

暖通空调给排水管道的表面改性与性能研究

文 / 曹 锐 济南联东金烁科技有限公司

摘要: 本研究聚焦于暖通空调系统中给排水管道的表面改性与性能提升,通过系统分析化学镀层技术在铜合金管道表面的应用,深入探讨了Ni-P/TiN镀层对管道物相组成、形貌特征、硬度及耐磨性能的影响。研究采用精细调控镀液中TiN质量浓度的方法,揭示了不同浓度下镀层的微观结构与宏观性能间的内在联系。结果表明,在特定TiN浓度下,镀层展现出优异的硬度和耐磨性,为暖通空调给排水管道的表面处理提供了科学依据与技术支持。

关键词: 暖通空调; 给排水管道; 表面改性; 性能

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.02.077

引言

暖通空调系统的稳定运行依赖于各组成部件的高效协同工作,其中给排水管道作为输送流体的关键元件,其表面性能直接影响系统的整体效能与使用寿命。铜合金因其良好的导热性、耐腐蚀性及加工性能,在暖通空调管道中得到广泛应用。然而,在实际应用过程中,铜合金管道表面易受环境因素影响,出现磨损、腐蚀等问题,进而影响系统性能。因此,对铜合金管道进行表面改性,以提升其耐磨、耐腐蚀等性能,成为当前研究的热点之一。

一、表面改性技术概述

表面改性技术是通过物理、化学等方法改变材料表面或界面的化学组成、组织结构,从而赋予材料表面新的性能。对于暖通空调给排水管道而言,表面改性旨在增强其耐磨性、耐腐蚀性、抗结垢性等,以延长管道使用寿命,提高系统效率。常见的表面改性方法包括化学镀、物理气相沉积、化学气相沉积等。

二、Ni-P/TiN 镀层制备与表征

(一) 镀层制备工艺

1. 镀前预处理环节

镀前预处理环节是Ni-P/TiN复合镀层制备工艺中的重要步骤,其目的在于彻底清除铜合金给排水管道表面的油污、氧化物及其他杂质,以确保镀层与基体之间的良好附着。此环节的实施,需借助化学或物理方法,对管道表面进行深度清洁。具体而言,可采用碱性溶液去除油污,利用酸洗工艺去除氧化物,并通过机械打磨或喷砂处理进一步清除表面附着物。通过这些预处理措施,可以有效提升镀层与基体之间的结合力,为后续镀层的均匀沉积奠定坚实基础。

2. 镀液配制与施镀过程

镀液的配制与施镀过程是Ni-P/TiN复合镀层制备工艺的核心环节。在镀液配制阶段,需精确调控Ni、P及TiN等组分的浓度,以获得所需性能的镀层。这一过程的实现,依赖于对镀液成分的深入理解及精确的化学计量技术。在施镀过程中,则需严格控制镀液的温度、pH值及搅拌强度等参数,以确保镀层的均匀致密。具体而

言,需采用先进的恒温控制系统维持镀液温度的稳定,利用pH计精确监测并调整镀液的酸碱度,并通过合理的搅拌设计实现镀液中各组分的均匀分布。通过这些措施的实施,可以有效保障镀层的沉积质量。

3. 后处理步骤与镀层性能提升

后处理步骤是Ni-P/TiN复合镀层制备工艺的收尾环节,其目的在于进一步提升镀层的性能。此环节主要包括清洗、干燥及热处理等步骤。清洗步骤旨在去除镀层表面残留的镀液及杂质,以确保镀层的洁净度。干燥步骤则是通过加热或风干等方式,去除镀层表面的水分,防止镀层在后续使用过程中出现锈蚀或变质。而热处理步骤则是利用高温环境对镀层进行进一步的固化处理,以提升镀层的硬度、耐磨性及耐腐蚀性。通过这些后处理措施的实施,可以有效提升镀层的整体性能,使其更好地满足实际应用的需求。

(二) 镀层表征方法

为全面评估Ni-P/TiN镀层的性能,本研究采用了多种表征方法。物相组成通过X射线衍射(XRD)分析确定;表面及截面形貌利用扫描电子显微镜(SEM)观察;硬度测试采用维氏硬度计进行;耐磨性能则通过摩擦磨损试验机测定磨损率及磨损机制。

