评估焊接过程温度对既有桥面铺装层的影响。

条文说明：有限元分析中需模拟焊接热循环过程，预测热影响区（HAZ）的峰值温度，确保不超过铺装层耐热限值。

5.6. U 肋增补内焊焊缝构造要求

5.6.1. U 肋增补内焊焊缝构造尺寸应结合有限元计算确定，并应与面板和 U 肋厚度相匹配。U 肋腹板厚度 $t \leq 10\text{mm}$ 时，U 肋增补内焊焊缝构造尺寸可采用 $4 \times 4\text{mm}$ ，如图 5.6.1 所示。U 肋腹板厚度 $t > 10\text{mm}$ 时，U 肋增补内焊焊缝构造尺寸可采用 $6 \times 6\text{mm}$ 。

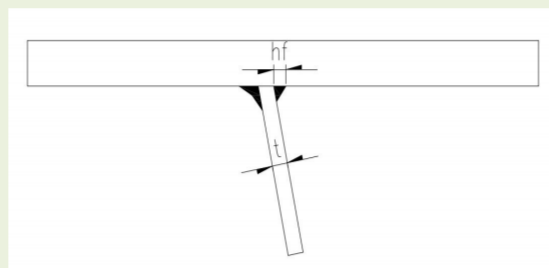


图 5.6.1 增补内焊焊缝构造尺寸

条文说明：应验证熔深是否满足板厚的 80%的要求（如 8mm 板厚需熔深 ≥ 6.4mm），且无未焊透缺陷。

5.6.2. 开孔形状为在 U 肋侧腹板上切割长度 D 不宜大于 900mm，宽度不大于 $(H-30)$ mm 的矩形槽口，其中 H 为 U 肋腹板高度，如图 5.6.2 所示。开孔边缘宜设置 $R \geq 5\text{mm}$ 的圆角，减少应力集中。

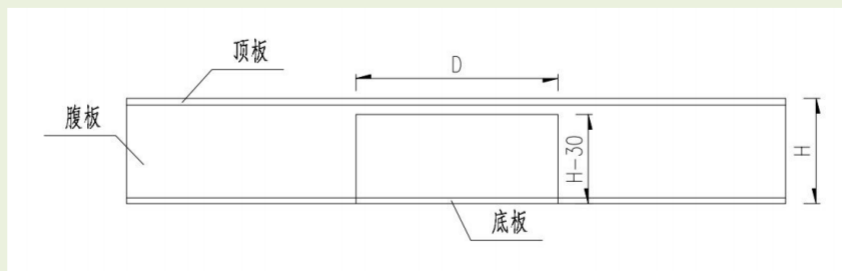


图 5.6.2 U 肋开孔尺寸 (图中单位为 mm)

条文说明：保留至少 30mm 的腹板边缘以避免局部失稳。

5.6.3. 开孔位置宜选在 U 肋封头板处，开孔顺序应满足同时开孔时开孔 U 肋相隔一道或以上的 U 肋。

条文说明：U 肋封头板处，此处应力水平较低，开孔对整体刚度影响较小。相邻开孔 U 肋需间隔至少一道未开孔 U 肋，避免连续开孔导致局部刚度突变。开孔长边应与 U 肋纵向轴线平行，以分散横向应力。

6. 在役 U 肋增补内焊焊接工艺评定

6.1. 一般要求

6.1.1. 进行工艺评定时，应采用与在役桥梁拟投入的 U 肋增补内焊设备和材料及环境条件等一致条件。在役桥梁使用的钢材存在不可替代时，应与实际工程一致；在役桥梁使用的钢材已经淘汰时，应选用与实际工程碳含量接近的钢材。

条文说明：工艺评定的核心是验证焊接设备、材料及工艺参数与实桥条件的适配性，因此，应确保评定环境（温度、湿度、焊接位置）与工程实际一致，避免因环境差异导致焊缝性能偏差。替代钢材的碳当量应接近原材，并需通过化学成分分析和力学性能试验确认其匹配性。

6.1.2. 遇有下列情况之一者，应重新进行焊接工艺评定：

1. U 肋仰位增补内焊设备型号、功率或冷却系统改变；
2. 焊接材料、钢板材质及 U 肋厚度改变；
3. 焊接电流、焊接电压或焊接速度改变 $\pm 10\%$ 以上；
4. 坡口形状和尺寸改变(坡口角度减少 10° 以上，钝边增大 2mm 以上)。

条文说明：坡口角度减少 10° 或钝边增大 2mm，会改变焊缝金属填充量，影响接头强度及疲劳性能。

6.1.3. 焊接工艺评定应确定焊接坡口尺寸、焊接材料，并编制焊接工艺作业指导书。采用气保焊时，应明确电流、电压、速度、气体组成百分比和焊丝型号及送丝速度等参数。

6.1.4. 采用 U 肋仰位增补内焊技术进行在役正交异性钢桥面板 U 肋疲劳损伤处治的内角焊缝名义熔透率应达到 80%以上，且根部熔深应 ≥ 0.8 倍 U 肋腹板厚度。

条文说明：若熔透率低于 80%，焊根处易形成未熔合缺陷，成为疲劳裂纹源。

6.2. 试件要求

6.2.1. 试件应为单个完整的 U 肋截面，面板宽度应大于 U 肋开口宽度 150mm 以上；试件长度不应小于 1000mm，确保涵盖典型焊接变形区。

条文说明：面板宽度大于 U 肋开口宽度 150mm 以上，确保边缘效应不影响焊缝应力分布。长度 $\geq 1000\text{mm}$ 可覆盖焊接热影响区（HAZ）及残余应力分布范围，避免因试件过短导致数据失真。

