



材料检验和工艺控制

对三层聚烯烃防腐涂层长期性能的影响

管世伟博士 Dennis Wong 博士

加拿大劲氏集团有限公司及百劭公司 25 Bethridge Road, Toronto, Ontario M9W 1M7 Canada

摘要: 材料检验和施工工艺控制对三层聚烯烃防腐涂层长期性能的影响巨大。本文讨论了有关的一些具有决定性的指标参数，例如熔结环氧粉末涂料及其涂层的质量鉴定和施工厚度、表面清洁度和喷钢砂除锈处理之后的表面粗糙度、表面预处理、涂层涂敷过程中的钢管加热温度、焊缝部位的防腐层覆盖度以及防腐管的产品检验等等，比较了中国目前管道防腐层技术标准在处理这些指标参数方面与国际上的差异，对相关的可改进之处提出建议，以确保新建管线的长期防腐效果。

主题词: 材料检验，工艺控制，三层聚烯烃防腐层，FBE，3LPE，3LPP，防腐性能，技术标准

1. 引言

腐蚀是影响埋地油气管线长期寿命和可靠性的主要因素，因此这些管线的设计和建造都必须有防腐外涂层，同时和一个有效的阴极保护系统来保护。熔结环氧（FBE）及3层聚烯烃（3LPO）（分别为PE聚乙烯或PP聚丙烯）是新建管线使用最广泛的外涂层系统。FBE在北美和英国一直较受欢迎，而3LPO涂层则在世界其余地区的管道涂层市场里占主角。3LPO管道防腐层系统的构成是：第一层为FBE环氧涂层，第二层为官能共聚物（聚乙烯或聚丙烯）的胶粘剂，最外层为聚乙烯（PE）或聚丙烯（PP）。

在过去十年间，三层聚烯烃涂层（3LPE和3LPP）的剥离失效问题已发生过多起和被报道¹⁻⁵。这些失效的主要共同特点，都是FBE环氧涂层从钢表面剥离，表面上并有微少或严重的腐蚀不等。这些涂层的失效问题引起了世界各地的业界对于3LPO涂层性能是否能够长期有效的关注。业界采取了若干举措，以确定涂层失效的机制并采取相应纠正⁶。

如同任何其他管道防腐层系统，材料检验和施工工艺控制对三层聚烯烃防腐涂层长期性能的影响巨大。本文目的是讨论我们对其中一些相关关键参数进行研究之后的结果。这些参数包括熔结环氧粉末涂料及其涂层的质量鉴定和施工厚度、表面清洁度和喷钢砂除锈处理之后的表面粗糙度、表面预处理、涂层涂敷过程中的钢管加热温度、焊缝部位的防腐层覆盖度以及防腐管的产品检验等等。本文也比较了中国目前管道防腐层技术标准在处理这些参数方面与国际上的差异，对相关的可改进之处提出建议，以确保新建管线的长期防腐效果。

2. 方法和实验

人们可以简单地设计一个管道防腐层，以求仅仅刚好符合现行国家、国际组织和公司标准和规格的要求。这些标准和规格常常会规定某一特定的性能检验值来作为防腐层材料通过验收资格的标准。但是这些文件列出的检测往往都是相对短期的，也不能给防腐层的长期表现提供预测模型。另外，现有有关管道防腐层长期性能的检测数据往往也是匮乏的。因此，作为一个管道防腐层的全球领袖，绍氏集团百劭公司所采用的办法，更多地是依赖于确立完整的、可从中看到发展趋势的一系列检测数据，来对三层聚烯烃防腐层的长期性能进行预测。

以管道防腐层的阴极剥离为例。国际标准化组织有关埋地管道三层聚烯烃防腐层的ISO 21809-1标准草案中可能会包括一个短期（24小时65°C下）的阴极剥离（CD）检测。同样，中国SY/T 0413-2002标准对3LPE管道防腐层要求的是48小时65°C下的阴极剥离检测，刚刚经过专家讨论通过的中国《埋地钢管聚烯烃防腐层技术标准》则增加了一个30天的65°C下的阴极剥离检测。这些短期的CD检验原本是用来针对防腐厂的产

品做质检的，它们并不能反映也不应该用来作为防腐层长期性能的验证资格的标准。正确的验证管道防腐层阴极剥离性能是否合格的方法，不应该仅仅是依赖在某一指定时间内（例如 48 小时或者 30 天）的某个单一的检测结果，而应是确立有关该防腐层的一系列阴极剥离率。图 1 显示了两种不同的防腐层，如只在 28 天内，系统 #2 的阴极剥离性能可能看起来更好，但事实上，防腐层系统 #1 才是一个更好的选择。