三、TiN 质量浓度对镀层性能的影响

(一) 物相组成与形貌特征

1. 铜合金基体物相

研究结果显示,未经镀层处理的铜合金基体,其物相主要由CuZn相与CuZn₅相构成,展现出典型的铜合金组织结构特征。这一基础物相构成对于后续镀层的形成及其性能表现具有重要影响,是理解镀层改性效果的出发点。

在铜合金基体的构成中,CuZn相与CuZn₅相的比例及分布状态,对镀层的附着力、均匀性以及改性后的整体性能起着决定性作用。CuZn相作为基体的主要组成部分,其良好的导电性和导热性为镀层提供了稳定的物理化学环境。而CuZn₅相则以其较高的硬度和耐磨性,为基体带来一定的机械强度基础。这两相的共同作用,构成了铜合金基体的基本性能框架。

2. TiN浓度对镀层物相影响

随着镀液中TiN质量浓度的增加，镀层的物相组成发生了显著变化。这一变化过程揭示了TiN在镀层形成中的关键作用，以及其对镀层性能的潜在影响。适当添加TiN，镀层中出现了含有胞状颗粒的结构，这些颗粒的嵌入，对镀层的硬度和耐磨性起到了显著提升作用。

具体而言，TiN的加入改变了镀层的生长机制和物相构成。在低浓度下，TiN纳米颗粒以分散状态存在于镀层中，与Ni基质形成复合结构。这种复合结构不仅保留了Ni基质的良好导电性和耐腐蚀性，还通过TiN颗粒的增强作用，提高了镀层的硬度和耐磨性。然而，当TiN浓度过高时，镀层物相的稳定性受到破坏，导致镀层质量恶化，出现裂纹、剥落等现象。这表明，TiN浓度的精确控制对于获得高性能镀层至关重要。

3. 镀层表面形貌特征

SEM观察进一步揭示了镀层表面形貌随TiN浓度的显著变化。在低浓度下，镀层表面光滑均匀，无明显的颗粒状或粗糙结构。这一形貌特征有利于减少流体在管道表面的摩擦阻力，提高流体的输送效率。随着TiN浓度的增加，镀层表面开始出现胞状颗粒，并逐渐增多。这些颗粒的嵌入，不仅增强了镀层的机械强度，还为其提供了额外的耐磨性。

然而，当TiN浓度过高时，镀层表面的颗粒聚集形成粗大结构，导致镀层质量下降。这种粗大结构不仅破坏了镀层的均匀性，还可能成为流体输送过程中的阻碍，增加流体的摩擦阻力和能量损失。因此，控制TiN浓度在适宜范围内，以获得光滑均匀且具有优异性能的镀层表面，是镀层改性技术的关键之一。

4. 镀层质量与TiN浓度的关系

镀层质量与TiN浓度之间的关系复杂而微妙。适量添加TiN可显著提升镀层的硬度和耐磨性，而过量添加则导致镀层质量恶化。这一关系揭示了TiN在镀层形成中的双重作用：既是增强相，也是潜在的破坏因素。因此，精确控制TiN浓度成为获得高质量镀层的关键。

在镀层形成过程中，TiN颗粒的嵌入为镀层提供了额外的硬度和耐磨性。然而，当TiN浓度过高时，镀层中TiN颗粒的聚集和粗大结构的形成，破坏了镀层的均匀性和连续性。这种破坏不仅降低了镀层的机械强度，还可能导致其在实际应用中的失效。因此，在镀层改性技术中，必须严格控制TiN浓度，以确保镀层质量的稳定性和可靠性。

5. 镀层改性效果与优化策略

综上所述，镀层改性效果显著受TiN浓度的影响。适量添加TiN可显著提升镀层的硬度和耐磨性，为暖通空调给排水管道的表面处理提供了有力支持。然而，过量添加TiN则导致镀层质量恶化，降低了其实际应用价值。因此，优化镀层改性策略成为当前研究的重要