6.2.2. 样坯截取位置在试件的有效利用长度内选取，其尺寸应满足相关试验要求。

条文说明：在试件有效长度内选取，选取中间稳定焊接区域，避开焊缝起止弧点，取样区域需标注位置编码。切割样坯时需采用水射流或线切割，避免热影响导致金相组织变化。

6.3. 试件检验

6.3.1. U 肋内部焊缝应进行 100%外观检查，焊缝表面无咬边、无裂纹、未熔合、夹渣、焊瘤，焊脚尺寸偏差 $\leq \pm 1\text{mm}$ ，焊趾过渡圆滑；适当条件下，可采用工业内窥镜（分辨率 $\leq 0.1\text{mm}$ ）检查 U 肋内部焊缝成型质量，并形成电子文件储存。

条文说明：外观检查是质量控制的第一道防线，使用焊接检验尺测量焊脚尺寸，允许偏差 $\pm 1\text{mm}$ 。

6.3.2. 焊缝应在 24h 后进行无损检测，质量应符合设计要求和现行《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650)的有关规定。

6.3.3. 焊接接头硬度测试应按《焊接接头硬度试验方法》(GB/T2654)的规定执行；硬度值不大于 HV380 时，则判为合格；否则，判为不合格。

条文说明：焊缝区硬度 $\leq \text{HV}380$ 可避免脆性断裂，热影响区 (HAZ) 硬度梯度需平缓 (差值 $\leq 50\text{HV}$)。

6.3.4. 在焊缝的有效长度范围内随机选取宏观断面进行酸蚀试验，试验方法应符合现行《钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法》(GB/T226)的规定；熔透率 $\geq 80\%$ ，未焊透区域长度 $\leq 10\%$ 焊缝总长。

6.3.5. 试件检验结果不合格时，可在原试件上加倍取样检验。如还不能达到合格标准，应分析原因，调整工艺方案，按原步骤重新评定。

条文说明：不合格试件的处理需科学严谨，首次不合格时，在原试件相邻位置加倍截取样坯，排除偶然因素影响。

7. 在役 U 肋增补内焊焊接施工

7.1. 一般要求

7.1.1. 在役 U 肋增补内焊焊接施工前，应对设计图进行工艺性审查，重点关注焊接可达性、开孔位置对结构刚度的削弱程度及嵌补段匹配性；同时，应绘制加工图，编制焊接工艺、施工组织设计及应急方案；当需要修改设计时，应取得原设计单位的同意，并应签署设计变更文件。

条文说明：。

7.1.2. 在役 U 肋内角焊缝仰位增补焊接的具体实施流程，应参照附录 A，包括开孔、清磨、焊接、封孔及防腐等工序。

7.2. 焊接准备

7.2.1. 焊接应在正交异性钢桥面板 U 肋内部进行，焊接前应对 U 肋腹板进行开孔。

7.2.2. 焊接前，应配备可靠稳定的工作电源和动力电源，并配备 100KW 发电机作为后备切换电源。

7.2.3. 焊接前，应对 U 肋内部进行清渣，并宜用激光清磨设备处理焊缝区域，确保表面呈现金属光泽，粗糙度 $Ra \leq 6.3 \mu m$ 。

条文说明：采用激光清磨时，激光输出方式为脉冲输出，功率 200w，配备风冷或者水冷，工作焦距为 100mm，工作速度 0.4m/min，清磨区域以焊缝为中心分别向左右两侧延伸 20mm。最终需要达到 U 肋里面不得有水、锈、氧化皮、油污、油漆或其它杂物等。

7.2.4. 焊接前，应准备 U 肋内部焊接烟尘回收的设备，部署移动式焊烟净化器和废气排出管道，风量 $\geq 1200m^3/h$ ，确保作业面烟尘浓度 $\leq 2mg/m^3$ 。

条文说明：移动式焊烟净化器风量需根据焊接工艺差异匹配，J422 焊条发尘量 200-280mg/min 时 $1200m^3/h$ 可满足需求，J502 焊条发尘量 350-450mg/min 需更高风量设备。采用沉流式结构设计，配备覆膜滤筒（过滤精度 $0.1 \mu m$ ，效率 $> 99.9\%$ ）和自动清灰系统，可有效控制作业面烟尘浓度。设备配置万向吸气臂（2-5 米可调）和防爆脚轮，适应 U 肋内部有限空间作业。

7.2.5. 焊接前，应准备通风系统，配置轴流风机（风量 $\geq 2000m^3/h$ ）与 250mm 抗静电 PVC 风管，每小时换气次数 ≥ 30 次，并进行绝缘检查。

条文说明：轴流风机 $2000m^3/h$ 风量配合 $\phi 250mm$ 抗静电风管，可形成 ≥ 30 次/小时换气效率。系统采用顶进风底排风设计，配合导流装置提升气流组织效率。绝缘检查需包含电机绕组（绝缘电阻 $\geq 2M\Omega$ ）、电缆接头（耐压测试 1500V/1min）等关键部位，确保在湿度 $> 80\%$ 环境中安全运行。

7.2.6. 焊接前，应准备照明系统，采用防爆 LED 灯带（照度 $\geq 300lx$ ）与移动工作灯组合照明，电缆沿桥架敷设，并进行绝缘检查。

7.2.7. 焊接前，宜准备工作温度调节系统，采用工业空调与冷风机组合，电缆沿桥架敷设，并进行绝缘检查。

条文说明：温度调节系统采用冷暖型工业空调（制冷量 $\geq 5kW$ ，制热量 $\geq 6kW$ ）配合离心式冷风机（风量 $\geq 3000m^3/h$ ），可实现作业区域温度控制在 $18-28^\circ C$ 。设备间距保持 ≥ 1.5 倍出风口直径，

电缆敷设需设置温度传感器（监测点间距 $\leq 10\text{m}$ ），绝缘检测包含压缩机电机（绝缘电阻 $\geq 5\text{M}\Omega$ ）和控制系统（耐压 $2500\text{V}/1\text{min}$ ）。

