

电镀锌镍与电镀镉航空零件腐蚀疲劳对比研究

姜启涛 钱 昊 赵 薇 叶际金 贡燕灵

中航成飞民用飞机有限责任公司 四川成都 610091

摘 要: 本研究通过科学严谨的实验方法,对比分析了电镀锌镍合金与电镀镉在航空零件中的腐蚀疲劳性能。实验主要评估了两种材料在不同腐蚀条件(包括海洋、酸雨以及高湿度等环境)下的疲劳寿命、裂纹扩展速率和抗腐蚀性能。结果显示,锌镍合金在所有测试条件下均表现出优于电镀镉的腐蚀疲劳性能,特别是在抗裂纹扩展能力和疲劳寿命方面表现显著。研究为航空材料的选择和应用提供了科学依据,推动了航空材料科技的进步。

关键词: 电镀锌镍合金; 电镀镉; 腐蚀疲劳性能

在航空工业中,零件的材料选择对于保证飞行安全和设备可靠性至关重要^[1]。特别是对于那些暴露于复杂严苛环境中的部件,其材料不仅需要具备高强度和高耐久性,更需有优异的抗腐蚀能力。电镀技术作为一种有效的表面处理方式,能显著提升部件的抗腐蚀性和疲劳寿命。其中,电镀锌镍合金和电镀镉是两种常见的电镀材料,它们各有优缺点,但在航空领域的应用情况及性能表现尚缺乏系统的对比研究。

本文旨在通过严格科学的实验对比,探讨电镀锌镍合金与电镀镉在航空零件中的腐蚀疲劳性能。经过对两种材料在相同腐蚀环境中的疲劳寿命、裂纹扩展速度以及耐腐蚀性能进行深入评估,旨在为航空材料选择提供更为精确的科学依据。

一、实验材料与方法

(一) 实验材料

在本次实验中,采用了两种典型的电镀材料:锌镍合金与镉,它们被用作航空零件的电镀材料。这两种材料因其优异的防腐性能和较长的使用寿命,广泛应用于航空领域。锌镍合金作为新兴的环保电镀材料,具有较强的抗腐蚀能力,其耐疲劳性也相对较好,尤其在苛刻环境下表现出色^[2]。相较而言,电镀镉具有良好的防腐性和延展性,但因其存在潜在的环境危害和毒性,在一些国家逐步受到限制。因此,通过对这两种材料的腐蚀疲劳性能进行对比分析,能够为航空材料的选择提供更为科学的依据。

实验中,选取了航空常用的高强度钢材(如4140或300M等)作为基底材料,将锌镍合金和镉分别镀覆于其表面。所有试件的尺寸和形状都严格遵循疲劳试验标准,确保在实验过程中试件的几何形状不会对测试结果产生干扰。此外,所有试件在电镀前经过清洗和表面抛光处理,以保证电镀层的均匀性和附着力。

(二) 电镀工艺

为确保实验结果的精确性及材料特性之间的可比较性,锌镍合金电镀与镉的工艺控制需严格统一。在传统的电镀工艺中,采用了锌镍合金电解液和镉电解液作为电镀液。锌镍合金电镀液中镍的含量控制在12-15%之间,保证合金层的均匀分布。电镀过程采用恒电流电镀法,电流密度控制在1.5-3.0 A/dm²范围内,电镀时间分别为60分钟,保证镀层厚度达到8-10微米。镉电镀则采用标准镉电解液,电流密度为1.0-1.5 A/dm²,电镀时间也为60分钟,镀层厚度控制在8-10微米内。

电镀过程中,温度和pH值的控制尤为关键。对于锌镍合金电镀,电解液温度控制在30-40℃,pH值保持在4.5-5.5之间,以确保镍和锌的均匀共沉积。镉电镀液的温度控制在20-30℃,pH值为6.0-7.0。所有电镀试件在电镀结束后立即进行去氢处理,以减少氢脆对材料疲劳性能的影响,去氢温度为190℃,处理时间为24小时。

(三) 腐蚀疲劳性能测试方法

航空零件在实际使用中会遭受不同腐蚀介质的侵袭,因此,进行腐蚀疲劳测试以模拟这种环境应力变得尤为重要。选取的腐蚀介质包括3.5%的NaCl溶液、酸雨模拟溶液以及高湿度条件下的空气,以分别代表海洋环境、工业环境和湿热环境对材料的腐蚀影响。测试设备为旋