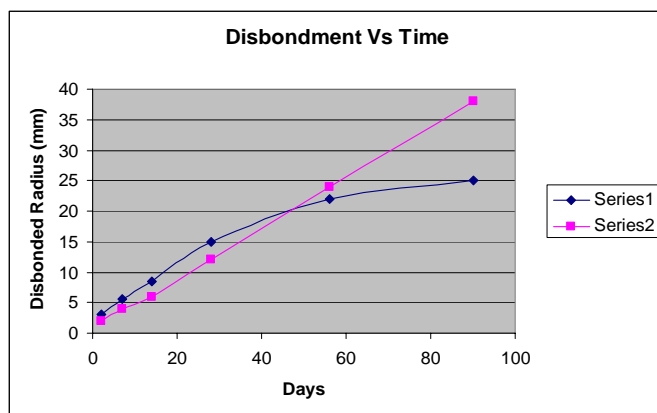


图 1 两种不同防腐层的阴极剥离—时间行为

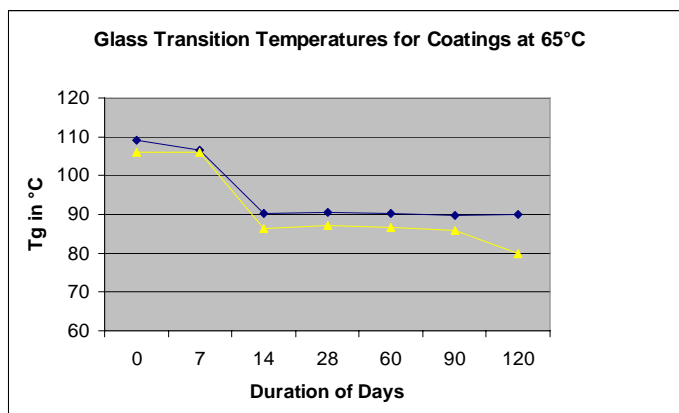


图 2 两种不同 FBE 材料在湿气运行环境下的脆化温度 (T_g)

同样地，人们在使用材料性能来作为管道防腐层的验证资格时也应审慎。图 2 显示了两种不同 FBE 材料在 65°C 的湿气运行环境下暴露 120 天期间的脆化温度 (T_g)。这两个 FBE 标材在浸泡于水中之后，由于湿气造成 FBE 塑化， T_g 值有相当大的下降（20 至 25 °C 左右）。这些 T_g 值是根据加拿大 CSA Z245.20-2006 标准以 20° C/分钟的升温速率测量的。如果以接近管线的实际运行条件（接近 0 °C 左右）下的升温速率来测量，该 T_g 值大约会再低 10° C。从图 2 的结果可以知道，当用脆化温度 (T_g) 来作为管道防腐层的限定资格的时候我们要小心，尤其是当现有的许多管道防腐层的标准和规格（包括目前的中国标准）都只考虑 T_g 干值而不考虑 T_g 湿值的情况下。在温度高于 T_g 时，不同的材料表现不同。有的材料在渗透率上面会有急剧增加，而有的材料则性能保持好得多。设计人员应该注意是所用的熔结环氧粉末涂料的长期 T_g 湿值，设计涂覆好的管道最高运行温度极限要足够低于该值，以保证 FBE 底漆在运行条件下仍处于玻璃晶体状态下并保持适当的防腐性能。道达尔 (TOTAL) 公司最近的一项研究的结果也支持我们的这一个论点⁷。

作者也研究了与三层聚烯烃防腐层的材料检验和施工工艺控制有关的其他一些相关关键参数，包括 FBE 环氧涂层的涂敷厚度、管材表面洁净度和表面锚纹深度、表面预处理、钢管在涂敷时的加热温度、焊缝部位防腐层覆盖率和防腐层检验等等。样品的准备是通过实验室或者防腐厂按照加拿大 CSA Z245.20/21-2006 标准进行的。使用的一些 FBE 都是业界被使用最广泛的工业产品，粘合剂和聚烯烃专用料亦然。对样品进行了各种检验，包括按加拿大 CSA Z245.20/21-2006 标准做阴极剥离（-1.5 伏，3%NaCl）和热水浸泡（75°C）试验、在环境箱中做热循环试验、电化学阻抗谱（EIS）、差示扫描量热法（DSC）和热重仪分析（TGA）。检验在绍氏集团公司加拿大多伦多研究与发展中心完成。

3. 结果与讨论

3.1 FBE 环氧涂层: 作为 3LPO 防腐层的底漆或第一层，FBE 旨于提供与钢基材之间优良的附着力以及很好的抗阴极剥离性能，同时它也可以作为阻止氧气通过涂层向钢界面扩散的屏障。然而国际腐蚀界普遍认同一个观点，太薄的 FBE 环氧涂层并不能让其这些可取的性能得以完全发展。表 1 显示了 FBE #1 和 FBE #2 两种材料在 65°C 下根据加拿大 CSA Z245.20-2006 标准检验的阴极剥离与厚度的关系（该 CSA 标准的指标是 28 天内的阴极剥离半径最多 20 毫米宽）。表 2 显示了 FBE #2 材料在 75°C 下根据加拿大 CSA Z245.20-2006 标准做热水浸泡试验之后涂层附着力与涂层厚度的关系（该 CSA 标准的指标是 28 天内的附着力等级为 1-3）。有意思的是，注意到样品被热水浸泡直到 60 天之后涂层附着力才有差异，再次说明评价涂料是否合格时必须对防腐层进行长期性能检验的重要性。

