

引文：朱秋颖. 复合保温结构的制备及其在集输管道中的应用[J]. 石油石化节能与计量, 2026, 16 (2): 18-23.

ZHU Qiuying. Preparation of composite thermal insulation structure and its application in gathering pipeline[J]. Energy Conservation and Measurement in Petroleum & Petrochemical Industry, 2026, 16 (2): 18-23.

复合保温结构的制备及其在集输管道中的应用

朱秋颖

(大庆油田有限责任公司第三采油厂)

摘要：为解决油田埋地集输管道传统保温材料保温性能差、吸水失效、高温降解等问题，以纳米气凝胶为主体，钛白粉、气相 SiO_2 、纳米 SiC 粉体，制备了改性纳米气凝胶保温涂料，并与常规保温材料形成高效复合保温结构，对涂料多项性能进行了测试分析。结果显示：改性纳米气凝胶保温涂料的最优配方为纳米气凝胶质量分数12%，导热系数低至 $0.027 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，抗压强度 0.28 MPa 、粘结强度 2.1 MPa ，综合性能适配油田管道的苛刻工况；将改性涂料与常规材料复合形成的预制管壳结构，导热系数显著低于单一常规材料；在三条集输管道的应用中，复合保温结构使平均散热损失从 $66.3 \text{ W}/\text{m}^2$ 降至 $38.2 \text{ W}/\text{m}^2$ ，降幅42.3%，年减少热损失1 181 GJ，对应节约燃料费9.3万元。研究结果可为油田地面系统的节能降耗提供实际参考价值。

关键词：复合保温结构；纳米气凝胶；保温涂料；集输管道；散热损失

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3322.2026.02.004

Preparation of composite thermal insulation structure and its application in gathering pipeline

ZHU Qiuying

No.3 Oil Production Plant of Daqing Oilfield Co., Ltd.

Abstract: To address the issues of poor insulation performance, water absorption failure, and high-temperature degradation of traditional insulation materials for buried gathering and transportation pipelines in oilfields, the modified nano-aerogel insulation coating is prepared with nano-aerogel as the main component, combined with titanium dioxide, gas-phase SiO_2 , and nano-SiC powder. The efficient composite thermal insulation structure is formed with conventional thermal insulation materials, and a number of properties of the coating are tested and analyzed. The results show that the optimal formula of modified nano-aerogel thermal insulation coating is 12% mass fraction of nano-aerogel, the thermal conductivity is as low as $0.027 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, the compressive strength is 0.28 MPa , and the bonding strength is 2.1 MPa . The comprehensive performance is suitable for the harsh working conditions of oilfield pipelines. The prefabricated shell structure formed by the combination of modified coatings and conventional materials leads to a significantly lower thermal conductivity than a single conventional material. In the application of three gathering pipelines, the composite insulation structure reduces the average heat loss from $66.3 \text{ W}/\text{m}^2$ to $38.2 \text{ W}/\text{m}^2$, a decrease of 42.3%. The annual heat loss is reduced by 1 181 GJ, corresponding to the saving of fuel cost of 93 000 yuan. The research results can provide practical reference value for energy conservation and consumption reduction of oilfield surface system.

Keywords: composite insulation structure; nano aerogel; insulation coating; gathering and transportation pipeline; heat dissipation loss

作者简介：朱秋颖，工程师，2011年毕业于兰州交通大学（道路与铁道工程专业），从事土建道路规划设计工作，15214598800，444203848@qq.com，黑龙江省大庆市萨尔图区第三采油厂工艺研究所西楼，163000。

