

节能环保型无溶剂环氧减阻内涂层技术

——以中俄东线天然气管道工程黑河—长岭段为例

郑安升¹ 黄留群¹ 杨学强² 付伟¹ 王杰¹ 潘怀良¹

1. 中国石油天然气管道工程有限公司 2. 中国石油管道局工程有限公司燃气分公司

摘要：天然气管道涂敷内减阻涂层可以减小涡流区、降低湍流程度、提高输送效率、降低压气站能耗及运行费用。目前国内的涂层以溶剂型涂料为主，溶剂型涂料含有大量挥发的有机溶剂（VOC），不但会对人体健康产生危害，而且还有可能对自然环境造成污染；而无溶剂涂料不含 VOC，各项机械性能和耐化学介质性能都明显优于前者。为了克服无溶剂环氧脆性大、抗弯曲性能差、涂料黏度过高及施工难度大等缺点，从涂料改性和改进喷涂工艺参数两个方面进行了研究，并在中俄东线天然气管道工程试验段开展了验证试验。研究结果表明：①固化剂对涂层的抗弯曲性能影响较大，较之于改性酚醛胺和脂肪族多元胺固化剂，聚酰胺类对增强涂层的抗弯曲性能效果显著；②环氧树脂分子结构的支链越短、分子量越小，黏度越低；③涂层生产宜采用常温下黏度小于 10 Pa·s 的树脂原料，并添加适量的稀释剂；④涂层生产过程中钢管内壁粗糙度宜控制在 30~50 μm，喷涂温度控制在 50~70 ℃，喷涂压力需大于 5 MPa，涂层厚度控制在 65~160 μm，可更好的保证涂层满足工程需求；⑤在中俄东线天然气管道工程中，应用无溶剂环氧减阻内涂层的节能效果显著。结论认为，该研究成果解决了无溶剂环氧涂料的施工以及涂层性能较差的问题，可以为无溶剂环氧减阻内涂层的应用提供技术支持。

关键词：节能；环保；无溶剂环氧减阻；内涂层；固化剂；稀释剂；黏度；中俄东线天然气管道工程

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.10.014

Energy-saving and environmental-friendly solvent-free epoxy drag-reduction coating technology: A case study of the Heihe—Changling section of the China—Russian Eastern Gas Pipeline

ZHENG Ansheng¹, HUANG Liuqun¹, YANG Xueqiang², FU Wei¹, WANG Jie¹, PAN Huailiang¹

(1. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang, Hebei 065000, China; 2. Gas Branch, China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang, Hebei 065000, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 40, ISSUE 10, pp.120-125, 10/25/2020. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Internal drag-reduction coating in gas line pipes can reduce the eddy current area and turbulence degree so as to improve transportation efficiency and reduce energy consumption and operation cost of compressor stations. At present, domestic internal coatings are mostly solvent-based coatings, which contain a lot of volatile organic solvents (VOC), so they not only do harm to personal health, but may pollute the natural environment. The solvent-free coatings contain no VOC, and they are superior to solvent-based coatings in terms of mechanical properties and chemical medium resistance. In order to overcome the shortcomings of solvent-free epoxy, e.g. high brittleness, poor bending resistance, high viscosity and high construction difficulty, this paper studied coating modification and spraying technological parameter improvement and carried out verification tests in the test section of the China—Russian Eastern Gas Pipeline. And the following research results were obtained. First, solidifying agents have greater influences on the bending resistance of coating. And compared with the solidifying agents of modified and aliphatic polyamine, those of polyamide can significantly enhance the bending resistance of coating. Second, the shorter the side chains of the molecular structure of epoxy resin and the smaller the molecular weight, the lower the viscosity. Third, to prepare coatings, it is suitable to adopt the resin with its viscosity less than 10 Pa·s under the atmospheric temperature as the material and add thinning agent appropriately. Fourth, in the process of coating generation, it is necessary to control the roughness of pipeline inner wall in the range of 30–50 μm, the spraying temperature in the range of 50–70 ℃, the spraying pressure higher than 5 MPa and the coating thickness in the range of 65–160 μm, so as to satisfy the engineering requirements better. Fifth, when the internal drag-reduction coating of solvent-free epoxy is applied in the China—Russian Eastern Gas Pipeline, its energy saving effect is remarkable. In conclusion, the research results solve the construction problem of solvent-free epoxy coating, improve its performance and provide the technical support for the application of the internal drag-reduction coating of solvent-free epoxy.