7.2.8. 焊接前，焊丝长度应满足单次焊接长度的要求；焊丝盘应放置在专用保温筒内，使用前烘干温度 $150\text{-}200^{\circ}\text{C}$ ，保温时间 $1\text{-}2\text{h}$ 。

7.2.9. 焊接前，宜将 U 肋开口处的嵌补复原段准备就位。

7.2.10. 焊接前，宜配置有害气体监测与报警装置；人员进入钢箱梁内，应佩戴安全帽、正压式呼吸器和对讲机。

7.3. 焊接环境

7.3.1. 在役桥梁正交异性钢桥面板为封闭空间时，应采取相关措施确保混合气、电流、电压、空气温度、空气湿度等焊接环境的稳定。

7.3.2. 焊接环境的相对湿度应小于 80% ，环境温度不应低于 5°C 、高于 40°C 。

7.3.3. U 肋板单元焊接道间温度不应超过 160°C ，超过 160°C 时应暂停焊接，待温度降至规定范围后恢复。

7.3.4. 雨雪、冰雹等恶劣天气，或者钢箱梁内存在结霜时，不得进行焊接作业。

7.4. 焊接实施

7.4.1. U 肋仰位增补内焊宜采用微型自动化焊接机器人施焊作业。

7.4.2. 焊接顺序应遵循“先深后浅、先长后短”原则，单条焊缝应一次连续焊完，中断时应采取后热保温措施。同时，应采取合理的工序，避免因局部集中焊接导致 U 肋变形或焊缝咬边。

7.4.3. U 肋仰位增补内焊焊接宜遵循以下规定及要求：

1. 严格按照焊接工艺规定的参数执行；
2. 设备使用的焊材宜采用 $\Phi 1.2$ 实心焊丝，使用混合气体作为保护气体，焊接电流宜为 $220\sim 260\text{A}$ ，电压 $18\sim 21\text{V}$ ；U 肋仰位焊接机器人的补焊移动速度（自主行走速度）宜为 $0.25\sim 0.4\text{m}/\text{min}$ ；
3. 焊枪与焊缝夹角应控制在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ，焊丝伸出长度 $12\sim 15\text{mm}$ ，干伸长波动 $\leq \pm 2\text{mm}$ 。
4. 禁止在焊缝区域以外的母材上随意起弧；
5. 焊接过程中利用高清视频时刻观察焊缝成型及外观质量情况；
6. 随时观察设备运行情况及气体剩余量等情况。

7.4.4. 焊道清理宜即刻焊接，间隔不得超过 4 小时，超出时限应重新进行表面处理。

条文说明：

1. 焊道打磨需要打磨出金属光泽、保证焊接区域没有氧化膜、打磨纹路跟焊缝方向平行且均匀、打磨深度不超过 0.2mm。如果第一次清磨效果没有达到预计效果则需要二次清磨，直到 U 肋内部焊道清理效果达到可以焊接作业的标准为止。

2. 每次清磨结束后需要尽快完成焊接作业，受到不同环境影响，有的地方空气湿度较高导致 U 肋二次生锈的速度可能很快，为了避免无效作业则需要尽快完成焊接作业。

7.4.5. U 肋开孔处，宜采用工业视频探头配合手工焊，完成开孔处的 U 肋内焊，不宜采用盲焊。

7.4.6. U 肋焊接完成经检测合格后，应对所焊接位置采取局部残余应力消除工艺，如局部热处理，并进行钢结构防护体系恢复工序。

7.5. 开孔复原

7.5.1. 焊接完成后，U 肋开孔处嵌补复原段与原 U 肋腹板、底板宜采用螺栓连接；螺栓开孔套钻困难时，可采用钢内衬单面焊双面成型工艺进行复原，并对焊缝进行打磨、喷漆。

条文说明：

1. U 肋内焊后的恢复采用栓焊结合的连接方式，通过高强螺栓群与角焊缝的协同作用实现结构传力，理论上兼具机械连接的可靠性与焊接连接的连续性。但在既有 U 肋修复场景中存在以下适配性问题：（1）空间约束：U 肋内部净空尺寸通常小于 300mm，常规磁力钻机操作半径达 250mm，实际可作业空间不足 50mm，导致钻孔定位精度难以保证；（2）既有变形影响：原焊接残余应力导致腹板平面度偏差达 3-5mm，套钻时易引发螺栓孔群错位，实测孔位偏差率达 18.7%；（3）工效制约：单螺栓孔施工周期延长至 45min（常规工况 15min），综合工效下降 66.7%，难以满足在役桥梁维修窗口期要求。因此，栓焊结合的连接方式需要针对具体工作条件进行选择。

2. U 肋开孔处采用单面焊双面成型工艺时，采用实心焊丝配合聚弧脉冲深熔焊枪进行打底焊接，再用药芯焊丝进行盖面焊接；该工艺通过深熔焊实现全熔透效果，可提升焊缝疲劳性能。

7.5.2. U 肋开孔处嵌补复原宜通过在 U 肋嵌补复原段底部开手孔的方式为复原施工提供操作空间，U 肋底部手孔的宽度宜为 80mm，长度宜为 200mm。

条文说明：底部手孔尺寸设计依据来源于钢内衬安装空间需求，80mm×200mm 开孔可满足焊接机器人进出要求。施工时需注意手孔边缘打磨处理，避免应力集中，完成后应进行防腐涂层修复。

7.6. 缺陷返修

7.6.1. 当 U 肋内焊焊缝表面有裂纹时，应进行返修处理，返修应符合下列要求：

1. 焊缝表面裂纹的修磨与补焊长度应为焊接裂纹起止点往两端各延伸 50mm 以上；
2. 焊缝表面裂纹返修前应对返修区域进行预热，预热温度宜为 60℃～80℃，预热范围为缺陷周围不小于 100 mm 的区域；
3. 返修时再次发现 U 肋板单元焊缝表面有裂纹时，应重新开展焊接工艺评定试验。

