

# 输氢管道用阻氢涂层制备及结合力研究

**材料 2102 班：刘盼盼 指导教师：张可人 论文类型：毕业论文**

**摘要：**本文以输氢管道常用材料 X80 钢为例制备阻氢涂层，以 X80 钢为基体，采用浆料法制备了环氧树脂（EP）、氧化石墨烯（GO）及其复合涂层、三氧化二铝（Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）及其复合涂层、改性氧化石墨烯（mGO）及其复合涂层等 14 种阻氢涂层，通过结合力测试与断面形貌分析，筛选最优阻氢涂层。

试验结果表明：EP/GO/EP II型复合涂层表现出优异性能，其破坏强度高达 79.16MPa，为所有涂层中较高结合力涂层，且表面颗粒分布均匀、平整度高，无气泡及“月球坑”状缺陷，断面结构致密，体现了复合固化工艺下的界面结合优势。综上，EP/GO/EP II型复合涂层凭借较高的破坏强度、优良的表面质量及致密的断面结构，成为输氢管道用最优阻氢涂层，为解决氢脆问题提供了可行方案。

**关键词：**输氢管道；阻氢涂层；浆料法；EP/GO/EP II型复合涂层；涂层结合力

## 1 研究背景

在过去的一个世纪，化石燃料作为主要能源被大量开采和使用，导致温室气体的排放增加，寻找一种替代传统化石能源的清洁能源载体变得至关重要。氢作为自然界中最为丰富的元素之一，其来源广泛，且可通过可再生能源进行高效制取，被视为一种清洁、高效、零碳排放的能源载体，具有极高的发展潜力，成为替代传统化石能源的重要选择之一。我国在长距离氢气运输方面，仍以长管拖车为主要方式，管道输氢具有能耗小、运输量大、效率高、维护成本低等突出优点，是极具优势的输氢方式。但在输氢管道的长期运行过程中，由于氢分子与管道内表面持续接触，氢原子会通过吸附、渗透和扩散等机制进入钢材内部，最终在局部区域形成氢分子，导致应力集中并引发氢脆现象。因此如何有效控制氢脆的发生，是保障输氢管道长期稳定运行的关键技术问题之一，然而阻氢涂层通过在金属基材表面构建一层能够有效阻挡氢原子渗透的结构，防止氢及其同位素渗透至金属材料内部，从而延缓或阻止氢脆等有害现象的发生。

## 2 发展现状

为了提升阻氢涂层的性能，通常需要从材料选择和制备工艺两个方面进行优化。目前，研究主要集中在氧化物、硅化物、钛化物、铝化物及有机涂层等五大类材料上。这些材料因其在氢渗透方面的优异表现而被广泛研究和应用。此外，涂层结构也可分为单层涂层和双层/多层复合涂层。传统阻氢涂层材料通过在金属表面形成一层保护膜，能够有效抑制氢的渗透，从而减轻氢对金属材料的腐蚀作用。然而，它

们在实际应用中仍存在一些问题，如阻氢效率较低、涂层与基体结合性差以及寿命较短等，限制了其在复杂工况下的广泛应用。

阻氢渗透涂层的制备方法包括浆料法、化学气相沉积（CVD）、等离子喷涂（PS）、包埋渗铝（PA）和溶胶凝-胶法等。在制备阻氢涂层的过程中，不同研究者所采用的工艺条件和实验方法存在显著差异，即使在相同条件下制备的氧化铝涂层，其阻氢性能也可能相差几个数量级。

### 3 实验材料及方法

#### 3.1 实验材料及方法

本试验使用的基体材料为 X80 管线钢，其化学成分如下表 3-1 所示。

表 3-1 X80 管线钢的化学成分

成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	Nb	V	Mo
wt%	0.063	0.28	1.83	0.011	0.0006	0.03	0.03	0.016	0.061	0.059	0.22