Keywords: Energy-saving; Environment protection; Solvent-free epoxy for drag reduction; Internal coating; Solidifying agent; Thinning agent; Viscosity; China—Russian Eastern Gas Pipeline

基金项目：中国石油天然气集团有限公司重大科技专项“第三代大输量天然气管道工程关键技术研究”（编号：2012E-2801）。

作者简介：郑安升，1980年生，高级工程师，硕士；主要从事长输管道防腐设计方面的研究工作。地址：（065000）河北省廊坊市和平路146号。ORCID: 0000-0002-2526-4788。E-mail: zhengansheng@cnpc.com.cn

0 引言

中俄东线天然气管道（以下简称中俄东线）工程试验段属于黑河—长岭管道的一部分，管线长度约为 78 km，管外径为 1 422 mm，设计输送压力为 12 MPa。由于中俄东线的黑河—长岭段是中国首次大规模采用外径 1 422 mm 的 X80 钢管道，对于现场焊接、防腐、检测、施工规划等内容还需通过工程试验和应用验证，以期为外径 1 422 mm 管道后续大规模应用奠定基础^[1]。借此机会在试验段开展了无溶剂环氧减阻内涂层的设计和试验应用工作。

环氧涂料是天然气管道减阻内涂层的主要原料^[2]，被美国石油学会 API RP 5L2^[3] 标准推荐使用^[4]。目前国内外减阻内涂层基本上都采用以有机溶剂作为分散介质的溶剂型环氧涂料，在涂膜过程中挥发的有机溶剂（VOC）占涂料总重量的 30%～50%，VOC 不但会对人体健康产生危害，而且还有可能对自然环境造成污染^[5]。无溶剂型环氧涂料固化成膜时活性溶剂也参与反应并成为涂膜的组成部分，但在施工过程中没有溶剂挥发，减少了大气中 VOC 的排放量，可以更好地满足环保要求。此外，无溶剂环氧涂料的各项机械性能和耐化学介质性能都明显优于溶剂型环氧涂料，耐磨性、附着力、抗剪切强度等机械性能尤为突出。无溶剂涂料的缺点主要是涂层过厚、

脆性大且抗弯曲性能差、涂料黏度过高及施工不便等。目前国内外都在开发无溶剂减阻内涂层，但均未在工程中大规模应用^[6]。为此，笔者从涂料改性和改进喷涂工艺参数两个方面进行了研究，并在中俄东线工程试验段开展了验证试验，以期克服无溶剂涂料的上述缺点。

1 无溶剂环氧减阻内涂层特点

1.1 无溶剂环氧减阻内涂层的减阻原理

由于管道内壁具有一定的粗糙度^[7]，导致天然气在管道内的流动状态主要以湍流为主，天然气流经管道内壁凸起物就会形成涡流区。管道涂敷内涂层使得涡流区减小、湍流程度降低^[8]，可以提高输送效率、降低压气站能耗运行费用（图 1）。

1.2 无溶剂与溶剂型环氧减阻内涂层对比

无溶剂环氧减阻内涂层相对于溶剂型环氧减阻内涂层主要差别在于：无溶剂涂料在生产和涂敷过程中不需要采用挥发性的有机溶剂作为分散介质，而采用低黏度胺类固化剂和环氧树脂经过交联反应合成的涂层，该涂层具有优异的机械性能和耐化学性能以及良好的防腐性能。无溶剂型和溶剂型环氧减阻内涂层的主要差异如表 1 所示。