表 1 FBE #1和 FBE #2两种材料在65°C下根据加拿大CSA Z245.20-2006标准检验的阴极剥离与厚度的关系

FBE	厚度 (μm or mils)	7 天 (mm)	14 天 (mm)	28 天 (mm)
#1	100 μm (4 mils)	6, 6	11, 11	20, 20
#1	150 μm (6 mils)	5, 5	12, 16	15, 20
#1	200 μm (8 mils)	6, 7	7, 15	14, 15
#1	250 μm (10 mils)	6, 7	7.5, 12	13, 15
#1	300 μm (12 mils)	6, 7	7, 10	13, 13
#2	100 μm (4 mils)	6, 6	10, 10	15, 15
#2	150 μm (6 mils)	6, 6	11, 11	12, 12
#2	200 μm (8 mils)	6, 6	10, 15	12, 15
#2	250 μm (10 mils)	4.5, 4.5	6, 7	11, 15
#2	300 μm (12 mils)	4.5, 5	5, 5	10, 15

表 2 FBE #2 材料在 75°C 下热水浸泡试验涂层附着力等级与涂层厚度的关系

厚度 (μm or mils)	7 天	14 天	28 天	60 天
100 μm (4 mils)	2	2	2	4-5
150 μm (6 mils)	2	2	2	4
200 μm (8 mils)	1	1	1	3-4
250 μm (10 mils)	1	1	1	3
300 μm (12 mils)	1	1	1	3

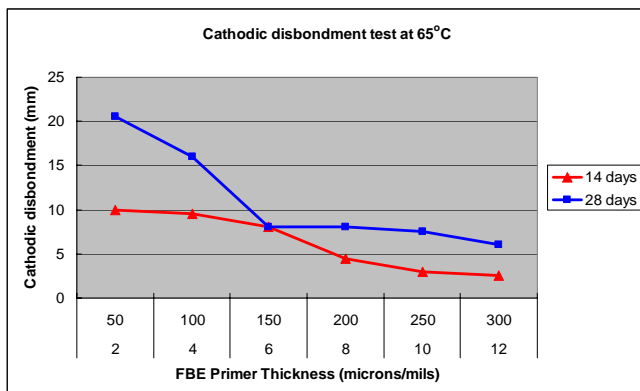


图 3 多层聚乙烯涂层阴极剥离与 FBE 底漆涂层厚度的关系

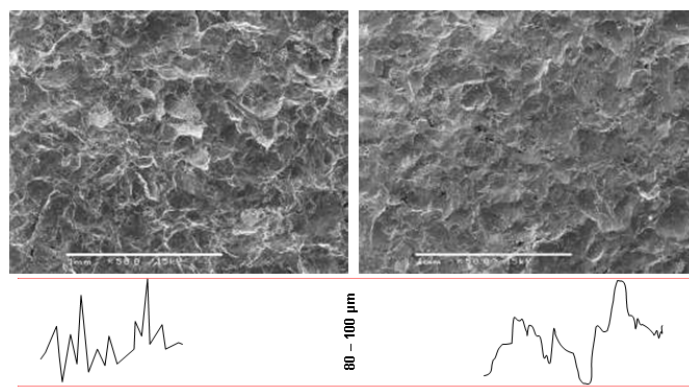


图 4 锚纹深度相同的两种经抛（喷）射除锈之后的不同表面

3LPO 防腐层里的 FBE 环氧涂层膜厚一般较薄（通常规范指标为 150-300 μm 或 6-12 mils），而独立的单层 FBE 管道防腐层通常较厚（300-400 μm 或 12-16 mils）。图 3 显示了某一多层聚乙烯涂层阴极剥离行为（65°C，-1.5 伏，14 和 28 天）与 FBE 底漆涂层厚度的关系。实验结果表明，在类似的施工工艺条件下，环氧底漆涂层厚度为 200 μm（8 mil）的该多层聚乙烯涂层之阴极剥离值接近于 350 μm（14 mils）厚的单层 FBE 管道防腐层的阴极剥离值。连同表 1 和 2 的结果表明，鉴于目前的 FBE 技术水平，多层聚乙烯涂层里的 FBE 环氧涂层膜厚必须达到一个最低的门槛值，才能保证整个涂层体系拥有良好平衡的防腐性能。这一最低的门槛值应为 150 μm（6 mils），常规规范下应为 200 μm（8 mils）。