涂层制备技术路线 如下图 3-1 所示

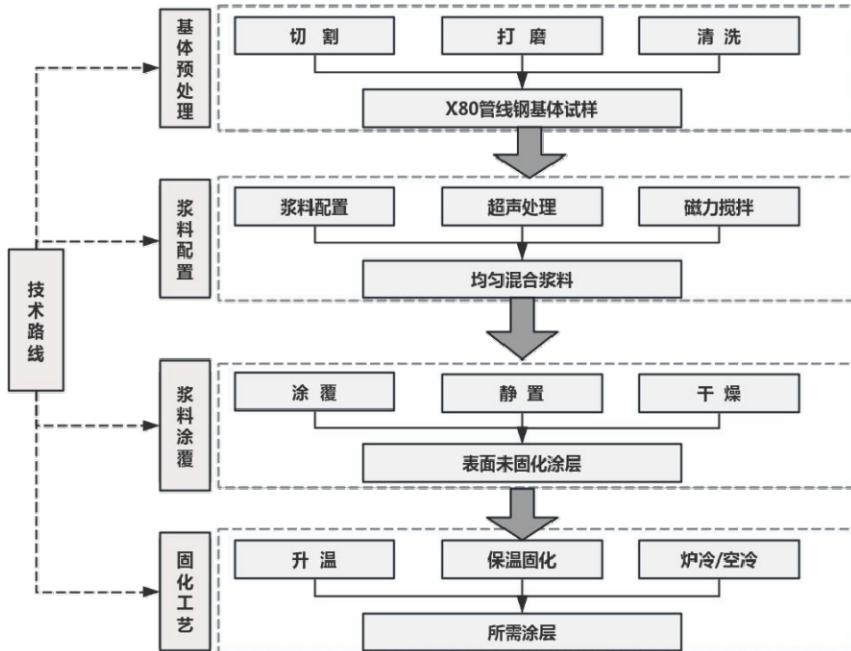
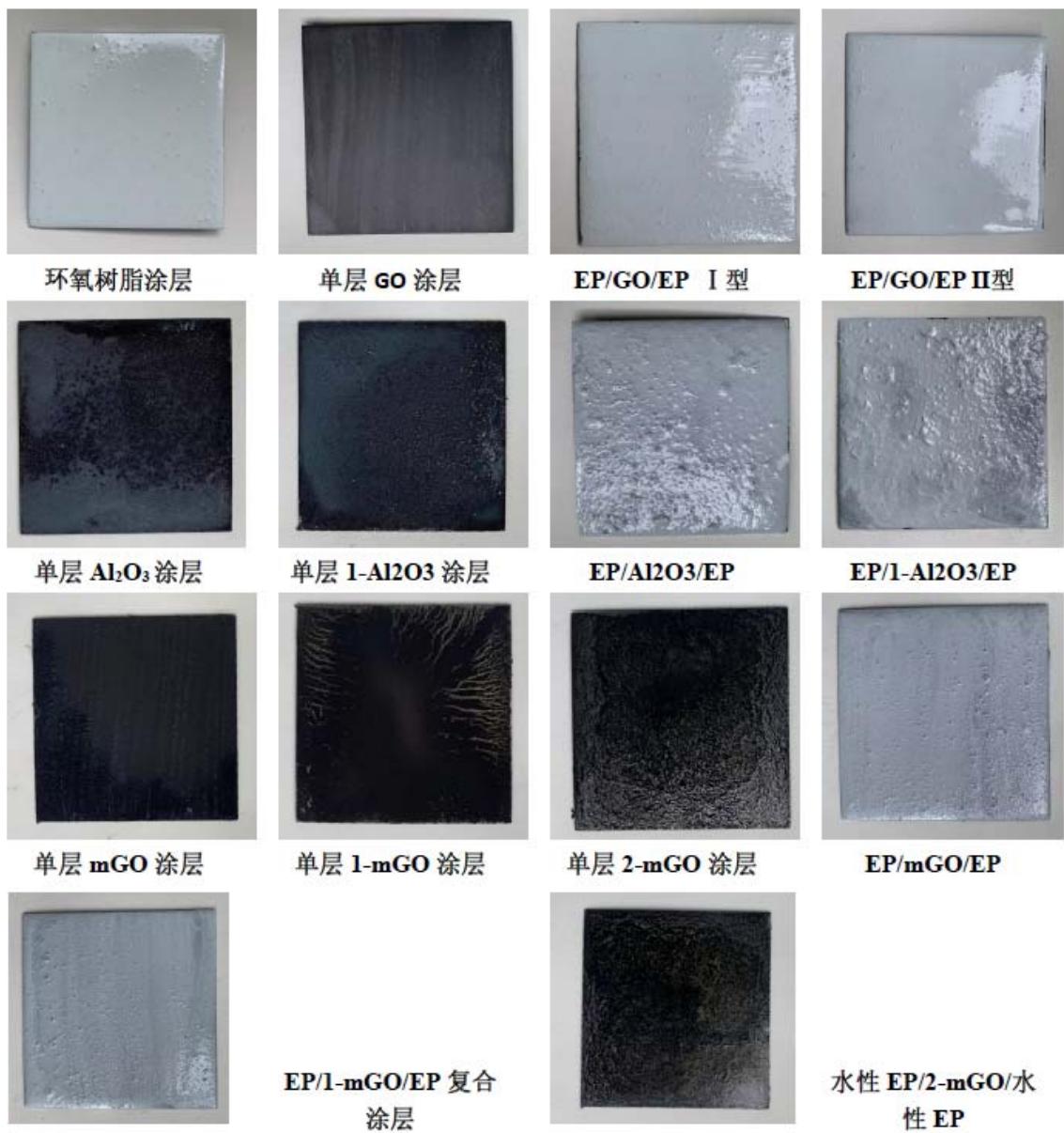