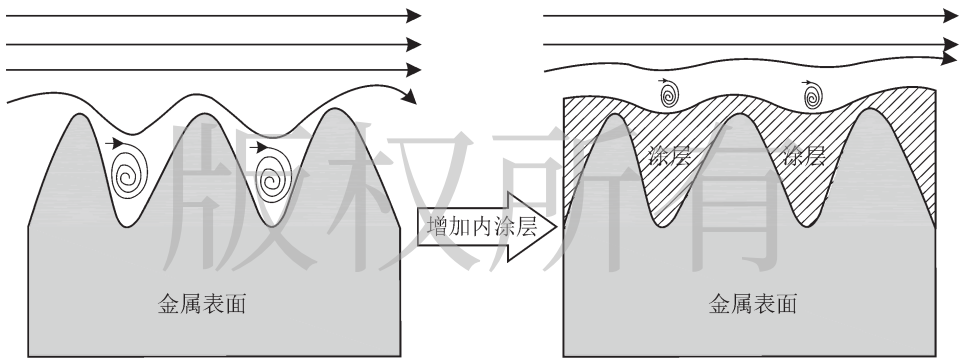


图 1 管道涂敷减阻内涂层的减阻示意图

表 1 无溶剂型和溶剂型环氧内涂层性能对比表

项目	无溶剂型	溶剂型
环保节能	无 VOC	VOC 含量占涂料总重量的 30%～50%
施工安全	无 VOC，对人员无害，且不易发生爆炸	多数有机溶剂都有毒有害，且达到一定浓度易发生爆炸
物理机械性能	耐磨性、耐划伤、抗冲击等性能优异	涂层固化过程中溶剂挥发，涂层不致密，机械性能差
耐化学品性能	涂料固化反应交联密度高，耐化学品性能优异	涂料固化反应交联密度低，耐化学品性能差
防腐性能	涂层致密，防腐性能优异	涂层不致密，防腐性能差
减阻效果	镜面光泽度高 ^[9] ，相对溶剂型可提高 30% 以上	镜面光泽度相对于无溶剂较低

2 无溶剂环氧减阻内涂层技术研究

2.1 减阻内涂层性能试验及材料比选

针对无溶剂减阻内涂层的缺点,在中俄东线设计之前,设计单位联合研究院与涂料生产厂商开展了相关研究和试验工作,致力于解决其脆性大、抗弯曲性差、黏度大以及喷涂施工困难等问题。

2.1.1 固化剂对涂层性能的影响

抗弯曲性能是无溶剂环氧减阻内涂层的一个重要指标,而对抗弯曲性能影响较大的是固化剂。常用的固化剂有聚酰胺、改性酚醛胺、脂肪族多元胺等几种。固化剂的分子结构和化学反应速度对涂层影响较为明显。酚醛胺、脂肪族多元胺由于其自身分子链较短、分子量小、活化期短、反应迅速,所以造成内涂层硬脆性大^[10]。聚酰胺类与环氧树脂反应慢,而且分子量较大、反应活性基团较少,反应产物交联密度低、固化产物柔性好,从而可以增强涂层的抗弯曲性^[11]。故推荐聚酰胺类固化剂作为涂层原材料使用。

2.1.2 黏度对涂层性能的影响

树脂基料、稀释剂以及固化剂都会影响涂料黏度。以上已基于抗弯曲性能选定了固化剂类型,故这里只考虑树脂基料和稀释剂对涂层性能的影响。

环氧树脂的黏度与其分子结构和分子量有直接关系,支链越短、分子量越小,黏度越低,因此应选择支链较短、分子量较小的树脂原料。根据中国石油天然气管道科学研究院实验研究,推荐使用常温下黏度小于 10 Pa·s 的树脂原料。稀释剂是一种与树脂混溶性良好的液体物质,添加稀释剂可以改善树脂的工艺性能,并降低树脂黏度。但稀释剂的添加要适量,过量稀释剂会造成涂层性能下降,不添加稀释剂则会造成树脂黏度过大而无法施工。

2.1.3 试验结果

根据上述固化剂和树脂黏度的推荐结果,选择 5 个生产厂家(A、B、C、D、E)的无溶剂环氧涂料进行外观、黏结力、抗弯曲和剥离性能实验室测试,测试结果均满足要求(表 2)。

2.1.4 涂料与涂层的技术指标要求

鉴于 5 个厂家的涂料都可满足黏结力、抗弯曲和剥离性能的测试要求,解决了其脆性大、抗弯曲性差的缺点。在此基础上并结合 SY/T 6530—2010^[14]的相关要求,制订了无溶剂环氧涂料以及涂层综合性