在油气矿场中,受油品物性、环境温度和管输流量等因素的影响,一般需要对埋地集输管道外进行保温材料设计,以减少管输介质热量向环境传递,避免发生凝管、堵塞等事故。保温材料性能的优劣直接影响到流动保障效果、能源消耗及管道运行安全性^[1]。目前,油田常用的保温材料有硅酸盐毡、岩棉、聚氨酯泡沫等^[2-4]。根据现场管道服役情况和维抢修记录,硅酸盐毡和岩棉的吸收性能较强,在潮湿环境中易吸收土壤水分,吸水后导热系数可上升30%~50%,保温效果显著下降,同时吸水后材料结构松散,丧失强度;聚氨酯泡沫的使用温度上限为100~120℃,油田稠油集输管道的温度常常超过上限,此时材料会发生热解、变色,保温性能下降40%以上,且释放有害气体。气凝胶作为一种具有孔隙率80%~99.8%、孔径1~100 nm的新型保温材料,具有保温性能高效、耐温范围较宽等优点。近年来,气凝胶在管道保温领域的改性研究取得一定进展,刘魁等^[5]采用单一SiO₂纳米颗粒改性气凝胶,导热系数降至0.030 W/(m·K),但抗压强度仅0.18 MPa,难以承受埋地土壤压力;纪风等^[6]通过纤维掺杂提升气凝胶机械性能,却因纤维分散不均导致耐水性下降,吸水率达5%以上。现有改性方法多聚焦单一性能优化,未能同时解决低导热、高强度、耐温耐水的协同问题。综上,以纳米气凝胶为主体,以钛白粉、气相SiO₂、纳米SiC这三种粉体为填充材料,把上述这些成分粘合在一起,形成了改性纳米气凝胶保温涂料,并与常规保温材料相结合,形成复合保温材料。

1 实验部分

1.1 试剂原料

钛白粉,平均粒径为50 nm;气相SiO₂平均粒径9~15 nm;纳米SiC平均粒径在30~50 nm;纳米气凝胶粉体;氧化铝纤维,纯度大于70%,耐火温度1 700~2 000℃;硅酸铝纤维,氧化硅和三氧化二铝为主要成分,纯度90%以上;无机聚合物硅凝胶,最高使用温度800℃。

1.2 改性纳米气凝胶保温涂料的制备

制备过程需通过分步混合、梯度分散,确保各组分均匀融合,充分发挥纳米气凝胶的高效保温性、粉体填料的协同隔热作用及纤维的增强效果,具体步骤如下:

1) 增强纤维的预处理与分散:取定量无机聚合物硅凝胶(粘结剂)置于高速分散釜中,先加入

氧化铝纤维,保持搅拌转速1 200~1 500 r/min,分散5 min使纤维初步舒展;随后加入硅酸铝短纤维,提高转速至1 800~2 000 r/min,持续分散15~20 min,直至两种纤维均匀悬浮于硅凝胶中,形成“纤维-粘结剂前驱体”,纤维分散度通过显微镜观察,确保无明显团聚。

2) 隔热粉体的梯度混合:保持分散釜转速1 500 r/min,按比例依次加入钛白粉、气相SiO₂、纳米SiC,形成了均匀的“纤维-粉体-粘结剂混合浆料”。

3) 纳米气凝胶的掺入与均质化:将纳米气凝胶粉体缓慢加入上述混合浆料中,加入速度控制在5~10 g/min,避免粉体飞扬团聚,保持转速1 200 r/min,搅拌25~30 min,使气凝胶粉体均匀填充于纤维与其他粉体的间隙中,最终形成细腻、无结块的膏状涂料。

4) 陈化与脱泡处理:将膏状涂料转移至真空脱泡机,在-0.09~-0.08 MPa真空度下处理10~15 min,去除搅拌过程中引入的气泡;随后在室温下静置陈化24 h,使硅凝胶与各组分充分交联,提升涂料的固化强度。

1.3 性能测试

采用稳态热流法,依据GB/T 10294—2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法》,将涂料涂覆于尺寸为300 mm×300 mm×5 mm的20#钢试片,固化后制成标准试样,在25℃相对湿度50%的环境中,通过控制试样两侧温差,测量单位时间内通过试样的热流量,计算导热系数。测试仪器采用DRPL-III型导热系数测定仪,精度±2%。

抗压强度测试,按照GB/T 8813—2008《硬质泡沫塑料压缩性能的测定》,将涂料注入模具固化成φ50 mm×50 mm的圆柱试样,采用万能试验机以2 mm/min的加载速度进行轴向压缩,记录试样压缩量达10%时的压力值,计算抗压强度。测试仪器采用WDW-100型万能试验机,量程0~100 kN。

