



指导性文件  
GUIDANCE NOTES  
GD 09-2007

中国船级社

# 海上自升式钻井平台桩腿 裂纹检验与修复指南

**GUIDELINES FOR INSPECTION  
AND REPAIR OF CRACKS ON  
JACK-UP'S LEG**

2007

人民交通出版社



指导性文件  
GUIDANCE NOTES  
GD 09-2007

中国船级社

# 海上自升式钻井平台桩腿 裂纹检验与修复指南

## GUIDELINES FOR INSPECTION AND REPAIR OF CRACKS ON JACK-UP'S LEG

2007

北京

Beijing

# 目 录

第 1 章 通 则.....	1
1.1 目的.....	1
1.2 适用范围.....	1
1.3 缩写与定义.....	1
1.4 一般要求.....	2
第 2 章 桩腿裂纹的检验方法.....	3
2.1 概述.....	3
2.2 外观检查.....	3
2.3 磁粉检验.....	3
2.4 渗透探伤.....	4
2.5 桩腿裂纹深度的测定.....	5
第 3 章 提高桩腿疲劳寿命的 TIG 熔修技术及其应用.....	6
3.1 概述.....	6
3.2 提高桩腿疲劳寿命的关键在于对焊接接头的焊趾进行焊后处理.....	6
3.3 TIG 熔修技术.....	6
3.4 TIG 熔修的使用要求.....	7
第 4 章 桩腿裂纹的平焊位超两次修复技术.....	11
4.1 概述.....	11
4.2 对桩腿裂纹多次修复的要求.....	11
4.3 试验研究结果启示.....	13
第 5 章 桩腿裂纹的立焊位修复技术.....	14
5.1 概述.....	14
5.2 桩腿裂纹立焊位焊补工艺.....	14
5.3 桩腿裂纹立焊位焊补规范.....	14
5.4 桩腿裂纹立焊位 TIG 熔修工艺.....	14
5.5 桩腿裂纹立焊位 TIG 熔修规范.....	15
第 6 章 TIG 熔修技术在自升式钻井平台桩腿裂纹修复中的应用.....	16
6.1 概述.....	16
6.2 “勘探二号”平台桩腿裂纹焊补修复后作与未作 TIG 熔修的效果对比.....	16
6.3 “南海一号”平台桩腿裂纹焊补后作与未作 TIG 熔修的效果对比.....	18
6.4 小结.....	19
附录 1 桩腿存在裂纹的平台的安全评估.....	20
1.1 概述.....	20
1.2 对桩腿带裂纹平台安全评估的要求.....	20
1.3 参考实例.....	20
附录 2 带裂纹损伤结构的有限元方法.....	21
2.1 力学模型及基本假设.....	21
2.2 损伤单元的刚度矩阵.....	21
2.3 损伤杆件等效单元刚度矩阵.....	23
2.4 损伤杆件等效的有限元参数.....	25

附录 3 裂纹损伤对平台安全影响的评估实例 .....	26
附录 4 海上自升式钻井平台桩腿裂纹平焊位超两次 TIG 修复技术 .....	30
4.1 概述 .....	30
4.2 桩腿裂纹的超两次焊补工艺 .....	30
4.3 桩腿裂纹的超两次 TIG 修复技术 .....	38
4.4 桩腿裂纹的超两次焊补工艺和超两次 TIG 熔修技术的修后效果比较 .....	40
附录 5 海上自升式钻井平台桩腿裂纹立焊位修复技术 .....	55
5.1 概述 .....	55
5.2 桩腿裂纹的立焊焊补工艺 .....	56
5.3 立焊焊补焊缝的 TIG 熔修 .....	57
5.4 立焊焊补试件与立焊焊补熔修试件疲劳寿命的比较 .....	58

# 第 1 章 通 则

## 1.1 目的

1.1.1 为给海上自升式钻井平台桩腿裂纹修复提供通用性指导的方法，特制定《海上自升式钻井平台桩腿裂纹检验与修复指南》（以下简称为指南）。

1.1.2 本指南可作为授权或申请中国船级社审批海上自升式钻井平台桩腿裂纹检验报告、对桩腿存在裂纹的平台实施安全评估的指导性文件。

1.1.3 本指南可作为授权或申请中国船级社审批海上自升式钻井平台桩腿裂纹修复工艺、规范等技术文件以及为制定这些技术文件须进行的相关试验、检验的指导性文件。

## 1.2 适用范围

1.2.1 本指南适用于海上自升式钻井平台。

1.2.2 海上固定平台、钢质船等海上钢结构物亦可参照使用。

## 1.3 缩写与定义

### 1.3.1 缩写

本指南所用缩写如下：

**TIG 熔修：**指钨极（Tungsten）惰性气体（Inert Gas）保护电弧在焊趾处进行的重熔整形技术，简称 TIG 熔修。

### 1.3.2 定义

本指南所用定义如下：

(1) 海上自升式钻井平台：指具有活动桩腿且其主体能沿支撑于海底的桩腿升至海面以上预定高度，为勘探或开采诸如液态或气态碳氢化合物、硫或盐等海床之下的资源而从事钻井、修井等作业的海上建筑物。

(2) 桩腿：是一种在自升式平台上借助电动机械、液压机械或电动与液压相结合的机械与平台主体结构作预定相对运动的柱形或桁架式结构，桩腿可插入海床并将平台主体结构抬出海面到一定高度。

(3) 桩靴（脚）：系指与自升式平台单个桩靴底部相连的独立水密结构。

(4) 焊趾：指填角焊缝横截面中角边上的焊缝边缘。桩腿裂纹大都萌生在强力构件角接头的焊趾处。

(5) TIG 熔修方法：指为达到提高疲劳寿命的目的，可供选用的不同的 TIG 熔修做法。

(6) TIG 熔修工艺：指针对选用的 TIG 熔修方法制定的操作内容及应遵循的操作要领、要求。

(7) TIG 熔修规范：指 TIG 熔修电流、电弧电压、熔修速度、TIG 熔修的预热温度、钨丝直径、喷嘴直径、所用惰性气体及其流速等参数。

(8) 桩腿裂纹焊接修补：指对桩腿上的裂纹用焊接方法进行的修理，简称焊接修补。

(9) 桩腿裂纹修复技术：指对桩腿上的裂纹先进行焊接修补，而后对修补焊缝的焊趾作 TIG 熔修处理的修理技术。

## 1.4 一般要求

1.4.1 桩腿裂纹修理的各项工作中，裂纹检验是前提，桩腿存在裂纹的平台实施安全评估是依据，裂纹修复技术是保证修理质量的技术关键。

1.4.2 裂纹检验应参考本指南第二章桩腿裂纹的检验方法进行，检验报告应报送本社批准。

1.4.3 桩腿裂纹的一次或多次焊接修补应按本社批准的桩腿裂纹一次或多次焊补工艺、焊补规范进行。

1.4.4 桩腿裂纹焊补后的 TIG 熔修处理应按本社批准的 TIG 熔修工艺以及 TIG 熔修规范进行。

1.4.5 桩腿裂纹的一次或多次焊补工艺，焊补规范连同 TIG 熔修工艺、TIG 熔修规范等工艺技术文件应依据相关试验或可供参照的实践经验编制。

1.4.6 桩腿裂纹焊补焊工、TIG 熔修操作人员应分别经过专门培训、考试并持有本社签发的有效桩腿裂纹焊补焊工的有效资格证书和 TIG 熔修操作人员有效资格证书，严禁无证人员上岗操作。

1.4.7 桩腿裂纹焊补焊工、TIG 熔修操作人员的培训计划（包括报名条件、培训大纲、培训教材、考试试卷、试验用试样连同试验等）应报送本社批准，并在本社验船师和本社授权单位相关人员现场监督下进行。

1.4.8 桩腿裂纹经一次或多次焊补修理或经一次修补或多次修补的平台，在下次检修（含坞修或水下检测）时，应对修理部位和/或修补部位做仔细检查，并向本社提交完整检验报告。

## 第 2 章 桩腿裂纹的检验方法

### 2.1 概述

桩腿裂纹的检验包括检查桩腿有无裂纹和测量裂纹的长度及深度两个方面的内容,是对存在裂纹的桩腿进行安全评估的依据,是控制、消除裂纹的前提条件,是保证钻井平台桩腿安全的重要环节。

桩腿裂纹的主要检验方法是磁粉法和渗透法,裂纹深度主要用超声探伤仪或裂纹测深仪测定。

### 2.2 外观检查

首先对桩腿进行外观检查,其目的是检查桩腿有无明显变形、机械损伤及肉眼能够发现的裂纹。

桩腿检验前,应除去桩腿需检验部位表面的油污及其它影响检验工作的污物。

### 2.3 磁粉检验

由于自升式钻井平台桩腿存在自身结构复杂及易产生表面或近表面裂纹等特点,采用磁粉探伤便成为检验桩腿裂纹的首选方法。只要磁悬液的配比合适,磁化方法和磁化时间掌握适当,该方法对裂纹的检出率较高。

#### 2.3.1 探伤前的工件表面准备

进行磁粉探伤的工件表面应清除油漆、油污、铁锈、氧化皮、药皮、飞溅等物。表面粗糙度不应大于  $12.5\mu\text{m}$ 。

#### 2.3.2 磁化

##### (1) 磁粉探伤方法的选择

采用湿粉连续法探伤。

##### (2) 电流类型的选择

采用交流电。

##### (3) 磁化方法的选择

采用局部磁化——磁轭法。

##### (4) 磁化方向

在工件上进行磁粉探伤,防止漏检,应至少在两个互相垂直的方向进行磁化(纵向和横向)。

##### (5) 磁粉探伤设备提升力要求(磁轭法)

当电磁轭极间距为  $200\text{mm}$  时,交流磁轭的提升力至少为  $44\text{N}$  ( $4.5\text{kg}$ ),直流磁轭至少应有  $177\text{N}$  ( $19\text{kg}$ )。

#### 2.3.3 磁粉和磁悬浮液

##### (1) 对磁粉的要求

磁粉的粒度应不少于 200 目;磁粉颜色按与被检工件有最大对比度的原则选择,当在工件上喷涂白色“反差剂”和使用黑色磁粉时可增强对比度。

## (2) 对磁悬液要求

湿磁悬液分为水基法和油基法：

水基法：挤磁膏 100ml，在 1000ml 水中充分溶解后即可；

油基法：用 500ml 煤油，500ml 变压器油和 17-24g 磁粉配制而成。

## (3) 磁悬液浓度测定

采用犁型沉淀瓶测定，还要用灵敏度试片测定。在任何产品上进行磁粉探伤都必须用试片考查工件上磁感应强度及磁场方向及磁悬液浓度以便获得全方位的缺陷显示能力。

### 2.3.4 磁痕解释

磁粉探伤形成的各种磁痕是漏磁场造成的。磁痕可以是相关显示，也可以是非相关显示。相关显示是由缺陷引起的。非相关显示是伪磁痕。相关显示按所要求的标准进行评定。如果判定为非相关显示，可不必考虑。

## 2.4 渗透探伤

桩腿的某些部位，其形状对磁粉检验不适合，作为磁粉检验的补充也可采用渗透检验方法。由于自升式钻井平台的桩腿裂纹中开口型居多，故采用渗透检验方法也有较高的裂纹检出率。但应该注意的是，被检表面在检验实施之前必须采用恰当的处理方法进行处理。

### 2.4.1 检验表面预清洗

渗透探伤前，必须进行表面清理，将灰尘、油脂、铁锈、氧化皮、水污等清除掉，建议所用的清洗方法有蒸汽脱脂、蒸汽清洗、溶剂清洗、油漆清洗和酸洗等。杜绝用以下方法清理：喷丸、喷砂、砂轮或其它机械方法。这些处理方法会使工件的表面开口缺陷封闭而使得渗透检验失去意义。

### 2.4.2 渗透探伤材料

渗透材料包括渗透剂、乳化剂、清洗剂和显象剂。渗透剂有水洗型、后乳化型和溶剂去除型三种，其中溶剂清洗所用的清洗剂大都是丙酮，多装在压力喷罐中使用。

清洗剂应对渗透剂有一定溶解度，要有较高的挥发性，对材质无腐蚀、无毒或低毒。

显象剂应具备颗粒细小、松软、色白（与工件反差大）等特性。

### 2.4.3 渗透剂的施加、渗透温度及渗透时间的控制

用喷罐把渗透剂均匀地涂布在工件表面，当工件表面存在缺陷时，渗透剂对缺陷内壁逐渐浸润而渗入缺陷内部，渗透剂必须具备以下几个特性：

- (1) 颜料应具备悬浮性性能；
- (2) 具有较小的表面张力，能充分润湿工件表面；
- (3) 具有较强的渗透能力，能迅速渗入开口缺陷内部；
- (4) 易于清洗。

渗透剂加在工件表面后，应根据工件状态的不同、所用渗透液的不同，以及所处温度的不同，控制长短适当的渗透时间，一般规定为 10~30min，渗透温度一般应在 15~40℃。

### 2.4.4 渗透液的清洗（溶剂型）

清洗的目的是把工件表面多余的渗透液用水或溶剂清洗干净。为了不把渗入缺陷内部的渗透液清洗掉，千万不可正面进行喷洗。只能用带有清洗剂的白布去擦除，但也不能擦除不足，否则会增加工件的背景色泽，降低分辨缺陷的能力。

#### 2.4.5 显象剂

显象剂为速干式，一般是在工件干燥后施加显象剂，显象时间约为 10~30min。

#### 2.4.6 检查、评定、清洗

在上述渗透的探伤全部完成以后，可根据缺陷显示痕迹的色泽、长度、宽度、形状及分布位置进行综合观察、分析，做出评定后，进行记录，最后将工件表面清洗干净。

### 2.5 桩腿裂纹深度的测定

磁粉检验、渗透探伤检验出的裂纹，如需测定其深度，可用超声波探伤仪测定，也可用裂纹测量仪测定；但是，由于受到桩腿表面形状限制和疲劳裂纹面表面不规则等因素的影响，使测定深度的难度增大、测定的精度降低，甚至有时无法测定。

当使用超声波探伤仪测定桩腿裂纹深度时，推荐采用“横波（双探头）穿透定位法”或“横波声束边界定位法”与“作图解析定位法”相结合的深度定位技术，如图 2.5-1、图 2.5-2 所示。

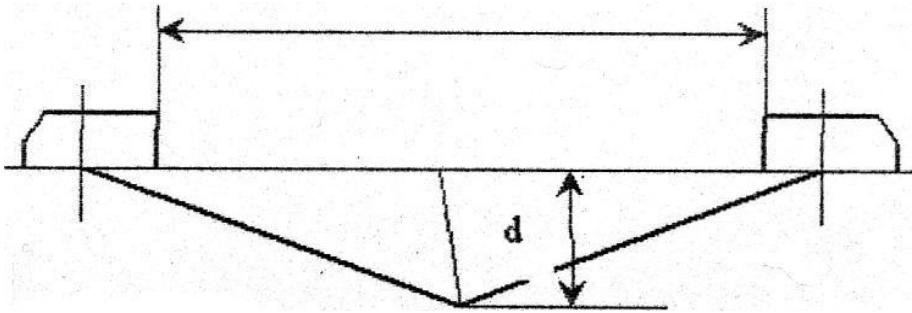


图 2.5-1 横波(双探头)穿透定位法示意图

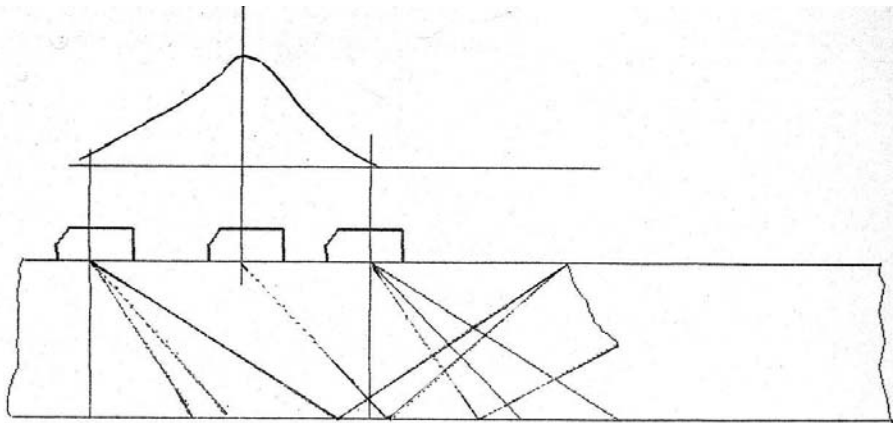


图 2.5-2 横波声束边界定位法示意图

## 第3章 提高桩腿疲劳寿命的 TIG 熔修技术及其应用

### 3.1 概述

提高钢结构物疲劳寿命的方法较多，如打磨、槌击、喷丸、TIG 熔修、超声冲击等方法，本指南着重推荐 TIG 熔修方法。

TIG 熔修法始于 20 世纪 70 年代，30 余年的国内外应用研究和工程使用表明，TIG 熔修可显著地提高钢结构物的疲劳寿命。

### 3.2 提高桩腿疲劳寿命的关键在于对焊接接头的焊趾进行焊后处理

#### 3.2.1 改善焊接接头疲劳寿命的重要意义

焊接接头承受静载的能力不低于母材，但由于焊接接头存在应力集中、焊接缺陷和焊接残余应力，使其承受交变载荷的能力与母材相差甚远，从而导致一些焊接结构物（如桩腿）因接头疲劳问题而过早开裂，不得不停工修复。因此，采取有效措施改善焊接接头的疲劳寿命具有重要意义。

#### 3.2.2 对焊趾进行焊后处理是挖掘接头抗疲劳潜力的有效方法

大量研究表明，在焊趾部位表面、母材靠近融合线 0.5mm 处一般存有熔渣等缺陷，焊趾表面还有微夹渣、微裂纹等缺陷，这些缺陷较尖锐，相当于疲劳裂纹提前萌生或成核。焊趾处因焊缝向母材的过渡不圆顺、不光滑造成的应力集中又加剧了疲劳裂纹提前萌生或成核。焊接过程中形成的焊接残余拉应力，在大多数情况下对接头疲劳寿命有不利影响。这几个方面不利因素的综合作用使焊趾成为疲劳裂纹的萌生地、焊接接头抗疲劳的薄弱环节。对焊趾进行焊后处理，可消除或在一定程度上消除上述焊接缺陷、改善焊趾处的几何形状，降低几何应力集中，还有可能改变焊接残余应力场，形成残余压应力（当做超声处理时），这些都有助于疲劳寿命朝提高、改善的方向转变，其联合作用的结果是焊趾不再是焊接接头的薄弱环节、疲劳裂纹的萌生位置转向母材，使得焊接接头、桩腿等焊接结构的疲劳寿命大幅度提高。

### 3.3 TIG 熔修技术

#### 3.3.1 TIG 熔修原理

TIG 熔修是用钨极（Tungsten）氩（Inert Gas）电弧焊焊枪在焊趾特定部位焊缝上进行的重熔整形，见图 3.3-1 TIG 熔修示意图。电弧在钨棒和焊趾间燃烧，由于焊趾处金属的熔化和结晶是在氩气这种惰性气体保护下进行的，排除了周围空气中的氮、氢、氧等气体对重熔金属的有害作用，从而保证了重熔金属材质的致密，大大减少或基本消除了微裂纹、微小非金属夹渣物，使焊趾处的焊缝金属与母材之间形成光滑过渡，减小了应力集中。

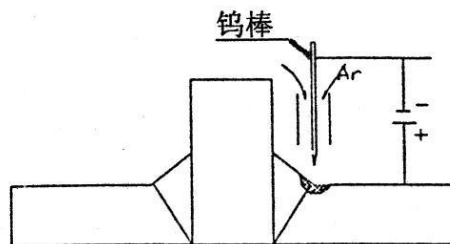


图 3.3-1 TIG 熔修示意图

### 3.3.2 一次 TIG 熔修方法及其适用范围

#### (1) 一次 TIG 熔修法

这是一种用钨极氩弧焊焊枪，在焊趾特定部位进行的只有单一熔化修理焊缝的熔修方法，如图 3.3-1 所示。

#### (2) 一次 TIG 熔修法的适用范围

桩腿结构选用的钢种是否适合使用一次 TIG 熔修方法，可用前苏联学者 A·E·Achuc 提出的碳当量法确定。碳当量 $[C] \leq 0.42$  的钢种适用一次 TIG 熔修方法。

