管道 3PE 防腐层技术标准对比分析

张 丰* 赵 君 刘玲莉 侯 宇 王德增
（中国石油管道研究中心）
吴晓宁 罗治国
（中国石油管道公司沈阳输油气分公司） （中国石油管道公司大连输油气分公司）

张 丰 赵 君等：**管道 3PE 防腐层技术标准对比分析**，油气储运，2009，28(7) 48～51。

摘 要 针对 3PE 涂层在国内管道工程应用中存在剥离的现象，对国内外 3PE 涂层相关标准及技术规格书进行了对比分析。从涂层结构、原材料指标、涂装工艺评定和涂装表面要求及质量检验等四个方面，对比分析了主要技术指标的差异，重点考察了环氧层、表面要求以及长期阴极剥离等指标对 3PE 涂层质量控制的影响，提出了今后需要进一步改进的性能指标。

主题词 管道 3PE 涂层 标准 对比 涂装工艺评定 质量检验

一、前 言

自 20 世纪 90 年代中期 3PE 涂层在我国管道工程中开始应用以来，累计使用量已经超过上万公里。近年来，西气东输及其二线、涩宁兰、兰成渝和陕京二线等新建长输管道工程均选用了 3PE 防腐层。理论上，3PE 涂层具有稳定的高品质性能，但由于其生产工艺和施工控制相对复杂，容易产生缺陷，因此，管道长期运行后容易产生因涂层粘结失效而导致的涂层剥离。剥离后的涂层对阴极保护有屏蔽作用，一旦发生剥离涂层下的加速腐蚀，危害极大，而现有非开挖检测技术还无法准确检测出涂层的剥离。近年来，新大线、兰成渝等管道 3PE 涂层现场调查均发现多处剥离、粘结失效的情况。

在此背景下，通过对比分析国内外 3PE 的技术标准及工程技术规格书，查找出技术指标和涂装施工两方面的差距，对于完善国内标准中对生产过程控制与涂层质量检验的要求，提高 3PE 涂层的长期使用性能及保障管道安全运行均具有重要意义。

二、3PE 相关标准及技术规格书

可供参考的国内外 3PE 相关标准及技术规格书包括，SY/T0413—2002埋地钢质管道聚乙烯防腐层技术标准，SY/T 0413—2005 钢质管道单层熔结环氧粉末外涂层技术规范，CSA Z245.21—2002 钢管聚乙烯外涂层标准，CSA Z245.20—2002 钢管熔结环氧外涂层标准，ISO 21809.1—02 石油天然气工业——用于管道输送系统的埋地和水下管道的外涂层第一部分，Q/SY GJX 0106—2007 西气东输二线管道工程钢质管道三层结构聚乙烯防腐层技术规范（简称西二线）以及兰州—郑州—长沙管道工程（简称兰郑长）、川气东送管道工程（简称川气东送）和印度 Reliance 天然气管道工程（简称印度管道）的 3PE 技术规格书等。

三、技术指标对比

1、 涂层结构对比

国内外标准及技术规格书在涂层结构方面的主要差别有三个方面，即底层环氧粉末涂层（FBE）的厚度、胶粘剂厚度和允许的涂层偏差，见表 1。

为了获得更好的保护，国外实际工程中已普遍采用更厚的 FBE 涂层[1]。例如，加拿大某公司提供的应用实例中，几条管道都适当增加了 FBE 和胶粘剂的厚度，数据见表 2。文献[2]表明，加拿大国家标准中规定的防腐层的最小厚度主要依据北美 2PE 的应用经验，该标准在北美的运输、使用环境下可能适用，但却不一定适用于其他环境，应根据工程的实际情况来确定防腐层厚度。

* 065000，河北省廊坊市金光道 51 号；电话：(0316)2170737。

表 1　涂层结构对比数据[3~6]