粘结强度测试,依据GB/T 5210—2006《色漆和清漆 拉开法附着力试验》,将涂料涂覆于除锈后的20#钢试片表面,固化7天后,采用环氧树脂将试片与拉力计夹具粘结,以5 mm/min的速度进行拉开试验,记录涂料与钢片剥离时的最大拉力,计算粘结强度。测试仪器采用PosiTest AT-M型拉开法附着力测试仪,精度±1%。

参照GB/T 1735—2009《色漆和清漆 耐热性测定》,将涂料涂覆于钢板上(干膜厚度2 mm),置

于高温箱中，分别在 60 °C、100 °C、150 °C、200 °C 下恒温放置 240 h，冷却至室温后，观察涂料是否出现开裂、变色、鼓泡等现象，并测试高温处理后的导热系数与常温下的差值。测试仪器采用箱式电阻炉，控温精度 ± 1 °C。

按照 GB/T 1733—1993 《漆膜耐水性测定法》，将涂料试片浸入 25 °C 蒸馏水中，连续浸泡 168 h 后取出，擦干表面水分，称量试样吸水率（质量变化率），并测试吸水后的导热系数变化率。测试仪器采用电子天平，精度 0.001 g、DRPL-III 型导热系数测定仪。

2 结果与讨论

2.1 导热系数

改性纳米气凝胶保温涂料，是在大量实验以及对各成分特性深入研究的基础上确定的。保持粘结剂质量分数 30%，增强纤维质量分数 25%（氧化铝纤维和硅酸铝；铝纤维质量比例为 1:1），钛白粉、气相 SiO₂、纳米 SiC 的质量比例为 2:1:1，改变纳米气凝胶的质量分数，分析改性保温涂料的性能变化情况。导热系数和涂料干度结果见图 1，随着纳米气凝胶质量分数的增加，改性保温涂料的导热系数呈先快速下降后缓慢下降趋势，涂料干度呈单调下降趋势，在气凝胶质量分数为 18% 时，为导热系数变化的转折点。这是由于当气凝胶含量较低时，其分散于纤维与粉体间隙中，形成“点-面”结合的隔热网络，随含量增加，网络密度提升，导热系数快速下降^[7]；当含量较高时，气凝胶颗粒间开始堆叠，孔隙结构重叠，热阻提升空间缩小，故导热系数降幅放缓。气凝胶颗粒填充于纤维与粉体间隙中，减少了高密度成分的堆积密度，使涂料更轻质化，轻质化特性有利于降低管道保温层的附加载荷，尤其适合埋地管道的长期服役。

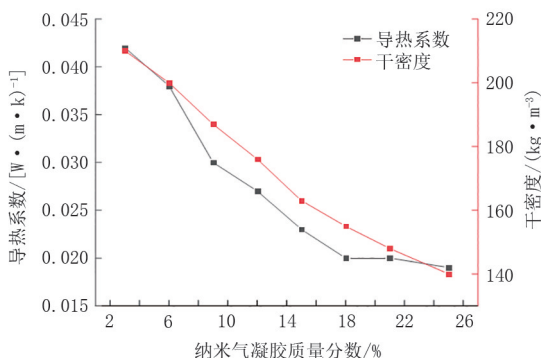


图1 改性保温涂料的导热系数和涂料干度

Fig.1 Thermal conductivity and coating dryness of the modified insulation coating

2.2 抗压强度和粘结强度

抗压强度和粘结强度结果见图 2。随着纳米气凝胶质量分数的增加，改性保温涂料的抗压强度呈先增加后降低趋势，粘结强度呈先保持稳定后快速下降趋势，在气凝胶质量分数为 12% 时，为两种性能变化的转折点。抗压强度由“纤维骨架支撑+气凝胶填充协同”决定。当气凝胶质量分数较低时，气凝胶粉体均匀分散于氧化铝纤维与硅酸铝纤维形成的三维网络间隙中，既填补了纤维间的空隙，又通过气凝胶颗粒的点接触增强了网络结构的致密性；当气凝胶质量分数较高时，过量气凝胶颗粒开始挤占纤维间的有效接触面积，导致纤维骨架的“桥接”作用被削弱，抗压强度下降。过量气凝胶颗粒在界面处形成物理隔离层，阻碍硅凝胶与钢表面的直接接触，同时气凝胶的高比表面积吸附部分硅凝胶，导致界面处粘结剂有效浓度降低，界面结合力随气凝胶含量增加而快速下降，粘结强度在气凝胶质量分数超过 12% 时快速下降。综上，从油田埋地管道的实际需求来看，纳米气凝胶质量分数 12% 时综合性能最优，此时抗压强度达 0.28 MPa，符合抗压强度大于或等于 0.2 MPa 的相关要求；粘结强度 2.1 MPa，满足粘结强度大于或等于 0.15 MPa 的相关要求^[8]。相较于 18% 的气凝胶含量配比，虽导热系数略高，但机械性能更优，更适合土壤压力复杂、需频繁检修的油田集输管道场景（如弯头、阀门等应力集中部位）。