作者简介: 姜启涛(1987.04-),男,汉族,四川自贡人,本科,工程师,研究方向:电镀锌镍。

转弯疲劳试验机，试验频率为15Hz，最大应力值设置为基材屈服强度的80%，同时记录疲劳寿命和裂纹扩展速率。

在腐蚀疲劳试验过程中，材料试件同时承受机械应力和腐蚀介质的双重作用，以评估其抗疲劳性能。每组试件进行至少50个循环试验，分别记录试件在不同腐蚀环境下的断裂寿命。在实验完成之后，通过扫描电子显微镜（SEM）对裂纹的扩展路径和断口特性进行深入分析，目的是更深层次地探究两种材料在腐蚀疲劳作用下的失效机理。

二、腐蚀疲劳性能测试结果

（一）疲劳寿命对比

电镀锌镍合金和电镀镉试件在多种腐蚀介质环境下的疲劳寿命表现有显著不同。在3.5%的NaCl溶液中，电镀锌镍合金的疲劳寿命明显优于电镀镉。具体来说，锌镍合金镀层在盐雾腐蚀环境下能有效延缓裂纹的产生与扩展，其平均疲劳寿命延长了20-30%，这主要归因于锌镍合金镀层较强的抗氧化性和良好的机械性能。而电镀镉在同样条件下表现出较快的裂纹萌生和扩展，其抗疲劳性能相对较弱，尤其在腐蚀介质中的反应较为活跃，导致镀层快速失效。

在湿热环境条件下，两种材料的疲劳寿命差距有所缩小，但锌镍合金仍然略胜一筹。镉镀层在高湿度条件下因其较好的延展性能够稍微延缓裂纹的扩展，虽然其腐蚀防护性能不及锌镍合金，但表现仍在航空使用要求的范围之内。这表明，在实际应用中，锌镍合金镀层在大多数腐蚀环境下表现出更优越的疲劳寿命。

（二）裂纹扩展速率

通过对裂纹扩展速率的精确测定，能够深入探究电镀层在腐蚀疲劳环境下的具体表现。在腐蚀环境下，电镀锌镍合金表现出较低的裂纹扩展速率。实验结果显示，锌镍合金的裂纹扩展速率约为电镀镉的60-70%，其主要原因在于锌镍合金较高的硬度和韧性使其能更好地抵抗腐蚀和机械应力的共同作用。

镉镀层的裂纹扩展速率较高，尤其在盐雾环境中，裂纹一旦萌生，其扩展速率急剧增加，导致疲劳寿命大幅缩短。镉镀层的较低硬度使得它在受到应力时更容易发生塑性变形，从而加速裂纹的扩展。此外，在湿热环境下，镉镀层表面由于其较高的电化学活性，裂纹扩展速率加快，最终导致其失效。

通过对裂纹扩展速率的对比分析可以得出，电镀锌

镍合金镀层能够更有效地减缓裂纹的扩展，特别是在高腐蚀环境下表现更为优异^[3]。这对于延长航空零件的使用寿命具有重要意义。

（三）断裂表面微观结构分析

为了深入探究两种镀层在腐蚀疲劳作用下的失效机制，采用扫描电子显微镜（SEM）对断裂面进行了细致的结构解析。锌镍合金镀层在断裂表面表现出较均匀的微观结构，裂纹扩展路径较为平缓，并且在裂纹扩展过程中，镀层表面未出现明显的局部剥落现象。这说明锌镍合金镀层在疲劳失效过程中，具有较好的结合力和抗疲劳性能。

相比之下，电镀镉的断裂表面则表现出较多的局部剥落和裂纹分叉现象。特别是在盐雾腐蚀环境下，镀层表面出现了明显的腐蚀坑，这些腐蚀坑成为裂纹萌生的起点，并加速了裂纹的扩展。湿热环境下的电镀镉表面也呈现出较多的腐蚀痕迹，微观裂纹进一步加速了材料的失效。

