

煤制油化工费托反应设备内壁抗腐蚀涂层性能研究

王佳瑞

国家能源集团宁夏煤业公司煤制油分公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i10.8479

[摘要] 煤制油化工设备中的费托反应设备在极端工作环境下面临着严重的腐蚀问题，尤其是内壁的腐蚀现象严重影响了设备的使用寿命与安全性。为了提高反应器的抗腐蚀性能，针对费托反应设备内壁涂层的研究显得尤为重要。本文围绕煤制油费托反应设备内壁涂层的选材、涂层结构、应用工艺等方面进行了深入探讨，重点分析了不同涂层材料在高温、高压及化学腐蚀环境下的性能表现。实验结果表明，优化的涂层不仅能有效提高反应器的抗腐蚀能力，而且还具备良好的耐久性，能在长时间使用中保持稳定的性能。研究结果为煤制油化工设备的长期安全运行提供了技术支持。

[关键词] 煤制油；费托反应设备；抗腐蚀涂层；性能；材料优化

Study on the Performance of Anti Corrosion Coating on the Inner Wall of Coal to Oil Chemical Fischer Tropsch Reaction Equipment

Wang Jiarui

National Energy Group Ningxia Coal Industry Company Coal to Oil Branch

[Abstract] The Fischer Tropsch reaction equipment in coal to oil chemical equipment faces serious corrosion problems in extreme working environments, especially the corrosion phenomenon on the inner wall, which seriously affects the service life and safety of the equipment. In order to improve the corrosion resistance of reactors, research on the inner wall coating of Fischer Tropsch reaction equipment is particularly important. This article delves into the material selection, coating structure, and application process of the inner wall coating of coal to oil Fischer Tropsch reaction equipment, with a focus on analyzing the performance of different coating materials under high temperature, high pressure, and chemical corrosion environments. The experimental results show that the optimized coating not only effectively improves the corrosion resistance of the reactor, but also has good durability and can maintain stable performance during long-term use. The research results provide technical support for the long-term safe operation of coal to oil chemical equipment.

[Key words] coal to oil; Fischer Tropsch reaction equipment; Anti corrosion coating; Performance; Material optimization

引言

在煤化工行业中，煤制油过程中的费托反应设备应用于费托合成关键化学反应。反应器在长时间高温、高压及高腐蚀性介质的作用下，内壁涂层常常遭遇严重腐蚀，导致设备性能下降甚至发生故障。尤其是在高压条件下，反应器的内壁面临更多的腐蚀源和更加苛刻的工作环境。研究表明，涂层材料的选择与施工工艺对费托反应设备的抗腐蚀性能至关重要，寻找和优化适合该类设备的抗腐蚀涂层成为了提升煤制油化工设备安全性的关键。当前，针对费托反应设备涂层性能的研究逐步深入，且涂层材料的技术创新和施工工艺改进对延长设备使用寿命、降低运营成本具有重要意义。

一、煤制油费托反应设备腐蚀问题现状及影响因素

(一) 高温、高压条件下的腐蚀现象分析

煤制油费托反应设备主要用于催化裂化和加氢等高温高压条件下的化学反应，这些反应过程中涉及的温度和压力往往超过常规反应器的承受能力，极易导致设备腐蚀。高温环境下，反应器内壁会暴露于极其腐蚀性的气体、液体介质中，尤其是水蒸气、氢气、二氧化碳以及酸性物质等，这些因素共同作用下加速了腐蚀进程。高压条件则进一步加剧了腐蚀的速率，特别是化学腐蚀与机械腐蚀相互叠加的效应更加突出，内壁涂层若未能有效防护，容易发生局部腐蚀、裂纹扩展等现象。腐蚀性物质与反应器内表面接触时间较长，腐蚀速率通常较快，这

