

长输管道防腐补口施工质量控制要点分析

吴金烁

中石化江苏油建工程有限公司 福建 漳州 363000

摘要：长输管道属于国家能源战略的关键部分，其是否能够安全平稳运行至关重要。管道接口处的防腐补口处在整个管道防腐体系中最为脆弱，补口施工质量的好坏直接影响到管道的使用寿命及其正常运行状况。本文对长输管道防腐补口施工期间质量控制重点予以探究，试图构建起一套完备的质量控制框架。文章首先从预处理、涂敷过程以及检验测试这三个重要环节出发，全面剖析了影响补口质量的诸多要素：钢管表面清理程度、钢管清洁状态、补口材质的选择及与管道的契合情况、补口处的预热程度、涂敷流程中的工艺标准要求、无损伤检查手段等都被纳入考察范畴之内。

在基础上，提出全生命周期管理的理念在补口质量控制中的创新应用，并且强调了从设计、采购材料到施工、最后的后期运营每一个阶段都进行追溯、数据化这一概念；最后提出结合当今智能化、大数据等领域的最新技术对未来的长输管道防腐补漏质量控制提出新的方向，例如采用智能化监测装置、搭建大数据分析预警平台等，希望能够对改善我国长输管道的本质安全水平提供理论指导。

关键词：长输管道；质量控制；施工工艺；全生命周期管理；智能化监测

引言

随着国家能源战略的推进，长输管道成为保障国家能源安全的重要基础设施。但管道接口的现场防腐补口由于施工环境复杂、工艺控制难度高，一直是整个管线防腐体系中的薄弱环节，几乎所有的腐蚀失效事故都是由此引发的。所以对补口施工质量进行系统性控制，保证其防腐性能不低于管体，对于保障管道全生命周期安全至关重要。

传统质量控制大多只局限在施工阶段的监督以及末端检测，偏重于事后修正，缺少前瞻性和系统性。本文按照对补口失效机理的剖析，想要建立起覆盖“事前预防、事中控制、事后评价”的全方位质量控制体系。文章将仔细探究从表面预处理、材料选取、涂敷工艺直至最后检验的关键控制要素。并且要引进全生命周期管理的新观念，突出数据化追溯和风险预判的必要性。希望为提高我国长输管道的本质安全水平和资产经营效益提供理论支撑和实际参照。

1 补口前预处理的质量控制

预处理是防腐补口施工的第一步，其好坏直接决定了防腐层与钢管基体的结合程度，是后续所有工序的基础^[1]。预处理质量控制的关键点是保证钢管表面达到后续涂层施工所需的“清洁”“粗糙”这两个基本条件。预处理过程中出现的任何瑕疵，都可能成为日后涂层剥离、鼓包、翘边等缺陷的“祸根”，最终导致腐蚀^[2]。

1.1 表面清理与除锈等级控制

补口区域的表面清理与除锈是保证防腐层附着力的基础，质量控制的第一步就是确定清理范围（一般延伸到管体原有防腐层两端各50毫米）^[3]，并对原有涂层边缘实施倒角处理，从而达成平滑过渡，避免应力集中与水分积存。主要工序是喷砂或者抛丸除锈，目的是清除氧化皮、锈蚀等全部附着物^[4]，并形成具备良好机械“锚固”效应的活性金属表面。其控制要点在于依照《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》（GB/T8923）标准，除锈等级要达到Sa2.5级，在严酷腐蚀环境下则需达到Sa3.0级。还要严格把控压缩空气品质，采用高效油水分离器以防止二次污染，这是保证最终表面洁净度的必要条件^[5]。

1.2 表面粗糙度与清洁度检测

光靠宏观判断除锈等级是不够的，还要加入微观参数的量化检测。第一，表面粗糙度应控制在40μm至100μm的最佳区间。这个范围既能为涂层提供足够的机械锁固力，又能避免“波峰效应”，防止涂层过薄或固化应力过高。第二，要对眼睛察觉不到的微小污染物进行检测，特别是那些具有很强吸湿性的物质，如氯化物等可溶性盐类，会引起涂层下的电化学腐蚀并造成渗透性鼓泡。依照ISO8502等标准，在涂敷之前，要保证其表面的盐分浓度小于规定的限值，并执行粉尘等级检测。这两项细致的检测是填补宏观评价与内部质量差距，防止涂层过早损坏的重要技术保证。

2 补口材料与涂敷工艺的质量控制

材料的性能和涂覆工艺的准确实施是补口防腐层最

终性能的关键环节。选择了最好的材料，如果没有科学严谨的施工工艺，好的材料性能也无法发挥出来。反之，工艺再好，材料不好，也不能保证长久的防腐效果。因此，材料与工艺的匹配与协同控制是这个阶段的重点。