条文说明：

1. 参考 GB/T 19418《钢的弧焊接头 缺陷质量分级指南》，裂纹尖端存在微观扩展区，延伸 50mm 可确保彻底清除裂纹源。研究表明，疲劳裂纹扩展速率在达到临界长度前呈指数增长，延伸修磨可打断裂纹扩展路径。

2. 参考 AWS D1.5《桥梁焊接规范》，预热温度 60℃-80℃的设定基于低合金钢的氢扩散需求；预热范围≥100mm 可以确保热影响区温度梯度平缓，避免附加应力。

3. 参考 EN 1993-1-9《欧洲钢结构设计规范》，同一部位反复出现裂纹表明原工艺存在系统性缺陷，需重新进行焊接工艺评定。

7.6.2. 当 U 肋内焊焊缝上深为 0.8 mm 以上或宽度小于深度的咬边、漏焊或焊道与 U 肋分离时，应重新补焊处理，焊脚尺寸为 4~6mm，并打磨光滑。

条文说明：参考 JTG/T 3650-2020《公路桥涵施工技术规范》，焊脚尺寸过小（<4mm）无法保证有效连接面积，过大（>6mm）可能引发 U 肋局部变形。4-6mm 的焊脚尺寸范围可覆盖 t=6-10mm 的 U 肋板厚。同时，依据《钢结构焊接疲劳设计指南》，焊趾半径从 0.5mm 增至 2mm，疲劳强度可提升 30%-50%。

7.6.3. 对直径 $\phi \leq 4\text{mm}$ ，深度 $h \leq 0.5\text{mm}$ 的电弧擦伤缺陷用砂轮修磨匀顺，打磨后表面粗糙度 $Ra \leq 6.3\text{ }\mu\text{m}$ ； $\phi > 4\text{mm}$ ，深度 $h > 0.5\text{mm}$ 的电弧擦伤缺陷，采用低热输入工艺补焊后用砂轮修磨匀顺。

条文说明：参考 GB/T 8923.1《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定》， $\phi \leq 4\text{mm}$ 且 $h \leq 0.5\text{mm}$ 的擦伤属于轻微表面损伤，打磨后表面粗糙度 $Ra \leq 6.3\text{ }\mu\text{m}$ 即可满足使用要求。同时，依据 AWS D1.1《钢结构焊接规范》， $\phi > 4\text{mm}$ 或 $h > 0.5\text{mm}$ 的擦伤可能已伤及母材，需补焊填充；补焊时应采用低热输入工艺（电流≤150A），避免局部过热导致硬度升高。

7.6.4. 对于烧穿缺陷，先在 U 肋外侧补焊，然后在 U 肋内侧刨槽封底补焊；其中，内侧刨槽深度应≥烧穿深度+2mm，采用碳弧气刨时，需将刨槽边缘打磨至露出金属光泽。封底焊缝应熔透至外侧焊缝根部，形成“V”型熔合线。

条文说明：U 肋外侧补焊为优先步骤，因外侧操作空间大，可保证焊缝成形质量。

7.6.5. 其它缺陷按表 7.6.5 修补方法进行处理。

表 7.6.5 U 肋板单元焊缝缺陷返修范围及修补方法

缺陷种类	严重程度或范围	修补方法	
		铲磨（刨）	焊接
漏焊	任何区域		√
焊偏	焊偏严重，基本形成“单边”		√
焊缝尺寸不足	不足超过 2mm 以上		√
直径≥1mm 或密集性气孔	任何区域	√	√
焊瘤	大于 3mm	√	
飞溅	任何区域	√	

条文说明：参考 GB/T 12469《焊接质量保证 钢熔化焊接头的要求和缺陷分级》，气孔直径≥1mm 或密集分布时，需清除缺陷后重新焊接。依据 JTG/T 3650-2020《公路桥涵施工技术规范》，焊瘤>3mm 需打磨至与母材平齐，飞溅需彻底清除以避免涂装缺陷。

7.6.6. 返修焊接完成后应进行复检；同一部位返修次数不应超过两次，返修次数超过 2 次时需经技术负责人批准。

条文说明：参考 EN 1090-2《钢结构执行标准》，同一部位返修次数不应超过两次，以防止局部性能过度弱化。第三次返修需经技术负责人批准，并制定专项质量控制方案。

7.6.7. 所有返修操作应由持有Ⅱ类及以上资质的焊工执行，焊接工艺需经评定合格。

条文说明：参考 GB 50236-2011《现场设备、工业管道焊接工程施工及验收规范》，返修操作涉及缺陷清除、坡口制备、多层多道焊等复杂工序，需焊工具备Ⅱ类及以上资质（技师、高级技师）持证者。

征求意见稿

8. 在役 U 肋增补内焊焊接质量检验

8.1. 一般要求

8.1.1. 所有焊缝应在全长范围内进行外观检查，不得有裂纹、未熔合、夹渣、未填满弧坑和焊瘤等缺陷。

条文说明：《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）明确要求：一级焊缝外观质量需满足“裂纹、未熔合、未焊透、条状夹渣”等缺陷零容忍，咬边深度 $\leq 0.3\text{mm}$ 且累计长度 $\leq$ 焊缝长度 10%。

8.1.2. 经外观检查合格的焊缝方能进行无损检验，无损检验应在焊接 24h 后进行。

条文说明：参考 GB/T 19418《钢的弧焊接头 缺陷质量分级指南》，氢致延迟裂纹需在焊接完成后 24-48 小时进入萌生高峰期，此时检测可最大限度发现潜在裂纹。