会导致金属材料的结构和性能发生显著变化，甚至出现严重的泄漏等安全问题。研究和改进涂层技术，以适应高温高压下的腐蚀环境，成为解决煤制油费托反应设备腐蚀问题的关键。

(二) 腐蚀对反应器性能的影响

费托反应设备内壁的腐蚀不仅直接影响到设备的使用寿命，还会对反应器的运行性能产生深远的影响。腐蚀导致反应器内壁材料的强度和韧性降低，反应器可能发生形变，导致密封不严、泄漏等故障，影响设备的正常运转。腐蚀现象增加了设备的维护和更换成本。在高压环境下，腐蚀引起的结构损坏需要频繁检修，这不仅增加了停机时间，还提高了维修费用。长期的腐蚀会使反应器的内壁表面粗糙度增大，导致物料流动不畅，影响反应速率和产品质量。腐蚀所引发的金属屑和腐蚀产物可能进入反应系统，污染产品并造成催化剂失效。反应器内壁的腐蚀防护显得尤为重要，合理的涂层材料和涂层工艺能够有效避免这些不良后果。

(三) 腐蚀源与腐蚀机理探讨

煤制油费托反应设备面临的腐蚀源主要包括反应介质中的腐蚀性气体和液体物质，如水蒸气、二氧化碳、氢气、硫化氢等。催化裂化反应中生成的酸性物质及高温下产生的氧化物也是腐蚀源的重要组成部分。腐蚀机理主要包括化学腐蚀、氧化腐蚀和电化学腐蚀等几种形式。化学腐蚀通常发生在高温环境中，金属与酸性物质反应生成腐蚀产物；氧化腐蚀则与氧气和水蒸气的存在密切相关，金属表面在高温下氧化形成氧化膜，从而影响金属的物理性能。电化学腐蚀是指金属在介质中的电极反应，尤其是在腐蚀介质的电导性较强时，电化学腐蚀尤为严重。费托反应设备在工作过程中可能出现局部涡流、气泡等不均匀流动现象，这些流体力学因素也会加剧局部腐蚀。深入探讨腐蚀源及其机理，能够为涂层材料的研发和施工提供科学依据，帮助选择更适合的防腐策略。

二、超音速电弧喷涂技术

序号	特点	技术指标
1	喷涂粒子速度高	超音速电弧喷涂：喷涂铝平均速度为 373.6m/s，最高可达 385.7m/s 普通电弧喷涂：喷涂速度为 180m/s 左右
2	涂层结合强度高	超音速电弧喷涂：喷涂 3Cr13 涂层结合强度平均值达 60MPa 普通电弧喷涂：其结合强度通常为 20MPa
3	涂层硬度高	超音速电弧喷涂：喷涂 3Cr13 涂层硬度为 HV397
4	喷涂效率高	超音速电弧喷涂：喷涂不锈钢丝沉积率高达 78%
5	涂层空隙率低	涂层呈典型的层状组织结构，涂层孔隙率小于 1.5% 超音速电弧喷涂：喷涂 3Cr13 时，空隙率为 0.9% 普通电弧喷涂的空隙率一般为 5%-10%
6	喷涂颗粒细小均匀	超音速电弧喷涂：喷涂 3Cr13 时，较大的为 18.8um，较小的为 1.0um，平均粒度为 4.32um
7	综合性能好	施工过程中喷涂工件表面温度低，不会产生因高温烘烤造成工件扭曲变形；并可方便地制备复合涂层，以获得独特的综合性能。

(一) 超音速电弧喷涂材料及其特点

近年来，随着高性能涂层技术的不断发展，新的涂层材料不断涌现。采用超音速电弧喷涂技术中喷涂粒子速度高、涂层结合强度高、雾化效果好、喷涂颗粒细小均匀、涂层孔隙率低的优点，施工操作更简单更合理、涂层质量更优质，是具有国际领先水平的新一代电弧喷涂设备，在当前电弧喷涂领域中处于国际领先水平，对电弧喷涂技术的发展有很大的推动作用。该技术在表面防腐、耐磨、特种功能涂层和装饰等方面都有着广阔的应用前景，必将产生很大的经济效益和社会效益。