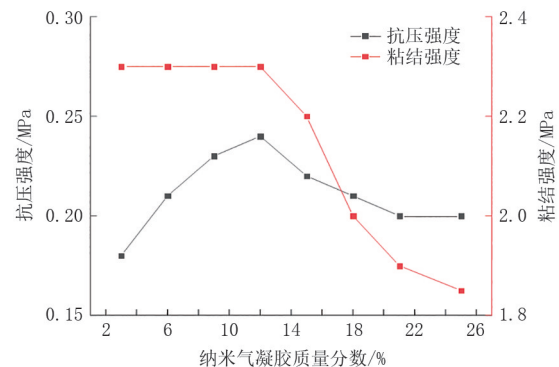


图2 改性保温涂料的抗压强度和粘结强度

Fig.2 Compressive strength and bonding strength of the modified insulation coating

2.3 耐高温性能

以最优配比 12% 纳米气凝胶质量分数为例，耐高温性能结果见图 3。从外观变化上观察，60 °C、100 °C、150 °C 下，涂料表面无开裂、变色、鼓泡现象，与常温状态一致；200 °C 下，涂料表面颜色略深呈浅褐色，但无开裂、鼓泡或粉化，结构保持

完整。温度 200 °C 下的导热系数 0.033 W/(m · K)，与常温 0.027 W/(m · K)相比，变化率为 22.2%；与其他气凝胶含量相比，气凝胶含量为 6%时，200 °C 下导热系数变化率达 28%，气凝胶含量为 25%时，200 °C 下表面出现轻微裂纹，导热系数变化率升至 26%。耐高温性能由“无机成分耐高温骨架+纤维增强网络”共同决定，纳米气凝胶为无机硅基结构，本身耐温性优异，可耐受 600 °C 以上；氧化铝纤维与硅酸铝纤维形成耐高温骨架，抵抗高温下的热收缩；无机聚合物硅凝胶 200 °C 下不发生热解，通过化学键合维持各组分的结合力，避免涂料分层。200 °C 下的轻微变色与导热系数上升，源于硅凝胶在高温下的轻微氧化，但未破坏整体化学结构形式，故性能仍保持稳定。参考 SH 3010—2022《石油化工设备和管道隔热技术规范》，油田埋地集输管道（尤其是稠油管道）对保温材料的耐高温要求为，在 200 °C 以下长期使用时，无明显外观缺陷，导热系数变化率小于或等于 30%。

聚氨酯泡沫在 120 °C 以上环境中会发生明显热解，在 130 °C 下恒温 240 h 后，导热系数从 0.055 W/(m · K)升至 0.080 W/(m · K)，变化率达 45%，且表面出现粉化开裂；岩棉在 200 °C 下虽结构稳定，但导热系数变化率为 30%。该改性涂料在高温下的性能稳定性显著优于传统材料，更适配稠油集输管道 150~200 °C 的服役环境。