2.1 防腐材料的选型与管理

长输管道防腐补口材料的选择要遵守“匹配性”和“兼容性”准则，所谓“匹配性”，就是说补口材料的防腐性能、机械性能、耐温等级等，一定要与管道主体防腐层（三层聚乙烯，3LPE）相匹配，从而形成一个性能连贯、没有明显缺点的防腐系统。所谓“兼容性”，就是指补口材料一定要与管道主体防腐层有较好的粘结能力，保证在界面处不会出现分层或剥离现象。现在应用得最多的补口材料主要有热收缩套（带）、粘弹体防腐胶带以及无溶剂环氧涂料等。质量把控的主要任务是建立严格的材料准入制度，所有进场的防腐材料都需要提交完整的出厂合格证、性能检测报告，并按照规范要求进行第三方抽样复检。

复检项目应包含材料的厚度、拉伸强度、断裂伸长率、剥离强度、吸水率等关键性能指标。针对热收缩材料，还应重视其热稳定性和收缩性能。在材料的储存和运输过程中，务必遵循厂家的要求，避免日晒、雨淋、化学品污染以及物理损坏。应建立一套严格的出入库管理台账，确保材料在保质期内使用，并实现可追溯性。对于任何批次、任何环节出现问题的材料，均应进行隔离，禁止使用，从根本上预防因材料问题导致的质量风险。

2.2 施工工艺参数的精准控制

施工工艺参数的精准控制是把理论设计性能转化为实际工程质量的关键，热收缩材料的核心工艺参数包含预热温度，烘烤温度以及收缩过程控制，钢管补口区域的预热温度非常关键，这直接关系到底层环氧涂料的固化情况以及热熔胶的熔融流动性，如果温度太低，环氧固化不彻底，粘结力会很差，温度太高则可能造成环氧涂料被烧焦，性能变差，甚至引发钢材金相组织改变，所以务必用红外测温仪等接触式或者非接触式测温设备，对补口区域实施多点，均匀的温度检测，保证其处在规定的工艺窗口内，像某些环氧底漆就要求预热温度在60°C–80°C。在热收缩带/套的烘烤过程中，火焰移动的速度、距离都要均匀，要按照“先中间、后两边”“先下部、后上部”的原则进行，确保收缩均匀，无气泡、无褶皱。

收缩完成后，要用压辊把表面滚压一下，把里面的气排出来，让热熔胶填满所有的空隙，从边缘溢出来，

形成一个均匀的胶环，这才是收缩质量好的表现。对于液体环氧涂料这样的涂敷型材料，质量控制的关键点是混合比例是否准确，涂敷厚度是否均匀，固化条件是否满足。双组分涂料一定要用专门的设备，按照厂家规定的要求，严格按比例混合，而且还要充分搅拌均匀，否则就会造成涂层固化不完全或者性能不均匀。涂敷厚度（干膜厚度）是防腐性能的直接保证，要使用湿膜测厚仪在施工过程之中实施检测，在固化之后采用干膜测厚仪执行最终检测，保证最小厚度符合设计需求，而且环境因素比如温度，湿度对液体涂料的固化有着极大的影响，务必依照制造商所指定的环境条件展开施工，若有必要，则搭建临时的温棚、除湿等措施，保证涂层能够正常，完全地固化，从而实现最佳的防腐效果。

3 检验测试与全生命周期管理

检验测试是评估补口施工质量是否满足设计及规范要求的最后一步，也是质量控制闭环中不可或缺的一环。将质量控制的视角从施工阶段延伸到管道的全生命周期，是长输管道实现本质安全、提升管理能力的必然趋势与创新方向。

3.1 成品检验

补口防腐层施工完成后完全固化后必须100%的成品检测，首先是外观检查，也就是肉眼观察防腐层表面是否平整光滑、有无气泡、褶皱、碳化、机械损伤等情况，对于热收缩材料而言，还要检查两端是否有均匀的热熔胶溢出。外观检查合格之后，一定要实施厚度检测，用经过校准合格的干膜测厚仪，依照所规定的布点密度，比如每米圆周上至少要测四个点之类的要求，对所有检测点执行测厚，并保证所有的厚度值都要达到规范规定的最小厚度数值。最为关键的便是电火花检查，这是检验防腐层连续性和寻找针孔之类微小缺陷最有效的一种手段。

