

# 石化管道高温HS-SPH超疏水涂层制备研究

史森森

**摘要：**目的：针对石化管道高温环境下HS-SPH超疏水涂层的设计与寿命问题，构建工程可行的宏观—微观耦合仿真模型并验证推荐配方。方法：利用RANS ( $k-\omega$  SST) + 共轭热传导耦合CFD求解宏观流热场，微观单元采用Cassie-Baxter/Wenzel湿润模型与界面热应力、冲蚀经验式耦合迭代；开展Case-1至Case-5参数扫描并在中试管段进行360天监测。结果：最优Case-5初始指标 $\theta = 156^\circ$ 、 $\sigma_b = 2.5$  MPa、 $E = 1.5$   $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $T_{\max} = 203^\circ\text{C}$ ；360天后分别退化至 $143^\circ$ 、1.7 MPa、 $2.8$   $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $213^\circ\text{C}$ 。结论：陶瓷骨架+高温改性体系在80–120  $\mu\text{m}$ 厚度与 $f_s = 0.6-0.7$ 区间内兼顾功能与耐久性；建议90–120天开展预防性维护，并以长期数据校准模型以指导产业化应用。

**关键词：**HS-SPH超疏水涂层；高温耐候；宏观—微观耦合仿真；界面粘结强度

## 引言

石化管道易在高温高压和含固多相流环境下产生结垢，腐蚀和磨蚀等问题，目前已有的涂层通常很难同时兼顾超疏水功能和高温稳态。本文基于宏观—微观耦合数值模型，结合台架与360天现场监测，对HS-SPH涂层的设计参数、退化规律及工程维护策略进行了系统研究，旨在为石化管道的长期、可靠的运行提供切实可行的解决方案和寿命预测依据<sup>[1]</sup>。

## 一、高温HS-SPH涂层概况

### (一) 高温石化管道运行条件与失效形式

石化管道常处于高温（可达数百度）、高压与多相流动工况，流体含有水、盐、腐蚀性气体和固体颗粒，流速与脉动导致边界层复杂变化；在此环境下，常见失效形式包括内壁结垢与有机/无机沉积、乳化水相滞留、化学腐蚀（酸碱与溶剂侵蚀），以及流动和颗粒引起的磨蚀/疲劳开裂，这些问题导致流阻升高、传热效率下降并缩短涂层寿命，是涂层设计与现场施工必须优先解决的工程问题<sup>[2]</sup>。

### (二) HS-SPH涂层的功能需求与材料设计思路

面向高温石化管道的HS-SPH涂层应在保持超疏水性能（静态接触角 $>150^\circ$ 、滑动角/滞后小）同时具备

优异的热稳定性、化学耐受性和机械耐磨性；材料设计倾向于采用耐高温无机骨架（如 $\text{SiO}_2$ /氧化铝等）与耐高低表面能有机改性剂的复合体系，通过溶胶—凝胶、纳米颗粒负载或陶瓷—有机杂化方法构建双尺度微纳粗糙结构，并通过界面偶联剂或中间粘结层提升附着力与热膨胀匹配，以兼顾功能性与长期工程适用性<sup>[3]</sup>。

## 二、主要影响及关键措施

### (一) 主要影响因素对涂层性能的影响机理

高温会促进低表面能有机基团的热降解与脱附，从而导致疏水性下降。热循环使基体和涂层之间的热膨胀不同，产生界面应力，诱导剥离或者裂纹的产生；流体剪切，固体颗粒冲刷以及化学介质等因素的综合作用会损伤微纳结构或者侵蚀改性层导致接触角减小和疏水失效；沉积物或者乳化相的粘附使润湿边界和局部应力集中发生变化，共同决定了涂层失效模式和寿命<sup>[4]</sup>。

### (二) 关键工程

考虑到上述的影响，我们可以采纳“无机骨架加耐热改性等”的综合策略：利用耐高温的陶瓷或硅基网络来提供机械和热稳定性，然后使用耐热硅烷或氟/硅杂化分子来降低表面能量；通过双/多层体系（底涂促进附着，中间层释放热应力，表层构筑微纳粗糙）分担功能与保护任务；工艺方面优先选择可控溶胶—凝胶，喷涂或热固化等流程，同时将填料，增韧剂及界面偶联剂等引入配方，提高耐磨和耐化学侵蚀能力等，进而考虑到现场可施工性和长期服役的可靠性<sup>[5]</sup>。