图 3-1 涂层制备技术路线

结合力是反映涂层与基体结合性能是否良好的一个重要参数。一般来说，测试结合力的方法主要有拉伸法、压入法、剪切法、划痕法等。本文采用 EUT5105 型万能试验机，拉伸法来定量测量不同单一涂层以及复合涂层的结合力。

### 3.2 结果与分析

通过浆料法制备如下 14 种涂层：



通过拉伸法测得其结合力及破坏强度如表3-2 所示

表 3-2 涂层结合力

涂层名称	结合力 F (N)	破坏强度 (MPa)
单层 EP 涂层	226.49	7.12
单层 GO 涂层	92.09	2.89
EP/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /EP 复合涂层	121.97	3.83
EP/1-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /EP 复合涂层	95.8	3.00
单层 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 涂层	2864.42	89.99

单层 1-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 涂层	.91	11.50
EP/mGO/EP 复合涂层	910	28.59
EP/1-mGO/EP 复合涂层	1456	45.74
单层 mGO 涂层	168.23	5.29
单层 1-mGO 涂层	81.3	2.55
水性 EP/2-mGO/水性 EP 复合涂层	453.14	14.24
单层 2-mGO 涂层	521.72	16.39

结合表面质量以及与涂层结合力分析, 单层 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层与 EP/GO/EP II型复合涂层为较优选择, 从力学性能来看, 单层 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层 89.99 MPa 为所有涂层中最高, 远超同类涂层 (如单层 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 11.50 MPa), 表明其抗拉伸、与基体结合力能力最强, EP/GO/EP II型复合涂层 79.16 MPa 仅次于单层 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层, 表面其抗拉伸、与基体结合力能力较强。从表面质量及制作工艺来看, 单层 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层强度虽高, 但其表面以及断面都存在颗粒缺陷, 长期使用易因应力集中失效。与此同时, 单层 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层工艺制作较复杂, 固化温度高, 涂层易起皮脱落; EP/GO/EP II型复合涂层不仅与基体结合力较强, 而且表面细腻, 虽有小颗粒但不影响整体平整度, 单层 GO 涂层虽表面质量好, 但其与基体结合力极弱, 附着情况不理想。

#### 4 研究结论

结合表面质量以及与涂层结合力分析, EP/GO/EP II型复合涂层为较优选择, 从力学性能来看, EP/GO/EP II型复合涂层 79.16 MPa 仅次于单层 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层, 远超过同类涂层, 表明其抗拉伸、与基体结合力能力较强。从表面质量及制作工艺来看, EP/GO/EP II型复合涂层不仅与基体结合力较强, 而且表面细腻, 虽有小颗粒但不影响整体平整度。

从断面组织形貌来看, EP/GO/EP II 型复合涂层结构致密性与均匀性最优。EP/GO/EP II型复合涂层的断面颗粒分布均匀, 无气泡、“月球坑”等缺陷, 结构致密, 断裂面积小, 显示其优异的原料分散性和界面结合力。不存在引入环氧树脂产生的界面分层问题, 颗粒边界结合紧密, 应力传递均匀。单层 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的颗粒更明显, 平整度略差, 存在一定的微观缺陷。

综上所述, EP/GO/EP II型复合涂层在力学性能上, 79.16MPa 的破坏强度确保了涂层与基体的结合力以及在其余下的可靠性; 在形貌上, 致密均匀的表面避免了气泡、颗粒等缺陷导致的早期失效; 在工艺上, 条件易控制, 成本与稳定性更优。