

锆合金管在化工领域的应用前景

王康帅, 生金峰, 姬茹一, 吴学纲, 马秀清, 陈虹港, 刘天庆

机械工业上海蓝亚石化设备检测所有限公司, 上海

收稿日期: 2025年5月16日; 录用日期: 2025年7月3日; 发布日期: 2025年7月11日

摘要

在化工产业中, 设备与管道材料的选择对生产的安全性、稳定性以及成本控制起着关键作用。锆合金管凭借其独特的物理与化学性能, 在化工领域逐渐崭露头角, 展现出广阔的应用前景。

关键词

化工, 管道, 锆合金, 应用前景

The Application Prospect of Zirconium Alloy Tubes in the Chemical Industry Field

Kangshuai Wang, Jinfeng Sheng, Ruyi Ji, Xuegang Wu, Xiuqing Ma, Honggang Chen, Tianqing Liu

Shanghai Lanya Petrochemical Equipment Inspection Institute Co., Ltd. of Machinery Industry, Shanghai

Received: May 16th, 2025; accepted: Jul. 3rd, 2025; published: Jul. 11th, 2025

Abstract

In the chemical industry, the selection of equipment and pipeline materials plays a crucial role in the safety, stability of production and cost control. With its unique physical and chemical properties, zirconium alloy tubes have gradually emerged in the chemical industry field and shown broad application prospects.

Keywords

Chemical Industry, Pipeline, Zirconium Alloy, Application Prospect

文章引用: 王康帅, 生金峰, 姬茹一, 吴学纲, 马秀清, 陈虹港, 刘天庆. 锆合金管在化工领域的应用前景[J]. 化学工程与技术, 2025, 15(4): 214-221. DOI: 10.12677/hjct.2025.154020

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在化工领域，材料的性能往往决定了生产的效率、成本以及产品的质量。随着化工工艺不断向高温、高压、强腐蚀等极端条件发展，对材料的要求也日益严苛。锆合金管凭借其优异的耐腐蚀性、良好的机械性能和加工性能，在化工领域展现出了广阔的应用前景[1]-[8]。

2. 锆合金管的特性

2.1. 卓越的耐腐蚀性

锆合金管对多种化学介质具有出色的耐受性。无论是氧化性酸如硝酸、浓硫酸，还是还原性酸如盐酸、氢氟酸，亦或是强碱溶液，锆合金管都能保持稳定，不易被腐蚀。例如，在浓度高达 98% 的浓硫酸中，普通金属材料可能会迅速被腐蚀，但锆合金管却能长时间稳定工作，其腐蚀速率极低。这一特性使得锆合金管在处理各种腐蚀性化工原料和产品时，能够确保设备的安全运行，大大延长设备的使用寿命。

2.2. 良好的机械性能

锆合金管具有适中的强度和良好的韧性。在高温和高压环境下，它依然能保持结构的稳定性，不易发生变形或破裂。以常见的 Zr-Sn 系和 Zr-Nb 系锆合金为例，它们在高温下的屈服强度和抗拉强度都能满足化工设备的要求。同时，其良好的韧性使其在受到冲击或振动时，不会轻易损坏，为化工生产的连续性提供了保障。

2.3. 优异的加工性能

锆合金管可以通过挤压、锻造、轧制等多种加工方式制成不同规格和形状的产品，以满足化工设备多样化的需求。在挤压成形过程中，能够制造出高精度的管材，用于制造化工管道和反应釜的换热管等；通过锻造成形，可以获得强度更高、性能更优的管件，用于关键部位的连接。而且，锆合金管在加工过程中的尺寸精度和表面质量易于控制，这对于化工设备的精密制造非常重要。

2.4. 高温强度高

许多化工工艺需要在高温条件下进行，锆合金管具有较高的高温强度，能够承受高温环境下的压力和应力，确保设备的正常运行。比如在石油化工的裂解、重整等高温反应过程中，锆合金管可以作为反应管道或加热管道。