3.2 表面处理：在为了确保三层聚烯烃防腐涂层的长期性能所应注意的方方面面中，表面处理是其中常常没有获得足够重视的。许多报道过的有关管道防腐层失效的问题都与涂敷前钢管表面处理不好有直接的关系，包括管材表面锚纹深度和表面洁净度方面。如图 4 所示，两种经抛（喷）射除锈之后的表面，尽管用 Testex 锚纹深度测试纸测量结果都是 80-100 μm，但两者的微观结构却相当不同，用粗糙度测量仪来测量出的单位表面长度下锚纹峰数的结果也大不相同。遗憾的是，要想把在正确或错误处理过的钢管表面上涂敷好的防腐层的性

能好坏区别出来，除了对防腐层进行长期性能检验以外还别无它法。表 3 显示了 FBE #2 和 FBE #3 两种工业产品，在经过三种不同处理后的钢材基体上涂敷，然后根据加拿大 CSA Z245. 20-2006 标准做热水浸泡试验下的涂层附着力。这三种不同的表面处理分别是用两种不同等级的钢砂进行喷射除锈，或者是进行机械打磨。短期的热水浸泡试验，将无法把两种 FBE 工业产品与基体的附着性能以及表面处理好坏对防腐层性能影响的好坏一一区别出来，虽然加拿大 CSA 标准的指标是 28 天内的附着力等级为 1-3。表 4 则显示了 FBE #2 涂料在正确或错误处理过的钢管表面上涂敷好之后，防腐层的抗阴极剥离结果。再次证明，即使是用已证明合格的同一商业涂料产品来涂敷，无论是阴极剥离还是热水浸泡，短期的试验都无法把表面处理的好坏对防腐层性能的影响测试出来。

表 3 表面处理对 FBE#2 和 FBE #3 涂层的附着力的影响

材料	表面处理			附着力等级 (热水浸泡, 75°C)					
	钢砂型号	锚纹深度 Rz (μm)	锚纹峰数 个/英寸	2 天	7 天	14 天	28 天	60 天	120 天
FBE#2	GL25	62	74	1	1	1	1	2,3	2,3
FBE#2	GL80	35	92	1	1	1	1	1,2	4
FBE#2	机械打磨之后的表面			1	1	1	1	5	5
FBE#3	GL25	60	72	1	5	5	5	5	5
FBE#3	GL80	40	98	1	1	5	5	5	5
FBE#3	机械打磨之后的表面			1	3	3	5	5	5

表 4 表面处理对 FBE#2 涂层的阴极剥离性能的影响

材料	表面处理			阴极剥离半径 (-1.59 伏, 65°C)	
	钢砂型号	锚纹深度 Rz (μm)	锚纹峰数 个/英寸	14 天	28 天
FBE#2	GL25	62	74	5 mm	16 mm
FBE#2	GL80	40	77	5 mm	23 mm
FBE#2	机械打磨之后的表面			25 mm	完全剥离

磷酸处理是涂敷前对经抛（喷）射除锈之后的钢管表面进行的最流行的一种处理方法。它涉及到在钢管表面上先加上一层酸性溶液的湿膜，允许一定的停留时间以发生蚀刻反应，然后用非常清洁的水来把酸漂洗干净。蚀刻反应有利于解除和化解譬如盐和油脂之类的污垢物，而清洁的水则把这些污垢物冲洗掉，因此可以消除对接收钢管原始表面状态的任何疑虑，保证管材表面的清洁度。蚀刻反应也有利于改善钢管表面粗糙度和微观结构，提高防腐管的整体质量和长期表现。表 5 比较了 FBE #2 涂层在有和无磷酸处理过的钢表面涂敷之后，热水浸泡试验和阴极剥离试验的结果。28 天的短期阴极剥离试验未能检测出明显不同的结果，但长期热水浸泡试验则说明酸处理确实能够大大地改善涂层的附着力性能。

表 5 通过磷酸处理改善表面清洁度对 FBE#2 涂层性能的影响

表面处理 (GL25 钢砂)			阴极剥离半径平均值	Adhesion rating (hot water soak, 75°C)					
有否酸处理	锚纹深度 Rz (μm)	锚纹峰数 个/英寸		2 天 s	28 天	60 天	90 天	120 天	150 天
有	59-66	74-76	16 mm	1	1	1,2	2	2	3
无	54-62	73-75	16.5 mm	1	1	2,3	3	2,3	4

3.3 涂层涂敷温度: 许多报道过的有关 3LPO 管道防腐层失效的问题和 FBE 环氧底漆涂层涂敷温度不当有关⁸。FBE 环氧底漆达到充分的固化度并不自动等于其与基体的附着力也是最佳。常规的 FBE 涂料的最佳涂敷温度范围应为 230 - 240°C。在比其更低的温度下 FBE 也可实现充分固化，但 FBE 在熔融状态下的流动性以及与管体钢表面的浸润度都将缺乏，从而造成固化下的虚假粘结。某些防腐厂家为了达到降低能耗成本、提高 3LPO 防腐层涂敷之后的散热效率进而提高防腐生产速度的目的，常常会在涂敷 3LPO 防腐层里的 FBE 环氧涂层时把钢管加