方向。

(1) 精确控制镀液中TiN质量浓度

为了进一步优化镀层改性效果，精确控制镀液中TiN的质量浓度是一个至关重要的策略。这一策略的实施，旨在通过实验研究确定TiN的最佳浓度范围，从而最大化地提升镀层的硬度和耐磨性能。在实际操作中，需要借助先进的检测技术和分析手段，对镀液中的TiN浓度进行精确测量和控制。同时，通过系统地改变TiN浓度，并观察其对镀层性能的影响，可以逐步逼近并确定最佳浓度范围。这一策略的成功实施，不仅能够显著提升镀层的力学性能，还能够为暖通空调给排水管道的表面处理提供更多可能性，推动相关领域的技术进步和发展。

(2) 优化镀液配方和工艺参数

除了精确控制镀液中TiN的质量浓度外，优化镀液配方和工艺参数也是提升镀层改性效果的重要策略。这一策略的实施，旨在通过调整镀液的化学成分和工艺条件，改善镀层的微观结构和表面形态，从而提高镀层的均匀性和附着力。具体而言，可以通过改变镀液中各组分的比例和添加适量的表面活性剂等方式，来优化镀液的配方。同时，还可以调整电镀过程中的电流密度、温度和时间等工艺参数，以进一步改善镀层的性能。通过这些措施的实施，可以有效地提升镀层的整体质量，使其更好地满足实际应用的需求。

(3) 探索新型镀层材料和技术

在镀层改性技术的研究中，探索新型镀层材料和技术是一个具有广阔前景的创新方向。这一策略的实施，旨在通过引入新的材料和技术手段，打破传统镀层性能的局限，进一步提升镀层的综合性能。例如，可以研究具有更高硬度和耐磨性的新型镀层材料，或者开发能够形成更加致密和均匀镀层的新型电镀技术。同时，还可以借鉴其他领域的先进技术和经验，如纳米技术、表面工程技术等，来丰富和完善镀层改性技术的手段和方法。通过这些创新性的研究和实践，有望为暖通空调给排水管道的表面处理带来更多突破性的进展和成果。

(二) 硬度与耐磨性能

1. 硬度提升机制

在针对Ni-P/TiN镀层与铜合金基体的硬度对比测试中，结果显示镀层的硬度显著提升，这一现象可通过镀层成分与结构的优化进行解释。具体而言，随着镀液中TiN质量浓度的增加，镀层硬度呈现上升趋势，此趋势归因于TiN纳米颗粒在镀层中的有效嵌入及其所引发的细晶强化效应。当TiN质量浓度达到10 g/L时，镀层硬度达到峰值633 HV0.1，此数据不仅表明了镀层在此浓度下具有最优的力学性能，还侧面反映了镀层内部结构的致密化与强度的显著提升。此硬度的增强机制，可从镀层中TiN颗粒的分布状态及其对镀层整体微观结构的

改良作用进行深入探讨。

2. 耐磨性能优化

耐磨性能试验揭示，Ni-P/TiN镀层的耐磨性随TiN浓度的增加而显著增强。在最佳浓度10 g/L TiN条件下，镀层的磨损率降低至 0.93×10^{-8} g/(r·N)，此极低磨损率凸显了镀层在摩擦环境下的出色耐久性。此耐磨性能的优化，可归因于TiN颗粒在镀层中的均匀分散及其所诱导的强化效应，该效应有效阻碍了摩擦过程中镀层表面的微观损伤扩展。此外，磨损机制的分析表明，镀层在摩擦过程中主要经历氧化磨损，即镀层表面形成了具有保护性的氧化膜，此膜层有效减缓了进一步的磨损，从而延长了镀层的使用寿命。

3. 镀层成分与结构影响

Ni-P/TiN镀层的硬度与耐磨性能的提升，与镀层成分及结构的精细调控密切相关。镀液中TiN质量浓度的变化，直接影响了镀层中TiN颗粒的含量与分布状态，进而改变了镀层的微观结构。高浓度的TiN颗粒不仅作为硬质相增强了镀层的整体强度，还通过细晶强化机制提升了镀层的硬度。同时，镀层中TiN颗粒的均匀分散，有效阻碍了摩擦过程中裂纹的萌生与扩展，从而显著提升了镀层的耐磨性能。因此，镀层成分与结构的精准设计，是实现其力学性能优化的关键。