碳当量计算公式如下：

$$[C] = [C]_x(1 + 0.005\delta)$$

$$[C]_x = C\% + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{10} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V+Nb}{14}$$

式中：

$[C]$ ——碳当量；

$[C]_x$ ——钢中各化学元素含量折合成的碳当量之和；

$\delta$ ——工件厚度[mm]。

### 3.3.3 TIG 熔修技术的应用

TIG 熔修技术目前主要应用于自升式钻井平台桩腿裂纹在平焊位和立焊位的修复。

## 3.4 TIG 熔修的使用要求

### 3.4.1 至少要把握下列三个要点

- (1) TIG 熔修操作人员素质是决定熔修效果的根本；
- (2) 规范适当、工艺正确是决定熔修效果的技术关键；
- (3) TIG 熔修设备的技术规格与熔修作业环境条件是决定熔修效果不可忽略的影响因素。

### 3.4.2 加强对 TIG 熔修操作人员资质及其操作的监督、管理

- (1) 从事 TIG 熔修的操作人员必须经过资格培训、考试，考试合格后获得本社或本社授权单位核发的 TIG 熔修操作人员资质证书；
- (2) 根据实际情况对 TIG 熔修操作人员资质证书的适用范围、有效期等制定管理办法；
- (3) 根据实际情况对 TIG 熔修操作人员按章（如 TIG 熔修工艺、TIG 熔修规范等）操作和熔修质量的优劣制定监督、管理办法。

### 3.4.3 做好 TIG 熔修操作人员培训、考试的各项准备工作

- (1) 规定参加 TIG 熔修操作人员培训、考试的报名资格、报名手续、报名时须交验的材

料、证件等；

(2) 编写出 TIG 熔修操作人员“应知”大纲及相应教材；

(3) 编写出 TIG 熔修操作人员“应会”大纲及相应的培训用试件（接头形式、材料、尺寸、数量等）与考试用试件（接头形式、尺寸、材料、数量、加工制作要求等）；

(4) 规定 TIG 熔修操作人员“应知”、“应会”的考试实施方法。

#### 3.4.4 TIG 熔修焊缝质量至少应符合下列要求

(1) 熔修焊缝应光滑平整，与焊趾处原焊缝的结合以及与母材的过渡应平滑平顺，不得形成沟槽，其咬边、凹陷等缺陷的深度应小于 0.2mm，长度小于 3mm，任意 50mm 熔修焊缝内，咬边个数不得超过 2 个；

(2) 熔修焊缝表面不得存在任何裂纹、未熔合和夹渣等缺陷；

(3) 熔修焊缝的熄弧坑前后不得有肉眼可见的弧坑、凸起、微裂纹等缺陷；

(4) 熔修焊缝的无损检验结果应符合 JB/T6061-92《焊缝磁粉检测方法和缺陷磁痕分级》标准中的质量等级 II 级标准，或 JB/T6061-92《焊缝渗透检测方法和缺陷痕迹的分级》标准中的 II 级标准。

#### 3.4.5 编制 TIG 熔修工艺

TIG 熔修工艺应根据实践经验和必要的试验确定，在实践经验不足的条件下，推荐下列要点为编制 TIG 熔修工艺做参考。

(1) 当钢结构物所用钢材的碳当量[C]≤0.42%时，采用一次 TIG 熔修，尽量避免采用二次 TIG 熔修和/或往复平移 TIG 熔修。

(2) 熔修前用轻微打磨、擦拭等方法清理焊趾，清除焊趾及其两侧各 20mm 范围内的锈迹、水迹、油污等，使之保持清洁、干燥，让金属露出其光泽；

(3) 按照筛选出来的适用熔修规范进行熔修；

(4) 所用熔修设备应符合相应规定的要求；

(5) 露天作业时，熔修现场的环境条件（首要是风速）应符合氩弧焊的相关要求；

(6) 焊枪应保持在位于距焊趾部位偏向焊缝一侧 0.5~1.5mm 处进行熔修；

(7) 熔修过程中尽量避免中间停顿，熔修速度要均匀；

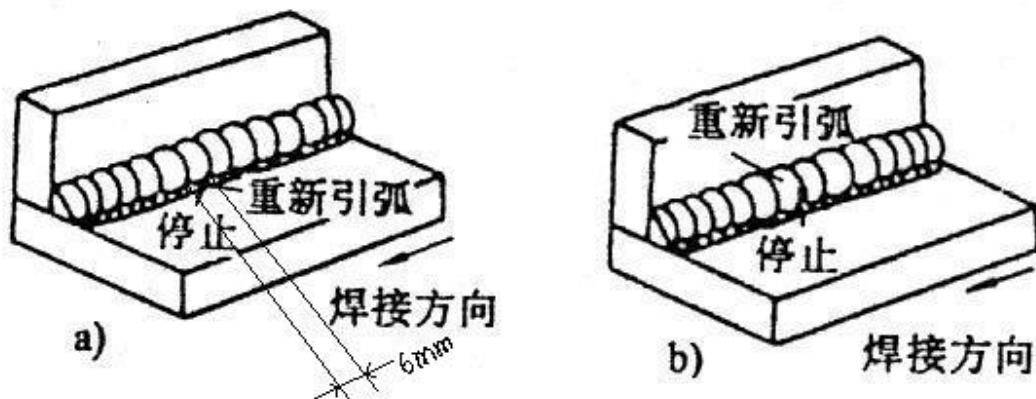


图 3.4-1 TIG 熔修重新起弧技巧示意图

(8) 为保证熔修焊道的良好形状和质量，熔修中发生熄弧时，按下列方法重新起弧：

- ① 按图 3.4-1a)所示，在熔修焊道弧坑前 6mm 处起弧；或
- ② 按图 3.4-1b)所示，在靠近熄弧处的原焊缝上起弧。

(9) 熔修完毕并经过 72h 冷却后，对熔修焊道的形状、质量进行检查，符合相关要求后进行 100%磁粉检验，检验结果应符合有关规定的要求。

#### 3.4.6 制定 TIG 熔修规范

##### (1) TIG 熔修规范的内容

TIG 熔修规范包括钨丝直径、喷嘴直径、保护气体流速、熔修电流、电弧电压、熔修速度、熔修热输入能（又称线能量）和预热温度等。熔修电流、电弧电压、熔修速度是熔修规范的主要内容，也是难点、重点。

表 3.4-1 国际焊接学会（IIW）推荐的 TIG 熔修规范

保护气体	氩气
气流速度	7~12L/min
喷嘴直径	10~14mm
预热（根据需要）	50~200℃
钨极直径	3.2~4.0mm
电压	12~17V
电流	160~250A
焊速	80~160mm/min
热输入能	0.5~2.5KJ/mm

##### (2) 确定熔修规范的方法

① 以国际焊接学会（IIW）推荐的 TIG 熔修规范（详见表 3.4-1）做为确定桩腿裂纹修复中所用 TIG 熔修规范的参照依据。

国际焊接学会推荐的 TIG 熔修规范提供了一个适用的 TIG 熔修规范范围，适用的钢种范围较宽。海上自升式钻井平台桩腿裂纹修复中拟用的 TIG 熔修规范，可根据桩腿中出现裂纹处接头用钢的碳当量值，结合自己的经验（缺少经验可参考附录 4），从表 3.4-1 中初选出 3 组规范，作为候选规范。

② 用常规筛选法从候选规范中选出适用的熔修规范

具体做法如下：

##### a) 制备试件

按桩腿出裂纹处焊接接头型式（多为 T 型接头）和所用钢种，焊制出试件（不少于三个，所用焊接工艺、焊接规范与原结构物相同或相近）；

b) 用初选出的三组候选规范熔修，逐一在制备好的三个试件的焊趾处作 TIG 熔修；

c) 制备金相试样：在三个熔修好的试件上逐个加工出三个金相试样，并逐个作金相分析，测出每个试件的熔修焊缝区和过热区的维氏硬度值（每区测取三个硬度值，以其平均值作为各区的硬度值）并察明各区的金相组织；

d) 找出各区硬度值小于 350HV, 但又接近 350HV, 既未出现较多马氏体组织, 金相组织又未变得粗大的试件, 则熔修此试件的候选熔修规范, 即为适用的熔修规范。

e) 如选不出符合上述要求的熔修规范, 须调整候选熔修规范的热输入能, 而后再遵循上述 a)、b)、c)、d) 步骤做常规筛选, 直至选出符合要求的适用规范为止。

f) 如须修复的结构很重要, 一旦发生疲劳破坏会造成极重大损失和严重后果, 或机构物数量多, 修复量大等情况时, 可考虑加做模拟试件的疲劳试验, 对筛选出的适用 TIG 熔修规范进行进一步验证。

#### 3.4.7 规定对 TIG 熔修设备技术规格的要求

用于 TIG 熔修的设备的规格应达到国家规定的关于钨极氩弧焊设备的质量、规格标准的规定要求, 此外须满足下列要求:

- (1) 熔修设备设有高频引弧装置, 不允许采用接触引弧方式进行引弧;
- (2) 设备应具有电流缓升、缓降及调解功能;
- (3) 设备应具有预先保护通气和滞后停气保护的功能;
- (4) 网路电压波动 $\pm 10\%$ 时, 熔修设备的焊接电流输出波动应小于 $\pm 2.5\%$ 。

#### 3.4.8 规定对 TIG 熔修作业环境条件的要求

TIG 熔修作业环境条件主要应满足下列要求:

(1) 在露天暴露条件下进行 TIG 熔修作业对风速、降雨、降雪等环境条件的要求与钨极氩弧焊作业相同;

(2) 当结构用钢具有淬硬倾向时, 如无防淬硬硬化工艺措施, 不宜在摄氏零度以下对其进行熔修作业;

(3) 如采取防风围栏、遮雪、遮雨棚等措施使能保证达到上述(1)、(2)项要求时, 可进行不利环境条件下的熔修作业。

## 第4章 桩腿裂纹的平焊位超两次修复技术

### 4.1 概述

#### 4.1.1 桩腿裂纹的超两次焊补的可行性

试验研究（参见附录 4）表明桩腿裂纹的超两次焊补是可行的，具体体现在如下几个方面：

(1) 超两次焊补对桩腿开裂接头的金相组织无明显影响

初焊、一次焊补、二次焊补和三次焊补后，接头的焊缝区，过次热区的金相组织基本相同，无明显变化。

(2) 超两次焊补对桩腿开裂接头力学性能无明显影响

初焊接头和经过 1~4 次焊补后的接头的力学性能相当，未见变化。

(3) 超两次焊补对桩腿开裂焊接接头的残余应力有不利影响。ASTM A514, ASTM EH36 以外的钢材的多次焊补对母材力学性能有无影响须通过实验验证。

(4) 超两次焊补对桩腿开裂焊接接头焊趾应力集中的影响总体表现为随焊补次数的增加，应力集中逐次减小。

(5) 与初焊接头相比，超两次焊补对桩腿开裂焊接接头疲劳寿命，随焊补次数增加有小幅下降趋势，从总体上看，变化不大。

4.1.2 按桩腿裂纹超两次熔修技术修复后的疲劳寿命，显著地高于桩腿裂纹超两次焊接修补后的疲劳寿命

桩腿裂纹经超两次熔修修复和超两次焊补后的疲劳试验结果对比（参见附录 4）表明：

(1) 桩腿裂纹一次焊补熔修后的疲劳寿命较一次焊补提高一倍以上；

(2) 桩腿裂纹二次焊补熔修和三次焊补熔修后的疲劳寿命与二次焊补和三次焊补的疲劳寿命相差不多，未见提高。

### 4.2 对桩腿裂纹多次修复的要求

#### 4.2.1 一般要求

(1) 桩腿裂纹焊补工艺、焊补规范、焊后对焊趾处理工艺、处理规范等应适合桩腿处裂纹部位所用钢种、构件厚度和施工现场的环境条件等实际情况。

(2) 桩腿裂纹焊补工艺、焊补规范、焊后焊趾处理工艺和处理规范应符合如下要求：

① 本指南第 1 章 1.4 的一般要求；

② 修复后的焊接接头与母材等强度

③ 修复后的焊接接头的塑性、韧性与强度间的匹配应符合海上自升式钻井平台所入级规范的相应规定。

(3) 超两次焊补焊缝间交叠处，超两次焊补焊缝与超两次 TIG 熔修焊缝间交叠处以及超两次 TIG 熔修焊缝间交叠处不得造成沟槽。

#### 4.2.2 桩腿裂纹超两次焊补工艺至少应包括下列要点

(1) 明确桩腿裂纹所在的具体位置、裂纹数量、裂纹长度和深度；

(2) 规定清除裂纹的方法、建议:

① 尽可能用砂轮磨削法清除裂纹。尽实际可行, 打磨方向顺着主应力、最终打磨不能采用盘形磨具;

② 先沿裂纹长度方向打磨, 磨到裂纹尽头后再延长磨削 20mm 左右;

③ 沿长度方向磨削掉全部裂纹后, 进行全长度的磁粉探伤检查, 直至无裂纹为止。

(3) 开制焊接坡口的要求:

① 坡口的向外倾斜角(见图 4.2-1)尽量小些, 以便控制焊补焊缝的外延量不至过大(见图 4.2-2);

② 坡口的向内倾斜角相对大些, 按如下两个条件确定:

a) 该角度与向内倾角合在一起, 能为焊条摆动留出必要空间, 保证焊缝与坡口的两个侧壁良好的熔合;

b) 使焊缝总量最少。

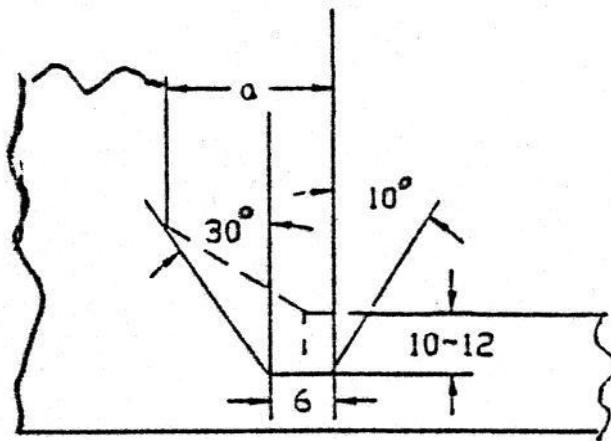


图 4.2-1 坡口示意图

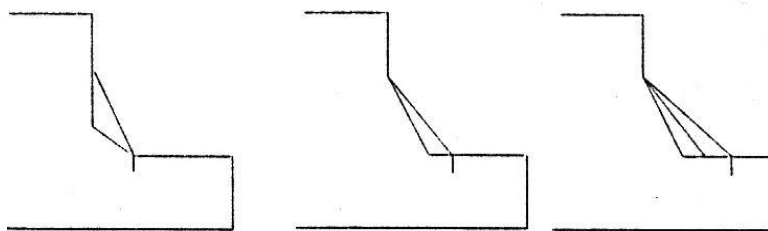


图 4.2-2 多次焊补焊缝位置、形状示意图

③ 坡口深度超过裂纹深度;

④ 坡口底部宽度(底宽)应保证根部焊透。

(4) 规定承担桩腿裂纹焊补焊工的资格, 严格焊工持证上岗制度;

(5) 对焊前清洁工作的清除物、清除范围、清除方法、清除合格标准作出明确规定;

(6) 对焊条焙烘方法、制度做出规定;

(7) 对焊前预热(如需要)温度、预热范围、预热方法做出规定;

- (8) 对焊后保温（如需要）温度、保温范围、保温方法做出规定；
- (9) 对焊补后经多少时间进行外观检查以及焊缝外观质量合格标准做出规定；
- (10) 焊缝外观质量合格后进行无损检测，并规定无损检验方法、范围、合格标准。

4.2.3 桩腿裂纹超两次焊补规范至少应包括下列要点：

- (1) 规定使用的焊条牌号、焊条直径、焊条的化学成分；
- (2) 规定焊条的熔烘制度；
- (3) 规定焊接的极性；
- (4) 规定焊接电流、电弧电压、焊接速度；
- (5) 规定焊前预热（如需要）温度和预热范围；
- (6) 规定对焊接接头力学性能的要求；

4.2.4 桩腿裂纹超两次焊补后实施多次 TIG 熔修工艺和规范的要求

- (1) TIG 熔修方法的选用应符合本指南中 3.3.3 中(1)、(2) 的规定；
- (2) 多次 TIG 熔修工艺至少应符合本指南 3.4.3、3.4.4、3.4.5、3.4.7、3.4.8 的要求；
- (3) 多次 TIG 熔修规范的内容及其确定方法应符合本指南中 3.4.6 中(1)、(2) 的要求。
- (4) 超声处理工艺和规范应符合本指南中 4.5.3 和 4.5.4 的要求。

4.2.5 桩腿裂纹的 1~4 次焊补工艺、焊补规范、1~4 次熔修工艺、熔修规范相同或基本相同，只是每次焊补后的焊缝位置和焊缝形状都有所改变：

- (1) 桩腿裂纹每经过一次焊补后的再开裂裂纹将出现在新焊趾处，相对原裂纹位置外移一段距离（见图 4.2-2）
- (2) 桩腿裂纹多次焊补造成的焊补焊缝逐次向外延伸，使得焊缝形状逐次变得扁平（这也是要求焊补坡口向外倾角尽量要小的原因）。

### 4.3 试验研究结果启示

- (1) 桩腿裂纹经过超两次修复后，桩腿的薄弱环节有由焊趾转向焊缝的趋势

经过 TIG 熔修后，焊趾得到强化，提高了焊趾处的疲劳寿命但 TIG 熔修的强化作用未能覆盖焊缝其它部位；多次焊补后的焊缝上焊补焊缝间和/或熔修焊缝与焊补焊缝间相互交叠处形成的沟槽易萌生疲劳裂纹，此时桩腿的疲劳寿命，大致取决于焊补焊缝的疲劳寿命。

(2) 正确的超两次修复工艺和合适的规范是全面提高桩腿裂纹修复后的疲劳寿命的技术保证，为此推荐：

- ① 制定焊补规范时按焊接接头等强度原则选择焊条，力求焊缝与母材等强度匹配；
- ② 制定焊补工艺时规定超两次焊补焊缝间多边交叠处，超两次 TIG 熔修焊缝间和/或超两次焊补焊缝与熔修焊缝交叠处应避免出现沟槽。

## 第5章 桩腿裂纹的立焊位修复技术

### 5.1 概述

5.1.1 桩腿裂纹的立焊修复技术切合实际需要，具有重要的工程实用价值。

海上自升式钻井平台桩腿裂纹有很大一部分产生在桩腿结构的立焊焊缝上，立焊缝裂纹的焊补修复在平台桩腿裂纹修复中占有相当大的比例。桩腿裂纹的平焊位修复技术能否用于立焊位？能否提高桩腿疲劳寿命？如何适应立焊位特点？这些具有工程实用价值的问题亟需解决。

5.1.2 立焊位 TIG 熔修难度较大

立焊位在空间位置上的特殊性给立焊焊补，尤其是给熔修后成型要求很高的 TIG 熔修增加了难度：在熔融金属受重力作用往下流淌的条件下，与平焊位相比，立焊难以控制和保证焊缝良好成型、熔宽均匀和表面平滑光滑。

5.1.3 试验研究（见附录 5）表明，桩腿裂纹的立焊位修复是可行的，修复后的桩腿寿命得到显著提高（至少可提高一倍）。

### 5.2 桩腿裂纹立焊位焊补工艺

5.2.1 对结构及其用钢相同的桩腿而言，桩腿裂纹立焊位焊补工艺与桩腿裂纹的平焊位焊补工艺大同小异，异在突出立焊位的特点。

5.2.2 桩腿裂纹立焊位焊补工艺的若干特点

- (1) 焊工需具有从事桩腿立焊位焊接修补的资格，并需报本社审核认可；
- (2) 立焊位的向外开制的倾斜角度要比平焊位开制的向外倾斜角度大些，以便操作，保证侧壁与焊缝良好熔合，不出或少出缺陷；
- (3) 其它内容与本指南中第四章的 4.2.2 相同。