热温度降低直到 180°C。然而，在这些较低的涂敷温度下，FBE 与基体的最佳附着力和抗腐蚀特性都将发挥不出来，从而导致 3LPO 防腐层的失效。潜在的解决方案曾被建议⁸，比如说，对作为 3LPO 底漆用的粉末环氧涂层的性能指标标准要求与对单层 FBE 管道防腐层的要求同等，和在 3LPO 防腐层涂敷使用被检验证明确实可行的低涂敷温度的粉末环氧（LAT-FBE）配方。本研究在表面处理得当的钢材表面上，于 190 - 200°C 涂敷了一种国际品牌的 FBE 涂料。热水浸泡试验和阴极剥离试验的结果见表 6。本研究还调查了两种 LAT-FBE 涂料和两种常规 FBE 涂料，在 160 和 240°C 间的温度下涂敷之后，进行 28 天 65°C 阴极剥离试验的结果，见表 7。结果表明，除非经过充分检验，证明所用的 FBE 粉末环氧和施工工艺控制确实可适用于较低的钢管加热温度，否则的话，为了确保 3LPO 防腐层的长期性能表现，维持常规的 FBE 涂料的 230 - 240°C 钢管加热温度是有必要的。

表 6 某一常规的 FBE 涂料在 190-200°C 温度下涂敷后的性能检验结果

检验	CSA Z245.20 -2006 标准要求	检验时间和平均结果			
		24 小时	7 天	14 天	28 天
附着力等级 (热水浸泡试验, 75°C)	24 小时和 28 天的 附着力等级为 1-3	1	1,2	2	2
阴极剥离半径 (28 days, 65°C)	<20 mm	未检验	6 mm	14 mm	24 mm

表 7 在不同钢管加热温度下涂敷后的四种 FBE 涂层的阴极剥离半径(65°C, 28 days)

钢管加热温度 °C	LAT FBE 1	LAT FBE 2	常规 FBE 1	常规 FBE 2
160	19 mm	12.75 mm	未检验	未检验
170	20 mm	12.75 mm	未检验	未检验
180	15.5 mm	12.75 mm	17.5 mm	25.75 mm
190	15.25 mm	14.25 mm	未检验	未检验
200	16 mm	14.25 mm	未检验	未检验
240	11 mm	5.0 mm	9.5 mm	11 mm

3.4 焊缝部位的防腐层覆盖度: 油气输送管道工业目前一个发展趋势就是建设越来越多的大口径有焊突面的管线。这对确保管道防腐层在焊缝部位的覆盖度带来了一个挑战，也对防腐层在处理和安装过程中的抗破损能力以及防腐层的长期防腐性能效果影响至关巨大。现有的钢管焊接技术产生的焊缝部位都是凸出管外表面的。一个理想的、适合于接受防腐层的焊缝形状应该余高低、顶部圆和从管体表面有平滑过渡。但是这样的理想的焊缝形状除非是在制管过程中格外增加一道对焊缝打磨的工序否则很难得到。采用传统的 3LPO 涂层侧向缠绕工艺进行施工时，凸出的焊缝容易导致围绕在焊缝颈部有孔洞、涂层分层或者不连续的“帐篷”现象的发生。伴随着“帐篷”现象的同时，焊缝部位的防腐层厚度与管体部位相比严重减薄（如图 5）⁹。在极端情况下，这种厚度降可高达 100%。为确保有足够的防腐层厚度来保护管道，今日大多数的有关 3LPO 防腐层的国际规格，都只允许焊缝部位防腐层只有 0—10% 的厚度降。这项要求对传统的 3LPO 防腐层工艺是一个挑战，特别是对螺旋焊管的防腐层涂敷来说。由于这种情况下实际的防腐层厚度要比规格要求的最低厚度要高出许多，导致生产速度减少、涂料及涂敷成本增加，还可能在聚烯烃涂层中引入严重的高残余应力。这些问题，如图 6 所示，可以通过一种在材料和施工工艺控制都有所创新的多层聚烯烃防腐系统来得以帮助解决⁹。

