

管道 3LPE 防腐层补口技术研究和应用新进展

张立彬（中海油能源发展股份有限公司采办共享中心，天津 300452）

摘要：管道内衬或防腐涂层在施焊过程中，受高温作用其焊缝周边的防腐层易被破坏，无法保护环焊缝，而补口技术成为影响管道质量、性能的关键。由于传统补口技术存在诸多问题，如密封性能不足、机械强度不够、施工难度大等，不仅不利于管道的应用与发展，还会缩减其使用寿命。在此背景下，越来越多的企业开始研发新的补口技术与材料，其中包括改进型热收缩带、喷涂聚氨酯等，既能提高补口的密封性、机械强度，又能延长管道的使用寿命、节省施工成本。基于此，本文围绕管道 3LPE 防腐层补口技术的研究与应用新进展进行分析和探讨。

关键词：管道；3LPE 防腐层补口；应用进展

0 引言

3LPE 防腐层因其质量与性能良好，被广泛应用于大型油气管道建设中，是首选的外防腐层材料。实际操作中，基于辐射交联聚乙烯热收缩带进行焊接，能够实现防腐层的补口。当前，3LPE 防腐层补口操作主要借助三层结构热收缩带，即环氧底漆、热熔胶、辐射交联聚乙烯，其施工效果直接影响着管道工程的建设质量。以往，热收缩带补口施工主要采用人工操作方法，施工易受人为影响而出现质量问题。通过完善技术要求，严格把控产品质量，能够提高补口施工的质量、效果。

1 3LPE 防腐层补口技术概述

1.1 3LPE 防腐层

3LPE 防腐层是现代管道防腐技术的核心，其性能、结构关系着管道系统的稳定性、安全性。聚乙烯是 3LPE 防腐层的主要成分，因聚乙烯材料的防腐蚀性良好，能够隔绝管道、外部环境中的腐蚀因子（酸、碱、盐等）。同时，3LPE 的绝缘性强，管道不易受到电流、电磁场等的干扰。制备过程中，采用熔融喷涂、缠绕包裹等方法将其涂抹在管道表面，在表面形成一层致密的保护层，以免管道受外界环境的腐蚀。为提高 3LPE 防腐效果，还需要控制材料厚度、均匀性等。

1.2 补口技术原理

管道防腐层受损或存在缺陷时，应用补口技术可以有效修补。具体操作中，通过材料溶解、混合、固化过程，能够将防腐层、补口有机结合。在工业生产领域，管道肩负着传输物料的重任，其防腐性能良好不仅能延长管道的使用寿命，还能提高生产效率。具体应用中，合理选择补口材料可以增强补口的密封性、耐久性与防腐蚀性，所选材料具有良好的耐化学腐蚀

性能，可以抵抗各种腐蚀介质（酸、碱、盐等）的侵蚀。在选择时，还需要结合管道的材质、工况、腐蚀介质等综合考虑，确保补口材料的适用性、合理性。技术实施中，严格管控工艺参数可以提高补口施工的质量。尤其是表面预处理工作，做好补口部位的清洗、打磨等，将其表面污垢、不平整部分全部去除，能够为后续施工奠定基础。

2 热收缩带补口问题及成因

相关企业在调查在役管道热收缩带补口情况时，发现部分热收缩带补口失效。通过分析，这一问题与施工操作不当有关，致使其机械损伤破损。如果粘结界面的密封性不佳，也会造成这一问题。具体问题如下：热收缩带与管道三层聚乙烯防腐层的搭接密封性差，导致剥离。问题原因在于热熔胶烘烤时间不足，未使热熔胶全部熔化，导致粘结性降低。在热收缩带、管道三层聚乙烯防腐层的搭接部位，涂抹与聚乙烯之间粘结性较差的环氧底漆，导致剥离；热收缩带、管体不粘结。

问题原因包括施工人员手动烘烤热熔胶不够均匀，使其部分熔化，而在其未熔化部位形成空鼓^[1]。在湿膜安装热收缩带时，底漆完全固化，无法与热熔胶有效粘结；管道底部热收缩带呈两层皮状态，无粘结性。究其原因，热收缩带安装施工过程中多名施工人员两侧烘烤，而烘烤结合处（管底）因操作不方便，容易形成施工加热盲区，致使热熔胶无法熔化。

3 热收缩带补口技术的改进研究

3.1 热熔胶改进研究

为解决热收缩带补口施工中的问题，不仅要完善技术要求，确保产品质量、性能，还要做好补口施工管理，针对热收缩带补口技术的改进展开研究。针对

热熔胶，其在热收缩带补口施工中发挥着重要作用，但实际应用时存在一些问题，如粘结强度低、耐久性差等，不仅会降低补口质量，还会影响管道的防腐效果。

通过进行热熔胶的改进研究，能够提高其性能。具体改进方向主要包括粘结强度、耐久性、熔融流动性等。基于现状改进热熔胶的配方，增加极性基团可以提高其与管道表面、聚乙烯层的粘结强度。合理选择材料，如抗老化能力强的材料可以增强热熔胶的耐久性。具体操作中，依据情况灵活调整热熔胶的成分、工艺参数等，有助于提高其在加热处理中的熔融流动性，确保热熔胶充分浸润管道表面，可以提高整体密封性。考虑到不同地区的气候条件不同，对于补口需求也有差异，因此开发能够适应不同温度的热熔胶，有助于达到施工要求，满足补口需求。