### 5.3 桩腿裂纹立焊位焊补规范

桩腿裂纹立焊位的焊补规范除焊接电流幅度较平焊位时略大些外，其它内容的要求与桩腿裂纹平焊位焊补规范相同（见本指南第四章中的 4.2.3）

### 5.4 桩腿裂纹立焊位 TIG 熔修工艺

5.4.1 TIG 熔修操作人员培训、考试、发证及监督管理等应符合本指南第三章中 3.4.2 和 3.4.3 的相关规定。

5.4.2 TIG 熔修设备及其露天作业环境条件应符合本指南中 3.4.7 和 3.4.8 的要求。

5.4.3 按本指南第三章中 3.4.3 推荐的方法选择 TIG 熔修方法。

5.4.4 其它 TIG 熔修工艺要点

(1) 打磨清洁焊趾

用砂轮法清洁焊趾两侧各 20mm 范围内的铁锈、油污、焊药皮、渣杂物等，并使之干燥，使金属露出亮泽；

(2) 将试件加热至 150℃ 以上；

(3) 按规定的熔修规范进行熔修；

(4) 采用立向下熔修

立焊位手工电弧焊焊补一般采用立向上焊，立向 TIG 熔修采用下熔修，以防止熔修铁水向下流，使熔修焊缝成型良好，减少咬边，焊趾处过渡光滑圆顺；

(5) 起弧时，控制电流缓升，收弧时控制电流缓降，避免焊缝成型不良，出现咬边，使焊缝过渡圆滑；

(6) 熔修完毕后 72h 进行外观检查；

(7) 焊缝外观检查合格后进行 100% 的无损检验；

(8) 焊缝外观检查合格标准、焊缝无损检验方法及其合格标准参照本指南第三章中 3.4.4 执行。

### **5.5 桩腿裂纹立焊位 TIG 熔修规范**

桩腿裂纹立焊位 TIG 熔修规范按本指南第三章中 3.4.6 的要求选定。

## 第 6 章 TIG 熔修技术在自升式钻井平台桩腿裂纹修复中的应用

### 6.1 概述

裂纹焊补后的 TIG 熔修技术是于 1999 年研究完成并推广使用的。在实验室条件下，试件在平焊、立焊焊位的大量试验及其结果表明：TIG 熔修是提高接头疲劳裂纹焊补后的疲劳寿命与疲劳强度的有效办法。为进一步在海上钻井平台上进行验证，在中海油田服务股份有限公司所属“南海一号”和中石化所属“勘探二号”两座海上自升式钻井平台桩腿裂纹焊补修复中有选择地作了 TIG 熔修。事隔两年左右，于 2001 年和 2002 年先后对该二平台桩腿进行了无损检验，根据检验结果可对裂纹焊补后作与未作 TIG 熔修两种情况进行对比。

### 6.2 “勘探二号”平台桩腿裂纹焊补修复后作与未作 TIG 熔修的效果对比

#### 6.2.1 桩腿裂纹的出现情况

“勘探二号”桩腿的裂纹集中在 2 号桩腿上，其中 A 柱有一条、B 柱有两条、C 柱有四条，共计七条，具体部位如下：

- (1) A 柱桩靴无齿齿条下部（外侧）一处，长 450mm（见图 6.2-1）；
- (2) B 柱桩靴无齿齿条下部，外侧一处长 350mm，内侧一处，长 50mm（见图 6.2-1）；

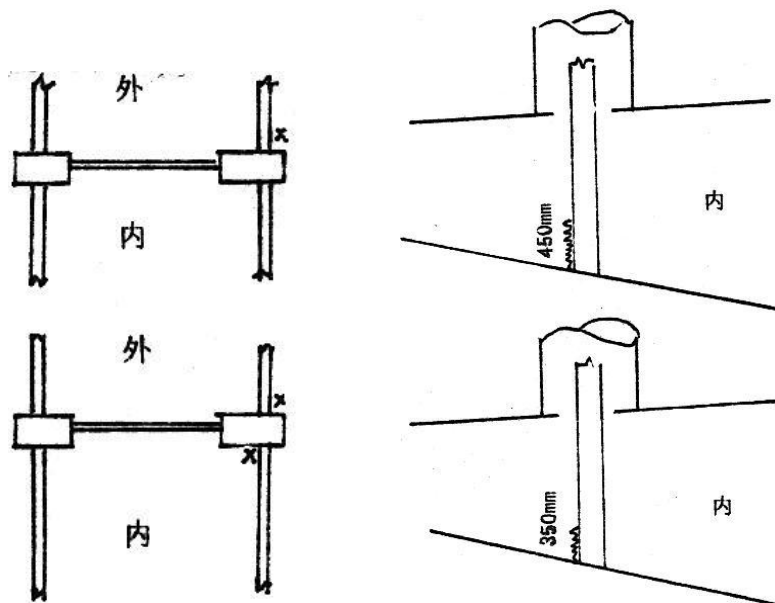


图 6.2-1 2 号桩腿 A、B 柱裂纹示意图

(3) C 柱桩靴上部“小庙”（指主立柱和桩靴之间的加强肘板，下同）区有四处裂纹，长度分别为 100mm、80mm、260mm、190mm；如图 6.2-2 所示。

#### 6.2.2 裂纹的修复情况

##### (1) TIG 熔修部位的选择

从钻井平台在作业过程中承受荷载大小和平台作业历史上裂纹程度等方面考虑，2 号桩腿的 C 桩是重中之重（2 号桩中 A 柱出现一处疲劳裂纹、B 柱出现两处、C 柱出现四处就是

证明), 因此, 把 C 柱桩靴“小庙”区四处裂纹的焊补焊缝的焊趾作为 TIG 熔修部位。2 号桩腿的 A 柱、B 柱的裂纹只作焊补, 未作焊补后熔修。

## (2) 裂纹焊补工艺、TIG 熔修工艺、熔修规范

TIG 熔修操作人员是从北方某造船厂中若干氩弧焊工中优选出来的, 经过短时间培训, 掌握了要领, 得到了认可。

整个 TIG 熔修作业, 自始至终都是在 TIG 熔修专家指导、监督下进行并完成, TIG 熔修质量合格。

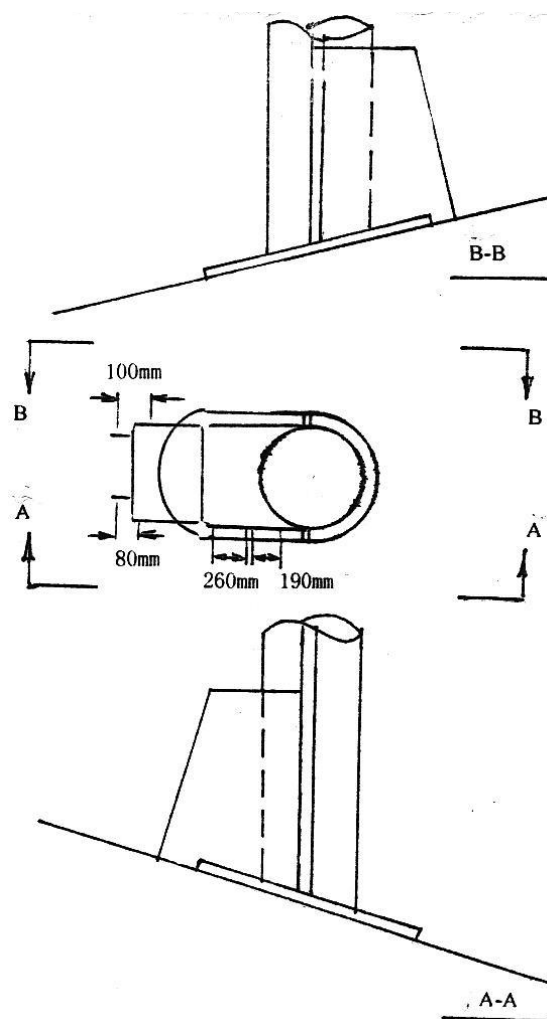


图 6.2-2 C 柱桩靴裂纹示意图

### 6.2.3 裂纹焊补后作与未作 TIG 熔修的效果对比

“勘探二号”于 1999 年 10 月底在北方某造船厂入坞, 11 月上中旬进行桩腿裂纹的焊补和部分焊补后的 TIG 熔修。2002 年 7 月份, “勘探二号”再次进坞检修保养, 经检查发现:

(1) 1999 年 11 月份对裂纹作过焊补的焊缝上, 有半数左右又开裂了, 又出现了疲劳裂纹;

(2) 1999 年 11 月份裂纹焊补后作了 TIG 熔修的接头上, 都未开裂, 都未出现疲劳裂纹。

### 6.3 “南海一号”平台桩腿裂纹焊补后作与未作 TIG 熔修的效果对比

#### 6.3.1 桩腿出现裂纹的情况

“南海一号”平台于 1999 年 3 月 8 日拖到香港某船厂后，随即对桩腿裂纹进行了检查，检查后发现桩腿的裂纹较多，在此次要焊补修复的 1 号桩腿 B 柱左面检查到的裂纹情况如图 6.3-1 所示。

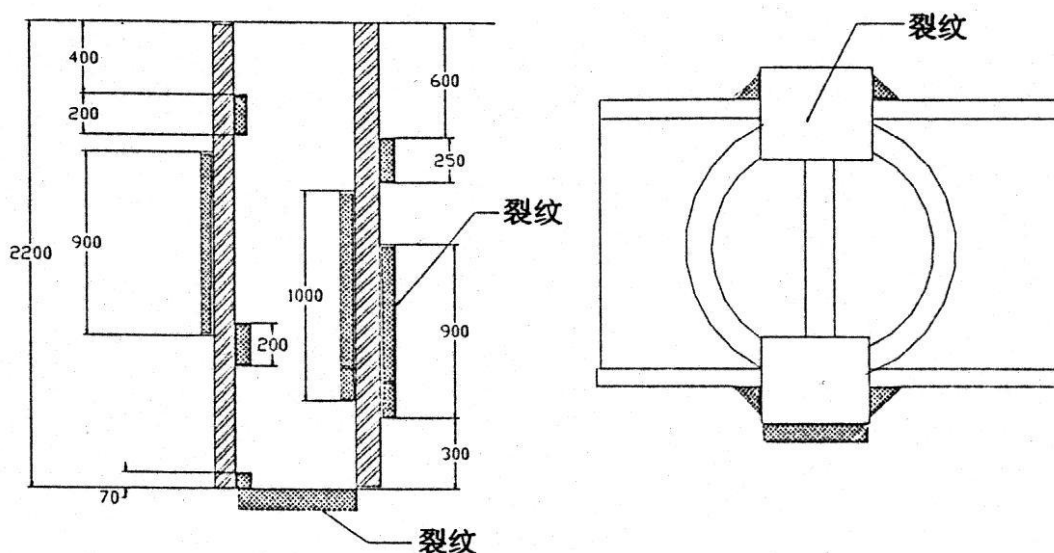


图 6.3-1 桩腿裂纹情况

#### 6.3.2 裂纹的焊补

“南海一号”平台桩腿要焊补的裂纹处于立焊焊缝上，裂纹的焊补也须在立焊位上进行，这是该平台桩腿裂纹焊补与众不同之处。焊补工艺、焊补规范要点参见本指南第五章 5.2、5.3 的相关规定。由于桩腿裂纹比较长（分别为 900mm 和 1000mm），工艺方法的主要特点是：

##### (1) 消除裂纹

由于桩腿材料在碳弧气刨时易造成裂纹扩展，所以采用砂轮磨削法清除裂纹。磨削沿焊缝长度方向进行，直到裂纹尽头，再延长 20mm 左右。深度方向打磨到全部裂纹，直到用磁粉探伤核试验坡口内部无裂纹为止。

##### (2) 预热

焊补坡口长，火焰预热法达不到整条焊缝的预热能量，也无保温设备，采用了分段（每段内约长 200mm 左右）预热、分段焊补方法。坡口宽度不等，以焊工好操作为原则，坡口最深达 20mm。

##### (3) 焊接修补

由于焊缝比较长，焊补采用分段退焊法，分五次焊完。

#### 6.3.3 焊缝的 TIG 熔修

经与南海西部钻井公司（现为中海油田服务股份有限公司钻井事业部）商议，将包括图 6.3-1 中所示裂纹在内的齿条与加强板间整条焊缝长度 2200mm 范围内的焊缝全部进行 TIG

熔修（包括此次焊补的焊缝和未焊补的焊缝）。

在熔修工艺方面，也采用分段预热、分段熔修，每 300mm 为一段，预热达到 150℃后作熔修，熔修方法是从上向下进行。

在熔修规范方面，使熔修电流在起弧和收弧时作到缓升和缓降，防止在起弧和收弧处产生较大的咬边和弧坑。

熔修质量：熔修后，熔修焊缝表面较为平整，和母材有圆滑过渡，表面有少量熔渣，可能为原表面未清洁干净的污物与焊缝本身的夹渣物在熔修时熔化后浮于熔修焊缝金属表面所致。

熔修后经 72h 进行磁粉探伤，未发现任何缺陷。

#### 6.3.4 裂纹焊补后作与未作 TIG 熔修的效果对比

2001 年 9 月 10 日至 21 日，在大连港锚地对“南海一号”进行了水下检验，检验的结果发现，桩靴内部无齿齿条与中心板间以及无齿齿条与桩靴加强肋板间角焊缝上发现 18 处裂纹，桩靴处未发现裂纹。这说明“南海一号”于 1999 年 3 月在香港修理时，桩靴外部的焊补焊缝以及其中做过 TIG 熔修的焊补焊缝均未发现裂纹。“南海一号”桩腿裂纹修补中 TIG 熔修的效果可能还需要再经过一段时间才能看出来。

### 6.4 小结

经迄今为止仅有的两例工程应用实例中已可看出：

- (1) 海上自升式钻井平台桩腿裂纹焊补后作 TIG 熔修确可提高桩腿疲劳寿命；
- (2) TIG 熔修可显著提高海洋工程结构物裂纹焊补后的疲劳寿命已在工程应用中得到证实。

由于类似的工程实例还不多，上述疲劳寿命的提高幅度当前还不能定量，还有一些结合工程实用的研究和跟踪工作有待今后继续去做。

## 附录 1 桩腿存在裂纹的平台的安全评估

### 1.1 概述

疲劳是海上平台破坏的主要形式之一。自升式钻井平台是一种常见的海上移动平台，其作业海域的广泛性和不确定性以及平台累积疲劳损伤的不可预计性，使得老龄平台的累积疲劳损伤评估成为控制裂纹扩展、保证平台安全的重要手段。

### 1.2 对桩腿带裂纹平台安全评估的要求

1.2.1 安全评估所用的分析方法应考虑桩腿裂纹及损伤。

1.2.2 安全评估应给出桩腿裂纹损伤对平台应力和强度的影响。

1.2.3 安全评估应给出桩腿存在裂纹的平台剩余疲劳强度和剩余疲劳寿命。

1.2.4 安全评估应给出存在裂纹的桩腿的维修时限以及对桩腿存在裂纹的平台作短期海上钻井作业的安全性作出科学、合理的结论。

1.2.5 桩腿存在裂纹的平台的安全评估报告，连同相关资料应报送本社批准。

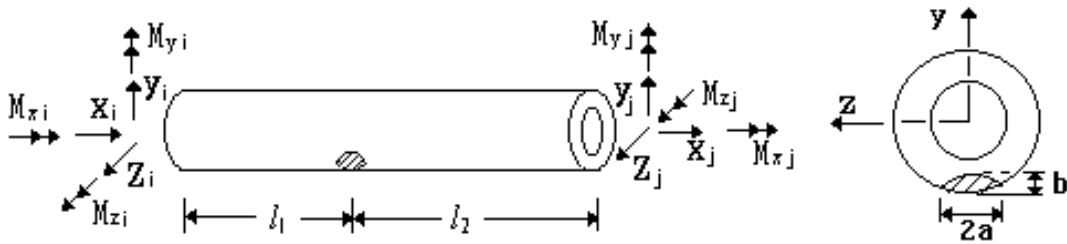
### 1.3 参考实例

见本指南附录 2、附录 3。

## 附录 2 带裂纹损伤结构的有限元方法

### 2.1 力学模型及基本假设

假设桩腿带有表面裂纹损伤,令杆件的损伤变形发生在局部系的 $xy$ 平面内,如附图 2.1-1 所示。将损伤构件沿裂纹处分割为两个无损伤梁单元和一个无长度的线弹簧,这两个梁单元或管单元由线弹簧相连,此即所谓的线弹簧模型,对三个子单元分别建立单元刚度矩阵,然后采用静凝聚法消除内部自由度,由此便可获得受损构件的等效单元刚度矩阵。对于损伤单元,将其用一个无长度的线弹簧管来代替,仍用能量法来构造其单元刚度矩阵。



附图 2.1-1 带有表面裂纹损伤单元

假设损伤构件的弹性模量不变。

### 2.2 损伤单元的刚度矩阵

考察一无长度裂纹管,简称为裂纹管单元,记其两端的节点编号分别为 1 和 2。由于不考虑单元的长度,由静力平衡条件可知,两端的节点力大小相等,方向相反,即

$$X_1 = -X_2 \quad Y_1 = -Y_2 \quad M_{z1} = -M_{z2} \quad (2-2-1)$$

记节点位移差为:

$$u = u_2 - u_1, \quad v = v_2 - v_1, \quad \theta_z = \theta_{z2} - \theta_{z1} \quad (2-2-2)$$

则节点位移与节点力之间有如下关系:

$$\begin{cases} u = \lambda_{uu} X_2 + \lambda_{u\theta} M_{z2} \\ \theta_z = \lambda_{u\theta} X_2 + \lambda_{\theta\theta} M_{z2} \\ v = \lambda_{vv} Y_2 \end{cases} \quad (2-2-3)$$

式中比例系数计算如下:

$$\lambda_{uu} = \frac{2(1-\nu^2)}{E} \int_0^S \left( \frac{K_{IX}}{X_2} \right)^2 dS$$

$$\lambda_{u\theta} = \frac{2(1-\nu^2)}{E} \int_0^S \frac{K_{IX}}{X_2} \cdot \frac{K_{IM}}{M_{z2}} dS$$

$$\lambda_{\theta\theta} = \frac{2(1-\nu^2)}{E} \int_0^S \left(\frac{K_{IM}}{M_{z2}}\right)^2 dS$$

$$\lambda_{\nu\nu} = \frac{2(1-\nu^2)}{E} \int_0^S \left(\frac{K_{IY}}{Y_2}\right)^2 dS$$

其中  $E$  为材料的弹性模量,  $\nu$  为泊松比,  $S$  为裂纹面面积,  $K_{IX}, K_{IY}, K_{IM}$  分别为  $X_2, Y_2, M_{z2}$  引起的各型应力强度因子。严格地讲, 裂纹前沿各点的应力强度因子是不相同的, 为安全起见, 也为了分析方便, 这里取裂纹最深点处的应力强度因子, 也就是最大应力强度因子, 由三维断裂力学知, 应力强度因子可由下式计算:

$$K_I = \frac{M_N \sigma_N + M_B \sigma_B}{E(k)} \sqrt{\pi b}, \quad K_{II} = \frac{M_Q \tau_Q}{E(k)} \sqrt{\pi b} \quad (2-2-4)$$

式中,  $b$  为裂纹深度,  $M_N, M_B, M_Q$  分别为与裂纹半长  $a$ 、裂纹深度  $b$ 、圆管壁厚  $t$  及圆管外径  $D$  有关的拉伸、弯曲、剪切及扭转应力修正系数,  $\sigma_N, \sigma_B, \tau_Q$  分别为无裂纹时轴向力  $X_2$ 、弯矩  $M_{z2}$ 、剪力  $Y_2$  和扭矩  $M_{x2}$  引起的热点应力,  $E(k)$  为全椭圆积分, 可用如下公式计算:

$$\sigma_N = \frac{X_2}{A}, \quad \sigma_B = \frac{M_{x2} D}{2I}, \quad \tau_Q = \frac{Y_2 S_z^*}{I}$$

$$E(k) \cong [1 + 1.464 \left(\frac{b}{a}\right)^{1.65}]^{\frac{1}{2}}, \quad \frac{b}{a} \leq 1$$