检测时电压的确定十分关键，务必要按照防腐层的种类、其材料和厚度，依照相关规范，如GB/T23257等标准来准确确定。电压过低可能导致漏检，电压过高则可能击穿合格的防腐层。在检测时，探头要以稳定速度在整个补口表面移动，达到100%覆盖。任何有火花放电的地方都要被标记为缺陷点，然后彻底修复。返修过的区域也要重新进行电火花检漏，直到合格为止。而且还要按照一定比例（比如每100个补口抽1-2个）做破坏性的剥离强度试验，以此来证实防腐层和钢管基体的真实粘结能力。所有的检验数据，包括检漏电压、厚度测量数值、剥离强度数据等等，都必须被仔细记录下来，并且要与对应的补口编号联系起来，从而建立起一个可追溯

的质量档案。

3.2 全生命周期质量管理理念的引入

传统的质量控制往往在工程结束之后就宣告结束，缺少对管道在长时间服役过程中接口性能变化的持续关注。而全生命周期质量管理则是把质量控制由一个“点”变成一条“链”；质量控制从设计开始，在设计时就要考虑到管线经过的地区环境、介质情况，合理选用接口种类和材料。在材料采购、制作阶段，加强供应链管理及出厂检验，使材料具备“先天”质量。施工阶段的精细控制是关键，其中最重要的创新是“一管一档”“一口一档”数字化信息档案。

每一个补口的地理位置信息（GPS坐标）、对应的焊口编号、施工单位、操作人员、所用材料的批号、施工时的环境参数（温度、湿度）、关键工艺参数（预热温度、涂敷厚度）和所有的检验测试结果（电火花检漏、剥离强度等）。这些数据被放在信息化平台上统一管理起来，就变成了一座庞大的数据库。在管道运营维护阶段，我们可以把定期开展的管道内检测（比如智能漏磁检测器）和外检测（比如DCVG/CIPS技术）所检测到的腐蚀缺陷信息，与该位置的补口施工方案联系起来做分析。

借助大数据分析手段，找出施工队伍、材料批次或工艺参数与后期出现腐蚀现象之间的潜在联系，进而对将来可能出现的问题作出预测和预警。假如我们察觉到某个时间段，由某个团队做的补口几年之后都会出现问题，那么就可以事先对这一批所有的补口展开重点检查，并做好预防性保养工作，这样就从被动抢修转变成了主动应对风险，这就是全生命周期管理理念的关键之处，它让管道资产的经营管理变得更为科学，也为省钱。这种基于数据的、可追溯的、贯穿始终的管理模式，是长输管道防腐补口质量控制由传统向现代、由经验向科学转变的必然趋势。

4 结论

长输管道防腐补口属于保证管线整体完整性的关键一环，其施工质量控制是一项系统而综合的工作，本文通过对补口施工全过程加以剖析，找出质量控制的重点，还提出了新的管理理念，总的来说，想要做好高质量的防腐补口，就得靠三根柱子支撑，第一根柱子是根

基扎实的预处理，要严格把住表面清洁度这道关卡，做到Sa2.5级以上，还要把好表面粗糙度这道关卡，处在40μm-100μm这个最佳范围，这样才能给防腐层营造出最理想的附着环境，第二根柱子是科学合理的材料和工艺控制，始终遵循材料选用的匹配性原则，还要对预热温度，涂敷厚度这些重要工艺参数实施精确的实时监控，第三根柱子是严谨可靠的检验和前瞻性管理，依靠100%的无损检测手段，特别看重电火花检漏，守住成品质量关，而且创造性地把全生命周期管理理念引入进来，创建起“一口一档”的数字化档案，从施工到运维，全程做到质量追溯和数据驱动的风险预警。

把精细化的过程控制与宏观的全生命周期管理融合起来，这是破解当前长输管道防腐补口质量难题的一种有效方式，既要从技术层面实施严格的要求，也要在管理模式上作出深刻的改变。

面向未来，智能化的检测设备会更加成熟，大数据分析技术也会更加完善，所以建立智能化的补口质量控制与预警平台是完全可行的。这样就可以对管道的安全实现更深层次的、更具有预见性的保护，经过我们不断的努力，让每个补口都做到极致，筑起一道坚不可摧的管道防腐屏障，才能使国家能源动脉的安全、长寿、高效运行。

参考文献

- [1]雷阳.长输管道防腐蚀补口施工质量控制策略[J].全面腐蚀控制,2023,37(02):100-102.DOI:10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2023.02.100.03.
- [2]马滔.油气长输管道防腐施工质量控制策略[J].全面腐蚀控制,2022,36(05):122-123.DOI:10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2022.05.122.02.
- [3]冯殿波.长输管道防腐补口施工质量的数字化管理策略[J].全面腐蚀控制,2021,35(09):106-107.DOI:10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2021.09.106.02.
- [4]钱溢.长输天然气钢质管道防腐补口施工质量控制探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(19):18-20.
- [5]吴海峰.浅谈长输管道防腐蚀补口施工质量控制[J].石化技术,2020,27(02):141+157.