8.2. 焊缝外观检验

8.2.1. U 肋内焊焊缝外观检测方法、范围与比例应符合表 8.2.1。

表 8.2.1 U 肋内焊焊缝外观检测

焊缝位置	检测方法	检测范围	检测比例
U 肋内焊焊缝	目视及焊接检测尺	焊缝两端各 200mm	100%
	工业电视视频	内焊焊缝全长	100%
注：采用工业电视视频对 U 肋板单元内侧焊缝外观检验时，视频监控图像分辨率应小于 0.1mm，并对焊缝外观监控图像信息进行储存。			

条文说明：依据 ISO 17637《焊缝无损检测 熔焊接头目视检测》，U 肋内焊缝最小允许缺陷尺寸为 0.2mm（如气孔、夹渣），视频分辨率需达到缺陷尺寸的 1/2 以下以确保检出率，即视频分辨率 $< 0.1\text{mm}$ 。

8.2.2. 焊缝外观质量检验应满足《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T3650）的有关规定。

8.3. 质量要求

8.3.1. U 肋仰位增补内焊焊缝采用无损检测探伤方法及探伤范围要求可参照表 8.3.1 执行。

表 8.3.1 U 肋板单元内角焊缝无损检测探伤方法及探伤范围

序号	焊缝形式	质量等级	探伤方法	探伤部位与比例	执行标准
1	部分熔透焊缝（熔透率不低于 80%）	1	超声相控阵	焊缝全长	本规程附录 B
			超声导波	焊缝全长	本规程附录 C
			磁粉	U 肋开孔处两端各选取 200mm	GB/T 26951 GB/T 26952

序号	焊缝形式	质量等级	探伤方法	探伤部位与比例	执行标准
		2	超声相控阵	U 肋开孔处两端和中间各选取 1000mm	本规程附录 B
			超声导波	U 肋开孔处两端和中间各选取 1000mm	本规程附录 C
			涡流检测	U 肋开孔处两端和中间各选取 1000mm	GB/T 30565
			漏磁检测	U 肋开孔处两端和中间各选取 1000mm	GB/T 31212
			磁粉	U 肋开孔处两端各选取 200mm	GB/T 26951 GB/T 26952
注：U 肋板单元焊缝无损检测的质量等级按照设计文件的要求执行；在设计文件无明确要求时焊缝无损检测的质量等级可按照 2 级执行,但主梁跨中 1/3 区域应升级为等级 1。					

条文说明:参考 ASTM E2775《超声导波检测标准指南》,适用于 U 肋等长距离线性结构检测,单次激发可覆盖 3-5m 范围,对纵向缺陷检测效率提升 80%。依据 GB/T 26951《磁粉检测 第 1 部分:总则》,U 肋开孔处两端 200mm 区域为高应力区,磁粉检测对表面裂纹(深度 $\leq 0.5\text{mm}$)灵敏度达 0.1mm。

8.3.2. 无损检测应符合下列规定:

- 1 采用磁粉探伤(MT)检测时,按现行《焊缝无损检测焊缝磁粉检测验收等级》(GB/T26952) 2X 级进行验收;
- 2 采用超声相控阵、超声导波进行无损检测时,按照现行《焊缝无损检测超声检测技术、检测等级和评定》(GB/T11345)进行评定;
- 3 采用漏磁检测时,判定准则应符合《无损检测漏磁检测》(GB/T31212)的规定;
- 4 采用涡流检测时,判定准则应符合《无损检测涡流检测》(GB/T30565)的规定。

8.3.3. 采用多种方法检验的焊缝,各方法检测区域需重叠 $\geq 50\text{mm}$,应分别达到对应方法检验的质量要求,方可认为该焊缝合格。

条文说明:参考 AWS D1.5《桥梁焊接规范》,多方法检测时各方法需独立满足质量等级要求。

8.3.4. 当进行磁粉检测的焊缝发现超标缺陷时,应加倍检验;当进行局部超声波或者超声相控阵等检测的焊缝发现裂纹或较多其他缺陷时,应扩大该条焊缝检测范围,必要时可延长至全长。

条文说明:参考 GB/T 26951《磁粉检测 第 1 部分:总则》规定,连续出现显示时需扩大检测范围至相邻区域。根据 GB/T 11345《焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定》规定,裂纹类缺陷需 100%清除,密集缺陷需评估整体质量等级。