另外，针对热熔胶操作中的一些问题，很多学者通过不同的方法进行改进研究。如，改进主体聚合物，选择不同极性与分子量的聚合物为主体材料，进一步调整热熔胶的成分，有效提高了热熔胶的粘结强度、耐久性。尤其是利用马来酸酐 EVA 树脂，将其与填料、增黏树脂等结合使用，可以制备出提高管道密封性、防腐性的热熔胶。

还可以筛选增稠剂、黏度调节剂来改进，筛选结束合理调整热熔胶黏度，让其在加热处理中保持良好的流动性，既能确保热熔胶充分浸润管道表面，又能避免施工中的空隙、气泡，有助于增强密封性能。再适当添加抗氧剂、颜填料，也能提高热熔胶的耐候性、抗老化性。究其原因，使用抗氧剂可以延缓热熔胶的老化过程，延长其使用寿命；添加颜填料丰富热熔胶的色彩，更便于识别、检查。

3.2 环氧底漆改进研究

3LPE 防腐层的三层结构中，环氧粉末涂层发挥着良好的防腐性能；胶粘剂层常采用共聚物胶粘剂，能够提高聚乙烯防腐层的剥离强度、解决耐温变性能差的问题；聚乙烯层主要起到机械保护、耐环境腐蚀的作用。具体应用中，热收缩带补口技术通过在补口部位涂抹环氧底漆、安装热收缩带，有效增强补口区域的密封性，更好实现了防腐效果。在热收缩带补口施工中，环氧底漆发挥着提升热收缩带抗阴极剥离性能、增强与钢管附着力的作用。但在应用过程中，传统的环氧底漆尚有不足，如与热收缩带匹配性差、干燥速度慢等，不仅影响了热收缩带补口施工的质量、

效果，还使防腐层在后续使用中出现失效。针对环氧底漆存在的问题，国内外学者展开大量的改进研究^[2]。具体如下：

3.2.1 选择环氧树脂类型加以改进

环氧底漆中，环氧树脂是重要的成膜物质，其类型关系着环氧底漆的性能。以往使用的环氧树脂（双酚 A 型环氧树脂）虽有较好的防腐蚀性，但其固化后的涂膜结构紧密性不足，在耐腐蚀性、抗渗透性方面仍待提升。因此，大量学者不断探索其他类型的环氧树脂，如双酚 F 型环氧树脂、酚醛环氧树脂。前者不仅能克服传统环氧树脂的缺点，还有黏度低、耐腐蚀性强的优势；后者则具有更多的环氧基团，固化后的涂膜结构更加紧密。具体对比见表 1。

表 1 不同类型环氧树脂的性能对比

环氧树脂类型	环氧基团数量/个	黏度	抗渗透性	耐蚀性	固化条件
双酚 A 型	2	中等	一般	一般	常温 / 加温
双酚 F 型	2	低	较好	较好	常温
酚醛环氧树脂	2.5-4.0	高	较好	较好	加温

3.2.2 匹配固化剂加以改进

固化剂的选择直接影响着环氧底漆的固化速度及固化后的性能。有学者通过试验筛选出与双酚 F 型环氧树脂匹配性好的固化剂（改性脂环胺、改性胺等），不仅能加快固化速度，还能与环氧树脂紧密结合，形成致密性更好的涂膜结构，进一步保证了底漆的耐蚀性、抗渗透性。

3.3 补口施工机具改进研究

热收缩带补口施工中，为规避人为操作对施工的影响，诸多学者展开机具补口技术研究工作，如热收缩带中频加热补口施工技术。该技术主要应用到热收缩带施工的管道补口预热、已收缩定位的热收缩带加热到热熔胶熔融场景，能够有效去除气泡，提高整体的粘结效果。经研究表明，中频加热过程中会产生一定的热效应，主要由管内向外部传递，加热停止后钢管的表面温度持续上升 10 摄氏度，可以有效蓄热，为热熔胶熔融提供充足的热量^[3]。这不仅能使热熔胶受热均匀且全部熔融，还能缩减回火时间，保证粘结的质量与效果。通常，应用该技术可以解决施工人员手工烘烤的不均匀问题，还能降低施工难度。