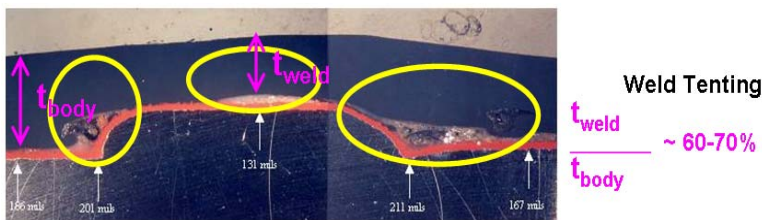


图 5 传统 3LPE 防腐层的“帐篷”现象

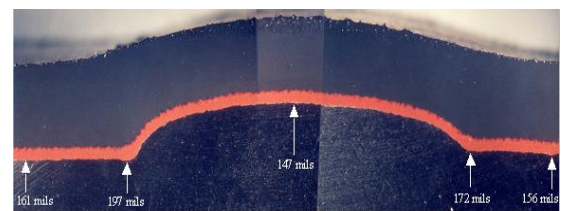


图 6 新的多层聚烯烃防腐层在焊缝部位极好的覆盖度⁹

3.5 防腐管的产品检验: 3LPO 防腐管产品的质量控制 (QC) 检验可以确保防腐层在涂敷施工的每个环节中性能

都能达到可以接受的求，而被该防腐层保护的管道能适用于实际的运营条件。遗憾的是，3LPO 防腐管产品的 QC 检验往往是一个薄弱环节。目前的工业规格里的所主张的一些检验措施，初衷往往是为了对涂敷过程进行一定的验证，可能并不能对防腐层的长期防腐性能进行可靠预测。因此曾有人建议，应当在涂层材料检验和在涂敷生产线做适用性（PQT）试验的时候，就对已“熟化”了的防腐层的所有关键的性能进行很好的考量⁸。图 7 显示了单层 FBE 管道防腐层、双层 FBE 环氧防腐层和新型多层聚乙烯涂层在 95°C 下 3% 的氯化钠溶液浸泡为期 120 天之后的电阻变化。在室温浸泡 120 天之后下，所有这些涂层的电阻都超过上述 10^{10} 欧姆-平方厘米。经过 120 天的浸泡。所有 FBE 涂层 65°C 下浸泡之后电阻没有什么大的变化，但在 95°C 下浸泡 120 天之后的变化极大。即使是 625-750 μm (25-30 mil) 厚的双层 FBE 环氧防腐层，电阻也降到只有 10^8 欧姆-平方厘米，几乎是能起到防腐保护电阻要求的最低下限。而新的多层聚乙烯防腐层则在所有的温度浸泡下电阻值都非常一致。

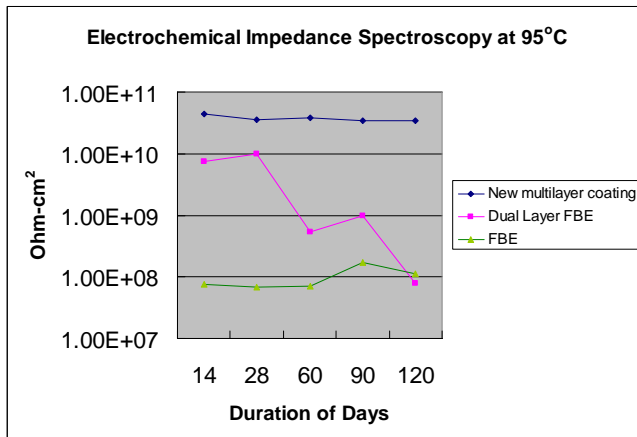


图 7 管道防腐层在 95°C 下的电阻抗

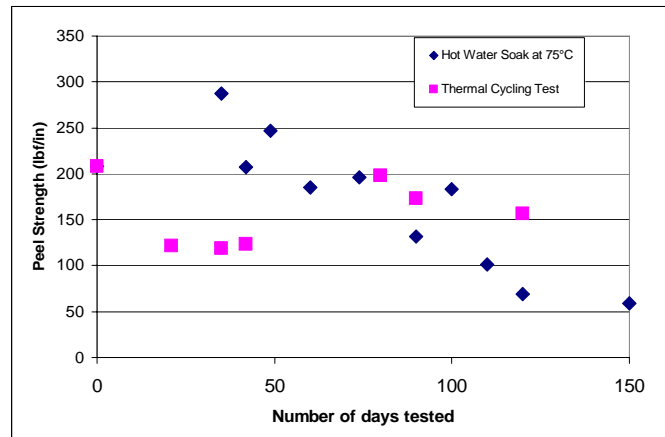


图 8 某一 3LPP 防腐层的粘接力

图 8 显示了某一防腐厂涂敷的 3LPP 防腐层，在为期 150 天的 75°C 的热水浸泡和热循环（16 小时暴露于 75°C 和 99% 相对湿度的环境下再 8 小时暴露于 5°C 和 95% 相对湿度的环境）之后，剥离强度测试的结果。热水浸泡之后该防腐层的剥离强度显著降低，但直到 150 天也没有观察到明显的涂层剥离或脱层现象。经过 120 天的热循环试验之后，在样品的边缘有涂层剥离现象出现，但剥离强度仍然很高，也发现剥离形式为在聚丙烯/胶粘剂的界面上发生的内聚破坏。该 3LPP 防腐层与基体良好的粘接力是由于表面处理得好、而该防腐厂的涂敷工艺控制得当以致于防腐层残余应力达到最低的结果。目前，百劭公司正在世界各地所有的百劭旗下防腐厂里实施一项所谓的“最佳实践涂敷工艺”体系，旨在以优化和规范涂敷过程中的工艺参数，以确保管道防腐层产品的长期性能表现。

