

碳纤维复合材料在磷酸装置化工泵上的应用经济价值

张士磊（云南云天化红磷化工有限公司，云南 开远 661600）

摘要：本文针对磷酸生产装置中金属化工泵因腐蚀、磨蚀导致的备件寿命短、检修频繁等问题，深入分析碳纤维复合材料的性能及其对不同介质的适用性。通过某化工有限公司实际应用的对比，发现碳纤维复合材料泵不仅在半年内收回成本，还能节约大量备件费用，应用效果显著，具有极高的推广价值。

关键词：磷酸装置；化工泵；碳纤维复合材料；应用经济价值

0 引言

在磷酸生产过程中，化工泵的稳定运行对整个生产系统至关重要。磷酸装置物料多为液态且具有易腐蚀、易磨蚀、易结垢的特性，现用机泵在应对这些物料时，随着磷矿品质下降及化工辅剂的添加，出现了过流部件腐蚀、磨蚀加剧等问题，严重影响生产效率与经济效益。

1 磷酸装置化工泵工作原理

在磷酸装置中，化工泵通过特定的机械结构与动力转换机制实现物料的高效输送。泵的核心部件叶轮在电机驱动下高速旋转，其叶片对泵腔内液体施加作用力，基于离心力原理，液体在叶轮中心处获得加速度，沿叶片流道被甩向叶轮外缘。在叶轮中心形成的低压区促使液体从泵的进口被持续吸入，补充至叶轮中心区域，如此循环往复，保障了物料的连续流动。

针对磷酸装置中各类具有不同化学性质和物理特性的介质，化工泵在设计上采用了多种针对性措施。对于腐蚀性介质，选用 CD4MCu、Cr30 等耐腐蚀材料制造过流部件，可以确保泵体的结构完整性。而对含固体颗粒的介质时，通过优化叶轮的形状、叶片的角度以及流道的设计，降低颗粒对泵体的磨蚀影响，提高泵的运行稳定性与使用寿命。通过合理设计泵的扬程、流量等参数，能够确保泵能够提供足够的能量，稳定、准确地输送至各个指定工位，维持磷酸生产系统的连续、稳定运行。

2 碳纤维复合材料的特点及性能

2.1 碳纤维复合材料的特点

2.1.1 独特的复合结构

新型碳纤维复合材料采用一种创新的复合架构，将耐腐化覆、耐磨金覆与碳纤维进行精妙组合。碳纤维作为整个结构的核心增强体，以极高的强度和模量特性，为材料提供了稳固的力学支撑。它的微观结构呈现出有序排列的纤维束形态，这些纤维束在复合材

料中犹如坚固的骨架，能够有效承载外部施加的各种应力，极大提升了材料整体的抗变形能力。

耐腐化覆主要针对化学腐蚀环境，特殊的化学成分和分子结构能够有效抵御各类化学物质的侵蚀，防止材料在恶劣化学环境中发生化学反应而导致性能下降。耐磨金覆侧重于应对机械磨损，它具有极高的硬度和耐磨性，能够在材料表面形成一层坚韧的保护膜，有效减少因物料摩擦、颗粒冲击等机械作用对材料造成的磨损。这种多相复合结构是通过先进的复合工艺使各组成部分之间形成了紧密的化学键合和良好的界面结合。

2.1.2 出色的化学稳定性

碳纤维复合材料是与介质接触的部件完全不含金属材料。在化工生产领域的磷酸生产过程中，金属离子的溶出往往会带来一系列问题，如产品污染、催化剂中毒等问题，新型碳纤维复合材料的化学结构中的化学键具有极高的稳定性，能够有效抵抗多种酸碱介质的侵蚀。以在稀硫酸环境中的应用为例，传统金属材料在稀硫酸的长期作用下，会逐渐发生氧化反应，表面产生锈蚀，导致材料性能劣化。而新型碳纤维复合材料在相同条件下能够长时间保持表面光洁，它的化学结构和性能几乎不受影响。在磷酸生产过程中，不会因为材料的腐蚀而引入杂质，从而保证了磷酸产品的纯度和品质，为企业的生产经营提供了有力保障。

2.1.3 优良的耐磨特性

新型碳纤维复合材料与传统的高铬耐磨合金相比，新型碳纤维复合材料在耐磨性方面具有明显优势。在磷酸料浆输送等含有大量固体颗粒的工况下，泵的过流部件需要承受颗粒的高速冲刷和摩擦。新型碳纤维复合材料凭借其优良的耐磨特性，能够有效抵抗颗粒的磨损作用。当固体颗粒冲击到碳纤维复合材料表面时，其内部的耐磨硬质相能够将冲击力分散到周围的碳纤维和其他组成部分，从而减少了局部的应力集

中。同时,耐磨硬质相的高硬度使得颗粒难以在材料表面形成明显的划痕和磨损坑,经过长期的实际运行验证,采用新型碳纤维复合材料的泵过流部件,在相同工况下大大降低了设备的维护成本和更换频率。