其中  $A, I, S_z^*$  分别为无损管的横截面面积、惯性矩和最大  $z$  轴静矩。对平台桩腿, 裂纹形状为扁平型(即  $a > b$ ), 其应力强度因子修正系数  $M_N$  和  $M_B$  用如下公式计算:

$$M_N = f_N(\xi, \beta) g_N(\xi) E(k)$$

$$M_B = f_B(\xi, \beta) g_B(\xi) E(k)$$

其中  $\xi = \frac{b}{t}, \beta = \frac{b}{a}$ ,

$$f_N(\xi, \beta) = 0.9885 + 0.1136\beta + 0.9388\beta^2 - 14.050\beta^3 + \xi(-0.0433 - 8.3171\beta + 31.698\beta^2 + 8.2269\beta^3) + \xi^2(0.9488 - 5.924\beta - 25.887\beta^2 + 4.1516\beta^3) + \xi^3(-2.4107 + 17.518\beta - 13.688\beta^2 + 5.9439\beta^3)$$

$$f_B(\xi, \beta) = 0.9730 + 0.1035\beta - 0.5642\beta^2 - 7.9135\beta^3 + \xi(0.0799 - 7.5001\beta + 38.220\beta^2 - 26.094\beta^3) + \xi^2(0.710 - 12.924\beta - 24.232\beta^2 + 55.528\beta^3) + \xi^3(-2.381 + 24.60\beta - 22.086\beta^2 - 17.262\beta^3)$$

$$g_N(\xi) = 1.1216 + 6.520\xi^2 - 12.388\xi^4 + 89.055\xi^6 - 188.608\xi^8 + 207.387\xi^{10} - 32.052\xi^{12}$$

$$g_B(\xi) = 1.1202 - 1.8872\xi - 18.014\xi^2 - 87.385\xi^3 + 241.912\xi^4 - 319.940\xi^5 + 168.011\xi^6$$

将(2-2-3)式变形，改写为如下形式：

$$\begin{cases} X_2 = (\lambda_{\theta\theta}u - \lambda_{u\theta}\theta_z) / (\lambda_{uu}\lambda_{\theta\theta} - \lambda_{u\theta}^2) \\ M_{z2} = (-\lambda_{u\theta}u + \lambda_{uu}\theta_z) / (\lambda_{uu}\lambda_{\theta\theta} - \lambda_{u\theta}^2) \\ Y_2 = v / \lambda_{vv} \end{cases} \quad (2-2-5)$$

根据弹性理论中的最小应变能原理，即得裂纹管的单元刚度方程为：

$$\begin{bmatrix} \frac{\lambda_{\theta\theta}}{\Delta} & 0 & -\frac{\lambda_{u\theta}}{\Delta} & -\frac{\lambda_{\theta\theta}}{\Delta} & 0 & \frac{\lambda_{u\theta}}{\Delta} \\ 0 & \frac{1}{\lambda_{vv}} & 0 & 0 & -\frac{1}{\lambda_{vv}} & 0 \\ -\frac{\lambda_{u\theta}}{\Delta} & 0 & \frac{\lambda_{uu}}{\Delta} & \frac{\lambda_{u\theta}}{\Delta} & 0 & -\frac{\lambda_{uu}}{\Delta} \\ -\frac{\lambda_{\theta\theta}}{\Delta} & 0 & \frac{\lambda_{u\theta}}{\Delta} & \frac{\lambda_{\theta\theta}}{\Delta} & 0 & -\frac{\lambda_{u\theta}}{\Delta} \\ 0 & -\frac{1}{\lambda_{vv}} & 0 & 0 & \frac{1}{\lambda_{vv}} & 0 \\ \frac{\lambda_{u\theta}}{\Delta} & 0 & -\frac{\lambda_{uu}}{\Delta} & -\frac{\lambda_{u\theta}}{\Delta} & 0 & \frac{\lambda_{uu}}{\Delta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_{z1} \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_{z2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ M_{z1} \\ X_2 \\ Y_2 \\ M_{z2} \end{Bmatrix} \quad (2-2-6)$$

其中， $\Delta = \lambda_{uu}\lambda_{\theta\theta} - \lambda_{u\theta}^2$ 。

由于裂纹对扭转及 xz 平面内弯曲影响比较小，故忽略了 x 轴方向转角和 z 方向位移及 y 轴方向转角在裂纹面上的间断，即  $\theta_{x1} = \theta_{x2}$ ， $w_1 = w_2$ ， $\theta_{y1} = \theta_{y2}$ 。

### 2.3 损伤杆件等效单元刚度矩阵

两端的无损伤单元的单元刚度矩阵的计算相对比较简单，可按正常单元计算。与梁单元

类似，将损伤杆件的各个子单元的单元刚度矩阵在单元局部坐标系  $xyz$  下进行组集，就可得到损伤杆件的单元刚度矩阵，其中包含有非边节点项（即内部自由度项）。为求得损伤杆件的等效单元刚度矩阵，以便组集到石油平台整体结构中，必须将内部自由度采用静凝聚法从损伤杆件的单元刚度矩阵中消除掉。若用  $i$  表示损伤杆件的左端节点（即左边节点），用  $j$  表示损伤杆件的右端节点（即右边节点），

$\{U_a\} = \{u_i, v_i, w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}, u_j, v_j, w_j, \theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{zj}\}^T$  表示损伤杆件的边节点位移向量，

$\{F_a\} = \{X_i, Y_i, Z_i, M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}, X_j, Y_j, Z_j, M_{xj}, M_{yj}, M_{zj}\}^T$  表示对应的边节点载荷向量，

$\{U_b\}$  表示损伤杆件的内部节点位移向量（即损伤单元的节点位移向量），则损伤杆件的单元刚度方程可简单地表示如下：

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_a \\ U_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_a \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2-2-7)$$

由上式消去内部节点自由度  $\{U_b\}$ ，即得：

$$[\bar{K}]\{U_a\} = \{F_a\} \quad (2-2-8)$$

其中  $[\bar{K}]$  即为损伤杆件的等效单元刚度矩阵，具体表达为：

$$[\bar{K}] = [K_{aa}] - [K_{ab}][K_{bb}]^{-1}[K_{ba}] \quad (2-2-9)$$

用上述方法得到的只是单元局部坐标系下的等效单元刚度矩阵，为整体结构的有限元计算，须将其转换为整体坐标系下的等效单元刚度矩阵，记局部坐标系  $xyz$  和整体坐标系  $\tilde{x}\tilde{y}\tilde{z}$  间的转换矩阵为  $[\lambda]$ ，即：

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \cos(x, \tilde{x}) & \cos(x, \tilde{y}) & \cos(x, \tilde{z}) \\ \cos(y, \tilde{x}) & \cos(y, \tilde{y}) & \cos(y, \tilde{z}) \\ \cos(z, \tilde{x}) & \cos(z, \tilde{y}) & \cos(z, \tilde{z}) \end{bmatrix}$$

其中  $(x, \tilde{x})$  表示局部坐标系的  $x$  轴与整体坐标系的  $\tilde{x}$  轴之间的夹角，其余依次类推。利用

转换矩阵为  $[\lambda]$ ，可得整体坐标系下的等效单元刚度矩阵为：

$$[K] = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}^T [\bar{K}] \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \quad (2-2-10)$$

其中上标“ $T$ ”表示转置矩阵。

## 2.4 损伤杆件等效的有限元参数

由(2-2-9)式算得损伤杆件的等效刚度矩阵后,假设损伤杆件的弹性模量不变,通过比较损伤杆件的等效刚度矩阵和无损伤杆件的刚度矩阵,可求得损伤杆件的等效横截面面积、 $y$ 轴惯性矩、 $z$ 轴惯性矩和极惯性矩为:

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \frac{\bar{K}_{uu}L}{E} & \bar{I}_y &= \min\left\{\frac{\bar{K}_{ww}L^3}{12E}, \frac{\bar{K}_{\theta_y\theta_y}L}{4E}\right\} \\ \bar{I}_z &= \min\left\{\frac{\bar{K}_{vv}L^3}{12E}, \frac{\bar{K}_{\theta_z\theta_z}L}{4E}\right\} & \bar{J} &= \min\left\{\bar{I}_y + \bar{I}_z, \frac{\bar{K}_{\theta_x\theta_x}L}{G}\right\} \end{aligned} \quad (2-2-11)$$

其中 $\bar{K}_{uu}$ 、 $\bar{K}_{vv}$ 、 $\bar{K}_{ww}$ 、 $\bar{K}_{\theta_x\theta_x}$ 、 $\bar{K}_{\theta_y\theta_y}$ 、 $\bar{K}_{\theta_z\theta_z}$ 为由(2-2-9)式算得的等效刚度矩阵 $[\bar{K}]$

中分别与节点位移 $u_1$ 、 $v_1$ 、 $w_1$ 、 $\theta_{x1}$ 、 $\theta_{y1}$ 、 $\theta_{z1}$ 对应的对角元素, $L$ 为损伤杆件的长度。

对于无损伤圆管单元, $y$ 轴惯性矩和 $z$ 轴惯性矩是相等的,但由式(2-2-11)可知,损伤管单元的两个方向的惯性矩不一定相等。因此,对于受损的管单元,即使是管径和壁厚不等,也不能用一个无损伤的圆管单元等效,这一点与梁单元不同。

### 附录3 裂纹损伤对平台安全影响的评估实例

在大多数情况下，裂纹常常出现在桩腿与桩靴的连接部位，而桩靴内部的裂纹被认为不会威胁平台的整体安全。为此，我们选取泥线附近9根桩的单元，假设分别具有穿透裂纹，裂纹尺寸分两种：

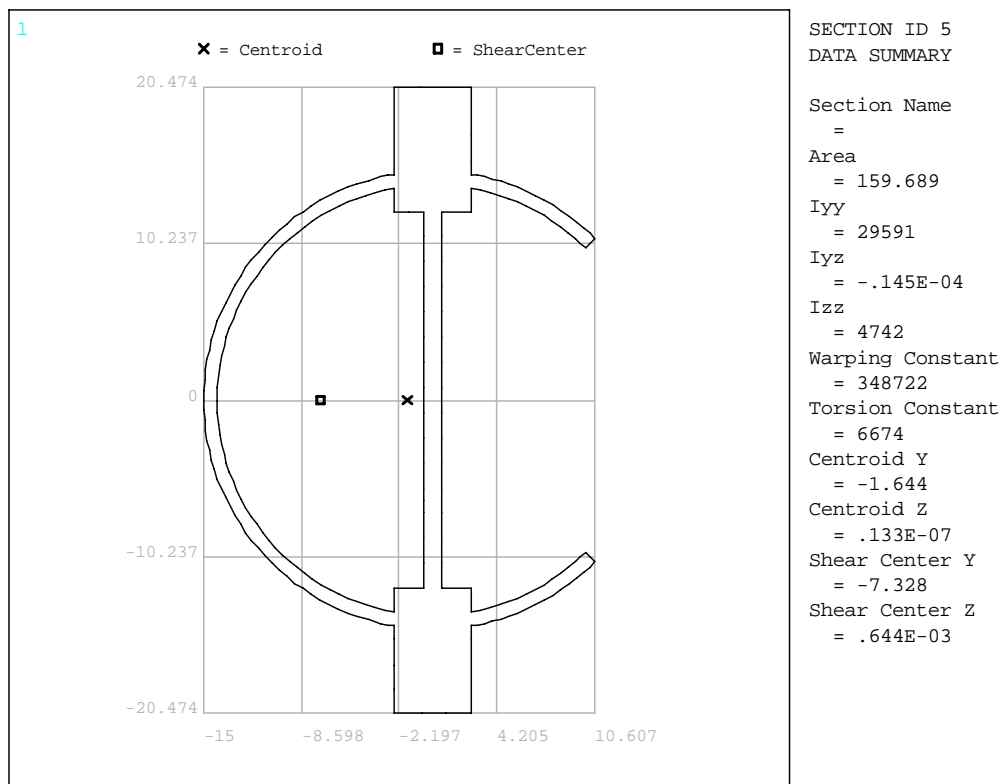
第一种裂纹，尺寸为 $\alpha = 90^\circ$ ， $c = \frac{\pi}{4}D$ ， $\frac{c}{D} = \frac{\pi}{4}$ ，计算得到的该损伤单元的有效截面模量为：

$$A = 0.103m^2$$

$$I_y = 12.31 \times 10^{-3} m^4$$

$$I_z = 1.97 \times 10^{-3} m^4$$

$$J = 2.778 \times 10^{-3} m^4$$



附图 3.1-1 桩腿第一种裂纹损伤单元的截面图

穿透裂纹长度  $c = \pi D/4$ (in),  $c/D = \pi/4$

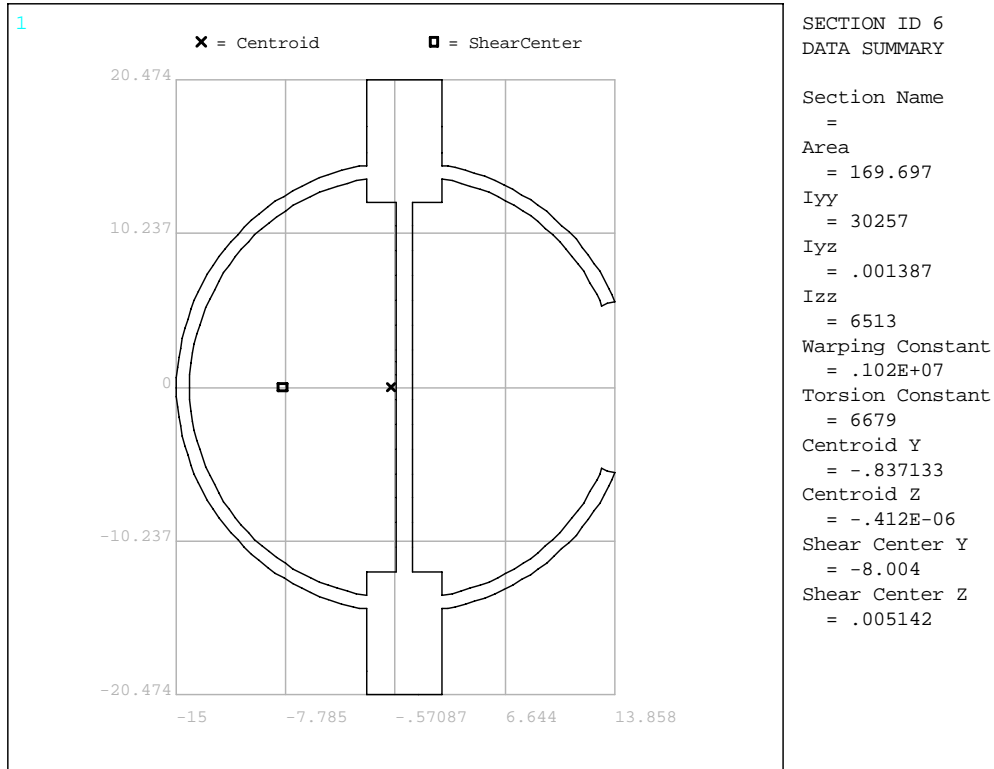
第二种裂纹，如附图 3.1-1 所示，尺寸为 $\alpha = 45^\circ$ ， $c = \frac{\pi}{8}D$ ， $\frac{c}{D} = \frac{\pi}{8}$ ，计算得到的该损伤单元的有效截面模量为：

$$A = 0.109m^2$$

$$I_y = 12.59 \times 10^{-3} m^4$$

$$I_z = 2.71 \times 10^{-3} m^4$$

$$J = 2.78 \times 10^{-3} m^4$$



附图 3.1-2 桩腿第二种裂纹损伤单元的截面图  
穿透裂纹长度  $c = \pi D / 8$  (in),  $c/D = \pi/8$

上述两种裂纹损伤在渤海、南海和东海三个海域的计算结果列于附表 3.1~3.4。显然，结构局部的裂纹损伤对自升式钻井平台应力和位移的影响不大。单根桩腿的裂纹不会显著减弱平台的强度，即使三条桩腿各有一根桩出现裂纹，平台的最大位移和最大应力也升高得有限。当然，裂纹部位的局部应力会比损伤前高，但对平台的整体强度影响不大。

自升式钻井平台由三根桁架式桩腿组成，是高度超静定的钢结构。这种结构的局部损伤对结构的整体强度不会有多大的威胁。但如果主要支撑构件完全丧失承载能力，结构的整体安全就会受到威胁。所以，这类平台令人担心的不是局部损伤，而是这些损伤的发展。如果损伤发展到整个构件失效，平台的整体安全就会受到威胁。

附表 3.1 渤海海域带裂纹损伤单元的应力表(单位: Pa)

节点号 \ 状态	完好	第一种 ( $\alpha=90^\circ$ )	第二种 ( $\alpha=45^\circ$ )
102	-0.56831E+08	-0.569270E+08	-0.569190E+08
103	-0.717900E+08	-0.718090E+08	-0.718050E+08
104	-0.627190E+08	-0.627240E+08	-0.627240E+08
105	-0.532460E+08	-0.532350E+08	-0.532380E+08
106	-0.692520E+08	-0.692700E+08	-0.692660E+08
107	-0.592380E+08	-0.592430E+08	-0.592420E+08
174	-0.327390E+08	-0.327580E+08	-0.327520E+08
176	-0.360660E+08	-0.360610E+08	-0.360600E+08
177	-0.285510E+08	-0.2856000E+08	-0.2855700E+08
180	-0.267890E+08	-0.267980E+08	-0.267960E+08

附表 3.2 南海海域带裂纹损伤单元的应力表(单位: Pa)

节点号 \ 状态	完好	第一种 ( $\alpha=90^\circ$ )	第二种 ( $\alpha=45^\circ$ )
102	-0.607380E+08	-0.607410E+08	-0.607400E+08
103	-0.655830E+08	-0.656770E+08	-0.656760E+08
104	-0.620290E+08	-0.620310E+08	-0.620300E+08
105	-0.579420E+08	-0.579460E+08	-0.579450E+08
106	-0.632120E+08	-0.633140E+08	-0.633120E+08
107	-0.583990E+08	-0.584100E+08	-0.584000E+08
174	-0.541100E+08	-0.541130E+08	-0.541120E+08
176	-0.593800E+08	-0.593860E+08	-0.593840E+08
177	-0.481790E+08	-0.481860E+08	-0.481820E+08
180	-0.443870E+08	-0.443990E+08	-0.443890E+08

附表 3.3 东海海域带裂纹损伤单元的应力表(单位: Pa)

节点号 \ 状态	完好	第一种 ( $\alpha=90^\circ$ )	第二种 ( $\alpha=45^\circ$ )
102	-0.684560E+08	-0.684630E+08	-0.684590E+08
103	-0.648460E+08	-0.649160E+08	-0.649160E+08
104	-0.612630E+08	-0.612690E+08	-0.612650E+08
105	-0.565280E+08	-0.565480E+08	-0.565380E+08
106	-0.634020E+08	-0.634720E+08	-0.634710E+08
107	-0.573050E+08	-0.573150E+08	-0.573100E+08
174	-0.585300E+08	-0.585430E+08	-0.585380E+08
176	-0.584040E+08	-0.584140E+08	-0.584090E+08
177	-0.483320E+08	-0.483540E+08	-0.483250E+08
180	-0.439320E+08	-0.439550E+08	-0.439450E+08

附表 3.4 裂纹损伤条件下的平台在各海域的最大位移和最大应力

海域	渤海		南海		东海	
	完好	损伤	完好	损伤	完好	损伤
位移 (mm)	29.97	30.11	62.01	62.50	136.9	137.5
应力 (MPa)	82.03	82.3	82.440	83.0	84.771	85.0

关于裂纹对疲劳损伤的影响, 我们选择东海进行对比计算, 结果列于附表 3.5。计算时假设裂纹不再扩展。可见, 在东海海域, 所考虑的裂纹对该平台的损伤有明显的影 响, 但尚在可接受的范围内。这也说明, 平台桩腿出现裂纹后, 如果该裂纹不是扩展裂纹, 在短期内 (如承包井正在作业过程当中) 可以带裂纹作业, 但要尽快采取措施清除裂纹或阻止其进一步扩展。

附表 3.5 裂纹对疲劳寿命的影响 (东海)

节点号	带裂纹疲劳寿命 (a)	无裂纹疲劳寿命 (a)	节点所在位置
303	16.53	20.34	87.776
306	16.59	20.42	87.776
321	16.73	29.51	93.262
324	16.79	29.63	93.262
285	17.79	19.52	82.29
288	17.86	19.58	82.29

## 附录4 海上自升式钻井平台桩腿裂纹平焊位超两次 TIG 修复技术

### 4.1 概述

4.1.1 自升式钻井平台桩腿裂纹的超两次 TIG 修复技术是针对我国自升式钻井平台的实际情况和桩腿裂纹作超两次焊补的急需而研发的

在我国引进的十余座自升式钻井平台上,疲劳裂纹大都产生在桩腿、桩靴、锅底等结构的 T 型焊接接头的焊缝上,其中又以出现在 (ASTM A514 和 ASTM EH36) 异种钢接头焊缝上的居多,超两次修复技术的研发就是据此进行的。