4. 中国目前管道防腐层技术标准与国际上的比较

2002 年中国出版了 SY/T 0413-2002《埋地钢质管道聚乙烯防腐层技术标准》行业标准（简称 SY/T），取代其 1995 版。近年来，3LPE 已成为保护中国油气管道占主导地位的防腐层。中国管道工业在防腐层知识和标准方面也都有了长足的进步，从而有了刚刚经过专家讨论通过的《埋地钢质管道聚乙烯防腐层技术标准》国家标准（简称报批稿）。我们把这两个标准与国际的一些标准规范（包括最新出版的 CSA Z245.20/21-2006 标准和国际标准化组织 ISO 21809-1 标准草案和几个重点国际管道工程的规范）进行了比较。表 8 针对与三层聚烯烃防腐涂层的长期性能和有效性相关的一些关键参数，提供了我们的一些反馈意见，供国内同行参考。

5. 结论

- 材料检验和施工工艺控制对三层聚烯烃防腐涂层的长期性能的影响巨大。相关的关键参数包括熔结环氧粉末涂料及其涂层的质量鉴定和施工厚度、表面清洁度和喷钢砂除锈处理之后的表面粗糙度、表面预处理、涂层涂敷过程中的钢管加热温度、焊缝部位的防腐层覆盖度以及防腐管的产品检验等等。

表 8 中国目前管道防腐层技术标准与国际上的比较

序号	范围	标准规范要求	反馈意见
1	材料: FBE 环氧底漆	涂层厚度: SY/T : $\geq 80 \mu\text{m}$; 报批稿: $\geq 120 \mu\text{m}$	加拿大 CSA Z245.21-2006: $\geq 120 \mu\text{m}$. 大多数国际工程: 最低 $150 \mu\text{m}$, 一般常见规范 $200 \mu\text{m}$.
2		性能指标: 粉末密度: 1.3-1.5 胶化时间: $\geq 12 \text{ s}$	没有规定同一牌号的粉末产品密度的公差范围。 国际: 厂家规定的粉末密度的 $\pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ 公差范围; 厂家规定的胶化时间的 20% 公差范围。
3		防腐性能: 附着力: 48 小时 75°C 热水浸泡 48 小时 65°C 阴极剥离 (材料和质检); 30 天 65°C 阴极剥离 (材料)	对于成品的 FBE 的横截面和界面的空孔没有进行测量和要求; 对于成品涂敷好的钢管, 在遭受应变后也没有对涂层进行抗阴极剥离检测。短期的附着力和阴极剥离实验时间太短, 不足以把性能好与不好的粉末环氧涂层检验区别出来。大多数国际工程对作为 3LPO 底漆用的粉末环氧涂层的性能指标标准要求与对单层 FBE 管道防腐层的要求完全同等。
4	材料: 胶粘剂	胶粘剂密度: 0.92-0.95 熔体流动速率: ≥ 0.5 (SY/T) or 0.7 (报批稿)	对具体产品密度的公差范围给得太大。 国际: 厂家规定值的 $\pm 1\%$ 公差范围。
5	材料: 聚乙烯	耐热老化指标为试验前与试验后的熔体流动速率偏差 $\leq 35\%$	对更关键的力学性能没有进行规范。 国际: 达到 65% 的原拉伸强度和 150% 最低的延伸率; 也建议对聚乙烯的肖氏硬度 (Shore D) 和低温延伸率进行测试 ¹⁰ 。
6	材料: 所有	焊缝处的防腐层的厚度不小于规定值的 70%	允许焊缝处的防腐层的厚度降到 30%。 低于世界上绝大多数的技术要求 (厚度不小于规定值的 90%)。
7	适用性: 性能指标	48 小时 65°C 下 和 30 天最高运行温度下的阴极剥离检验	长期的热水浸泡和长期的阴极剥离检验都应进行, 才能把性能好与不好的防腐层检验区别除来。
8	工艺: 钢管预热	管温: 高于露点温度 3°C	对预热温度和测量温度的方法都没有规定。 国际: 严格规定抛丸除锈前的预热必须使用电感应加热的方法, 预热后的温度在 $30-50^\circ\text{C}$ 之间, 以确保在任何相对湿度下管材表面的温度都高于露点温度 5°C 。
9	工艺: 抛丸除锈	质量达到 Sa2 $\frac{1}{2}$ 级要求, 锚纹深度采用粗糙度测量仪或锚纹深度测试纸测量应达到 $50\sim 90 \mu\text{m}$	锚纹深度测试纸不能反映出除锈后表面的棱角粗糙程度。
10	工艺: 表面清洁度	盐份: 没有规定 (SY/T); 不超过 20 mg/m^2 (报批稿)	对酸处理没有要求。 国际: 通常要求进行表面酸处理。
11	工艺: 涂层涂敷温度	SY/T: 将钢管加热到合适的涂敷温度 报批稿: 应对涂敷过程中的钢管加热温度进行连续监测, 钢管的加热温度等工艺参数应符合确定的参数。	对涂敷过程中的钢管加热温度和测试仪器没有具体规定。导致报道的 3LPO 管线防腐涂层失效的一个重要原因就是 FBE 涂敷过程中钢管加热温度过低以及整个钢管表面不合适的温度分布, 从而导致 FBE 在熔融状态下缺乏流动性、与管体钢表面的浸润度, 造成固化下的虚假粘结。现有的常规 FBE 粉末必须在钢管表面温度 $230-240^\circ\text{C}$ 以内施工, 以保证防腐层与基体表面的长期附着力。
12	产品质检: 涂层厚度	每班测量至少一次环氧粉末层厚度; 但不测量胶粘层的厚度	不保证环氧粉末与胶粘层的施工厚度就不能保证整个防腐涂层的施工质量。国际: 建议每班的第一根管或者停工后重新开工的第一根管必须在 3, 6, 9, 12 点位置测量一次环氧粉末与胶粘层的厚度, 不得小于规定的最低值。