(二) 高性能电弧喷涂的原理

燃烧于丝材端部的电弧将均匀送进的丝材熔化，经拉伐尔喷嘴加速后的超音速气流将熔化的丝材雾化为粒度细小分布均匀的粒子，喷向工件表面（经喷砂除锈）形成涂层。该涂层因材质不同，分别具有防磨或耐腐蚀的作用，同时，因涂层较薄而且材质为金属，故涂层与工件结合强度高，并且不影响工件的传热性能。

(三) 超音速电弧喷涂设备的创新点

(1) 应用空气动力学原理和计算机辅助设计以及拉伐尔喷管等技术，成功研制出了超音速电弧喷枪，大幅度提高了粒子速度，测得的粒子速度超过了当前国内外电弧喷涂粒子速度，其中粒子最大速度为 385.7m/s。

(2) 设计的超音速电弧喷涂电源，起弧可靠，加上拉伐尔喷嘴对气流的加速作用，拉长了电弧并保持电弧的稳定，有效地提高了金属粒子的雾化效果和涂层的致密度以及涂层与基体的结合强度。

(3) 喷枪采用气冷方式，解决了金属粒子与喷嘴内壁的粘接难题，提高了气流的能量，有利于提高粒子的速度和涂层质量。

(四) 超音速电弧喷涂技术指标及工艺特点

8	热效率高	电弧喷涂是直接用电能转化为热能来熔化金属，热能利用率高达 60%~70%。
9	生产效率高	一般电弧喷涂的生产效率是火焰喷涂的 3 倍以上。
10	安全性高	仅使用电能和压缩空气，不用氧、乙炔等易燃气体，安全可靠。
11	雾化效果好	金属熔滴雾化良好，被喷涂工件不受粒子束流的冲击和温度的影响，不产生变形。

(五) 喷涂丝材

喷涂材料	成分 (wt.%) 和性能
Inconel 625 实心丝材	主要成分：Ni≥58；Cr20-23；Mo8-10；Nb3.15-4.15；Fe≤5.0；C≤0.1，其它少量。
	Inconel 625 是以钼、铌为主要强化元素的固溶强化型镍基变形高温合金，从低温到 980℃均具有良好的拉伸性能和疲劳性能，且能耐盐雾气氛下的应力腐蚀。主要表现：（1）在硫/氯化物介质中具有出色的抗点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀和侵蚀性能；（2）具有良好的耐无机酸腐蚀性，如硝酸、磷酸、硫酸以及盐酸等，同时在氧化和还原环境中也具有耐碱和有机酸腐蚀的性能；（3）有效的抗硫离子还原性应力腐蚀开裂，在静态或循环环境中具有抗碳化和氧化性，且耐含氯的气体腐蚀；（4）焊接过程中无敏感性，具有良好耐蚀性的同时，也具有优异的室温和高温力学性能。
	但 Inconel 625 采用电弧喷涂使用较少，主要原因是成本相对 Fe 基材料高，电弧喷涂过程中会产生较多的氧化物产生、孔隙率较高，导致其耐蚀性能相对块体的合金大幅度降低。只要有通孔的出现，涂层很快失效，因此依赖于封孔剂的性能。另外涂层不耐磨。（有资料表明 625 堆焊层的硬度在 250-350HV 左右）。作为奥氏体的 Ni 基合金，不能喷涂过厚的涂层（<0.5mm），对于防止涂层中孔隙的贯穿不利。
316L+20wt.%碳化钨粉芯丝材	316L 不锈钢成分：C≤0.03；Cr16-18；Ni10-14；Mo2-3，Fe 余量
	316L 具有较好的耐蚀性，在化工行业广泛应用，添加有 2~3%的 Mo 元素更有利于提高耐蚀性。但喷涂层的硬度不高，不能喷涂厚涂层（奥氏体）。在粉芯中添加 20wt.%的 WC，电弧喷涂过程中 WC 反弹严重，留在涂层中的 WC 数量不多，单纯添加 WC 对于提高耐磨性能效果不好。
HG-2N 粉芯丝材 可选用 NiAl 打底层一起制备复合涂层	成分：Cr：28-30；Ni3-5；B：3-5；Mn：1-1.5；Si：1-3；Fe 余量
	涂层显微硬度：平均 910HV（800-1066HV） 高硬度，耐磨，因 Cr 含量较高（>28%），其耐蚀性能有所提高。可以喷涂更厚的涂层（0.5-1.5mm）。 建议采用 NiAl 丝材打底，一是提高结合强度，另外就是通过 NiAl 良好的耐蚀性能，也可以起到阻隔腐蚀介质进入到基材与涂层之间，表面层采用环氧等涂料再进行封孔处理。