#### 4.1.2 研发遵循的技术路线

(1) 用同一种工艺既焊接初焊试样 (含初始焊缝的试样), 又焊出焊补试样 (对含裂纹试样作焊补后的试样)。焊补试样按焊补次数不同分为 1~4 次焊补试样四种;

(2) 对初始试样和 1、2、3、4 次焊补试样作工艺验证试验;

(3) 对初焊试样和 1、2、3、4 次焊补试样分别作系列疲劳实验, 进行疲劳实验验证;

(4) 根据上述实验结果, 特别是根据对大量疲劳实验数据作统计分析后, 再对超两次焊补工艺用于自升式钻井平台桩腿裂纹焊补的适用性作出评定。

#### 4.1.3 桩腿裂纹的超两次焊补与超两次 TIG 修复技术的相同与相异

(1) 桩腿裂纹的超两次焊补工艺系指对桩腿裂纹进行超两次焊接修补

(2) 桩腿裂纹的超两次 TIG 修复技术包括如下两部分:

① 桩腿裂纹的超两次焊补;

② 桩腿裂纹在超两次焊补后, 对焊补焊缝的焊趾加作 TIG 熔修处理。

#### 4.1.4 本章内容只适用于平焊 (俯焊) 位的 TIG 焊补修复

### 4.2 桩腿裂纹的超两次焊补工艺

#### 4.2.1 桩腿裂纹的一次焊补工艺要点

(1) 搞清桩腿裂纹的具体位置、数量、长度和深度;

(2) 清除裂纹

用砂轮磨削方法清除裂纹比较稳妥, 因为有的金属在使用碳弧气刨时容易造成裂纹扩展和/或产生新的裂纹。

先顺着裂纹长度方向打磨, 一直磨削到裂纹尽头, 再延长 20mm 左右。

当沿长度方向打磨掉全部裂纹后, 用磁粉探伤法检查, 直至无裂纹为止。

(3) 开制坡口

① 坡口深度必须保证超过裂纹深度 (本实验条件下超出 4~7mm)。

② 坡口底部留有必要宽度, 以便焊补时焊条能伸到坡口底部, 避免根部未焊透。当焊条直径为  $\phi 3.2\text{mm} \sim \phi 4.0\text{mm}$  时, 底部宽可取为 6mm 左右。

③ 坡口向外倾斜的坡口角度尽量小些, 以使焊补焊缝的外延量尽量小些 (在实验中我们取为  $10^\circ$  左右, 如附图 4.2-1 所示。)

④ 坡口向内倾斜角度相对大些, 其具体角度数值综合如下两个条件确定:

- 该角度与向内倾斜角合在一起, 能为焊补时焊条的摆动留出必要的空间, 为保证焊缝

与坡口的两个侧壁良好熔合提供条件；

- 使焊缝金属总量减到最少。

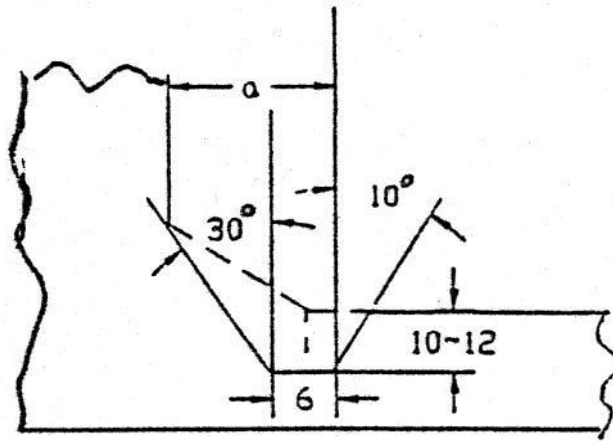
附图 4.2-1 给出的 30° 向内倾斜坡口角是我们在实验中采用的，仅供参考。

(4) 焊补由取得符合相关规定的等级资格证书的手工电弧焊焊工承担；

(5) 作好焊前清洁工作

坡口内部和距焊补焊缝 20mm 范围内的金属表面上的锈迹、污垢、油脂和水等都要彻底清理干净，直到露出金属本色；

(6) 按焊补规范施焊



附图 4.2-1 坡口示意图（以裂纹深 5~8mm 为例）

#### 4.2.2 桩腿裂纹的一次焊补要点

(1) 焙烘

按规定（见焊接规范）焙烘焊条；

(2) 预热

按规定（见焊接规范）进行预热，如无专用预热设备，可采用手工分段预热法；

(3) 焊接修补

按焊补规范（见附表 4.2-1）进行焊补，先用  $\phi 3.2\text{mm}$  LB-52 焊条打底 1~2 层，后用  $\phi 4.0\text{mm}$  LB-52 焊条焊满坡口。

附表 4.2-1 桩腿裂纹焊补规范

填充金属	牌号	直径 (mm)	电流(A)	电压(v)	极性	备注
LB-52	E7016	3.2	100	21-24	DC+	
LB-52	E7016	4.0	160	21-24	DC+	
预热温度	150℃					
焊条焙烘	350℃/1h					
层间温度	200℃					

LB-52 焊条的化学成份和力学性能见附表 4.2-2、附表 4.2-3。

附表 4.2-2 LB-52 焊条化学成份(%)

	C	M <sub>n</sub>	P	S	Si
技术标准	0.08	0.96	0.011	0.007	0.58
复验结果	0.07	0.93	0.016	0.008	0.53

附表 4.2-3 LB-52 焊条力学性能

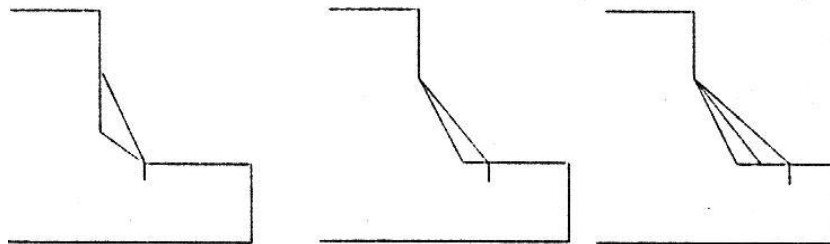
	$\sigma_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\delta$ (%)	$\varphi$ (%)	TV J(kgf-m)	焊后热处理
产品性能 指标	490	560	32		230(23)	焊态
	420	529	33		270(28)	620℃×1hr 消除应力处理
复验结果	404.4	491.9	31.0	77.8		

(6) 焊补完毕后, 经过 48h 进行外观检查, 合格后进行无损检验。检验合格, 焊补完成。

#### 4.2.3 裂纹的二、三、四次焊补工艺

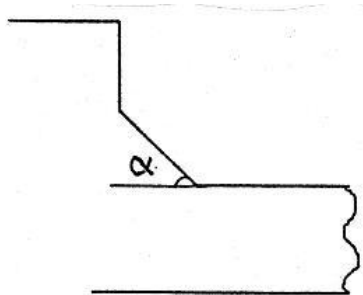
桩腿裂纹的二、三、四次焊补工艺与桩腿裂纹的一次焊补工艺相同, 只是每次焊补后的焊缝位置和形状都有所改变, 这是因为:

(1) 桩腿裂纹经过一次焊补后若再开裂, 裂纹将出现在新焊趾处, 相对原裂纹位置要外移一段距离, 如附图 4.2-2 所示。在本试验研究工艺条件下, 此外移的单边距离为 5mm 左右。所以一次焊补的坡口及焊趾比初焊外移 5mm 左右, 二次焊补的坡口及焊趾与一次焊补相比外延 5mm 左右。二次、三次、四次焊补也都要相应外延。



附图 4.2-2 多次焊补焊缝位置、形状示意图

(2) 每焊补一次, 焊缝都要向外延伸一次, 使得焊缝形状逐次变得扁平, 焊趾过渡角  $\alpha$  (见附图 4.2-3) 逐次变小。



附图 4.2-3 焊趾过渡角示意图

#### 4.2.4 多次焊补的影响

##### (1) 多次焊补对金相组织的影响

###### ① 初焊焊缝（指未经过焊补的焊缝）的相应金相组织为：

焊缝金相组织为：柱状和针状铁素体加贝氏体和少量珠光体；

过热区金相组织为：贝氏体（上贝氏体和粒状贝氏体）加铁素体和珠光体。

###### ② 一次焊补、二次焊补和三次焊补后的相应金相组织为：

焊缝金相组织：柱状和针状铁素体加少量珠光体；

过热区金相组织：细珠光体加粒状贝氏体加铁素体。

初焊和一次焊补、二次焊补、三次焊补后，对应区的金相组织基本相同，其细微差别可能是因为初焊时 ASTM A514 一侧的母材的合金元素过渡到焊缝金属中去所致。

##### (2) 多次焊补对力学性能的影响

为查明多次焊补对焊接接头常规力学性能的影响，将初焊试样与经过四次焊补后的试样分别进行了拉伸和冲击试验（冲击试样的缺口开制在熔合线上，按 GB2650-89 进行），试验结果如附表 4.2-4 所示。

附表 4.2-4 初焊与四次焊补焊接接头力学性能对比

试验内容 试样	抗拉强度 N/mm <sup>2</sup>	冲击试验	
		冲击功 (J)	试验温度 (°C)
初 焊	502	234	-40
		138	-40
四次焊补	503	>145	-40
		227	-40

比较上述试验结果可以看出：焊接接头经过四次焊补后，常规力学性能未见降低，与初焊时相当，无恶化现象。

##### (3) 多次焊补造成的残余应力的影响

焊补是局部不均匀加热过程，被加热熔化和加热到很高温度的金属冷却后受到周围金属的制约，而承受的拉伸残余应力，将对接头的疲劳寿命产生不利影响。

##### (4) 多次焊补对焊趾应力集中的影响

① 焊趾应力集中系数计算方法

根据 Nishida 公式，焊趾的应力集中系数  $k$  可按下式计算：

$$K = 1 + \frac{1 - \exp\left[-0.9 \sqrt{\frac{B}{h}} \cdot (\pi - \theta)\right]}{1 - \exp\left[-0.9 \sqrt{\frac{B}{h}} \cdot \frac{\pi}{2}\right]} \cdot \left(\frac{1}{2.8 \times \frac{B}{2b} - 2} \cdot \frac{h}{\rho}\right)^{0.63}$$

式中（见附图 4.2-4）：

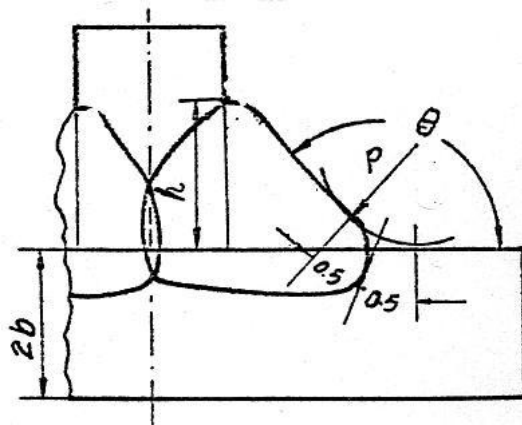
$B = h + b$ ；

$h$ ——焊脚(mm)；

$2b$ ——板厚(mm)；

$\rho$ ——焊趾半径(mm)；

$\theta$ ——焊趾夹角(rad)。



附图 4.2-4 焊趾  $\rho$ 、 $\theta$  示意图

通过实际测量，测得每个初焊和多次焊补 T 型焊接接头试件的上述确定焊趾应力集中系数的五个参数的数值，然后再求出诸多初焊和多次焊补试件的每个参数的平均值，分别代入 Nishida 公式便可得到初焊和多次焊补试件的焊趾应力集中系数。其具体数值如附表 4.2-5 所示。

附表 4.2-5 初焊与多次焊补的焊趾应力集中系数

试件状态	K
初焊	$K_0=3.066$
一次焊补	$K_1=2.925$
二次焊补	$K_2=2.333$
三次焊补	$K_3=2.302$

由此可见，在本试验条件下，多次焊补改变了焊趾形状，从而使焊趾应力集中系数逐次减小，有利于提高疲劳寿命。

附表 4.2-6 初焊试件 $\theta$ 、 $h$ 实测值

参数 试件号	$\theta_1$ (°)	$h_1$ (mm)	$\theta_2$ (°)	$h_2$ (mm)
100	33	12.0	35	12.0
121	35	10.7	45	10.7
120	38	11.4	36	10.8
122	31	10.8	47	10.8
092	35	14.3	30	
093	30.0	10.7	46.0	10.0
	30.7	11.6	39.8	10.9
平均值	$\theta=36.75^\circ$		$h=11.3\text{mm}$	

附表 4.2-7 一次焊补试件 $\theta$ 、 $h$ 实测值

参数 试件号	$\theta_1$ (°)	$h_1$ (mm)	$\theta_2$ (°)	$h_2$ (mm)
36	30.0	13.0	37.0	13.0
115	34.0	13.0	30.0	13.0
51	38.0	13.0	33.0	12.0
21	38.0	11.4	28.0	12.5
103	37.0	12.5	38.0	12.5
39	48.0	11.4	30.0	12.5
4	34.0	12.5	30.0	11.5
126	25.0	14.0	30.0	12.5
97	40.0	12.5	35.0	13.6
86	35.0	12.5	40.0	13.6
34	30.0	10.0	33.0	11.5
	35.4	12.3	33.1	12.56
平均值	$\theta=34.3^\circ$		$h=12.5\text{mm}$	

② 焊趾应力集中系数计算参数实测

为查明多次焊补对焊趾应力集中系数的影响，对五十九个 T 型接头试件的五个焊趾应

力集中系数计算参数逐个分别进行了实际测量，其结果如下：

(a) 焊趾过渡角 $\theta$ 和焊趾高  $h$  实测

实测结果见附表 4.2-6、附表 4.2-7、附表 4.2-8、附表 4.2-9、附表 4.2-10。

附表 4.2-8 二次焊补试件 $\theta$ 、 $h$  实测值

参数 试件号	$\theta_1$ (°)	$h_1$ (mm)	$\theta_2$ (°)	$h_2$ (mm)
36			25.0	12.5
103	27.0	11.5	26.0	13.7
66	35.0	12.5	30.0	12.5
40	30.0		30.0	
74	30.0	13.8	35.0	12.5
128	20.0	12.5	30.0	13.8
100				
77	30.0	21.5	30.0	12.5
93	20.0	12.5		
92	25.0	11.5	25.0	12.0
115	26.0	13.0	28.0	12.5
21	20.0	12.5	22.0	12.0
32	20.0	10.0	30.0	12.5
48	28.0	12.5	23.0	15.0
25	26.0	14.0	26.0	14.0
41	23.0	13.0	20.0	14.0
88				
20	23.0	9.0	20.0	8.0
42	20.0	13.5	20.0	15.0
69	25.0	13.5	23.0	12.5
34	30.0	10.0	30.0	11.0
46	32.0	12.5	20.0	12.0
55	25.0	12.5	28.0	11.0
23	26.0	12.0	26.0	12.5
97	20.0	12.5	35.0	14.0
86	39.0	12.5	30.0	12.5
4	25.0	12.5	25.0	16.0

126	30.0	11.0	30.0	15.0
72	20.0	12.5	30.0	12.5
102	25.0	10.0	25.0	9.0
132	25.0	10.5	25.0	11.5
104	30.0	11.5	25.0	11.5
37	30.0	10.0	20.0	11.5
平均值	$\theta=26.2^\circ$		h=12.5mm	

附表 4.2-9 三次焊补试件 $\theta$ 、h 实测值

试件号 \ 参数	$\theta_1$ (°)	$h_1$ (mm)	$\theta_2$ (°)	$h_2$ (mm)
25	28.0	11.0	28.0	10.0
34	30.0	16.0	28.0	11.0
104	25.0	12.5	26.0	12.0
69	30.0	11.5	25.0	10.0
平均值	$\theta=27.6^\circ$		h=12mm	

附表 4.2-10 四次焊补试件 $\theta$ 、h 实测值

试件号 \ 参数	$\theta_1$ (°)	$h_1$ (mm)	$\theta_2$ (°)	$h_2$ (mm)
23	25.0	13.0	25.0	14.0
66	23.0	15.0	30.0	13.0
4	23.0	13.0	20.0	15.0
40	20.0	13.0	22	15.0
126	25.0	14.0	28.0	18.0
平均值	$\theta=24.1^\circ$		h=14.3mm	

(b) 焊趾过渡处曲率半径 $\rho$ 的实测

经放大倍后,对初焊和多次焊补后试件焊趾过渡处的曲率半径进行了实测,其结果如附表 4.2-11 所示。

焊趾应力集中系数与焊趾半径 $\rho$ 之间有某种反比关系,  $\rho$ 越大,应力集中系数越小。表中给出的 $\rho$ 值随焊补次数增多总体趋于增大的规律与附表 4.2-5 给出的焊趾应力集中系数随焊补次数增多而逐次减小相符的。但一次焊补是个例外,对此留待小结中再讨论。

附表 4.2-11 焊趾半径 $\rho$ 实测值

试件 \ 参数	焊趾过渡半径 $\rho$ (mm)
初焊试件	$\rho_0=2.80$
一次焊补试件	$\rho_1=2.64$
二次焊补试件	$\rho_2=3.50$
三次焊补试件	$\rho_3=4.00$

#### (5) 多次焊补对疲劳损伤的影响

每次焊补都会使焊补焊缝的相邻金属受到一次加热、冷却的热循环作用,从而使这部分金属受到加载——卸载——加载的应力循环,多次循环后给这部分金属造成程度不等的疲劳损伤,这对接头疲劳寿命是不利的。

而每一次焊补前,都要挖掉焊趾裂纹,同时不可避免地挖掉裂纹两边受到疲劳损伤的部分焊缝金属和母材(这部分金属承受了原焊缝焊接或焊补热循环和实验过程中施加的应力循环造成的双重疲劳损伤,应该说是整个焊接接头中除焊趾外疲劳损伤最严重的区域),从而避免了双重疲劳损伤的累积叠加,这又是对疲劳寿命有利的。

#### (6) 小结

① 上述焊补工艺和试验条件下,经过对裂纹的多次焊补后,焊接接头的金相组织、接头的力学性能并未变坏,基本保持初焊性能。

② 从多次焊补对接头疲劳寿命的影响因素分析看,有利与不利两方面同时存在,多次焊补对焊接接头疲劳寿命的影响是多个因素共同作用的结果。

### 4.3 桩腿裂纹的超两次 TIG 修复技术

#### 4.3.1 按桩腿裂纹超两次焊补工艺对桩腿裂纹进行超两次焊补

#### 4.3.2 对经过焊补的桩腿裂纹修补焊缝的焊趾作 TIG 熔修处理

##### (1) TIG 熔修工艺和操作要点

① 采用一次 TIG 熔修方法进行 TIG 熔修;

② 清理焊趾,在焊趾及其两侧各 20mm 范围内不得有锈迹、油污、油脂、水迹、焊接飞溅物等杂质、污物;

③ TIG 熔修应由经本社认可的有组织培训、掌握与 TIG 熔修相关的知识和技能、经考试合格持证或经本社审核认可的人员操作;

④ 按通过实验选定的熔修规范进行熔修;

⑤ 将焊枪保持在位于焊趾部位 0.5~1.5mm 处熔修;

⑥ 为保证熔修焊道的形状和质量,熔修中不得中间停顿,熔修速度要均匀;

⑦ 熔修完毕 72h 后进行 100% 探伤;

⑧ 多次焊补熔修

多次焊补熔修的工艺、过程、所用熔修规范皆与一次焊补熔修相同。

## (2) TIG 熔修规范的确定方法

①参照国际焊接协会 (IIW) 推荐的 TIG 熔修规范 (见附表 4.3-1), 在熔修热输入能量为  $0.7\sim 2\text{KJ/mm}$  范围内初选出三种熔修规范, 按照热输入能量由小到大的顺序, 依次称作 0<sup>#</sup>、1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>规范;

②然后再通过常规试验对 0<sup>#</sup>、1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>三种初选熔修规范做进一步筛选, 从中选出做 TIG 熔修用的熔修规范。