- 简单地设计或者认可一个管道防腐层，只求能满足某一国家、国际和公司的标准和规格里短期的检验和最低的要求，未必足以保证用该防腐层进行保护的管道在运行条件下的安全性，也不能保证该防腐层的防腐性能在完成整个涂敷过程之后一定可被接受。
- 应当采用更多地是依赖于确立完整的、可从中看到长期发展趋势的一系列检测数据的办法，来对三层聚烯烃防腐层的材料选择和适用性进行性能检验，也应当落实更好的表面预处理和涂敷工艺控制，优化和规范涂敷施工参数，以确保三层聚烯烃防腐层的长期防腐性能效果。

致谢

作者在此感谢 Catherine Lam 和 Marissa Tan 在本研究中做的一部分实验工作，感谢 Peter Singh 博士分享他有关本课题的优秀知识和经验，也感谢作者所在的劭氏和百劭公司允许本文的发表。

参考文献

1. K.K. Tandon, G.V. Swamy, and G. Saha, "Performance of three layer polyethylene coating on a cross country pipeline – a case study", 14th International Conference on Pipeline Protection, BHR Group, Barcelona, Spain, October 29-31, 2001
2. G. Portesan, J. Taves, and G. Guidetti, "Cases of massive disbondment with three layer PE pipeline coatings", Cathodic Protection and Associated Coatings, CEFRAFOR, EFC Event nr254, Aix-en-Provence, France, June 6-7, 2002
3. C. Argent and D. Norman, "Fitness for purpose issues relating to FBE and three-layer PE coatings", Paper #05034, Corrosion NACEExpo 2005, Houston, Texas, USA, April 3-7, 2005
4. Marcel Roche, Denis Melot, and G. Paugam, "Recent experience with pipeline coating failures", 16th International Conference on Pipeline Protection, BHR Group, Paphos, Cyprus, November 2-4, 2005
5. A.N. Moosavi, S.Al-Mutawa, S.Balboul, and M. Saady, "Hidden problems with three layer polypropylene pipe coatings", Paper #06057, Corrosion NACEExpo 2006, San Diego, USA, March 12-17, 2006
6. B. Chang, H. Jiang, H. Sue, S. Guo, G. StJean, H. Pham, D. Wong, A. Kehr, M. Mallozzi, and K. Lo, "Disbondment mechanism of 3LPE pipeline coatings", 17th International Conference on Pipeline Protection, BHR Group, Edinburgh, UK, October 17-19, 2007
7. V. Sauvant-Moynot, J. Kittel, D. Melot, and M. Roche, "Three layer polyolefin coatings: how the FBE primer properties govern the long term adhesion", 17th International Conference on Pipeline Protection, BHR Group, Edinburgh, UK, October 17-19, 2007
8. C. Argent and D. Norman, "Three layer polyolefin coatings: fulfilling their potential?", Paper #06056, Corrosion NACEExpo 2006, San Diego, USA, March 12-17, 2006
9. C. Lam, D. Wong, R. Steele and S. Edmondson, "A new approach to high performance polyolefin coatings", Paper #07023, Corrosion NACEExpo 2007, Nashville, TN, USA, March 11-15, 2007
10. B. Turner, "Quality and durability of different polyethylene pipe coating solutions?", 17th International Conference on Pipeline Protection, BHR Group, Edinburgh, UK, October 17-19, 2007