表 2 减阻内涂层测试结果表

测试项目	外观	黏结力 ^① /MPa	抗弯曲 ^②	剥离 ^③
测试要求	光滑平整	≥ 8.00	无剥落或开裂	成片剥落,不以条状刮去,搓捻成粉状
生产厂家 A	光滑平整	8.26	通过	通过
生产厂家 B	光滑平整	9.83	通过	通过
生产厂家 C	光滑平整	10.05	通过	通过
生产厂家 D	光滑平整	11.67	通过	通过
生产厂家 E	光滑平整	9.52	通过	通过

注:①试验方法按 GB/T 5210—2006^[12];②试验方法按 ASTM D522^[13];③试验方法按 SY/T 6530—2010^[14]。

能指标(表 3、4)。按照该指标要求完成了无溶剂环氧内涂层钢管的工厂试制,并通过了中国石油管道研究院第三方实验室检验。这些试制的钢管已用于中俄东线天然气管道工程试验段。在管道施工现场,除个别钢管因内涂层过厚导致钢管冷弯过程中涂层开裂的情况外,其他试制的钢管在试验段应用良好,为后续在中俄东线黑河—长岭段中大规模应用奠定了基础。

表 3 稀释后涂料的物理性能要求表

试验项目	验收指标	试验结果	试验方法
流动性	在涂敷于垂直表面时无不均匀现象	通过	10℃、37℃和 66℃喷涂在钢表面以形成最小 76 μm 的干膜
适用期	10 min, 55℃±5℃, 250 g 样品,黏度值最大增加 100%	通过	GB/T 9751.1—2008 ^[15]
黏度 / (Pa·s)	25℃±1℃时,小于等于 10	8.9	GB/T 2794—2013 ^[16]

2.2 无溶剂环氧减阻内涂层喷涂要求

溶剂型环氧涂料由于其含有机溶剂、黏度低、流动性好,一般喷涂压力约 3.2~4.0 MPa。无溶剂环氧涂料的流动性差,加热后一般喷涂压力约 5 MPa。一般防腐厂配备的国产喷涂机最大喷涂压力可达 6 MPa,配备的国外喷涂机最大喷涂压力可达到 7 MPa,完全可以实现无溶剂环氧减阻内涂层的喷涂。无溶剂型环氧减阻内涂层钢管喷涂的工艺流程如图 2 所示。

由于无溶剂型涂料比溶剂型涂料黏度大,喷涂

表 4 钢管减阻内涂层的性能指标要求表

试验项目	验收指标	试验结果	试验方法
盐雾试验	涂层应无起泡，拉拔撕裂长度小于或等于 3.2 mm	1.6 mm	SY/T 6530—2010 ^[14]
水浸泡	距试样边缘 6.3 mm 以内无起泡	无起泡	碳酸钙饱和溶液，100% 浸泡，室温，21 d
体积 1：1 的水与甲醇混合液浸泡试验	距试样边缘 6.3 mm 以内无起泡	无起泡	100% 浸泡，室温，5 d
剥离	应成片剥落，不应被以条状刮去，搓捻应成粉状颗粒	通过	SY/T 6530—2010 ^[14]
弯曲	目视检查，试片涂层应无剥落或开裂	通过	ASTM D522 ^[13]
附着力	除切口处其他位置不得有任何剥离	通过	SY/T 6530—2010 ^[14]
硬度	25 ℃ ±1 ℃ 时，大于或等于 94	96	ISO 2815 ^[17]
气压起泡	无起泡	无起泡	SY/T 6530—2010 ^[14]
磨损系数 /(L · μm ⁻¹)	最小磨损系数 0.91	1.06	ASTM D968 ^[18]
水压起泡	无起泡	无起泡	SY/T 6530—2010 ^[14]
镜面光泽度	Cardiner 60° 光泽仪测取的涂层光泽大于或等于 50	76	ASTM D523 ^[19]
剪切强度 /MPa	≥ 5	6.2	GB/T 7124—2008 ^[20]
黏结力 /MPa	≥ 8，内聚破坏	9.73	GB/T 5210—2006 ^[12]