附表 4.3-1 国际焊接学会推荐的 TIG 熔修规范

保护气体	氩气
气流速度	7~12L/min
喷嘴直径	10~14mm
预热 (根据需要)	50~200℃
钨极直径	3.2~4.0mm
电压	12~17V
电流	160~250A
焊速	80~160mm/min
热输入能	0.5~2.5KJ/mm

所谓常规试验, 是指对 TIG 熔修后的焊接接头作金相分析。

与三种熔修规范对应的 TIG 熔修后的焊接接头金相分析结果见附表 4.3-2a 和 4.3-2b。

焊缝区的金相组织:

0<sup>#</sup>、1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 三种规范对应的熔修接头的焊缝区的金相组织皆为柱状和针状铁素体+贝氏体; 硬度均在 HV350 以下, 介于 HV310~HV266 之间。

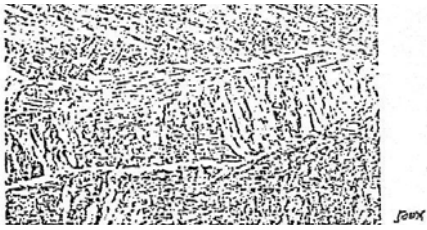


热影响区的金相组织:

1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 两种规范对应的熔修接头热影响区组织为贝氏体+索氏体+少量铁素体+少量低碳马氏体, 显微硬度在 HV335~HV252 之间;

0<sup>#</sup> 规范对应的熔修接头热影响区里马氏体量增多, 硬度值高达 HV377。

上述结果表明: 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 规范对应的熔修接头组织较为合适, 虽然过热区中有少量低碳马氏体, 但焊接接头各区的硬度都低于 HV350, 满足平台建造要求, 此时焊缝的强度和韧性都较好, 如果再加大规范, 势必增加熔修热输入能量, 可能会造成金相组织粗大, 综合力学性能将会变差。因此选用 2<sup>#</sup> 熔修规范作为实验研究用的熔修规范。

附表 4.3-2a 按 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 规范熔修得到的焊接接头金相组织

序号	焊接接头部位	金相组织	金相组织照片
1	焊缝组织	柱状和针状铁素体+贝氏体	
2	过热区组织-1	贝氏体+索氏体+少量铁素体+少量马氏体	
3	过热区组织-2	贝氏体+索氏体+少量铁素体+少量马氏体	

附表 4.3-2b 按 0<sup>#</sup>、1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 规范熔修所得焊接接头显微硬度值 (HV0.2)

试样号	焊接接头显微硬度值 (HV0.2)			
	TIG 焊缝距表面 1.5mm	熔合线热影响区距表面 1.5mm	热影响区距熔合线 1mm,距表面 1.5mm	热影响区距熔合线 2mm,距表面 1.5mm
0 <sup>#</sup>	310	377	330	266
1 <sup>#</sup>	290	335	302	262
2 <sup>#</sup>	266	328	282	252

#### 4.4 桩腿裂纹的超两次焊补工艺和超两次 TIG 熔修技术的修后效果比较

##### 4.4.1 两种方法对桩腿接头各区金相组织和硬度影响的比较

桩腿裂纹按两种方法修复后, 接头各区的金相组织如附表 4.4-1 所示。

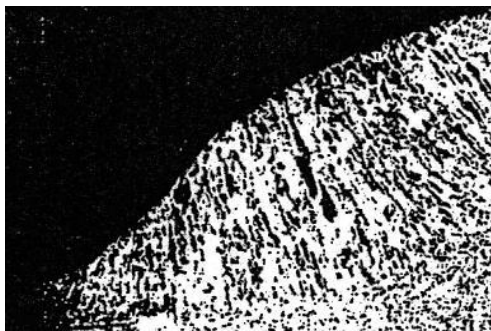
从附表 4.4-1 中可以看出, TIG 熔修后焊补接头组织的变化主要表现在热影响区出现了马氏体组织, 增加了热影响区的硬度, 但由于是低碳马氏体, 数量也比较少, 热影响区的最高硬度值在 HV300 左右, 不算太高。此外, 还可明显看出经过一次焊补熔修乃至三次焊补熔修后, T 型接头焊缝和热影响区对应的金相组织相同, 没有变化, 说明在相同的工艺和规范条件下得到的焊接接头组织相同。

附表 4.4-1 两种方法修复后修复接头金相组织

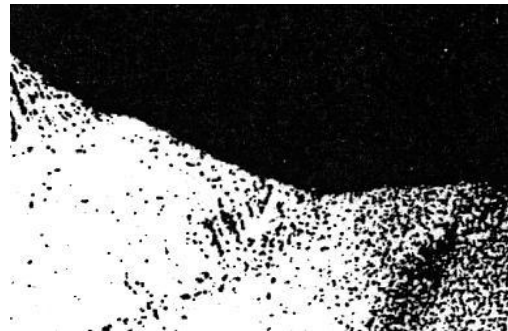
焊补或焊补后熔修次数	焊补后 T 型接头各区金相组织		TIG 熔修后 T 型接头各区金相组织	
	焊缝区	热影响区	焊缝区	热影响区
一次	柱状和针状铁素体+少量珠光体	细珠光体+粒状贝氏体+铁素体	沿贝氏体晶界分布的铁素体+针状铁素体+少量珠光体	贝氏体+马氏体+少量铁素体
二次				
三次				

#### 4.4.2 两种方法对修复接头焊趾应力集中影响的比较

焊趾处的形状和焊趾应力集中系数对焊接接头的疲劳寿命影响很大。改变焊趾角及焊趾半径可改变焊趾处的应力集中系数。从附图 4.4-1 和附图 4.4-2 可明显地看出焊补后的焊缝焊趾经熔修后焊趾形状的变化。TIG 熔修使焊趾处的曲率半径明显地比焊补试件焊趾处的曲率半径大，熔修后的曲率半径值一般都在 10mm 以上，过渡平缓，焊趾角增大，应力集中系数降低。而焊补状态的曲率半径为 2~4mm，有的只有 0.5~1.0mm，焊缝向母材的过渡有突变，应力集中严重，对接头的疲劳寿命很不利。



焊补焊缝焊趾形状 a ×12.5



焊补焊缝焊趾形状 b ×12.5

图 4.4-1 焊补焊缝焊趾形状 (×12.5)



图 4.4-2 焊补后熔修焊缝焊趾形状 (×12.5)

按 Nishida 公式可算焊补熔修后的焊趾应力集中系数为：

$$K=1.736 \quad (\theta=150^\circ、\rho=10\text{mm})$$

$$K=1.313 \quad (\theta=170^\circ、\rho=10\text{mm})$$

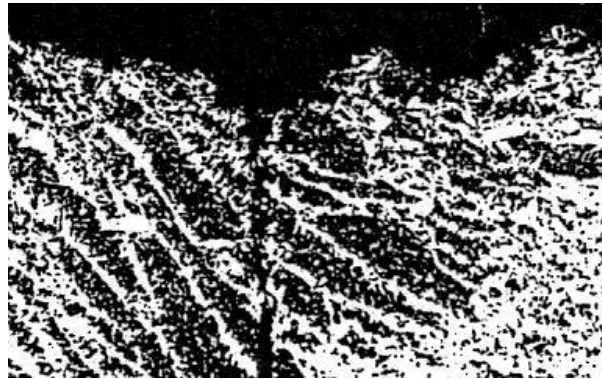
而焊补焊缝焊趾的应力集中系数为：

$$K=3.066\sim 2.302$$

两者相比较可看出：焊补熔修焊缝的焊趾应力集中系数要比焊补焊缝的焊趾应力集中系数（按最小的算）低 25~43%，从而有利于疲劳寿命的提高。

#### 4.4.3 两种方法对修复接头焊趾金属材质性能影响的比较

焊趾金属的材质性能对疲劳裂纹的萌生和扩展都有较大的影响。从附图 4.4-3（照片×100）可看出：焊补后的焊趾表面不光滑、有凹槽，经电镜检查还发现有的焊趾处有夹渣、微裂纹等缺陷，这些都是焊补接头产生疲劳裂纹的裂纹源。从放大倍数较高的照片（附图 4.4-3）上可看到：在表面粗糙、不光滑的沟槽处产生疲劳裂纹；而经过 TIG 熔修后，不但表面光滑、平整、无沟槽，夹渣等缺陷也减少，焊趾金属的材质性能得到改善，疲劳裂纹也不再发生在焊趾处，而转移到有缺陷的焊补焊缝部位以及熔修焊缝与母材交界有咬边等缺陷的其它薄弱面上，可见 TIG 熔修改善了 T 型焊接接头疲劳性能最薄弱的部位——焊趾处焊补后金属材质的性能，从而提高了接头的疲劳寿命。

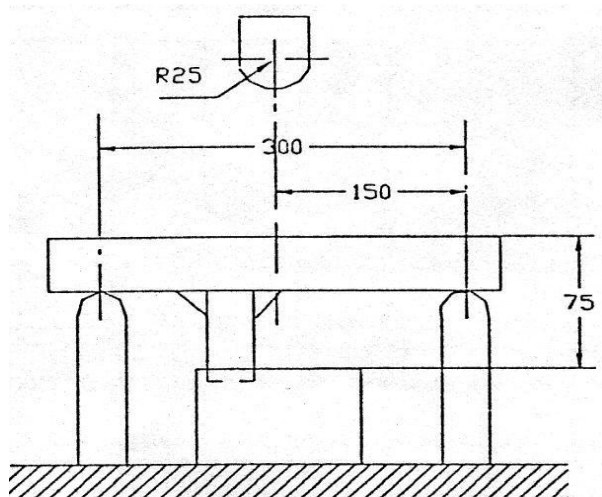


附图 4.4-3 未经 TIG 熔修焊趾的表面缺陷和裂纹（×100）

#### 4.4.4 两种方法对修复接头低温性能影响的比较

对于长期在低温海域进行钻井等海上作业的海上平台而言，抗脆性断裂性能是不可或缺的，为此，我们通过落锤实验测定熔修焊补与焊补两种状态下的 T 型焊接接头试样的脆性转变温度  $T_r$ （类似 NDT）的办法，评定 TIG 熔修对焊补接头低温性能的影响。

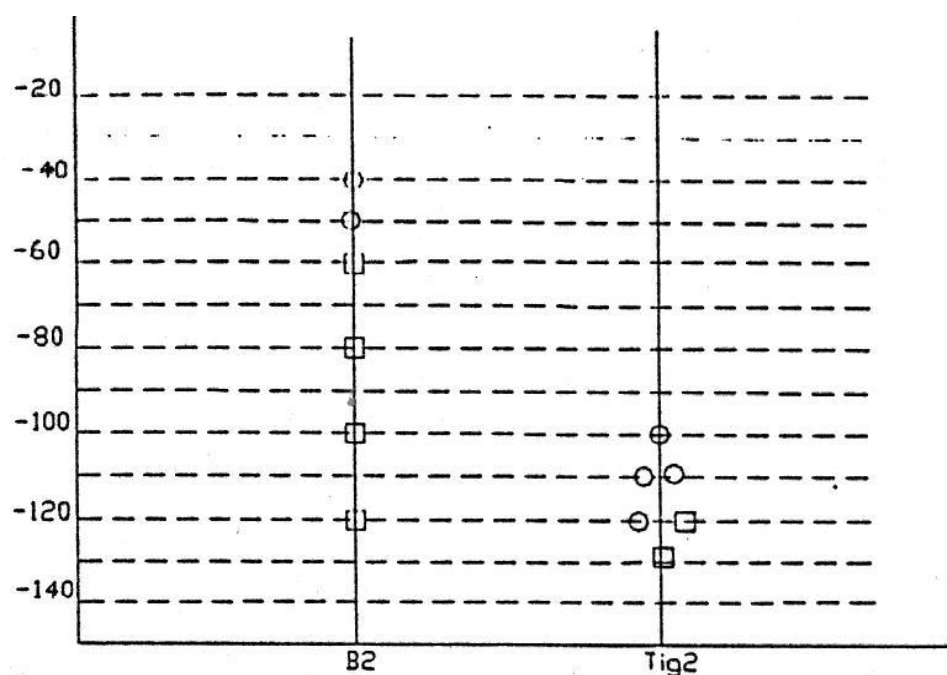
落锤实验在 900kgf-M 的落锤试验机上进行，使用的打击能力为 630kgf-M，落锤实验的示意图如附图 4.4-4 所示。



附图 4.4-4 T 型接头落锤实验示意图

实验用的冷却介质为氟里昂，冷却剂为干冰加液氮，为确保试样各部位的温度均匀，将试样在低温槽内的冷却时间按不低于 15min/mm 进行控制。为确保实验温度准确，操作时间不得超过 5~6sec。

附图 4.4-5 和附表 4.4-2 为焊补和焊补后熔修两种状态下的 T 型焊接接头的落锤实验结果。



注：○——未断；  
□——断裂。

附图 4.4-5 二次焊补和二次焊补熔修接头落锤实验结果

附表 4.4-2 T 型接头落锤实验结果

温度 (°C)	-40	-50	-60	-80	-100	-110	-120	-127
未熔修	O	O	X	X	X		X	
熔修					O	OO	XO	X

注：○——表示试件未断；  
X——表示试件断裂。

附图 4.4-5 和附表 4.4-2 表明：TIG 熔修后接头发生脆断的温度将从焊补后的 -60°C 降至 -120°C，换言之，TIG 熔修可使焊补后的 T 型接头的脆性转变温度  $T_f$  (类似 NDT) 降低 60°C 左右。TIG 熔修既可提高疲劳寿命，又提高了抗脆性断裂的性能，这对长期在低温海域作业的海上平台而言都具有特殊重要的意义。

#### 4.4.5 两种方法对修复后疲劳寿命的比较

自升式钻井平台桩腿裂纹性质属于疲劳裂纹,因此用两种方法进行多次修复后的桩腿疲劳寿命的长短,两种方法修出的桩腿焊接接头的抗疲劳性能的状况便成为被关注的焦点。为了客观地、定量地给出一个科学的评定结论,我们作了如下系列疲劳实验:

- (1) 初焊试件的疲劳实验;
- (2) 一次焊补试件的疲劳实验;
- (3) 二次焊补试件的疲劳实验;
- (4) 三次焊补试件的疲劳实验;
- (5) 四次焊补试件的疲劳实验;
- (6) 一次焊补后加 TIG 熔修试件的疲劳实验;
- (7) 二次焊补后加 TIG 熔修试件的疲劳实验;
- (8) 三次焊补后加 TIG 熔修试件的疲劳实验。

总共 8 个部分的疲劳实验。每个部分疲劳实验的试件数、相关实验参数见附表 4.4-3。

附表 4.4-3 疲劳试件数与实验参数汇总表

试件类型	试件数			实验应力 (MPa)		平均应力 (MPa)		应力幅 (MPa)		应力比	
	总数	低周	高周	低周	高周	低周	高周	低周	高周	低周	高周
初焊试件 <sup>1)</sup>	100	50	50	相同		299.52	137.28	161.28	73.92	0.3	
一补试件	35	16	19								
二补试件 <sup>2)</sup>	29	15	14								
三补试件	28	12	16			较一补高 20%	167.86	90.38			
四补试件	22	10	12								
一补熔试件 <sup>3)</sup>	37	17	20								
二补熔试件	31	14	17			较二补高 20%					
三补熔试件	22	10	12			较三补高 20%					
总计	304	144	160								

注: 1) 初始试样指未作过焊接修补的试样。

2) 一补试样指作过一次焊接修补的试样, 余类推。

3) 一补熔修试样指经一次焊补后, 又对一补试样的焊趾作过 TIG 熔修处理的试样, 余类推。

附表 4.4-4 R=0.500 及 R=0.999 时的疲劳寿命

	R=0.5		R=0.999	
	低周( $\times 10^5$ )	高周( $\times 10^6$ )	低周( $\times 10^5$ )	高周( $\times 10^6$ )
初焊	1.97	2.41	1.04	1.39
一次补焊	1.63	2.15	0.84	1.15
二次补焊	2.15	3.44	1.18	1.38
三次补焊	1.96	3.68	0.91	1.08
四次补焊	1.35	4.59	0.56	2.06

附表 4.4-5 各次焊补试件实验结果的对数正态分布参数

	对数平均值 $\mu$		对数标准差 $\sigma$	
	低周	高周	低周	高周
初焊	5.295	6.382	0.090	0.077
一次补焊	5.212	6.332	0.093	0.088
二次补焊	5.332	6.536	0.085	0.128
三次补焊	5.291	6.566	0.107	0.173
四次补焊	5.129	6.662	0.123	0.113

## (1) 初焊试件与多次焊补试件疲劳寿命的比较

## ① 对数正态分布下初焊试件与多次焊补试件疲劳寿命的比较。

对疲劳实验数据按对数正态分布统计处理, 得到对数正态分布下的疲劳寿命比较结果如附表 4.4-4、附表 4.4-5 所示。

据此, 可从附表 4.4-5 中看出: 二次焊补、三次焊补和四次焊补试样的高周实验数据分散性较大; 对低周实验而言, 除四次焊补试样外, 实验数据分散性相关不大, 得到高应力疲劳实验数据分散性一般较小的结果; 这一结果与大量实验报道相一致的。而高周疲劳实验数据的分散性有随焊补次数增多而逐渐增大的趋势, 且在三次焊补时达到相当大的值。

从附表 4.4-4 中可以看到, 在存活率  $R=0.500$  条件下的低周疲劳寿命中, 与初焊相比较:

- (a) 一次焊补寿命下降约 17%;
- (b) 二次焊补寿命提高约 9%;
- (c) 三次焊补寿命与之相当;
- (d) 四次焊补寿命下降约 31%。

而其高周疲劳寿命中, 与初焊相比较:

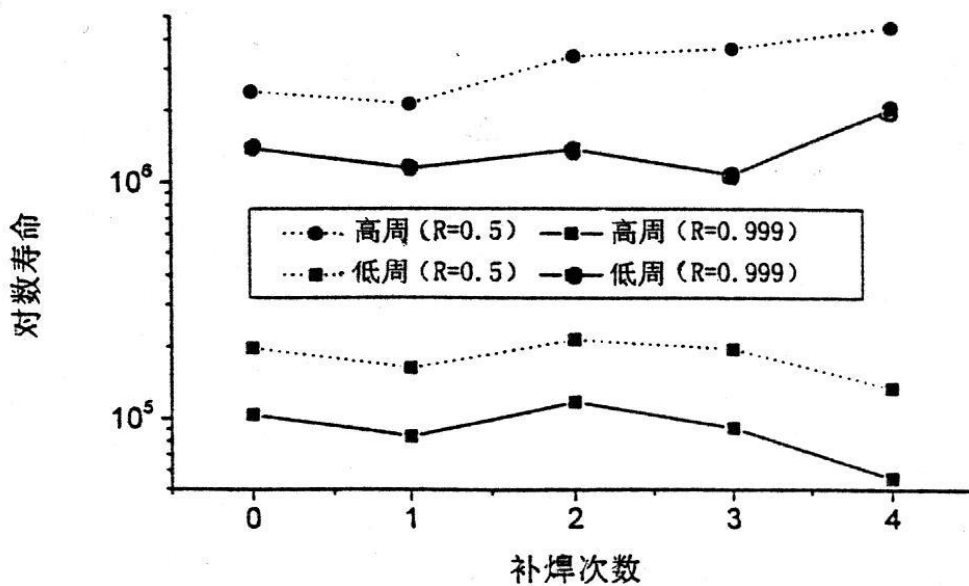
- (a) 一次焊补下降约 10%;
- (b) 二次焊补提高约 40%;
- (c) 三次焊补提高约 50%;

(d) 四次焊补提高约 90%。

概括地说，在存活率  $R=0.500$  条件下的中值寿命比较中，四次焊补除一、四次焊补的疲劳寿命较初焊有一定下降外，二、三次焊补的疲劳寿命都没有明显的变化。在高周疲劳实验中，疲劳寿命有随补次数增多而略有增加的趋势。

在高存活率 ( $R=0.999$ ) 条件下的疲劳寿命比较中，可以看到各次焊补的疲劳寿命之间已经没有一致性的规律，高周疲劳寿命段中各次焊补与初焊疲劳寿命间的差距也较中值寿命段中对应寿命段间差距有所增大，一般在 20% 左右，最大达 50%。