4 新型补口技术研究及应用

4.1 热塑性材料补口技术

传统补口技术应用过程中面临防腐蚀性能差、管

道防腐层熔合不良等问题。为解决这些问题,众多学者对新型补口技术进行研究、探索。其中,热塑性材料补口技术是在加热加压条件下,采用热塑性补口片进行补口,不仅施工便捷,还有较高的粘结强度。热塑性补口片往往由热塑性聚合物材料制成,其中包括聚丙烯、聚乙烯等,不论是耐化学腐蚀性还是耐环境老化性,都极强。

在该技术研究过程中,关键技术的突破、创新大大推动了技术应用。为进一步增强补口片的粘结强度、密封性,众多学者设计出气囊式、钢箍式补口机具^[4]。使用机具时,在加热补口片的同时还能对补口部位均匀施加压力,更好地保证了补口片与防腐层、钢管表面的紧密粘结。

另外,热塑性材料补口技术的施工工艺不断优化、完善。一些学者使用硅胶加热片、云母加热圈等设备有效控制了加热时间、温度等指标,避免温度过热/过冷而影响补口施工的质量。实践操作中,依据情况灵活调整补口机具的压力、加热时间等参数,更好地满足不同管道直径、防腐层厚度的补口需求。经实践发现,该技术的补口效果良好,防腐蚀性、耐久性强,即使在恶劣气候环境或复杂多变的地质条件下,也发挥出良好作用,为补口施工奠定了坚实基础。

4.2 液体环氧涂料补口技术

液体环氧涂料补口技术应用过程中,使用液体环氧涂料进行补口,采用涂刷或喷涂方法,将涂料均匀涂抹在补口部位,形成致密、完整的防腐层。该技术不仅操作便捷,还具有较强的耐化学腐蚀性,适合进行补口部位的防腐处理。技术研究过程中,学者致力于完善施工工艺、调整涂料配方,有效增强了涂料性能,提高其粘结强度^[5]。

通过优化设备,进一步保证了施工质量与效果。实际操作中,很多油气管道工程均采用液体环氧涂料补口技术进行补口处理,其防腐蚀性强、耐久性良好,并且该技术能够在恶劣气候、复杂地形条件下使用。另外,该技术还有较强的环保性。与传统的热收缩带补口技术相比,液体环氧涂料的生态效益更高,操作中不会产生废弃物、有害气体。

4.3 粘弹性防腐新技术

粘弹性腐蚀防护系统不同于以往的液态/固态防腐涂层,其防腐材料具有LPE的固体特性、液态特性等,其粘结性更强,更便于使用。常用的粘弹体防腐材料有粘弹体防腐带、粘弹体防腐膏等。针对粘弹体

防腐胶带,其采用冷流性较好的树脂材料,不仅永不固化,还能阻断水与空气,确保结合区域的水密性、气密性佳,在防腐蚀性也表现优异。在受到外界破坏时,如砂砾、石块,可以发挥自愈合功能,不会影响正常使用。基于粘弹体补口过程中,其处理要求相对较低。

通常,钢管表面进行手工除锈便可,由施工人员将防腐胶带缠绕在补口处,再缠绕LPE、PVC胶带进行保护,能够提高其整体的抗机械损伤性。而为增强粘弹体补口的效果,一些学者进行补口修复试验,提出更多的复合补口结构,如将粘弹体与压敏胶热收缩带结合、将粘弹体与热收缩带结合等,还针对具体的补口结构制订相应的设计技术标准^[6]。当前,粘弹体补口技术经大量试验后已进行推广使用,其复合补口结构在很多热收缩带补口修复施工中发挥作用,取得极好的效果。

5 结束语

总而言之,3LPE防腐层技术广泛应用于我国管道工程建设中,并采用热收缩带补口技术。随着热收缩带补口技术的推广、应用,有效提高了补口施工的质量与效果,进一步保证管道的性能、使用寿命。同时,众多学者还纷纷研究新型补口材料、技术工艺,然而不论哪一种材料或技术均有其特定的使用环境、条件,具体应用中还应结合实际工况科学分析并选型,以保证各工况下防腐补口施工的质量、效果。

参考文献:

- [1] 王洪洲,刘永利,王志业,等.海底管线非常规节点防腐补口施工技术探讨[J].全面腐蚀控制,2021,35(9):92-95,142.
- [2] 赵元元.海底管道3LPE热缩带节点防腐涂层的质量控制研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(8):33-35.
- [3] 鲁振兴.海底管道3LPE热缩带节点防腐涂层的质量控制[J].全面腐蚀控制,2020,34(3):34-38.
- [4] 张一,刘少东,王子文,等.长输管道防腐层优化设计及应用技术探讨[J].全面腐蚀控制,2022,36(2):108-110.
- [5] 王康凤,陈旭,蔡亮,等.长输管道防腐层技术现状和发展趋势[J].全面腐蚀控制,2022,36(1):120-122.
- [6] 岳晓成.海管内检测及海管预防腐蚀的措施分析[J].石油化工建设,2024,46(11):147-149.