4. 摩擦过程中的氧化磨损机制

在Ni-P/TiN镀层的耐磨性能试验中，观察到的主要磨损机制为氧化磨损。这一现象表明，在摩擦过程中，镀层表面能够迅速形成一层具有保护性的氧化膜。此氧化膜的形成，不仅减缓了镀层与对磨材料之间的直接接触，还有效阻碍了摩擦热与机械应力对镀层表面的进一步损伤。因此，氧化磨损机制在镀层耐磨性能的提升中发挥了重要作用。为了深入理解这一机制，需对镀层在摩擦过程中的氧化行为及其对镀层表面状态的影响进行深入探讨。

四、讨论

(一) 镀层形成机制

Ni-P/TiN镀层的形成机制，根植于化学镀过程中Ni、P元素与TiN纳米颗粒的共沉积现象。具体而言，在镀液环境中， Ni^{2+} 离子经历还原反应，转化为金属Ni并沉积于铜合金给排水管道的表面。与此同时，P元素以非晶态的形式融入Ni基质之中，与Ni共同构成Ni-P合金镀层。而TiN纳米颗粒，则通过吸附、共沉积等物理化学作用，被巧妙地嵌入到镀层结构中，进而形成具有复合结构的镀层。这一独特的结构，不仅显著提升了镀层的硬度，还极大地增强了其耐磨性能，为Ni-P/TiN镀层在实际应用中展现出优异的性能奠定了坚实的基础。

(二) 镀层性能优化策略

1. 精细调控镀液与工艺

为进一步优化Ni-P/TiN镀层的性能，首要策略在于

精细调控镀液组分及工艺参数。具体而言，需对镀液中TiN的浓度进行精确控制，通过系统的实验研究，确定其最佳浓度范围，以确保镀层获得理想的微观结构和力学性能。同时，镀液的温度和pH值等关键工艺参数也需被严格控制，以维持镀液的稳定性和镀层沉积的均匀性。

2. 引入添加剂与辅助工艺

除精细调控镀液与工艺外，引入其他添加剂或辅助工艺也是优化Ni-P/TiN镀层性能的有效途径。例如，可以在镀液中添加适量的表面活性剂，以改善镀层的湿润性和分散性，进而提升镀层的均匀性和附着力。此外，超声波辅助镀覆等先进工艺的应用，也能够对镀层沉积过程中发挥积极作用，促进镀层中各组分的均匀分布和致密化。

3. 开发新型复合镀层材料

在镀层性能优化的探索中，开发新型复合镀层材料是一个具有广阔前景的方向。具体而言，可以通过结合其他纳米颗粒或功能材料，赋予Ni-P/TiN镀层更多优异性能。例如，可以研究将具有特殊功能的纳米颗粒嵌入镀层中，以提升镀层的耐腐蚀性、导电性或磁学性能。同时，还可以探索将不同材料进行复合镀覆的新工艺，以实现镀层性能的多元化和定制化。

结论

本研究通过化学镀法在暖通空调给排水管道表面成功制备了Ni-P/TiN复合镀层，并系统探讨了镀液中TiN质量浓度对镀层物相组成、形貌特征、硬度及耐磨性能的影响。结果表明，适当添加TiN可显著提升镀层的硬度和耐磨性；在最佳浓度下（10 g/L TiN），镀层展现出优异的综合性能。本研究为暖通空调给排水管道的表面改性提供了新思路与技术支持，对于提升系统效能与延长管道使用寿命具有重要意义。

参考文献

- [1] 于彬, 姜方, 赵虎, 郭保善, 赵志丰. 铜合金连续挤压模具疲劳裂纹的失效分析[J]. 热加工工艺, 2022 (13).
- [2] 王猛, 王舜, 冯小亮, 郭策安. 基于动态再结晶软化机制的H90黄铜高速摩擦磨损数值模拟[J]. 塑性工程学报, 2021 (09).
- [3] 黄嘉乐, 陈德馨, 王启伟, 王文宇, 张保国, 朱胜, 李卫. 活塞表面Ni-P-SiC复合镀层的电沉积及性能表征[J]. 电镀与涂饰, 2021 (09).
- [4] 杜涌涛, 王杰杰, 杨苗, 王宏. ZrO₂颗粒浓度对钎铁硼Ni-P/ZrO₂复合镀层耐蚀性的影响[J]. 电镀与精饰, 2021 (05).

作者简介: 曹锐(出生1989年10月), 男, 汉族, 河北省衡水市人, 本科, 中级, 工程师, 研究方向: 给排水。