但就整体而言，经过四次焊补，试件的疲劳寿命没有产生较大变化，如附图 4.4-6 所示，基本上分布在一定的分布带中。虽然在高存活率下，疲劳寿命存在一定的差距，考虑到各次焊补中，试样由于焊接的不一致性等原因，这些差距还是合理的，由此可以认为多次焊补对试件的疲劳寿命没有较大的影响。



附图 4.4-6 多次焊补实验寿命比较

② 威布尔分布下初焊试件与多次焊补试件疲劳寿命的比较

(a) 不同存活率下的疲劳寿命比较

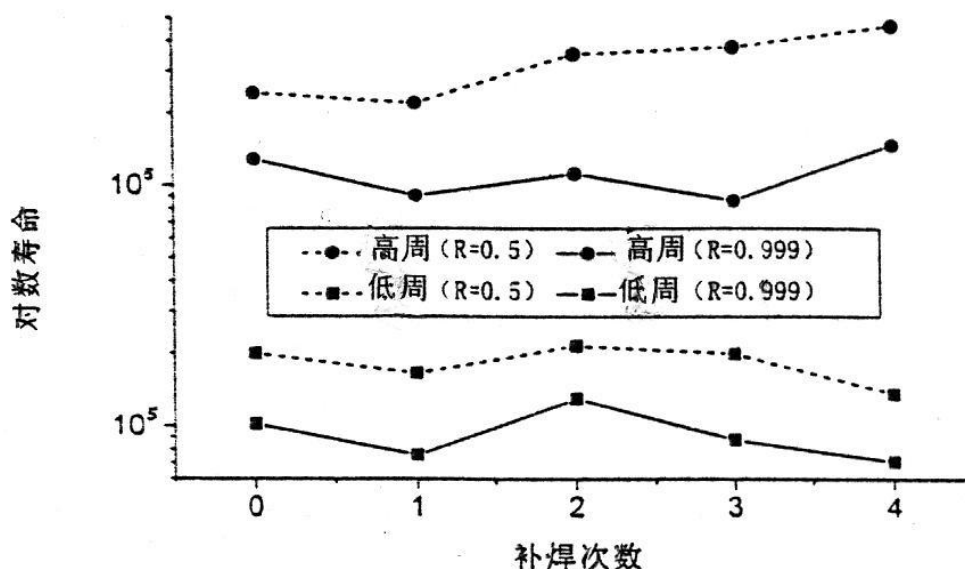
不同存活率下初焊试件与多次焊补试件的疲劳寿命如附表 4.4-6 所示。

附表 4.4-6 存活率  $R=0.500$  及  $R=0.999$  时的疲劳寿命

	$R=0.500$		$R=0.999$	
	低周( $\times 10^5$ )	高周( $\times 10^6$ )	低周( $\times 10^5$ )	高周( $\times 10^6$ )
初焊	2.00	2.43	1.02	1.29
一次补焊	1.65	2.20	0.76	0.90
二次补焊	2.15	3.52	1.30	1.12
三次补焊	1.99	3.78	0.88	0.86
四次补焊	1.36	4.70	0.71	1.49

从附表 4.4-6 可以看出, 存活率  $R=0.500$  条件下的低周疲劳寿命情况是: 一次焊补后下降 17%; 二次焊补后提高 7.5%; 三次焊补与初焊相当。而高疲劳寿命情况是: 一次焊补后下降 9.4%; 二次焊补提高 45%; 三次焊补提高 55%; 四次焊补提高 93%。可见, 威布尔分布下的各次焊补试样的中值疲劳寿命间的比较与对数正态分布下的趋势基本一致。

在高存活率 ( $R=0.999$ ) 的疲劳寿命比较中, 与对数正态分布的情况相似, 各次焊补的疲劳寿命已经没有一致性的规律, 而且各次焊补寿命间的差距也较中值寿命相比较的差距有所增大, 最大可达到 50%。



附图 4.4-7 各次焊补试样疲劳寿命的比较

总体而言, 可以得出与对数正态分布相同的结论, 如附图 4.4-7 所示。

(b) 热点应力下的初始试样与多次焊补试样疲劳寿命比较

在上述疲劳寿命比较中, 已经清楚地看到: 在存活率  $R=0.500$  时的高周疲劳寿命都随着焊补次数的增加而增加, 主要原因是在焊补过程中使焊趾角变小, 从而降低了应力集中系数。为了搞清由于焊趾角变化引起的应力集中系数的变化, 采用三维有限元对试件作了数值分析计算, 得到了焊趾处应力集中系数随焊趾角变化的规律。

考虑了由于焊趾角变化而引起的应力集中系数的变化后的应力幅由下式计算:

$$\Delta\sigma_n = SCF_n \Delta\sigma_m \dots\dots\dots (4-4-1)$$

式中:

$\Delta\sigma_n$ ——各次焊补试件的应力幅 (热点应力幅);

$SCF_n$ ——各次焊补试件的应力集中系数;

$\Delta\sigma_m$ ——实验中采用的名义应力幅。

焊趾过渡角的变化和应力集中系数的取值见附表 4.4-7。

附表 4.4-7 焊趾过渡角对应力集中系数的影响

试件 \ 参数	焊趾角 (度)	应力集中系数
初焊	45.00	1.81
一次补焊	33.69	1.73
二次补焊	26.57	1.69
三次补焊	21.80	1.63
四次补焊	20.56	1.61

根据式 (4-4-1), 重新算得的各次焊补试件所采用的应力幅值如附表 4.4-8 所示。

附表 4.4-8 考虑了应力集中影响的应力幅值

	焊趾过渡角 (°)	应力集中系数	低周应力幅 (MPa)	高周应力幅 (MPa)
初焊	45.0	1.81	291.92	133.80
一补	33.69	1.73	279.01	127.88
二补	26.57	1.69	272.56	124.92
三补	21.80	1.63	262.89	120.49
四补	20.56	1.61	259.66	119.01

注: 在焊趾处倒角半径为 5mm。

对数正态分布下, 考虑了应力集中系数后的 R-S-N 曲线参数如附表 4.4-9 和附图 4.4-8。

附表 4.4-9 热点应力下的 R-S-N 曲线参数 (R=0.500)

	K	C
初焊	-3.2101	13.2081
一次补焊	-3.3064	13.2983
二次补焊	-3.5538	13.9875
三次补焊	-3.7589	14.3879
四次补焊	-4.5200	16.0434

为了更清楚地比较考虑了应力集中系数后各次焊补试件疲劳寿命的变化, 用公式 (4-4-1), 按附表 4.4-8 所列参数, 比较应力幅 $\Delta\sigma = 291.92\text{MPa}$  以及应力幅 $\Delta\sigma = 133.8\text{Kpa}$  时的初焊试件和各次焊补试件的疲劳寿命。

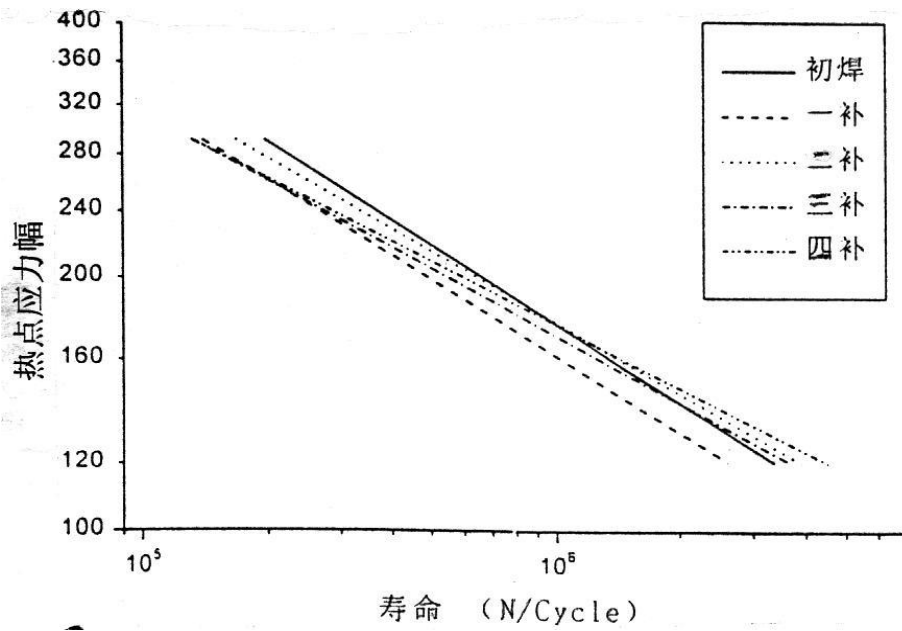


图 4.4-8 对数正态分布下热点应力的 R-S-N 曲线

附表 4.4-10 R=0.500 时热点应力下的疲劳寿命

试样	$\sigma=291.92$ (MPa) ( $\times 10^5$ )	$\Delta\sigma=133.8$ (Kpa) ( $\times 10^6$ )
初焊	1.97	3.37
一次补焊	1.40	2.62
二次补焊	1.68	3.91
三次补焊	1.32	3.68
四次补焊	1.32	4.58

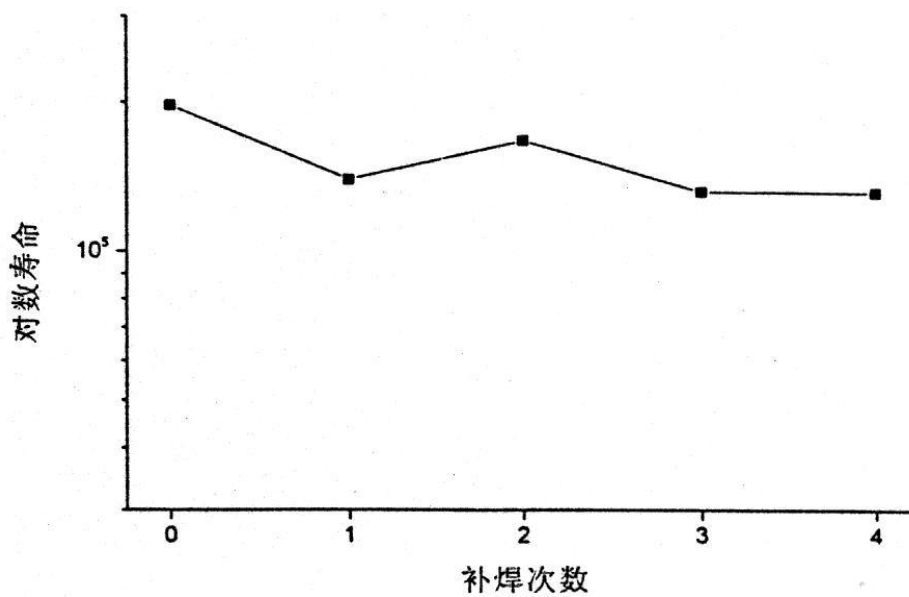


图 4.4-9 考虑热点应力后各次焊补试件寿命比较

从附表 4.4-10 中可以看到,就中值寿命 ( $R=0.500$ ) 而言,一次焊补较初焊下降约 29%;二次焊补较初焊下降约 15%;三次焊补较初焊下降约 33%;四次焊补与三次焊补相当。总观之,除了一次焊补因某种原因寿命下降较多外,其它各次焊补试件的疲劳寿命随焊补次数增加而逐次减少。每焊补一次下降幅度约在 15~20%之间。

从附图 4.4-9 中,也可看到:除一次焊补外,其余各次焊补试件寿命有逐渐小幅下降的趋势。

### ③ 小结

(a) 随着焊补次数的增加,疲劳寿命的分散性也逐渐增大,高周疲劳寿命的分散性高于低周疲劳寿命的分散性。如果不考虑由于焊补造成的焊趾变化引起的应力集中系数的变化,则各次焊补后的疲劳寿命没有过大的改变,基本上处于一定的分散带中。由于高周中值寿命对应力改变的敏感性,其寿命略有增加的趋势。而存活率较高的统计结果一致性较差,无明显规律可寻。

(b) 焊趾应力集中系数的改变对多次焊补后疲劳寿命的影响表现为随焊补次数的增加,疲劳寿命有不断下降的趋势,每次焊补后寿命的降幅约为 15~20%。

导致此结果的原因,一方面是经历了一次次的疲劳实验后,焊补试件有一定损伤,虽然损伤量不足以使材质发生大的变化。而在每次焊补前,尽管挖掉了实验中产生的裂纹,甚至还挖掉了相当部分的热影响区,但每次焊补依然会在试件焊趾处造成拉伸残余应力,这通常会给试件的疲劳寿命产生不利影响。另一方面,使用前述焊补工艺,由于逐次开出越来越大的坡口,使得每次焊补后的焊趾角和应力集中系数逐次相应减小,从而减小了试样在下次疲劳实验中所承受的应力,这一点有利于提高试件的疲劳寿命。在正反两方面因素的作用下,经过三次焊补的试件疲劳寿命并没有较大幅度的变化,这一点也可以在概率分析中得到证实。但是应该注意的是焊趾角和应力集中系数随焊补次数的增加而减小的幅度是有限度的,随着焊趾长度的不断增加,会变得越来越不明显,而试件的累积疲劳损伤以及重复焊补造成的其它不利因素是累积的。可以预料,不断增加焊补次数会使疲劳寿命在某次焊补后急剧下降,可能表现为母材的断裂。

(c) 实验证明:三次焊补和四次焊补是可行的。至少在所采用钢种、所使用焊接修补工艺和实验条件下,为突破海上钢结构裂纹两次焊补禁区提供了实验依据。

(d) 实验也反映出:一次、四次焊补试件的低周中值寿命 ( $R=0.500$ ) 和一次焊补试件的高周中值寿命 ( $R=0.500$ ) 都有一定下降。在热点应力下的中值寿命 ( $R=0.500$ ) 有随焊补次数增加逐次小幅下降的趋势。这些问题显示:实验研究中所采用的多次焊补工艺尚有进一步改进、完善的必要。

### (2) 多次焊补试件与多次焊补熔修试件疲劳寿命的比较

#### ① 对数正态分布下多次焊补试件与多次焊补熔修试件疲劳寿命的比较

对疲劳实验数据按正态分布进行统计处理,得到的焊补试件与焊补熔修试件的疲劳寿命对比结果如附表 4.4-11 所示。

要说明的是:焊补熔修试件在高周疲劳实验中的应力级较焊补试件的应力级高出 20%,此表中列出的是经过调整,在相同应力级下的寿命值,以便于比较。

从附表 4.4-11 中可看出,在  $R=50\%$  的条件下,就低周疲劳寿命而言:

(a) 一次焊补熔修试样比一次焊补试件提高约 142%;

(b) 二次焊补熔修试件比二次焊补试件提高约 43%;

(c) 三次焊补熔修试件比三次焊补试件提高约 52%。

附表 4.4-11 两种试样在 R=50% 及 R=99.9% 时的疲劳寿命

试件状态 \ 分布参数	对数平均值 $\mu$		对数标准差 $\sigma$	
	低周( $\times 10^5$ )	高周( $\times 10^6$ )	低周( $\times 10^5$ )	高周( $\times 10^6$ )
一次焊补熔修	3.94	2.58	1.81	0.99
一次焊补	1.63	1.11	0.84	0.58
二次焊补熔修	3.51	1.43	1.44	0.40
二次焊补	2.15	1.67	1.18	0.73
三次焊补熔修	2.97	1.55	0.92	0.43
三次焊补	1.96	1.73	0.91	0.57

就高周疲劳寿命而言：

- (a) 一次焊补熔修试件比一次焊补试件提高约 132%；
- (b) 二次焊补熔修试件比二次焊补试件下降约 14%；
- (c) 三次焊补熔修试件比三次焊补试件下降约 10%。

中值寿命 (R=50%) 的比较表明, TIG 熔修对一次焊补试件疲劳寿命的提高是明显的, 提高幅度均超过 100%, 再一次证实了 TIG 熔修的一系列效能、作用, 再一次证实焊趾经 TIG 熔修后, 再不是焊接接头的薄弱部位, 疲劳裂纹大都产生在母材或焊补焊缝上。

由于选用的焊条决定焊补焊缝金属强度较低以及焊补熔修焊缝形状扁平 (随焊补熔修次数增多, 越趋扁平), 疲劳裂纹大都出现在焊补焊缝上, 从而造成二次熔修和三次焊补熔修试件疲劳寿命取决于焊补焊缝, 与焊补接头疲劳寿命相当。

高存活率的统计结果进一步支持了对中值寿命的上述分析。

#### ② 威布尔分布下焊补试件与多次焊补熔修试件疲劳寿命的比较

(a) 不同存活率下焊补试件与多次焊补熔修试件疲劳寿命的比较如附表 4.4-12 所示。为在相同应力级下进行疲劳寿命比较, 表中多次焊补熔修试件的疲劳寿命是经过调解的, 对应力应力幅为高周低应力级应力幅 73.92MPa。

归纳多次焊补与多次焊补熔修试件在威布尔分布下疲劳寿命的比较结果, 可得出与对数正态分布下相一致的结论。

综合以上两种分布下的比较结果可以看出：

试件经一次焊补熔修后, 其疲劳寿命较一次焊补试件提高一倍以上。

试件经二次焊补熔修后和三次焊补熔修后, 其疲劳寿命与二次焊补和三次焊补试件相差不多, 并未得到提高。其原因可能是：

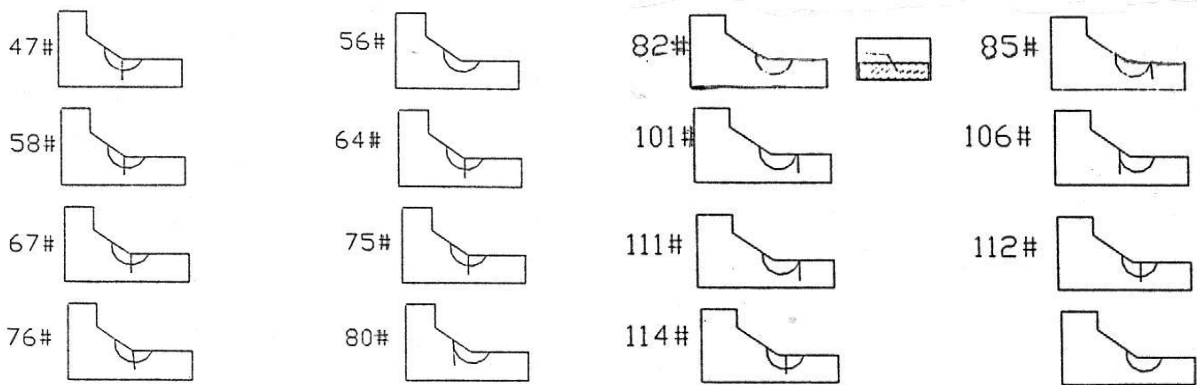
- 试件的焊趾经过 TIG 熔修后, 焊趾金属在惰性气体 (氩气) 保护下, 熔化、结晶, 减少或避免了手工焊时产生的夹杂、夹渣、微裂纹等缺陷, 使熔修过的焊缝表面光洁平滑, 消除了焊趾应力集中, 焊趾处得到加强, 从而使一次焊补熔修试件的疲劳寿命比一次焊补试件的疲劳寿命得到显著提高。

• 母材受多次疲劳累积损伤的影响

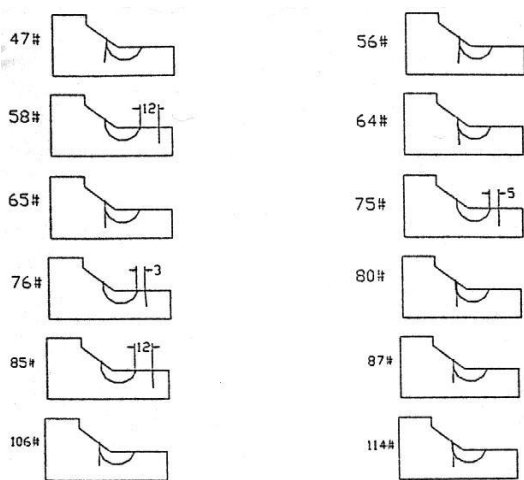
在多次弯曲疲劳实验中，试件的焊缝和母材都会产生疲劳损伤。由于焊补熔修试件是在较高应力下进行弯曲疲劳的，且寿命较长，试件焊缝和母材的疲劳损伤程度和损伤范围相对于焊补试件要重、要大。经过再次焊补和熔修后，对焊缝而言，焊补焊缝和熔修焊缝都是新的、不存在累积疲劳损伤，对母材而言，焊补前开坡口去除了一部分受疲劳损伤的母材，但新焊趾处的母材仍承受着前次疲劳损伤，随着疲劳次数增加，疲劳损伤便会累积起来，到一定程度就在母材某个部位产生疲劳裂纹。对疲劳试件裂纹开裂部位的统计分析结果为疲劳累积损伤影响提供了支持（见附表 4.4-12、附图 4.4-10）。