测试项目	FBE 厚度 (μm)	FBE 偏差 (μm)	胶粘剂厚度 (μm)	总厚度 (mm) (500≤D<800) 普通级	总厚度 (mm) (500≤D<800) 加强级	总厚度 (mm) (D≥800) 普通级	总厚度 (mm) (D≥800) 加强级	允许的涂层偏差
西二线	≥120		≥170	2.50	3.2	3.00	3.7	焊缝 70%
CSA Z245.21	≥120		≥100	1.15	1.0	1.15	1.0	无特别规定
ISO 21809.1	≥125		≥150	2.20	2.8	2.50	3.3	焊缝 90%
SY/T 0413	≥80		175～250	2.50	3.2	3.00	3.7	焊缝 70%
印度管道	≥150	0～50	≥200	2.50	3.2	3.00	3.7	焊缝 80%
川气东送	≥150		170～250	2.50	3.2	3.00	3.7	焊缝 90%
兰郑长	≥150		170～250	2.20	2.9	2.50	3.2	焊缝 70%

表 2　加拿大某公司 3PE 涂层厚度数据

管道	FBE (μm)	粘结剂 (μm)	聚乙烯 (mm)	总厚度 (mm)
墨西哥 φ580	200	200	2.5	2.90
美国 φ580	200	200	2.5	2.90
里海 CPCφ1 016	150	175	3.2	3.50
澳大利亚 φ406	150	200	1.0	1.35

对于管端预留，一般采用切削管端聚乙烯涂层和胶粘剂层露出 FBE 的方法提供一个搭接区，文献[7]认为，只有当 FBE 层(推荐为 200～350 μm)完全覆盖管体上的锚纹时，才能保证管体和补口部位的耐腐蚀性能。同时，由于常规操作难以完整地去除胶粘剂层，需要考虑管端 FBE 厚度减薄所带来的影响，并且这种管端预留方案不适用于 FBE 层厚度低于 100 μm 的 3PE 结构。

2、 原材料指标对比

国内外标准及技术规格书在原材料指标方面的主要差别见表 3 和表 4。

表 3　环氧原材料指标对比

环氧测试项目	挥发份 % 滴定法	挥发份 % 失重法	阴极剥离半径 (mm) 24 h、3.5 V 65℃	阴极剥离半径 (mm) 48 h、1.5 V 65℃	阴极剥离半径 (mm) 28 d 或 30 d 1.5 V	孔隙率 断面	孔隙率 界面
西二线		≤0.6		≤8.0	≤15(20℃)		
CSA Z245.20/21	≤0.5	≤0.6		≤ 6.5		1～4 级	1～4 级
ISO 21809.1		≤0.6					
SY/T 0413		≤0.6		≤8.0			
SY/T 0315		≤0.6	≤8	≤8.0	≤10(20℃)	1～4 级	1～4 级
兰郑长		≤0.6		≤8.0	≤15(20℃)		
川气东送		≤0.6		≤8.0	≤15(65℃)		
印度管道	≤0.5	≤0.6		≤6.5	≤15(60℃)	1～4 级	1～4 级

表 4　PE 原材料指标对比

PE 测试项目	硬度	体积电阻率	电气强度
西二线		$\geqslant 10^{13}$	≥25
CSA Z245.20/21	≥60		
ISO 21809.1	≥55		
SY/T 0413		$\geqslant 10^{13}$	≥25
SY/T 0315			
兰郑长		$\geqslant 10^{13}$	≥30
川气东送		$\geqslant 10^{13}$	≥25
印度管道	≥55	$\geqslant 10^{15}$	≥30

由表 3 可知，环氧粉末的主要差别在于挥发份(国外称含水量)指标。除了加拿大标准和印度管道同时要求滴定法和失重法测试挥发份以外，国内外均采用失重法进行测试。国外测试要求在 105℃下烘 2 h，降到室温测量，间隔 1 h 后重复称量，一直到两次质量相差不超过 0.001 g 为止，此时为烘烤后的质量；而国内主要参照 GB/T 6554，分别在 105℃下烘烤 1 h，在 230℃下烘 5 min 后，冷却到室温称重计算。可见，国外测定方法中烘烤时间长，测量精度要求高，在限制挥发份等方面更为严格。同时，加拿大和印度管道工程一般将 CSA Z245.21—02 和