2.5. 良好的焊接性能

便于加工和安装，能够与其他化工设备和管道进行可靠的连接，减少泄漏风险，提高整个化工系统的稳定性和可靠性。

3. 在化工领域的应用现状

3.1. 热交换器

热交换器是实现热量传递的关键设备，在化工生产中应用广泛。锆合金管因其良好的导热性能和耐

腐蚀性，成为制造热交换器换热管的理想材料。在一些需要处理腐蚀性介质的热交换过程中，如硫酸生产中的余热回收装置，使用锆合金管制成的换热管，不仅能够高效地传递热量，还能防止硫酸对换热管的腐蚀，延长热交换器的使用寿命，降低设备维护成本。

3.2. 管道输送系统

对于输送腐蚀性化工原料和产品的管道系统，锆合金管也有着重要的应用。在一些特殊的化工生产场景中，如输送氢氟酸等强腐蚀性介质，普通金属管道会迅速被腐蚀穿孔，而锆合金管则能稳定运行，保障物料的安全输送。此外，锆合金管的连接性能良好，通过合适的焊接或法兰连接方式，能够确保管道系统的密封性，防止物料泄漏，减少对环境的污染和安全隐患。

4. 应用前景展望

4.1. 化工行业发展带来机遇

(1) 石油化工领域需求增长：随着石油化工行业的持续发展，对耐腐蚀、耐高温的管材需求将保持稳定增长。锆合金管在石油炼制、乙烯生产、芳烃生产等过程中，可用于输送各种腐蚀性介质和高温流体，如在常减压蒸馏装置中输送腐蚀性的原油和石油产品，在乙烯裂解装置中输送高温裂解气等。

(2) 精细化工行业拓展应用：精细化工产品的生产过程中，对原材料和产品的纯度要求较高，锆合金管的耐腐蚀性和清洁性能够满足精细化工行业的需求。例如在制药、染料、香料等领域，锆合金管可用于输送各种有机溶剂、酸碱溶液等。

(3) 新兴化工工艺的需求推动：随着化工技术的不断创新，一些新兴的化工工艺不断涌现，如新能源材料的制备、精细化工产品的合成等。这些新兴工艺往往对材料的性能提出了更高的要求，锆合金管凭借其独特的性能优势，有望在这些领域得到更广泛的应用。例如，在锂离子电池材料的生产过程中，需要处理一些具有腐蚀性的电解液和化学试剂，锆合金管可以用于制造相关的反应设备和输送管道，满足生产过程对材料耐腐蚀和高精度的要求。

4.2. 环保要求促使应用拓展

在环保意识日益增强的今天，化工行业对减少污染物排放和提高资源利用率的要求越来越严格。锆合金管的耐腐蚀性能可以有效减少设备腐蚀导致的物料泄漏和环境污染问题。同时，由于其使用寿命长，减少了设备更换和维修过程中产生的废弃物，符合可持续发展的理念。未来，随着环保标准的不断提高，锆合金管在化工环保设备中的应用将会进一步拓展，如在废水处理设备、废气净化装置等方面发挥更大的作用。

4.3. 成本降低带来更广阔市场

尽管锆合金管具有诸多优异性能，但目前其较高的成本在一定程度上限制了其应用范围。然而，随着生产技术的不断进步和规模化生产的实现，锆合金管的生产成本有望逐渐降低。一方面，新的熔炼和加工技术的研发可以提高生产效率，降低能耗和原材料损耗；另一方面，市场需求的增加将促使企业扩大生产规模，实现规模经济效应。当成本降低到一定程度后，锆合金管将在化工领域获得更广阔的市场空间，替代更多传统的金属材料，推动化工行业的技术升级和发展。

4.4. 技术进步提升应用潜力

(1) 新型锆合金材料研发：随着科技的不断进步，新型锆合金材料的研发将取得突破，提高管材的性

能和耐腐蚀性，满足更广泛的应用需求。例如，通过添加特定的合金元素，可以进一步提高锆合金管的耐腐蚀性和耐高温性能，改善其加工性能和焊接性能。

(2) 生产工艺优化：改进生产工艺和设备，降低生产成本，提高锆合金管材的产量和品质，提升市场竞争力。例如，采用先进的熔炼工艺、轧制工艺和表面处理工艺，可以提高锆合金管的质量和尺寸精度，降低生产成本。