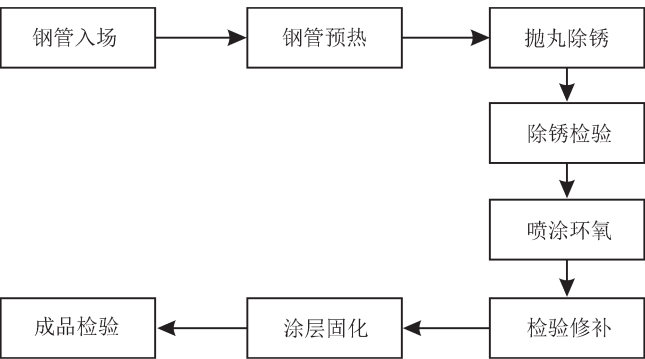


图 2 无溶剂型环氧减阻内涂层喷涂工艺流程图

成膜较厚，正常喷涂成膜厚度约 100 μm，很难像溶剂型环氧涂料那样均匀喷涂 65 μm 而不产生漏点。因此，需要对原溶剂型环氧喷涂生产工艺的工序参数进行调整，重点关注以下几方面内容。

2.2.1 表面处理

钢管表面除锈等级应达到 GB/T 8923.1—2011^[21] 规定的 Sa2.5 级，表面粗糙度应为 30 ~ 50 μm。将平滑的钢管表面除锈会增大表面粗糙度，从而增加涂料与管内壁接触面积，达到提高涂层与管内壁间黏结力的目的。因涂层最小厚度为 65 μm，故表面粗糙度必须小于 65 μm。按内涂层喷涂作业的设计要求，除锈后钢管内壁粗糙度应控制在 30 ~ 50 μm 范围内。

除锈后钢管内表面的灰尘度不应低于 GB/T

18570.3—2005^[22] 规定的 2 级。按金相学理论，经过处理的钢管表面能量不稳定^[23]，有向稳定平衡状态转化的趋势，而且可以通过吸引涂料粒子来趋向稳定，从而提高涂料和钢管表面的黏结力。但钢管内表面夹杂灰尘会降低涂层黏结力，所以合理控制钢管表面的灰尘度非常重要。为了提高灰尘度等级，应该加大表面清洁度的检测频次。对中俄东线试验段，要求每 50 根管抽检 1 根，不足 50 根按 50 根计。

2.2.2 温度

控制适当的涂料黏度对喷涂作业至关重要。涂料黏度太大会造成喷涂困难或者在涂层中产生气泡或针孔；涂料黏度太低会造成喷涂过快，涂层成型差，流挂严重。温度对黏度影响较大，所以喷涂时应严格控制温度，通常喷涂时需对涂料加热，温度控制在 50 ~ 70 ℃ 为宜^[24]，也可通过工艺评定确定喷涂温度。

2.2.3 厚度

厚度是控制涂层质量的重要指标之一，在过程检验和成品检验中都需检验厚度。厚度缺陷主要表现为厚度不足。由于生产工艺的限制，控制涂层厚度完全一致是不现实的，通常标准规范只要求沿圆周方向均匀测试若干点，其平均厚度达标即可，但这往往会造成局部涂层过厚导致弯曲开裂现象，试验段就曾发生现场钢管冷弯造成涂层开裂的情况。为此，应规定涂层的厚度上限。本试验段涂层厚度的设计要求为 65 ~ 160 μm。

2.3 节能效果

由于中俄东线黑河—长岭段工程全线采用内涂层, 管道内壁粗糙度降低, 管道摩阻减小, 使得压气站压缩机的功率减小, 压气站的投资降低^[25-27], 考虑内涂层投资后, 建设投资仍然低于无内涂层方案, 并且每年运行费用节省 15 271 万元, 具体如表 5 所示。

表 5 两种方案投资及运行费用对比表

参数	两种方案	
	无溶剂环氧内涂层	无内涂层
长度 /km	715	715
设计年输量 / 10^8 m^3	380	380
设计压力 /MPa	12	12
管外径 /mm	1 422	1 422
内壁粗糙度 / μm	10	30
压气站数量 / 座	4	4
压缩机配置	首站: 电驱 20 MW (3+1 台) 其他 3 站: 电驱 15 MW (3+1 台)	首站和第 2 个站: 电驱 20 MW (3+1 台) 第 3 个站和末站: 电驱 17 MW (3+1 台)
年耗电量 / ($10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$)	15.44	18.10
压气站投资	325 152	342 283
建设内涂层投资	10 626	0
投资 / 其他投资 万元	14 040	14 040
总计	349 818	356 323
年运行费用 / 万元	97 465	112 736
费用现值 / 万元	1 337 929	1 503 139