三、费托反应设备内壁涂层的优化设计与施工工艺

(一) 表面预处理施工工艺

(1) 基体材料适宜的预处理是电弧喷涂工艺过程最重要的部分之一。表面预处理包括除去金属表面的油脂、其他污物、锈、氧化皮、旧涂层、焊接熔粒以及对表面的粗化处理。

(2) 工件表面必须绝对净化，无任何油、水分和灰尘的极小残留物。

(3) 净化过程应同时达到使基本表面粗化的目的，喷砂粗化是常用的方法之一，它能达到符合技术要求的粗糙度，使涂层与基体很好地啮合，并可去除油污、锈、氧化皮、旧涂层

(二) 喷砂除锈施工工艺

(1) 喷砂材料应选用质坚有棱角的粒径在 10-20#的石英砂。砂子必须净化，使用前应经筛选，砂内粘土及细粉尘含量不应大于 5%，不得含有油污。喷砂前砂子要晾晒干燥，含水量不应大于 1%。干燥筛选后的砂子应装袋堆放，防止砂子受潮、雨淋、砂内混入杂质。

(2) 喷砂前要调整好风压（一般为 0.5MPa）及砂流量，喷枪与器壁内表面成 30°-75°，枪头左右或上下摆动，逐片逐层地进行除锈。

(3) 喷砂作业完成后, 要自上往下逐层吹扫跳板上及器壁上的砂子及粉尘, 待喷涂表面的砂子及粉尘要清理干净。喷砂后的设备内表面不得受潮、氧化及污染, 应尽快喷涂。

(三) 超音速电弧喷涂施工工艺, 采用复合涂层施工工艺, 选用 NiAl 打底层, 加 HG-2N 粉芯丝材工作层。

(1) 喷砂除锈粗化后, 检查表面粗化均匀一致, 并保持表面清洁无污。

(2) 喷砂与喷涂应每 10m² 间隔循环进行。喷砂除锈粗化后, 应立即进行喷涂。

(3) 喷枪每次开启大约有 4~5 秒钟的起动过程。喷涂底层喷涂厚度 0.1mm-0.2mm, 工作层喷涂厚度 0.5mm-0.6mm。

(4) 喷涂用的金属线材要求清洁, 表面无油、灰尘和氧化物。

(四) 纳米陶瓷防磨防腐涂料施工工艺

(1) 组份配比

该涂料由两个组份构成, 其中 A 组份为含超微纳米级粉状材料的粉料, B 组份为多种无机材料合成的高档结合剂。在电力锅炉“四管”锅炉上使用应按照 A、B 组分 1/1 至 1/1.4 比例配比。涂料施工前, 应将 A、B 组分充分混碾搅拌, 由于纳米材料的团聚作用, 所以搅拌时间至少要在十五分钟以上 A、B 组分才能充分融合, 有条件可以使用台式搅拌机搅拌。