5. 锆合金管在化工领域应用面临的难点

5.1. 成本因素

(1) 原料成本高：锆属于稀有金属，其获取和提炼过程复杂，导致锆合金的原料成本高昂。这使得化工企业在考虑大规模使用锆合金管时，需要承受较大的成本压力，尤其是对于一些利润空间有限的化工产品生产过程。

(2) 维护成本高：锆合金管在使用过程中，虽然具有较好的耐腐蚀性，但一旦出现损坏，由于其材料特殊性，维修和更换成本较高。而且，为了确保其性能稳定，需要定期进行检测和维护，这也增加了化工生产的整体成本。

5.2. 加工特性

存在成型难度大问题，锆合金的强度较高，在加工成管材的过程中，需要较大的加工力和特殊的加工工艺，如热加工、冷加工相结合的方法，才能使其达到所需的形状和尺寸精度。同时，加工过程中容易出现表面裂纹等缺陷，需要严格控制加工参数和操作流程。

5.3. 焊接特性

焊接技术要求严格。锆合金管的焊接需要采用特殊的焊接工艺，如钨极惰性气体保护焊(TIG)等，以防止焊接过程中合金元素的氧化和烧损。焊接过程中对焊接环境、焊接材料和焊接参数的要求非常严格，否则容易产生焊接缺陷，影响管道的密封性和耐腐蚀性。

5.4. 耐腐蚀性

(1) 复杂介质腐蚀挑战：化工生产中涉及的介质种类繁多，包括各种强酸、强碱、盐溶液以及有机化合物等。虽然锆合金在一些常见的腐蚀介质中表现出良好的耐腐蚀性，但在某些特定的复杂介质环境下，可能会发生局部腐蚀，如点蚀、缝隙腐蚀等，这对锆合金管的长期稳定使用构成威胁。

(2) 高温高压环境影响：在一些高温高压的化工工艺过程中，锆合金管的耐腐蚀性可能会受到影响。高温会加速金属的腐蚀速率，而高压则可能导致管道材料发生变形，进而影响其耐腐蚀性。此外，温度和压力的波动也可能引发热应力和机械应力，进一步加剧管道的腐蚀程度。

5.5. 设计与应用规范

(1) 缺乏完善标准：目前，针对锆合金管在化工领域的应用，相关的设计和应用规范还不够完善。在管道的设计、选材、安装和维护等方面，缺乏统一的标准和指导原则，这使得工程技术人员在实际应用中面临一定的困难，难以准确评估锆合金管的适用性和安全性。

(2) 特殊工况适应性差：化工生产中存在许多特殊的工况条件，如含有固体颗粒的流体输送、高速流动的腐蚀性介质等。锆合金管在这些特殊工况下的适用性需要进一步研究和验证，目前缺乏足够的实验数据和应用经验来支持其在这些复杂工况下的广泛应用。

6. 锆合金管在化工领域应用策略

6.1. 成本问题

(1) 优化采购与库存管理：与供应商建立长期稳定的合作关系，争取更优惠的采购价格和稳定的供应。同时，优化库存管理，精准预测需求，减少库存积压和资金占用。

(2) 提高材料利用率：在设计和加工过程中，采用先进的计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)技术，优化管材的尺寸设计和加工工艺，减少材料浪费，提高材料利用率。

(3) 探索替代材料或混合使用：研究是否有其他性能相近但成本较低的材料可以部分替代锆合金管，或者考虑在一些对耐腐蚀性要求不是极高的部位，采用锆合金管与其他材料混合使用的方式，以降低成本。

例如：

在硫酸介质中，在硫酸浓度为 98%、温度 80℃ 的工况下，进行为期 6 个月的运行监测。通过定期测量管道壁厚，计算腐蚀速率：Zr-4 合金管的平均腐蚀速率为 0.15 mm/年；Zr-2.5Nb 合金管的平均腐蚀速率为 0.08 mm/年；新型锆合金管的平均腐蚀速率仅为 0.03 mm/年。