2.1.4 稳定的高温性能

在一般工作条件下,新型碳纤维复合材料能够耐受高达 160℃ 的高温。即使当介质为特定浓度的硫酸(如 $w(\text{H}_2\text{SO}_4)$ 55% 硫酸)或磷酸(如 $w(\text{H}_3\text{PO}_4)$ 85% 磷酸)时,也能稳定耐受 120℃ 的高温环境。对于传统的非金属材料,随着温度的升高,材料会逐渐变软,导致密封性能下降、过流部件变形等问题。而新型碳纤维复合材料通过特殊的配方设计和工艺处理,使其在高温下能够保持稳定的物理和化学性能。在高温环境下,内部的碳纤维和其他组成部分之间的化学键依然保持稳定,材料的晶体结构也不会发生明显变化。

2.2 碳纤维复合材料的性能

2.2.1 力学性能

碳纤维复合材料具备高强度特性,拉伸强度远超传统金属材料,能承受更大的外力而不发生断裂,同时,通过合理的材料配方与工艺控制,它还拥有良好的韧性。在遭受冲击载荷时,能够吸收能量并产生一定的形变而不脆裂,这种高强度与高韧性的结合,使得在磷酸装置中,即使泵体的过流部件受到物料的高速冲击或压力波动,也能保持结构的完整性,减少意外损坏的风险。

2.2.2 化学性能

碳纤维复合材料化学结构中的化学键能有效抵抗酸碱的侵蚀,在磷酸、硫酸等酸性环境中,会发生氧化、溶解等化学反应。这种优异的耐化学腐蚀性不仅保证了设备的使用寿命,还确保了产品质量不受材料腐蚀产物的影响,维持了生产过程的稳定性和连续性。

2.2.3 热机械性能

在不同的温度和压力条件下,碳纤维复合材料能够保持良好的尺寸稳定性。无论是在高温的磷酸生产环境中,还是在压力频繁变化的工况下,其形状和尺寸的变化极小,这对于保证化工泵的密封性能和运行精度至关重要。稳定的尺寸能够确保泵的叶轮与泵壳之间的间隙始终处于合理范围,避免因尺寸变化导致的泄漏和效率下降问题。

碳纤维复合材料的表面也具有较低的摩擦系数,在物料输送过程中能有效减少物料与泵体过流部件之

间的摩擦阻力,降低能耗。同时,它也具备一定的自润滑性,因此,在无需额外添加润滑剂的情况下,也能减少部件之间的磨损,提高设备的运行效率。

3 碳纤维复合材料在磷酸装置化工泵上的应用

3.1 磷酸料浆输送泵应用

以某化工有限公司 20 万 t/a 磷酸装置的 P0105A 磷酸料浆输送泵为例,原设备型号为 LC200/410,在长期运行中暴露出诸多问题。其过流部件材质为 Cr30,面对含磷酸料浆(温度 80℃, $w(\text{固})$ 50%,相对密度 1.55)的复杂工况,原泵叶轮、泵体、泵盖等过流部件使用寿命仅为 3 个月,机封更是仅能使用 1 个月。频繁的部件更换与维修不仅增加了生产成本,还严重影响了生产的连续性。

在采用新型碳纤维复合材料泵后,情况得到显著改善。新型泵型号为 200DCS-350,选型过程充分考虑了现场工况。通过精确计算确定所需扬程 $H=15.0\text{m}$,流量 $qV=350\text{m}^3/\text{h}$,转速 980r/min。过流部件采用新型碳纤维复合材料,该材料的高强度与高韧性力学性能,使其能够有效抵抗料浆中固体颗粒的冲刷与磨损。从化学性能看,其优异的耐化学腐蚀性确保了在酸性料浆环境下稳定运行。

自 2022 年 9 月装置大修时更换为新型碳纤维复合材料泵后,运行至 2023 年 4 月期间未进行过检修。2023 年 5 月对泵进行常规检查时发现,泵盖完好,无明显腐蚀、磨蚀现象。这一应用案例充分展示了新型碳纤维复合材料在磷酸料浆输送泵中的优势。与传统材质泵相比,新型泵大大延长了使用寿命,减少了维修频次,降低了因设备故障导致的生产中断风险。由于新型碳纤维复合材料的低摩擦系数与自润滑性,在物料输送过程中有效降低了能耗,提高了输送效率。良好的尺寸稳定性也保证了泵在运行过程中的密封性能和运行精度,进一步提升了设备的整体性能与可靠性。

3.2 稀硫酸输送泵应用

某化工有限公司 20 万 t/a 磷酸装置的 P0131B 稀硫酸输送泵,原设备型号为 LC125/405。在实际运行中,该泵面临着严峻挑战。其过流部件材质为 CD4MCu,输送的介质为 $w(\text{H}_2\text{SO}_4)$ 8%–10% 的稀硫酸,温度达 80℃,且 $w(\text{固})$ 20%,相对密度 1.3。在此工况下,原泵叶轮、泵体、泵盖等过流部件使用寿命仅为 2 个月,机封寿命更是只有 1 个月。频繁的部件更换与维修工作,不仅耗费大量人力、物力,还对生产的稳定运行