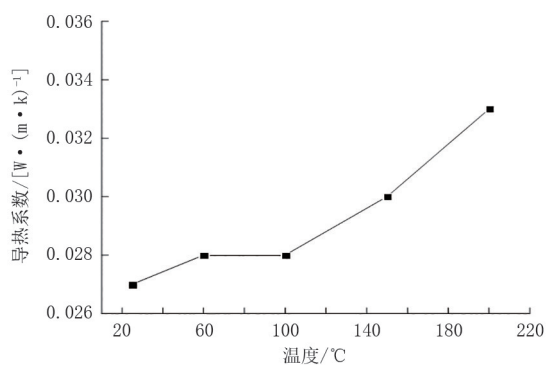


图3 改性保温涂料的耐高温性能

Fig.3 High-temperature resistance of the modified insulation coating

2.4 耐水性能

以最优配比 12% 纳米气凝胶质量分数为例，改性保温涂料的吸水率为 2.8%，吸水后导热系数从常温 0.027 W/(m · K)升至 0.028 W/(m · K)，变化率 3.7%。其他纳米气凝胶质量分数的测试结果，气凝胶含量为 6%时，吸水率为 4.5%，导热系数变化率为 12%；气凝胶含量为 15%时，吸水率 3.2%，导热

系数变化率为 9.2%；气凝胶含量为 25%时，吸水率为 3.5%，导热系数变化率为 10.5%。

2.5 微观形貌分析

采用扫描电子显微镜对材料表面进行微观形貌分析，放大倍数为 5 000~20 000 倍，聚焦 100 nm 尺度下结构特征。高倍镜下可见纳米气凝胶呈现三维网状多孔结构，这种结构可有效束缚空气分子，抑制空气热对流，是涂料低导热系数的核心微观机制。纤维网络与纳米颗粒的协同增强了结构稳定性；硅凝胶的均匀包覆保证了组分间的界面结合。这种微观结构是涂料在宏观上表现出低导热、高强度、耐高温水等优异性能的根本原因，也为其在油田埋地管道保温中的应用提供了直接的结构支撑。

3 复合保温结构

所使用的纳米气凝胶粉体为工业级保温用气凝胶，其生产成本受制备工艺（溶胶-凝胶法+超临界干燥）和纯度影响，市场价格为 800~1 200 元/kg。以最优配比的改性保温涂料为例，涂料中气凝胶粉体成本约为 100~150 元/kg，占涂料总成本的 60%~70%，远高于常规保温材料。为平衡保温性能与成本，将改性保温涂料与常规保温材料相结合，所有结构均采用预制管壳形式（便于现场安装），分层设计遵循“内层贴合管道、外层防护环境”的原则。以改性涂料+硅酸盐毡复合结构为例，以 DN200 管道为例，总厚度 50 mm，第一层为基层，涂覆改性纳米气凝胶保温涂料，厚度 10 mm，采用高压无气喷涂工艺，直接附着于管道外壁，除锈等级 Sa2.5，利用涂料高粘结强度，确保与管道紧密结合，避免界面空鼓；第二层为保温层，采用硅酸盐毡，厚度 40 mm，切割为半圆形管壳，采用错缝搭接，搭接宽度大于或等于 50 mm，接缝处用改性涂料作为密封胶，厚度 1~2 mm，阻断空气对流；第三层为外护层，缠绕 2 层玻璃纤维布涂刷环氧树脂防腐层（厚度 0.5 mm），抵抗土壤中少量盐分的腐蚀，同时增强结构整体性。其他复合结构的分层逻辑与上述一致，仅常规材料类型不同。采用导热系数测定仪测试常温下不同复合保温结构的导热系数见表 1。表中所有保温结构测试时总厚度均为 50 mm。对比可知，所有复合保温结构的导热系数均低于对应的单一常规保温材料；内层改性纳米气凝胶保温涂料具有低导热特性，并以改性涂料+硅酸盐毡的保温性能最优。

表1 不同复合保温结构的导热系数

保温结构	导热系数/[W·(m·k) ⁻¹]	最高使用温度/℃
硅酸盐毡	0.050	500
岩棉	0.044	600
聚氨酯泡沫	0.055	120
改性涂料+硅酸盐毡	0.031	500
改性涂料+岩棉	0.033	600
改性涂料+聚氨酯泡沫	0.037	120

4 现场应用

将上述复合保温结构用于某油田集输管道，根据保温层设计厚度计算表面散热损失^[9-10]，计算公式详见公式（1）。

$$Q = \frac{(t_0 - t_a)}{\left(\frac{D_1}{2\lambda} \ln \frac{D_1}{D_0} + \frac{1}{\alpha_s} \right) \times \frac{t_s - t_0}{t_a - t_s}} \quad (1)$$