在氯碱介质中，电解槽和氯气输送管道对管材的耐腐蚀性要求极高。在氯气含水量低于 0.06%、温度 60℃ 的工况下运行。经过 12 个月的监测，Zr-4 合金管的平均腐蚀速率为 0.2 mm/年，Zr-2.5Nb 合金管的平均腐蚀速率为 0.12 mm/年。从成本效益角度分析，虽然 Zr-2.5Nb 合金管的采购成本比 Zr-4 合金管高约 20%，在尿素生产场景中，在温度 190℃、压力 14 MPa、氨基甲酸铵浓度 80% 条件下，新型锆合金管的平均腐蚀速率为 0.05 mm/年，Zr-2.5Nb 合金管的平均腐蚀速率为 0.08 mm/年。新型锆合金管的抗拉强度下降幅度为 5%，Zr-2.5Nb 合金管的抗拉强度下降幅度为 8%。

综合上述特定条件，可以发现不同锆合金管的腐蚀性能差距，但是考虑成本因素，可以综合考虑采用混合使用的方式，来降低成本。

6.2. 加工难度问题

(1) 引进先进加工设备与技术：投资引进先进的加工设备，如高精度的轧机、数控加工中心等，提高加工精度和效率。同时，采用先进的加工技术，如激光切割、电子束焊接等，以更好地控制加工质量，减少加工缺陷。

(2) 加强人员培训：组织操作人员参加专业培训课程和技术交流活动，使其熟悉锆合金管的加工特性和工艺要求，掌握先进的加工技术和操作技能，提高加工质量和效率。

(3) 开展工艺研究与优化：企业与科研机构合作，开展针对锆合金管加工工艺的研究，通过实验和模拟分析，优化加工参数，如温度、压力、速度等，解决加工过程中出现的问题，提高加工性能。

6.3. 耐腐蚀性问题

(1) 开展腐蚀试验与监测：在化工生产现场或实验室模拟实际工况，对锆合金管进行长期的腐蚀试验，监测其腐蚀速率和腐蚀形态，及时发现潜在的腐蚀问题。根据试验结果，调整生产工艺或采取相应的防护措施。

(2) 表面防护处理：对锆合金管进行表面防护处理，如化学镀镍、喷涂耐腐蚀涂层等，提高其表面硬度和耐腐蚀性。同时，采用钝化处理等方法，在管材表面形成一层致密的钝化膜，增强其抗腐蚀能力。

(3) 优化工艺参数：根据锆合金管在不同化工介质中的腐蚀特性，优化生产工艺参数，如控制介质的温度、浓度、流速等，避免出现有利于腐蚀发生的条件，降低腐蚀风险[9]-[11]。

6.4. 设计与应用规范问题

(1) 参与标准制定：化工企业、科研机构 and 行业协会等应积极参与锆合金管在化工应用领域相关标准的制定和修订工作，结合实际应用经验和研究成果，完善设计、选材、安装、维护等方面的标准和规范，为工程技术人员提供明确的指导依据。

(2) 建立数据库与案例库：收集和整理锆合金管在化工领域的应用数据和案例，建立数据库和案例库，为工程设计和应用提供参考。通过对大量实际案例的分析，总结经验教训，提高锆合金管在特殊工况下的设计和应用水平。

(3) 加强合作与交流：加强企业与科研机构、高校之间的合作与交流，开展产学研合作项目，共同研究解决锆合金管在化工应用中的关键技术问题。同时，举办行业技术研讨会和培训班，促进技术交流和人才培养，推动锆合金管在化工领域的合理应用和发展。

7. 未来锆合金管的研发方向

7.1. 材料性能优化

(1) 高强度与高韧性：通过优化合金成分，如添加特定的微量元素，以及改进热处理工艺，进一步提高锆合金管的强度和韧性，使其能在承受更高压力、更复杂应力的环境下保持稳定性能，满足极端条件下的应用需求[12]-[14]。