(2) 涂料施工前必须把喷涂面吹扫干净, 可采用手工涂刷、滚刷、气喷涂等方法进行, 根据磨损情况的不同分为二至三遍完成。

(3) 超音速电弧喷涂工序和涂料施工工序间隔不应该超过 6 小时, 阴雨天气不得施工。

(4) 涂料施工后的涂层表面应平整均匀, 不允许有剥落、起泡、裂纹、气孔现象。

(五) 施工验收质量标准

(1) 喷砂质量要求

喷砂处理后的清洁度应达到 GB 8923 中规定的最高清洁度 Sa3 级, 即完全除去氧化皮、锈、油污和旧涂层等附着物, 工件表面完全显露出金属光泽。

(2) 喷涂涂层质量要求

喷涂施工后, 涂层要达到或超过以下质量要求:

结合强度: >60 MPa (EN 582) (HVOF)

涂层厚度: >500 μm (HVOF)

涂层的孔隙率: <1%;

四、未来涂层材料研究方向与煤制油设备的应用前景

(一) 先进涂层材料的研究与应用

纳米涂层、金属基复合涂层等新型材料具有更强的耐腐蚀性、耐高温性以及较高的机械强度, 能够满足煤制油反应器在苛刻环境下的要求。特别是在煤制油的高温高压环境中, 传统

涂层材料往往难以有效防止腐蚀和磨损, 而新型涂层材料在性能上更具优势, 能够延长设备的使用寿命, 减少设备停机检修时间。研究人员还在探索环保型涂层材料, 这些材料不仅能够提供更强的防护, 还具有较低的成本和更简便的施工工艺, 从而降低煤化工设备的整体维护费用。

(二) 涂层技术在煤化工设备中的前景分析

涂层技术的应用前景在煤制油化工设备中变得愈加重要。随着煤制油行业对设备运行效率和设备寿命的要求不断提高, 涂层技术不再局限于简单的防腐功能, 它已成为提升设备稳定性、延长使用寿命和降低能耗的重要手段。通过使用高性能涂层, 煤化工设备能够在复杂的高温高压环境中保持高效的工作状态, 极大提升了生产过程的安全性与稳定性。未来, 涂层技术将成为煤制油行业必不可少的核心技术, 且涂层材料将继续朝着更加环保、经济、高效的方向发展。

(三) 提升煤制油化工设备安全性的技术路径

提高煤制油化工设备的安全性不仅仅依赖涂层技术, 结合智能监测系统和优化设计等多项技术的融合, 才能达到更好的效果。智能监测系统可以实时检测设备的腐蚀程度、温度变化等重要参数, 提前发现潜在的安全隐患, 减少因设备故障而导致的事故。优化设计方面, 设备的结构可以通过更合理的设计减少应力集中和腐蚀加剧的区域。涂层技术作为基础防护手段, 在提高设备安全性方面扮演着不可或缺的角色, 未来它将与其它技术深度结合, 实现煤制油设备长期安全稳定的运行。

结语

本文通过对煤制油费托反应设备内壁涂层技术的研究, 探讨了涂层材料在高温、高压环境下对反应器的抗腐蚀性能、维护成本以及运行效率的影响。涂层的优化设计与合理选材能够显著提高反应器的耐腐蚀性, 延长设备的使用寿命, 并有效降低维修成本。涂层技术在提高煤制油化工设备安全性、降低运行成本、提升生产效率等方面发挥了重要作用。随着新型涂层材料的发展, 未来煤制油设备的涂层技术将进一步改善, 为煤化工行业的稳定发展提供坚实保障。

[参考文献]

[1]张勇, 李敏. 高温高压环境下涂层材料的应用研究[J]. 化工设备与管道, 2023, 42(6): 45-52

[2]陈杰, 刘涛. 纳米涂层在煤化工设备中的应用研究进展[J]. 化学工程, 2024, 76(4): 101-108

[3]赵丽, 孙峰. 金属基复合涂层在费托反应设备中的应用与性能分析[J]. 材料科学与工程, 2022, 40(9): 220-227

[4]王海, 张华. 新型抗腐蚀涂层的研究及其在化工设备中的应用[J]. 化学与材料, 2023, 58(7): 134-141

[5]李霞, 杨明. 高温腐蚀环境中涂层材料的研究与选择[J]. 工程材料, 2024, 45(2): 55-62