CSA Z245.20—02 配套使用，即作为 3PE 底层的 FBE 层与单独作为防腐涂层的 FBE 层执行同样的技术标准，要求较为严格，而国内对 3PE 底涂层 FBE 的要求要低于单层 FBE 涂后规范要求。

对于 PE 外涂层，国内外标准和工程技术规格书的指标要求大部分相近，差别主要在于，国外技术标准和工程技术规格书都有硬度指标要求，而耐化学品和耐紫外光性能测试则放在涂装工艺评定中进行，更能体现 3PE 整体涂层的性能。另外，国内对体积电阻率和电气强度的要求比印度管道工程低。

3、 涂装工艺评定对比

国内规范要求在正式涂装生产前有适用性试验，国外规范称之为涂装工艺评定，这方面的主要差别见表 5。

表 5 涂装工艺评定对比

测试项目	环氧固化率	ΔT_g	3PE 阴极剥离半径 (mm)			耐热老化/耐紫外光	环氧附着力
			24 h、3.5 V、65℃	48 h、1.5 V、65℃	28 d 或 30 d 1.5 V		
西二线	≥ 95%	≤5	≤8	≤15(65℃)			
CSA Z245.20/21				≤6.5	≤ 7(20℃)		1～2 级
ISO 21809.1		≤3			≤7 (23℃) ≤15 (T_{max})	≤20	1～3 级
SY/T0413				≤8			
兰郑长	≥95%	+3/−2		≤8	≤15(65℃)		交叉法
川气东送					≤7(23℃)		V 形法
印度管道	≥95%	+3/−2		≤7	≤15(65℃)	≤35	交叉法

对于聚乙烯层的测试，虽然测试项目和指标基本相同，但国内分为采用聚乙烯压制片和完全涂装管截取两种取样方法，而国外均要求从完全涂装 3PE 的钢管上取样，后者截取的试样更能体现 3PE 涂层的性能。

兰郑长和西二线管道工程对环氧粉末固化性能的要求分别为 $\Delta T_g \leqslant 5$ 和 $\Delta T_g \leqslant 3$，而国外标准及技术规格书均要求 $\Delta T_g \leqslant 3$，其要求更为严格。

另外，加拿大标准和印度管道要求在 48 h、65℃、1.5 V 条件下阴极剥离距离不超过 6.5 mm 和 7 mm，而国内则要求在相同条件下阴极剥离距离不超过 8 mm，这两者中哪一个快速评价方法更能反映 3PE 的阴极剥离性能还需要进一步的研究。同时，文献[7]表明，短期阴极剥离试验预测长期粘结性能并不可靠，而 28 d 或 30 d 高温水浸泡下的性能测试(主要为粘结力和阴极剥离)已证实可以合理预测涂层的长期性能。国外标准及技术规格书中一般注明，若 28 d 或 30 d 的阴极剥离试验合格，则认为短期的阴极剥离试验合格。因此，在适用性试验和涂装质量检验中，考察 28 d 或 30 d 高温水浸泡下的阴极剥离性能十分必要。

4、 涂装表面要求及质量检验对比

目前国内对于钢管表面涂装的要求(见表 6)，除行业标准外基本与国外相同，另外还增加了含盐量、灰尘度等指标要求。较为特殊的是，印度管道工程要求除锈后的锚纹不呈现半球形或圆形。文献[7]表明，过去 5 年中全球三层聚烯烃结构涂层失效的研究发现，引起 FBE 层附着力降低的主要原因是涂层下呈圆形或半凹形的喷砂锚纹。同时，FBE 涂层的典型涂装条件为角状喷砂锚纹，波峰与波谷的最小差值应为 50 μm。涂装质量检验中，国内外在检测项目和检测频次上有所不同。对于检测项目，国内外的主要差别在于，国外要求对冲击强度、压痕硬度进行抽样检测；在检测频次上，国外对锚纹深度、防腐层厚度、剥离强度和阴极剥离的检测频次要求比国内更严格，见表 7。

