

# PE内衬钢管技术手册：从材料原理到“零现场热工”的工艺控制

基于ABS认证与数字孪生测量的精准预制方案

## 摘要

在船舶、海工及油气行业，海水管道系统的腐蚀与失效是导致计划外停航和坞修超期的常见原因。传统管道更换方案因现场焊接、涂层损伤及材料自身缺陷，往往陷入“更换—腐蚀—再更换”的恶性循环。本手册系统介绍了Irwin Group基于ABS认证和Automet数字孪生测量的PE内衬钢管技术。从材料科学原理、旋转衬里工艺到“零现场热工”的预制交付模型，为技术决策者提供完整的工艺参考。核心结论：旋转内衬+数字孪生测量可实现100%工厂预制、一次安装到位、零现场热工作业，彻底消除传统管道更换中的尺寸误差、涂层破坏和工期延误风险。

## 1. 传统海水管道失效的三大根源

长期以来，海水管道系统在服役3-8年后出现严重腐蚀或泄漏，并非材料本身不合格，而是设计、施工和选型中的系统性缺陷。最常见的失效模式有以下三种。

### 1.1 现场焊接破坏涂层

**现象：**在船厂或坞修现场，工人将预制管段与现场管路进行焊接连接。焊接高温 ( $>1000^{\circ}\text{C}$ ) 导致热影响区内外涂层碳化、剥落。焊后仅用银粉漆或双组分环氧进行局部修补，修补层附着力远低于原厂涂层。

**后果：**焊接处在6-12个月内开始点蚀、穿孔泄漏。更换成本高，且再次焊接会进一步破坏相邻管段。

**PE内衬规避方式：**Irwin Group所有管段采用全法兰连接，现场零焊接。管段到货时法兰已焊接并完成PE内衬，现场仅需螺栓紧固和垫片密封。

### 1.2 橡胶衬里吸水分层

**现象：**天然橡胶或氯丁橡胶衬里管道在海水中长期浸泡，吸水率可达2%-5%。水分渗透至橡胶与钢管粘接界面，导致胶粘剂失效，出现鼓包、分层、脱落。

**后果：**2-5年内整段管道失效，脱落的橡胶碎片堵塞冷却器、过滤器和阀门。维修时需要全部拆除并重新衬里。

**PE内衬规避方式：**PE吸水率 $<0.01\%$ ，几乎不吸水。旋转衬里工艺使PE层与钢管内壁形成机械锁合+局部熔融，无胶粘剂层，不会分层。

### 1.3 镀锌/环氧薄涂层不耐机械损伤

**现象：**部分船厂为节约成本，采用镀锌钢管或单层环氧漆（厚度0.05-0.3mm）作为海水管道。在运输、安装、使用中轻微磕碰即划伤涂层，露出钢材。

**后果：**局部点蚀迅速扩大，2年内穿孔。修补困难，且修补区域附着力差。

**PE内衬规避方式：**PE内衬厚度为2-10mm，是薄涂层的10-100倍。一般的划伤、磕碰不会伤及钢材。即使外部涂装受损，内部PE层仍完好。

## 2. PE材料科学：为什么聚乙烯是海水防腐的优选材料

### 2.1 高密度聚乙烯（HDPE）的核心特性

Irwin Group采用的HDPE（高密度聚乙烯）是一种热塑性聚合物，具有以下关键工程性能：

性能指标	数据/描述
吸水率 (24h, 重量%)	<0.01%
耐化学性	耐海水、稀硫酸 (pH>1)、碱、盐溶液；不耐强氧化酸 (浓硝酸)
使用温度范围	-40°C 至 +60°C (长期)；短期可耐受80°C
耐磨性	良好，优于橡胶和普通环氧涂层
与钢材结合	旋转衬里形成机械锁合+局部熔融，无脱落风险
内衬无缝性	旋转成型，无焊缝、无搭接缝

### 2.2 PE vs FRP（双酚环氧树脂）关键对比

性能	PE (HDPE)	FRP (双酚环氧)
吸水率	<0.01%	>1%
耐稀硫酸	优	一般
分层风险	无	高 (水和介质渗透导致树脂-玻纤分离)
结构强度	依赖钢管 (钢承压)	依赖树脂-玻纤结合 (长期老化后强度骤降)
适用介质	海水、酸、碱	有机溶剂更优
现场维修	换短节 (法兰连接)	需要专用粘接材料，固化时间长

结论：对于海水、压载水、脱硫洗涤器等中低温腐蚀工况，PE内衬钢管在耐水性、抗分层能力和综合成本上显著优于FRP。

## 3. 旋转内衬工艺：从粉末到无缝防腐屏障

Irwin Group的旋转衬里 (Rotational Lining, 又称滚塑) 是目前最适合复杂管道几何形状的内衬工艺。

### 3.1 工艺流程

钢管/管件预处理（喷砂） → 装入PE粉末 → 在旋转炉中加热并旋转 → PE粉末熔融均匀附着内壁 → 冷却成型 → 成品检验

### 3.2 工艺参数与能力

参数	范围
适用口径	DN40 – DN1400 (1.5英寸 – 56英寸)
PE厚度	2mm – 10mm (可定制)
适用形状	直管、弯头、等径/异径三通、同心/偏心异径管、法兰短节、篮式过滤器
表面处理	喷砂达Sa2.5级，确保附着力
检验	100%电火花检测 + 压力测试