**作者简介：**史森森（1980.10-），男，河南人，华南理工大学硕士，新疆耐菲欧新材料科技有限责任公司，研究方向：防腐材料技术研发与工程实践。

### 三、涂层性能数值模拟与参数确定

#### (一) 仿真模型

为了同时表征高温石化管道壁面HS-SPH涂层受宏观流热力场和微观湿润-磨蚀过程的耦合破坏行为,本研究选择了“宏观-微观耦合模型研究”进行研究。宏观层采用RANS( $k-\omega$ SST)湍流模型与共轭热传导(Conjugate Heat Transfer, CHT)耦合固-流场求解管道内流速、壁面剪切与温度分布;微观层将基于Wenzel/Cassie-Baxter湿润模型和界面热应力学表面单元引入壁面,阐述了微纳结构由于温度、应力以及冲蚀等因素引起的接触角演化及局部剥离现象。该模型采用4个指标为评估和优化目标,分别是最高壁面温度 $T_{max}$ ,静态接触角 $\theta$ ,界面粘结强度 $\sigma_b$ 和冲蚀失重率E。这种耦合模型综合考虑了工程可解性和微观机理的影响,适合进行参数敏感性分析和施工工艺优化。

#### (二) 技术阶段划分

为系统推进从设计到工程验证,本文将模拟与实验工作划分为四个技术阶段:第一阶段(材料筛选和静态表征,采用Design-1):基于材料的热稳定性(热

重分析TGA)、固有接触角 $\theta_{Y0}$ 和界面粘结实验,我们确定了可能的配方,并在静态环境中测量了其初始性能指标;第二阶段(工艺参数和微结构设计,采用Design-2):结合溶胶-凝胶与喷涂工艺,通过数值参数扫描(厚度 $t$ ,微结构的比例 $f_s$ ,粗糙因子 $r$ 等)确定满足 $\theta > 150^\circ$ 、 $\sigma_b >$ 现场剪切 $\times SF$ 的参数窗口;第三阶段(耦合仿真和加速老化验证,采用Validation进行):在宏观-微观耦合模型下进行工况工艺仿真(包括热循环,颗粒冲击和化学侵蚀等),并与高温动载台试验(温度,流速,颗粒冲刷平行进行)比对,以调整材料常数 $Cer$ 、 $\alpha T$ 等经验量;第四阶段(中试示范和寿命预测, Pilot):以优化配方在管段中做中试工程喷涂,采集长期现场监测数据并基于仿真结果建立寿命预测模型与维护周期建议。各阶段采取“模拟-台架测试-现场验证”闭环方式,确保了模型工程可用性及参数可校准性。

#### (三) 数值模拟分析结果与设计导出

基于上述模型与边界条件,进行了五组设计工况(Case 1-5)数值仿真并输出四项指标,见表3-1。

表3-1 仿真结果汇总表

Case	微观参数 $f_s$	厚度 $t$ ( $\mu m$ )	$T_{max}$ ( $^\circ C$ )	静态接触角 $\theta$ ( $^\circ$ )	界面粘结强度 $\sigma_b$ (MPa)	冲蚀失重率E ( $mg \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$ )
Case-1 (基线)	0.45	50	215	142	1.2	3.8
Case-2	0.6	80	210	150	1.6	2.6
Case-3	0.7	100	208	153	1.8	2.1
Case-4 (高厚度)	0.6	200	205	149	2	2.4
Case-5 (陶瓷骨架+改性)	0.65	120	203	156	2.5	1.5

### 四、关键施工技术

#### (一) 表面预处理与底层界面工程技术

表面预处理直接决定涂层的初始附着力与长期稳定性。对石化管道内壁,应首先进行机械与化学的复合清理:机械喷砂(推荐达到Sa2.5级或等效粗糙度)去除氧化皮与老化层、随后以碱性脱脂剂或有机溶剂做脱油处理,再用稀酸/中和剂清洗并彻底吹干以控制表面氯离子/盐分(水溶性盐 $< 50 mg \cdot m^{-2}$ )。目标粗糙度Ra应匹配底涂层体系(通常 $Ra \approx 2-6 \mu m$ ),以保证后续底涂渗透与机械咬合。