式中： Q 为散热损失，W/m²； t_0 为介质输送温度，K； t_s 为保温层外表面温度，K； t_a 为环境温度，K； D_1 为保温结构外径，m； D_0 为管道外径，m； α_s 、 λ 分别为保温结构与空气的换热系数、保温结构导热系数，W/(m·K)。

复合保温结构应用效果见表2。改造前后保温层厚度保持一致，平均散热损失从66.3 W/m²降低至38.2 W/m²，降幅42.3%；N12-5井至12[#]阀组管道、N10井到6[#]阀组管道、6[#]阀组到接转站管道每年可减少热损失分别为168 GJ、322 GJ和691 GJ，合计1 181 GJ，按燃料气高位发热量38 MJ/m³核算，共计每年可减少燃料气3.1×10⁴ m³，燃料气价格3元/m³，每年可节约运行费用9.3万元。改造投资总费用为20万元，投资回收期为2.15年，经济效益显著。

5 结论

1) 改性纳米气凝胶保温涂料的最优配方为纳米气凝胶的质量分数12%、粘结剂30%、增强纤维25%、钛白粉+气相SiO₂+纳米SiC混合物的比例为2:1:1，涂料导热系数低至0.027 W/(m·K)，

抗压强度0.28 MPa、粘结强度2.1 MPa，综合性能适配油田管道的苛刻工况。

2) 将改性涂料与常规保温材料复合形成的预制管壳结构，显著提升了整体保温性能，导热系数较单一常规材料降低约20%~44%。现场应用表明，该结构使管道平均散热损失降低42.3%，年节能量达1 181 GJ，节约燃料费用9.3万元，投资回收期仅2.15年，体现了良好的节能效果与经济可行性。

3) 改性纳米气凝胶复合保温结构为油田埋地集输管道（尤其是稠油热采管道）提供了新型解决方案，可推广至其他高温、潮湿环境下的工业管道保温领域。

参考文献：

- [1] 蒋明. 大庆油田老区油气站场供热节能潜力分析[J]. 石油石化节能与计量, 2025, 15 (7): 52-56.
JIANG Ming. Analysis of energy conservation potential for heating in oil and gas stations in the old area of Daqing oilfield [J]. Energy Conservation and Measurement in Petroleum & Petrochemical Industry, 2025, 15 (7): 52-56.
- [2] 陈武, 王伟杰, 徐慧, 等. 海洋平台保温层下腐蚀治理技术[J]. 涂层与防护, 2025, 46 (4): 43-48.
CHEN Wu, WANG Weijie, XU Hui, et al. Corrosion control technology under insulation layer of offshore platforms [J]. Coatings & Protection, 2025, 46 (4): 43-48.
- [3] 王鑫. 废旧硅酸铝保温材料高值再利用技术在炼油装置中的应用[J]. 现代化工, 2024, 44 (S1): 289-293.
WANG Xin. Application of high-value reuse technology of waste aluminum silicate insulation materials in oil refining units [J]. Modern Chemical Engineering, 2024, 44 (S1): 289-293.
- [4] 刘磊, 范伟东, 陈红举, 等. 塔河油田超深超稠油地热保温开采技术[J]. 新疆石油天然气, 2022, 18 (2): 92-97.
LIU Lei, FAN Weidong, CHEN Hongju, et al. Geothermal thermal insulation exploitation technology for ultra-deep and ultra-heavy oil in Tahe oilfield [J]. Xinjiang Petroleum and Natural Gas, 2022, 18 (2): 92-97.
- [5] 刘魁, 董旺来. 二氧化硅气凝胶在化工管道绝热中的应用和分析[J]. 浙江化工, 2024, 55 (12): 48-54.