3 中俄东线大规模应用情况

经过中俄东线试验段的试制和现场成功应用, 无溶剂环氧内涂层在后续的中俄东线黑河—长岭段成功应用 637 km, 目前项目已经投产运行; 在中俄东线长岭—永清段成功应用 1 110 km, 目前项目正在施工; 在中俄东线永清—上海段成功应用 1 237 km, 目前已完成初步设计。

4 结论

1) 无溶剂环氧内涂层在中俄东线天然气管道工程试验段获得成功应用, 开创了无溶剂环氧内涂层在输气管道工程中大规模应用的先河。

2) 无溶剂型环氧涂料的安全环保性及各项性能

指标优于溶剂型环氧涂料。

3) 无溶剂环氧内涂层已推广应用至中俄东线天然气管道工程全线, 也可推广应用于其他新建输气管道。

4) 鉴于目前国家对环境保护的要求日益严格, 溶剂型涂料会被逐步淘汰, 无溶剂涂料在管道内涂层领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 张圣柱, 程玉峰, 冯晓东, 等. X80 管线钢性能特征及技术挑战 [J]. 油气储运, 2019, 38(5): 481-495.
ZHANG Shengzhu, CHENG Yufeng, FENG Xiaodong, et al. Performance characteristics and technical challenges of X80 pipeline steel[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(5): 481-495.
- [2] 钱成文, 刘广文, 王武, 等. 天然气管道的内涂层减阻技术 [J]. 油气储运, 2001, 20(3): 1-5.
QIAN Chengwen, LIU Guangwen, WANG Wu, et al. Drag reduction technology of internal coating in gas transmission pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2001, 20(3): 1-5.
- [3] American Petroleum Institute. Recommended practice for internal coating of line pipe for non-corrosive gas transmission service: API RP 5L2[S]. Washington DC: API, 2012.
- [4] 刘小利, 孙晶, 周号, 等. 大口径热煨弯管减阻内涂层 [J]. 油气储运, 2011, 30(3): 234-235.
LIU Xiaoli, SUN Jing, ZHOU Hao, et al. Drag reduction inner coating for heavy hot bending elbows of gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2011, 30(3): 234-235.
- [5] 沈远, 刘京雷, 侯峰. 无溶剂环氧涂料在油气管道内涂层中的应用 [J]. 上海涂料, 2013, 51(5): 18-21.
SHEN Yuan, LIU Jinglei, HOU Feng. Application of solventless epoxy coatings on internal coating of oil and gas pipelines[J]. Shanghai Coatings, 2013, 51(5): 18-21.
- [6] 崔灿灿, 郭晓军, 林竹, 等. 无溶剂内减阻耐磨涂料的研究与分析 [J]. 特种功能涂料, 2017, 20(9): 12-14.
CUI Cancan, GUO Xiaojun, LIN Zhu, et al. Research and analysis of solvent-free internal flow-efficient and wearproof coating[J]. Special Functional Paint, 2017, 20(9): 12-14.
- [7] 王琴, 李昂, 谢萍, 等. 天然气减阻剂开发应用现状及研究展望 [J]. 油气田地面工程, 2018, 37(10): 6-9.
WANG Qin, LI Ang, XIE Ping, et al. Development and application status and research prospects of natural gas drag reduction agents[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2018, 37(10): 6-9.
- [8] 张兴水, 曹杰. 输气管道减阻内涂层与减阻剂应用现状及效益分析 [J]. 油气储运, 2013, 32 (6): 675-678.
ZHANG Xingshui, CAO Jie. Application and economic benefits of internal drag reduction coating and DRA in gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(6): 675-678.
- [9] 杨继平, 毛浓召, 杜华, 等. 输气管道内壁无溶剂内减阻环氧涂层的应用研究 [J]. 焊管, 2015, 38(1): 33-37.
YANG Jiping, MAO Nongzhao, DU Hua, et al. Study on the