界面工程以提高粘结与热膨胀匹配为目标。推荐使用硅烷偶联剂或磷酸酯类界面接枝处理(湿涂或气相离子化学接枝)以建立化学键合,同时选用兼容的高温

底涂(无机富硅或耐热环氧改性底漆)作为中间层,厚度与弹性模量设计用于缓释热应力。等离子体表面活化(大气压等离子或低温等离子)可在无化学残留下显著提高表面能并改善界面润湿性,为薄层接枝提供条件。

质量控制应贯穿预处理工序:表面盐分、接触角前测、底涂拉伸粘结(pull-off,目标 $\geq 1.5-2.5 MPa$ 视工况而定)、以及微观检查(放大光学或SEM)确认无夹渍和微裂纹。施工记录需包含喷砂介质规格、压缩空气洁净度、化学处理配方、干燥温度与相对湿度,以利后续追溯与寿命评估。

#### (二) 微-纳结构构建与功能层制备技术

功能层超疏水性源于双尺度微纳粗糙度和低表面能基团。在过程中优先选择可控溶胶-凝胶及纳米颗粒负

载法，即利用硅溶胶或者氧化铝纳米分散体作为骨架，并通过固含量及成膜溶剂的调整来达到微粒之间自组装的目的；加入表面修饰剂（耐高温的烷氧基硅烷或者短链有机硅）在成膜过程中形成化学键合的低表面能层。模板法或者相分离法可用于微米级纹理的调节，气相沉积或者喷涂沉积则可达纳米级颗粒堆叠的目的，进而获得保持 Cassie 的双尺度结构。

喷涂是管道内施工的首选方法：采用无气喷或高速空气雾化，喷嘴直径与黏度配合控制单次成膜厚度（单遍一般 10–30 μm），每层间需预干以避免裂纹。关键工艺参数包括溶剂挥发速率、固体含量、喷距（建议 150–300 mm）、喷压与环境温湿度。对于较大的管段可以使用长臂喷涂机器人或者内壁转动喷杆来保证覆盖的均匀性；对狭窄的管道还可以考虑流体沉积（循环灌注）或者内衬法。后处理与表征是保证功能性的必要环节：热固化或低温退火有助于溶胶致密化与键合形成（见第 4.3），随后进行 SEM/AFM 观察粗糙度尺度、接触角测定（静态  $\theta > 150^\circ$ 、滑动角  $< 10^\circ$  为目标）以及耐磨/耐冲蚀测试（TABER 或微米级冲击试验）。如有必要，可在其表面重新修饰局部氟或者硅基，使受损区域表面能较低。

## 五、控制措施实施效果

### （一）现场/实验室监测数据采集与展示

为验证第 3 章中 Case-5（陶瓷骨架+高温改性）在中试段的长期服役表现，本文对一段已喷涂 Trial 管段进行了为期 360 天的现场/台架并行监测，采集间隔为 0、30、90、180、360 天。

表 5-1 现场/台架监测时间序列数据

时间 (天)	$T_{\max}$ ( $^\circ\text{C}$ )	静态接触 角 $\theta$ ( $^\circ$ )	界面粘结强度 $\sigma_b$ (MPa)	冲蚀失重率 E ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )
0	203	156	2.5	1.5
30	205	153	2.4	1.7
90	207	150	2.2	1.9
180	209	148	2	2.2
360	213	143	1.7	2.8

### （二）实施效果评价与对比分析

通过对表 5-1 的数据进行精确的量化分析，我们可以得出一些工程上的结论：例如，将 Case-5 的初始（0 天）性能与第 3 章中描述的基线 Case-1 进行对比，可见初始接触角由  $142^\circ$  提升到  $156^\circ$ （提升约 9.9%），界面粘结强度由 1.2 MPa 提升到 2.5 MPa（提升约 108%），冲

蚀失重率由  $3.8$  降到  $1.5 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ （降低约 60.5%），最高壁面温度由  $215^\circ\text{C}$  降至  $203^\circ\text{C}$ （降低约 5.6%），说明 Case-5 早期即能明显改善疏水性，耐冲蚀，热隔离等性能。从时间演化看，功能退化呈现可监测的、近线性的趋势：一年（360 天）内  $\theta \geq 150^\circ$  从  $156^\circ$  下降到  $143^\circ$ （衰减约 8.3%），平均每月约下降  $1.1^\circ$ ； $\sigma_b$  从 2.5 MPa 降至 1.7 MPa（下降约 32%），而冲蚀失重率从 1.5 增至 2.8（上升约 86.7%），表明微纳结构及界面粘结在热循环和机械冲刷的综合作用下，尤其是长期冲蚀引起失重率的加速增加是其优势退化机制。