(2) 耐腐蚀性提升：研发新的表面处理技术或添加耐蚀合金元素，增强锆合金管在各种腐蚀性介质中的抗腐蚀能力，特别是在化工等强腐蚀环境中的长期稳定性，降低腐蚀速率，延长使用寿命。

例如，在硫酸介质中，常用 Zr-4 合金管在较低浓度和温度下表现出较好的耐蚀性，但随着硫酸浓度和温度的升高，腐蚀速率明显增加。Zr-2.5Nb 合金管的耐硫酸腐蚀性能相对更优，尤其是在高浓度硫酸环境下，其腐蚀速率增长较为缓慢。新型添加了特定元素的锆合金管，在硫酸介质中形成了更致密的氧化膜，有效阻止了硫酸对基体的侵蚀，在整个实验浓度和温度范围内，其腐蚀速率均低于 Zr-4 合金管和 Zr-2.5Nb 合金管。

在盐酸介质中，三种合金管的腐蚀速率均较高，但 Zr-2.5Nb 合金管相对具有更好的抗盐酸腐蚀能力。这是因为 Zr-2.5Nb 合金管表面的氧化膜在盐酸环境中具有一定的稳定性，能够在一定程度上减缓氯离子对合金管的腐蚀。新型锆合金管通过优化成分设计，提高了对氯离子的抵抗能力，其耐盐酸腐蚀性能也优于 Zr-4 合金管。

在氢氧化钠溶液中，Zr-4 合金管和 Zr-2.5Nb 合金管的耐蚀性表现较为接近，腐蚀速率相对较低。新型锆合金管在碱性环境中，表面的微量元素与氢氧根离子发生反应，进一步增强了氧化膜的稳定性，使其耐碱腐蚀性能略优于前两种合金管。

同样可以采用新的表面处理技术进行防腐，目前最新的技术有磁控溅射技术和微弧氧化技术。选取 Zr-4 合金管作为研究对象，将其分为三组，一组不做处理作为对照组，另外两组分别采用磁控溅射技术和微弧氧化技术进行表面处理。将处理后的样品和对照组样品分别置于模拟化工环境介质中，同样采用浸泡实验法，测量样品的腐蚀速率，观察表面腐蚀形貌，分析腐蚀产物成分。

通过实验对比分析发现：经过磁控溅射处理的 Zr-4 合金管，在硫酸介质中，表面形成的薄膜有效隔离了硫酸与基体的接触，其腐蚀速率显著降低，约为未处理样品的三分之一。在盐酸介质中，薄膜对氯离子的阻挡作用明显，腐蚀速率降低了 40%。在氢氧化钠溶液中，磁控溅射薄膜也能在一定程度上减缓腐蚀，腐蚀速率降低了 25%。通过 SEM 观察发现，磁控溅射薄膜表面均匀致密，无明显缺陷，能够有效保护基体。

采用微弧氧化技术处理的 Zr-4 合金管,在硫酸介质中,其表面的陶瓷氧化膜具有良好的化学稳定性,腐蚀速率降低了 50%。在盐酸介质中,陶瓷氧化膜对氯离子具有较强的吸附和阻挡能力,腐蚀速率降低了 60%。在氢氧化钠溶液中,微弧氧化膜与碱性介质发生反应,形成了一层新的钝化膜,进一步提高了耐蚀性,腐蚀速率降低了 35%。SEM 图像显示,微弧氧化膜具有多孔结构,孔隙内部填充有各种氧化物,这些结构和成分增强了膜层的耐蚀性能。

(3) 高温性能改进:提高锆合金管的高温强度、抗蠕变性能和热稳定性,使其能在更高的工作温度下保持性能稳定,可应用于高温环境。

7.2. 制造工艺创新

(1) 精密成型技术:进一步发展精密挤压、连续轧制等成型技术,提高锆合金管的尺寸精度和表面质量,实现更复杂形状和结构的管材制造,满足不同应用领域的个性化需求。同时,降低制造过程中的材料损耗和能源消耗,提高生产效率[15]。