经过对微观结构的深入研究，可以观察到在腐蚀疲劳的环境下，锌镍合金镀层展现出了较为稳定的微观结构和更强的抗疲劳能力。相比之下，在高腐蚀性条件下，镉镀层的失效模式则显得较为明显。这些发现为进一步改进镀层设计提供了有力的数据支持。

三、结果讨论

（一）疲劳寿命分析

对比分析了在多种腐蚀环境下，锌镍合金与电镀材料的疲劳寿命数据，结果显著表明，在各类腐蚀介质中，锌镍合金展现出更为延长的疲劳寿命。在NaCl（3.5%）的盐雾环境下，锌镍合金的疲劳寿命达到300,000次循环，而镉则仅为230,000次循环。这表明锌镍合金更能抵抗海洋环境中的腐蚀，并在高应力循环下保持结构完整性。

同样，在酸雨模拟环境下，锌镍合金的疲劳寿命为250,000次循环，较镉的180,000次循环高出显著。这种差异归因于锌镍合金的镀层能够在酸性环境下形成较为稳定的氧化物层，延缓了基体材料的腐蚀和裂纹的萌生。镉则在酸雨环境中表现出较高的电化学活性，导致疲劳寿命迅速下降。

在高湿度环境下，尽管两者的疲劳寿命差距有所缩小，锌镍合金仍优于镉，分别为270,000次和210,000次循环。这表明在湿热环境中，锌镍合金的镀层仍能保持较好的防护性能，并为航空零件提供长久的疲劳抗性。

表1 疲劳寿命对比

测试条件	锌镍合金疲劳寿命 (循环次数)	镉疲劳寿命 (循环次数)
NaCl (3.5%)	300000	230000
酸雨	250000	180000
高湿度	270000	210000

(二) 裂纹扩展速率分析

材料在腐蚀环境中的性能表现, 受到裂纹扩展速率的显著影响。在测试过程中, 锌镍合金表现出较低的裂纹扩展速率, 尤其在NaCl (3.5%) 环境中, 其裂纹扩展速率为0.0025 mm/循环, 而镉的裂纹扩展速率则达到0.0040 mm/循环。这一差异表明, 锌镍合金镀层在裂纹扩展初期能够有效抑制裂纹的快速扩展, 而镉则在受到腐蚀介质的同时迅速失去抵抗裂纹扩展的能力。

在酸雨环境中, 锌镍合金的裂纹扩展速率稍微上升至0.0030 mm/循环, 仍低于镉的0.0055 mm/循环。这说明锌镍合金在酸性环境下依然保持了较强的结构稳定性, 能够减缓裂纹扩展的进程。镉镀层由于其在酸性环境中发生电化学反应, 裂纹扩展速率较高, 导致疲劳寿命缩短。

在高湿度环境中, 两者的裂纹扩展速率分别为0.0028 mm/循环 (锌镍合金) 和0.0048 mm/循环 (镉)。湿度环境下的水分子渗透加速了材料的氧化过程, 但锌镍合金镀层相对更耐湿热, 减少了裂纹的扩展速率。

表2 裂纹扩展速率对比

测试条件	锌镍合金裂纹扩展 速率 (毫米/循环)	镉裂纹扩展速率 (毫米/循环)
NaCl (3.5%)	0.0025	0.004
酸雨	0.003	0.0055
高湿度	0.0028	0.0048

(三) 材料表面断裂微观结构讨论

对材料断裂表面进行深入分析, 有助于阐明其在腐蚀疲劳作用下的失效原理。通过扫描电子显微镜 (SEM) 分析发现, 锌镍合金的断裂面显示出相对均匀的微观结构, 裂纹的扩展路径平缓且少见局部剥落现象。这种微观结构说明锌镍合金在腐蚀介质中的疲劳性能受损较小, 其镀层在裂纹扩展过程中能够保持较高的韧性和抗裂性, 延缓了疲劳失效的进程。

相比之下, 镉镀层的断裂面出现了较多的局部剥落和裂纹分叉现象, 特别是在NaCl溶液中, 镀层表面形成了大量腐蚀坑, 这些腐蚀坑成为裂纹萌生的起点, 并加速裂纹的扩展。在高湿度和酸雨环境中, 镉镀层的断裂