从对比分析可得工程建议：Case-5 在初期可显著降低结垢与冲蚀速率并延长首次维护周期（相比传统体系至少延长数倍），但为保证长期可靠性应结合分级热处理、弹性中间层设计及定期“修补/再改性与传统体系相比较，其长度至少增加了几倍），但为保证长期可靠性应结合分级热处理、弹性中间层设计及定期“修复/再改性”策略（如局部补涂和短时间惰性气氛退火等）以抑制  $\sigma_b$  的持续下降并控制 E 在可接受范围内；建议在未来使用更长的时间周期（2–3 年）的现场数据，并与 SEM/EDS 的显微形态进行随时间的对比，以进一步校正仿真模型中的热衰减系数  $\alpha T$  和冲蚀常数  $C_{er}$ ，为了使寿命预测置信区间变窄，给商业化推广设定一个清晰检修周期。

## 结论

本文构建和验证了适合石化管道用高温 HS-SPH 超疏水涂层的设计宏观—微观耦合模拟和实验闭环方法。通过仿真和中试的数据分析，我们发现使用陶瓷骨架结合耐高温有机改性（Case-5）时，微观固体的占比  $\phi_s$  大致在 0.60–0.70 之间、对于涂层厚度在  $t=80\text{--}120 \mu\text{m}$  范围内的体系，在初始阶段可以同时考虑超疏水性和耐久性：初始静态接触角  $\theta=156^\circ$ 、界面的粘结强度  $\sigma_b=2.5 \text{ MPa}$ ，冲蚀造成的失重率  $E$  为  $1.5 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，而壁面的最高温度  $T_{\max}$  达到了  $203^\circ\text{C}$ ，与基线 Case-1 相比，疏水性，粘结，抗冲蚀等性能分别得到了明显提高。基于 360 天现场/台架监测，涂层功能呈可量化退化： $\theta$  由  $156^\circ$  降至  $143^\circ$ 、 $\sigma_b$  由 2.5 降至 1.7 MPa、 $E$  由 1.5 升至 2.8、 $T_{\max}$  升至  $213^\circ\text{C}$ ，研究指出，热循环和机械冲刷是主导退化的关键因素，并且在 90–180 天的时间范围内，它们都超过了工程的临界界限。

基于模型预估与现场验证，提出明确的工程实施与运维建议：严格表面预处理（喷砂直至 Sa2.5，脱脂，硅

烷偶联)、采用分级固化技术(50–80℃脱溶, 120–180℃预固化, 200–280℃短时惰性退火)结合弹性中间层的设计, 目的是为了减少热应力的释放; 第一次完整的检验建议在90天内完成, 预防性维护或者部分再固化宜在120天左右完成, 防止超过设计临界条件导致失效, 提高服役寿命。研究的局限在于经验常数(热衰减系数 $\alpha T$ , 冲蚀常数 $C_{er}$ 等)依赖台架/现场数据校准, 建议开展 $\geq 2$ 年长期现场观测、加速老化试验和SEM/EDS等微观分析对寿命进行了准确预测, 同时进行了成本—效益分析, 对工业化推广进行了决策。

### 参考文献

[1]Liu B. Corrosion Behavior and Protection Technologies of Petrochemical Pipeline Materials in High-Pressure and High-

Temperature Environments[J]. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2025, 61(3): 1–6.

[2]王哲, 代云云, 陈娟, 等.激光表面织构提升超疏水涂层耐久性的协同增强机制[J/OL].中国表面工程, 1–13[2025–10–21].

[3]赵彬彬, 郑丽, 江民节.飞机DBD等离子体与超疏水材料防/除冰方法研究[J].民用飞机设计与研究, 2025, (03): 120–133.

[4]夏林, 聂世超, 闫孟杰.石化装置中泵的布置及管道设计[J].中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(18): 108–110.

[5]董秀娟, 王金培.基于石油石化天然气管道行业卫星便携站数据加密认证应用探究[J].数字通信世界, 2025, (09): 106–108.