(2) 3D 打印技术应用:深入研究 3D 打印技术在锆合金管制造中的应用,开发适合 3D 打印的锆合金材料体系和工艺参数,实现快速成型和定制化生产,缩短产品研发周期和生产周期,降低生产成本,为制造具有复杂内部结构和特殊功能的锆合金管提供可能。

(3) 连接技术创新:研发更高效、可靠的连接技术,如新型焊接工艺、机械连接方法等,确保锆合金管在连接部位具有良好的强度、密封性和耐腐蚀性,提高管道系统的整体可靠性和稳定性[16]。

7.3. 功能特性拓展

智能化功能集成:探索在锆合金管中集成传感器、智能监测等功能,使其能够实时监测自身的状态,如应力、温度、腐蚀程度等参数,实现智能化运维和故障预警,提高设备的安全性和运行效率。

7.4. 绿色环保与可持续发展

(1) 节能减排:改进生产工艺,降低锆合金管生产过程中的能源消耗和二氧化碳排放,采用更环保的生产技术和设备,提高资源利用效率,减少对环境的影响。

(2) 可回收利用:研究锆合金管的回收再利用技术,建立完善的回收体系,提高锆资源的回收利用率,实现资源的可持续利用,降低对原生锆矿资源的依赖。

8. 结论

锆合金管凭借其优异的性能,在化工领域已展现出重要的应用价值,并且随着化工产业的发展以及技术的不断创新,其应用前景极为广阔。无论是在传统化工领域的持续深耕,还是在新兴化工领域的开拓创新,锆合金管都将发挥关键作用,为化工行业的高质量发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 耿佩,龚小涛,等. 锆合金材料加工技术及应用研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2021, 56(4): 115-117.
- [2] 章海霞,李中奎,许并社,等. A-Zr 基体显微组织对新锆合金氧化膜的形成及其耐腐蚀性能的影响[J]. 功能材料, 2014, 45(8): 8062-8066.
- [3] 李中奎,刘建章,周廉,等. 新锆合金耐蚀性能研究[J]. 原子能科学技术, 2003, 37(1): 84-87, 110.
- [4] 鲍一晨,张乐福,朱发文. Zr-2.5Nb 合金在 500°C, 25MPa 超临界水中的腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(5): 398-401.
- [5] 周耀. 锆和锆合金在化工设备中的应用[J]. 化工设计, 2003, 13(4): 19-22.
- [6] 韩继秋. 锆金属及其在化工耐蚀设备领域中的应用[J]. 煤矿现代化, 2004(3): 47-48.

-
- [7] 王华, 陈鹏. 醋酸装置中的特殊材料[J]. 石油化工自动化, 2007(5): 26-30.
 - [8] 周逊. 醋酸工业中几种典型耐蚀材料的特性及应用探讨[J]. 化工设计, 2004, 14(5): 78-82.
 - [9] 王鹏, 张卫刚, 孙旭东. 锆在硫酸提浓工艺中的腐蚀研究[J]. 材料导报, 2020, 34(S1): 385-389.
 - [10] 户子帅, 陈树军, 李博毅, 等. 锆合金腐蚀与防护研究进展[J]. 河北科技大学学报, 2024, 45(1): 1-14.
 - [11] 李正阳. 锆合金及其典型表面改性层的微动腐蚀机理研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2021.
 - [12] 胡娟, 李刚, 张天广, 等. 工业级锆及锆合金性能研究现状[J]. 金属世界, 2020(3): 23-26.
 - [13] 冯志浩, 夏超群, 等. 高强韧锆合金的发展与应用[J]. 材料科学与工艺, 2018, 26(2): 1-8.
 - [14] 张新宇, 马明臻, 梁顺兴, 张素红, 刘日平. 新型锆合金设计与强韧化研究进展[J]. 燕山大学学报, 2014, 38(6): 471-483.
 - [15] 张立波, 权晓惠, 等. 锆合金挤压技术研究与应用[J]. 重型机械, 2015(6): 11-13.
 - [16] 蒋帆. 新型锆合金管棒材焊接性能研究[J]. 焊接技术, 2019, 48(11): 40-43.