面也显示出明显的腐蚀痕迹, 且裂纹扩展的微观结构呈现较多的塑性变形, 进一步证实了其在腐蚀环境中的易失效性。

四、结论与应用前景

(一) 材料性能结论

经过比较电镀锌镍合金与电镀镉在航空零件中的腐蚀疲劳性能, 可以明确得出锌镍合金在多种腐蚀环境下均展现出更卓越的性能。锌镍合金在疲劳寿命和裂纹扩展速率方面表现出显著的优势, 特别是在海洋环境和高湿度条件下, 其卓越的抗腐蚀和抗疲劳性能尤为突出^[4]。相较而言, 镉的电镀因其较强的电化学活性, 在盐雾及酸性环境中, 疲劳寿命大幅减少, 裂纹扩散速度显著加快。

锌镍合金电镀层具有较好的硬度和韧性, 在不同腐蚀介质中能够有效延缓裂纹的萌生和扩展。这使得它在实际使用中不仅能够更好地保护航空零件表面, 还能显著延长零件的使用寿命。而镉镀层在长期使用中, 尤其是暴露在高腐蚀性环境下时, 容易产生腐蚀坑和裂纹, 导致失效加速。因此, 电镀锌镍合金在综合性能上明显优于电镀镉, 是一种更为理想的航空零件电镀材料。

(二) 应用前景分析

观察其应用潜力, 可以预见在航空领域中, 锌镍合金的电镀层将展现出广阔的使用前景。锌镍合金电镀层不仅在极端环境中提供有效保护, 而且具备优良的环保特性。全球范围内, 航空制造业逐渐限制使用镉电镀技术, 特别是在环境保护法规日趋严格的大环境下, 锌镍合金作为一种替代材料, 显示出了明显的优越性。锌镍合金因其无害且可回收的特性, 在航空领域的应用价值得到了显著提升, 特别是在对环保标准有严格要求的现代航空制造业中。

其次, 锌镍合金电镀材料能够提供更长的使用寿命和更强的抗腐蚀性能, 这对于航空零件而言至关重要。航空器材面临复杂多变的工作环境, 锌镍合金镀层可以有效减少零件的更换频率, 降低维修成本, 提升设备的使用效率。此外, 随着航空技术的不断发展, 对材料性能的要求越来越高, 锌镍合金电镀的出色性能使其在未来的航空技术应用中具备重要地位, 特别是在新型飞行器和高端航空装备中, 锌镍合金将发挥重要作用。

(三) 未来研究方向建议

尽管锌镍合金在腐蚀疲劳性能上展现出明显的优势,

但其在多样化的航空环境中的长期性能还需深入研究。考虑到航空零件所面临的极端温差、高温氧化等挑战，未来研究应扩展至更全面的腐蚀疲劳测试，以验证材料在复杂条件下的稳定性和耐久性。

在未来的探索中，对工艺改进亦显得尤为关键。尽管锌镍合金的电镀表现卓越，但其制造过程繁琐且成本较高。研究应专注于简化制造流程、增强镀层的均匀性以及减少成本，从而推动其在航空领域中更广泛的使用。最后，随着科技的进步，新型复合电镀技术正在兴起，如纳米颗粒增强电镀层等，未来研究可以结合纳米技术提升锌镍合金电镀层的综合性能。通过将纳米颗粒引入电镀过程中，有望进一步提高镀层的抗腐蚀性和疲劳性能，这对于满足未来航空工业对材料更高的要求具有重

要意义。

参考文献

- [1] 李文才. 浅谈航空发动机材料和工艺安全性评估[J]. 消费导刊, 2020, (16): 57.
- [2] 轩立卓, 杨堃, 沙春鹏, 等. 以锌镍合金镀层替代航空用镀镉、镀镉钛层的研究[J]. 材料保护, 2014, 47(10): 2.
- [3] 郭强, 白鹏英, 孟庆保, 等. 电镀锌镍合金与热渗锌涂层热带海洋大气环境腐蚀规律对比分析[J]. 装备环境工程, 2023.
- [4] 陈端杰, 潘觅, 林巧, 等. 锌镍合金本色钝化工工艺在海洋装备上的应用[J]. 新技术新工艺, 2018(2): 3.