附录 A 在役 U 肋内角焊缝仰位增补焊接实施流程

A.1 实施流程

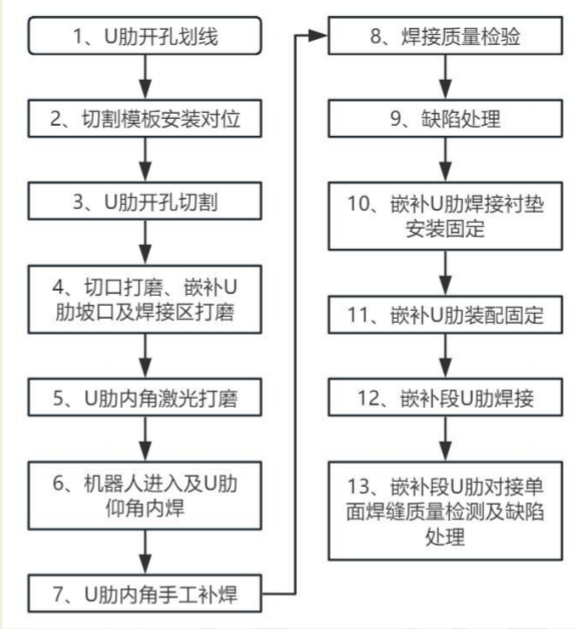


图 A.1 实施流程图

A.1.1 对 U 肋工艺孔进行划线，以确定切口划定范围。

A.1.2 安装开孔靠模，如下图所示，靠模内框长 900mm、高 180mm，整体呈 L 型，直角边做 R40 圆角避免应力集中。

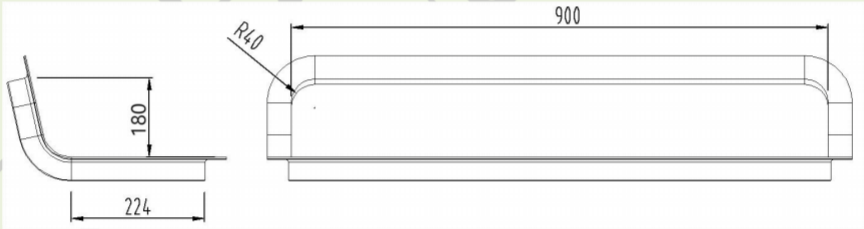


图 A.2 靠模尺寸与示意图

A.1.3 采用等离子切割，对切割边缘进行打磨开孔，切割高度优选 180mm，长度不大于 900mm，如下图所示，切割段应为 U 肋嵌补段处。

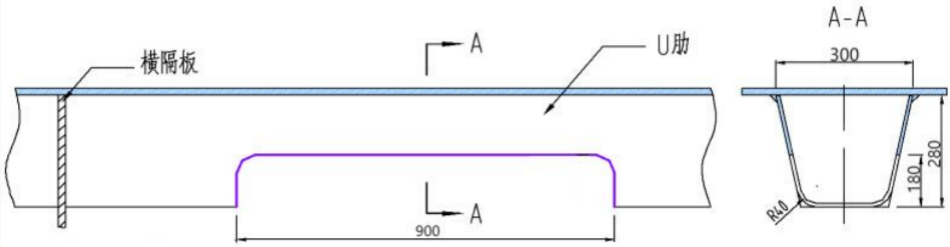


图 A.3 U 肋开孔示意图

A.1.4 利用 U 肋仰位修磨机器人，对 U 肋与顶板焊接区域进行清磨处理。

A.1.5 利用升降平台，将 U 肋仰位内焊机器人从切口处放入 U 肋内部，机器人在进入 U 肋后自动找正 U 肋中心线，机器人自动行驶至 U 肋端封板位置后停车待机，开始调节焊接参数和姿态，完成设置后开始焊接，进行内角焊缝焊接。

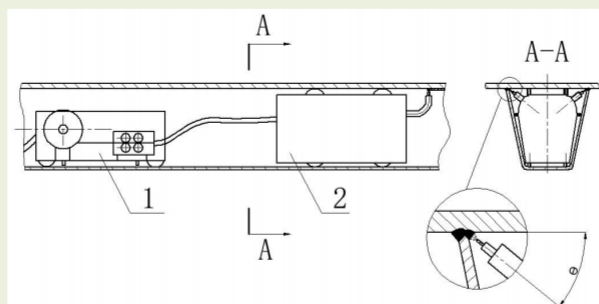


图 A.4 U 肋仰位内焊机器人焊接示意图

A.1.6 内焊机器人结束焊接后，利用升降平台退出 U 肋，对切口段 U 肋的内角焊缝进行手工焊接。

A.1.7 焊接过程中及焊后利用 U 肋仰焊机器人自带高清视频（录像）进行焊接外观检查，在 U 肋开口处对焊缝进行着色探伤检查，并对焊接区域首尾 200mm 区域进行探伤。

A.1.8 当 U 肋内部出现明显焊接缺陷时，通过机器算法标记出缺陷位置，将焊接机器人再次装载 U 肋内部，通过数据快速抵达缺陷位置对缺陷点进行熔覆焊接，当缺陷位置存在严重焊瘤时，则采用修磨机器人，打磨后再进行仰位补焊。

A.1.9 焊接完成后，U 肋开孔处嵌补复原段与原 U 肋腹板、底板宜采用螺栓连接。

A.1.10 螺栓开孔套钻困难或难以实施螺栓连接时，采用手持式角磨机对 U 肋切割段边缘区域打磨至切口边缘平滑，并开设焊接坡口，再清理其焊接区 30mm 范围内的油锈，根据 U 肋工艺孔位置，采用钢衬垫进行单面焊双面成型；还原 U 肋后应清除表面焊渣、焊瘤，并在 24 小时后对施焊处进行应力消除，最后对施焊处涂漆防锈。