- application of solvent-free inner resistance-reducing epoxy coating used in gas pipeline internal wall[J]. Welded Pipe and Tube, 2015, 38(1): 33-37.
- [10] 刘成楼. 无溶剂环氧输油气管内低表面处理防腐减阻涂料的研制[J]. 中国涂料, 2014, 29(4): 58-62.
- LIU Chenglou. Development of solvent-free epoxy anticorrosive resistance-reducing coatings for invert surface treatment of oil pipes[J]. China Coatings, 2014, 29(4): 58-62.
- [11] 曹鹏. 无溶剂内减阻涂料的研发和应用[D]. 西安: 西安石油大学, 2013.
- CAO Peng. Research and application of solvent-free internal drag reducing coatings[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2013.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 色漆和清漆 拉开法附着力试验: GB/T 5210—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. Paints and varnishes. Pull-off test for adhesion: GB/T 5210-2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [13] American Society of Testing Materials. Standard test methods for mandrel bend test of attached organic coatings: ASTM D522[S]. West Conshohocken: ASTM, 2017.
- [14] 国家能源局. 非腐蚀性气体输送用管线管内涂层: SY/T 6530—2010[S]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- National Energy Administration. Internal coating of line pipe for non-corrosive gas transmission service: SY/T 6530-2010[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 色漆和清漆 用旋转黏度计测定黏度: 第1部分 以高剪切速率操作的锥板黏度计: GB/T 9751.1—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. Paints and varnishes. Determination of viscosity using rotary viscometers. Part 1: Cone-and-plate viscometer operated at a high rate of shear: GB/T 9751.1-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 胶粘剂粘度的测定 单圆筒旋转粘度计法: GB/T 2794—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. Determination for viscosity of adhesives. Single cylinder rotational viscometer method: GB/T 2794-2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [17] International Organization for Standardization. Paints and Varnishes. Buchholz indentation test: ISO 2815[S]. Geneva: ISO, 2013.
- [18] American Society of Testing Materials. Standard test methods for abrasion resistance of organic coatings by falling abrasive: ASTM D 968[S]. West Conshohocken: ASTM, 2017.
- [19] American Society of Testing Materials. Standard test method for specular gloss: ASTM D 523[S]. West Conshohocken: ASTM, 2018.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 胶粘剂 拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料): GB/T 7124—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. Adhesives. Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies: GB/T 7124-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定: 第1部分 未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级: GB/T 8923.1—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Visual assessment of surface cleanliness. Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings: GB/T 8923.1-2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的评定试验: 第3部分 涂覆涂料前钢材表面的灰尘评定(压敏粘带法): GB/T 18570.3—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Tests for the assessment of surface cleanliness. Part 3: Assessment of dust on steel surface prepared for painting (pressure-sensitive tape method): GB/T 18570.3-2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [23] 崔超, 刘忠胜, 陈明, 等. 内减阻技术简述及涂层缺陷与对策[J]. 现代涂料与涂装, 2007, 10(7): 50-52.
- CUI Chao, LIU Zhongsheng, CHEN Ming, et al. Problems existed in resistance—Reducing internal coatings and countermeasures Thereof[J]. Modern Paint & Finishing, 2007, 10(7): 50-52.
- [24] 徐腊梅, 吴世杰, 娄月霞, 等. 钢管无溶剂内减阻涂层的制备工艺研究[J]. 焊管, 2018, 41(5): 44-47.
- XU Lamei, WU Shijie, LOU Yuexia, et al. Preparation technology research of non-solvent interior friction-reduction coating for steel pipe[J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(5): 44-47.
- [25] 刘广文, 于树青, 张琦, 等. 天然气管道内涂层减阻技术经济评价[J]. 石油规划设计, 2006, 17(5): 28-32.
- LIU Guangwen, YU Shuqing, ZHANG Qi, et al. Economic assessment of anti-drag technology for internal coating of gas pipeline[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2006, 17(5): 28-32.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 输气管道工程设计规范: GB 50251—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Code for design of gas transmission pipeline engineering: GB 50251-2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [27] 胡士信, 廖宇平, 王冰怀. 管道防腐层设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- HU Shixin, LIAO Yuping, WANG Binghuai. Handbook of pipeline coating designing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.