造成极大干扰。

为了解决这一难题,选用新型碳纤维复合材料泵。新型泵型号为 125DCS-350 新型碳纤维复合材料泵,选型时充分考虑现场工况。泵的扬程与原泵一致,设定为 25.5m,流量 $qV=250\text{m}^3/\text{h}$,转速 1450r/min,过流部件采用新型碳纤维复合材料。该材料凭借出色的化学性能,能够有效抵御稀硫酸的腐蚀,防止因化学侵蚀导致的部件损坏。同时,其力学性能方面的高强度与高韧性,使其在承受介质冲击时保持良好的结构稳定性。自 2022 年 9 月装置大修时将泵更换为新型碳纤维复合材料泵后,效果显著。2023 年 3 月对泵进行拆检时发现叶轮完好无损,也没有明显腐蚀、磨蚀现象。在实际运行中,新型泵大大延长了使用寿命,减少了维修频次。此外,新型碳纤维复合材料的低摩擦系数与自润滑性,使得物料输送过程更加顺畅,能耗降低,输送效率显著提高。

4 碳纤维复合材料在磷酸装置化工泵上的应用经济价值

从备件成本角度看,磷酸料浆输送泵和稀硫酸输送泵需频繁更换过流部件与机封。以这两台泵为例,改造前每 2-3 个月需更换全套过流部件,每月更换一套机封,半年备件费用高达 87.62 万元。而更换为新型碳纤维复合材料泵后,更新费用仅 31.20 万元,且在半年试用期间未更换任何备件,直接节约备件费用 56.42 万元。这不仅可以减少备件采购成本,还能避免因备件库存不足导致的生产延误风险。

在生产损耗方面,2021-2022 年因磷酸料浆输送泵故障导致系统非计划停车 8 次,平均每次抢修 2 小时。按单套装置过滤出酸 $130\text{m}^3/\text{h}$ 计算,非计划停车损失磷酸产量约 2080t,造成经济损失约 43.6 万元。而且在系统开停过程中,大量磷酸外排再回收造成的磷损失对生产影响较大。采用新型泵后,半年内未出现此类故障,有效减少了经济损失。稳定的生产运行保证了磷酸产量的稳定输出,避免了因产量波动带来的潜在经济损失。

从人力成本角度考量,改造前两台泵半年共检修 5 次,每次平均投入 4 名检修工,每次检修时间 6 小时。频繁的检修工作耗费大量人力。新型碳纤维复合材料泵运行稳定,减少了频繁启停操作与检修次数,极大地节约了人力投入。人力成本的降低不仅体现在直接的人工费用上,还包括因人力调配而节省的管理成本。

从长期运行的能源消耗来看,新型碳纤维复合材

料具有低摩擦系数与自润滑性,使得物料输送过程能耗降低。以大规模的磷酸生产装置为例,长期累积下来,能源成本的节约相当可观,由于其良好的性能也能减少设备故障导致的能源浪费,进一步提高了能源利用效率。在安全环保方面,新型泵减少了因腐蚀泄漏带来的安全隐患与环境污染风险,从长远来看,具有显著的经济价值。

5 结语

在磷酸装置化工泵中,新型碳纤维复合材料展现出卓越性能与显著经济价值。它凭借独特的结构与性能特点,有效解决了传统金属泵面临的腐蚀、磨蚀难题,大幅延长了设备使用寿命,减少了备件更换频率与维修次数。在经济层面,不仅显著降低了备件采购、库存管理及人力成本,还因减少非计划停车与生产损耗,保障了生产的连续性与稳定性,极大地提升了生产效益。在能源消耗与安全环保方面,这一创新应用为磷酸生产行业提供了高效、可靠且可持续的解决方案,具有广阔的推广应用前景。随着技术的不断进步与完善,新型碳纤维复合材料将在更多领域发挥重要作用,推动化工行业向更绿色、高效的方向发展。

参考文献:

- [1] 张怀伟,朱福先,胡可军,等.碳纤维复合材料超声辅助磨削制孔的轴向力实验研究[J].制造技术与机床,2023(11):131-133.
- [2] 张旭,齐磊,李镕君,等.高性能碳纤维复合材料自动铺放技术研究进展[J].纤维复合材料,2024,41(04):83-94.
- [3] 刘德胜.磷酸装置稀酸渣升级利用研究及应用[J].云南化工,2024,51(S1):95-97.
- [4] 张云川,廖鹏.新型碳纤维复合材料在磷酸装置化工泵上的应用[J].磷肥与复肥,2024(2):44-46.
- [5] 钱松.国内首创碳纤维耐腐蚀泵在大连花园口投产[J].化工装备技术,2023(5):111-113.
- [6] 尹玉霞,刘光涛,张旭锋,等.一种耐腐蚀的化工行业用碳纤维泵头:CN202123131287.6[P].CN216381952U.
- [7] 程显军.一种碳纤维树脂基复合材料制造的耐腐蚀泵.CN201010552348.3.

作者简介:

张士磊(1988-),男,汉族,云南开远人,本科,助理工程师,研究方向:磷化工和无机氟化工。