A.2 基本要求

A.2.1 靠模安装时，其内侧相距切割引导线的间距宜为 10mm。

A.2.2 开孔作业时所使用的等离子切割机，建议输出电流为 67A，最大气流量为 0.5m³/min。

A.2.3 清磨焊道时需打磨出金属光泽，清洗纹路应与焊缝方向平行且均匀。

A.2.4 若首次清磨效果未达到焊接要求，须进行二次清磨，直至 U 肋内无污水、锈、氧化皮、油污、油漆或其它杂物等，并达到焊接作业标准。

A.2.5 清磨区域为以焊缝为中心向两侧延伸至少 20mm 的范围。

A.2.6 焊道除锈时，建议采用激光清洗，激光输出方式宜为脉冲输出，建议功率优选 2000w，配备风冷或者水冷，清洗速度为 0.4m/min。

A.2.7 清磨结束后，需要尽快完成焊接作业，避免空气湿度较高导致 U 肋二次生锈。

A.2.8 内焊作业时，宜采用实心焊丝惰性气体全自动焊接，建议电流为 210-220A、电压为 19-20V、焊速为 0.25~0.40m/min。

A.2.9 手工仰角内焊补焊的具体工艺，宜依据相关规范工艺要求。

A.2.10 为了满足复原焊接工艺要求，须将 U 肋切割段的锯齿面进行打磨。

A.2.11 采用钢衬垫进行单面焊接时，应根据规范要求的打底、盖面双道焊接工艺进行操作。

征求意见稿

附录 B 在役 U 肋内角焊缝部分熔透焊缝超声波相控阵检测

B1 检测流程

B1.1 初检：检测前应当对 U 肋与顶板之间构造细节处的板厚、材料等基本情况进行了解和分析，特别是制造或运行环境可能出现的缺陷类型、位置等。

B1.2 编制检测文件：检测前编制相应检测操作文件，验证是否符合要求。

B1.3 清理被检工件：检查焊缝面是否具备检测条件，相控阵探头移动区域应打磨光滑，清除油漆、焊瘤、油污等，对目视缺陷进行处理。

B1.4 选用设备及器材：根据检测文件，选择合适的仪器、配件、扫查装置、耦合剂等。

B1.5 仪器设置：对探头、楔块、编码器进行对应的测量或校准，然后进行角度增益校准和时间增益校准，校准完成后，根据检测文件设置并考虑工件表面情况设置检测灵敏度。

B1.6 焊缝检测：相控阵检测对检测速度、探头耦合情况、探头相对焊缝的距离有严格要求，因此应严格根据检测文件规定扫查，检测过程中要时刻注意检测数据采集是否符合标准，检测过程中和检测结束时要进行系统复核，保证检测系统的准确性。

B1.7 数据处理：检测完成后，应及时保存检测数据避免丢失。技术人员对数据分析和评价，出具检测结果。

B1.8 裂纹记录：检测完成后，应在检测文件中详细记录裂纹情况，同时在 U 肋腹板上用粉笔记录以便后续维修处理。

B2 检测规定

B2.1 检测时，探头置于桥面板顶板下缘，可采用爬梯登高人为检测或采用自动化吸附机械人搭配相控阵设备进行仰位检测。

B2.2 相控阵探头扫查时，宜先采用锯齿形扫查，一般从较远处向焊缝处开始移动，探头前后移动的范围应保证扫查到全部焊缝截面及热影响区。在保持探头垂直焊缝作前后移动的同时，还应作 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 的左右转动。