表2 复合保温结构应用效果

管道起始点	D_0 /mm	t_0 /K	t_a /K	长度/m	保温结构		Q /(W·m ²)	
					改造前	改造后	改造前	改造后
N12-5井至12 [#] 阀组	89	58	10	375	30 mm 聚氨酯泡沫	10 mm 改性涂料+20 mm 硅酸盐毡	69.2	38.9
N10井到6 [#] 阀组	114	62	5	512	30 mm 聚氨酯泡沫	10 mm 改性涂料+20 mm 硅酸盐毡	84.7	48.2
6 [#] 阀组到接转站	219	60	5	1 250	50 mm 硅酸盐毡	10 mm 改性涂料+40 mm 硅酸盐毡	45.1	27.6

- LIU Kui, DONG Wanglai. Application and analysis of silica aerogel in thermal insulation of chemical pipelines[J]. Zhejiang Chemical Industry, 2024, 55 (12): 48-54.
- [6] 纪风, 张虎, 杨斌, 等. 气凝胶复合材料各向异性导热系数实验研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45 (7): 2131-2137.
- JI Feng, ZHANG Hu, YANG Bin, et al. Experimental study on anisotropic thermal conductivity of aerogel composites[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45 (7): 2131-2137.
- [7] 李宇, 谢海英, 王佳, 等. 气凝胶在稠油热采井水泥浆中的应用[J]. 现代化工, 2024, 44 (S2): 241-245.
- LI Yu, XIE Haiying, WANG Jia, et al. Application of aerogel in cement slurry of heavy oil thermal recovery wells[J]. Modern Chemical Industry, 2024, 44 (S2): 241-245.
- [8] 张路佳, 姜勇刚, 冯军宗, 等. 纤维增强 $Al_2O_3-SiO_2$ 气凝胶隔热复合材料研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (12): 4397-4405.
- ZHANG Lujia, JIANG Yonggang, FENG Junzong, et al. Research progress of fiber-reinforced $Al_2O_3-SiO_2$ aerogel thermal insulation composites[J]. Bulletin of the Chinese Silicate Society, 2022, 41 (12): 4397-4405.
- [9] 曾小川, 张耀, 王焕焕, 等. 气凝胶隔热保温涂料在加热炉保温涂层修复技术中的应用[J]. 涂料工业, 2022, 52 (4): 70-74, 80.
- ZENG Xiaochuan, ZHANG Yao, WANG Huanhuan, et al. Application of aerogel thermal insulation coating in the repair technology of thermal insulation coating for heating furnaces[J]. Coatings Industry, 2022, 52 (4): 70-74, 80.
- [10] 李洪宝, 马欣. 基于二氧化硅气凝胶的多层隔热结构与隔热效果评价[J]. 化工设计通讯, 2024, 50 (4): 7-9.
- LI Hongbao, MA Xin. Multi-layer thermal insulation structure design and evaluation of thermal insulation effect based on silica aerogel[J]. Chemical Engineering Design Communication, 2024, 50 (4): 7-9.

收稿日期 2025-05-17

(编辑 马英萍)

(上接第17页)

- [6] 李平原, 周鹤, 窦玉明, 等. 稠油 RO 浓水回注稀油井区研究[J]. 工业水处理, 2020, 40 (12): 111-114.
- LI Pingyuan, ZHOU He, DOU Yuming, et al. Research on the re-injection of heavy oil RO concentrate into light oil well[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40 (12): 111-114.
- [7] 陈文. 稠油污水处理回用[J]. 石化技术, 2020, 27 (2): 324-325.
- CHEN Wen. Treatment and reuse of heavy oil produced water[J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27 (2): 324-325.
- [8] 王守军. 胜利油田污水对微球调驱性能影响实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2025, 32 (1): 186-193.
- WANG Shoujun. Experimental study on the influence of Shengli oilfield sewage on micro-sphere profile control and flooding performance[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2025, 32 (1): 186-193.
- [9] 孟章进, 杨帆, 姜桂英, 等. 油田污水腐蚀特性与微生物变化情况研究[J]. 复杂油气藏, 2025, 18 (1): 122-126.
- MENG Zhangjin, YANG Fan, JIANG Guiying, et al. Research on corrosion characteristics and microbial variation of oilfield sewage[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2025, 18 (1): 122-126.
- [10] 李杨. 油田污水处理中化学剂化学性能分析及应用探究[J]. 清洗世界, 2025, 41 (10): 19-21.
- LI Yang. Research on the chemical properties analysis and application of chemical agents in oilfield produced water treatment[J]. Cleaning World, 2025, 41 (10): 19-21.

收稿日期 2025-11-03

(编辑 冷静)