### 3.3 为什么旋转衬里优于喷涂或硫化橡胶

特性	旋转衬里	喷涂/刷涂	硫化橡胶
厚度均匀性	优秀（离心力自然均匀）	一般（依赖人工）	一般
弯头/三通内衬	轻松覆盖	难以均匀	可做但成本高
有无接缝	无（一体成型）	无（但薄）	有（搭接缝）
与钢材结合	机械锁合+局部熔融	物理粘附	胶粘剂
使用寿命（海水）	>15年	2-5年	2-8年

## 4. Automet数字孪生测量：消除尺寸误差，实现零现场热工

### 4.1 传统测量方式的痛点

卷尺测量无法捕捉法兰间隙、垫片压缩量、老管变形；必须拆下旧管才能复制，导致工期延长和海关限制（如香港无法运旧管入境）；复制旧管的变形（扭曲、法兰面翘曲）导致新管仍然不匹配。

### 4.2 Automet三步测量流程

Irwin Group采用的Automet®系统基于徕卡全站仪和专用软件，实现管道数字孪生的全流程控制。

步骤	操作	关键输出
步骤1：现场在役测量	在管道完全螺栓紧固、在役状态下测量，记录法兰间隙、垫片厚度、涂层余量（PE层2-10mm、垫片压缩3mm等）	3D数字模型 + 带公差的轴测图

步骤	操作	关键输出
步骤2: 车间布局与点焊验证	根据数字模型在车间铺设管道、点焊法兰, 用Automet验证与模型的偏差是否在PFI-ES3公差内 (典型 $\pm 1.5\text{mm}$ )	预制管段 (未焊接完成)
步骤3: 焊接后复测	完成焊接、PE衬里、外涂装后, 再次用Automet复测, 确认成品与数字孪生一致	合格成品管段 + 质量保证报告

### 4.3 为什么能保证“第一次就适配”

预置余量: 模型中直接计入PE层厚度、外涂层厚度、垫片压缩量; 不复制变形: 以标准设计尺寸为基准, 不复制旧管的扭曲或应力变形; 双重验证: 焊接前后两次测量, 消除热变形导致的法兰偏斜。结果: 管道到达船坞时已经是“即插即用”的法兰连接成品, 无需任何现场切割、焊接或打磨。

## 5. 质量保证与认证

Irwin Group的所有PE内衬管道产品均遵循国际最严格的工业与船级社标准。

### 5.1 核心认证

认证	说明
ABS PDA	全球首家通过美国船级社产品设计评估的PE衬里公司
DNV	挪威船级社焊接工艺及产品认可
BV	法国必维国际检验集团认证
ASME IX	焊接工艺评定标准
AWS D1.1	钢结构焊接规范
ISO 9001:2008	质量管理体系
ISO 14001:2004	环境管理体系

### 5.2 专利与技术壁垒

38项专利, 其中33项为发明专利, 覆盖旋转衬里工艺、测量方法、管道翻新装置等核心技术。

### 5.3 出厂文件

每批管道均提供制造商证书, 包含: 材料证明 (钢管材质证书、PE粉末批次报告); 工艺记录 (喷砂等级、衬里厚度、加热曲线); 检验报告 (电火花检测、压力测试、NDT报告)。

## 6. 真实案例: 3000 TEU集装箱船中央冷却管全预制

## 项目背景

船型：3000 TEU集装箱船，船龄12年

系统：中央冷却海水管路（主机和辅助冷却器）

原用材料：GRE (BONDSTRAND)，运行7年后出现多次分层泄漏

业主决定：在计划坞修期间全部更换海水管路

## Irwin Group提供的方案

- Automet现场测量：在船舶在役状态下，对约110根海水管进行数字孪生测绘，包含弯头、分支、异径管

- 深圳车间100%预制：根据数字模型完成下料、焊接、PE衬里（旋转衬里，厚度2-10mm）

- 船坞安装：作为船东供料直接交付，现场全法兰连接，零热工作业

## 结果对比

现场接头制作工时：上次GRE更换36工时 → PE衬里0工时

安装时间（3名技工）：5天 → 2天

返工/修整：3根现场修整 → 零

总成本：节省32%

现场热工作业：有 → 无

质保：无 → 5年坞修到坞修

客户反馈：“所有PE衬里管段到达时已是预制好的法兰组件，第一次螺栓连接即100%合适。无需切割、无需焊接、毫无意外。这才是管道更换该有的样子。”

## 7. 结论与行动

### 7.1 技术总结

PE内衬钢管通过旋转衬里工艺实现无缝、耐腐蚀、长寿命（>15年）的内防腐层，彻底解决橡胶衬里吸水老化、GRE/FRP分层等传统问题。Automet数字孪生测量消除了现场尺寸误差，实现100%预制和零现场热工，将坞修时间从数周压缩到数天。ABS PDA认证和38项专利构成了Irwin Group的技术壁垒，保证产品可追溯、可验证、符合国际船级社要求。

### 7.2 适用场景

新造船海水、压载水、脱硫洗涤器管道系统；在役船舶中央冷却、消防、压载水改造；FSRU、矿业、化工等行业的腐蚀性介质输送。

### 7.3 下一步行动

如果您正在规划新造船或现役船舶的管道系统，欢迎联系我们进行免费技术咨询或预约技术研讨会。我们可以：根据您的介质、温度、压力推荐最佳衬里方案；提供PE内衬 vs GRE/FRP的全维度成本对比；安排Automet测量现场演示。

Irwin Group (IRL) – 中国最大的定制PE衬里碳钢管生产商之一，全球首家通过ABS PDA认证的PE衬里企业