B2.3 相控阵探头边缘与 U 肋外侧焊缝边缘的距离 S 需根据顶板板厚确定，建议 S 的取值范围为 5~30mm。

B2.4 当发现裂纹边缘不清晰或难以判断时，在该位置附近可采用前后、左右、转角、环绕四种基本扫查路径，以观察确定裂纹位置、裂宽和深度。

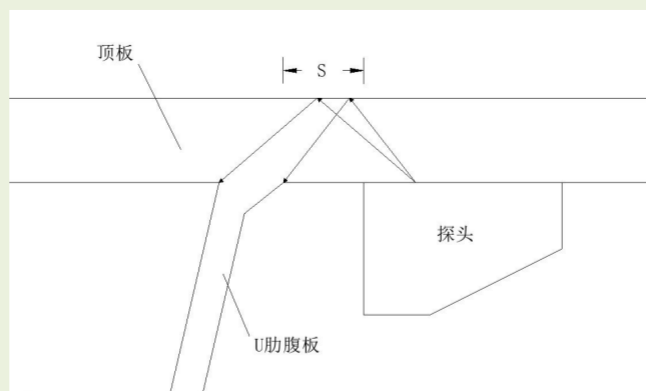


图 B. 1 相控阵探头位置示意图

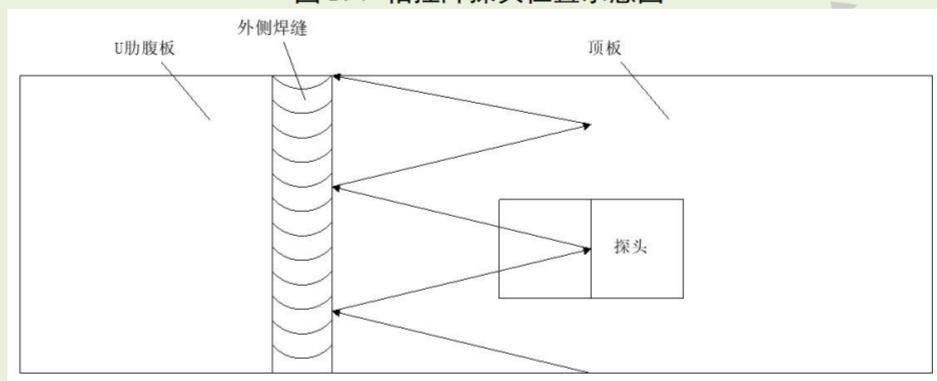


图 B. 2 相控阵探头锯齿形扫查路径示意图

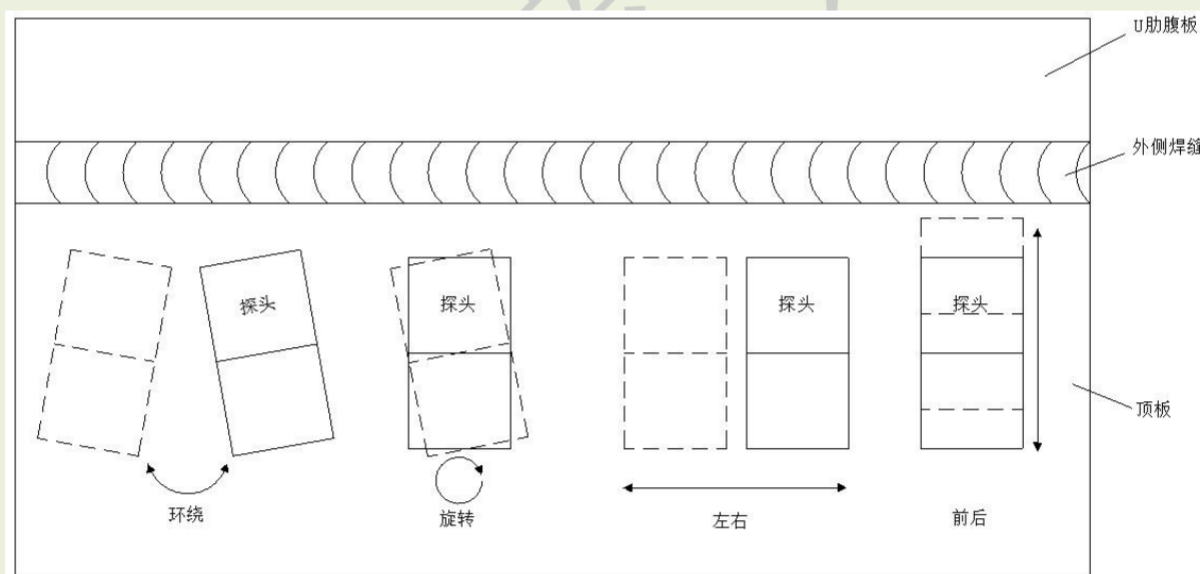


图 B. 3 相控阵探头四种基本扫查路径示意图

附录 C 在役 U 肋内角焊缝超声导波检测

C1 基本要求

C1.1 采用一激励一接收超声导波检测方式对在役 U 肋内角焊缝处的顶板疲劳裂纹进行检测。

C1.2 超声导波检测系统应包含两个超声导波探头、信号发生模块、电压放大模块及数据采集模块。

C1.3 用于激励信号的超声导波探头与用于接收信号的超声导波探头分别放置于 U 肋两侧。

C1.4 波形宜选用五周期汉宁窗调幅脉冲波。

C1.5 根据超声导波在钢板中传播的频散曲线，中心频率宜选用低于 100kHz（零阶模态截止频率），以避免激励高阶模态超声导波，利于后续信号处理；放大后电压幅值宜大于 100Vpp。

C1.6 宜利用基准差法，以无损区域的接收信号为基准，对待检测区域的散射信号进行提取以判断是否存在损伤，也可采用其他经验证的导波信号处理方法。

C1.7 换能器与正交异性钢桥面板的耦合需使用耦合剂，耦合剂须涂抹均匀以保证耦合效果。

C1.8 激励电信号电压峰值超过 100V，操作时须避免触摸导线与前置放大器的金属部分。

C1.9 探头与设备在移动时须轻拿轻放，避免磕碰导致设备损坏；使用设备前应先去静电，防止静电击穿设备电路板。

C2 检测流程可依照本附录 B 中的检测流程，或参照相关规范要求开展无损检测。

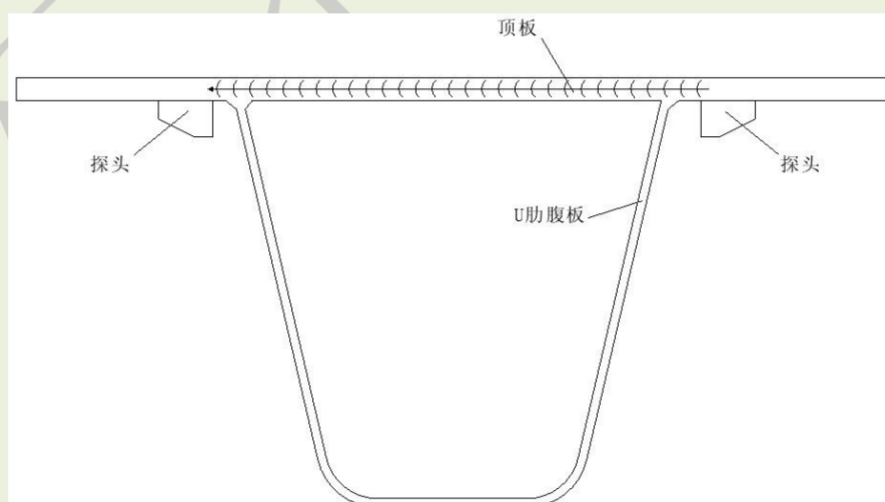


图 C.1 在役 U 肋内角焊缝超声导波检测探头位置示意图

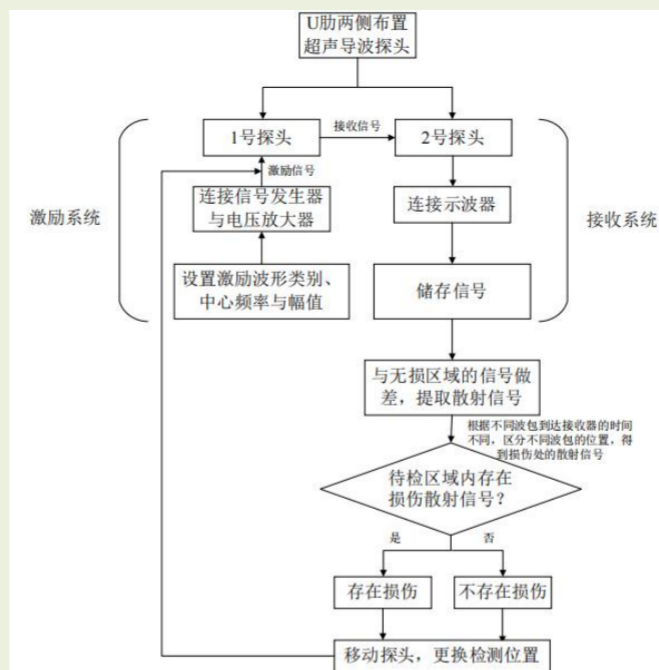


图 C.2 在役 U 肋内角焊缝超声导波检测技术路线

用词说明

1 本标准（规范/规程/指南……）执行严格程度的用词，采用下列写法：

- 1) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。
- 2) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。
- 3) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

1) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准或行业标准时，应表述为“应符合×××××的有关规定”。(×××××为标准编号)

2) 当引用标准中的其他规定时，应表述为“应符合本标准（规范/规程/指南……）第×章的有关规定”、“应符合本标准（规范/规程/指南……）第×.×节的有关规定”、“应按本标准（规范/规程/指南……）第×.×.×条的有关规定执行。”