附表 4.4-12 低周（高应力级）疲劳试件的母材开裂情况

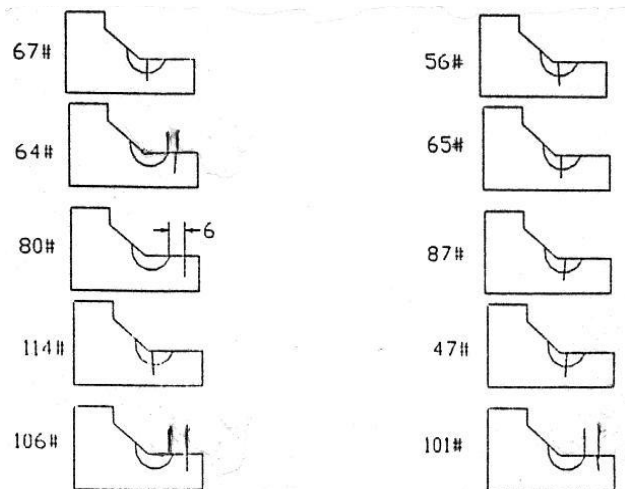
开裂情况 试件状态	试件数	开裂试件数	断于母材数	所占百分数
一次焊补熔修	17	13	0	0%
二次焊补熔修	14	14	4	28.6%
三次焊补熔修	10	10	3	30%



附图 4.4-10a 一次焊补熔修低周疲劳试件裂纹位置示意图



附图 4.4-10b 二次焊补熔修低周疲劳试件裂纹位置示意图



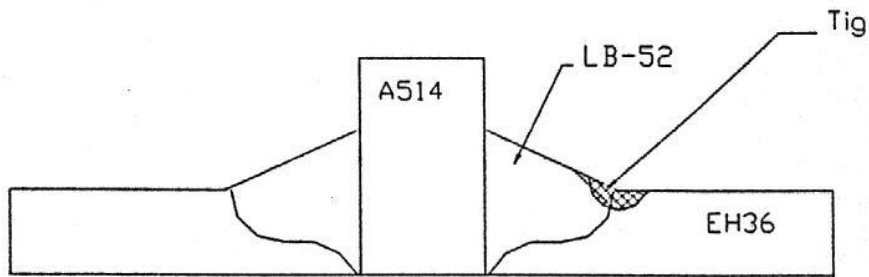
附图 4.4-10c 三次焊补熔修低周疲劳试件裂纹位置示意图

• 焊缝金属材质的影响

实验用的是 T 型焊接头试样（见附图 4.4-11），两边为 EH36，中间为 A514，填充金属由 LB-52 焊条提供，焊补后，整个接头中焊缝金属强度最低，属于低匹配焊缝。经 TIG 熔修后，形成熔修焊缝，它一边靠近母材，另一边与焊补焊缝相邻，如附图 4.4-11 所示。组成接头的部分金属性能见附表 4.4-13。

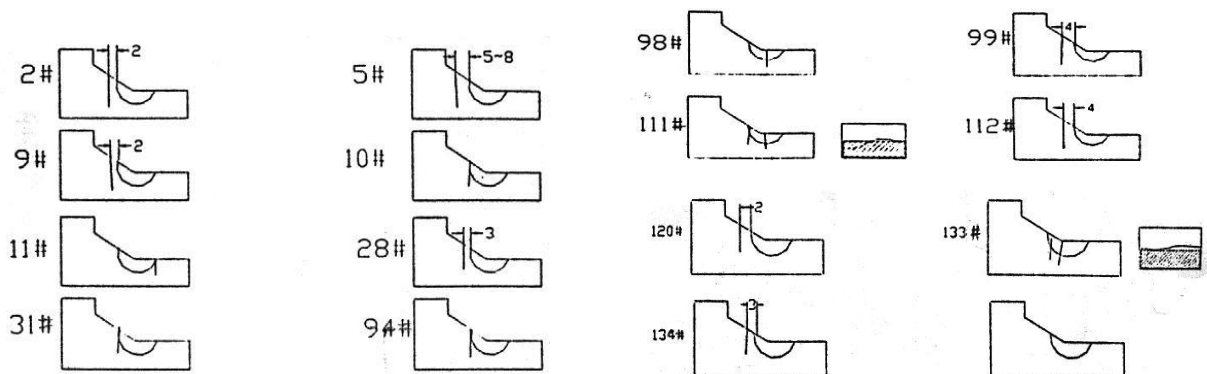
附表 4.4-13 接头各部分金属性能

金属 \ 性能	屈服极限 $\sigma_s(\text{N/mm}^2)$	强度极限 $\sigma_b(\text{N/mm}^2)$	相对延伸率 $\delta(\%)$
EH36	362.7	550.7	24.9
A514		867.5	18.3
LB-52	404.4	491.9	31.0

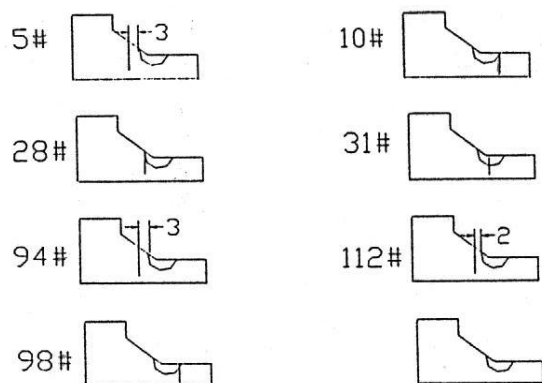


附图 4.4-11 焊缝金属匹配示意图

经过 TIG 熔修后，焊趾处的静强度、疲劳强度都提高了，一般情况下，薄弱面转移到熔修焊缝与母材交界的缺陷处。但由于本实验试件焊补焊缝强度偏低，相对应的疲劳强度也较低，在外力作用下，变形将会集中在焊缝上，并最终在焊缝的薄弱处产生疲劳裂纹，在焊道间的交叠处更容易产生裂纹，二次焊补熔修试件和三次焊补熔修试件的较多疲劳裂纹都产生在熔修焊缝与焊补焊缝交界处（见附图 4.4-12、附表 4.4-14）。



附图 4.4-12a 二次焊补熔修高周疲劳试件裂纹位置示意图



附图 4.4-12b 三次焊补熔修高周疲劳试件裂纹位置示意图

另一方面，在焊缝金属强度略低于母材金属强度的低匹配焊接接头中，若焊缝已产生裂纹或类裂纹缺陷，其止裂性能要比高匹配的焊缝低。据资料表明，动载下不同焊缝强度匹配对构件抗裂性能与静载下的影响是一样的，即适当提高焊缝金属的强度匹配可以增大焊缝中的极限裂纹尺寸，改善构件的抗裂性能，提高焊缝的止裂性能。当然焊缝金属的强度匹配也不是越高越好，当焊缝金属强度提高到一定程度，对上述抗裂性能与止裂性能的影响减小。

附表 4.4-14 多次焊补熔修试件高周疲劳开裂情况

试件	裂纹位置	试件数	断裂 试件数	断在熔修焊缝与焊 补焊缝之间		断在熔修焊缝与母 材之间	
				试件数	占百分数	试件数	占百分数
二次焊补熔修试件		17	15	12	80%	1	6%
三次焊补熔修试件		12	7	4	57%	2	28.6%

综上所述，二次焊补熔修和三次焊补熔修试件的疲劳寿命未提高，一方面是由于多次焊补熔修所经历的疲劳过程更严重；另一方面是因为多次焊补造成的焊缝太宽、焊道较多、焊补焊缝强度匹配不合适、强度偏低，而 TIG 熔修只解决了焊趾处的缺陷问题，强化了焊趾部位，只提高了焊趾处的疲劳寿命，熔修的强化效果未能惠及焊缝的其它部位，使得试件的疲劳寿命、疲劳强度大致取决于焊补焊缝，即与二次焊补、三次焊补试件的疲劳寿命相当。

### ③ 小结

(a) 焊趾经过 TIG 熔修后，消除或明显减少了焊趾表层的微夹杂、微裂纹等微缺陷，使焊趾金属材质致密，强度和韧性得到提高，表面光滑并使焊趾处过渡圆滑，焊趾半径增大，减小了焊趾处的应力集中，整个接头的疲劳寿命得到显著提高，一次焊补熔修试件的疲劳寿命较一次焊补试件提高一倍以上；

(b) 经过 TIG 熔修后，焊趾已不再是焊接接头中的薄弱环节。由于焊缝经过多次焊补，外延较多，焊脚变得宽大，而焊缝强度又低，在焊补焊缝多道焊交叠的沟槽处更容易产生疲劳裂纹，此时试件的疲劳寿命大致取决于焊补焊缝的寿命，与焊补接头的疲劳寿命相当。

## 附录5 海上自升式钻井平台桩腿裂纹立焊位修复技术

### 5.1 概述

#### 5.1.1 研发桩腿裂纹的立焊位修复技术是自升式钻井平台桩腿裂纹修复的急需

自升式钻井平台桩腿裂纹有很大一部分产生在结构的立焊焊缝上,立焊焊缝裂纹的焊补修复和 TIG 熔修在平台裂纹修复中占有相当大的比例。因此,针对平台桩腿开裂的主要接头型式和所用主要钢种(ASTM A514+ASTM EH36 异种钢 T 型焊接接头)研发出一套立焊位修复技术,关系到能否进行桩腿立焊缝裂纹的立焊位修复和修复质量是否良好、令人满意的大事。

#### 5.1.2 桩腿立焊缝裂纹的焊补和 TIG 熔修操作困难、质量保证有难度

本指南在第四、五章中介绍的桩腿裂纹焊补和焊补后的 TIG 熔修是针对平焊位的,国内外对此也有资料报道,而有关立焊缝的 TIG 熔修还未见过报道。

立焊位在空间位置上的特殊性给立焊焊补,尤其是给熔修后成型要求很高的 TIG 熔修增加了难度:在熔融金属受重力作用往下流淌的条件下,使焊缝良好成型、熔宽均匀、表面平滑光滑,确实较平焊位难控制、难保证。在立焊位上能否进行 TIG 熔修,如何控制熔修焊缝的成型和质量、如何提高熔修焊缝的疲劳寿命事关提高平台桩腿裂纹修复后的使用寿命、对保证平台安全减少桩腿裂纹修复次数、降耗增收,具有重要的工程实用价值和经济价值,也是一个迫切需要解决的实际问题。

#### 5.1.3 解决问题的技术路线

是以平焊位的裂纹焊补熔修工艺为基础,针对立焊特点,制定出适用于立焊位的 TIG 熔修规范和工艺,并通过疲劳实验验证该熔修规范、工艺条件下的 TIG 熔修对提高试件疲劳寿命的效果,并将其用于指导平台桩腿的修复。

鉴于已经进行了大量平焊位试件的焊补熔修实验,并做了考虑存活率的统计处理,在进行立焊位实验时,就不再做大量同应力级下的疲劳实验,而只做少量不同应力级下的疲劳实验,绘制相应的 S-N 曲线。

试件与平焊试件相同,加载仍采用四点弯曲形式。

实验中先做立焊位初焊试件的疲劳实验,产生疲劳裂纹后,做立焊位焊补和焊补后熔修,最后分别对焊补试件和焊补熔修试件进行疲劳实验,以便进行比较。根据平焊实验结果和实际要求,立焊位焊补和焊补熔修试件的疲劳实验各分为五个应力级,每个应力级做一个数据点,应力比均采用 0.3。实验中采用的应力级见附表 5.1-1、附表 5.1-2。

附表 5.1-1 立焊位焊补试件疲劳实验应力级

应力级	最大应力(MPa)	最小应力(MPa)	平均应力(MPa)	应力幅(MPa)
1	208.8	64.0	136.4	72.4
2	256.0	78.0	167.0	89.0
3	312.0	94.0	203.0	109.0
4	376.3	112.9	244.6	131.7
5	457.0	137.0	297.0	160.0

附表 5.1-2 立焊位焊补熔修试件疲劳实验应力级

应力级	最大应力(MPa)	最小应力(MPa)	平均应力(MPa)	应力幅(MPa)
1	343.0	102.8	222.9	120.1
2	371.5	112.3	241.9	129.6
3	397.4	119.2	258.3	139.1
4	426.0	128.0	277.0	149.0
5	457.0	137.0	297.0	160.0

## 5.2 桩腿裂纹的立焊焊补工艺

立焊焊补工艺程序和工艺方法要点。

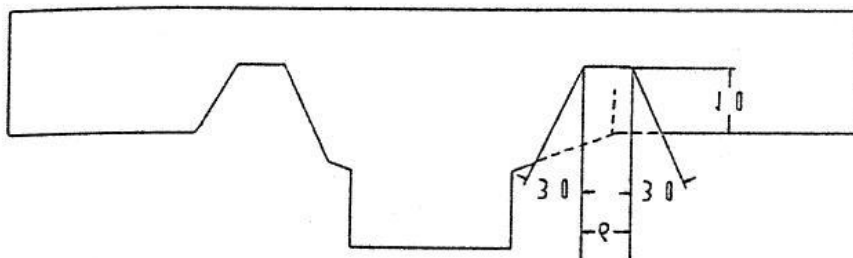
(1) 确定裂纹的数量、位置、长度和深度；

(2) 清除裂纹

具体方法、要点、要求与本指南第五章 5.2 中之(2) 相同；

(3) 开制焊接坡口

开制出合适的焊接坡口，才能保证焊接质量，这里采用的坡口型式如附图 5.2-1 所示，立焊坡口角度较平焊焊补坡口角度大，是为了便于立焊操作，保证焊缝与侧壁良好熔合，不出现缺陷。



附图 5.2-1 试件立焊焊补坡口示意图

(4) 预热

预热按附表 5.2-1 进行。预热范围不宜小于焊补范围扩大 4cm，如无专用预热工具可用手工方法。

附表 5.2-1 焊接规范

	填充金属	牌号	直径 (mm)	电流(A)	电压(V)	极性
焊接规范	LB-52	E7016	φ3.2	110~120	21~24	DC <sup>+</sup>
	LB-52	E7016	φ4.0	150~170	21~24	DC <sup>+</sup>
预热温度/ 层间温度	150℃/200℃					

(5) 焊条培烘

按烘干制度（加热到 350℃，保温 1h）进行。

(6) 焊接修补

- ① 焊工应具有符合相关规定的有效焊工级别证书（一般为 6G 焊工资格证书）；
- ② 为保证焊接质量，焊工资质尚须报本社审核认可；
- ③ 焊接规范按附表 5.2-1 执行。

(7) 检验

焊补完成 72h 后进行外观检查，合格后进行 100% 无损检验，并须符合相关合格标准。

### 5.3 立焊焊补焊缝的 TIG 熔修

有些资料认为 TIG 只适用于平焊位置，不适合于立焊、仰焊位置。确实，立焊位置的特殊性给熔修增加了许多困难，平添了一些新问题，但我们的实验研究表明：只要采用的熔修规范适当、熔修工艺正确适用，就能够解决立焊熔修的困难和问题，并获得良好的立焊熔修效果。

#### 5.3.1 通过常规筛选确定合适的熔修工艺

基于我们实验摸索的经验，选取了三种熔修规范（见附表 5.3-1），再逐一对其进行常规筛选。

附表 5.3-1 立焊熔修规范

规范	规范 1	规范 2	规范 3
线能量			
规范的线能量(KJ/mm)	2.0	1.5	1.2

附表 5.3-2 对立焊熔修规范的常规筛选内容与结果

规范	规范 1	规范 2	规范 3
金相组织			
立焊熔修线能量 (KJ/mm)	2.0	1.5	1.2
焊缝组织	柱状和针状铁素体+粒状贝氏体+少量珠光体	柱状和针状铁素体+粒状贝氏体	粒状和针状铁素体+贝氏体（粒贝）
过热区组织	铁素体(针状,沿奥氏体晶界析出)+贝氏体(上贝和粒贝)(晶粒粗大)+少量索氏体	贝氏体+马氏体+少量铁素体+少量索氏体(晶粒较粗大)	马氏体+贝氏体+少量索氏体(晶粒较细)
过热区最硬处硬度值 HV0.2	324、336、337	376、370、374	382、386、378

按表中所列的三种规范对焊补试件进行立焊熔修，尔后逐一对接头作金相分析，结果表明：按较小的规范（规范 3）熔修，在热影响区易产生马氏体组织，该组织硬度较高，达到 HV386，超出平台建造规范对硬度的要求（<350HV）；随着熔修线能量的增加，热影响区组织的硬度逐渐下降，用规范 1 熔修后试样的热影响区未出现马氏体组织，其硬度值（平均值）只有 HV336。熔修规范的线能量再大，组织变得粗大，材料综合力学性能下降（见附表 5.3-2）。

经过上述筛选，我们选用规范 1 做为试件的熔修规范。

### 5.3.2 熔修工艺要点

为取得良好的立焊熔修效果，熔修规范和熔修工艺这两者是相辅相成、缺一不可的。根据我们的体会，在采用合理熔修规范的基础上，尚须遵循如下立焊熔修工艺要点：

#### (1) 采用立向下熔修

手工焊立向焊缝一般采用立向上焊，立向熔修采用立向下熔修，这样可防止熔修时焊缝铁水向下流，使熔修焊缝成型良好，咬边大为减少，过渡平滑。

(2) 起弧时控制电流缓升，收弧时控制电流缓降，可避免焊缝成型不良、咬边等缺陷，使熔修焊缝过渡圆滑、性能良好。

### 5.3.3 立焊焊补焊缝的 TIG 熔修工艺过程

#### (1) 打磨清理焊趾

在焊趾及其两侧各 20mm 范围内不得有铁锈、油污、焊药皮、渣杂物等异物，应打磨出金属亮泽。

(2) 将试件预热至 150℃。

(3) 按选定的熔修规范进行熔修，熔修过程中认真按熔修工艺要点操作。

(4) 熔修完毕 72h 后进行外观检查。

(5) 外观检查合格后进行 X 射线探伤检查。

(6) 100%X 射线检查合格后做疲劳实验。

## 5.4 立焊焊补试件与立焊焊补熔修试件疲劳寿命的比较

### 5.4.1 立焊焊补试件的疲劳实验结果

立焊焊补试件共 7 根，其中 2 根为备用试件。按附表 5.1-1 规定的应力级，共做了 5 根试件的疲劳实验，实验结果见附表 5.4-1。

附表 5.4-1 立焊焊补试件疲劳实验结果

应力级	试件号	最大应力 (MPa)	最小应力 (MPa)	平均应力 (MPa)	应力幅 (MPa)	寿命 ( $\times 10^5$ )
1	2005	208.8	64.0	136.4	72.4	21.0
2	2003	256.0	78.0	167.0	89.0	10.5
3	2002	312.0	94.0	203.0	109.0	3.75
4	2001	376.3	112.9	244.6	131.7	2.14
5	2004	457.0	137.0	297.0	160.0	0.97

#### 5.4.2 立焊焊补熔修试件的疲劳实验结果

立焊焊补熔修试件共 7 根，按附表 5.1-2 规定的应力级，共进行了 7 根试件的疲劳实验，实验结果见附表 5.4-2。

附表 5.4-2 立焊焊补熔修试件疲劳实验结果

应力级	试件号	最大应力 (MPa)	最小应力 (MPa)	平均应力 (MPa)	应力幅 (MPa)	寿命 ( $\times 10^5$ )
1	2013	343.0	102.8	222.9	120.1	>20.2
1	2012	343.0	102.8	222.9	120.1	>25.0
2	2015	371.5	112.3	241.9	129.6	8.79
3	2014	397.4	119.2	258.3	139.1	>10.2
3	2011	397.4	119.2	258.3	139.1	>13.5
4	2010	426.0	128.0	277.0	149.0	>9.38
5	2009	457.0	137.0	297.0	160.0	2.93

#### 5.4.3 小结

立焊缝的 TIG 熔修是可行的，立焊缝一次焊补熔修可大幅提高疲劳寿命，保守的估计，寿命提高幅度为 100%。

立焊熔修在海上平台结构的焊补修复中，工艺适用性强、易操作、效率高、效果良好。