表 6 涂装表面要求

测试项目	锚纹深度 (μm)	表面盐分 (μg/cm²)	灰尘度	粉末回掺
西二线	50～90	≤20	≤2 级	试验确定
CSA Z245.20/21	40～110			
ISO 21809.1	50～100	≤20	≤2 级	
SY/T0413	50～75		清扫	
兰郑长	50～75	≤20	≤2 级	
川气东送	50～75			
印度管道	50～70	≤20	≤2 级	20%和试验确定值取低者

表 7　质量检验对比

测试项目	锚纹深度	灰尘度	表面盐分	阴极剥离	涂层厚度
西二线	2 次/班 2 根/次	≤2 次/班	2 根/批	第 10、20、30 km 各检测一次，之后每 50 km 检测一次	检测第 1、5、10 根，之后每 10 根测一次
CSA Z245.20/21	1 次/4 h			1 次/班	1 次/4 h
ISO 21809.1	5 根/h	5 根/h	头 5 根管和之后 1 根/批	1 次/ d	每 10 根检测 5 根
SY/T0413				同西二线	同西二线
兰郑长	每根	每根	每根	同印度管道	所有管
川气东送	1 次/h		1 次/h	同西二线	同西二线
印度管道	每根	每根	每根	1 次/周或更换环氧批号时间早者	所有管

四、结论与建议

自从国内管道发现 3PE 涂层存在剥离现象以来，新建管道工程对于 3PE 的技术要求在参考了国外标准和技术规格书后，相对于 SY/T 0413 在检测项目及指标上有所增加和提高，有些检测项目和指标甚至比国外要求更严格。但也有部分指标的要求在国外基础上有所放宽，例如对环氧固化性能指标 ΔT_g 和阴极剥离距离指标（在 65℃、1.5 V、48 h 条件下）的要求。

涂层的质量稳定性一方面通过产品的抽样质量检查来保证，另一方面通过生产过程中的工艺控制和监控体系来保证。国内规范在涂层质量检查的频次方面低于国外规范要求，在生产监控系统方面没有连续监控自动报警功能，同时，对部分需要监测的关键项目也没有指明，例如环氧喷枪气压等。

针对以上存在的问题，在编制技术规格书或修订 3PE 的相关标准时应注意以下问题。

1、 原材料性能

（1）原材料的性能要求和测试更多地体现在环氧粉末的质量检验要求上，对于 PE 的要求应主要从考察 3PE 完全涂装后的性能要求入手。

（2）在测试环氧涂装试片时采用与 FBE 单层标准相同的要求，对回掺比例有更明确的硬性指标，研究并确定出 3PE 涂装过程中 FBE 厚度偏差的范围。

2、 表面质量及涂装要求

（1）考察表面锚纹形状和波峰、波谷差对 3PE 长期粘结性能的影响，并提出指标。

（2）建立对于生产质量有重要影响参数（钢管表面预热和加热温度、各层涂装温度、环氧喷枪气压等）的自动化监测系统，提高这类非破坏性检测的精度和连续性，避免人工定期检测不能及时发现问题的缺陷。

3、 3PE 涂层性能

（1）在质量检验中增加一定频次的高温长期阴极剥离检验，以保证涂层的长期粘结性能。

（2）增加或提高完全涂装 3PE 涂层后对 PE 外层和环氧底层的检测指标，例如硬度、耐紫外光性能/耐老化、环氧固化度等。

参 考 文 献

1, David Norman, Colin J Argent: Fitness for purpose issues relating to FBE and three layer PE coatings, NACE Corrosion 2005.

2, 张其滨　刘金霞，赫连建峰 管道 3PE 防腐层厚度指标分析 管道技术与装备 2004(5)。

3, CSA Z245.20—02 钢质管道熔结环氧外涂层。

4, CSA Z245.21—02 钢质管道聚乙烯外涂层。

5, ISO 21809.1—02 石油天然气工业——用于管道输送系统的埋地和水下管道的外涂层第一部分：聚烯烃涂层（三层聚乙烯或三层聚丙烯）。

6, Q/SY GJX 0106—2007 西气东输二线管道工程钢质管道三层结构聚乙烯防腐层技术规范。

7, Colin Argent, David Norman: Three layer polyolefin coatings fulfilling their potential? NACE Corrosion 2006.

（收稿日期：2008-03-14）